



ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# Производство редких и редкоземельных металлов из техногенного сырья в рамках экономики замкнутого цикла

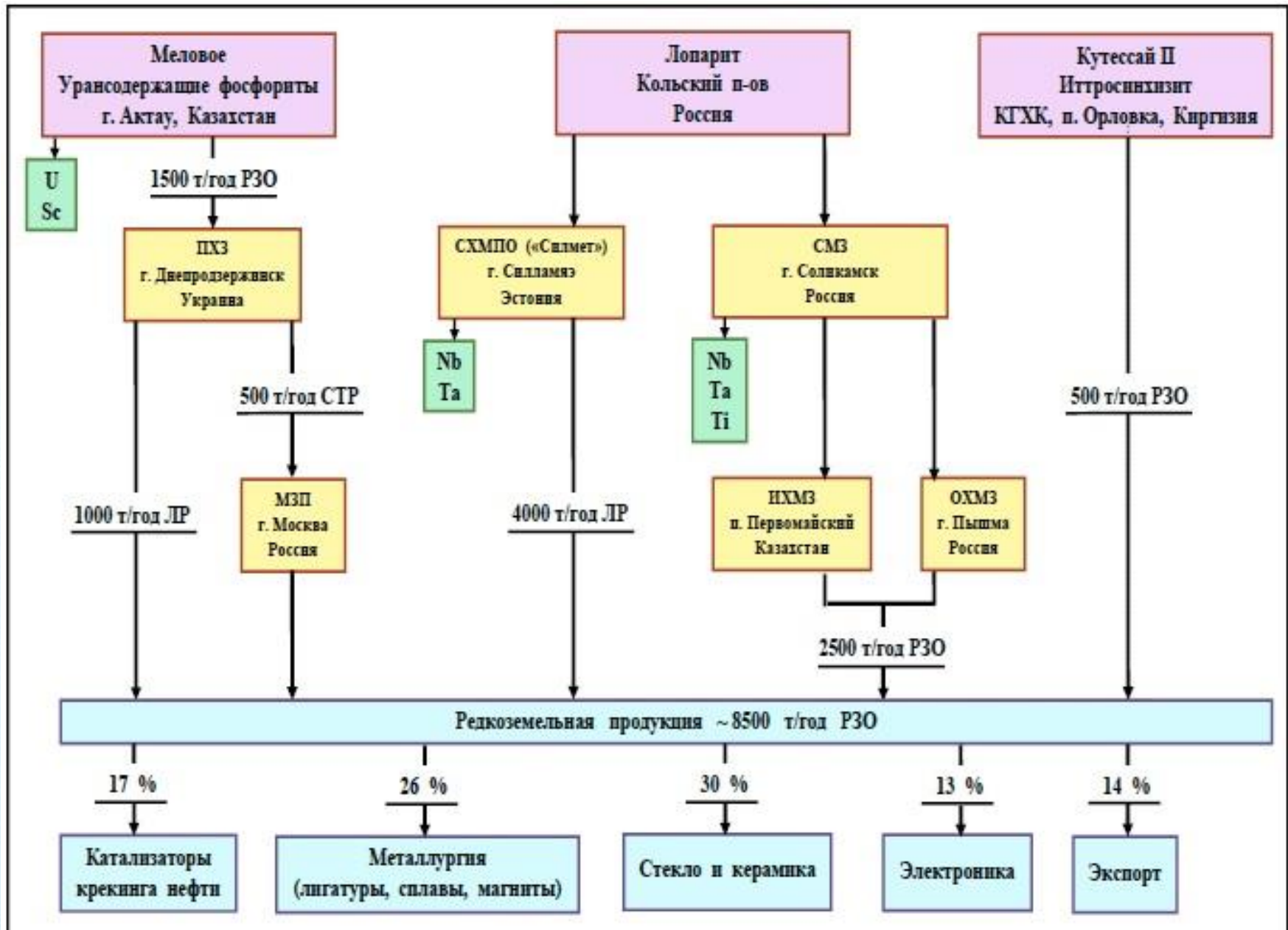
Маслобоев В. А., Черемисина О. В.,  
Литвинова Т. Е., Макаров Д. В.,  
Ключникова Е. М.

*01 июля 2025 г.*

До 1990 г. СССР занимал 2 место в мире по производству редких земель –8,5 тыс. т/год при потреблении 6 тыс. т, остаток направлялся на экспорт. В 2018 г. в РФ произведено 2,6 тыс. т продуктов РЗМ, импорт – 1,1 тыс. т (Китай и Эстония), экспорт – 2,6 тыс. т (Эстония).

Общемировое потребление редкоземельных элементов в пересчете на оксиды (РЗО) в 2020 г. – 230 тыс. т (2016 – 145, 2018 – 184 тыс. т) из них «магнитные» – Pr, Nd, Tb и Dy составили 42% по объёму и 93% по стоимости. В 2019 г., соответственно, 38 и 91%.

Прогноз - нарастающий дефицит на мировом рынке неодима и празеодима с 2022 г., диспрозия – с 2021 г., а тербий уже дефицитен с середины предыдущего десятилетия. В сравнении с 2020 к 2030 г. их потребление обещает вырасти в 2 раза.



# Rare Earth Elements (REE)



- Mining and Beneficiation of REE-Mineral Raw Materials
- Processing of REE-Concentrates to Metals and Compounds



## Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла»

В рамках перехода на экономику замкнутого цикла **Правительство ставит цель** к 2030 году добиться, чтобы отходы недропользования стали вторичным материальным ресурсом с помощью применения соответствующих технологий

**Спрос горнопромышленных предприятий** на новые технологии переработки минерального сырья, более энерго- и ресурсоэффективные, с минимальными выбросами загрязняющих веществ вообще и парниковых газов в частности

**Задача:** разработать граничные условия и подходы к созданию технологий переработки минерального сырья в арктических условиях в рамках концепции замкнутого цикла.

## **12 принципов циркулярной гидрометаллургии (KU Leuven)**

1. Регенерация реагентов
2. Замыкание водных контуров (полный водообмен)
3. Предотвращение отходов на всех технологических стадиях
4. Максимально эффективное использование массы, энергии, пространства и времени
5. Интегрирование потоков материалов и энергии
6. Безопасная утилизация потенциально вредных элементов
7. Снижение энергии активации
8. Электрифицировать процессы, где это возможно
9. Использовать безвредные химикаты
10. Сократить разнообразие химических веществ
11. Внедрение анализа в реальном времени и цифровое управление процессами
12. **Сочетание циркулярной гидрометаллургии с безотходной добычей полезных ископаемых**

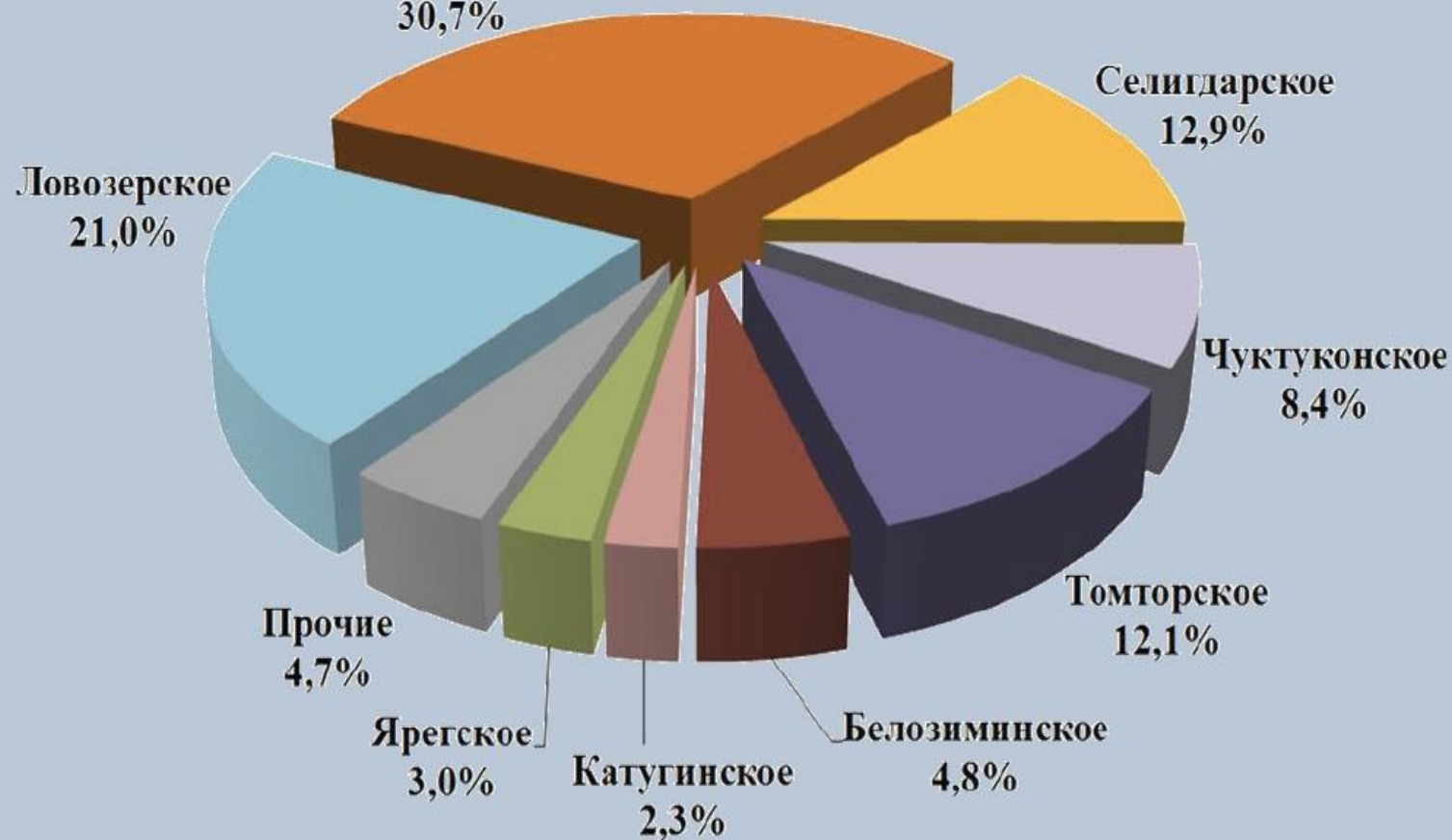
# Локализация месторождений, содержащих РЗЭ и скандия, в России



# Структура запасов редкоземельных металлов России по состоянию на 01.01.2019 г.

Запасы кат. А+В+С<sub>1</sub>+С<sub>2</sub> составляют ~34 млн т TR<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

9 хибинских  
месторождений  
30,7%



По разведанным запасам редкоземельных металлов (РЗМ) Россия занимает второе место в мире (~ 28 млн. тонн Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Все 16 месторождений, учтенных Государственным балансом запасов полезных ископаемых, являются комплексными, где РЗМ либо являются сопутствующими компонентами (9 месторождений апатита, 1 - титана), либо одним из основных (6 комплексных месторождений Nb-Ta, Ln).





Обоснование использования междисциплинарного подхода:

восстановление и развитие редкометалльной отрасли в рамках экономики замкнутого цикла

Анализ Минпромторга РФ (2019 г.) по внутреннему рынку РЗМ в России

**Необходимость восстановления и развития редкометалльной отрасли стала очевидной и для России.**

**В 2018 г. в РФ произведено 2,6 тыс. т продуктов РЗМ, импорт – 1,1 тыс. т (Китай и Эстония), экспорт – 2,6 тыс. т (Эстония).**

**Общемировое потребление редкоземельных элементов в пересчете на оксиды (РЗО) в 2020 г. – 230 тыс. т (2016 – 145, 2018 – 184 тыс. т) из них «магнитные» – Pr, Nd, Tb и Dy составили 42% по объёму и 93% по стоимости. В 2019 г., соответственно, 38 и 91%.**

## ГАЗО-, НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА



### ПРИМЕНЕНИЕ: *La, Ce, Nd, Pr*

- катализаторы;  
**9** предприятий.  
**593,5** тонн РЗМ

## ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА



### ПРИМЕНЕНИЕ:

***Gd, Er***  
- выгораемые добавки в оксидном урановом топливе реакторов ВВЭР и РБМК;  
**Госкорпорация «Росатом»**  
**9,7** тонн РЗМ

## МЕТАЛЛУРГИЯ



### ПРИМЕНЕНИЕ: : *La, Ce, Nd, Er, Dy, La, Sc, Y*

- сплавы для транспортного машиностроения;  
- сплавы для применения в нефтегазовой отрасли.

**25** предприятий.  
**155,6** тонн РЗМ

## ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ



### ПРИМЕНЕНИЕ: *Nd, Dy, Pr, Sm, Gd, Tb*

- постоянные магниты.  
**5** предприятий. **19,6** тонн РЗМ.

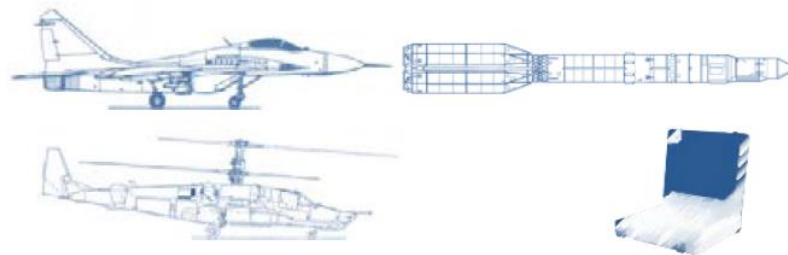
## СТЕКОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ



**ПРИМЕНЕНИЕ: *La, Ce, Nd***  
- в качестве добавки при изготовлении стекла;  
- полировка оптических стекол

**10** предприятий.  
**97,3** тонн РЗМ

## ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС



### ПРИМЕНЕНИЕ:

- датчики момента навигационных систем (гироскопы, акселерометры). РЗМ:  
- жаропрочные сплавы для военного двигателестроения. РЗМ:  
- постоянные магниты. РЗМ:  
- лазеры. РЗМ:  
- оптические системы (полировочные пасты). РЗМ:  
- никель-металлогидридные батареи. РЗМ:  
- люминофоры. РЗМ:

**153** предприятия

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЗ-МАГНИТОВ В РФ

Российский рынок РЗ-магнитов к 2030 году составит более 3 000 тонн, производство которых должно быть локализовано\* на территории РФ



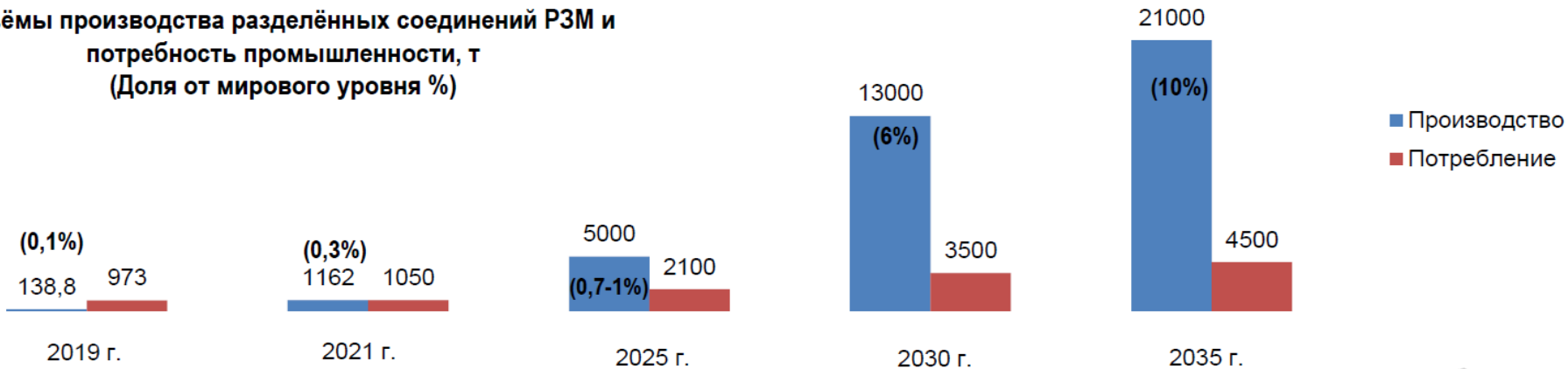
**0,8 – 1,0 тыс. тонн в год**  
Ветроэнергетика

**1,4-1,8 тыс. тонн в год**  
Электротранспорт

**0,6 – 0,8 тыс. тонн в год**  
Прочее

\*Требование Постановления правительства РФ №719 от 17.07.2015 г.

**Объёмы производства разделённых соединений РЗМ и  
потребность промышленности, т  
(Доля от мирового уровня %)**



**Действующие производства**



**Создаваемые производства**



## Возможное производство товарной продукции при освоении комплексных редкометалльных месторождений

Месторождение	Мощность переработки руд, тыс. т/год	Выпуск товарной продукции, т/год				
		TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	другая продукция
Ловозерское	500	3300	70	870	-	TiO <sub>2</sub> - 4200
Катугинское	600	1370	62	1150	-	ZrO <sub>2</sub> - 6900
Томторское (уч. Буранный)	150	14650	-	4500	~20	-
Чуктуконское	100	4030	-	720	~2,5	MnO <sub>2</sub> - 7180
Зашихинское	1020	360	180	2025	-	ZrO <sub>2</sub> - 3240
<b>Итого</b>	<b>2370</b>	<b>23710</b>	<b>312</b>	<b>9265</b>	<b>~22,5</b>	

# ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РЗМ В РОССИИ

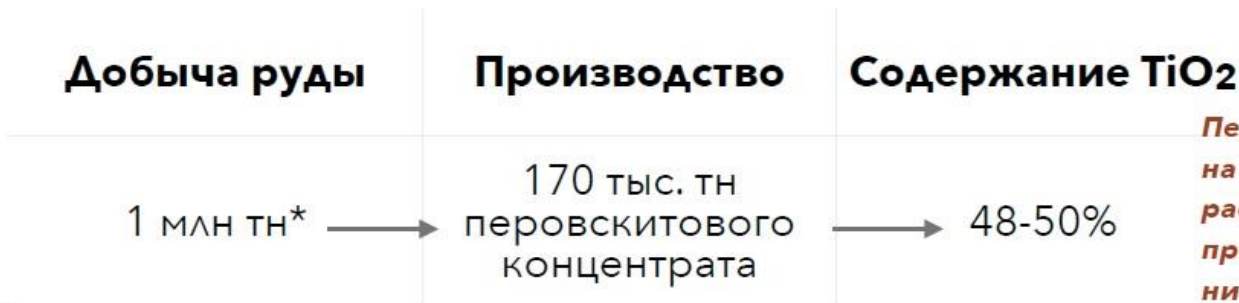
	СПРОС тонн, к 2028 г.	ПРЕДЛОЖЕНИЕ тонн		
		СМЗ	ФОСФОГИПС**	ТОМТОР
La	600	625	270	3 800
Ce	111	1 287	430	7 700
Nd	500	315	150	2 300
Pr	125	119	50	720
SEG	20*	35	100	1 480
<b>ИТОГО</b> тонн	<b>2 000</b>	<b>2 382</b>	<b>1 000**</b>	<b>16 000</b>

\* В виде Sm, Gd, Dy и т.д.

\*\* При переработке 300 тыс. тонн в год

# Африкандское перовскит-титаномагнетитовое месторождение, Мурманская обл.

## ➤ 1-й этап: горно-обогатительный комбинат



\* Базовая годовая производительность

*Перспективный 3-й этап – создание на базе предприятия рафинировочного комплекса для производства высокочистых ниобия, тантала и редкоземельных металлов.*



## ➤ 2-й этап: химико-металлургический комплекс



\* Производственные мощности и пропускная способность инфраструктуры позволят перерабатывать до 5 млн тн руды в год и производитькратно больше готовой продукции без существенных дополнительных затрат

## Характеристика основной продукции при переработке 45 тыс.т в год ПК

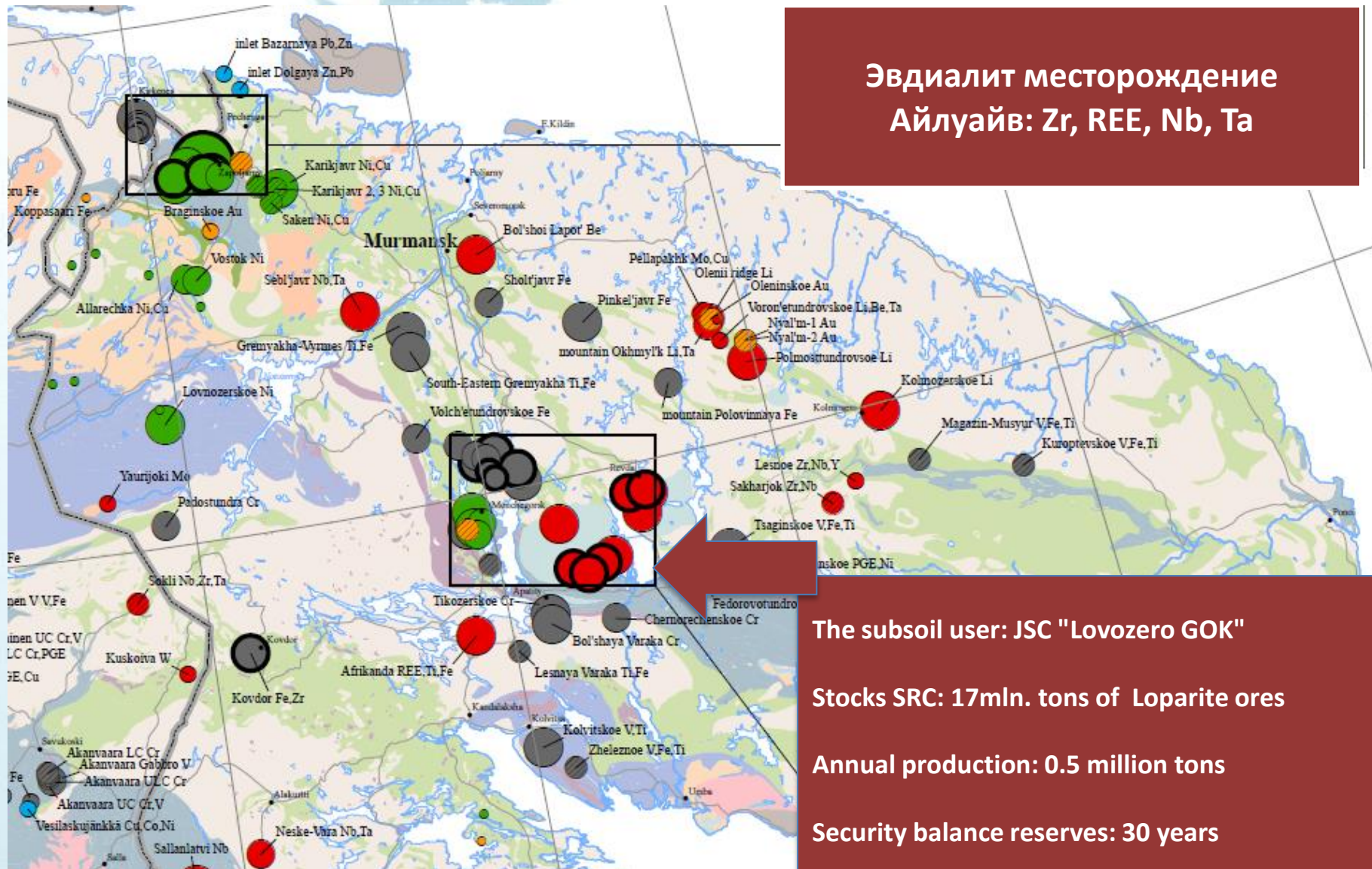
Продукт	Выход кг с 1т ПК	Кол-во, т в год	Цена за 1т, долл. США	Общая стоимость, млн долл. США
Пигментный $TiO_2$	445	20000	1800	36.00
$Nb_2O_5$	10	450	17000	7.65
$Ta_2O_5$	0.3	13.5	110000	1.485
Карбонаты РЗМ	25*	1125*	2000*	2.25
Титаногипс	200-1300		-	**
Железо-ториевый кек	10-50	450-2250	-	***
<b>Итого</b>				<b>47.385</b>

\* в пересчете на  $Ln_2O_3$

\*\* титаногипс сбрасывается в хвостохранилище. В будущем может использоваться в составе вяжущих, в производстве наполнителей и др. областях.

\*\*\* железо-ториевый кек ( $ThO_2 \sim 8\%$ ) на захоронение. В будущем предполагается выделение тория и его использование в ядерной энергетике.

# Основные источники РМ и РЗЭ – Ловозерская группа месторождений: Та - Nb - РЗЭ



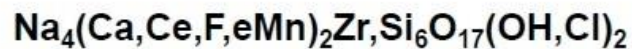
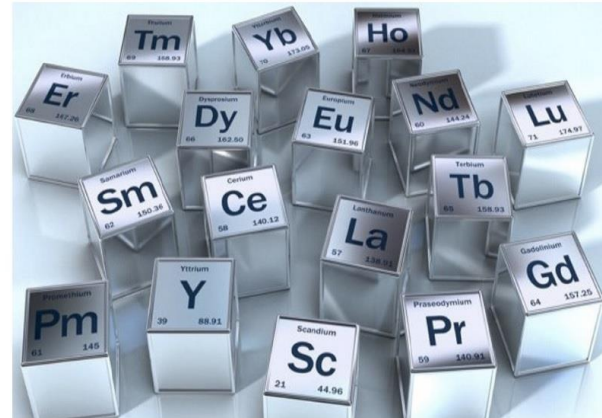
Эвдиалит месторождение  
Айлуайв: Zr, REE, Nb, Ta

The subsoil user: JSC "Lovzero GOK"  
Stocks SRC: 17mln. tons of Loparite ores  
Annual production: 0.5 million tons  
Security balance reserves: 30 years

*Относительное содержание РЗЭ легкой, средней и тяжелой групп, иттрия и церия в минеральном сырье РФ*

Месторождение	Апатит	Лопарит	Эвдиалит	Томтор	Катугинское	Монацит Красноуф.
<b>Относительное содержание, в %</b>						
Легкая группа РЗЭ: La, Ce, Pr, Nd	88,9	98,0	58,8	90,0	21,7	93,6
Средняя группа РЗЭ: Sm, Eu, Gd	4,5	1,54	9,4	3,62	10,6	3,3
Тяжелая группа РЗЭ: Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	1,73	0,60	10,8	2,14	22,5	1,65
Иттрий Y	4,9	0,008	21,0	4,21	45,2	1,4
Церий Ce	42,8	53,0	29,1	47,7	9,5	43,0

# Принципиальная схема вскрытия эвдиалитового концентрата\*



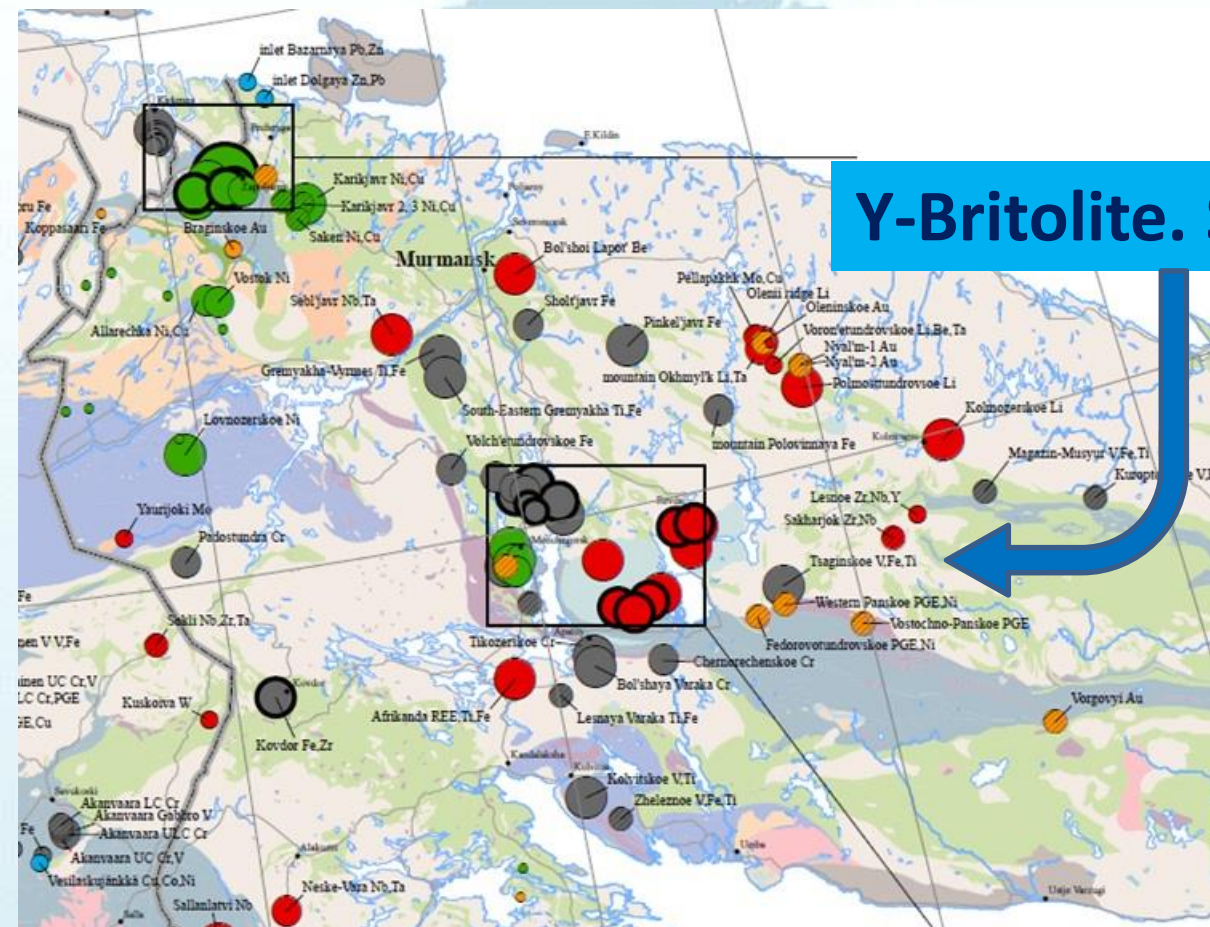
# The sources of REE for "rapid development" in framework of Kola Chemical-Technological Cluster

## Y-Britolite. Sakharyok Deposit

Ore composition, mass. %:

- Albite – 43.27
- Microcline – 22.00
- Nepheline – 11.00
- Eugirine – 15.30
- Biotite – 3.1
- Fluorite – 1.10
- Zircon – 0.85
- Y-Britolite – 0.25%

**3 commercial concentrates: Fluorite, Zircon and Y-Britolite**

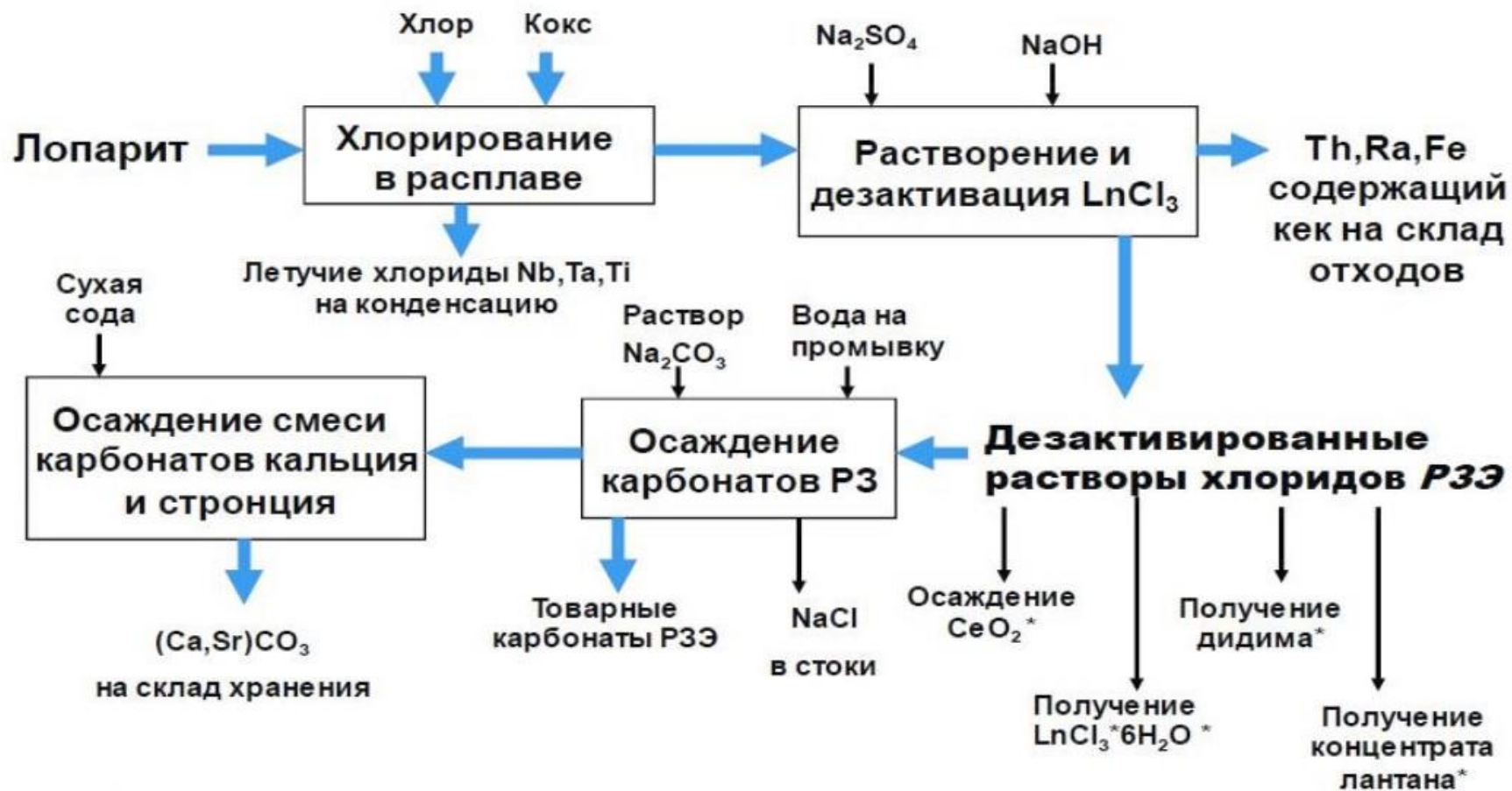


# Возможный выпуск редкоземельной продукции из различных источников РФ

ОБЪЕКТ	СОДЕРЖАНИЕ TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %		ЗАПАСЫ TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		МОЩНОСТЬ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ РУД/СЫРЬЯ, тыс. т/год	ВОЗМОЖНЫЙ ВЫПУСК ПРОДУКЦИИ В ГОД	
	в руде/ сырье	в концентрате	кат. В+С <sub>1</sub> +С <sub>2</sub> , тыс. т	доля от РФ, %		TR <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , тыс. т	Прочие редкие металлы
<b>СОБСТВЕННО РЕДКОМЕТАЛЛЫНЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ</b>							
Ловозерское	1,21	31	7180,8	21,7	500	3,3	70 т Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 870 т Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Катугинское	0,37	15	791,8	2,4	600	1,4	62 т Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 1150 т Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 6900 т ZrO <sub>2</sub>
Чуктуконское	4,75		2862,3	8,6	100	4,0	720 т Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 3 т Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в 0,11% концентрате
Томторское, уч. Буранный	10,59		3232,9	9,7	150	13,5	4520 т Nb в феррониобии, 34 т Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в 6% концентрате
<b>КОМПЛЕКСНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С ПОПУТНЫМИ РЗМ</b>							
Хибинские апатиты, всего	0,31	1,1	10473,8	31,6	8000	34,0	57 тыс. т SrO
– по сернокислотной схеме					7000	28,0	
– по азотнокислотной схеме					1000	6,0	
Белозиминское (КВ)	0,90	46	1645,9	5,0	3600	6,0	5200 т Nb в феррониобии
Запихинское	0,07	2,2	44,4	0,1	1020	0,1	220 т Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 2300 т Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 3500 т ZrO <sub>2</sub>
<b>ТЕХНОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ</b>							
Кулариты	0,28	53	12,9	0,04	1073	2,3	–
<b>ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ</b>							
Фосфогипс	0,45	60	–	–	1000	2,0	–
Красные шламы	0,21	–	–	–	1500	0,6	36 т Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 9 т Ga, 4200 т Ti-Zr концентрата
<b>ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕЗЕРВ</b>							
Монацит	–	54	–	–	8	4,0	–
<b>ИТОГО</b>						<b>71,2</b>	

**Возможное производство редкоземельных продуктов – до 70-80 тыс. т Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Но рынка для них нет.**

# Переработка лопаритового концентрата на Соликамском магниевом заводе (СМЗ)





**Обоснование использования междисциплинарного подхода:  
восстановление и развитие редкометалльной отрасли в рамках экономики замкнутого  
цикла**

**Наиболее перспективны для производства редких земель отвалы фосфогипса – отхода производства минеральных удобрений (Воскресенск, Балаково, Череповец, Мелеуз, Волхов, Уварово). Накопленное количество фосфогипса при перерабатывающих предприятиях колеблется от 10 до 80 млн т (суммарно в России – не менее 200 млн т).**

**Себестоимость группового концентрата РЗМ около \$7-10/кг, технология рентабельна только при комплексной переработке фосфогипса в строительные материалы (по данным ГК «Скайград» и «Русредмет».)**

# Отвалы фосфогипса

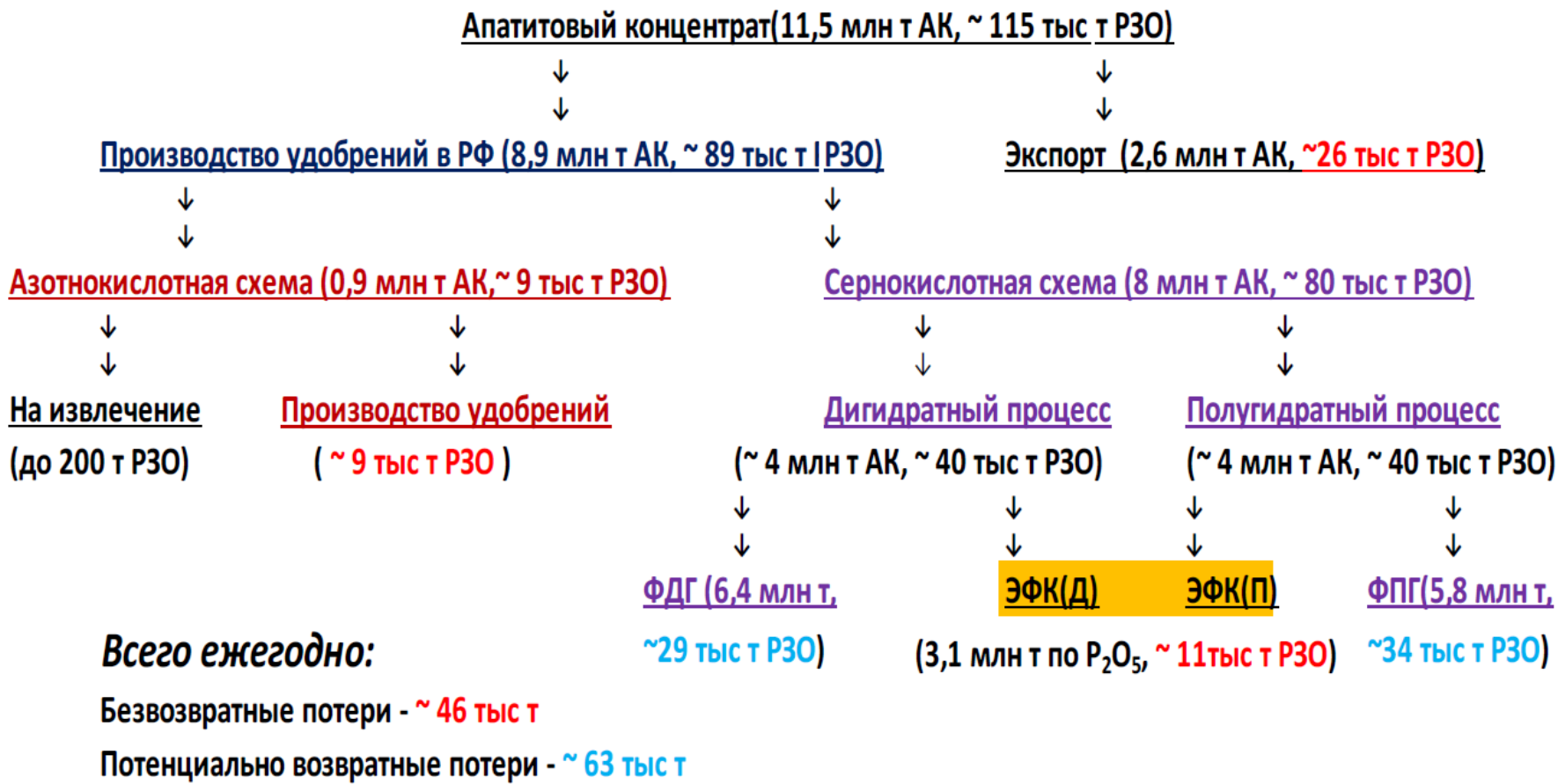


Отвалы фосфогипса Гомельского химического завода



Обоснование использования междисциплинарного подхода:  
восстановление и развитие редкометалльной отрасли в рамках экономики замкнутого цикла

## Распределение РЗЭ в процессах производства удобрений из апатитового концентрата



## Возможности переработки фосфогипса (ФГ) в РФ и Белоруссии

Регион	Запасы ФГ, млн. т.	Макс. потребность по гипсовому камню цементных и гипсовых производств (тыс.тонн)	Возможности по выделению РЗМ при полном переходе на комплексную переработку ФГ взамен природного гипса, (тонн)
А. Северо-западный ФО	25-30	300	1 200
Б. Центральный ФО	80-100	3 165	12 660
В. Приволжский ФО	80	1 230	4 920
Г. Южный (Кавказский) ФО	60	490	1 960
Д. Белоруссия	80	330	1 320
<b>ВСЕГО</b>	<b>325 - 350</b>	<b>5 475</b>	<b>22 100</b>

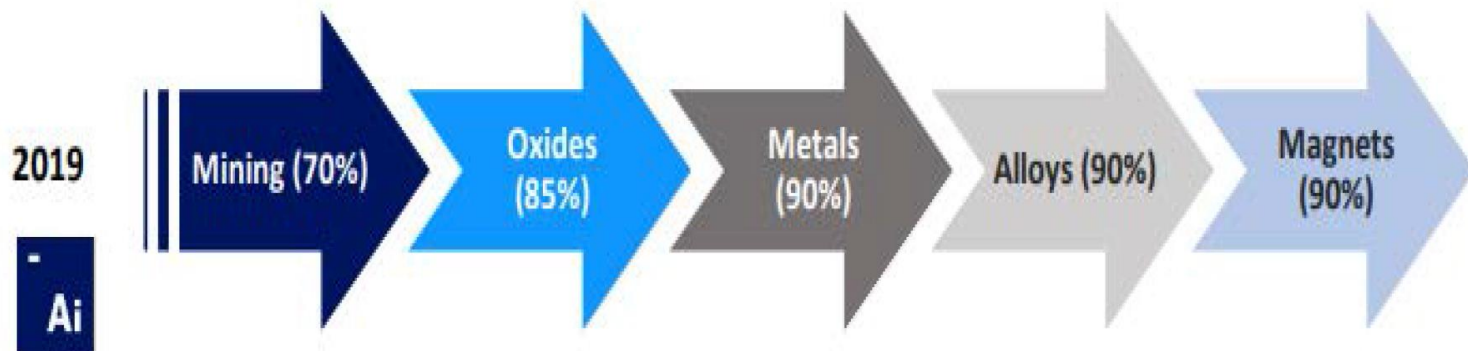


**Обоснование использования междисциплинарного подхода:  
восстановление и развитие редкометалльной отрасли в рамках экономики замкнутого  
цикла**

***Возможное производство редкоземельных продуктов – до  
70-80 тыс. т РЗ-оксидов. Но рынка для них нет.***

Опыт Китая наглядно показывает, что производство редкоземельных продуктов только тогда станет устойчивым, когда внутренний рынок их потребления составит не менее 70% от общего производства.

**Доля Китая в производстве различных видов редкоземельной  
продукции**



Source: Adamas Intelligence

# Структура потребления РЗМ в Китае, %





## Обоснование использования междисциплинарного подхода: восстановление и развитие редкометалльной отрасли в рамках экономики замкнутого цикла

### Выводы:

- **Комплексная переработка фосфогипса на РЗМ, мелиоранты, строительные материалы и материалы для дорожного строительства – ключ к решению проблемы восстановления и развития редкометалльной отрасли России в рамках экономики замкнутого цикла.**
- **Чтобы все заработало необходимо разработать территориальную схему экономически эффективных производств, где есть спрос и на РЗМ и на строительные материалы.**
- **Для этого необходимо сформировать рынок строительных материалов на основе фосфогипса.**
- **Вовлечь население и строительные компании в использование продуктов из фосфогипса (создать новые, востребованные обществом материалы!).**

**Чтобы осуществить данный проект необходима общая работа технологов, экономистов, социологов и маркетологов на основе междисциплинарного подхода.**



**В 2023 г. в РФ произведено 2,1 тыс. т продуктов РЗЭ 2-го технологического предела (групповые карбонаты РЗЭ), но 95% этого объема экспортировано за рубеж из-за отсутствия в стране крупнотоннажных перерабатывающих (разделительных) производств. При этом импорт РЗЭ составил 1,4 тыс. т (из Китая) — в форме продукции 3-го, 4-го и следующих переделов (разделенные оксиды, металлы, сплавы, магниты).**

## **Заключение\_1**

- 1. Кольский полуостров обладает высоким потенциалом редкоземельных ресурсов для удовлетворения потребностей высокотехнологичных отраслей промышленности.**
- 2. Перспективными крупномасштабными месторождениями являются апатитовые месторождения как источники легких РЗЭ.**
- 3. Месторождение эвдиалита (Аллуайв) является уникальным по мощности источником тяжелых РЗЭ, циркония, ниобия и тантала.**
- 4. Для "быстрого развития" редкометалльной промышленности в России наиболее перспективными являются месторождение перовскита Африканда (легкие РЗЭ, пигментный диоксид титана, ниобий, тантал) и месторождение Сахарйок (У-бритолит, циркон, флюорит).**

**Но, нужно торопиться!**

**В связи с введением Китаем экспортных квот на редкоземельные элементы для защиты внутреннего рынка, в развитых странах подготовлено к эксплуатации более сорока новых месторождений РЗЭ (см. следующий слайд) с планируемым объемом производства свыше 180 тыс. тонн РЗ-оксидов в год.**

**Не доведены до промышленного использования наши исследования по применению ионной флотации для извлечения РЗЭ из полупродуктов переработки апатита на комплексные удобрения:**

**1. Азотнокислотная технология (канд.дисс. Ю.А.Вершковой, ИХТРЭМС, 2000 г.)**

Установлено, что наиболее эффективным собирателем для флотационного извлечения РЗЭ из технологических азотно-фосфорнокислых растворов является полифос-124  $((C_{12},H_{2n+1}O)_2POOH$ , где  $n=12+14$ ). позволяющий получить необводненный пенный продукт при приемлемых расходе, степени извлечения коллигенда и селективности.

**2. Сернокислотная технология (канд.дисс. А.В.Вершкова, ИХТРЭМС, 2000 г.)**

Найдены оптимальные условия извлечения лантаноидов из серно-фосфорнокислых растворов, образующихся при переработке апатитового концентрата на экстракционную фосфорную кислоту и кислотном выщелачивании фосфогипса, методом ионной флотации с использованием ПАВ, относящихся к классу диалкилфосфорных кислот  $(C_nH_{2n+1}O)_2POOH$ , где  $n=12 \square 14$ .

## Major REE Projects in Development

Project	Country/Region	Operators	Capex (US\$ million)	Production year	Rare earth capacity (kt)
Mountain Pass	US	Molycorp Minerals	895	2012	40
Mount Weld	Australia	Lynas Corp	1,034	2012	22
New Monazite processing plant	India	Indian Rare Earth Limited	NA	2012	10
Steenkampskraal	South Africa	Great Western minerals group	NA	2013	5
Dubbo Zirconia	Australia	Alkane Resources	759	2014	7
Kvanefjeld	Greenland	Greenland Minerals & Energy Ltd	1,535	2015	41
Nolans Bore	Australia	Arafura Resources	903	2015	20
Zandkopsdrift	South Africa	Frontier Rare Minerals	938	2015	20
Nechalacho	Canada	Avalon Ventures Ltd	884	2015	10
Bear Lodge	US	Rare Element resource	446	2016	10
Hoidas Lake	Canada	Great Western minerals group	NA	2016	3-5
Strange Lake	Canada	Quest Rare Minerals	548	2017	12

KPMG analysis, 2012

## **Заключение\_2**

-Следует отметить устойчивую глобальную тенденцию перехода от бастнезита и монацита к щелочным циркониевым силикатам типа эвдиалита:

- Агпайтовый нефелин-сиенитовый комплекс Норра Кярр, Швеция (Tasman Metals Ltd.)

- Интрузия Илимауссак в Южной Гренландии, включающая несколько месторождений Кванефельд (U, LREE, Zn), ТАНБРИЗ (HREE, Zr, Nb, Ta, полевой шпат) и др.

- Месторождение Тунги. Циркониевый проект Даббо, Alkane Resources Ltd., Австралия

- месторождение Нехалачо, Канада, Avalon Ventures Ltd (нефелиновые сиениты) и др.

Отличительная особенность всех перечисленных месторождений редкоземельного сырья – отсутствие или незначительное содержание в рудах естественных радионуклидов, что существенно облегчает их переработку.

A serene sunset scene over a body of water. The sun is low on the horizon, partially obscured by the silhouettes of tall trees on the left. The sky is a mix of orange, red, and yellow, with some light clouds. The sun's reflection is clearly visible on the water's surface, creating a shimmering path. In the foreground, there are dark rocks and more trees. The overall mood is peaceful and beautiful.

*Спасибо за внимание!*