

Тема занятия (лекция № 3):

**ПОВЕДЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В  
МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ  
(и их индикаторная роль)**

1	1	ГРУППЫ																18						
1	<b>H</b> 1.0079																	<b>He</b> 4.0026						
2	<b>Li</b> 6.941	<b>Be</b> 9.0122																	<b>B</b> 10.811	<b>C</b> 12.011	<b>N</b> 14.007	<b>O</b> 15.999	<b>F</b> 18.998	<b>Ne</b> 20.18
3	<b>Na Mg</b> 22.99 24.305		Переходные металлы																<b>Al</b> 26.982	<b>Si</b> 28.086	<b>P</b> 30.974	<b>S</b> 32.066	<b>Cl</b> 35.453	<b>Ar</b> 39.948
4	<b>K Ca</b> 39.098 40.078		Sc 44.956	<b>Ti</b> 47.88	V 50.941	Cr 51.996	Mn 54.938	<b>Fe</b> 55.847	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.39	Ga 69.723	Ge 72.61	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.8						
5	<b>Rb</b> 85.468	<b>Sr</b> 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.94	Tc (97.91)	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.9	Xe 131.29						
6	<b>Cs</b> 132.91	<b>Ba</b> 137.33	La 138.91	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po (209)	At (210)	Rn (222)						
7	<b>Fr</b> (223)	<b>Ra</b> (226)	Ac (227)	Rf (261.1)	Db (262.1)	Sg (263.1)	Bh (262.1)	Hs (265.1)	Mt (266.1)	Uun (269)	Uuu (272)	Uub (277)												

Лантаниды

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>	<b>Lu</b>

Актиниды

140.12	140.91	144.24	(144.9)	150.36	151.97	157.25	158.93	162.5	164.93	167.26	168.93	173.04	174.97
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>	<b>Lr</b>
232.04	231.04	238.03	(237)	(244.1)	(243.1)	(247.1)	(247.1)	(251.1)	(252.1)	(257.1)	(258.1)	(259.1)	

Group Legend

<span style="background-color: red; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Alkali Metal	<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Actinides
<span style="background-color: blue; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Alkali Earth	<span style="background-color: lightgreen; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Lanthanides
<span style="background-color: lightgrey; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Metal	<span style="background-color: magenta; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Non-metal
<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Trans. Met.	<span style="background-color: cyan; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Halogen
<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 10px; height: 10px;"></span> Noble Gas	

# Классификация химических элементов по Гольшмидту

Сидерофильные	Халькофильные	Литофильные	Атмофильные
Co, Ni	Fe, (Co), (Ni)	Li, Na, K, Rb, Cs	H, N, O
Ru, Rh, Pd	(Ru), (Rh), (Pd)	Be, Mg, Ca, Sr, Ba	He, Ne, Ar,
Os, Ir, Pt	(Os), (Pt)	B, Al, Sc, Y, REE	Kr, Xe
Au, Re, Mo	Se, Te, (Mo)	Si, Ti, Zr, Hf,	
Ge, Sn, W	(Ge), (Sn), Pb	Th, U	
Cu, Ga	(Cu), Ag	P, V, Cr, Nb, Ta	
As, Sb	(As), (Sb), Bi	(H), (O), Cl, Br, I	
	Zn, Cd, Hg	(Fe), Mn, (Zn), (Ga)	
	(Ga), In, Tl		

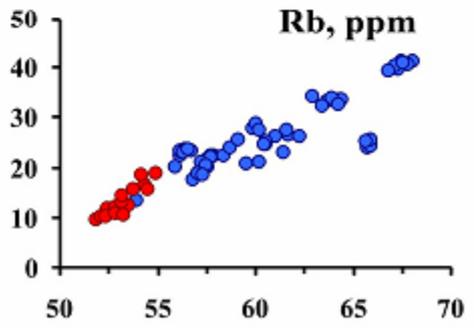
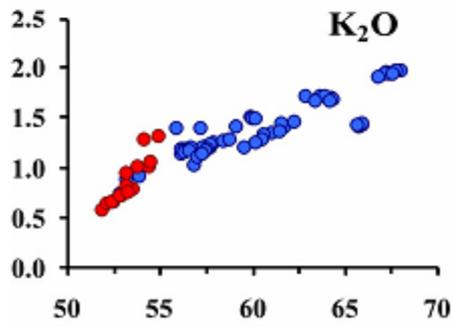
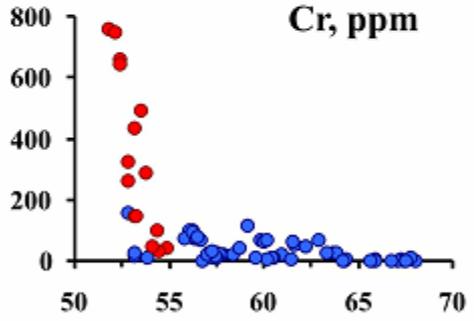
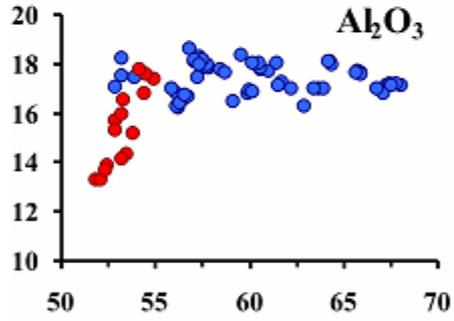
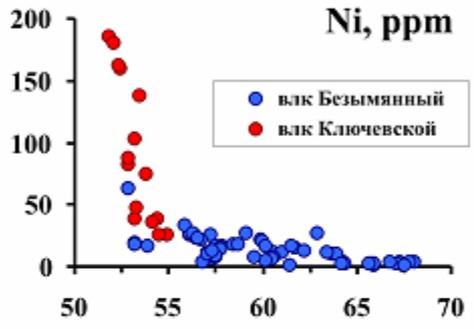
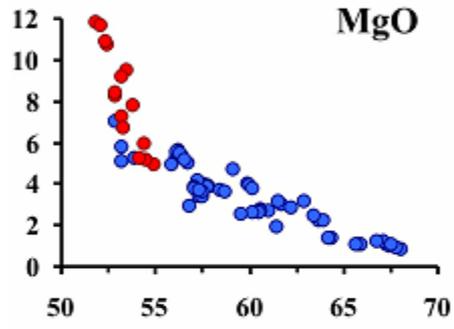
1	1	2											18					
1	H 1.0079	II ← ГРУППЫ →										III	IV	V	VI	VII	He 4.0026	
2	Li 6.941	Be 9.0122											B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.18
3	Na 22.99	Mg 24.305	Переходные металлы										Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.066	Cl 35.453	Ar 39.948
4	K 39.098	Ca 40.078	Sc 44.956	Ti 47.88	V 50.941	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.847	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.39	Ga 69.723	Ge 72.61	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.8
5	Rb 85.468	Sr 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.94	Tc (97.91)	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.9	Xe 131.29
6	Cs 132.91	Ba 137.33	La 138.91	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po (209)	At (210)	Rn (222)
7	Fr (223)	Ra (226)	Ac (227)	Rf (261.1)	Db (262.1)	Sg (263.1)	Bh (262.1)	Hs (265.1)	Mt (266.1)	Uun (269)	Uuu (272)	Uub (277)						

## Определение понятия “микроэлемент”:

*это такой химический элемент, который в рассмотренной магматической системе не образуют собственных минеральных фаз стехиометрического состава*

<span style="color: red;">■</span> Alkali Metal	<span style="color: green;">■</span> Actinides
<span style="color: blue;">■</span> Alkali Earth	<span style="color: yellow;">■</span> Lanthanides
<span style="color: grey;">■</span> Metal	<span style="color: magenta;">■</span> Non-metal
<span style="color: lightyellow;">■</span> Trans. Met.	<span style="color: cyan;">■</span> Halogen
<span style="border: 1px solid black;">□</span> Noble Gas	

ЭВОЛЮЦИЯ ГЛАВНЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНОЙ СЕРИИ ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ И БЕЗЫМЯННОЙ (Вост. Камчатка)



## Свойства микроэлементов

при низких содержаниях в породах некоторые из них могут варьировать в 10-100 раз, иногда охватывая диапазон от первых ppm до ~1000 ppm

10 главных компонентов слагают около 99% породы, а на оставшийся 1% приходится около 80 микроэлементов.

И каждый по-своему чувствителен к изменению параметров магматических процессов.

**Индикаторная роль** микроэлементов проявляется не только как концентрационные особенности той или иной геотектонической обстановки, но также в оценке физико-химических условий образования и эволюции магм.

## ИНДИКАТОРНЫЕ СВОЙСТВА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

Элементы	Предпочтительное распределение по фазам и интерпретация
Ni, Co, Cr	Высокие содержания в базальтах (~300 ppm для Ni и 600 ppm для Cr) служат индикатором связи с мантийным источником. Резкое обеднение Ni и Co в серии пород указывает на кристаллизацию <i>OI</i> , а обеднение Cr – на <i>Crх</i> .
V, Ti	Показатели кристаллизации ильменита и магнетита.
Zr, Hf	Классические несовместимые элементы, но могут замещать Ti в акцессорных фазах, напр. рутиле и сфене.
Ba, Rb	Несовместимы в отношении <i>OI</i> и <i>Crх</i> , но могут замещать K в плагиоклазе, роговой обманке и биотите.
Sr (Eu)	Входит в плагиоклаз, замещая Ca, и является показателем кристаллизации этого минерала на небольших глубинах. В процессах мантийного плавления ведут себя подобно несовместимому элементу.
Р.З.Э.	Несовместимы с <i>OI</i> , <i>Orх</i> и <i>Pl</i> , но входят в <i>Crх</i> и роговую обманку. Особенно обогащают гранаты. Eu может входить в плагиоклаз, что служит индикатором присутствия полевого шпата в мантийном источнике или кристаллизации <i>Pl</i> в ходе магматической эволюции.
Y	Обычно ведет себя как несовместимый элемент, параллельно содержаниям тяжелых Р.З.Э. Может обогащать гранат и амфибол.
U, Th	Классические несовместимые элементы, не имеющие фаз - концентраторов.

**“Совместимые” (*compatible*) и “несовместимые” (*incompatible*) элементы:**

К совместимым относят элементы, которые распределяются (концентрируются) преимущественно в кристаллизующихся минералах, обогащают твердую фазу относительно сосуществующего расплава

Несовместимыми называются микроэлементы, которые в ограниченных количествах допускаются в кристаллы, поэтому в процессах кристаллизации и плавления перераспределяются преимущественно в жидкость.

# Значение коэффициентов распределения минерал - расплав

$$D_i = C_i^{\text{минерал}} / C_i^{\text{расплав}}$$

Совместимые элементы

$$D_i > 1$$

Несовместимые элементы

$$D_i \ll 1$$

“Индифферентные” элементы

$$D_i \approx 1$$

# Примеры коэффициентов распределения минерал – расплав в базальтовой системе

	Olivine	Opx	Cpx	Garnet	Plag	Amph	Magnetite
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	<i>0.01</i>	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	<i>0.01</i>	2.00	7.4
La	0.007	<i>0.03</i>	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.582	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	6.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993).

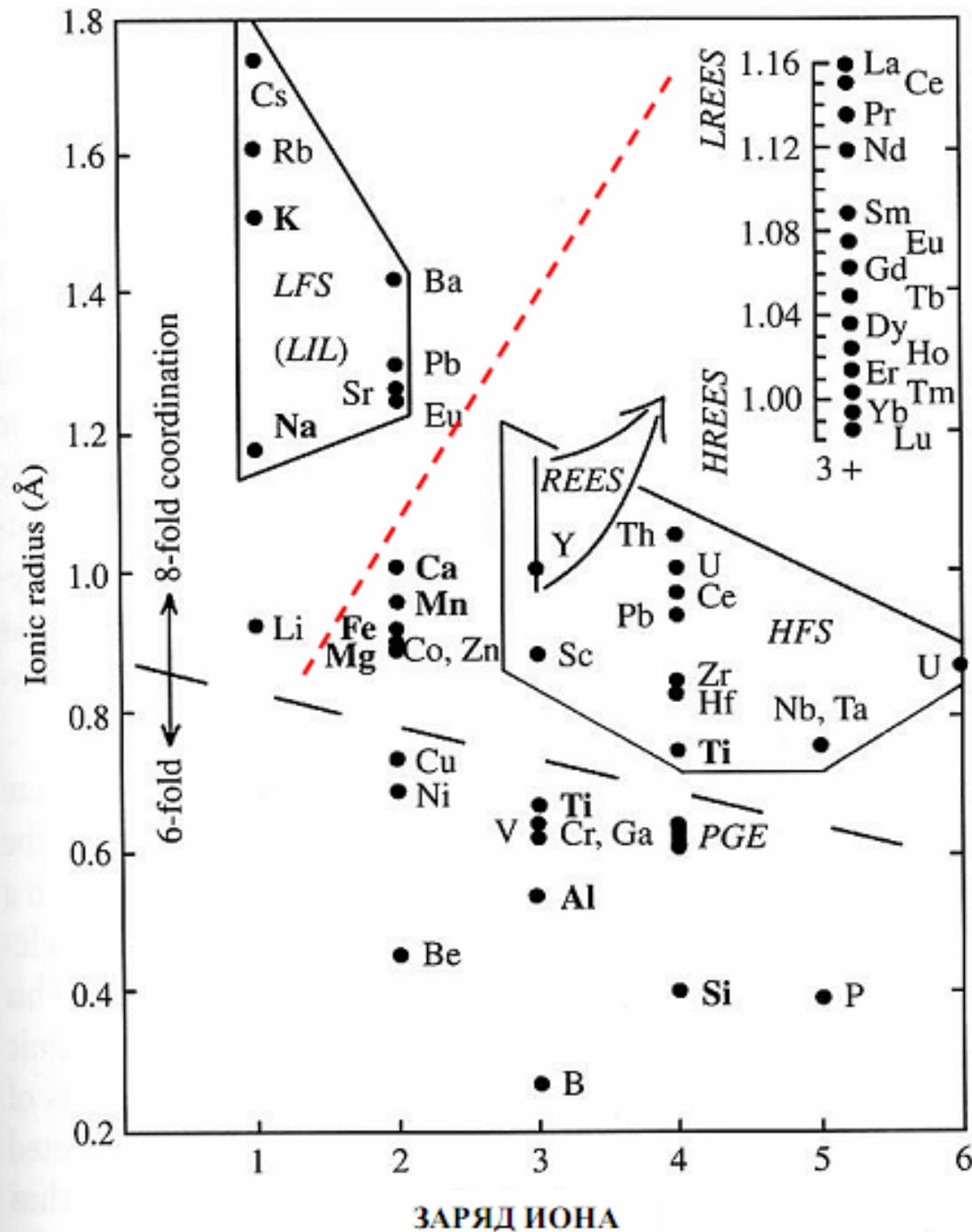
\*  $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$  *Italics* are estimated

# ПРАВИЛА ГОЛЬДШМИДТА

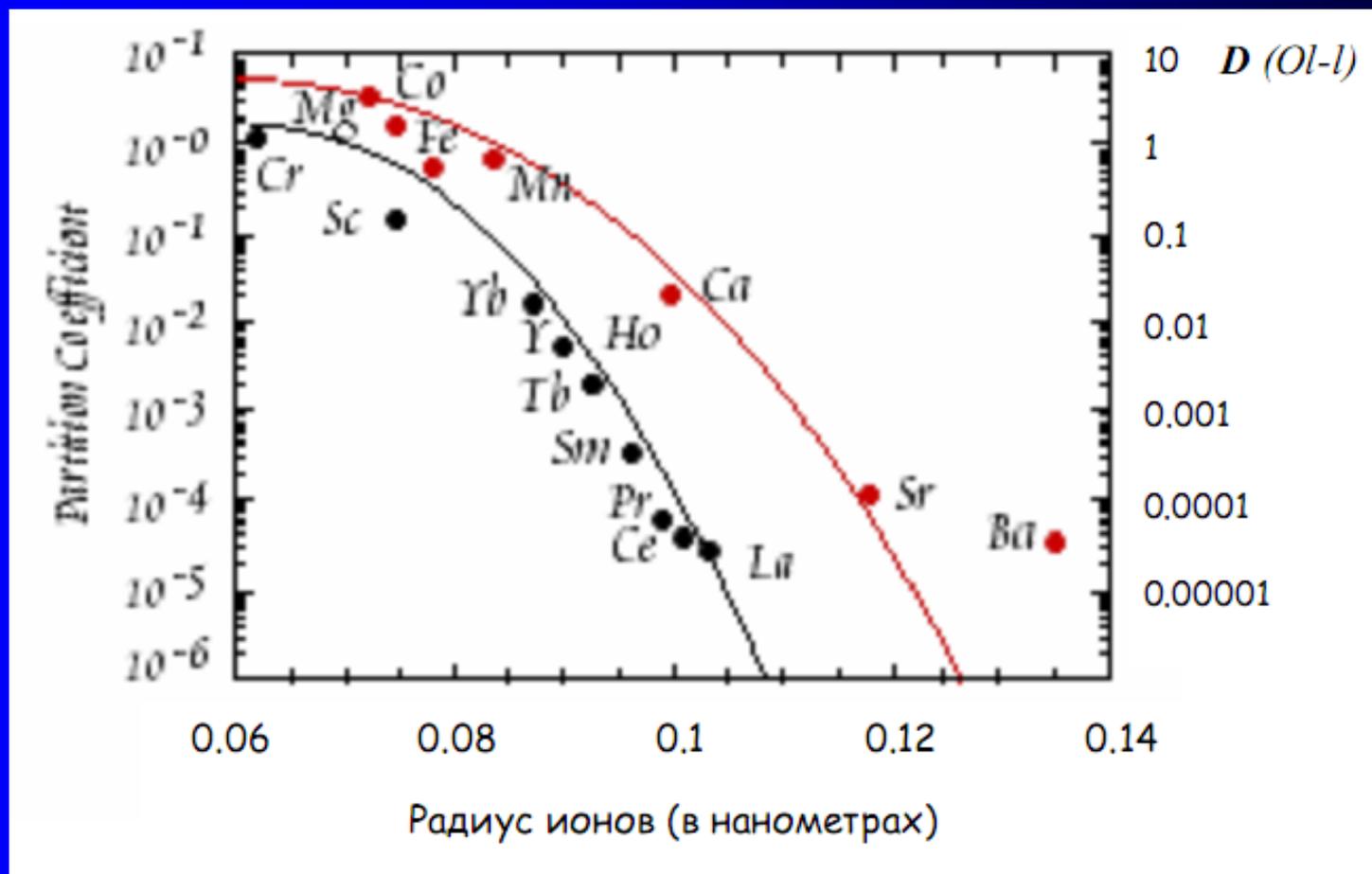
1. Два иона одной валентности и близкого радиуса легко образуют взаимные твердые растворы (Fe-Mg или Mg-Ni в оливинах).
2. В таких растворах обычно ион меньшего размера характеризуется более высоким значением D (например, Ni в оливинах - см. таблицу).
3. Если же два иона близкого радиуса имеют разную валентность, то более высокозарядный катион в большей степени концентрируется в кристалле (например, Li и Mn в оливине или K и Ba в плагиоклазе).

*Из любого правила есть исключения...*

# Кристаллохимическая классификация элементов



Примеры модельных зависимостей, описывающих экспериментальные значения коэффициентов распределения оливин – расплав  
(Blundy, Wood, 1992)



# Кристаллохимическая классификация элементов

Ионный потенциал

$$I = Z/R$$

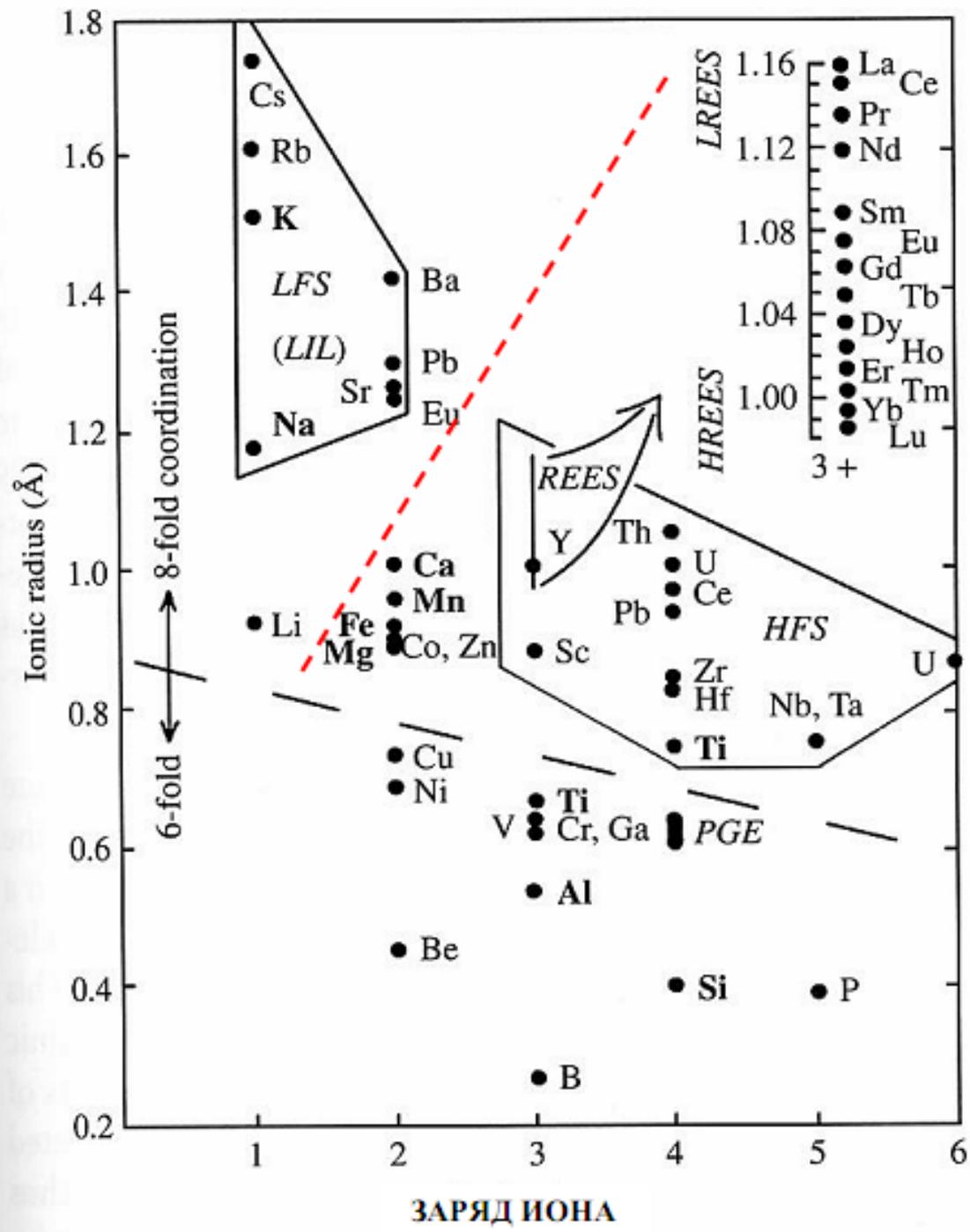
Линия  $I=2$  разделяет

**LILE** - Large-Ion Lithophile Elements и

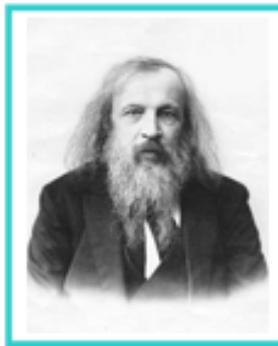
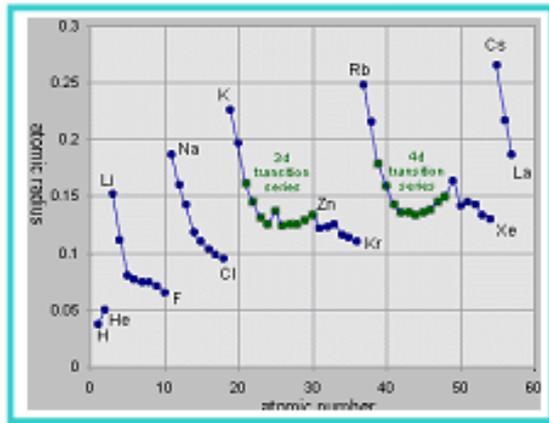
**HFSE** - High-Field-Strength Elements

$$HFS = Z/L$$

где  $L$  - расстояние между катионом металла и анионом кислорода в оксидных системах



# РЕДКИЕ ЗЕМЛИ (Р.З.Э.)



1+

H

2+ Зависимость радиуса от атомного номера

Зависимость радиуса от атомного номера

3+

4+

5+

2-

1-

Li

Be

B

C

O

F

Na

Mg

3+

4+

5+

6+

Al

Si

P

S

Cl

K

Ca

Sc

Ti

V

Cr

Rb

Sr

Y

Zr

Nb

Mo

Cs

Ba

Ln

Hf

Ta

W

Полная сводка атомных радиусов



La

Ce

Pr

Nd

Pm

Sm

Eu

Gd

Tb

Dy

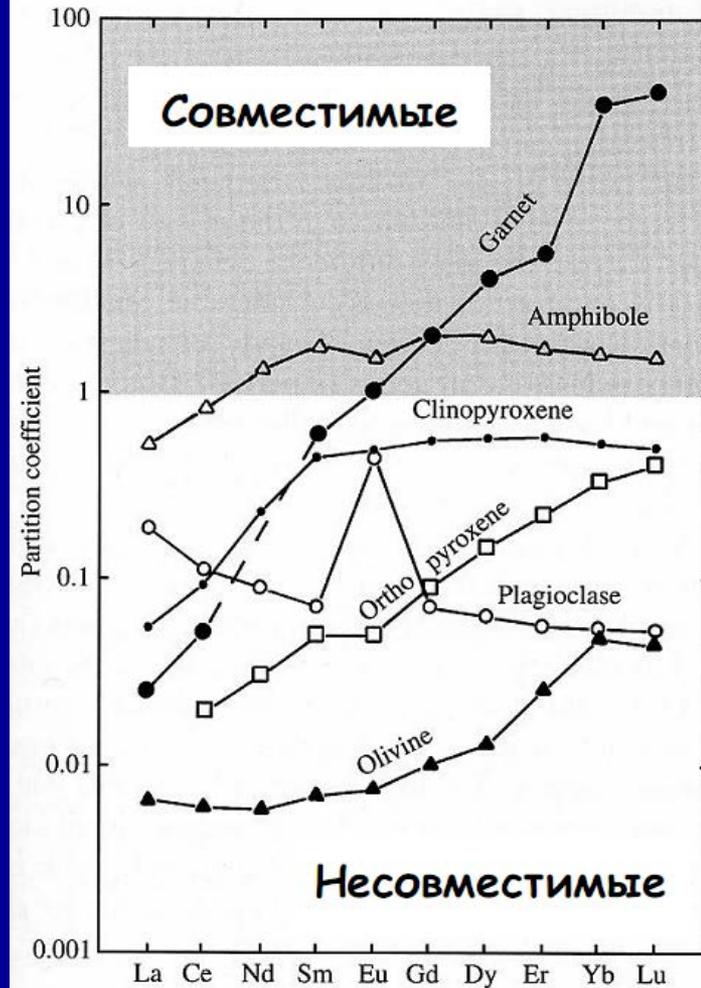
Ho

Er

Tm

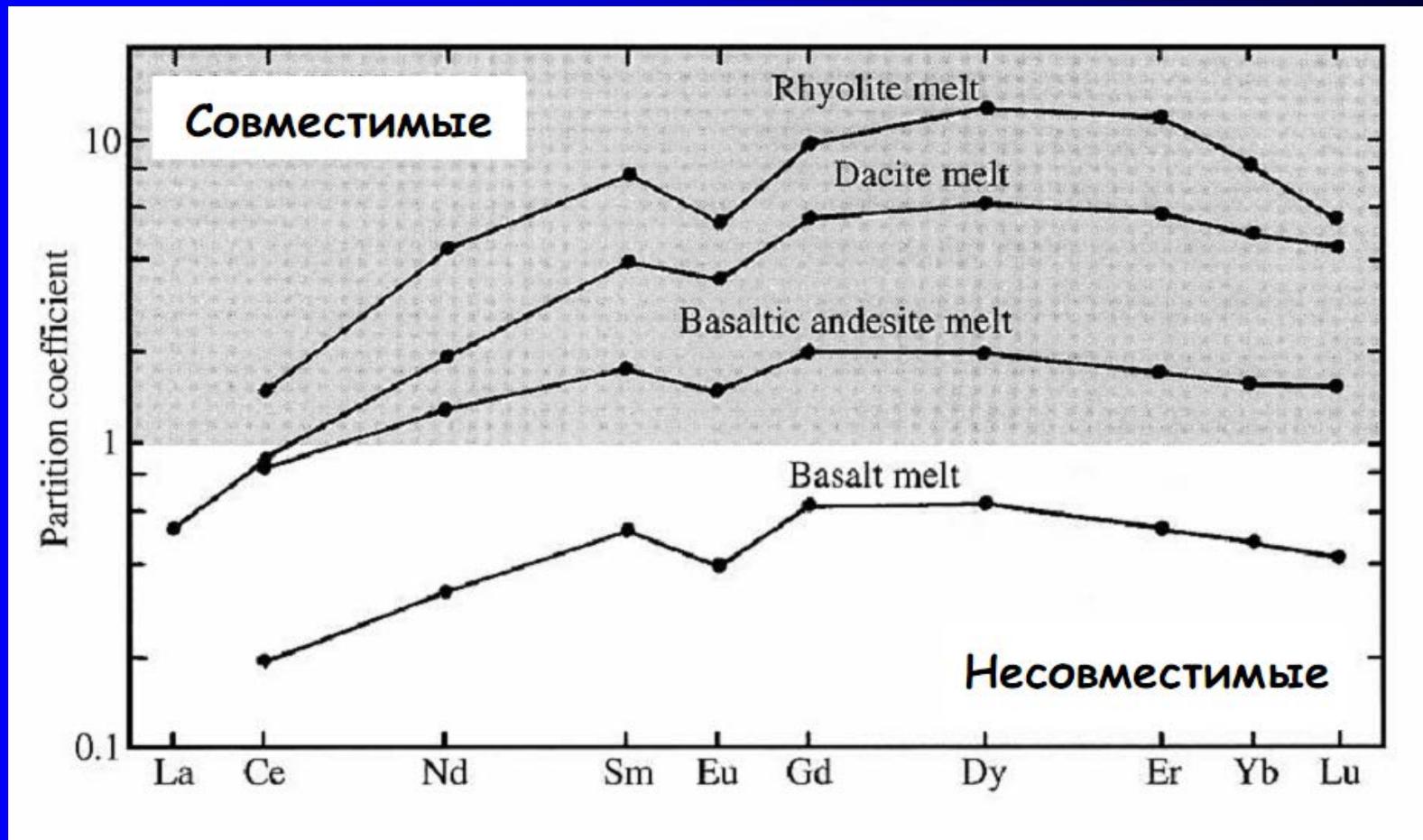
Yb

Lu



Коэффициенты распределения РЗЭ в базальтовой системе

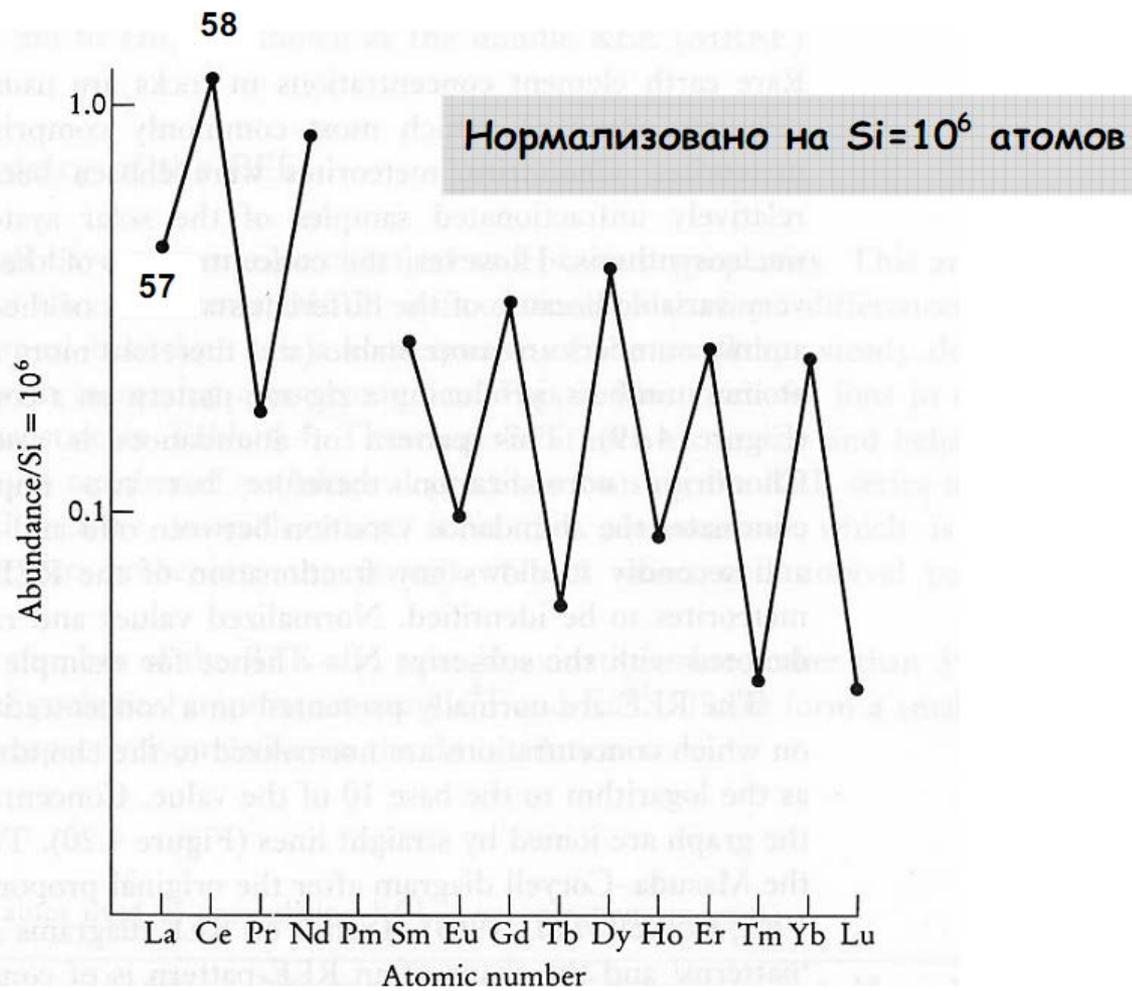
# Зависимость коэффициентов распределения минерал – расплав от состава системы



Коэффициенты распределения РЗЭ для пары амфибол - расплав в системах разного состава

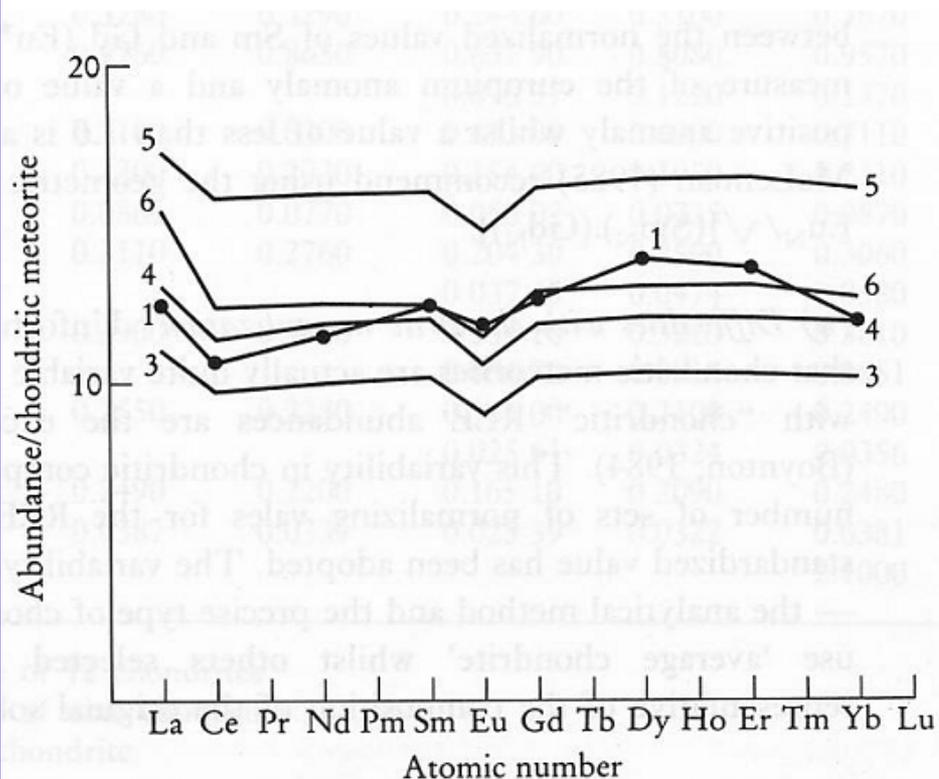
# Индикаторные диаграммы для микроэлементов

## РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ Р.З.Э. В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ



# Индикаторные диаграммы для микроэлементов

## СОДЕРЖАНИЯ Р.З.Э. В ТОЛЕИТОВОМ БАЗАЛЬТЕ, НОРМАЛИЗОВАННЫЕ НА СОСТАВ РАЗЛИЧНЫХ ОБЫКНОВЕННЫХ ХОНДРИТОВ



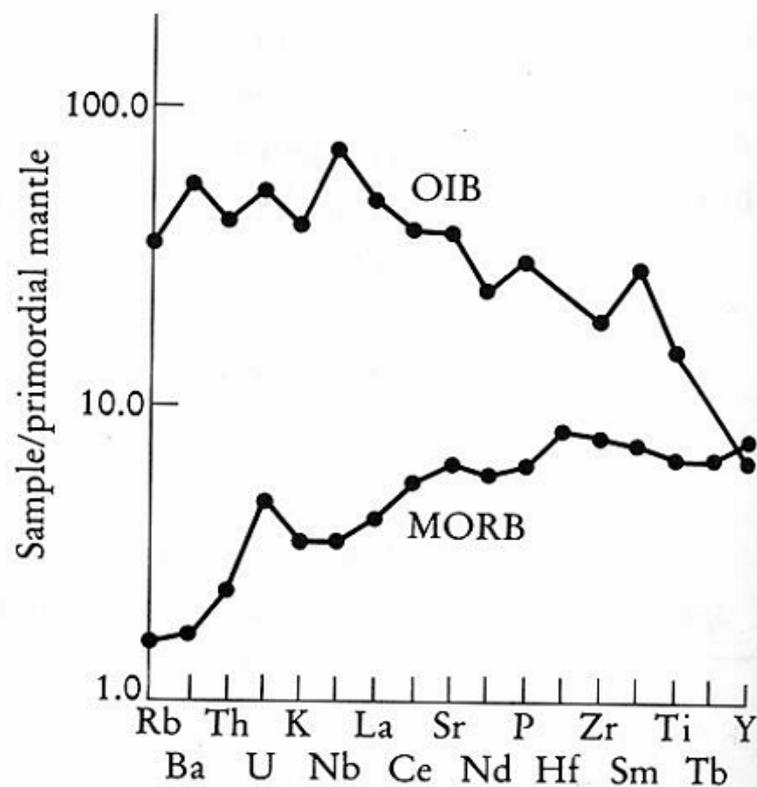
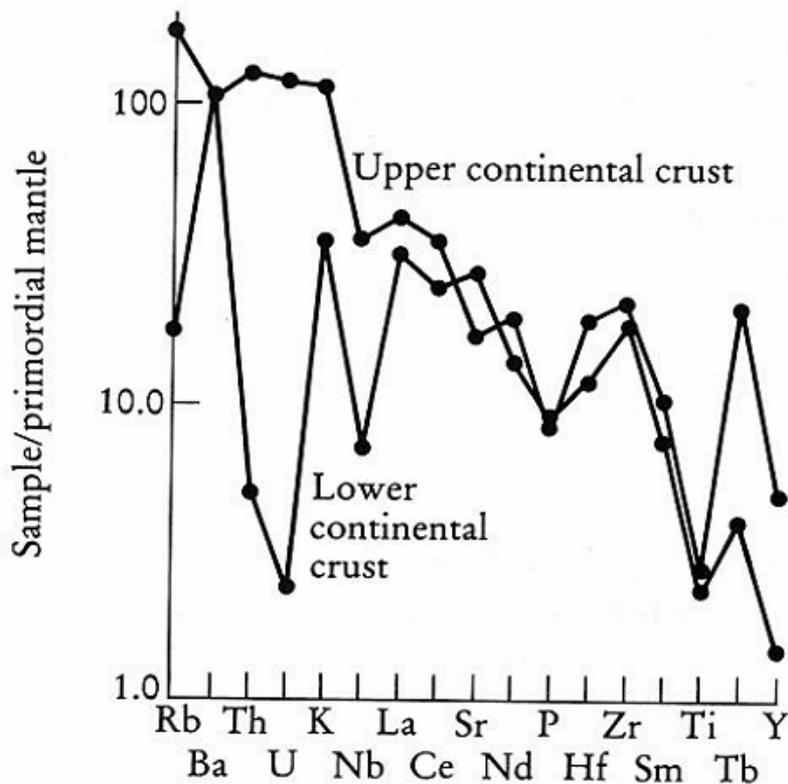
1 - 6 - один и тот же образец,  
нормализованный на составы  
различных хондритов

### Концентрации Р.З.Э. в хондрите и примитивной мантии Земли

Элемент	Хондрит	Мантия
La	0.237	0.687
Ce	0.612	1.775
Nd	0.467	1.354
Sm	0.15	0.444
Eu	0.058	0.168
Gd	0.206	0.596
Tb	0.037	0.108
Dy	0.254	0.737
Ho	0.057	0.164
Er	0.166	0.480
Tm	0.026	0.074
Yb	0.170	0.493
Lu	0.025	0.074

# Индикаторные диаграммы для микроэлементов

## ПРИМЕРЫ СПАЙДЕР-ДИАГРАММ (нормировка на состав примитивной мантии)



# Индикаторные диаграммы для микроэлементов

## ДИАГРАММА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ОБОГАЩЕНИЯ - ОБЕДНЕНИЯ



# Индикаторные диаграммы для микроэлементов

ПРИМЕРЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДИАГРАММ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЙ СОСТАВОВ  
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК

**MORB** - Толеиты срединно-океанических хребтов

**IAT** - Толеиты островных дуг

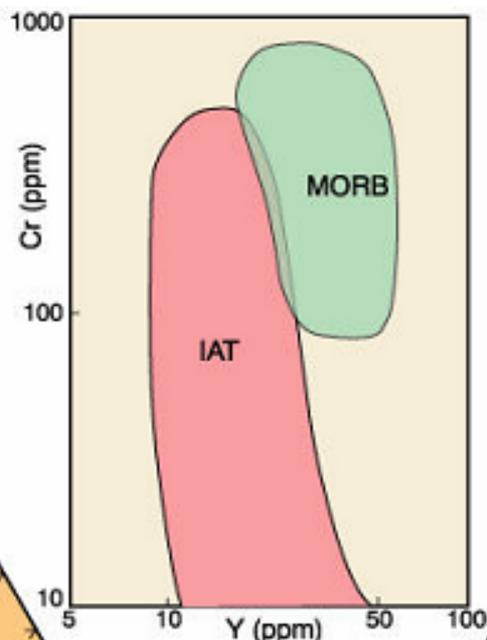
**OIT** - Толеиты океанических островов

**OIA** - Щелочные базальты океанических островов

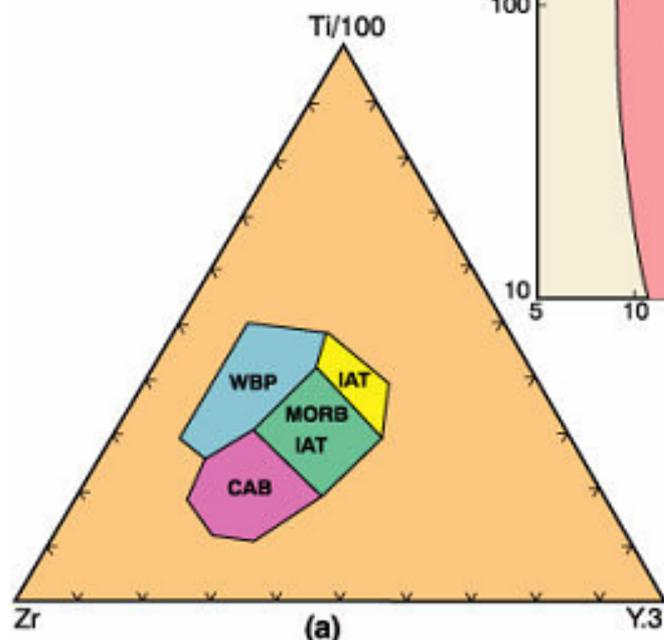
**CAB** - Известково-щелочные базальты

## Explanation

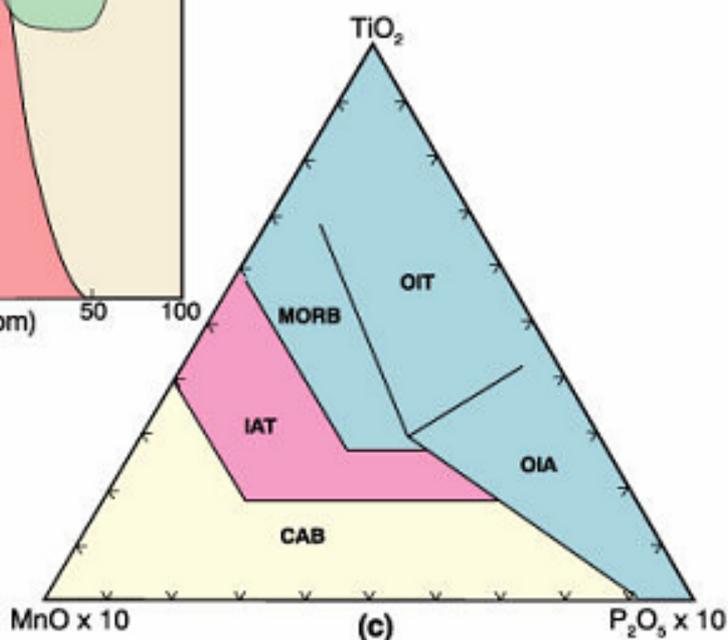
WBP within-plate basalts  
IAT island-arc tholeiites  
CAB calc-alkaline basalts  
MORB mid-ocean ridge basalts  
OIT ocean island tholeiite  
OIA ocean island alkaline basalt



(b)



(a)



(c)