

**«Стратегическое, дефицитное и критическое минеральное сырьё»
(Редкоземельные элементы)**



Ерёмин Николай Иосифович
Геологический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова

Общие сведения

- Редкоземельные элементы/металлы (*Rare Earth Elements/Metals*) объединяют **La** (порядковый No 57) и следующие за ним 14 элементов от **Ce** No 58 до **Lu** No 71 – *лантаноидов*, а также **Y** и **Sc**, расположенные в той же III группе периодической системы Менделеева. Сходное строение наружных электронных оболочек их атомов обуславливают близость их химических свойств и их совместное нахождение в природных минералах. Лантаноиды из-за своеобразного строения их атомов и особой близости химических свойств выделены в периодической системе в отдельный ряд и разделены на две подгруппы: *цериевую*, куда относятся **La, Ce, Pr, Nd** и **Sm, Eu**, и *иттриевую*, в которую входят **Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb** и **Lu**.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																Энергетические уровни		
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			a	
		a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	a	б	б				
1	1															He Гелий 4,003	2	K		
2	2	Li Литий 6,941	Be Бериллий 9,0122		B Бор 10,811	C Углерод 12,011	N Азот 14,007	O Кислород 15,999	F Фтор 18,998								Ne Неон 20,179	10	Kг	
3	3	Na Натрий 22,99	Mg Магний 24,312	Al Алюминий 26,982		Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,974	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453								Ar Аргон 39,948	18	Kг-М	
4	4	K Калий 39,102	Ca Кальций 40,08	Sc Скандий 44,956		Ti Титан 47,88	V Ванадий 50,942	Cr Хром 51,996	Mn Марганец 54,938	Fe Железо 55,847	Co Кобальт 58,933	Ni Никель 58,71						Kr Криптон 83,8	36	Kг-М-К
	5	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,72	Ge Германий 72,59	As Мышьяк 74,922	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904												
5	6	Rb Рубидий 85,468	Sr Стронций 87,62	Y Иттрий 88,906		Zr Цирконий 91,22	Nb Ниобий 92,906	Mo Молибден 95,94	Tc Технеций [99]	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,906	Pd Палладий 106,4						Xe Ксенон 131,3	54	Kг-М-К-Р
	7	Ag Серебро 107,868	Cd Кадмий 112,41	In Индий 114,82	Sn Олово 118,69	Sb Сурьма 121,75	Te Теллур 127,6	I Иод 126,905												
6	8	Cs Цезий 132,905	Ba Барий 137,34	57-71 Лантаноиды		Hf Гафний 178,49	Ta Тантал 180,948	W Вольфрам 183,85	Re Рений 186,207	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,22	Pt Платина 195,09						Rn Радон [222]	86	Kг-М-К-Р-Ф
	9	Au Золото 196,967	Hg Ртуть 200,59	Tl Таллий 204,37	Pb Свинец 207,19	Bi Висмут 208,98	Po Полоний [210]	At Астат [210]												
7	10	Fr Франций [223]	Ra Радий [226]	89-103 Актиноиды		104 Rf Резерфордий [261]	105 Db Дубний [262]	106 Sg Сиборгий [263]	107 Bh Борий [262]	108 Hn Ханий [265]	109 Mt Мейтнерий [268]	110								
ВЫСШИЕ ОКСИДЫ		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄											
ЛЕТУЧИЕ ВОДОРОДНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR												



Д.И. Менделеев
1834–1907



- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

ЛАНТАНОИДЫ

57 La Лантан 138,906	58 Ce Церий 140,12	59 Pr Празеодим 140,908	60 Nd Неодим 144,24	61 Pm Прометий [145]	62 Sm Самарий 150,4	63 Eu Европий 151,96	64 Gd Гадолиний 157,25	65 Tb Тербий 158,926	66 Dy Диспрозий 162,5	67 Ho Гольмий 164,93	68 Er Эрбий 167,26	69 Tm Тулий 168,934	70 Yb Иттербий 173,04	71 Lu Лютеций 174,97
----------------------------	--------------------------	-------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	----------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac Актиний [227]	90 Th Торий 232,038	91 Pa Протактиний [231]	92 U Уран 238,029	93 Np Нептуний [237]	94 Pu Плутоний [244]	95 Am Америций [243]	96 Cm Кюрий [247]	97 Bk Берклий [247]	98 Cf Калифорний [251]	99 Es Эйнштейний [254]	100 Fm Фермий [257]	101 Md Менделевий [258]	102 No Нобелий [259]	103 Lr Лоуренсий [260]
---------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------

poiskN1.RU

REE (Rare Earth Elements)

РЗЭ (РЗМ) Редкоземельные и близкие к ним элементы (семейство лантаноидов – «4f-элементов»)

57 – La, лантан (*Lanthanum*)

59 – Pr, празеодим (*Praseodymium*)

61 – Pm, прометий (*Promethium*)

63 – Eu, европий (*Europium*)

65 – Tb, тербий (*Terbium*)

67 – Ho, гольмий (*Holmium*)

69 – Tm, тулий (*Thulium*)

71 – Lu, лютеций (*Lutetium*)

58 – Ce, церий (*Cerium*)

60 – Nd, неодим (*Neodymium*)

62 – Sm, самарий (*Samarium*)

64 – Gd, гадолиний (*Gadolinium*)

66 – Dy, диспрозий (*Dysprosium*)

68 – Er, эрбий (*Erbium*)

70 – Yb, иттербий (*Ytterbium*)

а также:

39 – Y, иттрий (*Yttrium*) и 21– Sc, скандий (*Scandium*)

Цериевые РЗЭ (легкие): La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu

Иттриевые РЗЭ (тяжелые): Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

- По суммарной распространенности в земной коре РЗМ в десятки раз превосходят такие металлы, как Мо и W, однако капитальные затраты на их добычу относительно высоки (порядка 40 тыс. долл. за тонну). РЗМ используются в виде смесей и по отдельности в металлургии (легирующие добавки в сталях и сплавах), для изготовления магнитных материалов, в радиоэлектронике, атомной технике, машиностроении, химической (специальные стекла) промышленности и пр. Растет спрос на отдельные из них, а также на Y (в частности, в качестве люминофора для цветного телевидения).
- В докладе Пентагона по стратегическим и критическим материалам за 2013 год Sc и еще 5 РЗЭ: Dy, Y, Tb, Tm, Er включены в число дефицитных материалов. Одним из основных поставщиков Sc и др. критических РЗЭ для военной промышленности США и их союзников по НАТО является компания US Rare Earths, Inc (USRE) со штаб-квартирой в г. Плано (штат Техас).

Получение РЗМ

- Получение РЗМ - большей частью электролизом расплавленных солей или металлотермическими методами. Близость химических свойств лантаноидов позволяет на первых стадиях переработки сырья выделить их в форме смеси окислов.
- Разделение лантанидов требует сложных и прецизионных технологических процессов (многократные кристаллизации солей, ионообменные процессы, экстракция органическими растворителями и т.п.).

Геохимия РЗЭ

- Содержание РЗЭ в земной коре $2 \cdot 10^{-2}$ (по массе); по суммарной распространенности они превосходят Pb в 10 раз, Mo – в 50, W – в 165 раз.
- Для РЗЭ характерно их совместное нахождение в природных объектах, обусловленное близостью их химических свойств.
- Содержания РЗЭ и соотношения между ними в горных породах являются важной геохимической характеристикой последних, позволяющей устанавливать генетические связи между их отдельными представителями (спайдер-диаграммы).

Главнейшие промышленные минералы РЗЭ

Апатит, <i>apatite</i> – $(Ca, Ln)_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$ –	до 19%	оксидов РЗЭ
Алланит (ортит), <i>allanite</i> – $(Ca, Ln)_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$ –	30%	"
Бастнезит, <i>bastnasite</i> – $LnCO_3F$ –	76%	"
Браннерит, <i>brannerite</i> – $(U, Ca, Ln)(Ti, Fe)_2O_6$ –	6%	"
Гидроксил-бастнезит, <i>hydroxylbastnasite</i> – $LnCO_3(OH, F)$ –	75%	"
Ксенотим, <i>xenotime</i> – YPO_4 –	61%	"
Лопарит, <i>loparite</i> – $(Ln, Na, Ca)_2(Ti, Nb)_2O_6$ –	36%	"
онацит, <i>monazite</i> – $(Ln, Th)PO_4$ –	71%	"

Монацит $(\text{Ce,La})\text{PO}_4$



Монацит крупной фракции из проанализированных (партий концентрата, отобранного в хранилище ОАО «Уралмонацит» (по Г.А.Пелымскому и др., 2012). Средняя объемная доля монацита в концентрате – **78-97%**.. Концентрат в среднем содержит до **7,8% ThO_2** , а также преимущественно Ce –состав лантаноидов (%): La (13), Ce (23), Pr (3), Nd (11), Sm (1), Eu (0,1), Gd (0,6), Tb (0,4), Dy (0,2), Ho (0,05), Er (0,2), Tm (0,05), Yb (0,03), Lu (0,05), Y (0,8). Сод. Th уменьшается к периферии кристаллов.

Защитный ангар над обветшавшим хранилищем монацитового концентрата (по Г.А.Пельмскому и др., 2012).



Источником получения REE и тория в России могут быть *монацитовые концентраты* (82 тыс. т. складских запасов близ Красноуфимска, Свердловская обл.), доставлявшиеся в течение 50 лет из России, Монголии, Китая и Вьетнама и содержащие в ср. до **7,8% ThO₂**, а также преим. Се – состав лантаноидов (%): La (13), Ce (23), Pr (3), Nd (11), Sm (1), Eu (0,1), Gd (0,6), Tb (0,4), Dy (0,2), Ho (0,05), Er (0,2), Tm (0,05), Yb (0,03), Lu (0,05), Y (0,8).

Важнейшие области применения РЗЭ (примеры)

- **Нефтехимия** (катализаторы для оптимизации выделения светлых нефтепродуктов при крекинге нефти)
- **Металлургия** (мишметалл: 45-50% Ce, 20-25% La, 15-17% Nd, 8-10% др. REE как добавка в сталь, абсорбирующая в ней вредные O, S, P, что делает ее хладостойкой, жаропрочной, гибкой, более устойчивой и вязкой; для легирования Ti, Al и др. металлов).
- **Электроника** (мощные Sm-Co и Nd-Fe-B магниты)
- **Полупроводники** (легирование кремния)
- **Стекольное, керамическое и оптическое производство** (полирит – оксид церия – производство жидкокристаллических дисплеев, светочувствительных стекол, полировки зеркал, оптических линз с селективным светопропусканием и высоким преломлением)
- **Производство монокристаллов** для твердотельных лазеров ОКГ, специальных покрытий для защиты от радиации, использование в люминофорах, компонентах аудиосистем
- **Ядерная энергетика** (добавки в регулирующие стержни и в топливо для ядерных реакторов)
- **Медицина** (нейтронозахватная терапия для лечения в онкологии; как маркеры)
- **Автомобилестроение, оборонная, аэрокосмическая и др. инновационные отрасли промышленности** (Пример: для одного гибридного автомобиля требуется около 10 кг РЗМ – в основном в моторе и в аккумуляторной батарее).

Потребление и мировое рудничное производство РЗМ

Потребление РЗМ бурно растет. В 1980 году в мире добывалось 25 тыс. тонн (в пересчете на оксиды). К 2010 году эта цифра выросла в пять раз – 125 тыс. тонн; в 2018 году она составила 170 тыс. тонн. При современных темпах развития технологий через несколько лет потребуется не менее 200-225 тыс. тонн РЗМ.

В Китае рудничное производство РЗМ в первой половине 2018 года составило 73,5 тыс. тонн (в пересчете на оксиды), во второй половине – 46,5 тыс. тонн (суммарно 120 тыс. тонн); по сравнению с 2017 годом оно увеличилось на 14%.

Рудничное производство других стран в 2018 году: Австралия – 20 тыс. тонн; USA – 15; Мьянма – 5; Россия – 2,6; Индия – 1,8; Бразилия, Бурунди, Таиланд – по 1; Вьетнам – 0,4; Малайзия – 0,2. (данные USGS).

Мировые запасы (reserves) РЗМ (млн. тонн оксидов; данные USGS, 2020)

Китай – 44000 млн тонн;
Россия – 12000;
Австралия – 3400;
Малайзия – 30;

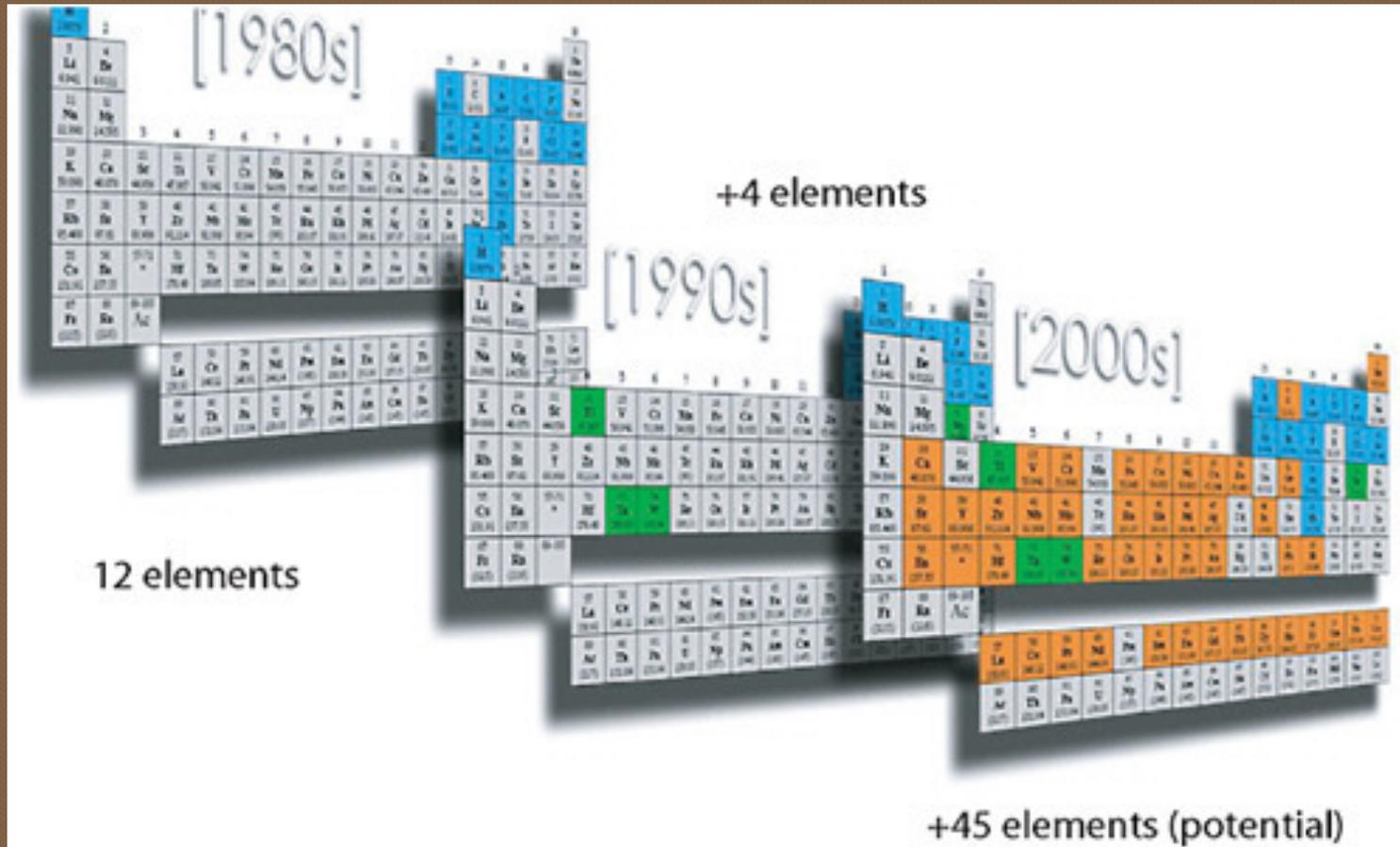
Бразилия и Вьетнам – по 22000;
Индия – 6900;
США – 1400;
другие страны – 4400;

Всего в мире запасов (округлено) – 120000.

Мировые ресурсы (resources) РЗМ (данные USGS, 2020)

Редкие земли (РЗМ) относительно распространены в земной коре. Но по сравнению с рудами других металлов их промышленные концентрации сравнительно редки. Основная доля их ресурсов приходится в первую очередь на четыре геологических типа их месторождений: карбонатитовый, в щелочных изверженных породах, ионно-адсорбционных глин и монацит-ксенотим-содержащих россыпей.

Карбонатитовые и россыпные месторождения являются ведущими источниками получения легких редкоземельных элементов. Ионно-адсорбционные глины – ведущий источник получения тяжелых редкоземельных элементов.



The dynamics of two decades of computer chip technology development and its mineral and element impacts. In the 1980s, computer chips were made with a palette of twelve minerals or their elemental components. A decade later, 16 elements were employed. Today, as many as 60 different minerals (or their constituent elements) may be used in fabricating the high-speed, high-capacity integrated circuits that are crucial to this technology. SOURCE: Used with permission from Intel Corporation.

Главнейшие генетические и геолого-промышленные типы месторождений РЗМ (REE) :

- ❑ *Магматический*
- ❑ *Полевошпатовые метасоматиты*
- ❑ *Карбонатитовый*
- ❑ *Ионно-адсорбционные глины*
- ❑ *Прибрежно-морские россыпи*
- ❑ *Осадочные фосфориты и органично-фосфатные образования*

- *Магматические месторождения* связаны с агпайтовыми нефелиновыми сиенитами (стратифицированный Ловозерский массив уртитов-фойяитов-луявритов с лопаритом; апатит-нефелиновые руды Хибинского плутона)

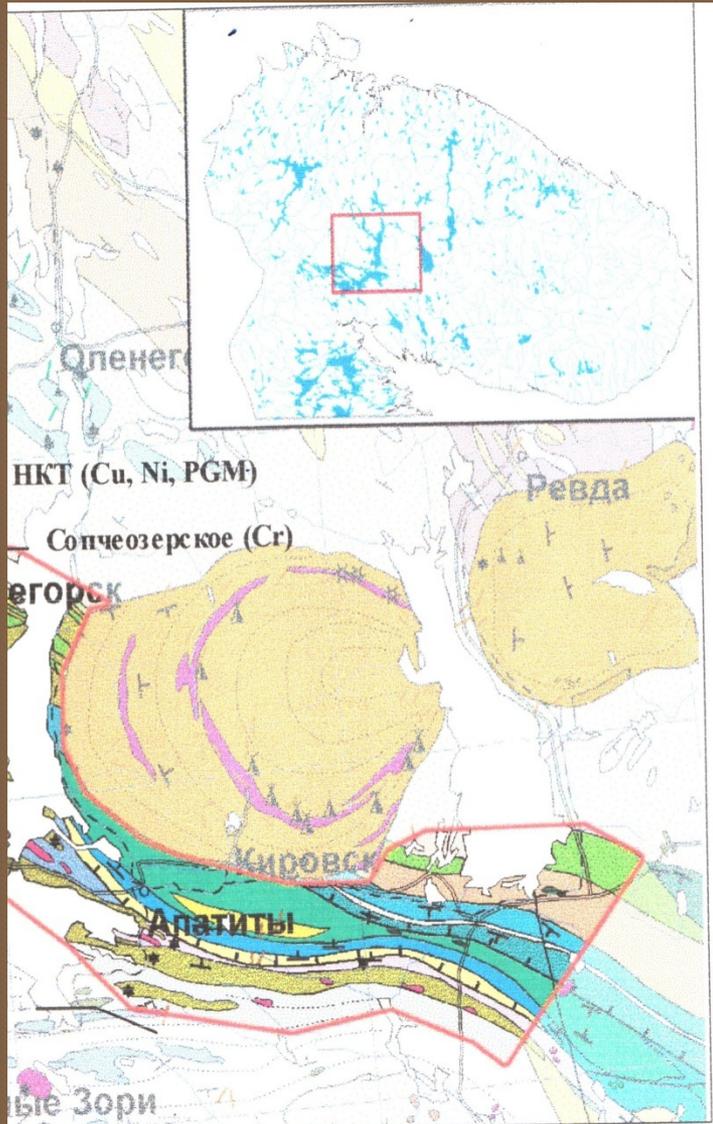
Хибинский и Ловозерский щелочные массивы на Кольском полуострове

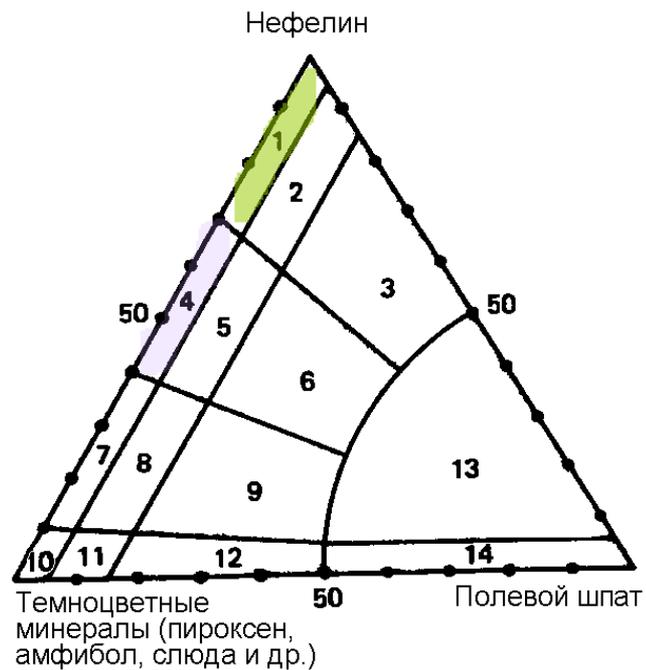
Хибинский массив с

многочисленными месторождениями апатит-нефелиновых руд приурочен к тектоническому контакту Имандра-Варзугской зоны карелид и архейских гранито-гнейсов.

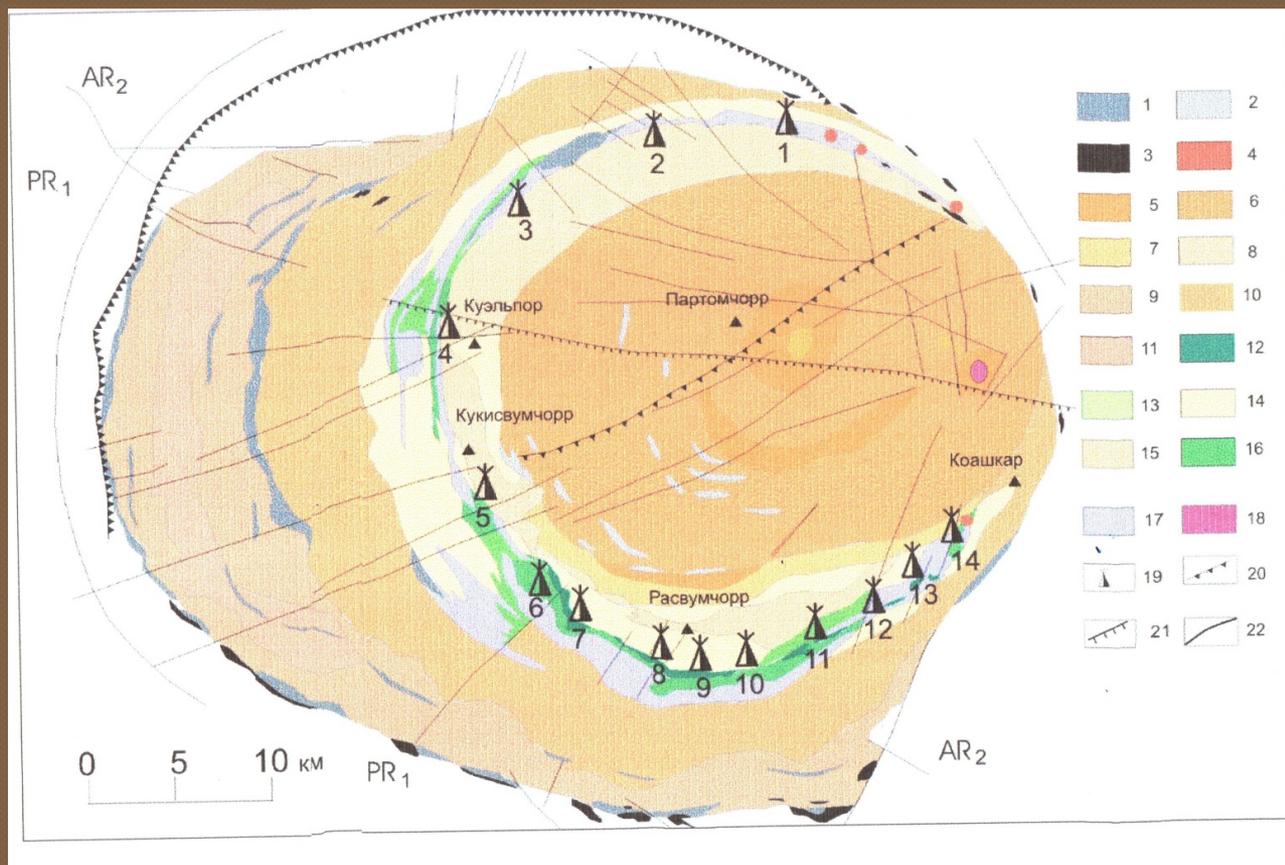
Ловозерский массив расположен в пределах грабенообразной структуры, ограниченной глубинными разломами. Грабен заложен в кристаллических породах архея и выполнен среднепалеозойскими вулканогенно-осадочными породами. Главный рудный объект - Ловозерское лопаритовое месторождение

Лопарит, *loparite* – $(Ln, Na, Ca)_2(Ti, Nb)_2O_6$





- **Диаграмма минерального состава щелочных пород** (по Н.А.Елисееву с дополнениями Е.А.Каменева и Ф.В.Минакова).
- 1 уртиты; 2 полевошпатовые уртиты; 3 ювиты; 4 ийолиты; 5 полевошпатовые ийолиты; 6 малиньиты; 7 мельтейгиты; 8 полевошпатовые мельтейгиты; 9 меланократовые малиньиты; 10 якупирангиты; 11 полевошпатовые якупирангиты; 12 щелочные габброиды; 13 нефелиновые сиениты; 14 щелочные сиениты.



Хибинский щелочной массив с месторождениями и рудопроявлениями апатит-нефелиновых руд

- 1- Валепакх-Намуайв, 2- Лявочорр, 3- Партомчорр, 4- Куэльпор,
 5- Снежный цирк, 6- Кукисвумчорр, 7- Юкспор, 8- Апатитовый цирк,
 9- Расвумчорр, 10- Эвеслогчорр, 11- Коашва, 12- Вуоннемйок,
 13- Ньоркпахк, 14- Олений ручей

- ▪ В рудах месторождений Хибинской группы, разрабатываемых на фосфор, содержится более 40% российских запасов РЗМ, которые однако, из руд не извлекаются, попадая в отходы их переработки (фосфогипс). Добыча апатит-нефелиновых руд, содержащих РЗМ, в 2012 году велась на шести месторождениях Хибинской группы, принадлежащих ОАО «Апатит». Было добыто 80,7 тыс. т $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$. РЗМ, однако, из руд не извлекались.
- ▪ В 2012 году введено в эксплуатацию месторождение Олений Ручей – одно из месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинской группы. ЗАО «Северо-Западная Фосфорная Компания» приступила к добыче руды производству апатитового концентрата; извлечение РЗМ планируется начать после выхода предприятия на проектную мощность. Кроме того, эта компания ведет освоение месторождения Партомчорр, также входящего в Хибинскую группу.

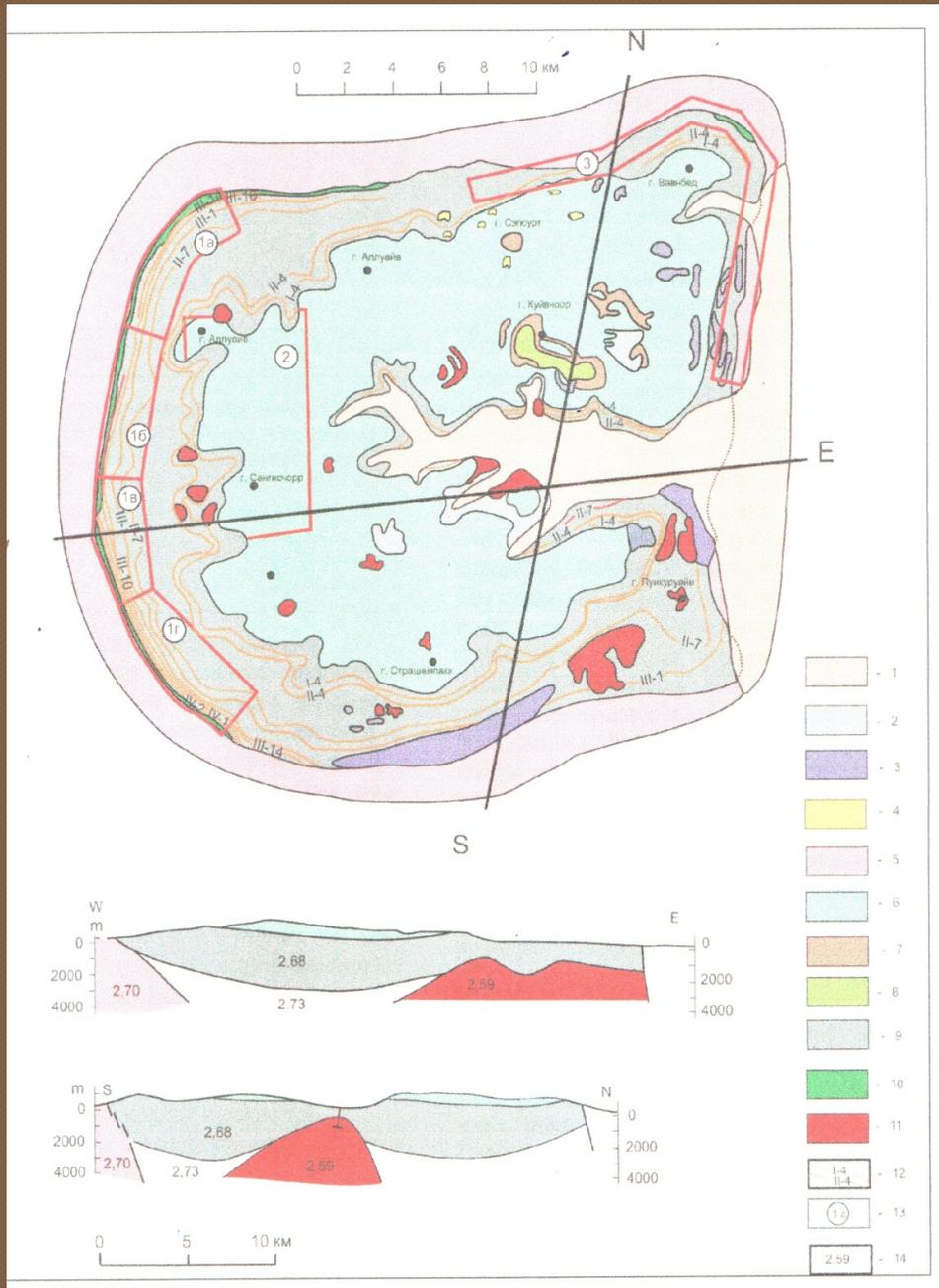
Месторождение Юкспор



TR

Редкоземельные металлы

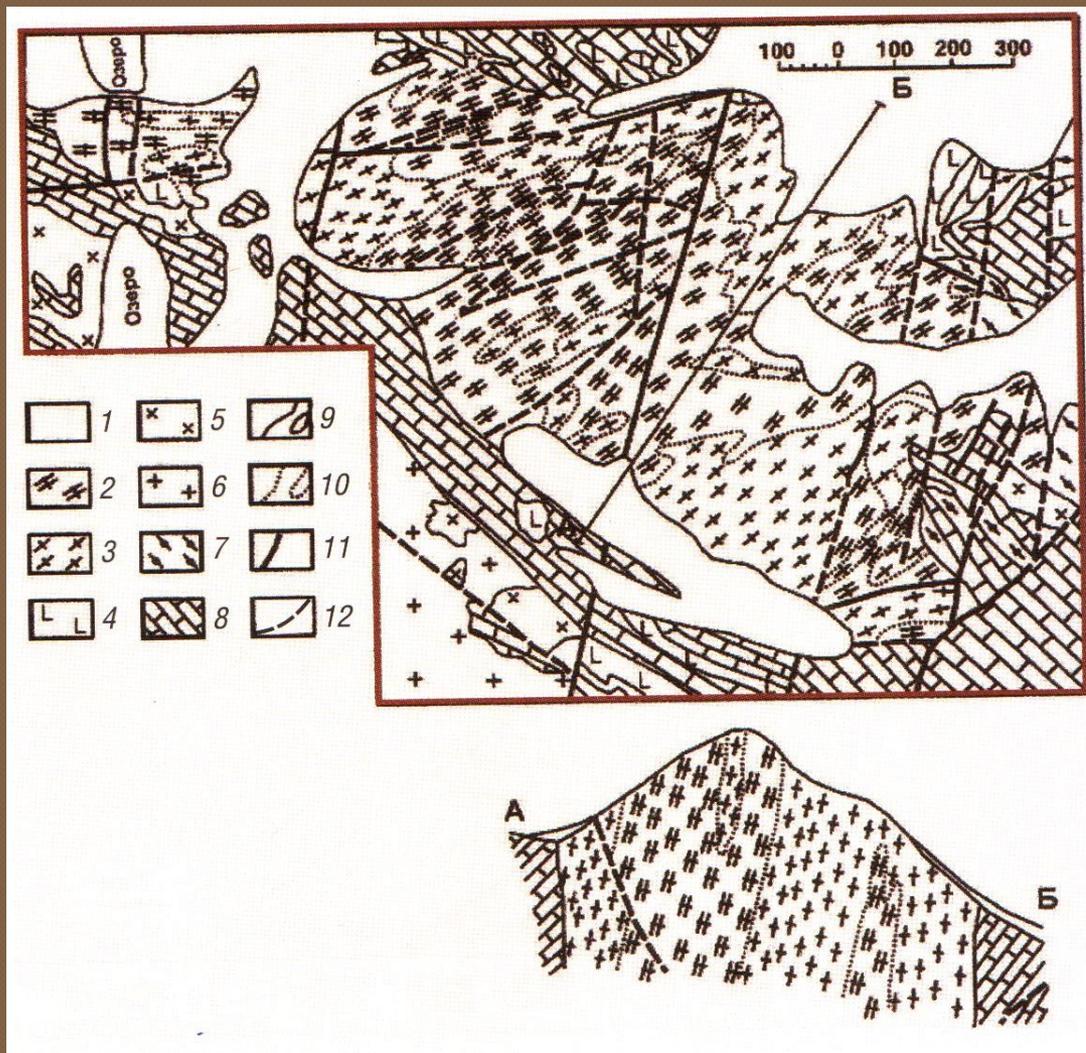
Ловозерский массив
 сложен щелочными породами 3-х комплексов: **дифференцированного лопаритоносного** (нефелиновые и содалитовые сиениты), **эвдиалитовых луявритов** (эвдиалитсодержащие разновидности нефелиновых сиенитов) и **жильных пород** (дайки щелочных лампрофиров). **Основные промышленные руды** – лопаритовые $(Ln, Na, Ca)_2(Ti, Nb)_2O_6$ дифференцированного комплекса и лопаритовые россыпи.



- ▪ Комплексное Ловозерское месторождение – единственное в России, из руд которого РЗМ извлекают в концентраты. Редкоземельные металлы, наряду с танталом и ниобием, являются главными компонентами его руд, а попутными – стронций и титан. Разведанные запасы РЗМ месторождения, представленные в основном металлами цериевой группы, составляют более четверти российских; среднее содержание суммы оксидов редких земель в рудах – 1,12%.
- ▪ Лопаритовые руды подвергаются первичной переработке на Карнасуртской обогатительной фабрике Ловозерского ГОКа. Здесь производится черновой лопаритовый концентрат, который перерабатывается затем в товарный концентрат – продукт с содержанием лопарита не менее 95%.
- ▪ Химико-металлургическая переработка товарного концентрата Ловозерского ГОКа производится на Соликамском магниевом заводе (СМЗ), где из этого сырья получают карбонаты и оксиды смешанных РЗМ, а также титановую губку, технические пентоксиды тантала и ниобия и чистые тантал и ниобий.
- ▪ Промышленных мощностей по разделению РЗМ в России нет, поэтому основная часть карбонатов РЗМ экспортируется (до 2011 года – Эстонию, сейчас - на Ульбинский металлургический завод в Казахстане).
- ▪ Большая часть РЗМ-продукции, используемой промышленностью России, закупается за рубежом (в основном в Китае).

- *Полевошпатовые метасоматиты, альбитизированные щелочные граниты, альбититы (связанные с граносиенитами, щелочными гранитами, сиенитами) как комплексные Ta-Nb-REE- месторождения (Катугинское, Улуг-Танзекское, Зашихинское и др. м-ния)*

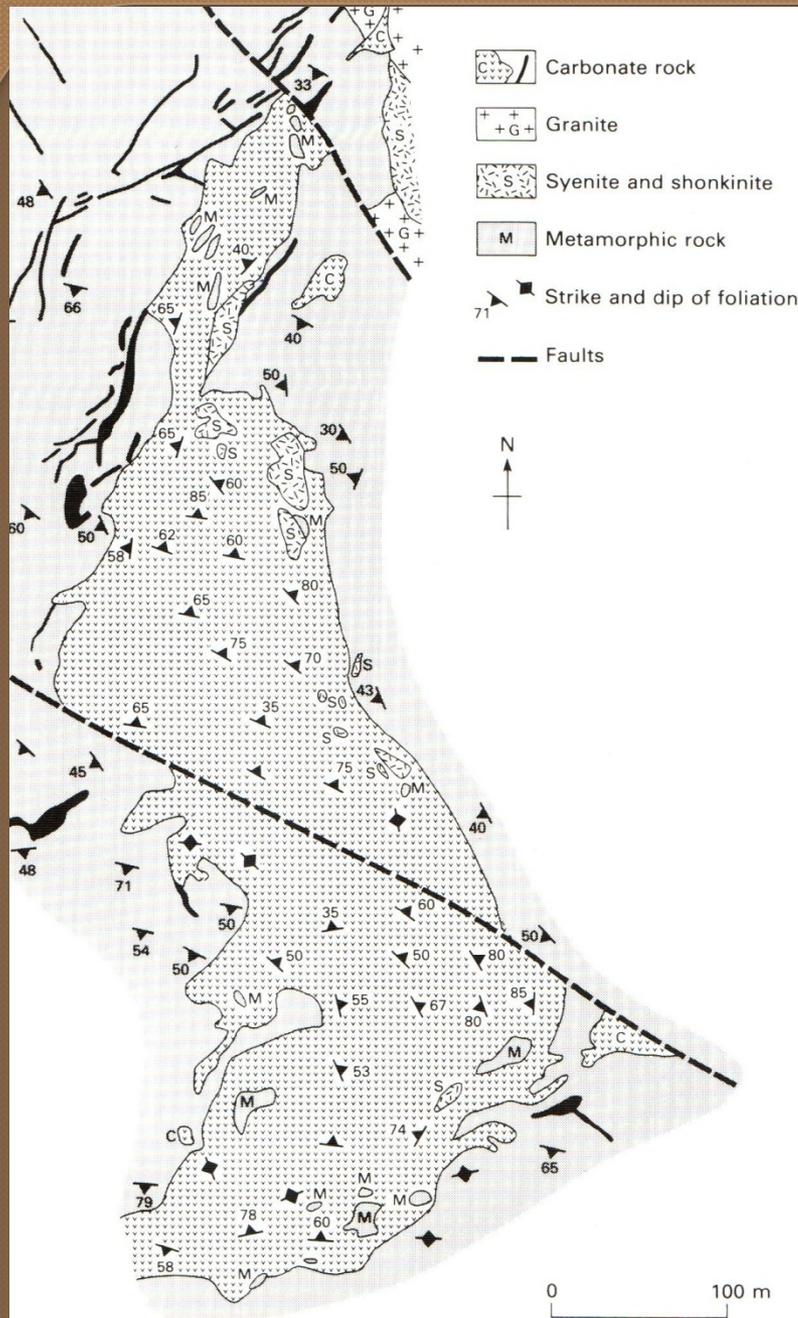
Улуг-Танзекское месторождение (Юго-Восточная Тува)



- 1 - четвертичные отложения;
 - 2,3 - кварц-альбит-микроклин. метасоматиты;
 - 4 - субщелочные граниты и кварцевые сиениты (Pz₃-Mz)
 - 5 - дориты и кварцевые диориты (Pz₁);
 - 6 - биотитовые и лейкократовые граниты позднего протерозоя;
 - 7 - позднепротерозойские сланцы и гнейсы;
 - 8 - позднепротерозойские мраморы и мраморизованные известняки;
 - 9,10 - геологические границы;
 - 11,12- разрывные нарушения.
- Pz-Mz рудоносный шток субщелочных биотитовых гранитов размером 1,8 x (0,1-0,8) кв. км. среди Pz метаморфических пород до глубины почти 700 м содержит промышленную вкрапленность тантало-ниобатов (колумбита, пирохлора), циркона, минералов TR, U и Th. (Сод. 0,1% Th в руде)

■ *Карбонатитовые месторождения*

связаны со щелочными породами магматически-метасоматических УЩК комплексов; промышленные концентрации REE образуются в корах выветривания этих комплексов (Араша Бразилия; Маунтин-Пасс, США; Баян-Обо, КНР; Томтор, Селигдарское, Белая Зима, Россия)



Маунтин-Пасс (Калифорния):

пояс (10x2,5 км) щелочных пород и карбонатитов; в его составе - карбонатитовое тело Сульфайд Куин (Sulphide Queen) шириной до 200 м и длиной около 730 м (в плане), сложенное преобладающими кальцитом, доломитом, анкеритом и сидеритом. Считают, что это рудное тело – крупнейшее в мире скопление REE-минералов. Бастнезит и паризит в ассоциации с баритом, кварцем и др. минералами образуют многочисленные жилы и прожилки. Содержание REE в рудном теле составляет 5-15%.

Бастнезит – $(Ce, Ln)(CO_3)F$

Паризит – $Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$

Массив Томтор (Северо-Западная Якутия)

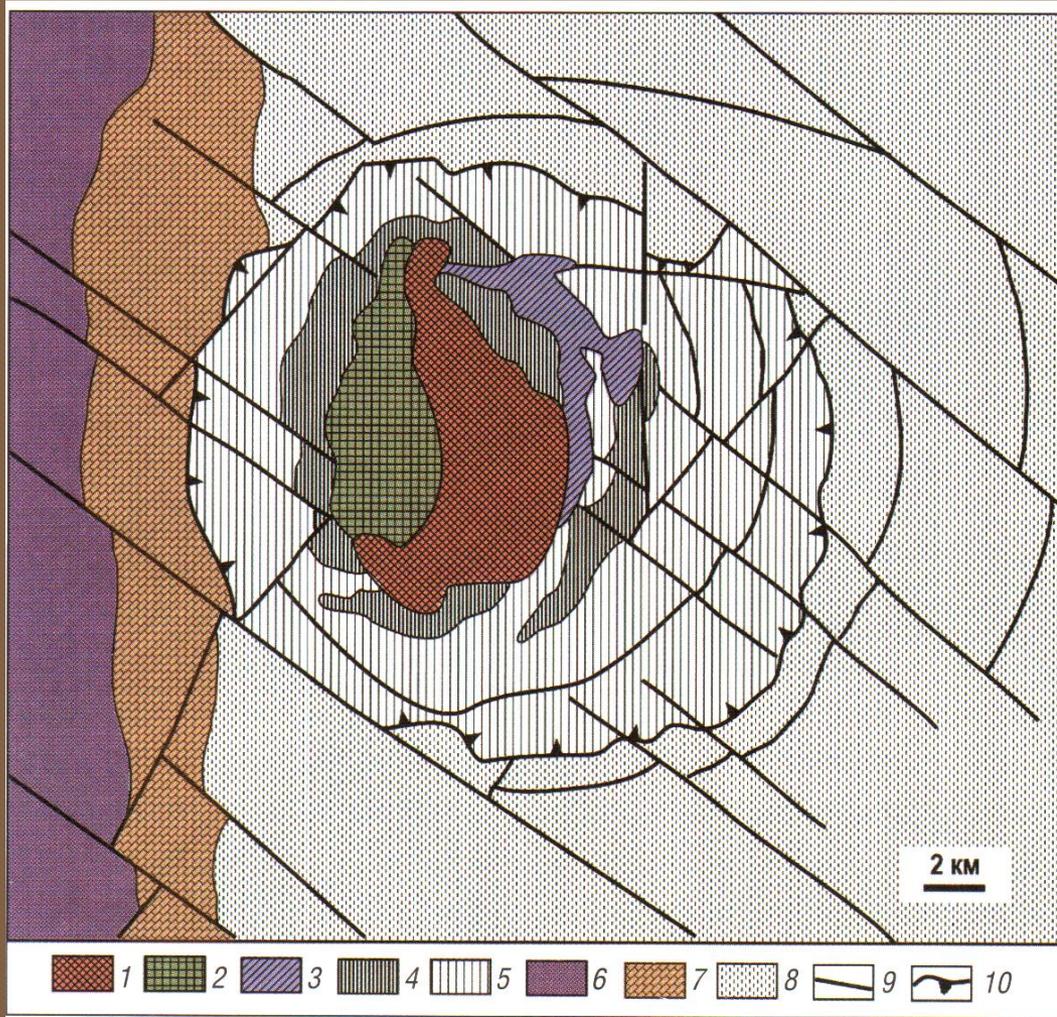
Схематическая

геологическая карта

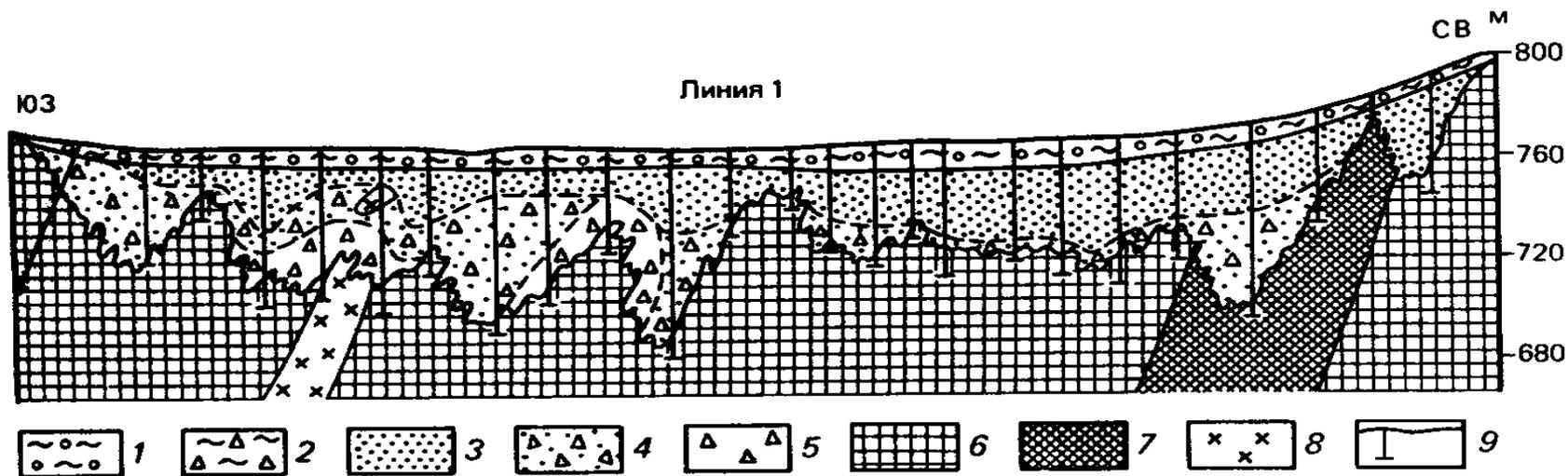
массива со снятым покровом Рз₃-пород осадочного чехла (по Г.А.Пелымскому и др. 2012)

- 1 - рудоносные карбонатиты;
- 2 – безрудные карбонатиты ;
- 3 – карбонатитоиды;
- 4 – ийолит-мельтейгиты;
- 5 – нефелиновые и щелочные сиениты;
- 6 – кембрийские породы;
- 7 – томторская свита, венд;
- 8 – рифейские отложения;
- 9 – разрывные нарушения;
- 10 - граница массива Томтор.

В пироклор-монацитовых рудах сод. Th 0,0191-0,3044%.



- На уникальном Томторском месторождении в Якутии разведан только участок Буранный. Основными компонентами его руд являются ниобий, РЗМ и скандий, при этом они характеризуются уникально высоким содержанием редких земель –
- 7,98% ΣTR_2O_3 .
- Установлены и промышленные запасы скандия (Sc): в 154 млн т Sc-REE-Nb руды содержание скандия составляет 0,048%. Начало разработки месторождения запланировано на 2015 год.
- Крупные запасы РЗМ цериевой группы содержатся в латеритных корах выветривания карбонатитов комплексного Белозиминского месторождения (Иркутская область). Его пироклор-монацитовые руды, кроме РЗМ, содержат ниобий, а также фосфор, тантал и некоторые другие полезные компоненты. Среднее содержание ΣTR_2O_3 в рудах – всего 0,9%.



Геологический разрез апатитовой коры выветривания Белозиминского массива (по В.Г.Кузнецову).

- 1 □ аллювий; 2 □ делювий; 3 □ карбонатная охра; 4 □ обохренная “сыпучка”; 5 □ необохренная “сыпучка”; 6 □ карбонатиты кальцитовые; 7 □ карбонатиты анкеритовые; 8 □ ийолиты; 9 □ буровые скважины.

- **Прибрежно-морские россыпи** (современные) монацита, ксенотима, а также циркон-ильменитовые россыпи с монацитом (Австралия, Бразилия, Индия, Индонезия)
- **Осадочные фосфориты, органично-фосфатные образования**, комплексные месторождения (U, P, REE). Галечниковые фосфориты Флориды (США), ископаемый костный детрит (п-ов Мангышлак)
- **Ионно-адсорбционные глины** как продукты выветривания гранитов или пирокластики в условиях субтропического климата (коры выветривания 15-35 м мощностью). Провинции на юге Китая.

Черные пески

пляжевая россыпь монацита на берегу Индийского океана.
Индия, штат Керала (по Г.А.Пелымскому и др., 2012).



Иттрий (Yttrium)

- **Иттрий (Yttrium)**. Y- химический элемент III группы периодической системы Менделеева; п.н. **39**, ат. вес **88,905**. Природный И. состоит из одного стабильного изотопа **Y89**. ... Конфигурация внешних электронов атома **4d5s2**. ... В 1794 г. Ю. Гадолин обнаружил в минерале на Иттербю (Швеция) неизвестную «землю», которую в 1797 г А. Экеберг назвал иттриевой землей. Впоследствии из этого минерала были выделены окислы редкоземельных элементов - Y, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu.... Среднее содержание И. в земной коре **2,8·10⁻³вес.%**.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																Энергетические уровни	
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			а
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	б			
1	1															He Гелий 4,003	2	К	
2	2	Li Литий 6,941	Be Бериллий 9,0122	B Бор 10,811	C Углерод 12,011	N Азот 14,007	O Кислород 15,999	F Фтор 18,998									Ne Неон 20,179	10	Кг
3	3	Na Натрий 22,99	Mg Магний 24,312	Al Алюминий 26,982	Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,974	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453									Ar Аргон 39,948	18	Кг-М
4	4	K Калий 39,102	Ca Кальций 40,08	Sc Скандий 44,956	Ti Титан 47,887	V Ванадий 50,942	Cr Хром 51,996	Mn Марганец 54,938	Fe Железо 55,847	Co Кобальт 58,933	Ni Никель 58,69						Kr Криптон 83,8	36	Кг-М-К
	5	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,723	Ge Германий 72,63	As Мышьяк 74,922	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904											
5	6	Rb Рубидий 85,468	Sr Стронций 87,62	Y Иттрий 88,906	Zr Цирконий 91,224	Nb Ниобий 92,906	Mo Молибден 95,94	Tc Технеций [99]	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,906	Pd Палладий 106,4					Xe Ксенон 131,3	54	Кг-М-К-О	
	7	Ag Серебро 107,868	Cd Кадмий 112,411	In Индий 114,82	Sn Олово 118,69	Sb Сурьма 121,75	Te Теллур 127,6	I Иод 126,905											
6	8	Cs Цезий 132,905	Ba Барий 137,34	57-71 Лантаноиды		Hf Гафний 178,49	Ta Тантал 180,948	W Вольфрам 183,85	Re Рений 186,207	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,22	Pt Платина 195,09				Rn Радон [222]	86	Кг-М-К-О-Ф	
	9	Au Золото 196,967	Hg Ртуть 200,59	Tl Таллий 204,37	Pb Свинец 207,19	Bi Висмут 208,98	Po Полоний [210]	At Астат [210]											
7	10	Fr Франций [223]	Ra Радий [226]	89-103 Актиноиды		Rf Резерфордий [261]	Db Дубний [262]	Sg Сиборгий [263]	Bh Борий [262]	Hn Ханий [265]	Mt Мейтнерий [268]							Кг-М-К-О-Ф-Л	
Высшие оксиды		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄										
Летучие водородные соединения					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR											



Д.И. Менделеев
1834–1907



- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

ЛАНТАНОИДЫ

57 La Лантан 138,906	58 Ce Церий 140,12	59 Pr Празеодим 140,908	60 Nd Неодим 144,24	61 Pm Прометий [145]	62 Sm Самарий 150,4	63 Eu Европий 151,96	64 Gd Гадолиний 157,25	65 Tb Тербий 158,926	66 Dy Диспрозий 162,5	67 Ho Гольмий 164,93	68 Er Эрбий 167,26	69 Tm Тулий 168,934	70 Yb Иттербий 173,04	71 Lu Лютеций 174,97
----------------------------	--------------------------	-------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	----------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac Актиний [227]	90 Th Торий 232,038	91 Pa Протактиний [231]	92 U Уран 238,029	93 Np Нептуний [237]	94 Pu Плутоний [244]	95 Am Америций [243]	96 Cm Кюрий [247]	97 Bk Берклий [247]	98 Cf Калифорний [251]	99 Es Эйнштейний [254]	100 Fm Фермий [257]	101 Md Менделевий [258]	102 No Нобелий [259]	103 Lr Лоуренсий [260]
---------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	-------------------------------	----------------------------	------------------------------

poiskN1.RU

Иттрий является металлом, обладающим рядом уникальных свойств, и эти свойства в значительной степени определяют очень широкое применение его в промышленности сегодня и, вероятно, ещё более широкое применение в будущем. Предел прочности на разрыв для нелегированного чистого иттрия около 300 МПа (30 кг/мм²). Очень важным качеством как металлического иттрия, так и ряда его сплавов является то, что будучи активным химически, иттрий при нагревании на воздухе покрывается пленкой оксида и нитрида, предохраняющих его от дальнейшего окисления до 1000 °С.

Главными конечными областями использования оксидных компонентов иттрия являются керамика (в абразивах, подшипниках, высокотемпературных рефракторах и др.), металлургия (рафинирующие добавки, деоксидайзеры и др.) и светотехника (в нелинейной оптике, фотохимии, фотолюминесценции и др.), а также в электронике и лазерах.

Иттрий входит в состав многих редкоземельных минералов и в природе всегда встречается совместно с РЗЭ **иттриевой** группы (особенно Dy, Gd, Er, Yb), а также в некоторых минералах совместно с элементами **цериевой** группы.

Главнейшими минералами, содержащими иттрий и РЗЭ **иттриевой** группы, являются: **ксенотим** $Y(PO_4)$, **фергюсонит** $(Y,Er,Ce,U)(Nb,Ta,Ti)O_4$, **эвксенит** $(Y,U)(Nb,Ti)_2O_6$, **гадолинит** $Y_2FeBe_2Si_2O_{10}$, **браннерит** $(U,Ca,Fe,Y)_3Ti_5O_{16}$, **иттропаризит** $Ca(Y,Ce)_2(CO_3)_3F_2$, **иттрофлюорит** $(Ca,Y,Ce)F_{2-3}$, **таленит** $Y_2(Si_2O_7)$, **иттриалит** $(Y,Th)_2(Si_2O_7)$.

Мировое производство оксида иттрия почти целиком приходится на южные провинции Китая, оцениваясь в 2018 году от 5000 до 7000 тонн. Мировые запасы (reserves) оксида иттрия по оценке USGS составляют более 500000 тонн, приходясь на Австралию, Бразилию, Канаду, Китай и Индию. Крупные мировые ресурсы (resources) иттрия в виде монацита и ксенотима связаны с россыпями, карбонатитами, урановыми и ионно-адсорбционными рудами.

- **Основными промышленными типами месторождений иттрия** являются:
- **россыпи**, содержащие ксенотим, эвксенит и фергюсонит,
- **гранитные пегматиты** с ксенотимом и титано-тантало-ниобатами иттрия, **гидротермальные месторождения**, связанные с субщелочными гранитоидами, содержащие ксенотим и иттропаризит в ассоциации с ферриторитом. ...
- **попутно** при переработке некоторых руд **U** (золото-браннеритовые конгломераты, урансодержащие фосфориты, угли), **Th** (ксенотим-ферроторитовые месторождения), **Nb** и **Ta** (фергюсонитовые, эвксенитовые, самарскитовые руды).
- Главнейшими месторождениями иттрия являются эвксенитовые россыпи штата Айдахо (США) и золото-браннеритовые конгломераты района Блайд-Ривер – Алгона (Канада). (КХЭ, т. IV, М., 1965)

Скандий (Scandium)

- Скандий (Scandium) **Sc** – химический элемент III группы периодической системы Менделеева; п.н. **21**, ат. вес **44,956** В природе известен только один стабильный изотоп **Sc45**. Скандий – первый переходный элемент с одним 3d-электроном; конфигурация внешних электронов атома **3d4s2**. Он был предсказан Менделеевым в 1870 (предсказал свойства, условно назвав экабором); был открыт Нильсоном в 1879 году в процессе разделения РЗЭ эрбиевой группы, полученных из минерала гадолинита, впервые найденного в Скандинавии (отсюда и название элемента).

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Ряды	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																Энергетические уровни			
		I		II		III		IV		V		VI		VII		VIII			а		
		а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	а	б	б					
1	1															He Гелий 4,003	2	К			
2	2	Li Литий 6,941	Be Бериллий 9,0122	B Бор 10,811	C Углерод 12,011	N Азот 14,007	O Кислород 15,999	F Фтор 18,998											Ne Неон 20,179	10	Кг
3	3	Na Натрий 22,99	Mg Магний 24,312	Al Алюминий 26,982	Si Кремний 28,086	P Фосфор 30,974	S Сера 32,064	Cl Хлор 35,453											Ar Аргон 39,948	18	Кг-М
4	4	K Калий 39,102	Ca Кальций 40,08	Sc Скандий 44,956	Ti Титан 47,887	V Ванадий 50,942	Cr Хром 51,996	Mn Марганец 54,938	Fe Железо 55,847	Co Кобальт 58,933	Ni Никель 58,71							Kr Криптон 83,8	36	Кг-М-К	
	5	Cu Медь 63,546	Zn Цинк 65,37	Ga Галлий 69,723	Ge Германий 72,63	As Мышьяк 74,922	Se Селен 78,96	Br Бром 79,904													
5	6	Rb Рубидий 85,468	Sr Стронций 87,62	Y Иттрий 88,906	Zr Цирконий 91,224	Nb Ниобий 92,906	Mo Молибден 95,94	Tc Технеций [99]	Ru Рутений 101,07	Rh Родий 102,906	Pd Палладий 106,4						Xe Ксенон 131,3	54	Кг-М-К-О		
	7	Ag Серебро 107,868	Cd Кадмий 112,411	In Индий 114,82	Sn Олово 118,69	Sb Сурьма 121,75	Te Теллур 127,6	I Иод 126,905													
6	8	Cs Цезий 132,905	Ba Барий 137,34	57-71 Лантаноиды			Hf Гафний 178,49	Ta Тантал 180,948	W Вольфрам 183,85	Re Рений 186,207	Os Осмий 190,2	Ir Иридий 192,22	Pt Платина 195,09					Rn Радон [222]	86	Кг-М-К-О-Ф	
	9	Au Золото 196,967	Hg Ртуть 200,59	Tl Таллий 204,37	Pb Свинец 207,19	Bi Висмут 208,98	Po Полоний [210]	At Астат [210]													
7	10	Fr Франций [223]	Ra Радий [226]	89-103 Актиноиды			Rf Резерфордий [261]	Db Дубний [262]	Sg Сиборгий [263]	Bh Борий [262]	Hn Ханий [265]	Mt Мейтнерий [268]									
Высшие оксиды		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄												
Летучие водородные соединения					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR													



Д.И. Менделеев
1834–1907



- s-элементы
- p-элементы
- d-элементы
- f-элементы

ЛАНТАНОИДЫ

57 La Лантан 138,906	58 Ce Церий 140,12	59 Pr Празеодим 140,908	60 Nd Неодим 144,24	61 Pm Прометий [145]	62 Sm Самарий 150,4	63 Eu Европий 151,96	64 Gd Гадолиний 157,25	65 Tb Тербий 158,926	66 Dy Диспрозий 162,5	67 Ho Гольмий 164,93	68 Er Эрбий 167,26	69 Tm Тулий 168,934	70 Yb Иттербий 173,04	71 Lu Лютеций 174,97
----------------------------	--------------------------	-------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	------------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	----------------------------

АКТИНОИДЫ

89 Ac Актиний [227]	90 Th Торий 232,038	91 Pa Протактиний [231]	92 U Уран 238,029	93 Np Нептуний [237]	94 Pu Плутоний [244]	95 Am Америций [243]	96 Cm Кюрий [247]	97 Bk Берклий [247]	98 Cf Калифорний [251]	99 Es Эйнштейний [254]	100 Fm Фермий [257]	101 Md Менделеевий [258]	102 No Нобелий [259]	103 Lr Лоуренсий [260]
---------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------	------------------------------	------------------------------	---------------------------	--------------------------------	----------------------------	------------------------------

poiskN1.RU

- Скандий занимает особое место в группе из 17 РЗМ: он используется при производстве высокопрочных сплавов и сверхтвердых материалов в аэрокосмической технике, электролитов для топливных элементов, спортивной экипировки (мотоциклы, бейсбольные биты). Один из способов извлечения скандия – рафинирование диоксида титана (TiO_2).

Содержание скандия в земной коре **$6 \cdot 10^{-4}$ вес. %**. Он - типичный литофильный элемент, характеризующийся геохимической близостью с РЗЭ Y- группы, Mg и Fe^{+2} . Будучи рассеянным элементом, скандий содержится в виде незначительной примеси (от 0,03 до 0,0001% Sc_2O_3) во многих, обычно темноцветных минералах интрузивных пород.

- Повышенные содержания скандия ($>0,01-0,03\%$) отмечаются в минералах постмагматических образований, главным образом *пегматитов* и *грейзенов* (танталониобаты РЗЭ, вольфрамиты, касситериты, бериллы, цирконы).
- Из собственных минералов скандия известны *тортвейтит* $\text{Sc}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ и *стереттит* $\text{Sc}(\text{PO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, которые встречаются очень редко и не образуют промышленных месторождений.

- Возможными природными источниками для промышленного получения скандия могут быть *касситериты, вольфрамиты* (0,2 вес.% Sc₂O₃), минералы РЗЭ (*эвксенит, хлопинит, ксенотим* и др., до 0,01-0,2% Sc₂O₃), бериллы (0,2%), мусковиты и ферримусковиты (0,6%), цирконы (0,08%), золы каменных углей (0,009%), бокситы (0,01%), пироксениты и габбро (0,02%).
- Основными сырьевыми источниками скандия. *служат отходы W, Sn, U и чугунного производств. При гидро- и пиromеталлургической переработке вольфрамитов скандия. концентрируется в отвалах и шлаках. Попутное извлечение скандия. из U-сырья производится экстракционным методом (растворы содержат 0,001-0,04 г/л Sc₂O₃). (КХЭ, т. IV, М., 1965).*
- По данным USGS (2020) мировые поставки и потребление скандия оцениваются в интервале от 10 до 15 тонн в год; его получают исключительно как побочный продукт (byproduct) переработки различных (железных, урановых, редкоземельных, титановых, циркониевых и др.) руд или извлечением из складированных отходов и хвостов обогащения в Китае, Казахстане, России, на Украине.
- По тем же данным ресурсы скандия идентифицированы в Австралии, Канаде, Китае, Казахстане, Мадагаскаре, Норвегии, Филиппинах, России, Украине и США.

МСБ TR металлов РФ

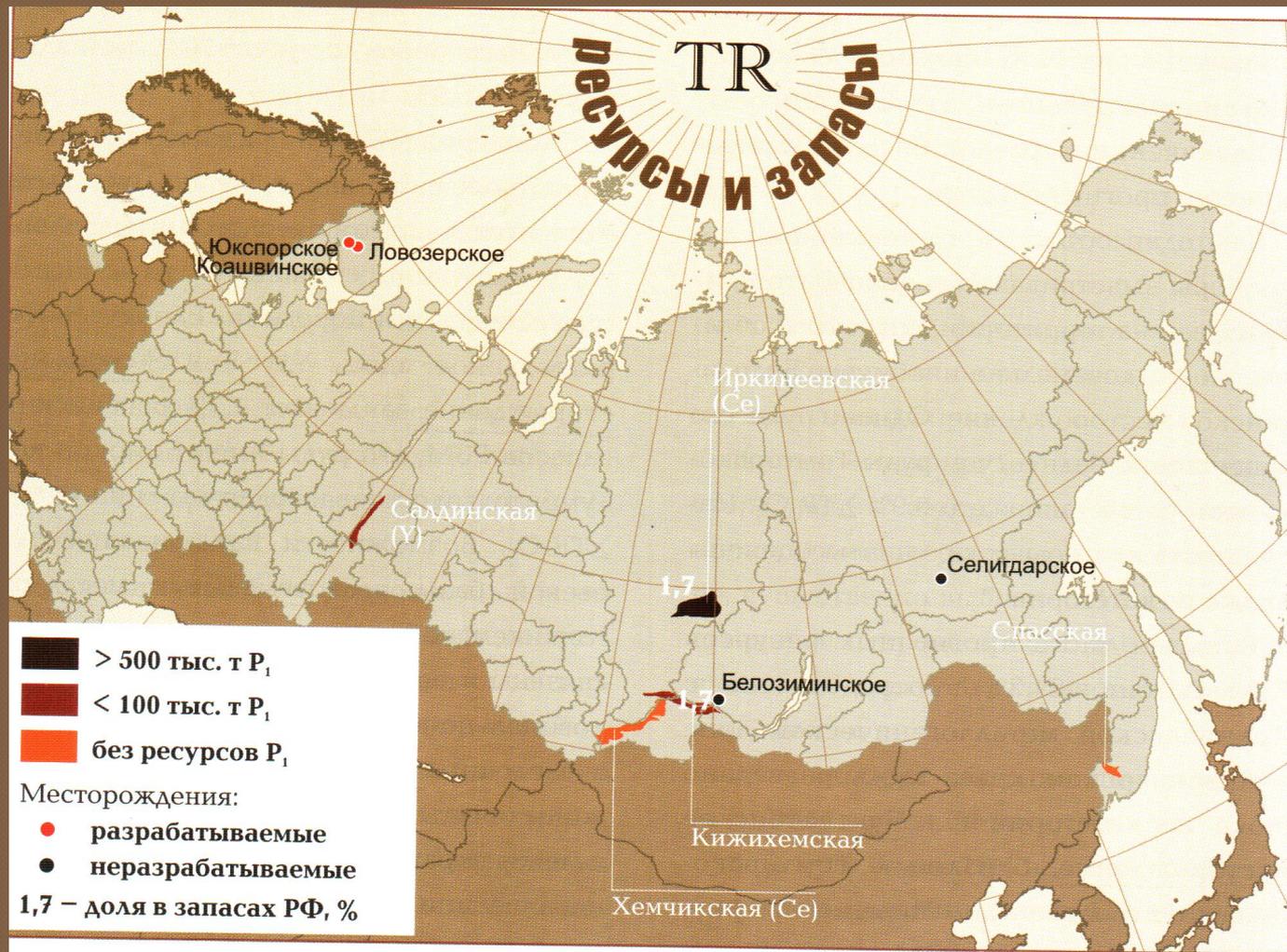
Состояние МСБ редкоземельных металлов Российской Федерации на 1.01.2010 г., тыс.т ΣTR_2O_3

Прогнозные ресурсы	P_1	P_2	P_3
количество	1359,5	3726,2	170
Запасы	разведанные (A+B+C ₁)	предварительно оцененные (C ₂)	
количество	18370,1	9484,5	
изменение по отношению к запасам на 1.01.2009 г.	-73,7	-0,1	
доля распределенного фонда, %	60,2	60,5	

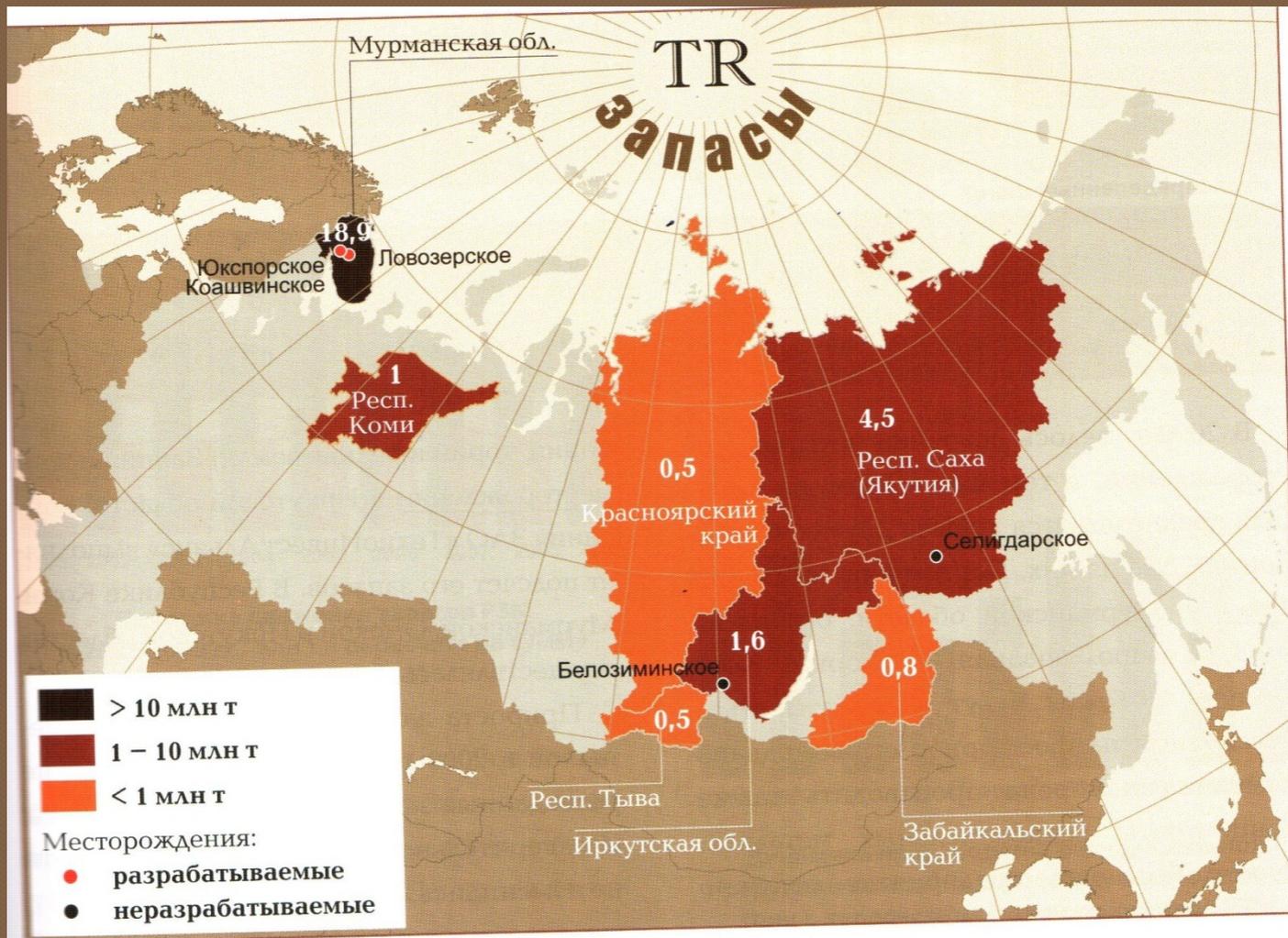
Использование МСБ редкоземельных металлов Российской Федерации в 2009 г.

Число действующих эксплуатационных лицензий	11
Число действующих лицензий на условиях предпринимательского риска	0
Добыча из недр, тыс.т ΣTR_2O_3	73,6
Производство концентратов РЗМ, тыс.т TR_2O_3	6,5
Производство редкоземельной продукции (карбонаты РЗМ), тыс.т в пересчете на ΣTR_2O_3	1,9
Средние за 9 месяцев 2010 г. спотовые цены оксидов РЗМ (FOB порты Китая), дол./кг	оксид иттрия (99,99%) – 16,2 оксид церия (99%) – 11,4 оксид европия (99%) – 526,9 оксид лантана (99%) – 13 оксид неодима (99%) – 36,2
Ставка налога на добычу	8%

Ресурсный потенциал TR РФ



Балансовые запасы TR РФ



Основные месторождения редкоземельных металлов и распределение их балансовых запасов по субъектам РФ, млн т в пересчете на сумму триоксидов РЗМ

Основные TR-месторождения РФ

Основные месторождения

Недропользователь, месторождение	Геолого- промышленный тип	Запасы, млн т ΣTR_2O_3		Доля в ба- лансовых запасах РФ, %	Содержание ΣTR_2O_3 в рудах, %	Добыча в 2009 г., тыс.т ΣTR_2O_3
		A+B+C ₁	C ₂			

ООО «Ловозерский ГОК»

Ловозерское (Мурманская обл.)	Нефелиновые сиениты с лопаритом	2,7	4,4	25,4	1,12	2,6
----------------------------------	---------------------------------------	-----	-----	------	------	-----

ОАО «Апатит»

Юкспорское (Мурманская обл.)	Апатит- нефелиновый	2,2	0	7,9	0,39	21,5
---------------------------------	------------------------	-----	---	-----	------	------

Недропользователь, месторождение	Геолого- промышленный тип	Запасы, млн т ΣTR_2O_3		Доля в ба- лансовых запасах РФ, %	Содержание ΣTR_2O_3 в рудах, %	Добыча в 2009 г., тыс.т ΣTR_2O_3
		A+B+C ₁	C ₂			
Коашвинское (Мурманская обл.)	Апатит- нефелиновый	2,6	0,7	11,8	0,41	7

Нераспределенный фонд

Селигдарское (Республика Саха (Якутия))	Апатитовый в карбонатитах	4,4	0	15,8	0,35	-
Белозиминское (Иркутская обл.)	Коры выветривания карбонатитов	0	1,6	5,7	0,9	-

Заключение

- – Бурно растущее потребление РЗМ в мире обусловлено, главным образом, их использованием в новейших технологиях (high-tech.).
- – МСБ РФ характеризуется крупными запасами (2-е место в мире после КНР), 2/3 которых – в Мурманской обл. (эксплуатируемые Хибинские и Ловозерское месторождения с рудами, содержащими в основном Се-TR).
- – Качественное укрепление МСБ РФ (освоение Томторского, Зашихинского и др. месторождений Восточной Сибири), создание высокотехнологичных производств по получению и разделению РЗМ, выход на мировой рынок REE-сырья – неотложные задачи, требующие безотлагательного решения.

Литература

1. Мелентьев Г.Б. *Редкоземельные приоритеты России*. Редкие земли (The Rare Earth Magazine). 2018. <http://rareearth.ru>.
2. *О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах*. Государственный доклад. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Москва 2018.
3. *Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года*. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 22.12.2018 г No 2914-р. Председатель правительства Д. Медведев.
4. *Mineral Commodity Summaries-2020*. USGS.

Critical Metals Handbook

Edited by

Gus Gunn

British Geological Survey

Keyworth

Nottingham

UK

13. Rare earth elements

Frances Wall

Head of Camborne School of Mines and Associate
Professor of Applied Mineralogy, Camborne

School of Mines, University of Exeter, Penryn, UK

Лантанидное сжатие, демонстрируемое величиной радиусов 3+ валентных катионов в девятерной координации

314

FRANCES WALL

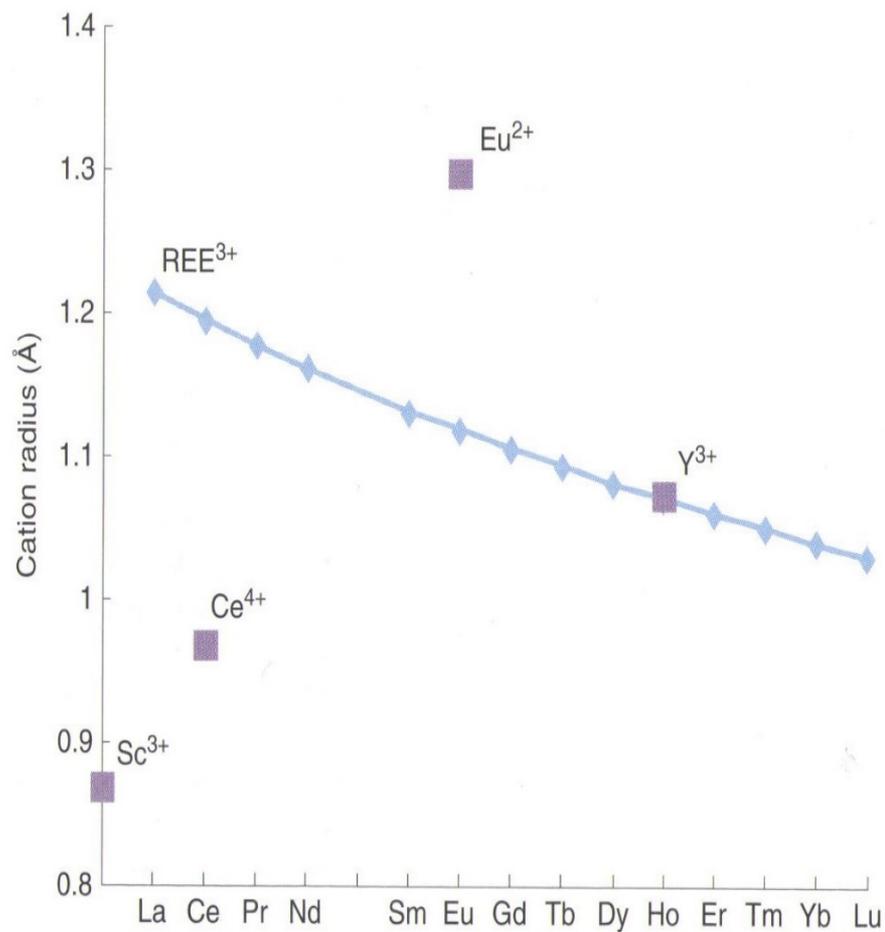


Figure 13.1 The lanthanide contraction demonstrated by plotting the radii of 3+ cations in nine coordination. The radii of the cations of the other most common lanthanide oxidation states are also shown, as are the radii of Y³⁺ and Sc³⁺. (Modified after Gupta and Krishnamurthy, 2005.)

Некоторые свойства редкоземельных элементов

Table 13.1 Selected properties of the rare earth elements.

Element name	Chemical symbol	Atomic number	Atomic weight	Density at 25 °C (kg/m ³)	Melting point (°C)	Cation radius (pm)	Colour of +3 cation in solution
scandium	Sc	21	44.96	2992	1541	87.0	Colourless
yttrium	Y	39	88.91	4475	1522	107.5	Colourless
lanthanum	La	57	138.91	6174	918	121.6	Colourless
cerium	Ce	58	140.12	6711	798	119.6	Colourless
praseodymium	Pr	59	140.91	6779	931	117.9	Yellow-green
neodymium	Nd	60	144.24	7000	1021	116.3	Rose
promethium	Pm	61	144.91	7220	1042	-	Pink
samarium	Sm	62	150.36	7536	1074	113.2	Yellow
europium	Eu	63	151.96	5248	822	112.0	Colourless
gadolinium	Gd	64	157.25	7870	1313	110.7	Colourless
terbium	Tb	65	158.93	8267	1356	109.5	Pale pink
dysprosium	Dy	66	162.50	8531	1412	108.3	Pale yellow-green
holmium	Ho	67	164.93	8797	1474	107.2	Yellow
erbium	Er	68	167.26	9044	1529	106.2	Pink
thulium	Tm	69	168.93	9325	1545	105.2	Greenish tint
ytterbium	Yb	70	173.04	6966	819	104.2	Colourless
lutetium	Lu	71	174.97	9842	1663	103.2	Colourless

Compiled from Gupta and Krishnamurthy (2005); pm, picometres.

Распространенность редкоземельных элементов в земной коре

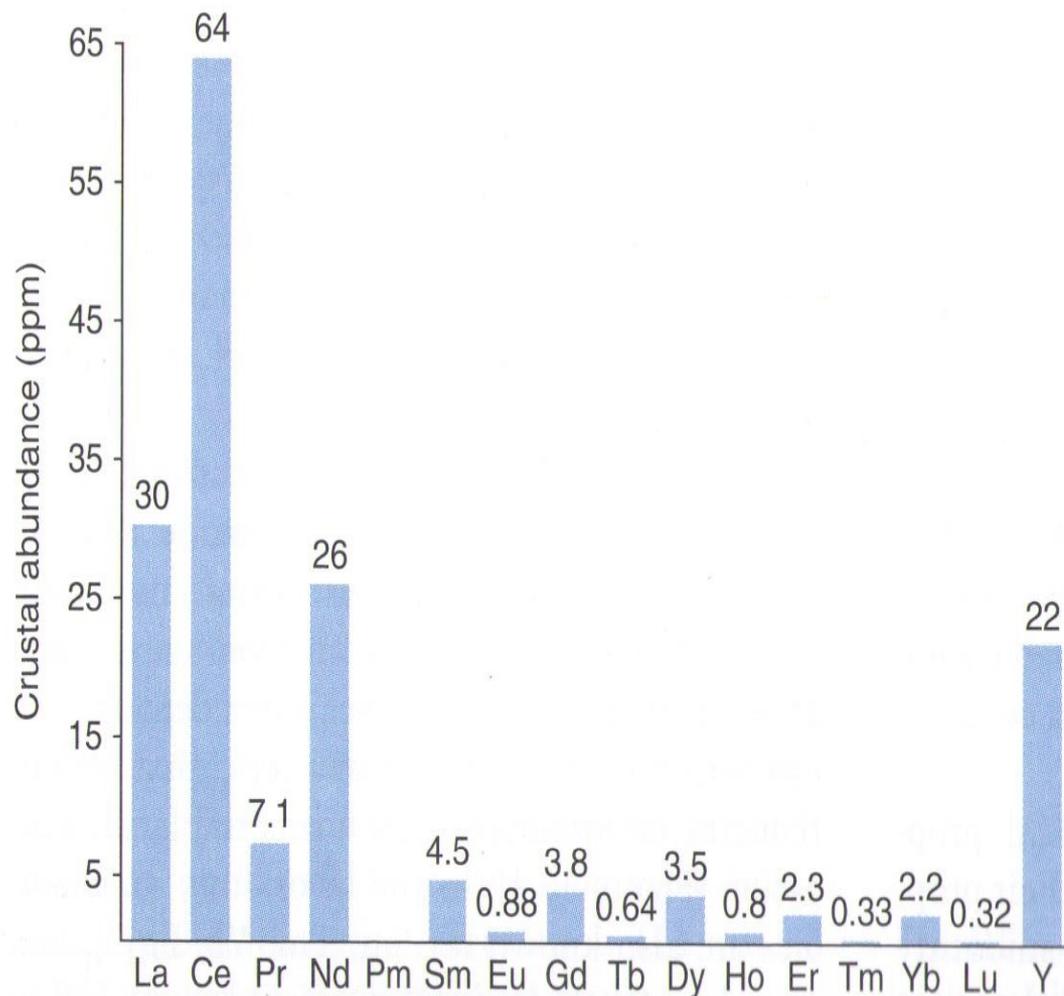
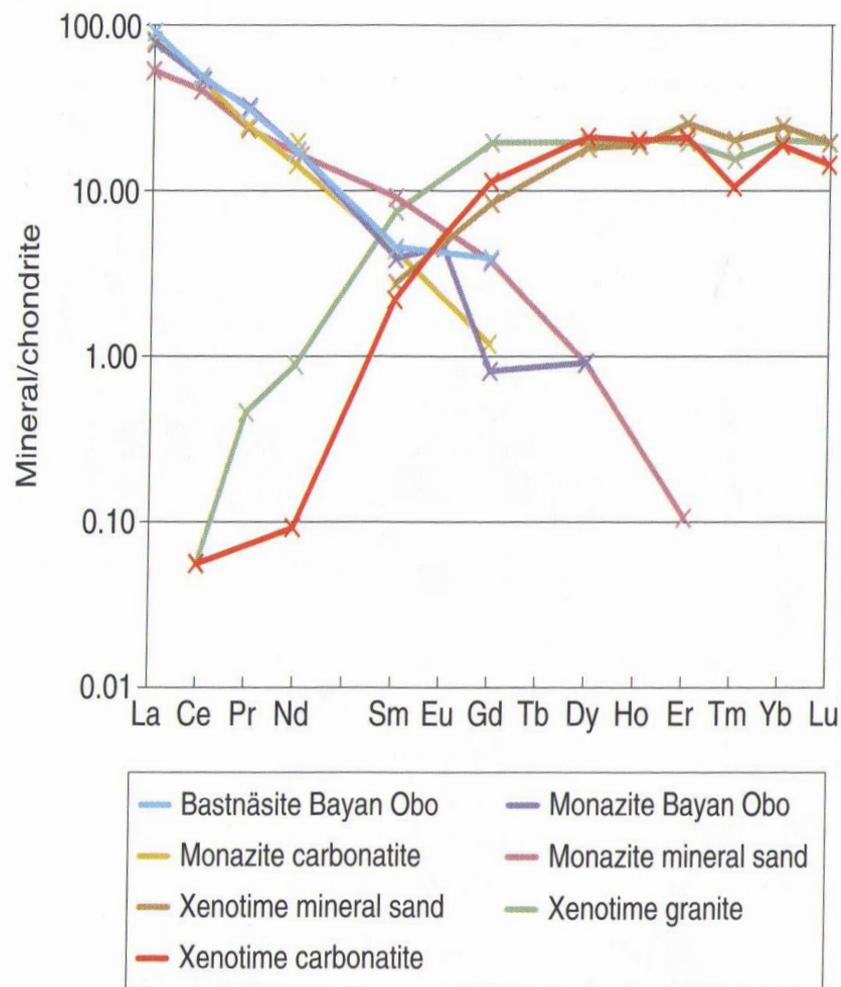


Figure 13.2 Crustal abundances of rare earth elements (Data from Taylor and McClennan, 1985). The light rare earths, lanthanum (La), cerium (Ce) and neodymium (Nd), are the most abundant rare earth elements in the Earth's crust.

Составы наиболее распространенных LREE (бастнезит-Се и монацит-Се) и HREE (ксенотим-У) минералов

Figure 13.3 Compositions of the most common light REE minerals, bastnäsite-(Ce) and monazite-(Ce), and the most common heavy REE mineral, xenotime-(Y). Following usual precedent, values are divided by values of a chondrite meteorite (McDonough and Sun, 1995) in order to remove the Oddo-Harkins 'zig-zag' effect. (Data from Förster (1998), Smith et al. (2000), van Emden et al. (1997), Wall and Mariano (1996), Wall et al. (2008).)



Глобальное распределение месторождений редких земель (по данным BGS, 2011)



Сравнение тоннажа (запасы) и содержаний REO (rare earth oxide) отдельных месторождений (рудников)

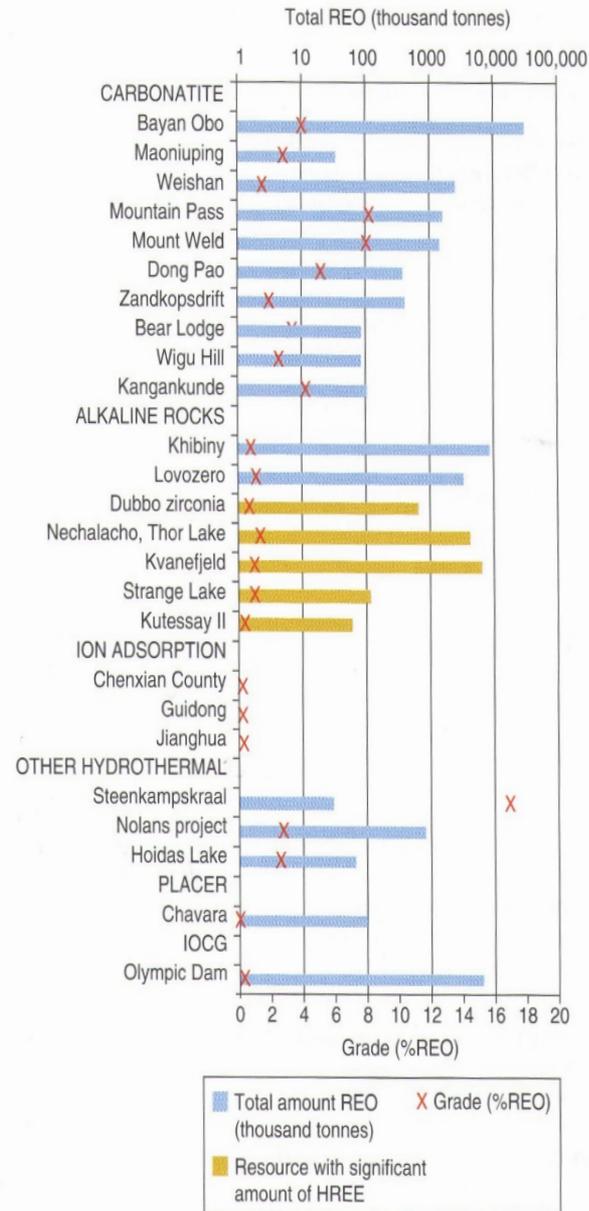


Figure 13.5 Comparison of the size and grade of rare earth mines and advanced development projects. [Data from Table 13.3.]

(a) Монацит в выветрелом карбонатите. Маунт-велд, Австралия

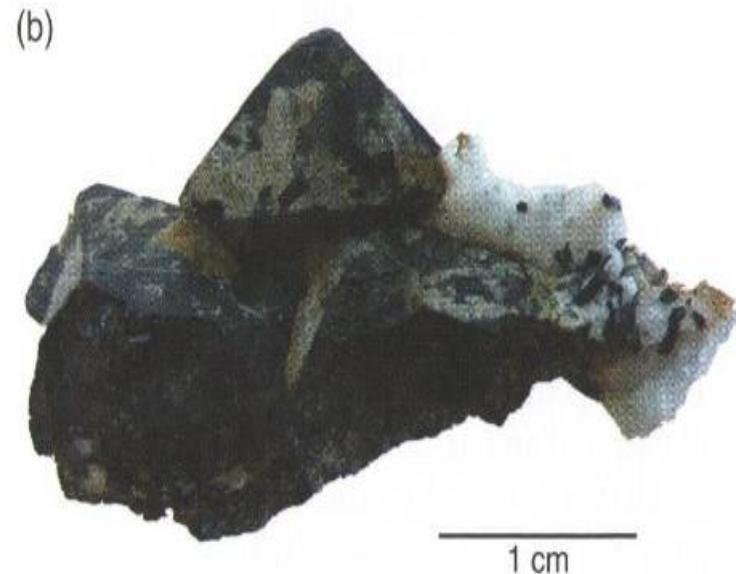
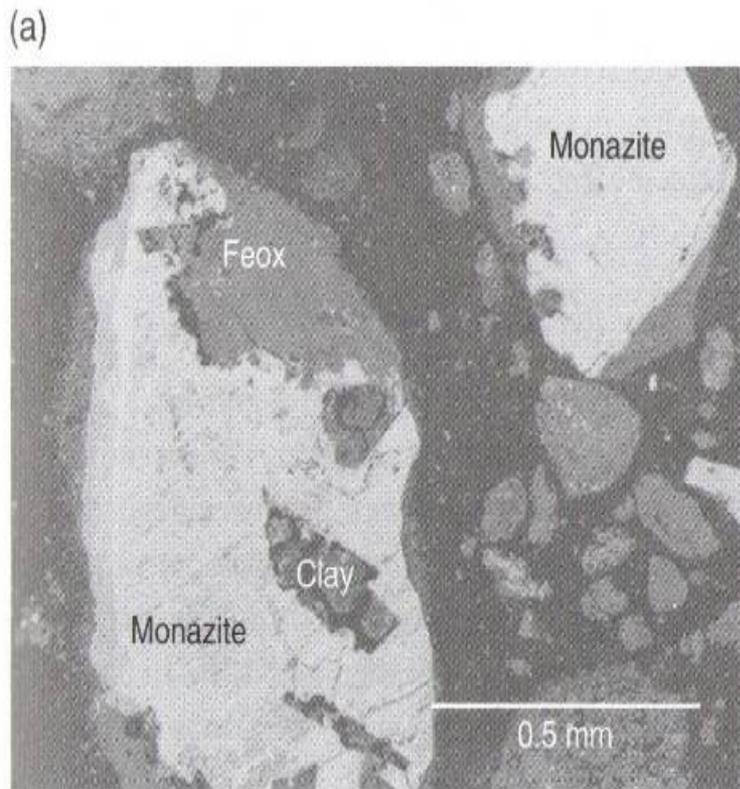


Figure 13.6 (a) Backscattered electron image of monazite in weathered carbonatite at Mount Weld, Australia. There is a narrow band of later monazite on the main monazite grain. The associated minerals are iron oxides (Feox) and clays. The grains are set in resin. (Sample courtesy of Lynas Corporation). (b) Steenstrupine crystals from a sodalite- and feldspar-rich late vein in nepheline syenite. Taseq Slope, Ilimaussaq alkaline complex, Greenland. (Sample and photo courtesy Henrik Friis.)

Обобщенная схема переработки (обогащения) бастнезитовых руд

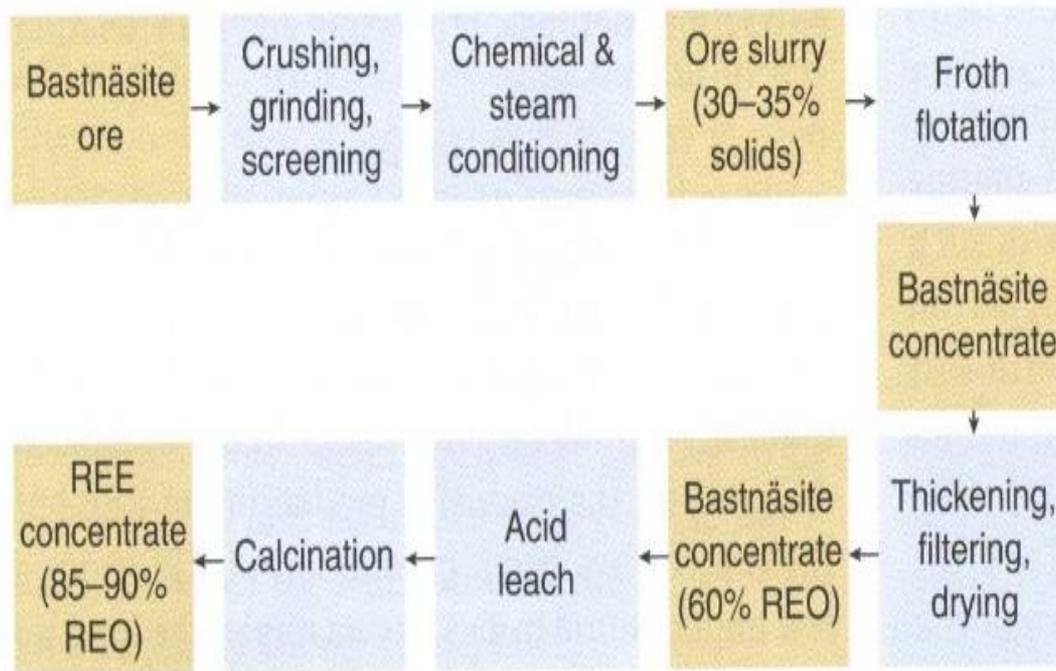


Figure 13.7 Schematic summary of the beneficiation of bastnäsite ores.

Обобщенная схема экстракции монацита и ксенотима из тяжелых песков

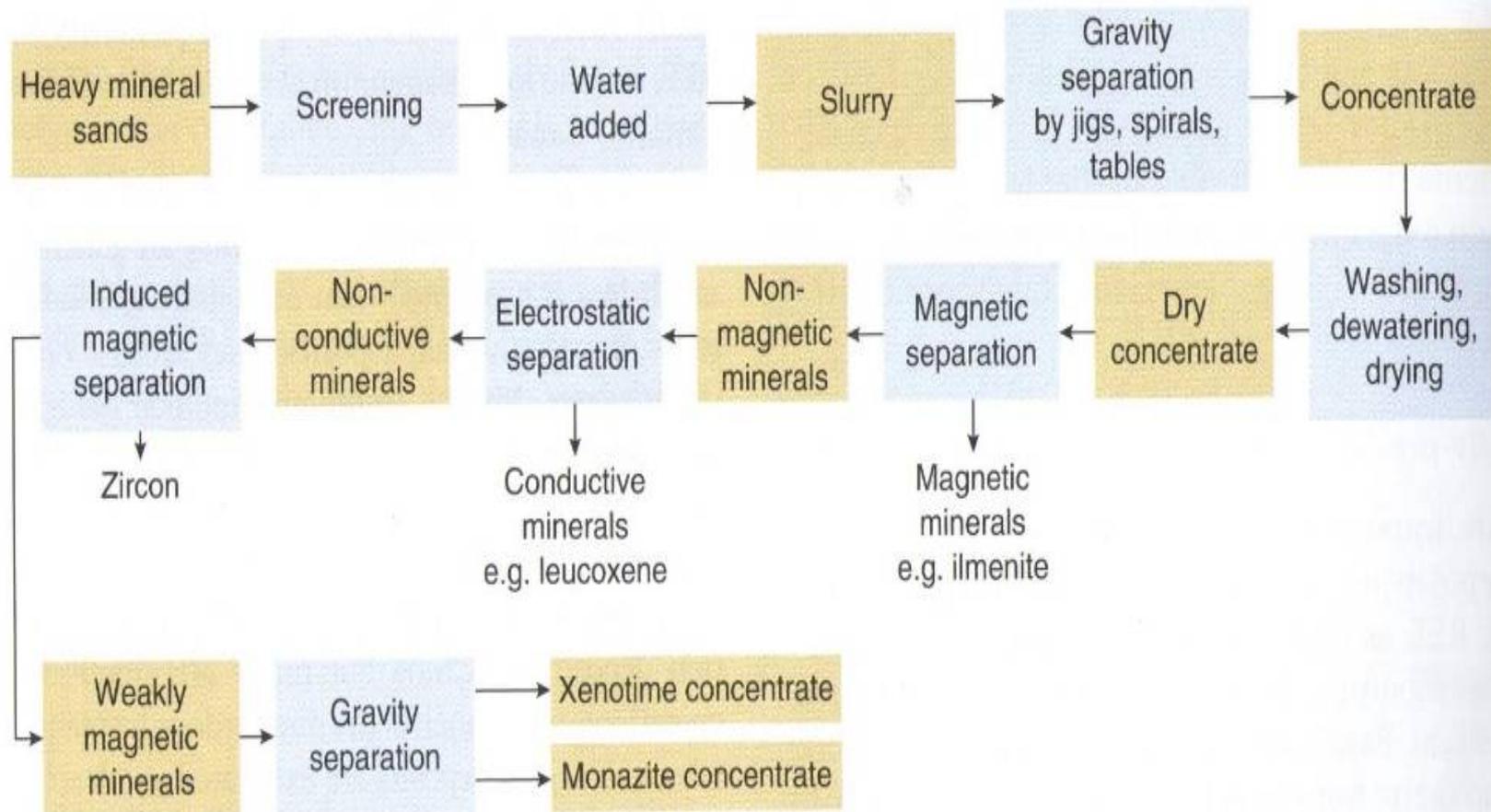


Figure 13.8 Schematic summary for the extraction of monazite and xenotime from heavy mineral sands.

Схематическая диаграмма экстракции редких земель из бастнезита месторождения Маунтин Пасс

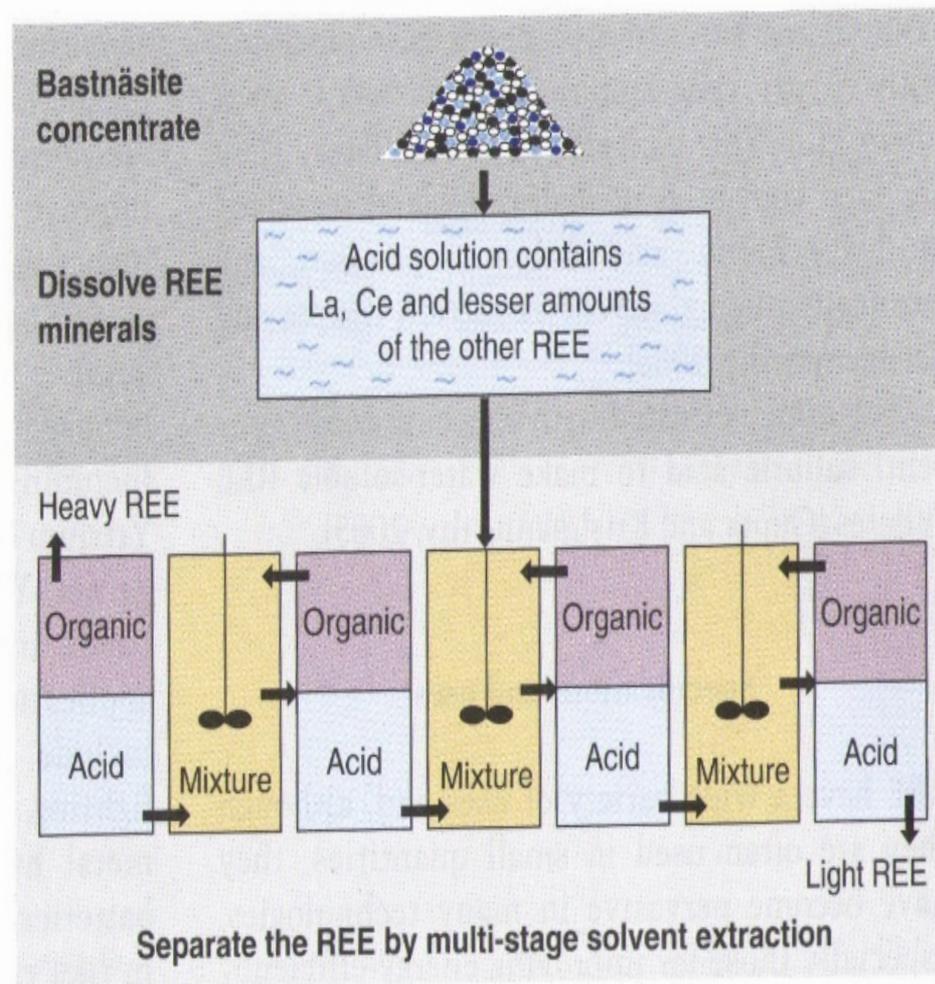


Figure 13.9 Schematic flowsheet for the extraction of rare earths from bastnäsite at Mountain Pass. (After Molycorp Inc., 2011b.)

BGS Производство редких земель в 1992–2010 гг (по данным BGS)

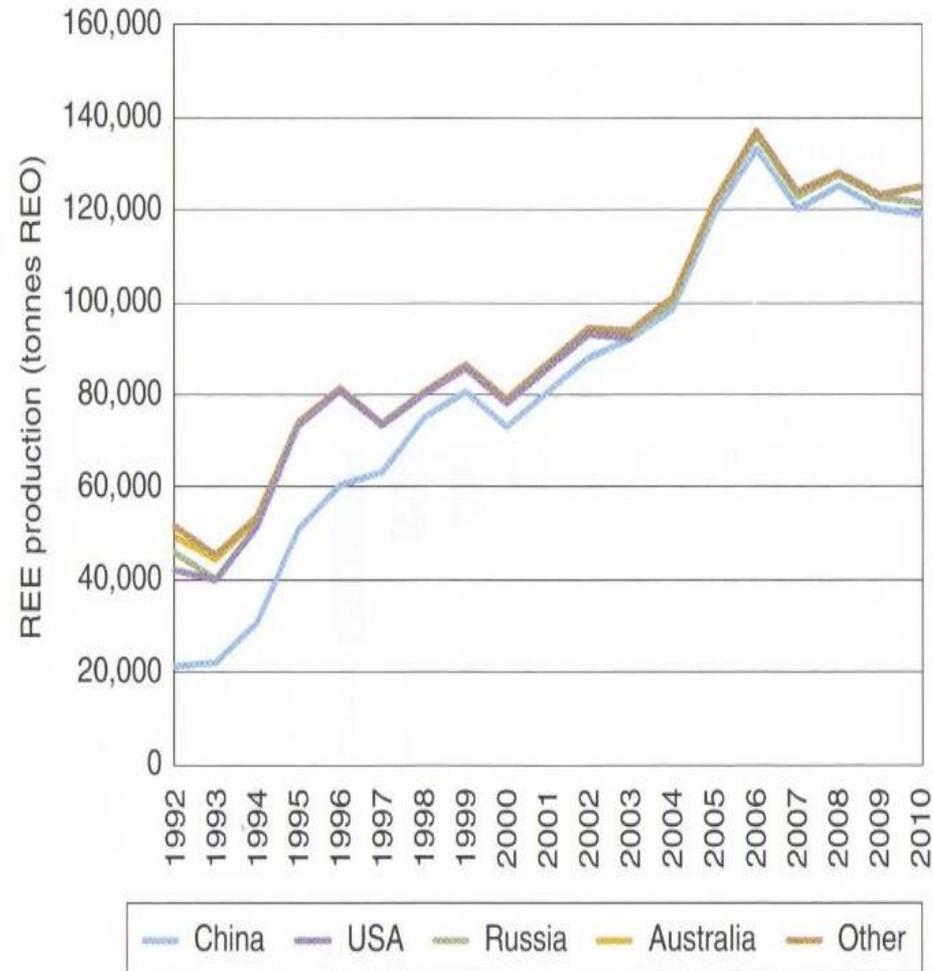


Figure 13.10 Rare earth production between 1992–2010. (Data from British Geological Survey World Mineral Statistics database.)

Импорт и экспорт редких земель и их соединений в 2009 г. (по данным BGS)

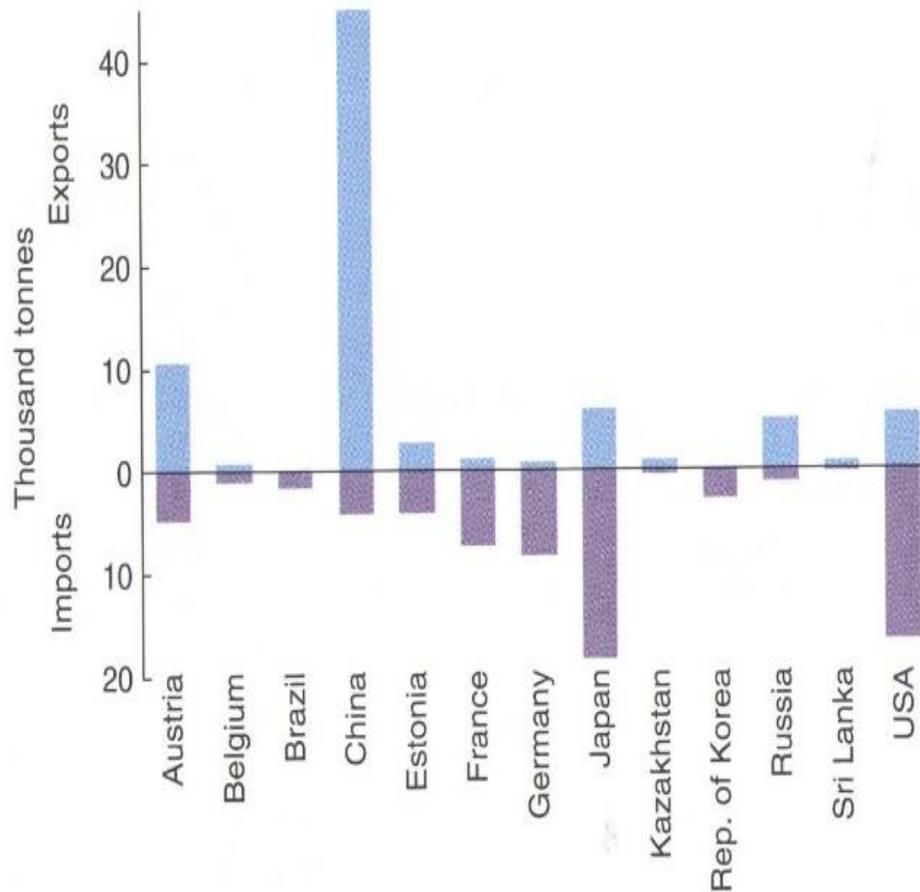


Figure 13.11 Imports and exports of rare earth metals and compounds, 2009. (Data from British Geological Survey World Mineral Statistics Database and UN Comtrade, 2013.)

Цены редкоземельных металлов, оксидов, мишметалла и смешанных LREE карбонатов в январе 2013 г.

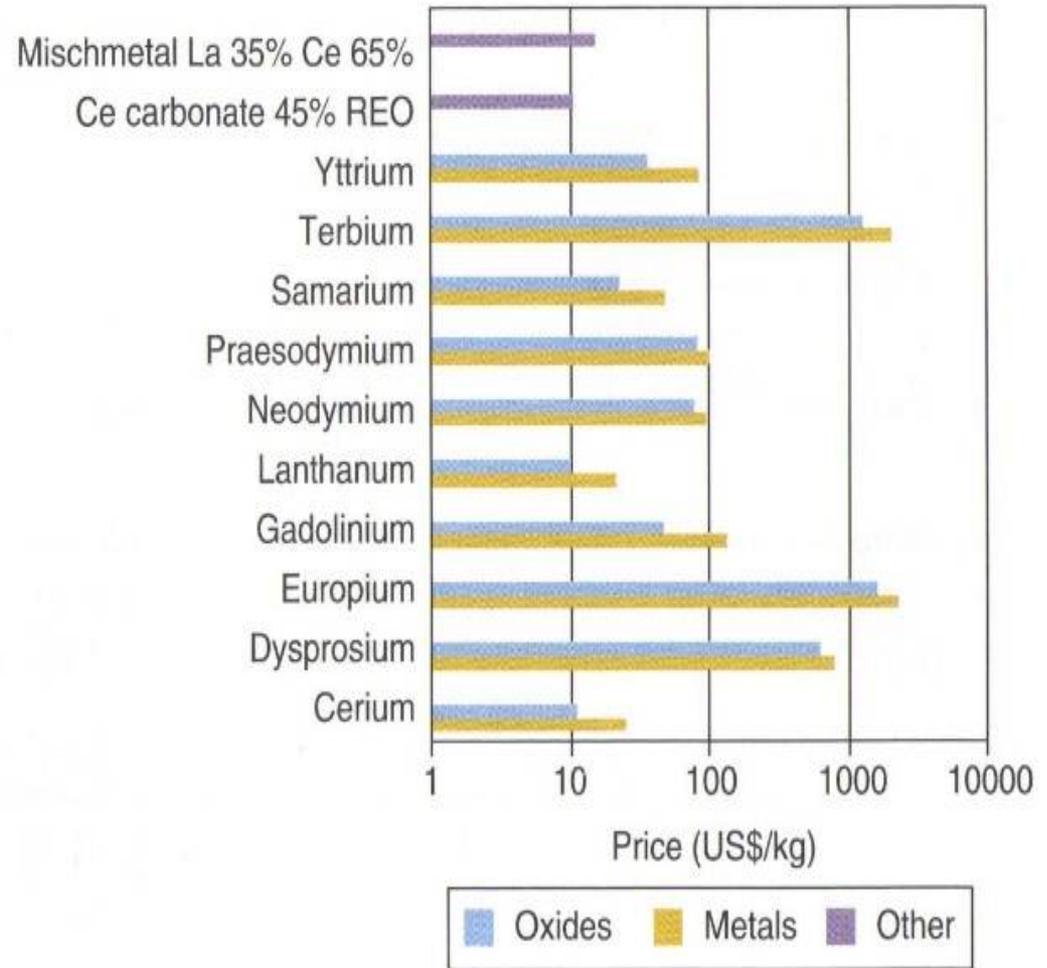


Figure 13.12 Prices of rare earth metals, oxides, mischmetal and mixed light REE carbonate in January 2013. Prices are FOB China, 99% metal min., except Y 99.9% min.; oxide: FOB China, 99% min., except Eu 99.9%, Y, 99.999%. (Data from Metal Pages, www.metal-pages.com.)

Ежеквартальные средние цены на отдельные LREE

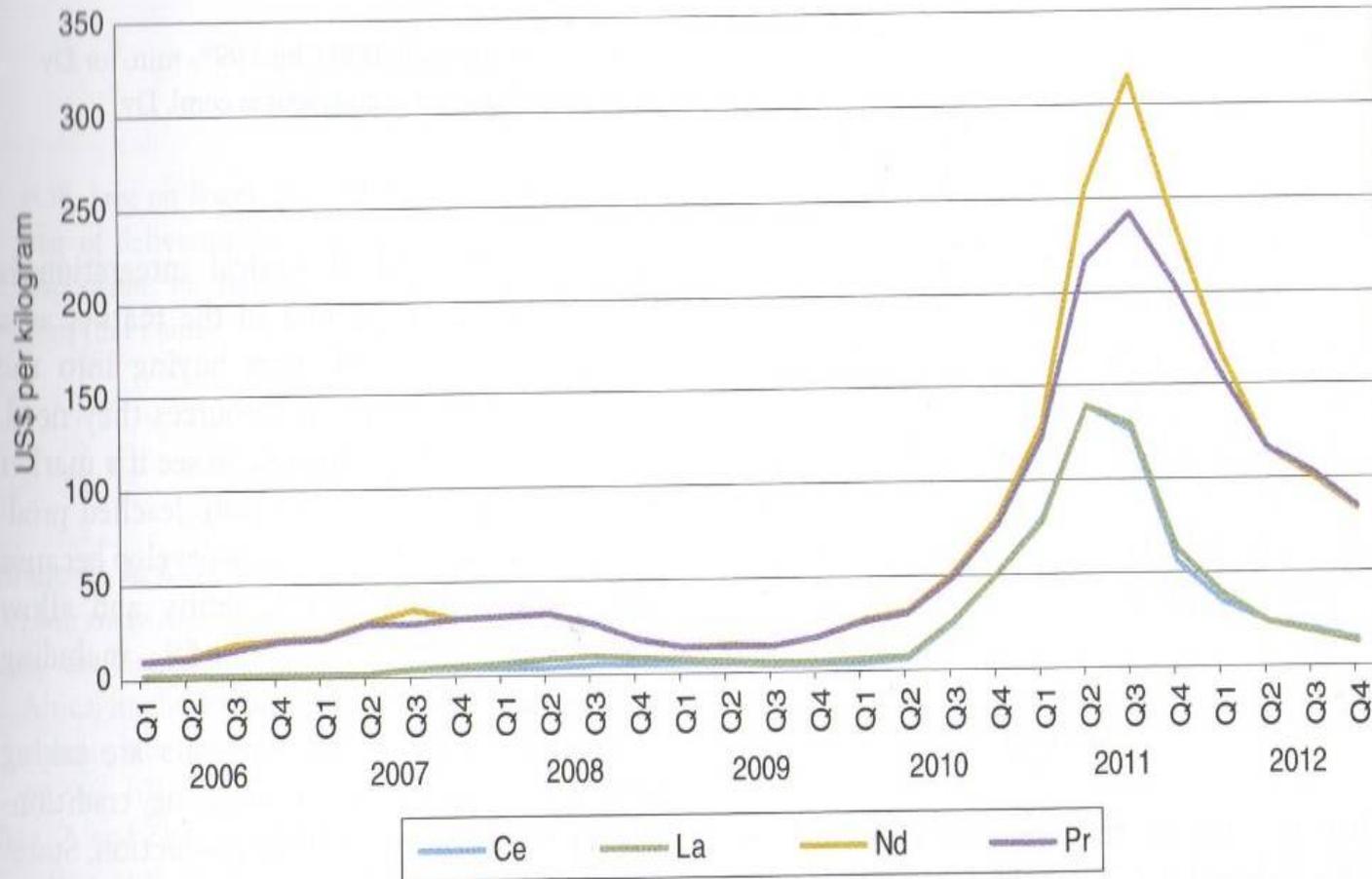


Figure 13.13 Quarterly average prices for selected LREE. Prices are for oxide FOB China 99% min. (Data from Metal Pages, www.metal-pages.com). Ce, cerium; La, lanthanum; Nd, neodymium; Pr, praseodymium.

Ежеквартальные средние цены на отдельные НРЭЕ

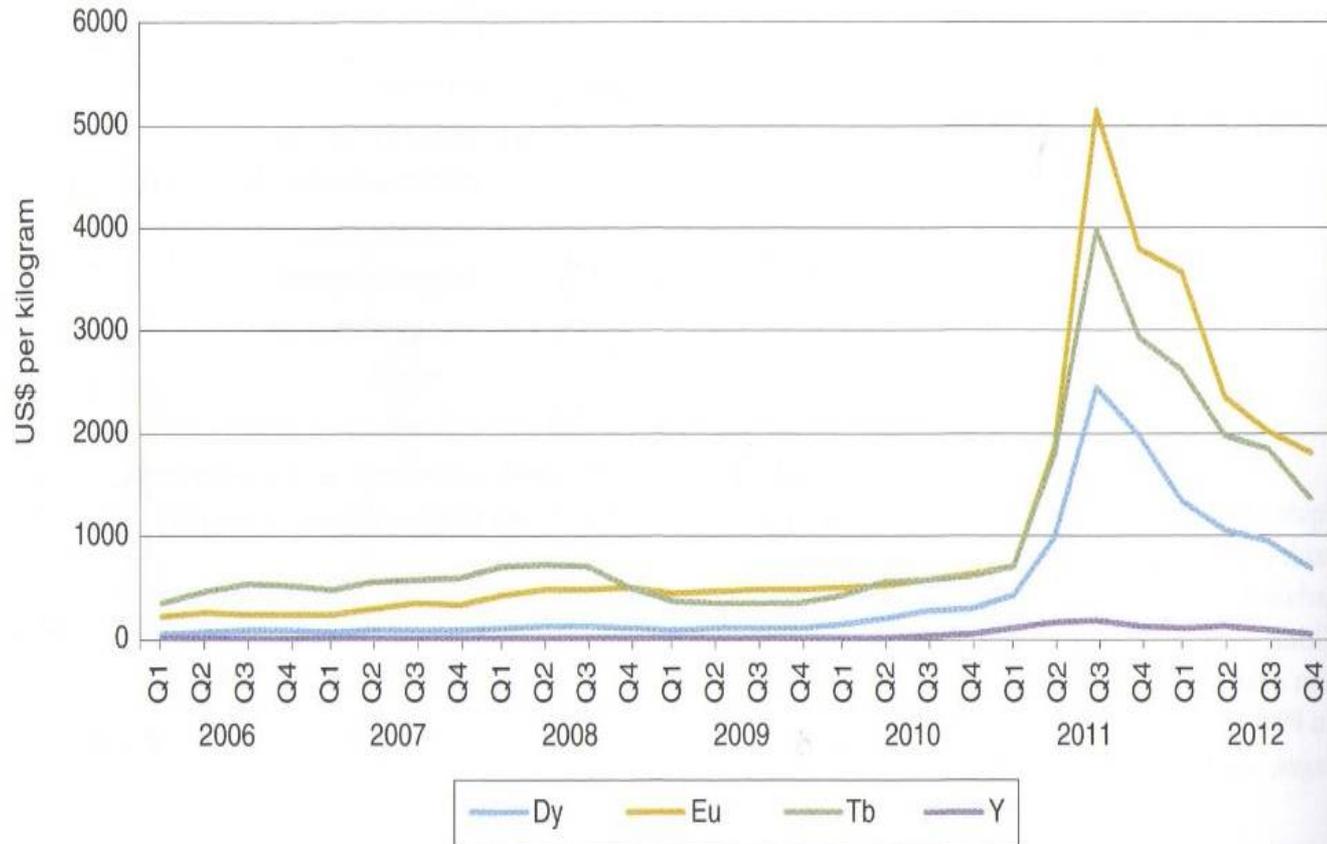


Figure 13.14 Quarterly average prices for selected HREE and Y. Prices are for oxide FOB China 99% min. for Dy and Tb, 99.9% min. for Eu, and 99.999% min. for Y. (Data from Metal Pages, www.metal-pages.com). Dy, dysprosium; Eu, europium; Tb, terbium; Y, yttrium.

Легкие и тяжелые редкие земли, их содержания (кларки) в земной коре по

Element	Symbol	Atomic number	Crustal abundance
Light REEs			
Lanthanum	La	57	39
Cerium	Ce	58	66.5
Praseodymium	Pr	59	9.2
Neodymium	Nd	60	41.5
Samarium	Sm	62	7.05
Europium	Eu	63	2.0
Gadolinium	Gd	64	6.2
Heavy REEs			
Terbium	Tb	65	1.2
Dysprosium	Dy	66	5.2
Holmium	Ho	67	1.3
Erbium	Er	68	3.5
Thulium	Tm	69	0.52
Ytterbium	Yb	70	3.2
Lutetium	Lu	71	0.8
Yttrium	Y	39	33

Спасибо за внимание!