

УДК 669.85/.86.046.5

Левченко Е.Н., Ключарев Д.С. (ФГБУ «ИМГРЭ»)

## НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ КРИТИЧЕСКИХ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

*В статье рассмотрена концепция «критических металлов», дано сравнение со стратегическими металлами. Приведены оценка обеспеченности России стратегическими редкими металлами, рассмотрена обеспеченность запасами и доля активных запасов в обеспечении потребностей промышленности России, рассмотрена обеспеченность редкими металлами в перспективе реализации стратегических планов развития промышленности редких металлов. Кратко охарактеризованы нетрадиционные источники редких металлов различных промышленных типов, приведены основные технологические характеристики руд. Сделаны выводы о достаточности минерально-сырьевой базы редких критических металлов для перспективного развития российской промышленности. Предложены возможные меры для восстановления редкометалльной промышленности России. **Ключевые слова:** критические металлы, редкие металлы, нетрадиционные источники, обеспеченность запасами, сценарии развития.*

Levchenko E.N., Klyucharev D.S. (IMGRE)

## NON-CONVENTIONAL SOURCES OF CRITICAL RARE METALS

*The paper considers the conception of «critical metals» in comparison with the Russian group of strategic metals. An estimation of Russian security on strategic rare metals is given. The provision of resources and the share of active resources in meeting the needs of the Russian industry are considered. An assessment of the availability of rare metals for the future implementation of strategic plans for the development of the rare metals industry is given. Non-conventional sources of rare metals of various potentially industrial types are briefly characterized, the main technological characteristics of ores are given. Conclusions are drawn about the sufficiency of the mineral and raw materials base of rare critical metals for the prospective development of Russian industry. Possible measures for the recovery of the rare metal industry in Russia are proposed. **Keywords:** critical metals, rare metals, non-conventional sources, provision of resources, development scenarios.*

Редкие металлы являются особо важными стратегическими материалами, обеспечивающими безопасность и обороноспособность государства, представляют основу для технологий XXI в. В настоящее время

редкометалльная промышленность мира переживает период активного развития. Редкие металлы по объему продукции играют относительно небольшую роль в суммарной стоимости производимого минерального сырья, но они являются металлами наиболее передовых технологий и по темпам роста производства и потребления в странах с развитой рыночной экономикой опережают многие традиционные виды сырья.

Концепция «стратегических» и «критических» металлов сформировалась в конце двадцатого века применительно к обеспечению функционирования военной и гражданской промышленности на период войны. Эта концепция учитывала зависимость от импорта и, как следствие, высокие затраты на производство внутри страны или невозможность покупки сырья за рубежом [12]. В этом определении термины «критические» и «стратегические» предельно сближены и отражена, прежде всего, позиция США в реалиях «холодной войны» и начинающейся глобализации. Вместе с тем, перечень «критических» и «стратегических» металлов зависит от рассматриваемой его страны, т.е. при многих общих параметрах эти перечни будут различны.

Развитие промышленности и естественное выделение стран-производителей минерального сырья нивелировало различия между понятиями «стратегических» и «критических» металлов. Собственно «стратегическими» металлами принято считать металлы для нужд ВПК и металлы, имеющие решающее значение для экономики, для которых угроза поставки может нанести серьезный экономический ущерб.

Спектр критериев отнесения к группе «критических» металлов, которые могут и не быть стратегическими, существенно шире. Так, критические металлы необходимы для военных, промышленных или коммерческих целей; для производства возобновляемых источников энергии, национальной обороны, медицинских приборов; электроники, сельскохозяйственного производства. Для критических металлов возможны потенциальные перебои с поставками; для них, как правило, мало или нет удовлетворительных заменителей; отсутствие критических металлов может привести, и часто приводит, к нежелательным экономическим, прежде всего финансовым, или социальным последствиям [10].

Критические металлы характеризуются следующими основными особенностями: малым объемом производства по сравнению с объемом производства «основных» металлов; как правило, они добываются в качестве попутного компонента; имеют специфические области применения; часто имеют высокие требования к химической чистоте и, как следствие, высокую стоимость.

**Таблица 1**  
**Сопоставление перечней критических металлов для ЕС [9], США [11] и России\***

	РФ**	ЕС			США (USGS, 2018)
		2011	2014	2017	
Сурьма	+	+	+	+	+
Барит	-	-	-	+	+
Бериллий	+	+	+	+	+
Висмут	-	-	-	+	+
Бораты	-	-	+	+	-
Хром	-	-	+	-	-
Кобальт	+	+	+	+	+
Коксующийся уголь	-	-	+	+	-
Флюорит	-	+	+	+	+
Галлий	-	+	+	+	+
Германий	+	+	+	+	+
Графит	-	+	+	+	+
Гафний	-	-	-	+	+
Гелий	-	-	-	+	+
Индий	-	+	+	+	+
Магнезит	-	-	+	-	+
Магний	-	+	+	+	+
Ниобий	+	+	+	+	+
Металлы платиновой группы	+	+	+	+	+
Фосфатные породы	-	-	+	+	-
—	-	-	-	Фосфор	-
Скандий	+	-	-	+	+
Кремний	+	-	+	+	-
Тантал	+	+	-	+	+
РЗМ	-	Редкоземельные металлы (РЗМ)	Легкие РЗМ	Легкие РЗМ	-
		Тяжелые РЗМ	Тяжелые РЗМ	Тяжелые РЗМ	-
Вольфрам	+	+	+	+	+
Ванадий	-	-	-	+	+

\* — показаны только совпадающие металлы в списках; \*\* — перечень основных видов стратегического минерального сырья РФ от 16 января 1996 года №50-р

В первой декаде двухтысячных годов ведущие страны мира стали вести работу по оценке «критичности» минерального сырья. Так, в декабре 2010 г. Министерством энергетики США (DOE) был опубликован перечень критических видов минерального сырья. Методики оценки критических видов минерально-

го сырья и перечни публиковались в США в 2016 и 2018 гг. [13]. В 2008 г. в ЕС была образована специальная Рабочая группа по определению критического сырья, а в 2009 г. дополнительно — консультативная группа по выявлению неэнергетического сырья, которое считается критически важным для ЕС. Основными критериями оценки были приняты экономическая значимость и риски прекращения поставок. В 2010 г. был опубликован первый отчет — «Критическое сырье для ЕС». С 2011 г. Еврокомиссией принят трехлетний срок для обновления перечня критических металлов для экономики ЕС. К настоящему времени обновления публиковались в 2011 (14 металлов), 2014 (20 металлов) и в 2017 (27 металлов) годах (табл. 1).

Таким образом, для большинства развитых стран перечни критических металлов являются динамическими, обновляемыми через принятый временной интервал по набору критериев и определенной методологии. В этом заключается коренное отличие Перечня основных видов стратегического минерального сырья, принятого распоряжением Правительства Российской Федерации №50-р от 16 января 1996 г., согласно которому на протяжении более чем двадцати лет к стратегическим видам минерального сырья отнесены литий, бериллий, тантал, ниобий, скандий, цирконий, германий и редкоземельные металлы иттриевой группы.

По сравнению с советским периодом истории, когда страна являлась одним из значимых производителей стратегических металлов и почти полностью обеспечивала свои нужды, новейший период истории России характеризуется резким падением уровня добычи и производства (рис. 1). Вместе с тем, обеспечение экономики любой промышленно развитой страны РМ и РЗМ носит критический характер для национальной безопасности, а для России является важным условием модернизации промышленности. Без развития отечественной РМ и РЗМ промышленности невозможно полноценное внедрение 14 из 27 критических технологий, утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 07 июня 2011 г. № 899.

Месторождения редких (в том числе редкоземельных) металлов широко распространены на всей территории Российской Федерации. Часть из них (Li, Be, Sr, РЗЭ, Zr, Ta, Nb) образуют собственные месторождения, а остальные (Sc, Ga, Ge, Re и др.) являются рассеянными в рудах черных, цветных и благородных металлов и горных породах (угли, глины, сланцы и т.д.). По запасам редких и редкоземельных металлов Россия занимает одно из ведущих мест в мире. Использование собственной МСБ в перспективе обеспечивает не только бюджетные поступления, но и занятость населения, рост социальной стабильности и защищенности в регионах.

Практически все редкие, в том числе и редкоземельные стратегические металлы в настоящее время не обеспечены собственной добычей сырья. По ряду металлов, например, редкоземельным металлам иттриевой группы, литию, цирконию и рению Россия полностью зависит от импорта как по сырью, так и по

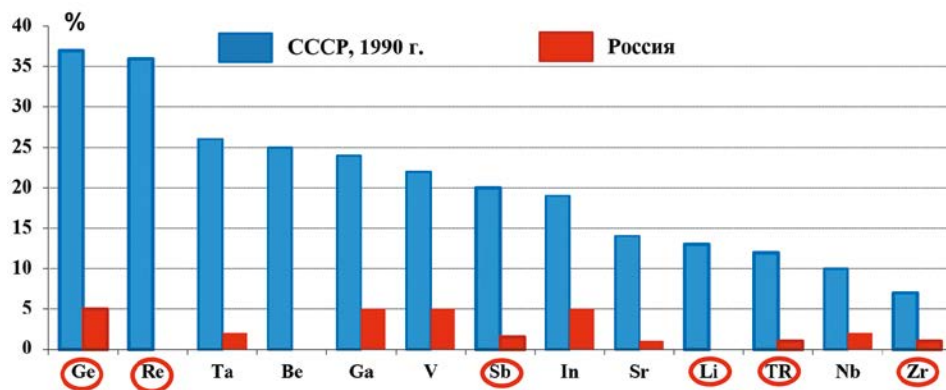


Рис. 1. Доля СССР и России в мировом производстве редких металлов, %

готовой продукции. По этим металлам не удовлетворяются текущие и перспективные потребности промышленности (табл. 2, рис. 2). Несмотря на то что по этим металлам балансовая обеспеченность запасами составляет 50 и более лет, обеспеченность активными, экономически выгодными для освоения запасами, крайне низка.

Сложившаяся ситуация обуславливает высокий уровень

Таблица 2  
Обеспеченность России критическими металлами

Металл	Обеспеченность России по текущему уровню производства		Обеспеченность потребностей собственной товарной продукцией и сырьем	Проблемы освоения МСБ и возможные пути решения
	Общие запасы	Активные запасы		
Рений	более 50 лет	0	Импорт сырья (100 %) и товарной продукции	Необходим ввод в разработку Аксугского месторождения, организация извлечения Re на Михеевском месторождении, организация опытно-промышленных работ на Брикетно-Желтухинском месторождении
Литий	более 100 лет	0	Импорт концентратов — 100 %. Экспорт товарной продукции (металл, гидроксид)	Необходима геолого-экономическая переоценка пегматитовых месторождений (в первую очередь Колмозерского), оценка объектов гидроминерального сырья
Германий	более 100 лет	Менее 30 лет (Павловское месторождение, участок «Спецугли»)	Экспорт товарной продукции (80 %)	Лицензированные объекты до настоящего времени не освоены
Цирконий	более 100 лет	Ковдорский ГОК — бадделеитовый концентрат; Туганское месторождение	Экспорт бадделеитового концентрата — 95 %, импорт цирконового концентрата — 95 %	Лицензированные объекты до настоящего времени не освоены
Сурьма	40 лет	20 лет, месторождения Сарылах и Сентачан — 6 тыс. т сурьмы в концентрате. Производства из собственного сырья нет	Экспорт сурьмяного концентрата — 100 %, импорт товарной продукции — 100 %	Нет поискового задела. Исчерпание активных запасов к 2030 г.

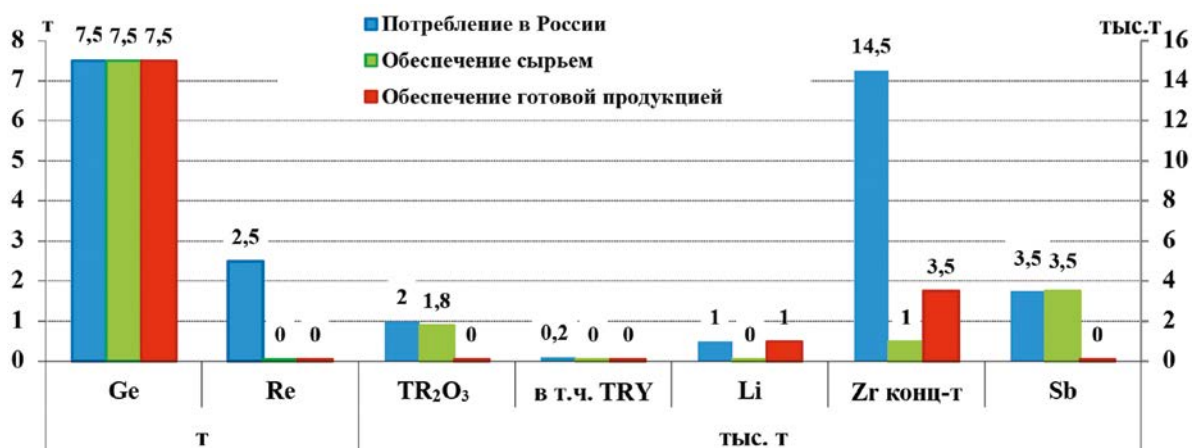


Рис. 2. Обеспечение текущих потребностей России собственным сырьем

Таблица 3

Ожидаемый баланс потребности и добычи (производства) РМ в рамках Стратегии развития МСБ РФ

Металлы	Текущая и прогнозируемая потребность (Степень обеспечения потребности добычей)		
	2018	2032	2062
РЗМ, тыс. т $TR_2O_3$	2,5 (100 %)	20 (100 %)	100 (64 %)
Литий, тыс. т	1 (0 %)	10 (100 %)	80 (25 %)
Цирконий, тыс. т концентрата	14,5 (0 %)	75 (100 %)	250 (85 %)
Рений, т	2,5 (0 %)	25 (20 %)	35 (0 %)
Германий, т	7,5 (100 %)	20 (100 %)	60 (83 %)

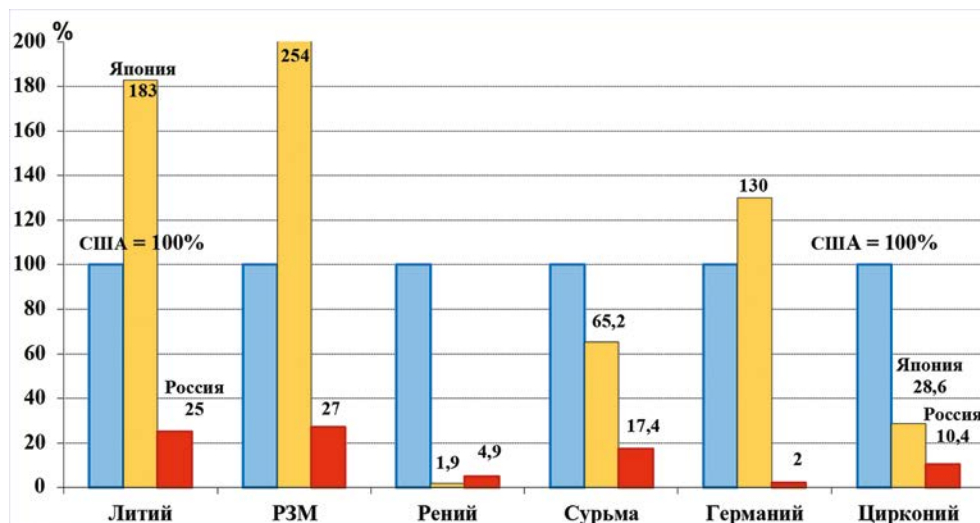


Рис. 3. Сравнительный анализ объемов потребления РМ и сурьмы в России и зарубежных странах

зависимости внутреннего потребления от импортных поставок. По ряду металлов практически отсутствуют объекты, подготовленные для быстрого освоения.

Моделирование ситуации показывает, что по редкоземельным металлам иттриевой группы, литию, цирконию и рению возможный рост потребления этих металлов в России на ближнюю перспективу может компенсироваться внутренним производством сырья на уже известных месторождениях (табл. 3). Оценка на более длительный временной интервал показывает падение добычи. Известные месторождения не могут обеспечить дальнюю перспективную потребность промышленности; необходим ввод в эксплуатацию новых объектов. Вместе с тем, попутное извлечение ряда металлов на уже действующих месторождениях (трубка Удачная, месторождения Хибинской группы, Аллуайв, Михеевское и др.) позволило бы в ближайшем будущем существенно сократить зависимость от внешних источников металлов и их соединений.

Основная особенность минерально-сырьевой базы редких металлов в России — низкое, по сравнению даже с советским временем, потребление редких металлов и, как следствие, слабое использование минерально-сырьевого потенциала. И хотя по сравнению с

зарубежными разрабатываемыми объектами руды отечественных месторождений сопоставимы по основным параметрам, а часто имеют более высокие содержания полезных компонентов, конкурентоспособность месторождений невысокая.

Крупные редкометалльные месторождения России расположены в неосвоенных или слабоосвоенных районах Якутии, Забайкалья, Иркутской области и Кольского полуострова. Большинство лучших объектов, имеющих промышленную значимость, лицензированы, но не осваиваются из-за относительно низкой рентабельности добычи и/или переработки, необходимости инвестирования «долгих денег» для организации попутного производства.

Тем не менее, часть редких металлов доступна для попутного извлечения, а для остальных существуют эффективные технологии переработки. Поэтому для редких металлов глубокая и

комплексная переработка руд может не только обеспечить получение добавленной стоимости извлекаемых компонентов, но и превратить убыточные, по технико-экономической оценке, объекты в экономически эффективные.

По объему потребления редких металлов Россия во многие разы отстает от индустриально развитых стран (рис. 3). Так, потребление редкоземельных металлов в России сегодня не превышает 2–3 тыс. т в год в пересчете на РЗО. Отсутствие крупных стратегических потребителей на редкометалльную продукцию и производителей РМ полного цикла в России является сдерживающим фактором для освоения редкометалльных месторождений.

Государственной программой Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности на период до 2020 года» Мероприятием 15.2 «Развитие минерально-сырьевой базы РМ и РЗМ» предусмотрено преодоление сырьевых ограничений и сглаживание геологических и технологических рисков вовлечения в освоение отечественных месторождений редких и редкоземельных металлов (табл. 4, рис. 4).

Необходимость воссоздания редкометалльной отрасли в России диктуется необходимостью ликвида-

ции зависимости отечественной промышленности от импорта стратегических редких металлов (в т.ч. РЗМ), а также для создания в России собственного производства высокотехнологичной продукции, конкурентоспособной на мировом рынке.

Из всего многообразия минерально-сырьевой базы России для ряда дефицитных металлов в последние годы возрастает роль техногенных и нетрадиционных источников редкометалльного сырья [5].

Так, для рения кроме традиционных медно-порфиновых (Ак-Сугское месторождение), молибденовых (Сорское и Агаскырское месторождения) и вольфрам-молибденовых (Коклановское) руд, потенциальными источниками могут стать инфильтрационно-полиметаллические руды Брикетно-Желтухинского месторождения; металлоносные сублиматы и, возможно, фумарольные газы вулкана Кудрявый; горючие сланцы Прибалтийского и Приволжского бассейнов.

Наиболее перспективным и подготовленным для первоочередного освоения является Брикетно-Желтухинское рений-уран-молибденовое пластово-инфильтрационное месторождение с утвержденными в 2016 г. запасами рения. Основными преимуществами данного объекта является благоприятное физико-географическое положение и разработанная и апробированная технология селективного подземного выщелачивания рения.

Рениевое оруденение локализовано в рыхлых отложениях палеодолин. Носителями рения являются органическое (углистое) вещество, глинистые минералы и сульфиды. Соединения рения также присутствуют в растворенной форме в металлоносных растворах водоносного горизонта. Содержания рения в рудах Брикетно-Желтухинского месторождения составляют 0,005–3,3 г/т. Рений образует тела в подошвенной части сероцветной толщи палеодолин. Размах оруденения, оконтуренного по среднему содержанию  $Re > 0,5$  г/т, достигает 30 м.

Для рениевых руд Брикетно-Желтухинского месторождения разработана и апробирована технология скважинного подземного выщелачивания и извлечения  $Re$  и попутных компонентов.

Другой нетрадиционный источник рения связан с современной вулканической активностью. На Курильских островах выявлено около 20 проявлений рениевой минерализации самых различных типов. Среди них преобладают сублимационные серно-сульфидные, гейзеритовые и эпитеермальные сульфидно-кремнистые. Существенные концентрации этого металла (до 3–12 г/т)

Таблица 4

Сценарии и показатели развития РЗМ промышленности (Подпрограмма 15.2. Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов)

Показатели	Инерционный сценарий	Базовый сценарий	Оптимистический сценарий
Объем потребления РЗМ в 2020 г.	2–3 тыс. т	5–7 тыс. т	12–15 тыс. т
Требуемый объем производства РЗМ для полного удовлетворения потребностей	6 тыс. т	19,8 тыс. т	27 тыс. т
Доля импорта в потреблении российских производителей в критических РЗМ	0,65	Не более 5 %	Не более 5 %
Объем экспорта РЗМ за рубеж	4 тыс. т (La и Ce)	13 тыс. т (La, Ce, РЗМ среднетяж. гр.)	15 тыс. т (La, Ce, РЗМ среднетяж. гр.)
Доля мирового рынка в 2020 г.	3 %	11 %	15 %
Социальный эффект			
Создание высокотехнологичных рабочих мест в РФ	6,0 тыс.	16,5 тыс.	18 тыс.
Подготовка квалифицированных кадров в РФ	3,0 тыс. человек	9,0 тыс. человек	9,5 тыс. человек

	Редкие металлы	Редкоземельные металлы
<b>Критические металлы</b> в соответствии с целевыми индикаторами и показателями подпрограммы 15 «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов»	тантал, ниобий, титан*	неодим, празеодим, иттрий, гадолиний, тербий, диспрозий, самарий
<b>Стратегические металлы</b> в соответствии с Перечнем основных видов стратегического минерального сырья (утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 16 января 1996 г. № 50-р)	бериллий, германий, литий, ниобий, тантал, цирконий, рений	иттрий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лотеций, самарий
<b>Металлы, месторождения и проявления, которые включены в перечень участков недр федерального назначения в соответствии с Законом «О недрах»</b>	тантал, ниобий, бериллий, литий	иттрий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лотеций, самарий

Рис. 4. Перечень редких и редкоземельных металлов, включенных в подпрограмму 15.2

отмечены также в отложениях термальных источников целого ряда геотермальных полей на о. Итуруп [8]. К сожалению, объемы таких пород невелики.

Наиболее известным рениевым объектом Курил является вулкан Кудрявый на о. Итуруп. В ходе исследований проявлений вулкана Кудрявый геохимиками ИМГРЭ во главе с Ф.И. Шадерманом было установлено, что фумарольные газы, кроме рения содержат ряд других ценных элементов — индий, германий, рений, золото, висмут.

В 1999 г. был оформлен патент на изобретение «Способ извлечения рения и других металлов», описывающий процесс осаждения рения в виде летучего семивалентного оксида из вулканических газов на различных сорбентах (патент № 2159296 от 20 ноября 2000 г., правообладатели Ф.И. Шадерман, А.А. Кремнецкий, Г.С. Штейнберг).

В 2000 г. был поставлен натурный эксперимент по получению рения из вулканических газов вулкана Кудрявый. В 2003 г. для доказательства возможности промышленной добычи рения из вулканических газов на вулкане Кудрявый в полупромышленном эксперименте была опробована технология по его извлечению из вулканических газов, показавшая возможность осаждения рения из вулканических газов на слое цеолита.

Динамические запасы рения в газовой фазе, утвержденные решением ЦКЗ МПР России (протокол от 08.07.2002 г., б/н), до сих пор представляются дискуссионными, т.к. данные о содержании рения в газах крайне противоречивы (табл. 5).

Исследования содержания рения в фумарольных газах, конденсатах и осадках конденсатов показали, что они составляют 0,02–6 мг/т, а вовсе не 1–5 г/т. Таким образом, суммарный вынос рения на вулкане Кудрявый оценивается в 30–60 кг/год, что существенно ниже динамических запасов, отмеченных в Государственном балансе полезных ископаемых [3].

Накопление рения происходит и на фумарольных полях в осаждающихся металлоносных сублиматах. Тут рений входит в состав молибденита и образует собственные минералы, прежде всего рениит и повеллит.

Для подтверждения возможности использования «твердой фазы» как источника рения, экспериментально была показана возможность совместного получения перрената аммония и оксида молибдена из металлоносных сублиматов прямыми химически-

ми методами. Локализованные прогнозные ресурсы участка «Горячий купол» в авторской оценке специалистов ИМГРЭ не превышают 1,3 т рения при среднем содержании 20 г/т, сходными объемами характеризуются «Рениевое поле» и остальные высокотемпературные поля кратерной части вулкана. Таким образом, суммарная оценка ресурсов рения в металлоносных сублиматах кратерной части вулкана Кудрявый не превышает 5 т.

Повышенные содержания редких элементов часто являются обычными для горючих сланцев. Так, потенциальным источником рения являются граптолитовые аргиллиты (диктионемовые сланцы) Прибалтийского сланцевого бассейна, где по результатам работ (ВСЕГЕИ, ИМГРЭ) были локализованы и апробированы прогнозные ресурсы рения кат. Р<sub>1</sub> в количестве 12 т, при среднем содержании 0,112 г/т и кат. Р<sub>2</sub> — 63 т при среднем содержании 0,132 г/т (протокол НТС ИМГРЭ №25 от 11.12.2014).

Зоны максимальных содержаний рения (более 0,35 г/т) формируют прерывистые линзы на фоне устойчивых средних концентраций 0,2–0,3 г/т. Оруденение комплексное — с ураном, редкоземельными металлами, металлами платиновой группы [1].

Основным носителем Re в горючих сланцах является органическое вещество сланцев, где рений находится в виде элементоорганических соединений [6], из которых он может быть извлечен в растворы в присутствии окислителей при повышенной щелочности выщелачивающего агента.

Экспериментальные исследования по извлечению редких металлов из сланцев Прибалтийского бассейна показали возможность совместного выщелачивания комплекса полезных компонентов из сланцев — рения, редкоземельных металлов, урана и др. [2].

Нетрадиционным источником лития для России является гидроминеральное сырье — промышленные подземные воды. В то время как более 70 % мировой добычи лития приходится на долю саларов Чили, Аргентины, Боливии, Китая и США, основные запасы лития России сосредоточены в пегматитовых месторождениях — Колмозерском, Вороньтундровском, Тастыгском, Улуг-Танзекском, Гольцовом; грейзенах — Вознесенское, Пограничное.

На волне повышенного интереса к литию в России обратили внимание на многообразие гидроминеральных источников (табл. 6). Разработанные российскими учеными технологические решения позволяют рентабельно извлекать соединения лития из этого вида сырья.

Основными проблемами переработки гидроминерального сырья в России являются отсутствие развитой МСБ (нет запасов, оценены и апробированы

**Таблица 5**  
**Содержания рения в вулканических газах вулкана Кудрявый [3]**

Год, метод определения	1995 г, адсорбционный	2007 г, кинетический	2007 г, ИСР+ИНАА
Диапазон температур, °С	г/т	мг/т	
440–450	1,57	2,4	0,06
540	0,57	1,0	0,05
600–620	2,51	1,3	0,02
600–620	0,83	1,1	0,04
700–730	2,47	6,8	18,03

**Таблица 6**  
**Основные типы перспективного гидроминерального сырья России**

Типы месторождений	Геохимический тип литийсодержащих рассолов минерализация, кг/м <sup>3</sup>	Содержание Li <sub>2</sub> O, % масштаб	Другие полезные ископаемые	Примеры российских объектов
Глубокозалегающие рассолы нефтегазоносных провинций	Br-Li рассолы Cl-Na-Ca Cl-Ca-Na Cl-Ca 250-450	0,0*n до крупных	Sr, B, Br, Rb, Cs, хлориды Ca, Mg, Na, K	Ангаро-Ленский бассейн, Иркутский амфитеатр (Знаменское месторождение промышленных вод и др.), Непско-Ботубинская провинция
Подземные воды нефтегазоконденсатных месторождений	Br-Li рассолы Cl-(Mg)-Ca-Na 100-350	0,008 не оценен	Sr, B, Br, Rb, Cs, хлориды Ca, Mg, Na, K	Нефтегазоносные провинции: Лено-Тунгусская, Прикаспийская, Предкавказская
Дренажные рассолы алмазоносных провинций	Cl-Ca 400	0,0*n не оценен	Br, Ca, Mg	Якутская алмазоносная провинция, трубка «Удачная»

прогнозные ресурсы Ангаро-Ленского бассейна), отсутствие принятой методики оценки запасов и, как результат — литий в гидроминеральном сырье не учитывается Государственным балансом полезных ископаемых. О повышенном внимании к данному сырью и возможных изменениях в лучшую сторону свидетельствуют внесенные в «Закон о недрах» поправки, позволяющие вести попутную добычу гидроминерального сырья на углеводородных месторождениях.

Перспективным источником германия для России могут стать германиеносные лигниты Касской впадины в Красноярском крае. Перемытые углефицированные фрагменты древесины заполняют толщи слабосцементированных глинистых песков и песчаников, формируя в разрезе несколько горизонтов. Наряду с простой схемой обогащения — достаточно отмывки древесных фрагментов от песка и глины, преимущество лигнитов заключается в минимальных концентрациях токсичных микроэлементов. Например, содержание серы в них существенно ниже уровня в бурых углях. При сжигании лигнитов осуществляется более глубокая очистка газовых выбросов от механической пыли (КПД = 99,8 %) с минимальным воздействием выбросов пылевых частиц на окружающую среду. Способ сжигания определяет полный переход CO в CO<sub>2</sub>.

Технологические характеристики германиеносных лигнитов, как перспективного источника германия, в настоящее время не до конца изучены. Сотрудниками Сибирского федерального университета, ОАО «Германий» и ООО «Березовское карьероуправление» проведены пилотные технологические исследования, позволяющие оценить возможность выделения германия из лигнитов в процессе их сжигания с целью отработки рабочих режимов, а в последующем — для промышленной технологии извлечения материала. Показано, что для достижения максимальной степени извлечения германия в газовую фазу, равной 94,0 %, сжигание лигнита необходимо производить при следующих условиях: температура 1150 ÷ 1200 °C; расход воздуха 4 л/мин\*см<sup>2</sup>; влажность лигнита 10 %; размер частиц 3÷5 мм. Эти исследования по сжиганию лигни-

тов и оценке распределения германия в газовой фазе и несгораемом остатке (золе) позволяют наметить решения по созданию промышленной технологии его извлечения.

Среди известных геолого-промышленных типов редкометалльных кор выветривания первоочередной интерес (как источник редкоземельных металлов) представляют апогранитные коры выветривания или так называемые — «ионные руды». Руды этого типа наряду с запасами гигантского месторождения бастнезитовых карбонатов Баюнь-Обо позволили Китаю достигнуть 60 % доли в мировых запасах и 90 % — в мировой добыче.

В осадочном чехле и верхней части фундамента кайнозойских впадин Павловско-Раковской депрессии (Приморье) в серии компактных тел была выявлена редкоземельная минерализация нескольких типов, в том числе и нового, необычного, связанного с молодым базальтовым вулканизмом. При относительном сходстве с «ионными рудами» Китая, среднее содержание РЗЭ в аргиллизированных базальтах на порядок выше, чем в китайских «ионных» рудах. Доля дефицитной иттриевой группы здесь также аномальна — 60–75 % [4].

Редкоземельные руды Павловской площади в подавляющем большинстве случаев сложены тонкодисперсными, размером первые микронны — десятки микрон, минералами. Основные собственные рудные минералы — кимураит и Nd-лантанит, нотронит, локкаит, чёрчит. Значительная часть РЗМ сорбирована на глинистой фазе. Содержания суммы РЗЭ в рудных телах Абрамовского рудопроявления варьируют от 0,05 до 1,4 %, в том числе иттрия — от 0,025 до 1,02 % [7]. Небольшие по запасам рудные тела площади относительно обогащены средними и тяжелыми лантаноидами и резко обеднены церием. РЗМ легко выщелачиваются слабыми растворами кислот. Руды классифицируются как очень богатые ценные и сверхценные руды, в составе и стоимости которых иттрий и дефицитные лантаноиды играют главную роль.

Отдельного внимания заслуживают техногенные источники критических редких металлов.

**Таблица 7**  
**Металлы в нефти и битумах нефтеносных провинций России**

Название провинции	Возраст	Сопутствующие редкие металлы
Северо-Кавказская	P-N	V, Ni, <b>Re</b> (Mo, Zn, Pb, Cu, Cr, Co, Au, As, <b>Sb</b> )
Волго-Уральская	P	V, Mo, As, Au, Ni, Sc, U, Hg, <b>Sb</b> (Cu, Pb, Zn, <b>Sb</b> , Ag, Tl, <b>Re</b> , Se)
Прикаспийская	N-Pg	V, Ni, Mo (As, Cu, Co, Pb, <b>Sb</b> , <b>Ga</b> , Ag, <b>Re</b> )
Енисейско-Анобарская	J-K	V, Ni, <b>Re</b> (Mo, Co, Cr, <b>La</b> , <b>Ce</b> , As, <b>Sb</b> , Au, Zn, Se, <b>Sc</b> )

Так, литиевые руды Вознесенского и Пограничного месторождений (Приморский край) представляют собой хвосты обогатительной фабрики, сложенные лепидолитом.

Золотоносные россыпи Куларского рудного района расположены в Якутии, практически на побережье Северного Ледовитого океана. В пределах рудного района развиты золотоносные россыпи с куларитом (низкотермическим РЗМ монацитом). Россыпи приурочены к водотокам, размывающим сланцевые толщи, содержащие и золото и куларит, содержание которого в сланцах достигает первых кг/т. Россыпи Центральная-Нижняя и Центральная-Верхняя в настоящее время отработаны и куларит с тонкодисперсным золотом концентрируется в хвостах промывки. Остальные россыпи не отработывались. Куларит в россыпях встречается в виде сростков и самостоятельных индивидов различной степени окатанности. Содержания оксидов РЗМ в куларите превышают для лантана, церия и неодима 30 %. Куларит в россыпях Куларского района концентрируется в различных классах крупности. Суммарное содержание РЗМ по классам превышает 7 кг/т, достигая 20 кг/т.

Значительные объемы редких металлов находятся в месторождениях бокситов, часто содержащих в виде сорбированных на глинистых минералах формах редкоземельные металлы, скандий. Содержания РЗМ в бокситах Тимана 33–1007 г/т, скандия — до 72,65 г/т (Сосьвинское). При условном бортовом содержании суммы  $P3Э+Y \geq 500$  г/т в корах выветривания выявлены рудные зоны со средними содержаниями от 532 до 2 616 г/т суммы  $P3Э+Y$  и зоны со средними содержаниями от 523 до 700 г/т суммы  $P3Э+Y$ .

В среднем по бокситам, вмещающим и подстилающим породам, средние содержания РЗО составляют 600 г/т, в максимуме достигая 3800–7900 г/т.

Сопоставление составов редкоземельных металлов в бокситовых рудах Тимана с китайскими месторождениями ионных руд показывает иное соотношение лантана-церия и остальных РЗЭ. По этим параметрам бокситы превосходят месторождение Ксанва, а от месторождения Лонгнан отличаются более разнообразным спектром тяжелых РЗЭ, на долю которых (с иттрием включительно) приходится 50 % от суммы. При переработке бокситов на глинозем практически весь объем редких металлов переходит в «красные шламы», формируя техногенные месторождения.

Потенциальным источником стратегических металлов могут стать и металлоносные нефти. Повышенные содержания рения характерны для высоковязких и полутвердых углеводородов (мальты, асфальтиты). В мальтах Ашальчинского месторождения в Татарстане отмечается 0,02 г/т рения. В битум-

ных разностях Мордово-Кармальского месторождения (Татарстан) содержание рения составляют 0,1 г/т. В тяжелых фракциях выявлены концентрации рения от сотых долей г/т до 2 г/т. При перегонке нефти часть рения концентрируется на катализаторах и может быть выделена. Значительные объемы вторичного рения России получают из этого источника. Нефти различных нефтеносных провинций России, независимо от возраста, часто содержат широкий спектр металлов (табл. 7). Несмотря на невысокие концентрации металлов, перспективность попутного получения редких металлов из металлоносных нефтей обусловливается значительными объемами переработки.

Таким образом, можно отметить, что российская минерально-сырьевая база критических редких металлов имеет все предпосылки (геологические, технологические и экономические) для создания отечественного конкурентоспособного редкометалльного производства, способствующего инновационному развитию России, в том числе за счет использования нетрадиционных источников минерального сырья.

Для восстановления и развития российской редкоземельной промышленности необходимо принять ряд неотложных мер в сфере организации производства развития минерально-сырьевой базы РМ, направленных на снижение фискальной нагрузки на производителей редкометалльной продукции, упрощение использования попутного и техногенного сырья.

Положительную роль в восстановлении редкометалльной отрасли должно сыграть создание предприятий полного цикла переработки редкометалльных руд от добычи до производства полного спектра продукции на основе частно-государственного партнерства (возможно с участием Госкорпораций).

Одним из приоритетов в государственной политике Российской Федерации должно стать становление и развитие редкометалльной и редкоземельной промышленности, интегрированной с отраслями производства конечной высокотехнологичной продукции, обеспечивающей устойчивое потребление редких металлов на начальных этапах становления производства. Но процесс этот должен быть обоюдным. В свою очередь, от недропользователей и производителей редких металлов необходимо повышение сортамента и качества производимых металлов и соединений при низком уровне отпускных цен.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Вялов, В.И. Рений в диктионемовых сланцах прибалтийского бассейна / В.И. Вялов, А.С. Балахонина, А.И. Ларичев, А.Х. Богомолов // Вестн. Моск. Ун-та. — Сер. 4. Геология. — 2013. — № 2. — С. 63–68.
2. Ключарев, Д.С. Рудное будущее горючих сланцев / Д.С. Ключарев, Соесоо Алвар // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 1. — С. 57–62.
3. Кременецкий, А.А. Содержание рения и других редких металлов в газах вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова) / А.А. Кременецкий, И.В. Чаплыгин // ДАН. — 2010. — Т. 430. — № 3. — С. 365–370.
4. Кременецкий, А.А. Стратегические редкие и рассеянные элементы в месторождениях цветных, черных и благородных металлов / А.А. Кременецкий, Д.С. Ключарев // В сборнике материалов Всероссийской конференции: Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования. ИГЕМ РАН 25–27 ноября 2015 г. — М.: ИГЕМ, 2015.
5. Левченко, Е.Н. Особенности учета запасов редких металлов / Е.Н. Левченко, Л.З. Быховский, И.Г. Спиридонов, Д.С. Ключарев // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 1. — С. 45–51.
6. Поплавко, Е.М. Особенности металлоносности горючих сланцев и некоторые предположения об их генезисе / Е.М. Поплавко, В.В. Иванов, В.С. Орехов // Геохимия. — 1978. — № 9. — С. 1411–1418.
7. Середин, В.В. Новый потенциально промышленный тип иттриевоземельной минерализации в Юго-Западном Приморье / В.В. Середин, А.А. Кременецкий, Г.Н. Трач, С.В. Коваленко, Е.Ф. Семенов // Разведка и охрана недр. — 2006. — № 9/10. — С. 37–42.
8. Чаплыгин, И.В. Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские острова): Автореферат дисс... к. геол.-мин. наук / И.В. Чаплыгин. — М.: ИГЕМ РАН, 2009.
9. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU COM/2017/0490 final.
10. Critical metals handbook Edited by Gus Gunn British Geological Survey 2014 by John Wiley & Sons, Ltd.
11. Fortier, S.M. Draft critical mineral list — Summary of methodology and background information / S.M. Fortier, N.T. Nassar, G.W. Lederer, Jamie Brainard, Joseph Gambogi and E.A. McCullough. — U.S. Geological Survey technical input document in response to Secretarial Order No. 3359: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1021, 15 p., <https://doi.org/10.3133/ofr20181021>.
12. Strategic and critical nonfuel minerals: problems and policy alternatives. The Congress of the United States Congressional Budget Office, August 1983.
13. Assessment of critical minerals: updated application of screening methodology. A Report by the Subcommittee on Critical and Strategic Mineral Supply Chains Committee on Environment, Natural Resources, and Sustainability National Science and Technology Council., 2018.

© Левченко Е.Н., Ключарев Д.С., 2020

Левченко Елена Николаевна // levchenko@imgre.ru  
Ключарев Дмитрий Сергеевич // sacsaul@gmail.com

УДК 622.631:624.121

Мальский К.С., Боровков Ю.А., Верчеба А.А.,  
Гурина К.М. (МГРИ-РГГРУ)

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПОРОД С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА КОНТУРА КАРЬЕРА

В статье рассматриваются вопросы по влиянию карьерной выемки рудной залежи на напряженно-деформированное состояние (НДС) и разупрочнение прибортовой

массива горных пород карьера для определения величины зоны разупрочнения пород, учитывающей рельеф контура карьера. Многие специалисты считают, что основными факторами, влияющими на показатели извлечения в прибортовой зоне, являются напряженно-деформированное состояние подрабатываемого подземными работами массива горных пород, их прочностные и деформационные характеристики. Анализ существующих методов определения устойчивых параметров камер показал, что они не учитывают такой фактор как контур поверхности откоса борта карьера, определяющий величину мощности зоны разупрочнения прибортового массива пород и этот факт приводит к увеличению потерь и разубоживанию отбитой руды. Рассмотрена задача о влиянии профиля карьера на величину зоны разупрочнения из-за разгрузки массива горных пород, расположенного в борту и под дном карьера. Приведена схема расчета величины зоны разупрочнения пород в борту и под дном карьера. **Ключевые слова:** карьер, прибортовой массив, горные породы, зоны разупрочнения, борт карьера, угол наклона борта, напряженно-деформированное состояние.

Malskiy K.S., Borovkov Yu.A., Vercheba A.A., Gurina K.M.  
(MGRI-RGGRU)

### DETERMINING THE SIZE OF THE BREEDING DEFENSE ZONE TAKING INTO ACCOUNT THE RELIEF OF THE CAREER CONTOUR

The article describes the impact of quarrying ore deposits on the stress-strain state and softening of the pit rock mass to determine the size of the zone of softening of rocks taking into account the relief contour of the carrier. Many experts believe that the main factors affecting the extraction rates in the instrument zone are the stress-strain state of the rock mass being mined by underground work, their strength and deformation characteristics. The analysis of existing methods for determining the stable parameters of the chambers showed that they do not take into account such a factor as the contour of the surface of the slope of the side of the quarry, determining the amount of power in the softening zone of the instrument rock mass and this fact leads to an increase in losses and dilution of the broken ore. The article describes the problem of the influence of the open pit profile on the size of the softening zone due to the unloading of the rock mass located on board and under the bottom of the pit. The scheme of calculating the size of the zone of softening of rocks in the board and under the bottom of the quarry is given. **Keywords:** career, instrument array, rocks, breeding zones, side of the career, bevel angle, stress-strain state.

При разработке месторождения извлечение руды из недр вызывает нарушение природного равновесия массива, которое выражается в сдвигении и горном давлении [2]. Эти геомеханические процессы осложняют добычу полезных ископаемых, создавая угрозу для безопасности горных работ, приводя к значительным потерям руды, вызывая разрушение конструктивных элементов систем разработки, а также повреждения