

# Интерпретация вещественного состава магматических горных пород

## *Рекомендованная литература*

- 1. Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геодинамических обстановок. М.: Изд-во МГУ, 1997.*
- 2. Интерпретация геохимических данных (под ред. Е.В.Склярова). М.: 2001.*
- 3. Мартынов Ю.А. Основы магматической геохимии. Владивосток: Дальнаука, 2010.*

# Лекция 1

- *общий алгоритм лабораторного исследования магматических пород*
- *основы геохимии элементов*
- *поведение элементов в магматическом процессе*
- *процессы дифференциации магм*
- *интерпретация состава магматических серий*

# Полевые исследования

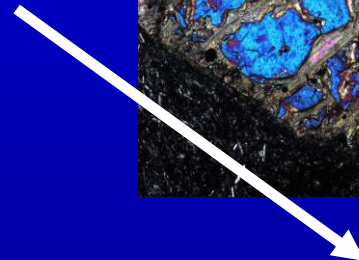
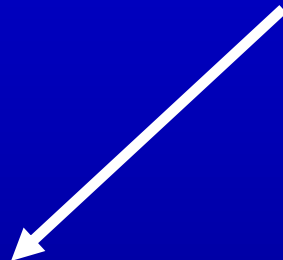
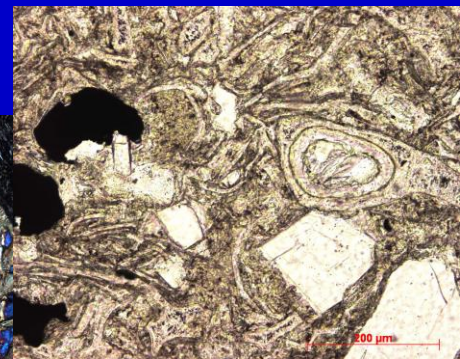
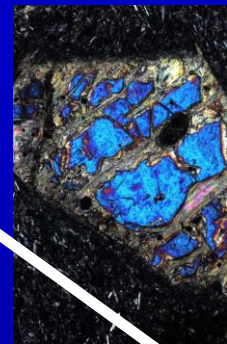


# Общий алгоритм лабораторного исследования магматических пород

полевые работы



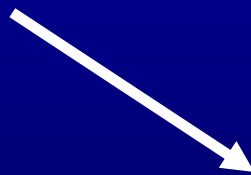
петрография



**химический анализ валовых проб**  
(XRF, ICPMS, INAA, ....)

извлечение мономинеральных фракций

электронная микроскопия и микронзондовые исследования (анализ химического и изотопного состава)



анализ изотопного состава (масс-спектрометрия)

# Геохимия элементов

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																	
	A	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	B								
1	(H)										H Hydrogenium Водород		He Helium Гелий					
2	Li Lithium Литий	Be Beryllium Бериллий	B Borum Бор	C Carboneum Углерод	N Nitrogenium Азот	O Oxygenium Кислород	F Fluorum Фтор	Ne Neon Неон										
3	Na Natrium Натрий	Mg Magnesium Магний	Al Aluminium Алюминий	Si Silicium Кремний	P Phosphorus Фосфор	S Sulfur Сера	Cl Chlorium Хлор	Ar Argon Аргон										
4	K Kalium Калий	Ca Calcium Кальций	Sc Scandium Скандий	Ti Titanium Титан	V Vanadium Ванадий	Cr Chromium Хром	Mn Manganum Марганец	Fe Ferrum Железо	Co Cobaltum Кобальт	Ni Niccolum Никель								
	Cu Cuprum Медь	Zn Zincum Цинк	Ga Gallium Галлий	Ge Germanium Германий	As Arsenicum Мышьяк	Se Selenium Селен	Br Bromum Бром	Kr Krypton Криптон										
5	Rb Rubidium Рубидий	Sr Strontium Стронций	Y Yttrium Иттрий	Zr Zirconium Цирконий	Nb Niobium Нйобий	Mo Molybdaenum Молибден	Tc Technetium Технеций	Ru Ruthenium Рутений	Rh Rhodium Родий	Pd Palladium Палладий								
	Ag Argentum Серебро	Cd Cadmium Кадмий	In Indium Индий	Sn Stannum Олово	Sb Stibium Сурьма	Te Tellurium Теллур	I Iodum Иод	Xe Xenon Ксенон										
6	Cs Caesium Цезий	Ba Barium Барий	La* Lanthanum Лантан	Hf Hafnium Гафний	Ta Tantalum Тантал	W Wolframium Вольфрам	Re Rhenium Рений	Os Osmium Осмий	Ir Iridium Иридий	Pt Platinum Платина								
	Au Aurum Золото	Hg Hydrargyrum Ртуть	Tl Thallium Таллий	Pb Plumbum Свинец	Bi Bismuthum Висмут	Po Polonium Полоний	At Astatum Астат	Rn Radon Радон										
7	Fr Francium Франций	Ra Radium Радий	Ac** Actinium Актиний	Rf Rutherfordium Ферзберфдий	Db Dubnium Дубний	Sg Seaborgium Сибборгий	Bh Bohrium Борий	Hs Hassium Хассий	Mt Meitnerium Мейтнерий									
формулы высших оксидов	R <sub>2</sub> O		RO		R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		RO <sub>3</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		RO <sub>4</sub>			
формулы летучих однородных соединений					RH <sub>4</sub>		RH <sub>3</sub>		RH <sub>2</sub>		RH							
ЛАНТАНОИДЫ*	Ce Ceria Церий	Pr Praseodymium Прозеродим	Nd Neodymium Неодим	Pm Promethium Прометий	Sm Samarium Самарий	Eu Europium Европий	Gd Gadolinium Гадолиний	Tb Terbium Тербий	Dy Dysprosium Диспрозий	Ho Holmium Гольмий	Er Erbium Эрбий	Tm Thulium Тулий	Yb Ytterbium Иттербий	Lu Lutetium Лютеций				
АКТИНОИДЫ**	Th Thorium Торий	Pa Protactinium Протактиний	U Uranium Уран	Np Neptunium Нептуний	Pu Plutonium Плутоний	Am Americium Америций	Cm Curium Курий	Bk Berkelium Берклий	Cf Californium Калифорний	Es Einsteinium Эйнштейний	Fm Fermium Фермий	Md Mendelevium Менделевий	No Nobelium Нобелий	Lr Lawrencium Лавренсий				



# Геохимия элементов

строение  
электронных  
оболочек



Химические свойства

стремление к полному  
комплекту электронов



электроотрицательность  
(металлы/неметаллы)

минералы -  
«хозяева»



поведение элементов в  
ходе геологических  
процессов







# Геохимия элементов

ряды сходства кристаллохимических свойств: вертикальные

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																			
	A	I	II	III	IV	V	VI	VII	VI	V	IV	III	II	I	0	VIII	B			
1	(H)															H Hydrogenium Водород 1 1.00794	He Helium Гелий 2 4.002602			
2	Li Lithium Литий 3 6.941	Be Beryllium Бериллий 4 9.0122	B Borium Бор 5 10.811	C Carbonium Углерод 6 12.011	N Nitrogenium Азот 7 14.007	O Oxygenium Кислород 8 15.999	F Fluorium Фтор 9 18.998	Ne Neon Неон 10 20.179												
3	Na Natrium Натрий 11 22.99	Mg Magnesium Магний 12 24.305	Al Aluminium Алюминий 13 26.9815	Si Silicium Кремний 14 28.086	P Phosphorus Фосфор 15 30.974	S Sulfur Сера 16 32.066	Cl Chlorum Хлор 17 35.453	Ar Argon Аргон 18 39.948												
4	K Kalium Калий 19 39.098	Ca Calcium Кальций 20 40.08	Sc Scandium Скандий 21 44.95	Ti Titanium Титан 22 47.9	V Vanadium Ванадий 23 50.9	Cr Chromium Хром 24 51.96	Mn Manganum Марганец 25 54.9	Fe Ferrum Железо 26 55.84	Co Cobaltum Кобальт 27 58.933	Ni Niccolum Никель 28 58.70										
5	Rb Rubidium Рубидий 37 85.468	Sr Strontium Стронций 38 87.62	Y Yttrium Иттрий 39 88.906	Zr Zirconium Цирконий 40 91.22	Nb Niobium Ниббий 41 92.9	Mo Molybdenum Молибден 42 95.9	Tc Technetium Технеций 43 97	Ru Ruthenium Рутений 44 101.1	Rh Rhodium Родий 45 102.906	Pd Palladium Палладий 46 106.4										
6	Cs Caesium Цезий 55 132.9	Ba Barium Барий 56 137.33	La* Lanthanum Лантан 57 138.9055	Hf Hafnium Гафний 72 178.49	Ta Tantalum Тантал 73 180.9479	W Wolfram Вольфрам 74 183.85	Re Rhenium Рений 75 186.207	Os Osmium Осмий 76 190.2	Ir Iridium Иридий 77 192.22	Pt Platinum Платина 78 195.08										
7	Fr Francium Франций 87 [223]	Ra Radium Радий 88 [226]	Ac** Actinium Актиний 89 [227]	Rf Rutherfordium Ферзфордий 104 [261]	Db Dubnium Дубний 105 [262]	Sg Seaborgium Сиборгий 106 [263]	Bh Bohrium Борий 107 [262]	Hs Hassium Хассий 108 [265]	Mt Meitnerium Мейтнерий 109 [266]											
	R <sub>2</sub> O		RO		R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		RO <sub>3</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		RO <sub>4</sub>					
				RH <sub>4</sub>			RH <sub>3</sub>		RH <sub>2</sub>		RH									
ЛАНТАНОИДЫ*	Ce Caesium Цезий 58 140.12	Pr Praseodymium Прозербий 59 140.908	Nd Neodymium Неодим 60 144.24	Pm Promethium Прометий 61 144.91	Sm Samarium Самарий 62 150.36	Eu Europium Европий 63 151.96	Gd Gadolinium Гадолений 64 157.25	Tb Terbium Тербий 65 158.928	Dy Dysprosium Диспрозий 66 162.59	Ho Holmium Гольмий 67 164.930	Er Erbium Эрбий 68 167.26	Tm Thulium Тулий 69 168.934	Yb Ytterbium Иттербий 70 173.04	Lu Lutetium Лутетий 71 174.967						
АКТИНОИДЫ**	Th Thorium Торий 90 232.038	Pa Protactinium Протактиний 91 231.04	U Uranium Уран 92 238.03	Np Neptunium Нептуний 93 237.05	Pu Plutonium Плутоний 94 244.08	Am Americium Америций 95 243.06	Cm Curium Кюрий 96 247.07	Bk Berkelium Берклий 97 247.07	Cf Californium Калифорний 98 251.08	Es Einsteinium Эйнштейний 99 252.08	Fm Fermium Фермий 100 257.10	Md Mendelevium Менделеевий 101 258.10	No Nobelium Нобелий 102 259.10	Lr Lawrencium Лавренций 103 260.10						

Символ элемента  
Очислительная атомная масса  
Порядковый номер

Ar  
Argon  
Аргон  
18  
39.948

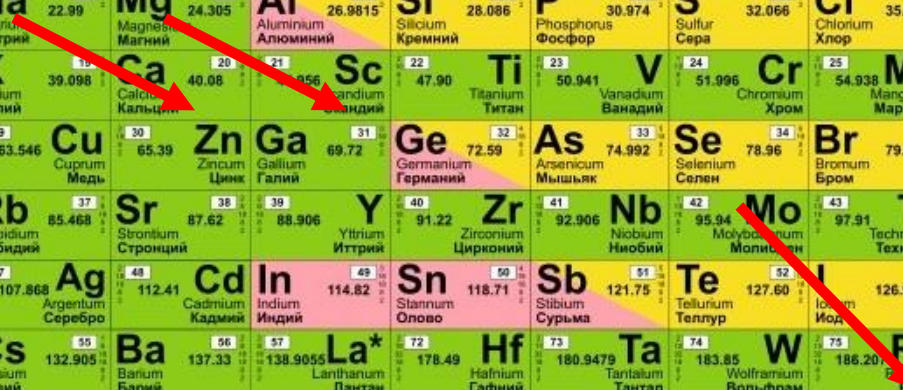
Название элемента  
Распределение электронов на энергетических уровнях

# Геохимия элементов

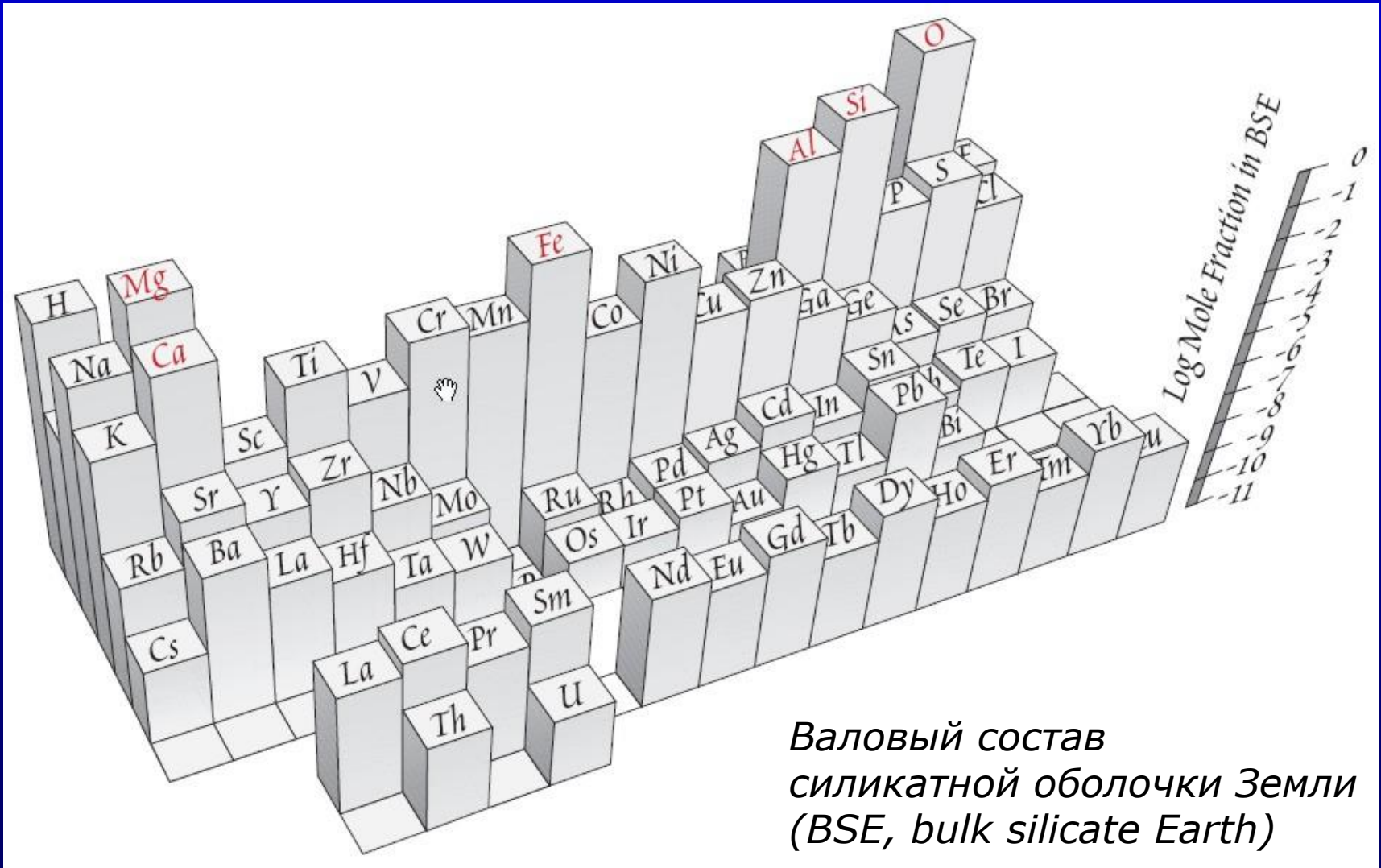
ряды сходства кристаллохимических свойств: диагональные

## ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В																	
	A	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	VIII								B
1	(H)																	
2	Li Lithium Литий	Be Beryllium Бериллий	B Borun Бор	C Carbonium Углерод	N Nitrogenium Азот	O Oxygenium Кислород	F Fluorun Фтор	Ne Neon Неон	He Helium Гелий									
3	Na Natrium Натрий	Mg Magnesium Магний	Al Aluminium Алюминий	Si Silicium Кремний	P Phosphorum Фосфор	S Sulfur Сера	Cl Chlorium Хлор	Ar Argon Аргон	He Helium Гелий									
4	K Kalium Калий	Ca Calcium Кальций	Sc Scandium Скандий	Ti Titanium Титан	V Vanadium Ванадий	Cr Chromium Хром	Mn Manganum Марганец	Fe Ferrum Железо	Co Cobaltum Кобальт	Ni Niccolum Никель								
5	Rb Rubidium Рубидий	Sr Strontium Стронций	Y Yttrium Иттрий	Zr Zirconium Цирконий	Nb Niobium Ниобий	Mo Molybdenum Молибден	Tc Technetium Технеций	Ru Ruthenium Рутений	Rh Rhodium Родий	Pd Palladium Палладий								
6	Cs Caesium Цезий	Ba Barium Барий	La* Lanthanum Лантан	Hf Hafnium Гафний	Ta Tantalum Тантал	W Wolframium Вольфрам	Re Rhenium Рений	Os Osmium Осмий	Ir Iridium Иридий	Pt Platinum Платина								
7	Fr Francium Франций	Ra Radium Радий	Ac** Actinium Актиний	Rf Rutherfordium Феррфордий	Db Dubnium Дубний	Sg Seaborgium Сиборгий	Bh Bohrium Борий	Hs Hassium Хассий	Mt Meitnerium Мейтнерий									
	R <sub>2</sub> O		RO		R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		RO <sub>3</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>7</sub>		RO <sub>4</sub>			
					RH <sub>4</sub>		RH <sub>3</sub>		RH <sub>2</sub>		RH							
ЛАНТАНОИДЫ*	Ce Ceria Церий	Pr Praseodymium Прозердий	Nd Neodymium Неодимий	Pm Promethium Прометий	Sm Samarium Самарий	Eu Europium Европий	Gd Gadolinium Гадолиний	Tb Terbium Тербий	Dy Dysprosium Диспрозий	Ho Holmium Гольмий	Er Erbium Эрбий	Tm Thulium Тулий	Yb Ytterbium Иттербий	Lu Lutetium Лютеций				
АКТИНОИДЫ**	Th Thorium Торий	Pa Protactinium Протактиний	U Uranium Уран	Np Neptunium Нептуний	Pu Plutonium Плутоний	Am Americium Америций	Cm Curium Кюрий	Bk Berkelium Берклий	Cf Californium Калифорний	Es Einsteinium Эйнштейний	Fm Fermium Фермий	Md Mendelevium Менделеевий	No Nobelium Нобелий	Lr Lawrencium Лавренций				



# Распространенность хим. элементов



# Классификация хим. элементов по распространенности в земной коре

**Главные (петрогенные) : > 1%**

$\text{SiO}_2$   $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{FeO}^*$   $\text{MgO}$   $\text{CaO}$   $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{K}_2\text{O}$   $\text{H}_2\text{O}$

**Второстепенные: 0.1 - 1%**

$\text{TiO}_2$   $\text{MnO}$   $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{CO}_2$

**Элементы-примеси: < 0.1%**

все прочие

# Классификация хим. элементов В. Гольдшмидта (по типам предпочтительной геохимической связи)





*Goldschmidt's Classification*

	IA											IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
1	H																He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIIB	VIII B		IB	II B	Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac															

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Nu	Pu									

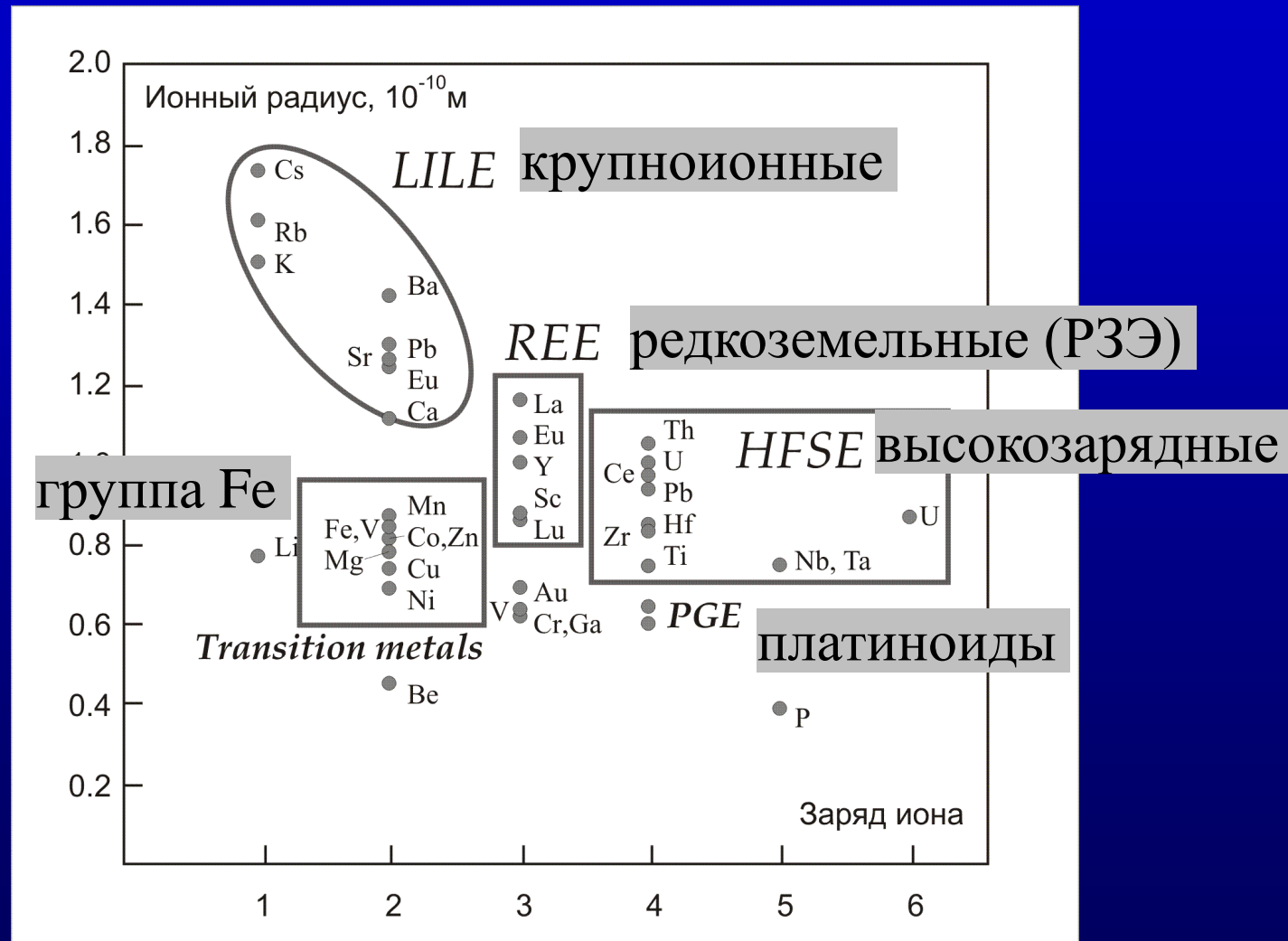
  

	<i>Lithophile</i>		<i>Siderophile</i>		<i>Chalcophile</i>		<i>Atmophile</i>
---	-------------------	---	--------------------	--	--------------------	---	------------------

1. **литофильные**  
3. **сидерофильные**

2. **халькофильные**  
4. **атмофильные**

# Группировка литофильных элементов по кристаллохимическим свойствам

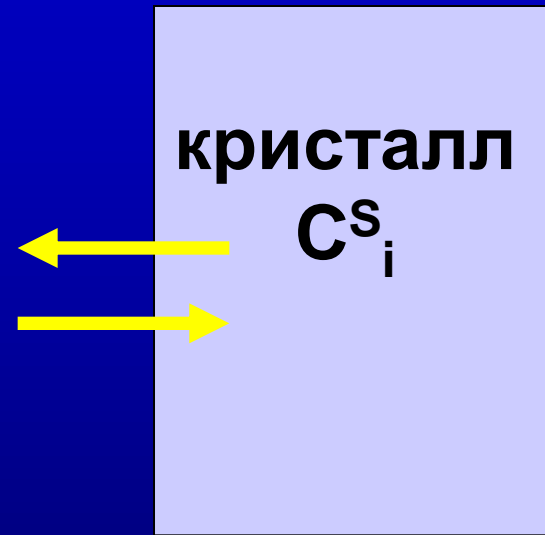


# Поведение хим. элементов в магматическом процессе

*элемент  $i$*

Коэффициент  
распределения  
(*partition coefficient*)

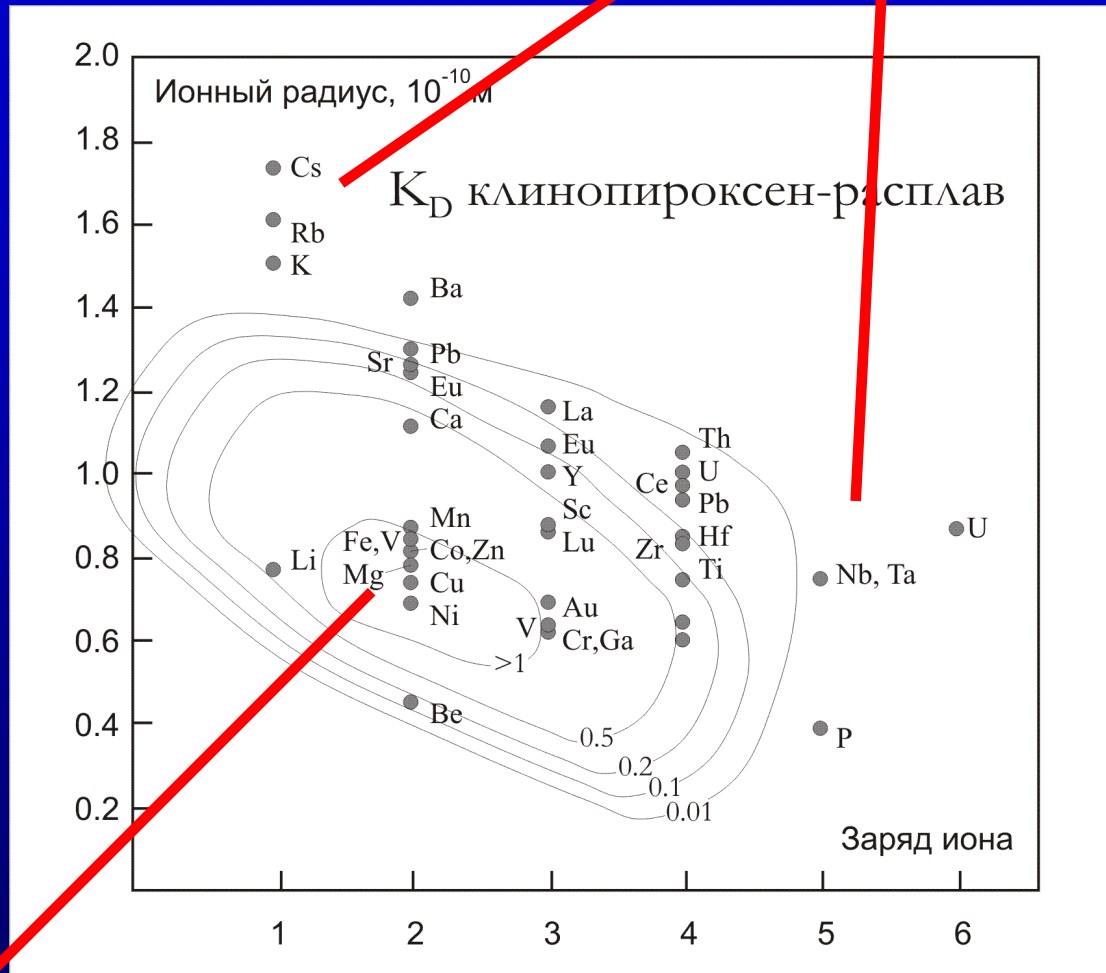
расплав  
 $C^L_i$



$$K_D = C^S_i / C^L_i$$

( $K_d, D$ )

# несовместимые (*incompatible*)



совместимые (*compatible*)



Валовый  $K_D$ :

$$\bar{D}_i = x_1 K_{D1}^i + x_2 K_{D2}^i + x_3 K_{D3}^i + \dots$$

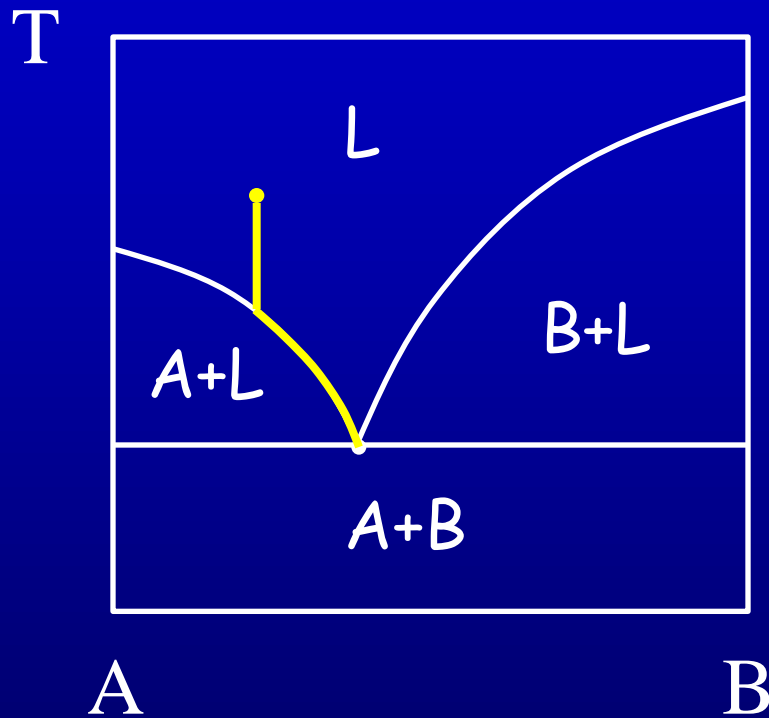
для расплава, из которого кристаллизуются минералы 1, 2, 3...  
в массовой пропорции  $x_1 : x_2 : x_3 \dots$

( $i$  - индекс химического элемента)

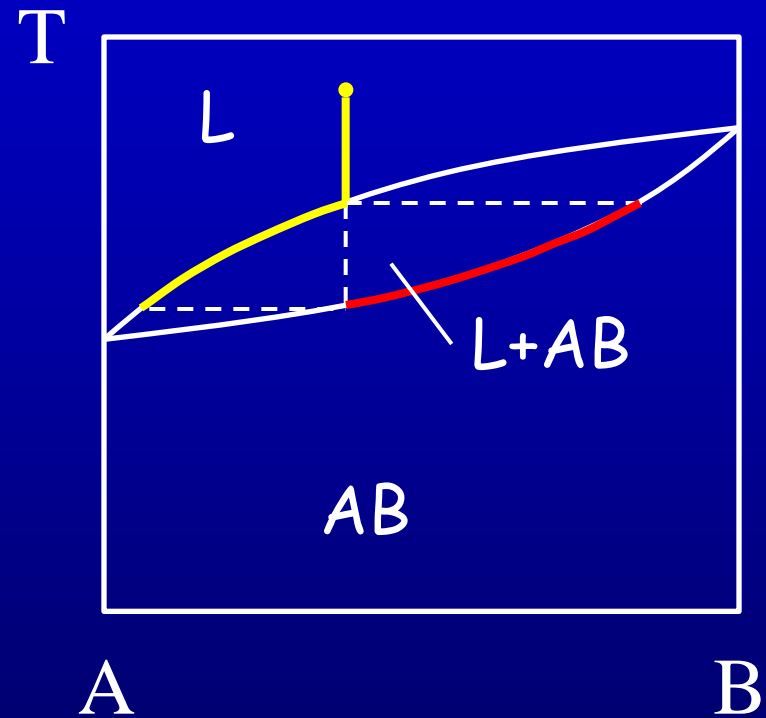
# Факторы, определяющие состав магматических пород:

- состав источника (протолита)
- вариации степени плавления источника
- фракционирование кристаллов (CF)
- контаминация
- смешение магм
- несмесимость расплавов (ликвация)

# Фракционирование кристаллов: изменение состава остаточного расплава

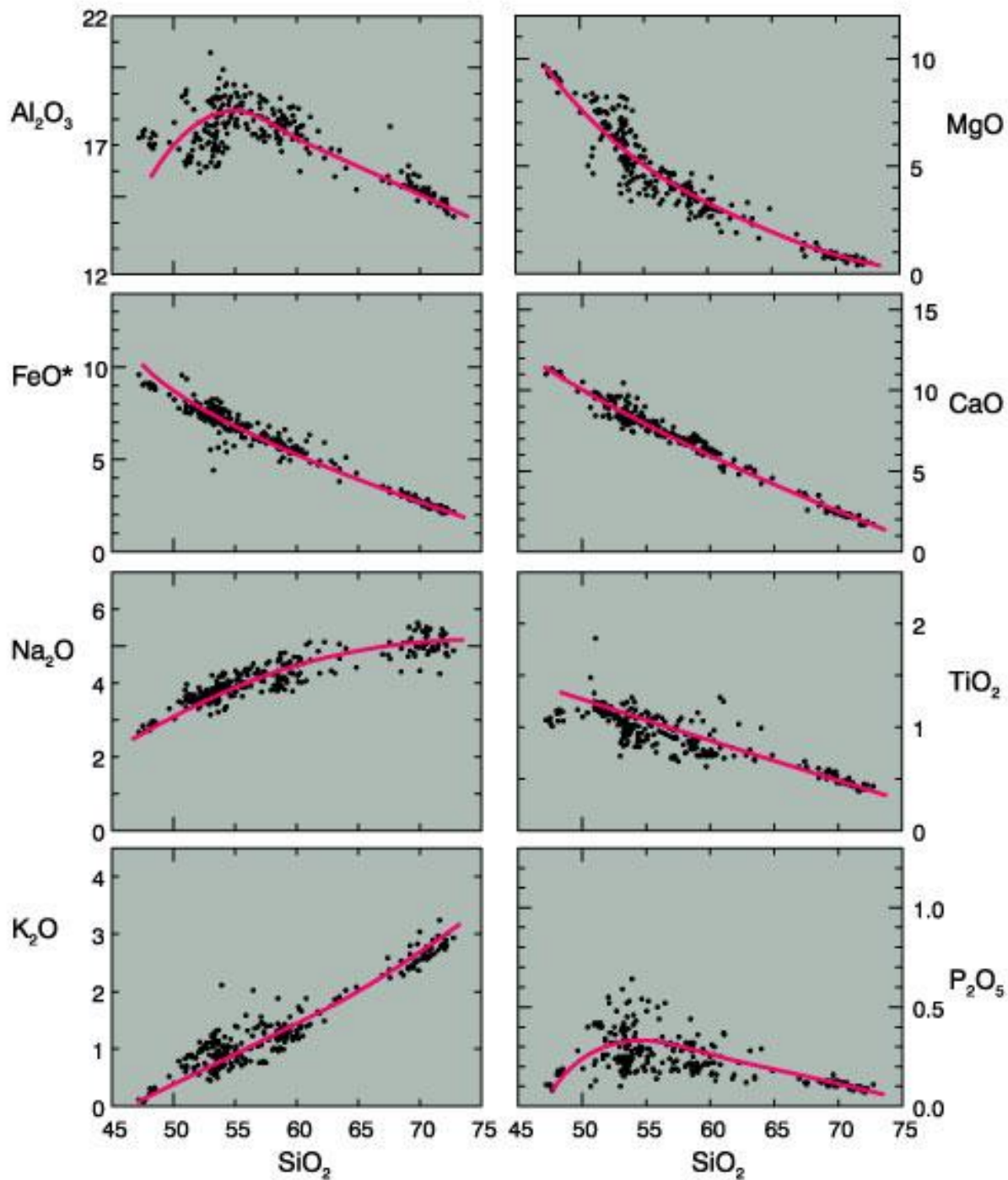


A и B не смешиваются  
(напр, рl и рх)



A и B – непрерывный  
твердый р-р (напр, ol<sub>Fe</sub> и ol<sub>Mg</sub>)

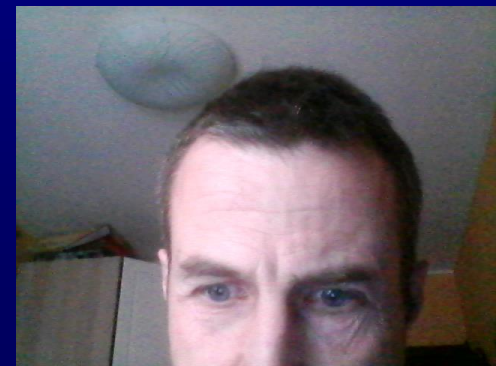
# Тренды кристаллизационного фракционирования



*Ведущая роль в формировании трендов -*

**качественный состав фаз, уходящих  
из системы**

*Минералы — хозяйева!*



# Интерпретация геохимических данных

первичные данные:

Состав пород:

- петрогенные элементы
- элементы-примеси
- изотопы

Состав минералов

# Петрогенные элементы

Wt. % Oxides to Atom % Conversion				
Oxide	Wt. %	Mol Wt.	Atom prop	Atom %
SiO <sub>2</sub>	49.20	60.09	0.82	12.25
TiO <sub>2</sub>	1.84	95.90	0.02	0.29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.74	101.96	0.31	4.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.79	159.70	0.05	0.71
FeO	7.13	71.85	0.10	1.48
MnO	0.20	70.94	0.00	0.04
MgO	6.73	40.31	0.17	2.50
CaO	9.47	56.08	0.17	2.53
Na <sub>2</sub> O	2.91	61.98	0.09	1.40
K <sub>2</sub> O	1.10	94.20	0.02	0.35
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.95	18.02	0.11	1.58
(O)			4.83	72.26
Total	99.06		6.69	100.00

# Классификационная диаграмма TAS

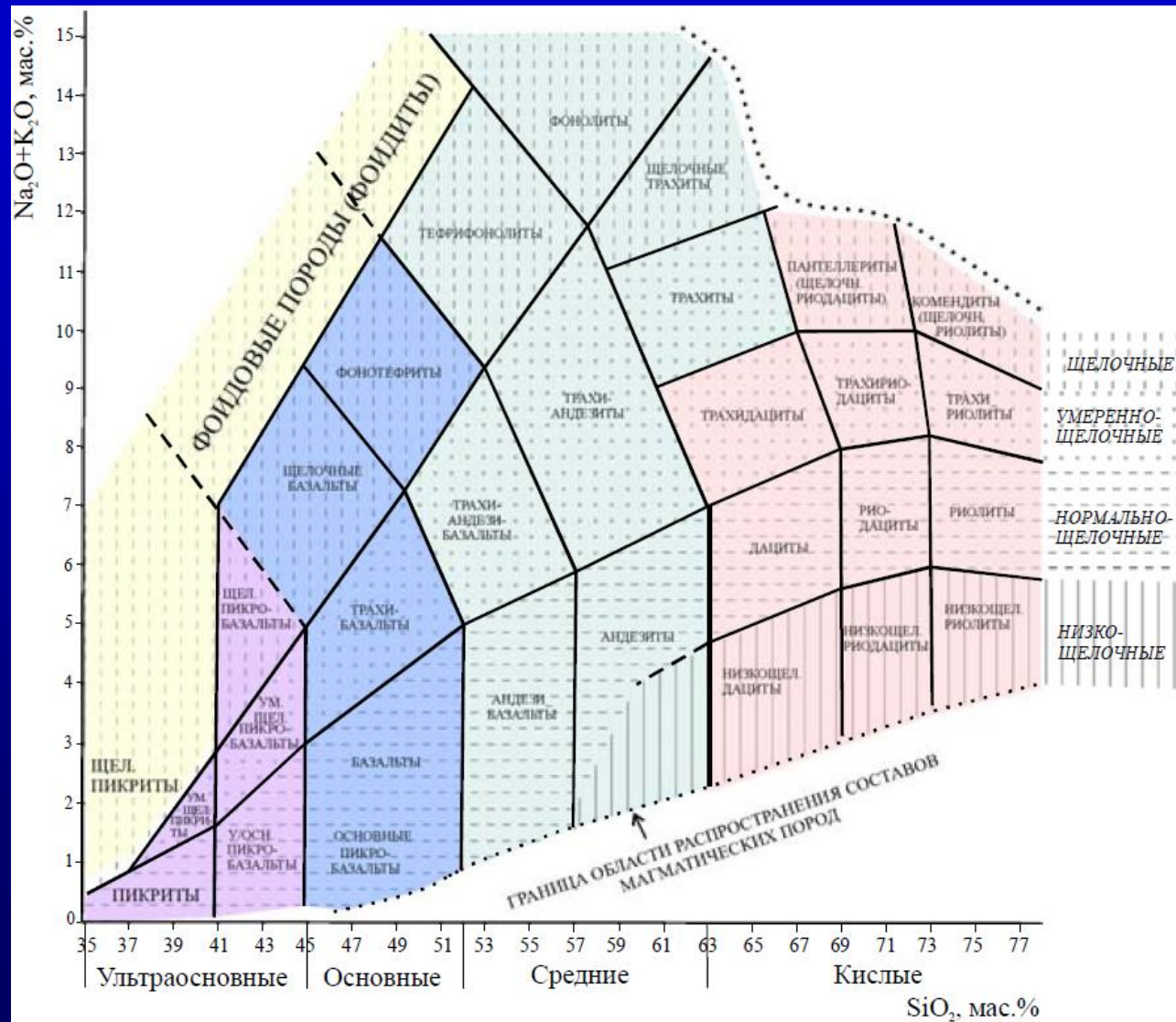
$\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$





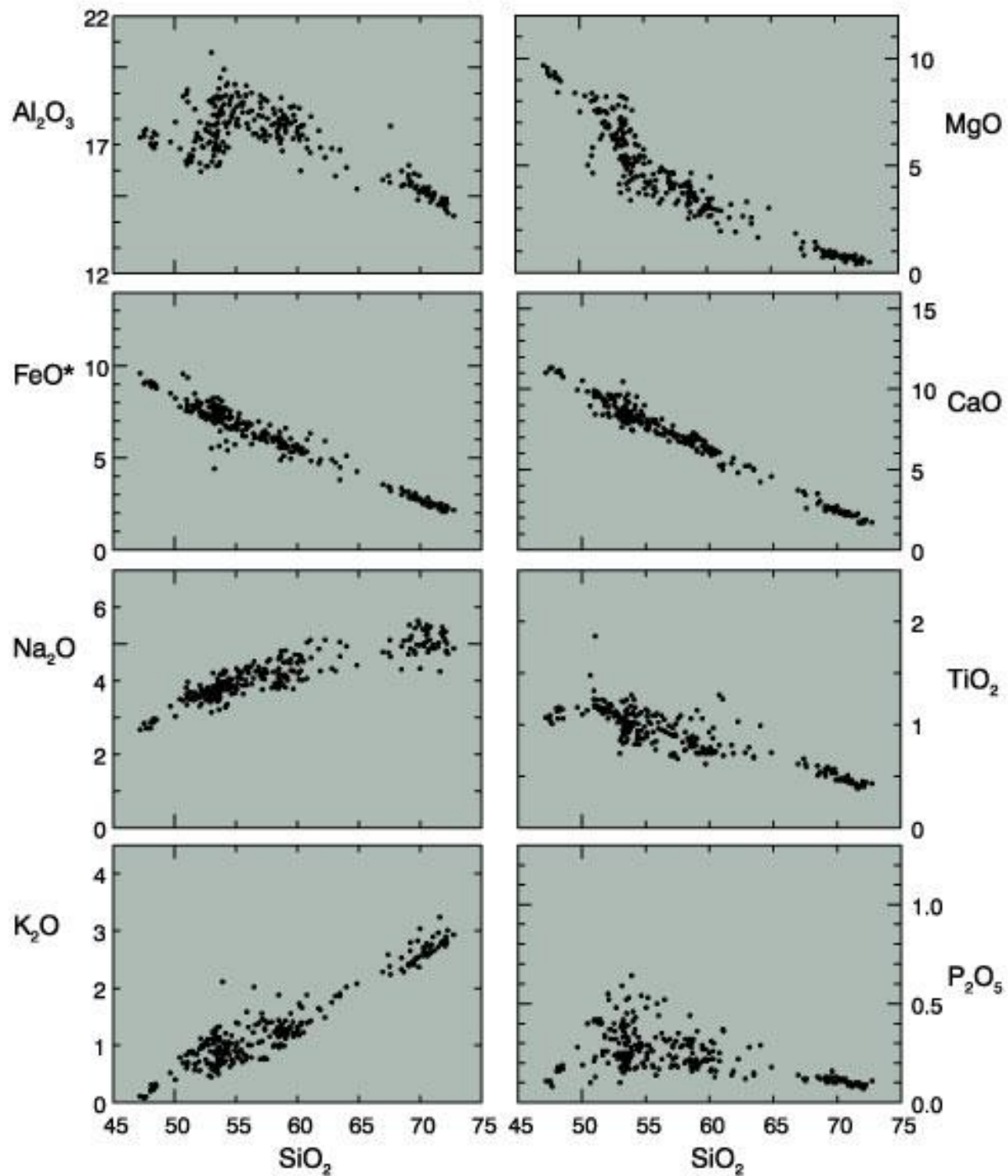
# Классификационная диаграмма TAS

## $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$



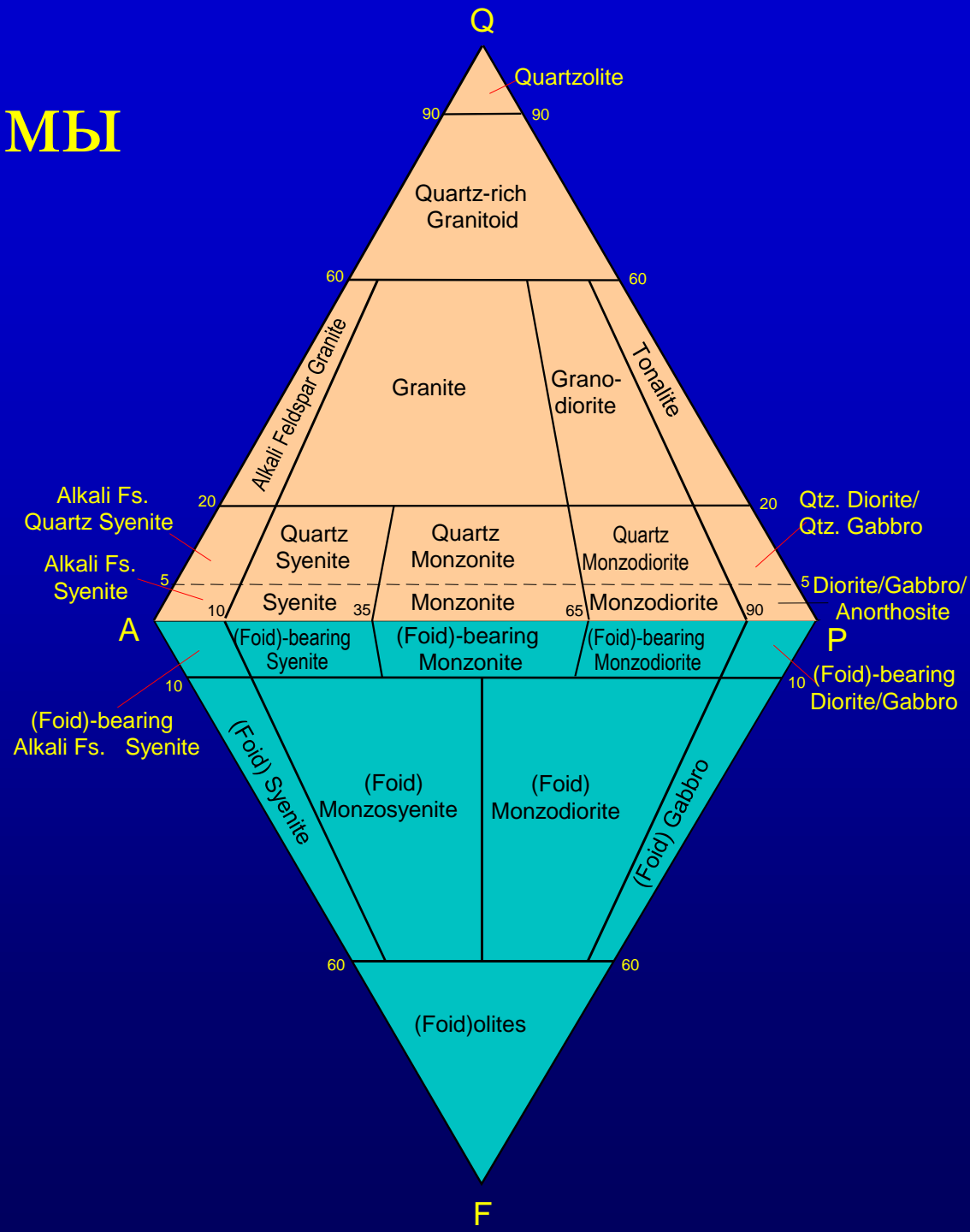
(Петрографический кодекс, 2010)

# Вариационные диаграммы (Харкеровские)



# СИРВ нормы

результат пересчета  
химического состава породы  
на минеральный,  
с использованием  
предполагаемых компонентов  
стехиометрического состава

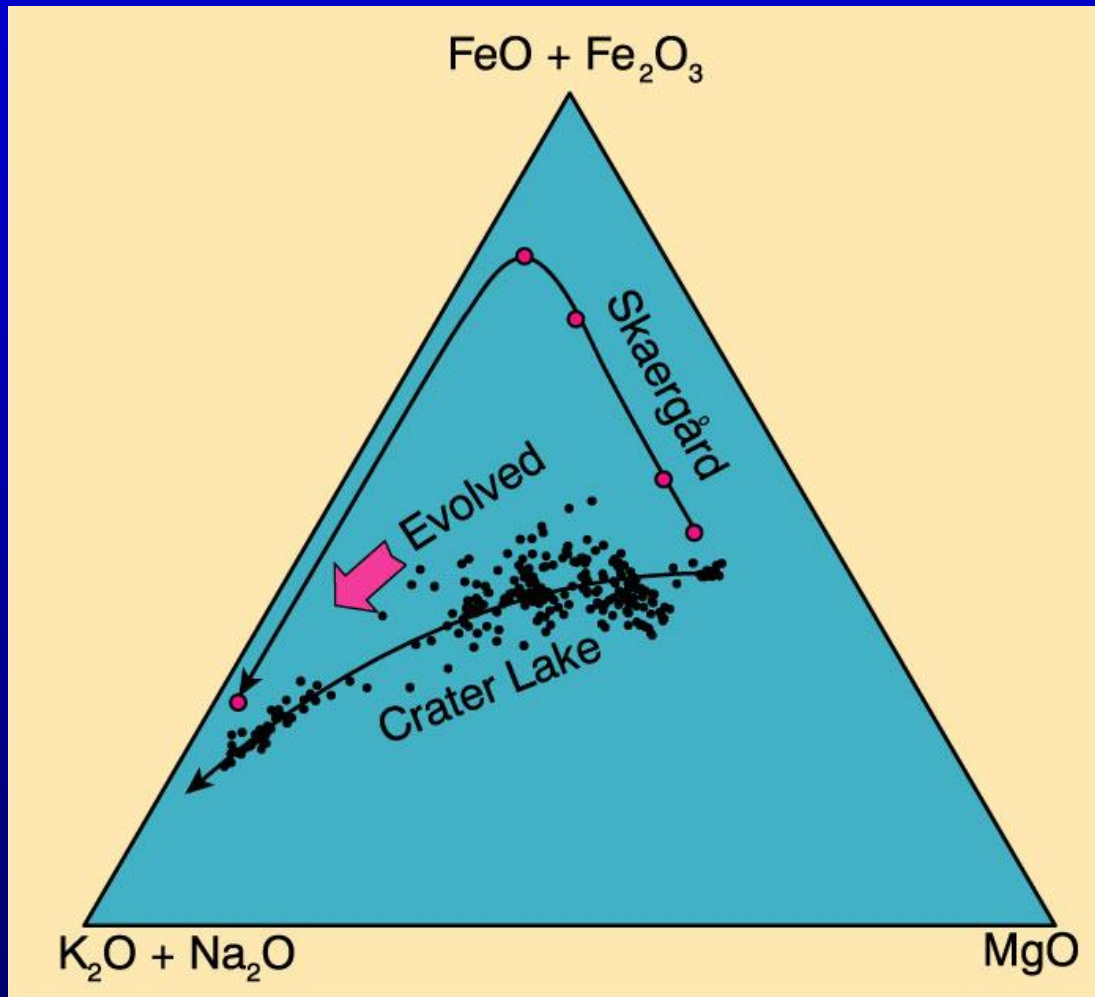


# диаграмма AFM



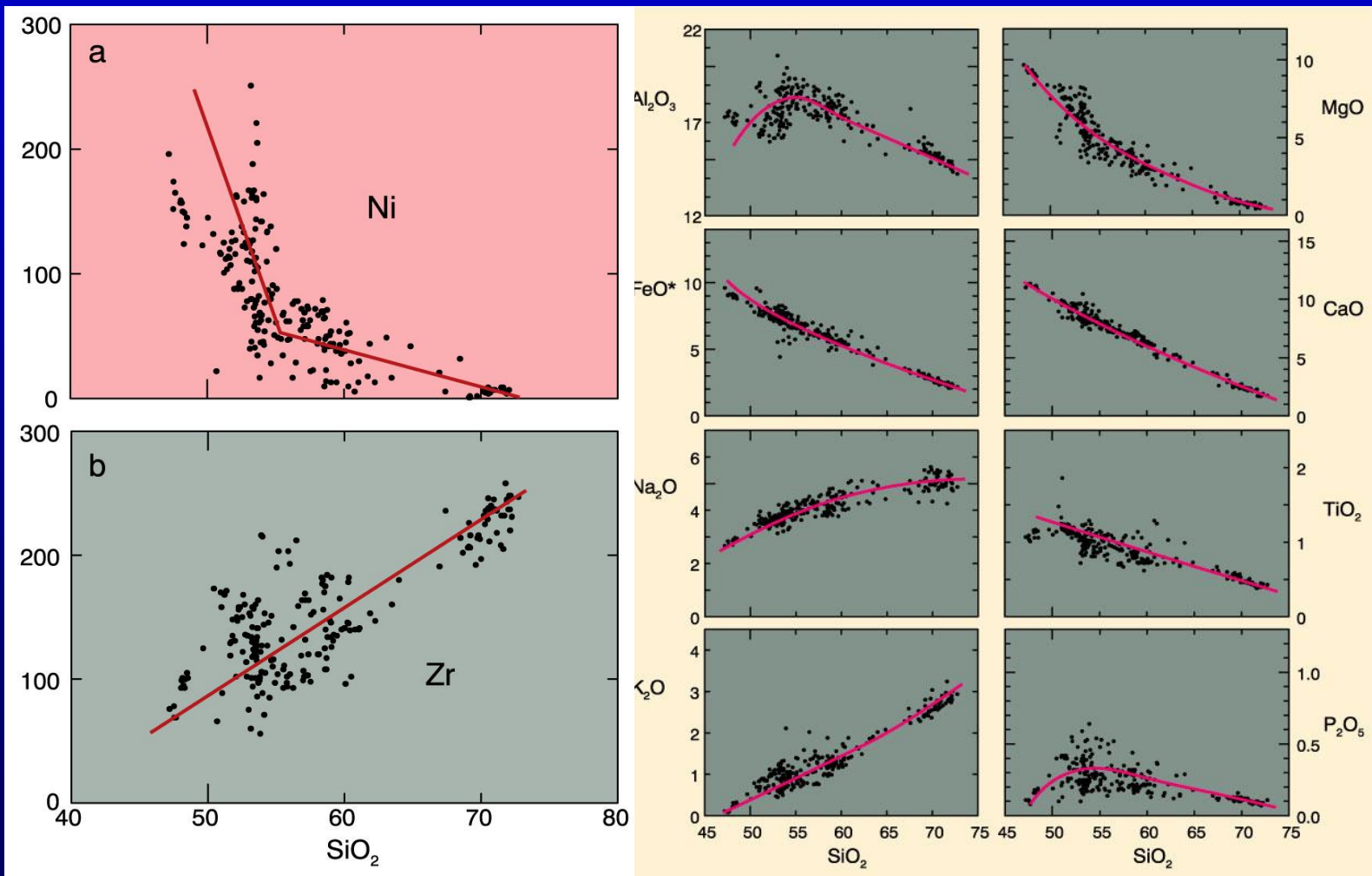
(для пород  
нормального ряда  
щелочности)

# диаграмма AFM

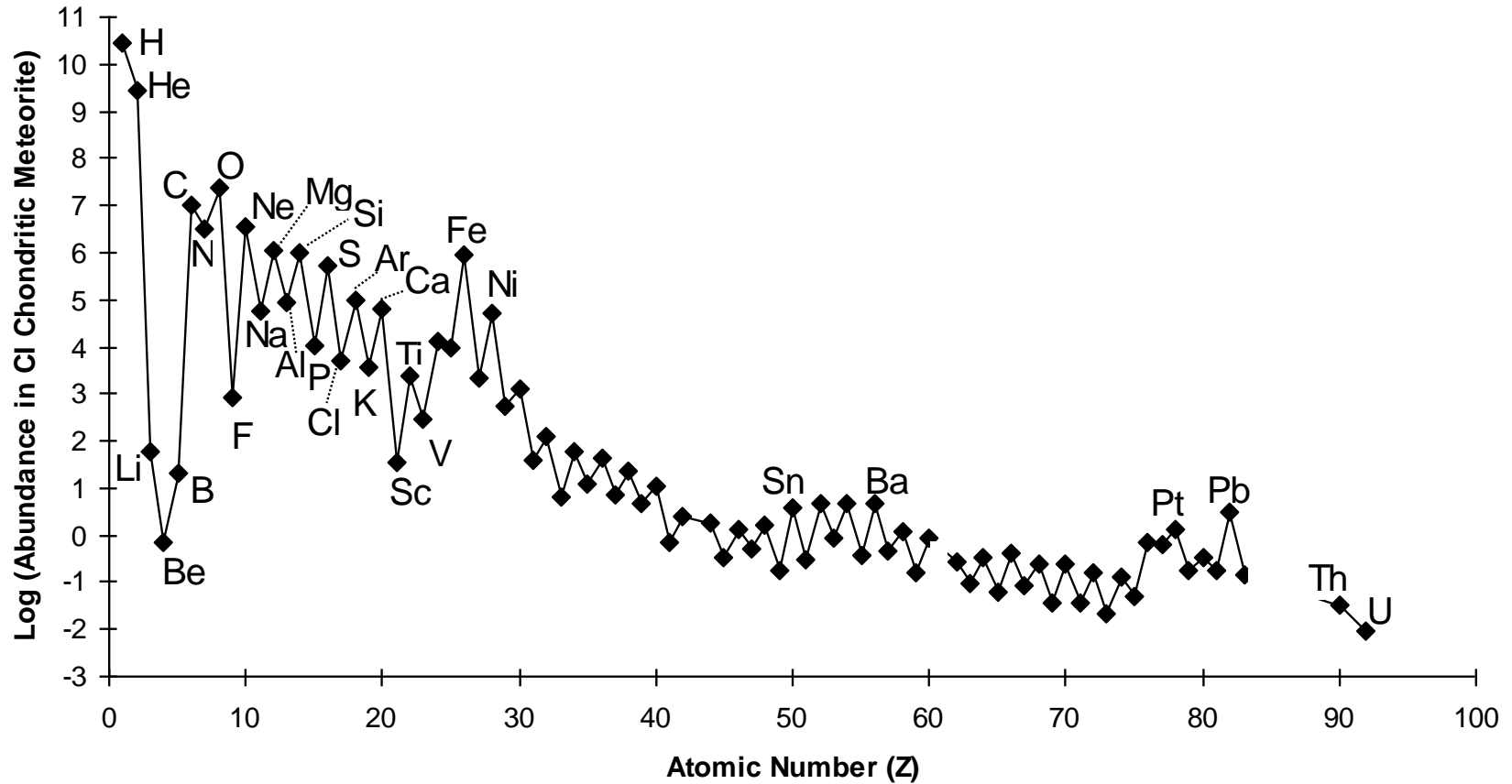


# Элементы-примеси

- значительное количество элементов
- значительные вариации содержаний

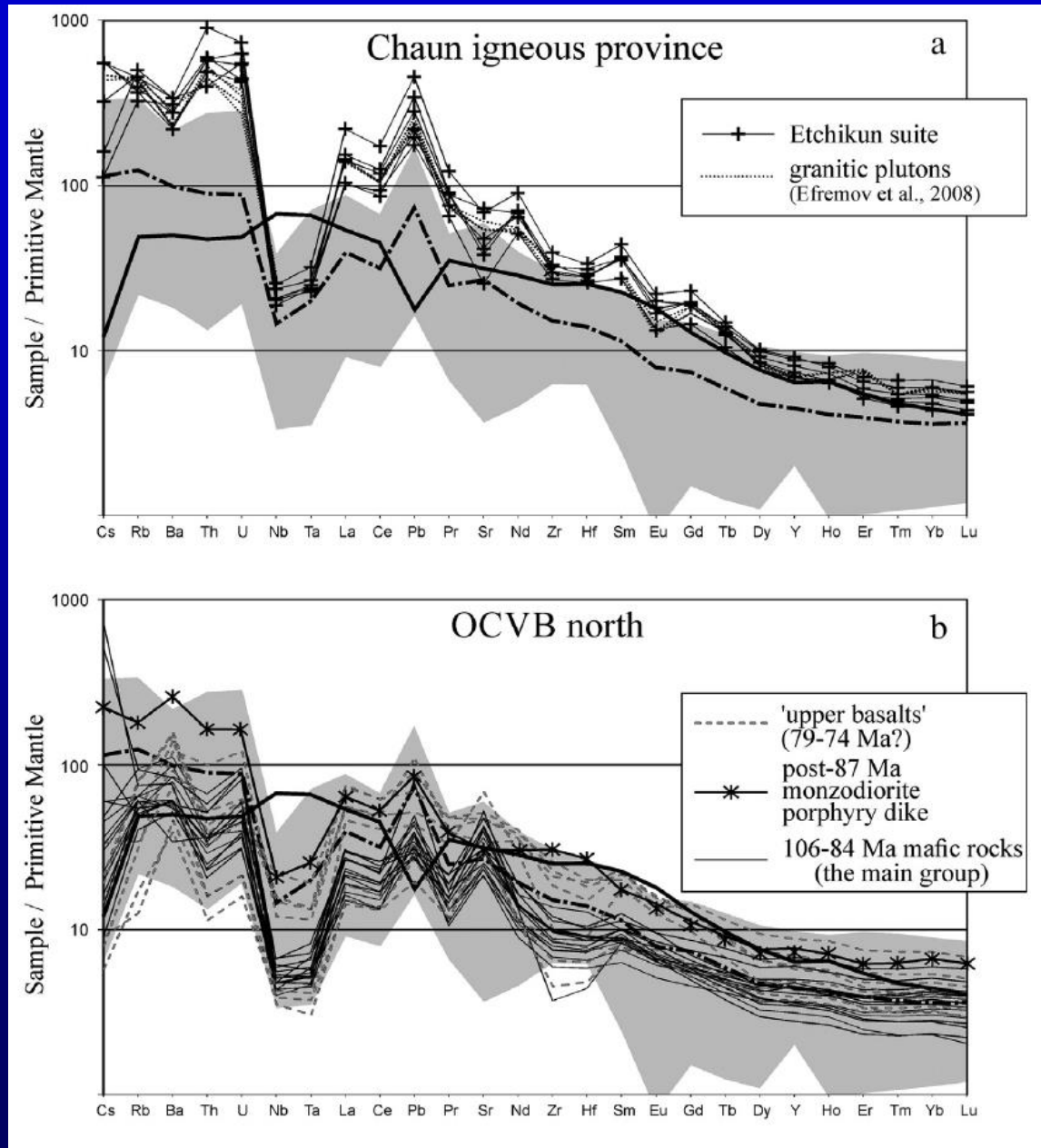


# построение спайдеграмм (мультиэлементных диаграмм)



# построение спайдеграмм (мультиэлементных диаграмм)

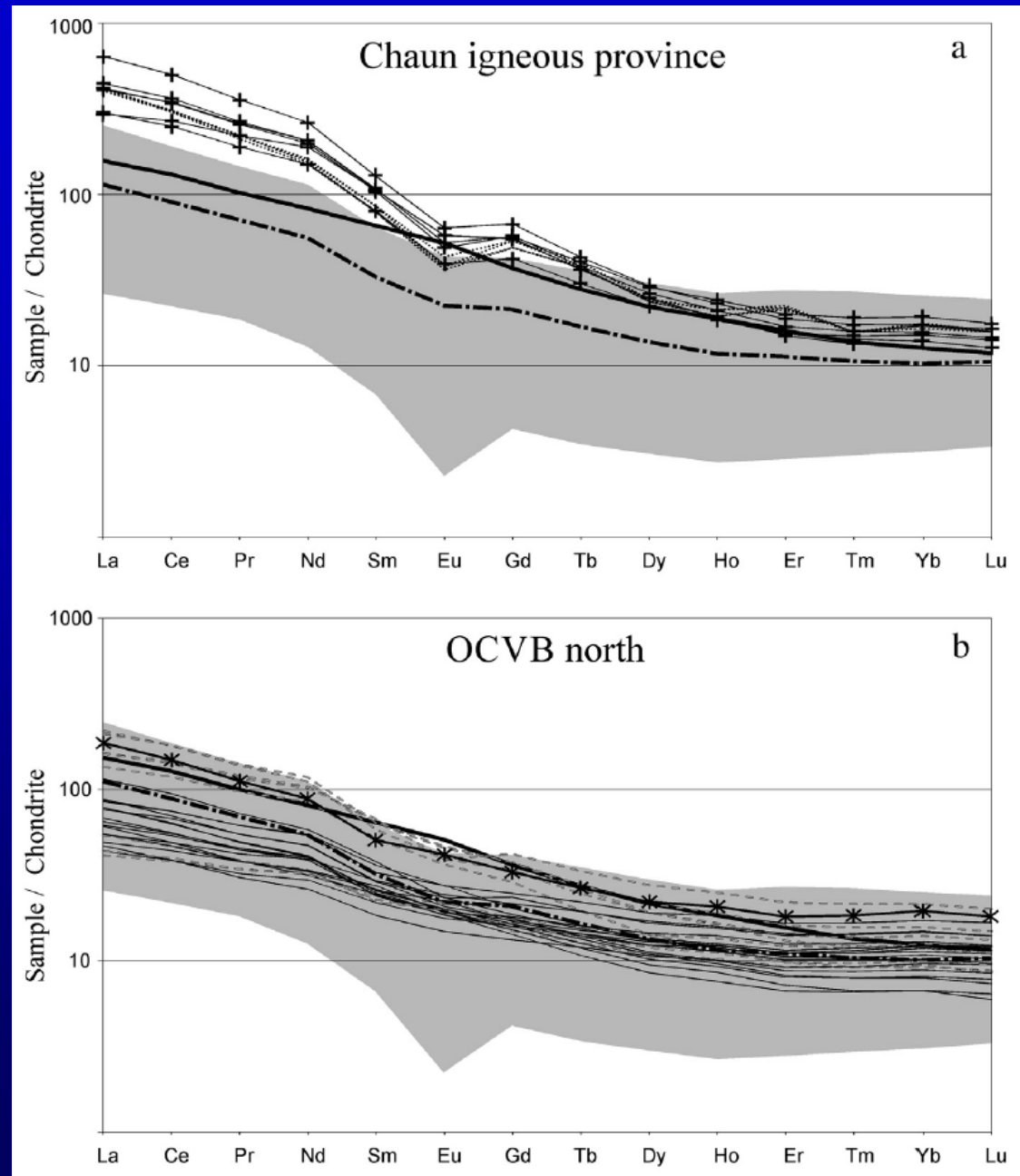
нормирование  
по составу  
«примитивной мантии»  
(Sun, McDonough, 1989)



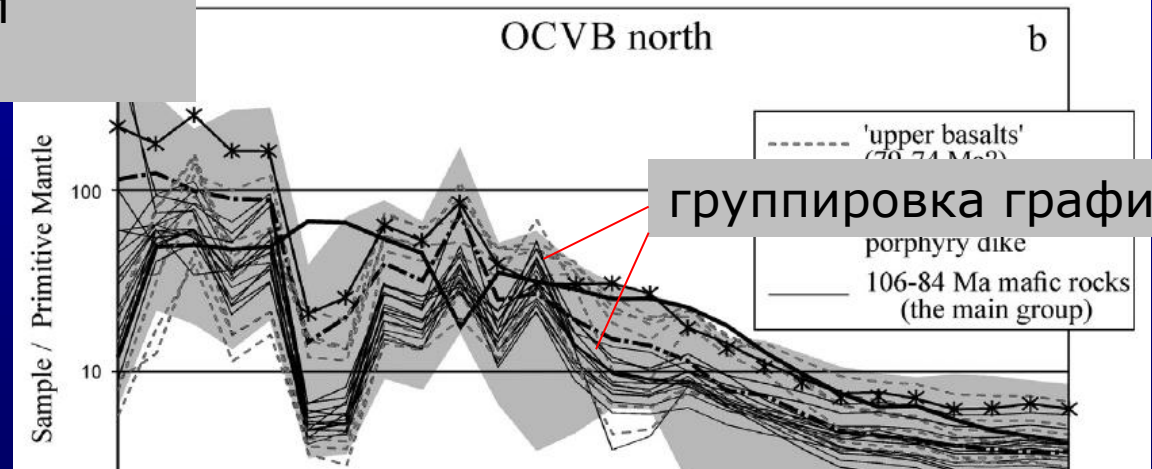
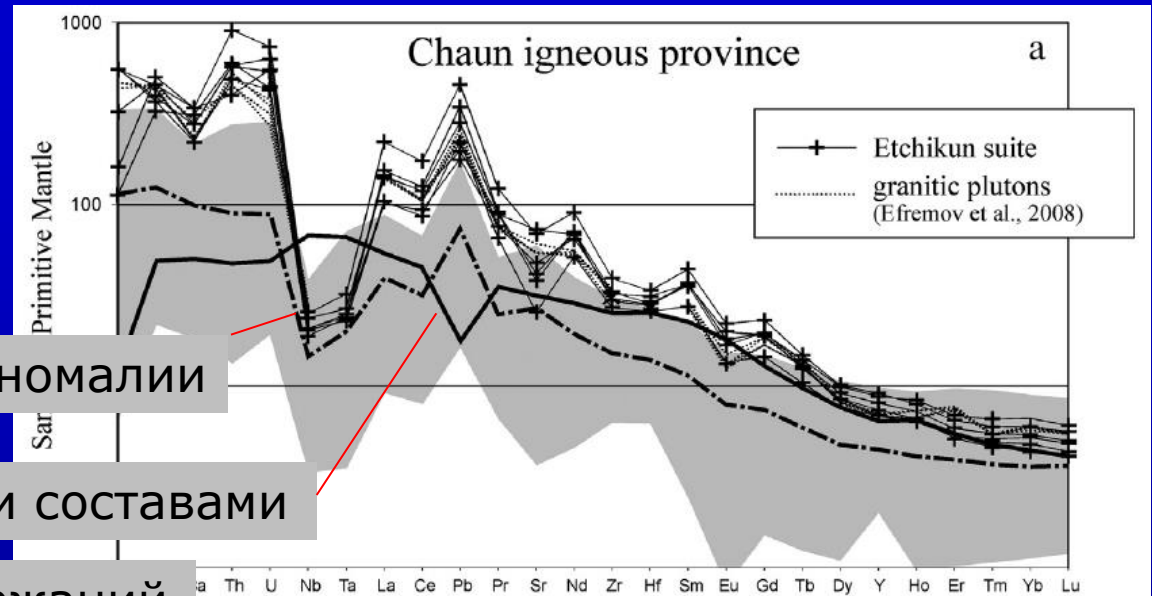


# построение РЗЭ-диаграмм

нормирование  
по составу  
хондрита CI  
(Sun, McDonough, 1989)

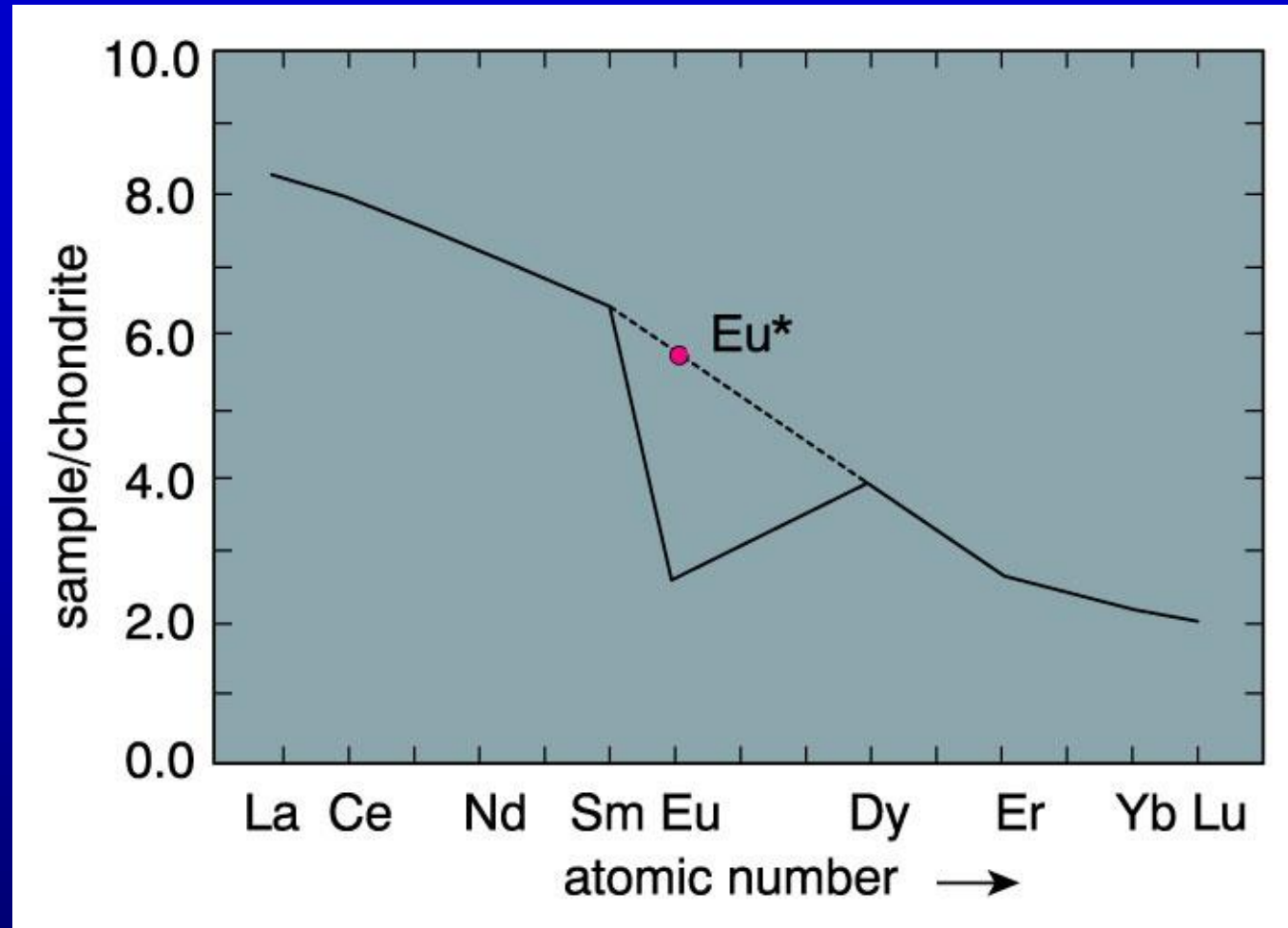


# интерпретация спайдеграмм



**важно: отношения содержаний несовместимых элементов слабо меняются в ходе крист. фракционирования**

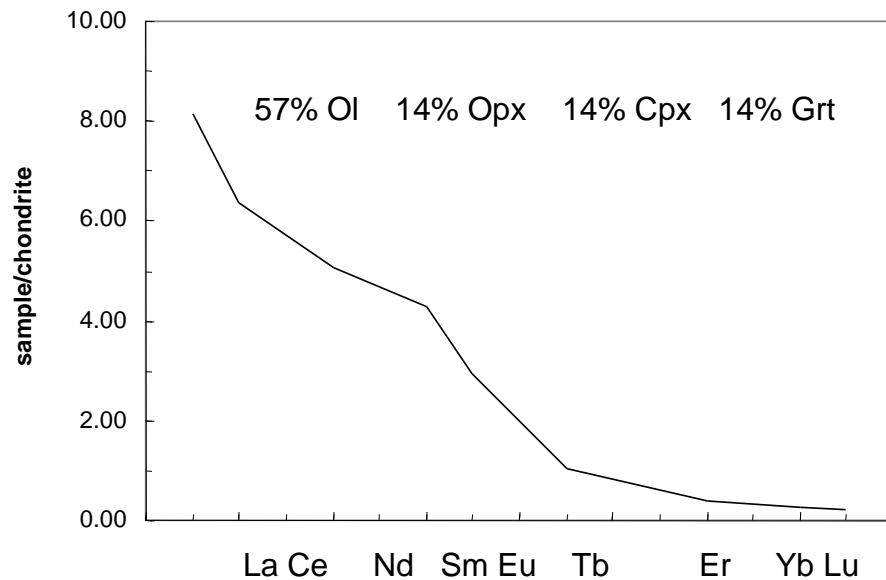
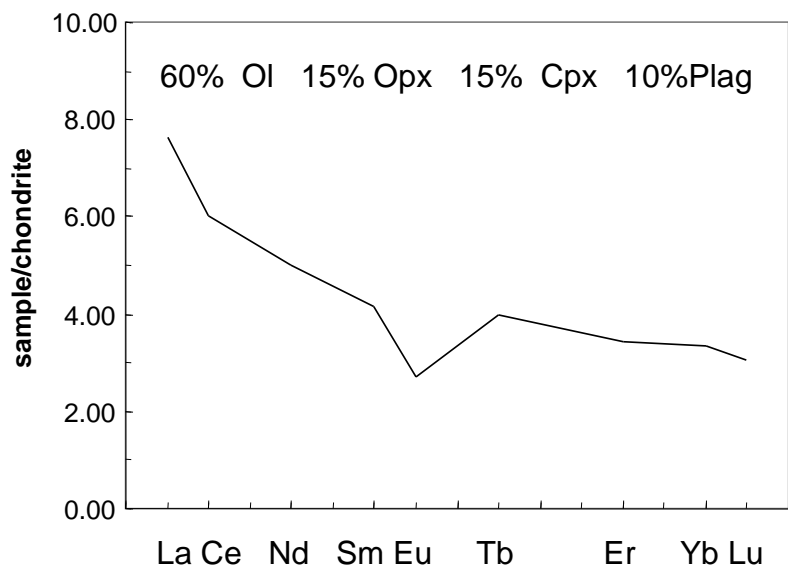
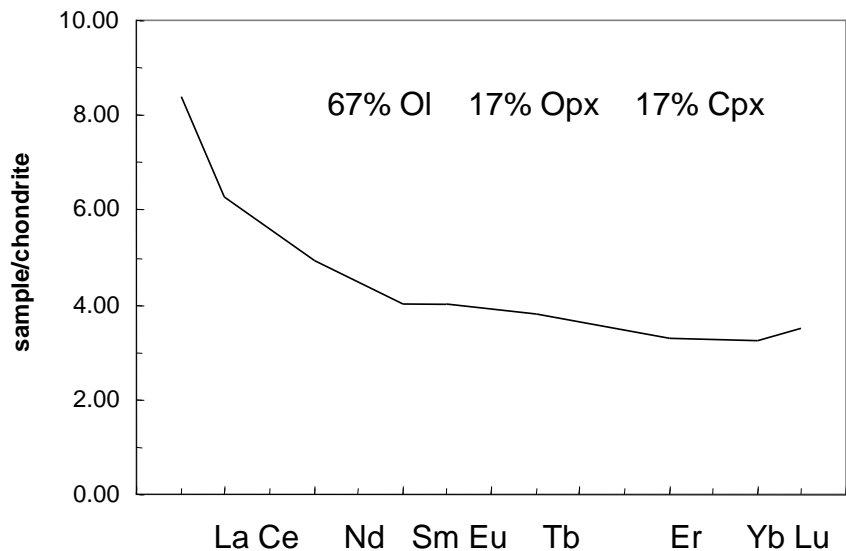
# Аномалия европия



следствие устойчивости иона  $\text{Eu}^{+2}$  (в отличие от прочих  $\text{TR}^{+3}$ )  
с его фракционированием вместе с минералами Ca

количественное выражение аномалии:  $\text{Eu}^*/\text{Eu}$

# Эффект фракционирования фаз



# Дискриминационные (дискриминантные) диаграммы

## 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

