

УДК 622.7:669.85/86

ИННОВАЦИОННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПЛЕКСНЫХ РУД СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА

© 2023 г. В. А. Чантурия^{а, *}, А. И. Николаев^{б, **}, Т. Н. Александрова^{с, ***}

^аИПКОН РАН им. Н.В. Мельникова, Москва, Россия

^бИнститут химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева
Кольского научного центра РАН, Академгородок, д. 26а, Апатиты, Россия

^сСанкт-Петербургский горный университет,
Васильевский остров, 21 линия, д. 2, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vchan@mail.ru

**E-mail: a.nikolaev@ksc.ru

***E-mail: Aleksandrova_TN@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 23.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Показаны отечественные и мировые тенденции вовлечения в переработку руд редких и редкоземельных металлов (РЗМ). Показано, что главным направлением инновационной деятельности является разработка и применение современных прорывных технологий комплексной переработки минерального сырья с получением высококачественных продуктов при минимизации экологического ущерба. Систематизированы основные месторождения редких и РЗМ с позиций содержания основных компонентов, минералов-концентраторов и основных методов обогащения. Приведены основные принципиальные технологические схемы переработки некоторых месторождений РМ и РЗМ России (Ловозерского, Томторского, Африкандского месторождений). Рассмотрены варианты вовлечения в переработку техногенного и забалансового сырья с целью извлечения стратегических металлов. Обосновано, что в настоящее время в России активно разрабатываются инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных металлов из комплексных руд сложного вещественного состава.

Ключевые слова: редкие металлы, редкоземельные элементы, обогащение, гидрометаллургия, селективное разделение, техногенное сырье

DOI: 10.31857/S0016777023050040, **EDN:** WDADJW

ВВЕДЕНИЕ

Согласно стратегии развития минерально-сырьевой базы (МСБ) РФ (Распоряжение от 22 декабря 2018 г. №2914-р.), эффективное развитие высокотехнологичных производств, включая атомную промышленность, радиоэлектронику, самолетостроение, космическую отрасль, “зеленую” энергетику, возможно только при достаточно полном обеспечении промышленности такими стратегическими металлами, как: Re, Be, Nb, Ta, Ti, In, Zr, Hf, Li, РЗЭ иттриевой группы, Cd, Ga и др. Для успешного развития и дальнейшей модернизации отечественной промышленности необходимо обеспечение экономической составляющей РФ стратегическими металлами (Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2022 г. №2473-р.). Инновационная деятельность — одна из основных тенденций развития минерально-

сырьевой базы, главным направлением которой является разработка и применение современных прорывных технологий комплексной переработки минерального сырья с получением высококачественных продуктов при минимизации экологического ущерба (Бортников и др., 2022; Litvinenko, Sergeev, 2019; Литвиненко и др., 2023).

Месторождений, характеризующихся высоким содержанием редких металлов (РМ) и редкоземельных элементов (РЗЭ), в совокупности с экономической целесообразностью их добычи и переработки, достаточно мало, в связи с чем актуальны исследования, связанные с изучением распределения РЗЭ для различных типов месторождений и сырья (Бортников и др., 2007, 2008; Горячев и др., 2008).

Легкие									Тяжелые								
21 Sc Scandium 44.956	39 Y Yttrium 88.906	57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	
Классификация редкоземельных элементов																	
57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	39 Y Yttrium 88.906	21 Sc Scandium 44.956	
Цериевая группа				Иттриевая группа													

Фиг. 1. Классификации редкоземельных элементов.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МСБ РМ И РЗМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ВОВЛЕЧЕНИЯ В ПЕРЕРАБОТКУ

Редкоземельные элементы представляют собой группу из 17 элементов, в которую включены 15 элементов лантаноидов (порядковые номера 57–71 ряд La–Lu), а также скандий и иттрий, имеющие порядковые номера 21 и 39 соответственно. Данная группа элементов характеризуется схожими химическими и физическими свойствами и достаточно близкими значениями молекулярных масс, что предопределяет сложность их селективного извлечения. Одной из наиболее распространенных классификаций РЗЭ считается разделение их по конфигурации электронов на цериевую и иттриевую группы. Существует также классификация редкоземельных элементов по атомному весу на легкие и тяжелые (фиг. 1).

Для месторождений РЗЭ характерна комплексность, помимо непосредственно редкоземельных элементов в них содержатся Ta, Nb, P, Fe, Al и др. Основными минералами-концентраторами являются монацит, бастнезит, ксенотим, паризит, лопарит, эвдиалит и др., однако всего известно порядка 250 минералов, содержащих редкоземельные элементы.

Лопарит является минералом подкласса сложных оксидов, содержит такие элементы, как титан, тантал и ниобий, из группы редкоземельных элементов в нем представлены в основном элементы цериевой группы лантаноидов. Редкоземельные элементы подгруппы иттриевых и некоторое количество цериевых содержится в апатитовом сырье. Минерал эвдиалит (альмандиновый шпат) характеризуется значительным содержанием редкоземельных элементов РЗЭ иттриевой группы.

Основными месторождениями редкоземельных элементов РЗЭ в России являются: Ловозеровское, Томторское, Умбозерское, Чингисуайское, Аллуайвайское, Белозиминское, Селигдарское и др., однако количество месторождений,

вовлеченных в эксплуатацию, значительно меньше. Извлечение редкоземельных элементов из комплексного сырья состоит преимущественно из основных этапов: обогащение, химическая переработка, разделение, рафинирование и очистка, которым предшествует непосредственно разведка месторождений и добыча сырья. В табл. 1 представлены основные действующие и проектируемые предприятия переработки месторождений РЗЭ. Структура редкоземельной промышленности РФ приведена на фиг. 2.

Разработка экологически безопасных технологий для извлечения редких и редкоземельных элементов из сырья различного генезиса предопределяет повышение экологичности на всех стадиях переработки:

- на стадии разведки и добычи сырья необходима оценка комплексности месторождения и последующее вовлечение в переработку отходов производства для снижения экологической нагрузки (например, фосфогипса или золошлаковых отходов) (Сучков, Литвинова, 2022; Литвинова, Олейник, 2021);

- на стадии рудоподготовительных процессов актуальным направлением является внедрение селективной дезинтеграции (Aleksandrova et al., 2018) с применением современного оборудования, например пресс-валков высокого давления, дробилок ударного действия, а также применение крупнокусовой рентгенорадиометрической и фотометрической сепарации для получения отвальных хвостов с последующим их использованием в качестве закладочного материала в руднике, обеспечивающих снижения энерго- и ресурсозатрат;

- на стадии обогащения сырья необходимо развитие и применение экологичных методов, в том числе электрических, магнитных и гравитационных, применения на стадиях рудоподготовки, синтез новых реагентов для направленного регулирования поверхностных свойств минералов в процессах флотации и флотогравитации, а

Таблица 1. Основные месторождения редких и редкоземельных элементов

Месторождение		Содержание РЗМ, %	Страна	Компания	Минералы РЗМ	Мощность по руде, тыс. т	Методы обогащения	Объем товарной продукции, тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды	Содержание РЗМ, % тяжелых
	(запасы РЗМ в пересчете на оксиды, млн т)								
Действующие предприятия									
Bayan Obo (36)		5.7–6.2	Китай	Inner Mongolia Baotou Steel Rare-earth Group	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ), Монацит (55–60% оксидов РЗМ)	5000	Магнитная сепарация, флотация (гравитация)	50–70	2–3
Xunwu/Lognan (1.5)		0.1–0.3	Китай	China Minmetals Rare Earth; Ganzhou RE Group; Chinalco RE	Ионно–адсорбционные глины (10–20% оксидов РЗМ)	до 50000	Гидрометаллургические методы	20–45	до 90
Sichuan/Shandong (более 15.0)		6–10	Китай	Sichuan Jiangxi Copper Rare Earth, другие	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ)	до 1000	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	10–40	2–3
Mountain Pass (0.2–2.0)		6–10	США	Molycorp	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ)	до 675	Флотация	19.5–40	1.2
Mount Weld (0.3–1.5)		6–23	Австралия	Lynas	Монацит (55–60% оксидов РЗМ)	270	Флотация	22	3–4
Dong Pao (0.4)		7–10	Вьетнам	Vinacimin, Toyota, Sojitz	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ)	200 (до 720)	Магнитная сепарация, флотация	3 (до 7–10)	2–3
Ловозерское (лопаритовое сырье) (7.1)		1.2	Россия	Ловозерский ГОК	Лопарит (30–35% оксидов РЗМ)	до 450	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	2.7–6.5	1

Таблица 1. Окончание

Месторождение	Содержание РЗМ, %	Страна	Компания	Минералы РЗМ	Мощность по руде, тыс. т	Методы обогащения	Объем товарной продукции, тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды	Содержание тяжелых РЗМ, %
Проектируемые (перспективные) предприятия								
Nolans Bore (1.3)	3.1	Австралия	Alkane Resources	Монацит, алланит	1100	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	20	3—4
Dubbo (0.7)	1	Австралия		Бастнезит, эвдиалит, фергюссонит	1000	Гидрометаллургические методы	6	23
Bear Lodge (1.45)	3.3	США	Rare Element Resources	Бастнезит	360	Гидрометаллургические методы	10.4	3—4
Kirawa (0.1)	0.4—0.45	Канада	Matamec	Эвдиалит	1500	Магнитная сепарация	5	35
Norra Karr (0.3)	0.4—1.0	Швеция	Tasman Metals	Эвдиалит (2.5% оксидов РЗМ)	1500	Флотация, магнитная сепарация	6.8	50
Томторское (3.2)	10.59	Россия	Ростех	Монацит, ксенотим (55—60% оксидов РЗМ)	10 (200)	Гидрометаллургические методы	2.5 (10)	12
Капугинское (0.67)	0.2—1.3	Россия		Гагаринит, иттриофлюорит	600 (3000)	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	1.4 (5.7)	32
Чукотконское (0.49)	7.3	Россия			150	Гидрометаллургические методы	3.1	5—6

ХОЛДИНГИ/ материнские компании	НЕДРОПОЛЬЗОВАТЕЛИ	МЕСТОРОЖДЕНИЯ в т.ч. подготавливаемые*	РУДНИКИ*	ФАБРИКИ обогащительные*	Перерабатывающие ПРЕДПРИЯТИЯ*
	ООО “Ловозерский ГОК” (участки Карнасурт и Кедыквырпахк)	Ловозерское	Карнасурт	Карнасурт	ОАО “Соликамский магнийевый завод” ГК “РОСАТОМ”
ПАО “ФОСАГРО”	АО “Апатит”	Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр (подкарьерная часть)	Расвумчоррский	АНОФ-3	ПАО “ФосАгро” Череповец (опытно-промышленное производство)
		Юкспорское, Кукисвумчоррское	Кировский	АНОФ-2	
		Плато Расвумчорр (в контуре Центрального карьера), Ньоркпахское, Коашвинское	Восточный		
ПАО “АКРОН”	АО “СЗФК”	Олений ручей	ГОК “Олений ручей” (карьер + подземный рудник)		ПАО “Акрон” Великий Новгород (промплощадка)
	ЗАО “Партомчоррское”	Партомчоррское			
ООО “ТРИАРК МАЙНИНГ”	ООО “Восток Инжиниринг”	Томторское месторождение (участок Буранный)	Карьер	Обогащительная фабрика	ООО “Краснокаменский гидрометаллургический комбинат”
ПАО ЧЕЛЯБИНСКИЙ ТРУБОПРОКАТНЫЙ ЗАВОД (ПАО “ЧТПЗ”)	ЗАО “Техноинвест Альянс”	Зашихинское	Карьер	Обогащительная фабрика	Химико- металлургический завод в г. Краснокаменск
ГК “СКАЙГРАД”	Фосфогипс, Воскресенский район Московской области		Групповой концентрат РЗМ		АО “Воскресенские минеральные удобрения”
					Лаборатория Инновационных Технологий (ЛИТ)

Фиг. 2. Структура редкоземельной промышленности РФ.

также применение различных энергетических методов воздействия (Чантурия и др., 2019a; Chanturiya, Bunin, 2022), таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, СВЧ (Aleksandrova et al., 2020, 2023), плазменные, МЭМИ, что ввиду разработки промышленных электрохимических установок для кондиционирования пульпы, плазмотронов и линейных ускорителей предопределяет возможность внедрения принципиально новых экологически безопасных технологий на стадиях обогащения сырья (Чантурия, 2017);

○ на стадии химической переработки и сепарации элементов необходимо применение экологически безопасных экстракционных систем экстрагент–сорбент, что позволит повысить экологичность переработки за счет отсутствия токсичных и пожароопасных органических растворителей.

На стадии химической переработки сырья, содержащего РЗМ, существует два принципиальных способа разложения руд и концентратов: кислотный и щелочной способы, используемые для повышения концентрации РЗМ и удаления примесей. При кислотной обработке, как правило, используются неорганические кислоты, такие как серная, соляная и азотная. При щелочной обработке применяются едкий натр и кальцинированная сода.

В качестве реагентов экстрагентов наибольшее применение нашли:

- нейтральные фосфорорганические соединения (алкилфосфаты, среди которых наибольшее распространение получил трибутилфосфат), а также аналоги на основе смеси разветвленных спиртов с достаточно короткими радикалами;
- длиннорадикальные фосфорорганические кислоты;
- карбоновые кислоты и высшие изомерные кислоты;
- органические основания – третичные амины (ТОА-триоктиламин) и четвертичные аммониевые основания (ЧАО);
- для тяжелых элементов в качестве комплексона используется этилендиаминтетрауксусная кислота, а для легких – диэтилентриаминпентауксусная и нитрилотриуксусная кислоты.

Одним из широко применяемых методов в технологии близких по свойствам РМ является экстракционный. Несмотря на изученность метода, проводятся широкие исследования в России и за рубежом по оптимизации экстракционных процессов для конкретных схем и их комбинированию с другими методами. Подобное применение нашли также методы сорбции, особенно эффективные при малых концентрациях РМ, а также

Таблица 2. Запасы РЗМ и объемы их товарной добычи в мире

Страна	Запасы, категория	Запасы, млн. тонн ΣTR_2O_3	Доля в мировых запасах, %	Товарная добыча в 2022 г., тыс. тонн ΣTR_2O_3	Доля в мировой добыче, %
Китай	<i>Reserves</i>	44.0 ¹	35.5	140.0 ^{1*}	58.4
США	<i>Reserves</i>	1.4 ¹	1.1	38 ¹	15.8
Мьянма	—	н/д	н/д	30 ¹	12.5
Австралия	<i>Reserves</i>	4.1 ¹	3.3	14 ²	5.8
Мадагаскар	<i>Reserves</i>	н/д	н/д	8 ¹	3.3
Индия	<i>Reserves</i>	6.9 ¹	5.6	3 ¹	1.3
Россия	Запасы категорий А + В + C ₁ **	19.3 ³	15.6	2.7 ³	1.1
Прочие	<i>Reserves</i>	48.3 ¹	39.0	4	1.7
Мир	<i>Reserves</i>	124.0	100.0	239.7	100.0

* Производственная квота.

** Разрабатываемых и подготавливаемых к разработке месторождений 1 – U.S. Geological Survey, 2 – Lynas Rare Earths Ltd., 3 – ГБЗ РФ.

комплексные методы, сочетающие обогащительные, кристаллизационные (осадительные), экстракционные и сорбционные:

- целенаправленный дизайн молекул экстрагентов, позволяющий многократно повысить селективность выделения соединений редких металлов (РЗЭ, радионуклиды и др.), а также устойчивость экстрагентов в технологическом процессе (Цивадзе, 2020; Сафиулина и др., 2020; Иванова и др., 2019);

- бинарная экстракция смесью катионо- и анионообменного экстрагентов из растворов для разделения близких по свойствам металлов, например, цветных, Ti, Nb и Ta (Белова и др., 2010);

- вытеснение примесных элементов из экстрактов на стадии промывки и реэкстракции при получении чистых и высокочистых соединений РЗЭ, Nb, Ta и др. (Мудрук и др., 2019; Николаев, Майоров, 2007; Кириченко и др., 2013);

- метод сорбционного выделения РЗМ непосредственно из минеральных концентратов и твердых продуктов переработки апатита, эвдиалита и др. сырья в среде разбавленных минеральных кислот;

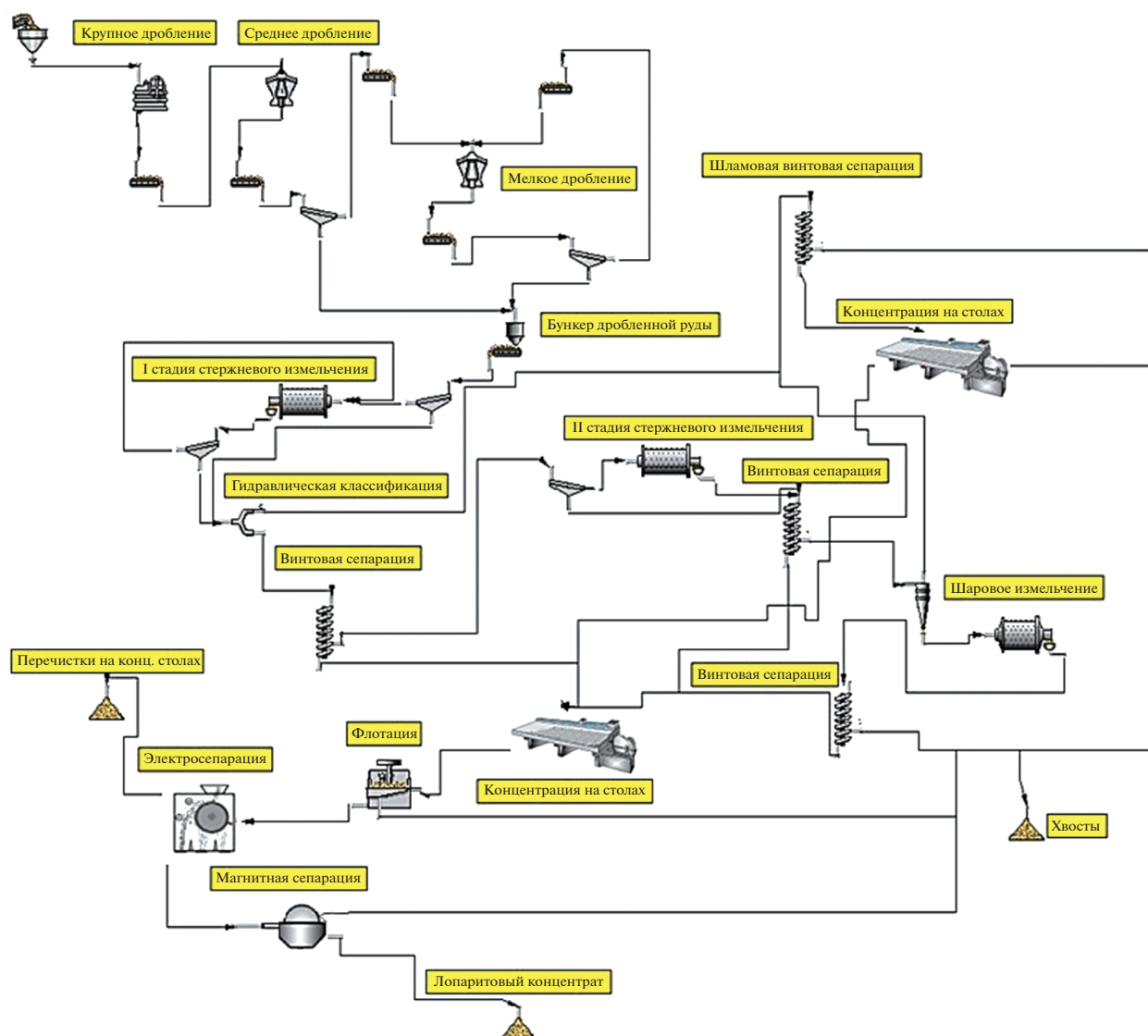
- сочетание обогащительных методов и химической очистки для повышения выхода и качества выделяемых соединений редких металлов, на примере выделения бадделеита (Лебедев и др., 2007);

- повышение эффективности разделения титана, ниобия и тантала из серноокислых растворов на стадии кристаллизации их аммонийных или безаммонийных сульфатных солей и азотнокислое разложение перовскитового концентрата в присутствии фторсодержащих реагентов (Герасимова и др., 2017).

ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ КОМПЛЕКСНЫХ РУД СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА

Россия обладает обширной сырьевой базой и месторождениями редких и редкоземельных металлов, которые в том числе относятся к стратегическим, однако переработка и добыча редкоземельного сырья ограничена. Крупнейшим разрабатываемым месторождением с получением редкоземельных концентратов является Ловозерское, располагающееся в Мурманской области, содержащее при этом преимущественно цериевую группу (лантаноиды). Перспективные для вовлечения в переработку месторождения РЗМ в России остаются на стадии проектов по причине отсутствия промышленных предприятий по переработке руд и продуктов обогащения, а также ввиду высокой конкуренции со стороны Китая. В табл. 2 представлена сводная информация по запасам РЗМ и объемам товарной продукции в мире.

Главной сложностью при переработке редкоземельного сырья является невозможность получения отдельных концентратов для каждого элемента ввиду сильной близости их технологических свойств и невозможности селективной экстракции. За 2020 для РФ отмечено увеличение добычи РЗМ по сравнению с предыдущим годом на 2.87%, что составляет 114.8 тыс. т ΣTR_2O_3 , значительная доля которых приходится на апатит-нефелиновые руды. Для лопаритового концентрата (получаемого только в России) отмечается снижение по уровню добычи на 7.8% до 8.8 тыс. т (Петров и др., 2021).



Фиг. 3. Обогатительный передел лопаритовых руд на Ловозерском ГОКе.

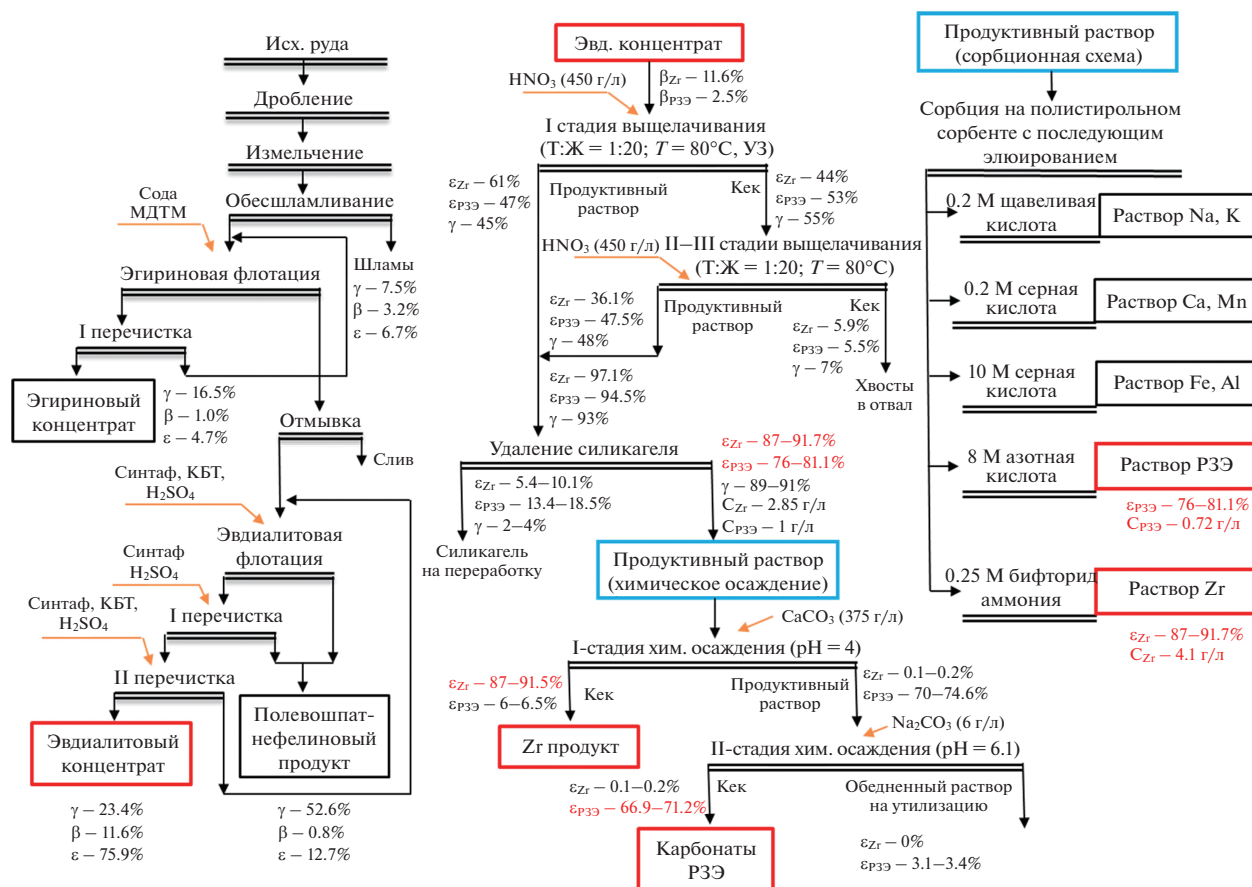
Концентраты, содержащие РЗМ, направляются на ОАО «Соликамский магниевый завод» ГК РОСАТОМ (г. Соликамск, Пермского края), основной продукцией которого являются титановая губка, оксиды и карбонаты РЗМ, а также оксиды Ta и Nb. К крупнейшим по запасам месторождениям России относятся Ловозерское, Томторское, Белозиминское, Чуктуковское и др. Возможность технологически эффективной и экономически целесообразной переработки руд Ловозерского месторождения с получением сверхчистого циркония и оксидов РЗЭ была обоснована в 1990 г. (Крюков и др., 2012; Чантурия, 2022).

Проблемам переработки руд Ловозерского месторождения посвящены работы (Чантурия и др., 2019б; Chanturia et al., 2017), направленные на переработку эвдиалитового концентрата, в том чис-

ле с применением энергетических воздействий. Принципиальная схема обогащения Ловозерских руд представлена развитой гравитационной схемой, основные операции которой реализованы с применением винтовых сепараторов, а перечистные операции с применением концентрационных столов. Электромагнитные и флотационные методы обогащения применяются для доводки черного концентрата (фиг. 3).

Кроме лопаритового концентрата, из руды Ловозерского месторождения можно получать эвдиалитовый концентрат. В ИПКОН РАН разработана технология получения эвдиалитового концентрата и его последующей селекции на основе комбинированных процессов (фиг. 4).

Томторское месторождение является одним из крупнейших в мире по запасам минералов-кон-



Фиг. 4. Принципиальная схема получения эвдиалитового концентрата и его селекции.

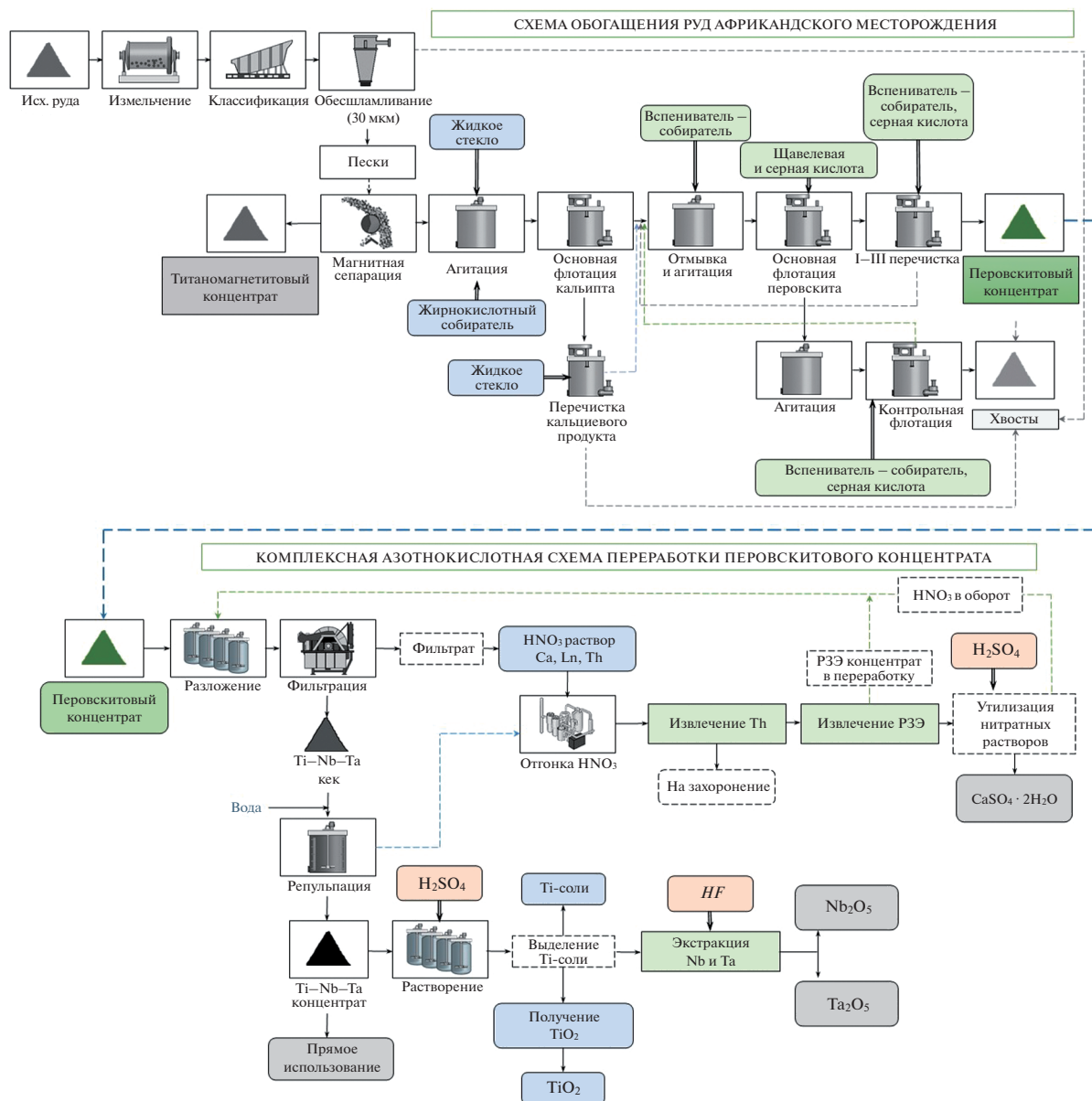
центратов редких и редкоземельных металлов, в том числе монацита, пирохлора, ксенотипа и др., а также источников таких элементов, как Nb, Y, Sc, La, Ce, Eu, Ti, Nd и Sm. Томторское месторождение является перспективным источником редких и редкоземельных металлов, в связи с чем возможная реализация комплексного проекта “Томтор–Краснокаменский комбинат” может обеспечить отечественные потребности в стратегических металлах. Конечным продуктом обогащения при этом будут являться пентаоксид ниобия и концентрат, представляющий собой карбонаты редкоземельных элементов, при дальнейшей переработке которых возможно получение ферро-ниобия и оксидов Ce и La, оксида NdPr, а также смешанного концентрата карбонатов средних и тяжелых РЗЭ (Пресс-релиз от 19 апреля 2021 г., Полиметалл).

По величине запасов Томторское месторождение сопоставимо с такими месторождениями, как Виттватерсранд в ЮАР, Сухой Лог, Норильская группа месторождений в России, по запасам РЗЭ опережая такие месторождения, как Маунтин-Пасс в США и Баюнь-Обо в Китае.

Особенности минералогического и элементного состава руд Томторского месторождения определяют необходимость применения гидрометаллургических технологий для их комплексной переработки (фиг. 5) (Ануфриева, Лихникевич, 2018; Ануфриева и др., 2011; Петрова и др., 1986). Возможным технологическим способом переработки данного типа сырья является ликвационная плавка концентратов с использованием добавок в окислительной среде (Делицын и др., 1987, 2015).

В работах (Елютин и др., 1995; Косынкин и др., 2105; Кузьмин и др., 2006) приведена технология автоклавно-щелочного вскрытия продуктов. После вскрытия проводится кислотное выщелачивание полученного кека с переходом в раствор РЗЭ, тогда как ниобий не переходит в жидкую фазу.

В работе (Кузьмин и др., 2006) показана возможность солянокислого вскрытия кека после автоклавного выщелачивания, при этом в жидкую фазу переходят РЗЭ, в том числе иттрий и скандий, с получением кека (концентрата), содержащего оксиды ниобия и фосфора. Данная технология дает возможность получения пентаоксида ниобия, оксида скандия, индивидуальных оксидов РЗЭ группы церия и коллективного кон-



Фиг. 6. Принципиальная технологическая схема переработки руд Африканского месторождения.

которые представляются эффективными и экологически безопасными. Авторами показана возможность селективной экстракции редкоземельных элементов иттриевой группы с отделением от цериевой с применением производных дифенилфосфорилподанов с дифенилэтилбензолом. С применением дифосфоновых кислот возможна селективная экстракция РЗЭ и попутных компонентов из азотнокислых растворов.

В качестве сорбентов для создания экологически безопасных технологий извлечения РЗЭ находят применение активированный уголь из рисовой шелухи, древесный уголь бамбуковый, хелатообразующие смолы и др. (Vieira et al., 2000).

Химические методы извлечения РЗМ характеризуются высокой эффективностью применения. Однако применение значительного количества химически токсичных и пожароопасных реагентов не относится к экологически безопасным методам (Suli et al., 2017; Opare et al., 2021)

Плазменная сепарация РЗЭ представляет собой нагрев сырья до высоких температур, приводящих к разрушению связей на уровне атомов (Gueroult et al., 2018). Извлекаемые элементы при этом восстанавливаются или осаждаются на поверхности. Основными преимуществами метода является отсутствие необходимости применения

химических веществ и высокая экологичность процесса.

Метод нанофильтрации РЗЭ (Kurniawan, Chan, 2006) применяется для осуществления селективной сепарации частиц от жидкой фазы за счет возникновения на стадии фильтрации, помимо диффузионного и конвективного механизмов, электростатических сил, ввиду наличия функциональных групп, что повышает эффективность фильтрации. Данная технология извлечения РЗЭ характеризуется высокой эффективностью, экологичностью, однако ее недостатком являются высокие экономические затраты.

Актуальным направлением исследований, нацеленных на повышение экологичности технологий извлечения РЗЭ, является метод биосорбции из разбавленных растворов. Ряд работ посвящен успешному применению биомассы *Sargassum* для экстракции Eu, Sm, Pr, Yb (Schiewer, 1996; Yang, 2000; Das, Devlina, 2013).

В работе (Zakhodyaeva et al., 2019) представлена экологически безопасная технология “зеленой” экстракции редкоземельных элементов из нитратных растворов.

Отходы электронной промышленности, отработанные источники тока представляют собой нетрадиционное сырье редких и редкоземельных элементов (Вошкин и др., 2023). Это делает актуальной разработку технологий замкнутого цикла с получением кондиционной продукции РМ, сочетающих принципы “зеленой” химии с гидрометаллургическими процессами переработки, что приводит к снижению экологической нагрузки за счет вовлечения в переработку отходов (Xu, 2021).

В работе (Gradov et al., 2019) предложено целенаправленное применение ультразвукового воздействия для интенсификации экстракционных технологий с применением экологичных экстрагентов.

Угольные отходы и золошлаки являются перспективными нетрадиционными источниками РЗЭ. В качестве экстрагента для извлечения редкоземельных металлов из данного типа сырья используется лимонная кислота. Экстракции способствует использование сверхкритического диоксида углерода в качестве растворителя. Лимонная кислота — это экологически чистый способ удерживать редкоземельные металлы в растворе.

Фосфогипс представляет собой побочный продукт переработки фосфатного рудного сырья кислотным методом. Преимуществом данного сырья как источника редкоземельных элементов является практически полное отсутствие в нем радиоактивного тория. Фосфогипс содержит 0.3–0.6% РЗЭ (на оксиды), примеси фторид- и фосфат-ионов, а также катионов железа, алюминия и титана. По предложенной в работе схеме

степень извлечения РЗЭ в раствор составляет $95 \pm 3\%$. При этом редкоземельные элементы находятся в форме карбонатных комплексов и могут быть отделены с применением экстрагентов. Разработанная схема позволяет повысить экологичность переработки фосфатного сырья за счет вовлечения в переработку отходов производства и получения новых концентратов редкоземельных элементов (Литвинова, Олейник, 2021).

В работе (Луцкий и др., 2013) показан способ извлечения церия и европия из нитратных сред с применением нафтенной кислоты. Рассмотрены возможности экстракции лантана, церия и самария олеиновой кислотой в инертном разбавителе. При этом установлено, что экстракционная способность снижается в ряду $\text{Eu} \rightarrow \text{Sm} \rightarrow \text{Nd} \rightarrow \text{Ce} \rightarrow \text{Yb} \rightarrow \text{Er} \rightarrow \text{Y} \rightarrow \text{Ho} \rightarrow \text{La}$. В представленной технологии показана возможность экстракционного разделения РЗЭ по линии празеодим — церий с применением трибутилфосфата с получением лантан-цериевого концентрата.

Таким образом, в настоящее время в России активно разрабатываются инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных металлов из комплексных руд сложного вещественного состава (Захаров, 2015; Кременецкий, Калиш, 2014) и техногенных продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Россия обладает мощной сырьевой базой, потенциально пригодной для производства требуемого объема редкометаллической продукции. Однако значительная часть сырья относится к нетрадиционным видам, представленным комплексными рудами сложного состава с низким содержанием РМ. Схемы переработки многих видов такого сырья с получением продукции РМ отработаны, ряд технологий соответствует требованиям к инновационным экологически безопасным процессам. Трудности реализации разработанных технологий связаны, в основном, со сложным вещественным составом сырья, низким содержанием ценных компонентов, сложными горно-геологическими условиями залегания ряда месторождений, а в отдельных случаях отсутствием необходимой инфраструктуры, что обуславливает высокую стоимость готовой продукции и, как следствие, ее неконкурентоспособность на мировом рынке. Поэтому практическое использование сырья РМ отечественной промышленностью в настоящее время находится на низком уровне.

Частный сектор без поддержки государства и научного сообщества не способен кардинально изменить ситуацию с обеспечением страны РМ продукцией и готовыми изделиями, содержащими РМ. Актуальным решением данной проблемы

представляется создание единой дорожной карты “Редкие металлы России”. При разработке технологий добычи, обогащения и переработки сырья с получением необходимого качества концентратов необходимо обосновывать также экономическую эффективность и целесообразность применения технологий, а также проводить оценку их экологической безопасности. Широкий выбор сырья, учет климатических условий расположения месторождений и производств по переработке сырья, наличия требуемой инфраструктуры в сочетании с экономическими и экологическими показателями позволят выбрать наилучшие варианты для производства РМ и продукции на их основе, обеспечить полное импортозамещение стратегических материалов РМ, необходимых для сохранения высокой обороноспособности страны и ускорения ее экономического развития. Для достижения технологического суверенитета России необходимо обеспечение государственными заказами горно-металлургических компаний, производящих РМ и РЗ продукцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Т.Н., Ромашев А.О., Янсон У.М.* Исследование возможности извлечения редких элементов из черносланцевых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 124–128.
- Александрова Т.Н., Николаева Н.В., Ромашев А.О., Янсон У.М.* Патент РФ № 2576715 «Способ повышения извлечения платиноидов из нетрадиционного платиносодержащего сырья», опублик. 10.03.2016., бюл. № 7.
- Александрова Т.Н., Ромашев А.О., Павлова У.М.* Патент РФ № 6121622 «Способ флотационного извлечения редких металлов», опублик. 02.03.2017., бюл. № 7.
- Александрова Т.Н., Кусков В.Б., Корчевенков С.А.* Патент РФ № 2685608 «Способ переработки техногенного углеродсодержащего сырья», опублик. 22.04.2019, бюл. № 12.
- Ануфриева С.И., Броницкая Е.С., Литвинцев Э.Г., Ожогина Е.Г., Петрова Н.В., Рогожин А.А., Соколова В.Н.* Опыт и перспективы применения современных технологий переработки бедных трудно-обогатимых руд // Разведка и охрана недр. 2011. № 5. С. 70–74.
- Ануфриева С.И., Лихниченко Е.Г.* Технологические проблемы комплексной переработки руд Томторского рудного поля // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2–1. С. 115–117.
- Белова В.В., Вошкин А.А., Егорова Н.С., Холькин А.И.* Экстракция редкоземельных металлов из нитратных растворов бинарным экстрагентом на основе Суапех 272 // Журнал неорганической химии. 2010. Т. 55. № 4. С. 679–683.
- Бортников Н.С., Гореликова Н.В., Коростелев П.Г.* Поведение редкоземельных элементов в оловоносных гидротермально-магматических системах (на примере месторождений Дальнего Востока) // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 6. С. 788–792.
- Бортников Н.С., Гореликова Н.В., Коростелев П.Г., Гоневчук В.Г.* Редкоземельные элементы в турмалине и хлорите оловоносных ассоциаций: факторы, контролирующие фракционирование РЗЭ в гидротермальных системах // Геология рудн. месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 507–525.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К. Ю.* Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности и энергетики России // Геология рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.
- Вошкин А.А., Заходяева Ю.А., Зиновьева И.В., Кожеевникова А.В., Милевский Н.А., Токарь Е.С.* Экстракционные технологии рециклинга отработанных источников тока / Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 1. С. 36–39. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.1.006>
- Герасимова Л.Г., Николаев А.И., Петров В.Б., Бычкова Ю.Г.* Азотнокислотное разложение перовскита в присутствии фторсодержащего реагента // Цветные металлы. 2017. № 5. С. 50–53.
- Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю.* Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология рудн. месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444.
- Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Лебедева Г.Г.* Перспективы пирохимической переработки фосфатно-редкометального сырья // Редкие элементы в нетрадиционном сырье и перспективы их попутного производства. М.: ИМГРЭ, 1987. С. 18–31.
- Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Толстов А.В., Магазина Л.А., Самонов А.Е., Сударева С.В.* Технологические проблемы Томтора и их решение // Редкие земли. 2015. № 2(5). С. 164–179.
- Елютин А.В., Чистов Л.Б., Муленко В.Н.* Комбинированная технология получения товарных продуктов из ультрабогатых редкометалльных руд Томторского месторождения // Редкоземельные металлы: переработка сырья, производство соединений и материалов на их основе: тез. докл. междунар. конф. Красноярск, 11–15 сентября 1995г. Красноярск: Ин-т химии и хим.-металлург. процессов СО РАН, 1995. С. 74–77.
- Захаров В.Н.* Техногенные образования минерально-сырьевого комплекса России: требования к эффективному использованию и возможности снижения технологических рисков, 2015. 20 с. <http://rosgorprom.com/files>
- Иванова И.С., Криворотко Е.С., Илюхин А.Б., Демин С.В., Пятова Е.Н., Баулин В.Е., Цивадзе А.Ю.* Экстракция редкоземельных элементов в системе 1, 1, 7-тригидродека-фторгептанол – вода фосфорилпододами, производными дифосфоновых кислот // Журнал неорганической химии. 2019. Т. 64. № 5. С. 538–544.
- Кириченко Н.В., Николаев А.И., Майоров В.Г., Тюремов А.В., Ильин Е.Г.* Экстракция сурьмы и тантала из фторидных водных растворов н-октанолом и трибутилфосфатом // Журнал неорганической химии. 2013. Т. 58. № 4. С. 541–541.
- Косынкин Ю.М., Трубаков Г.А., Сарычев В.Д.* Прошлое и будущее редкоземельного производства в России // Евразийское научное обозрение. 2015. № 6. С. 49–60.

- Кременецкий А.А., Калиш Е.А. Комплексные редкоземельные месторождения России и основные направления повышения их инвестиционной привлекательности // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 3–11.
- Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Стратегическое значение редкоземельных металлов в мире и в России // Всероссийский экономический журнал. 2012. № 2 (11). С. 5–16.
<https://doi.org/10.30680/ECO0131-7652-2012-11-5-16>
- Кузьмин В.И., Ломаев В.Г., Пашков Г.Л., Овчинников С.В., Кузьмина В.Н., Дорохова Л.И. / Переработка руд месторождений кор выветривания карбонатитов – будущее редкометаллической промышленности России // Цв. металлы. 2006. № 12. С. 62–68.
- Лебедев В.Н., Локишин Э.П., Бармин И.С. Выделение бадделеита из магнетит-сульфидных отвальных хвостов // Обогащение руд. 2007. № 5. С. 19–22.
- Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111.
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
- Литвинова Т.Е., Олейник И.Л. Кинетика растворения фосфатов редкоземельных металлов растворами карбонатов щелочных металлов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 712–722.
<https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.10>
- Луцкий Д.С., Литвинова Т.Е., Чиркст Д.Э., Луцкая В.А., Жуков С.В. Термодинамическое описание экстракции церия и европия нафтенной кислотой при стехиометрическом расходе экстрагента // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 97–101.
- Мудрук Н.В., Николаев А.И., Сафонова Л.А., Дрогобужская С.В. Экстракция редкоземельных элементов из нитратных растворов после вскрытия перовскитового концентрата // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10. № 1 (3). С. 207–214.
- Николаев А.И., Майоров В.Г. Новые подходы в технологии экстракции ниобия и тантала // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 1. С. 67–69.
- Петров Е.И., Тетенькин Д.Д. и др. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. Доступно онлайн: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/ (дата обращения: 02.05.2023).
- Петрова Н.В. Влияние особенностей структуры и состава тантало-ниобатов на их поведение в технологических процессах / Н.В. Петрова [и др.] // Современные химико-металлургические методы: сб. науч. тр. М.: ВИМС, 1986. С. 65–71.
- Пресс-релиз, режим доступа: <https://www.polymetalinternational.com/ru/investors-and-media/news/press-releases/19-04-2021/> (дата обращения 02.05.2023)
- Распоряжение от 22 декабря 2018 года №2914-р. Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы России до 2035 года. 2018. URL: <http://government.ru/docs/35247/> (дата обращения 02.04.2023)
- Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2022 г. № 2473-р. Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья. 2022. <http://actual.pravo.gov.ru/text.html#pnum=0001202208310002> (дата обращения 02.04.2023)
- Сафиулина А.М., Зверев Д.В., Макарова Т.В., Борисова Н.Е., Лопатин Д.А., Баулин В.Е., Цивадзе А.Ю. и др. Экстракционные свойства 2, 2'-тиобис (N, N-диоктилацетамид) для выделения благородных металлов из растворов переработки ОЯТ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 2. С. 53–579.
- Сучков Д.В., Литвинова Т.Е. Фосфогипс как техногенное сырье для получения товарных продуктов с заданными свойствами // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности. 2022. С. 69–72.
- Цивадзе А.Ю. Селективное разделение близких по свойствам химических элементов периодической таблицы – основа новых технологий // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 4. С. 320–330.
- Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. № 11. С. 7–13.
<https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.01>
- Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Чантурия Е.Л., Самусев А.Л., Анашкина Н. Е. О механизме изменения структурно-химических и технологических свойств эвдиалита при комбинированных энергетических воздействиях // Изв. РАН. Серия физическая. 2019а. Т. 83. № 6. С. 789–793.
- Чантурия В.А., Чантурия Е.Л., Миненко В.Г., Самусев А.Л. Интенсификация процесса кислотного выщелачивания эвдиалитового концентрата на основе использования энергетических воздействий // Обогащение руд. 2019б. № 3. С. 29.
- Чантурия В.А. Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркония и РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата. Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 505–516.
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.31>
- Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Lieberwirth H., Aleksandrov A.V. Selective desintegration and concentration: Theory and practice // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. V. 56. № 03001.
- Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Afanasova A.V., Romashev A.O., Aburova V.A., Prokhorova E.O. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // Minerals. 2023. V. 13. № 1. С. 84.
- Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Aleksandrov A.V. Microwave treatment to reduce refractoriness of carbonic concentrates // J. of Mining Science. 2020. V. 56. P. 136–141.
- Chanturia V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., Chanturia E.L., Koporulina E.V. The mechanism of influence exerted by integrated energy impacts on intensified leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate // J. of Mining Science. 2017. V. 53. № 5. P. 890–896.
<https://doi.org/10.1134/S1062739117052921>

- Chanturiya V.A., Bunin I.Z.* Advances in Pulsed Power Mineral Processing Technologies // Minerals. 2022. V. 12. № 9. P. 1177.
- Das N., Devlina D.* Recovery of rare earth metals through biosorption: an overview // J. of Rare Earths. 2013. V. 31. № 10. P. 933–943.
- Gradov O.M., Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V., Voshkin A.A.* Some features of the ultrasonic liquid extraction of metal ions // Molecules. 2019. V. 24. № 19. P. 3549.
- Gueroult R, Rax J-M, Fisch NJ.* Opportunities for plasma separation techniques in rare earth elements recycling // J. Clean Prod. 2018. 182:1060–9.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.066>
- Kurniawan T, Chan G.* Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals // Chem. Eng. J. 2006. 118. P. 83–98.
- Litvinenko V.S., Sergeev I.B.* Innovations as a factor in the development of the natural Resources sector // Studies on Russian Economic Development. 2019. V. 30. № 6. P. 637–645.
<https://doi.org/10.1134/S107570071906011X>
- Opore E.O., Struhs E., Mirkouei A.* A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. V. 143. № 110917.
- Schiewer S., Volesky B.* Modeling multi-metal ion exchange in biosorption // Environmental science & technology. 1996. V. 30. № 10. P. 2921–2927.
- Suli L. M., Ibrahim W. H. W., Aziz B. A., Deraman M. R., Ismail N. A.* A review of rare earth mineral processing technology // Chemical Engineering Research Bulletin. 2017. P. 20–35.
- Vieira R.H., Volesky B.* Biosorption: a solution to pollution? // International microbiology. 2000. V. 3. № 1. P. 17–24.
- Xiong C., Chen X., Liu X.* Synthesis, characterization and application of ethylenediamine functionalized chelating resin for copper preconcentration in tea samples // Chemical engineering journal. 2012a. V. 203. P. 115–122.
- Xiong C., Chen X., Yao C.* Preparation of a novel heterocycle-containing polystyrene chelating resin and its application for Hg (II) adsorption in aqueous solutions // Current Organic Chemistry. 2012b. V. 16. № 16. P. 1942–1948.
- Xu G.* Fundamental understanding of mineral dissolution and rare earths speciation in supercritical CO₂–H₂O–Chelator (s) systems for extraction and separation from coal and coal byproducts. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2021. № SAND2021-0583D.
- Yang J.* Biosorption of Uranium and Cadmium on Sargassum Seaweed Biomass (PhD Thesis) // McGill University, Montreal, Canada, 2000. pp. 116.
- Zakhodyaeva Y.A., Rudakov D.G., Solov'ev V.O., Voshkin A.A., Timoshenko A. V.* Liquid-liquid equilibrium of aqueous two-phase system composed of poly(ethylene oxide) 1500 and sodium nitrate // J. of Chemical and Engineering Data. 2019. V. 64. № 3. P. 1250–1255.