

Интерпретация вещественного состава магматических горных пород

Рекомендованная литература

Интерпретация геохимических данных (под ред. Е.В.Склярова). М.: 2001.

Лекция 1

- основы геохимии элементов
- геохимические классификации
- поведение элементов в магматическом процессе
- процессы дифференциации магм
- интерпретация состава магматических серий
- основы изотопной геохронологии

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)																	
2	Li Lithium Литий	Be Beryllium Бериллий	B Bor Бор	C Carbonium Углерод	N Nitrogenium Азот	O Oxygenium Кислород	F Fluorim Фтор	Ne Neon Неон	Ar Argon Аргон									
3	Na Natrium Натрий	Mg Magnesium Магний	Al Aluminium Алюминий	Si Silicium Кремний	P Phosphorus Фосфор	S Sulfur Сера	Cl Chlorim 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								
5	Rb Rubidium Рубидий	Sr Strontium Стронций	Y Yttrium Иттрий	Zr Zirconium Цирконий	Nb Niobium Нйобий	Mo Molybdenum Молибден	Tc Technetium Технеций	Ru Ruthenium Рутений	Rh Rhodium Родий	Pd Palladium Палладий								
6	Cs Cesium 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 Ферзберфдий	Db Dubnium Дубний	Sg Seaborgium Сеаборгий	Bh Bohrium Борий	Hs Hassium Хассий	Mt Meitnerium Мейтнерий									
	формулы высших оксидов		R ₂ O		RO		R ₂ O ₃		RO ₂		R ₂ O ₅		RO ₃		R ₂ O ₇		RO ₄	
	формулы летучих однородных соединений				RH ₄		RH ₃		RH ₂		RH							
	ЛАНТАНОИДЫ*																	
	АКТИНОИДЫ**																	



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

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	Г Р У П П Ы Э Л										«неметалличность»		В
	A	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
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			
5	Rb Rubidium Рубидий	Sr Strontium Стронций	Y Yttrium Иттрий	Zr Zirconium Цирконий	Nb Niobium Ниобий	Mo Molybdaenum 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	Au Aurum Золото	Hg Hydrargyrum Ртуть	Tl Thallium Таллий	Pb Plumbum Свинец	Bi Bismuthum Висмут	Po Polonium Полоний	At Astatium Астат	Rn Radon Радон					
8	Rf Rutherfordium Рурдерфий				Db Dubnium Дубний	Sg Seaborgium Сеаборгий	Bh Bohrium Борий	Hs Hassium Хассий	Mt Meitnerium Мейтнерий				
ФОРМУЛЫ ВЫСОКИХ ОКСИДОВ: R ₂ O, RO, R ₂ O ₃ , RO ₂ , R ₂ O ₅ , RO ₃ , R ₂ O ₇ , RO ₄													
ФОРМУЛЫ ЛЕГКОГО ОДНОРОДНОГО СОЕДИНЕНИЯ: RH ₄ , RH ₃ , RH ₂ , RH													
ЛАНТАНОИДЫ*													
АКТИНОИДЫ**													



«металличность»

«неметалличность»

Геохимия элементов

особые группы

(со сходным строением электронных оболочек)

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	VII	VI	VII	VI	VII	VI	VII	VI	VII	VIII	B
1	(H)																			
2	Li Литий	Be Бериллий	B Бор	C Углерод	N Азот	O Кислород	F Фтор	Ne Неон												
3	Na Натрий	Mg Магний	Al Алюминий	Si Кремний	P Фосфор	S Сера	Cl Хлор	Ar Аргон												
4	K Калий	Ca Кальций	Sc Скандий	Ti Титан	V Ванадий	Cr Хром	Mn Марганец	Fe Железо	Co Кобальт	Ni Никель										
5	Cu Медь	Zn Цинк	Ga Галлий	Ge Германий	As Арсеник	Se Селен	Br Бром	Kr Криптон												
6	Cs Цезий	Ba Барий	La Лантан	Hf Гафний	Ta Тантал	W Вольфрам	Re Рений	Os Осмий	Ir Иридий	Pt Платина										
7	Au Золото	Hg Ртуть	Tl Таллий	Pb Свинец	Bi Висмут	Po Полоний	At Астат	Rn Радон												
			Ac** Актиний	Rf Резерфордий	Db Дубний	Sg Сибборгий	Bh Борий	Hs Хассий	Mt Мейтнерий											
	<p>Символ элемента: <chem>Ar</chem> (Argon)</p> <p>Однозначительная атомная масса: 39,948</p> <p>Порядковый номер: 18</p> <p>Название элемента: Аргон</p> <p>Распределение электронов на энергетических уровнях: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$</p>																			

d-элементы

f-элементы

ЛАНТАНОИДЫ*
 АКТИНОИДЫ**

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	VIII	VIII								B		
1	(H)																		H Hydrogenium Водород	He Helium Гелий
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											Ar Argon Аргон	Ne Neon Неон
3	Na Natrium Натрий	Mg Magnesium Магний	Al Aluminium Алюминий	Si Silicium Кремний	P Phosphorus Фосфор	S Sulfur Сера	Cl Chlorum Хлор	Ar Argon Аргон											Ar Argon Аргон	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									Kr Krypton Криптон	Kr Krypton Криптон
5	Rb Rubidium Рубидий	Sr Strontium Стронций	Y Yttrium Иттрий	Zr Zirconium Цирконий	Nb Niobium Ниббий	Mo Molybdenum Молибден	Tc Technetium Технеций	Ru Ruthenium Рутений	Rh Rhodium Родий	Pd Palladium Палладий									Xe Xenon Ксенон	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									Rn Radon Радон	Rn Radon Радон
7	Fr Francium Франций	Ra Radium Радий	Ac** Actinium Актиний	Rf Rutherfordium Ферзифордий	Db Dubnium Дубний	Sg Seaborgium Сиборгий	Bh Bohrium Борий	Hs Hassium Хассий	Mt Meitnerium Мейтнерий											
	R ₂ O		RO		R ₂ O ₃		RO ₂		R ₂ O ₅		RO ₃		R ₂ O ₇		RO ₄					
					RH ₄		RH ₃		RH ₂		RH									
ЛАНТАНОИДЫ*	Ce Ceria Церий	Pr Praseodymium Прозердий	Nd Neodymium Неодим	Pm Promethium Прометий	Sm Samarium Самарий	Eu Europium Европий	Gd Gadolinium Гадолий	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						

Символ элемента
Относительная атомная масса
Порядковый номер

Ar
Argon
Аргон

Название элемента
Распределение электронов на энергетических уровнях

Геохимия элементов

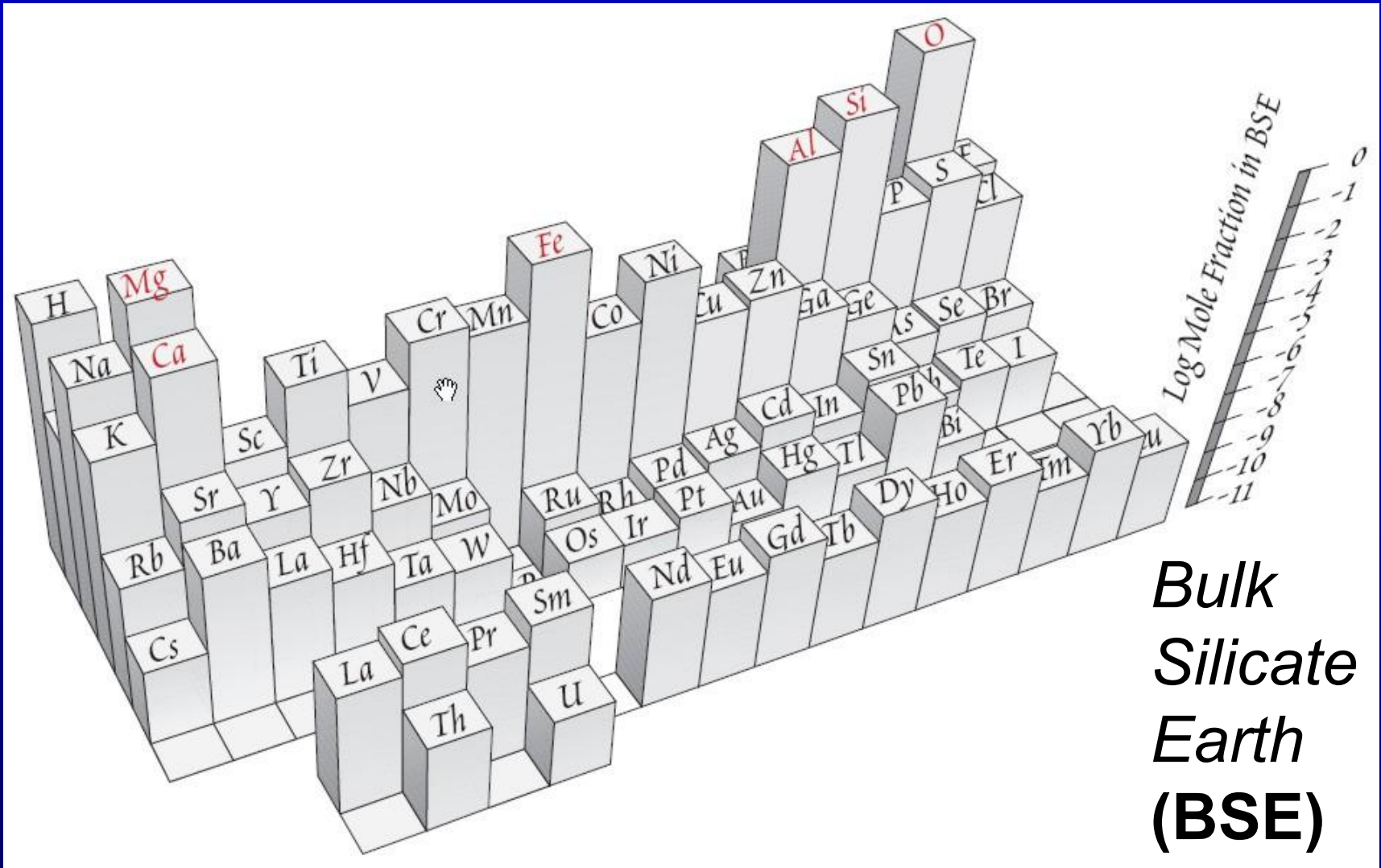
ряды сходства кристаллохимических свойств: диагональные

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	В A	II	В A	III	В A	IV	В A	V	В A	VI	В A	VII	В A	VIII	В			
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										Ar Argon Аргон		
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										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										
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 Ферзифордий	Db Dubnium Дубний	Sg Seaborgium Сиборгий	Bh Bohrium Борий	Hs Hassium Хассий	Mt Meitnerium Мейтнерий											
ФОРМУЛЫ ВЫСШИХ ОСИДОВ R_2O RO R_2O_3 RO_2 R_2O_5 RO_3 R_2O_7 RO_4																				
ФОРМУЛЫ ЛЕТУЧИХ ОДНОРОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ RH_4 RH_3 RH_2 RH																				
ЛАНТАНОИДЫ*	Ce Ceria Церий	Pr Praseodymium Прозербий	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 Туллий	Yb Ytterbium Иттербий	Lu Lutetium Лутетий						
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



Element	Wt % Oxide	Atom %
O		60.8
Si	59.3	21.2
Al	15.3	6.4
Fe	7.5	2.2
Ca	6.9	2.6
M	4.5	2.4
Na	2.8	1.9

Распространенность
элементов в земной коре

Главные (петрогенные) : > 1%



Второстепенные: 0.1 - 1%



Элементы-примеси: < 0.1%

все прочие

Goldschmidt's Classification

	IA																	VIIIA	
1	H																		He
2	Li	Be										B	C	N	O	F		Ne	
3	Na	Mg	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB	—	IB	IIB	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									



Lithophile



Siderophile

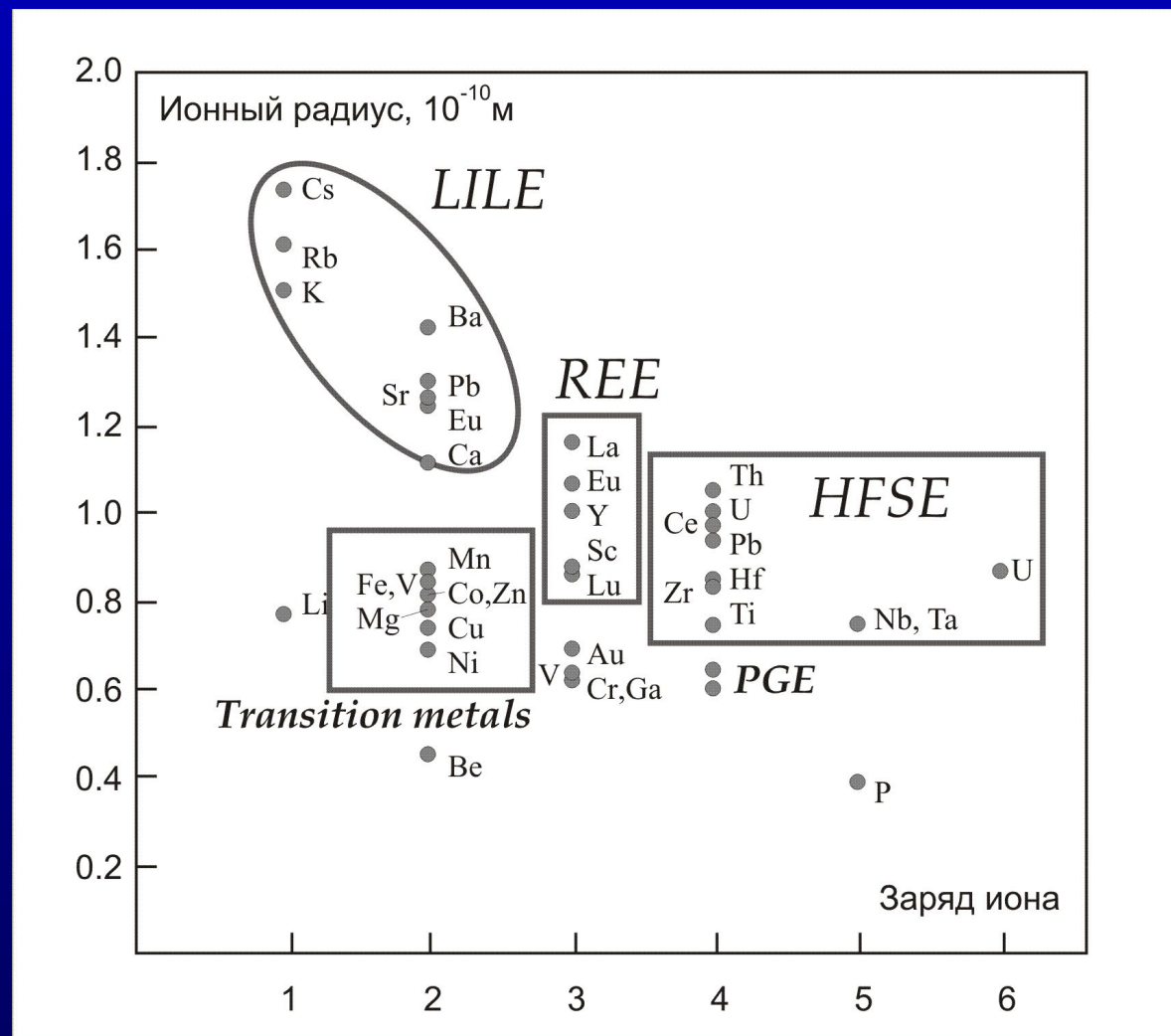


Chalcophile



Atmophile

Группировка литофильных элементов по кристаллохимическим свойствам

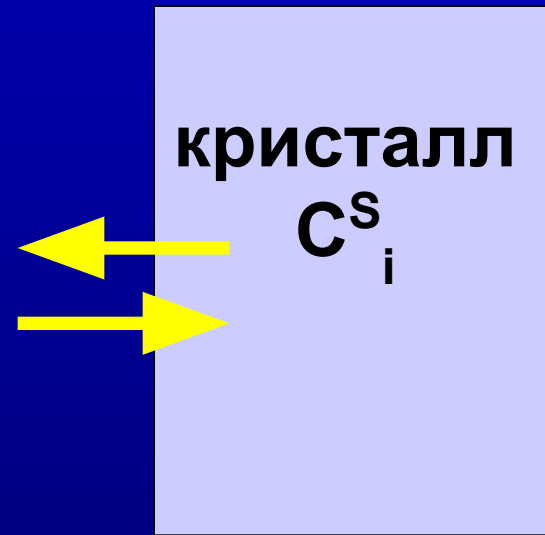


Поведение хим. элементов в магматическом процессе

элемент i

Коэффициент
распределения
(*partition coefficient*)

расплав
 C_i^L



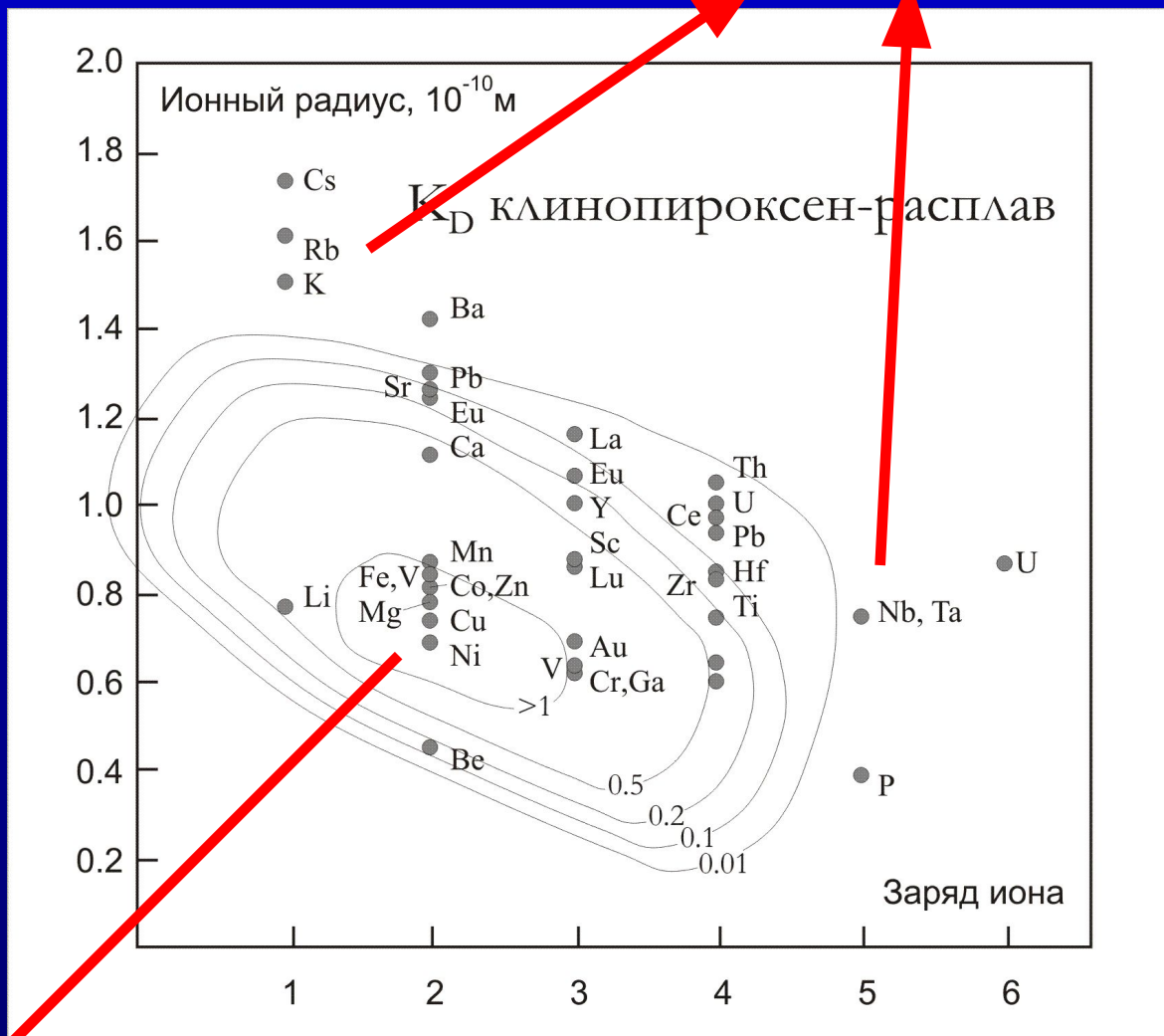
$$K_D = C_i^S / C_i^L$$

(K_d, D)

Валовый K_D :

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

несовместимые (*incompatible*)

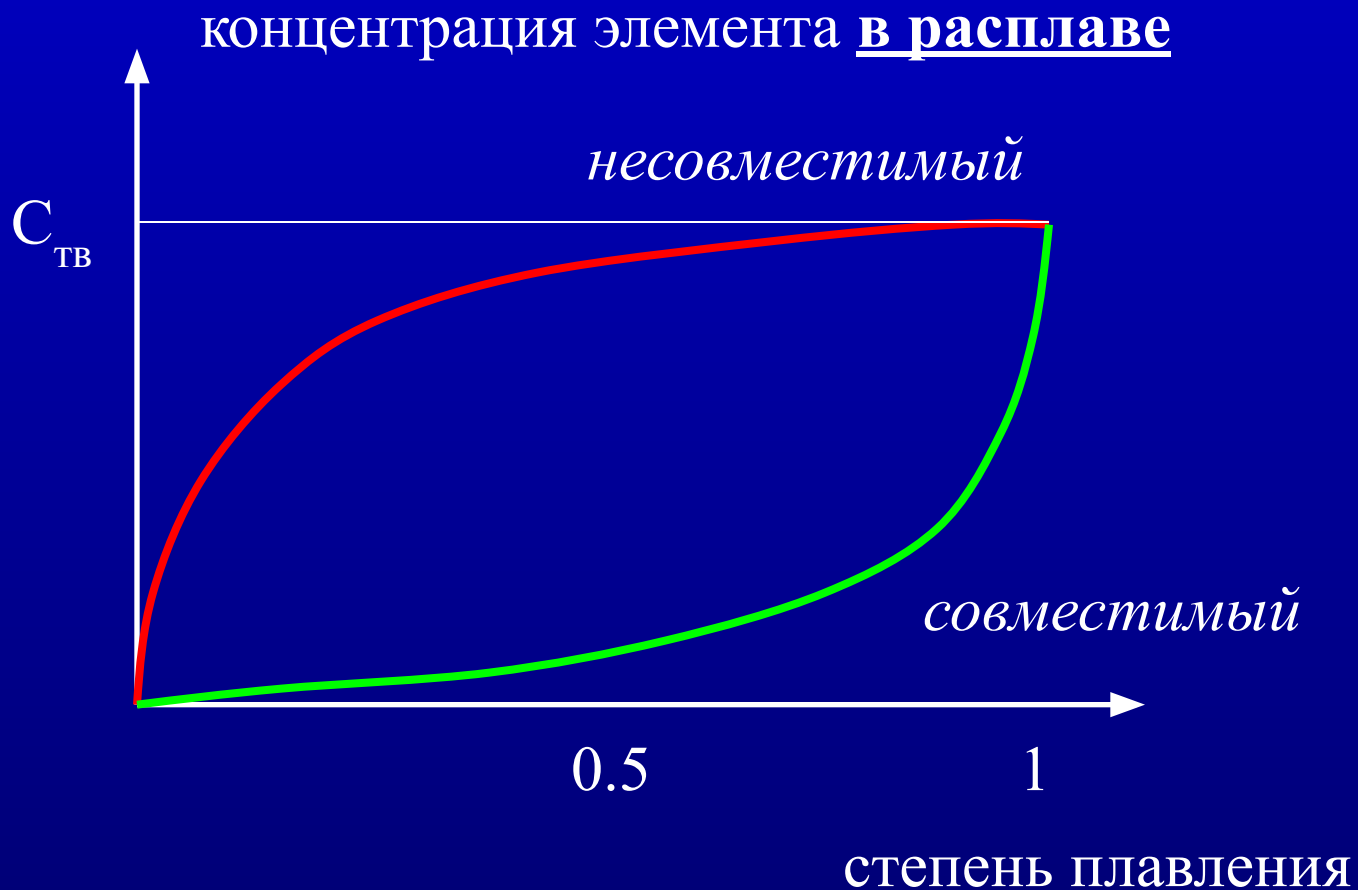


совместимые (*compatible*)

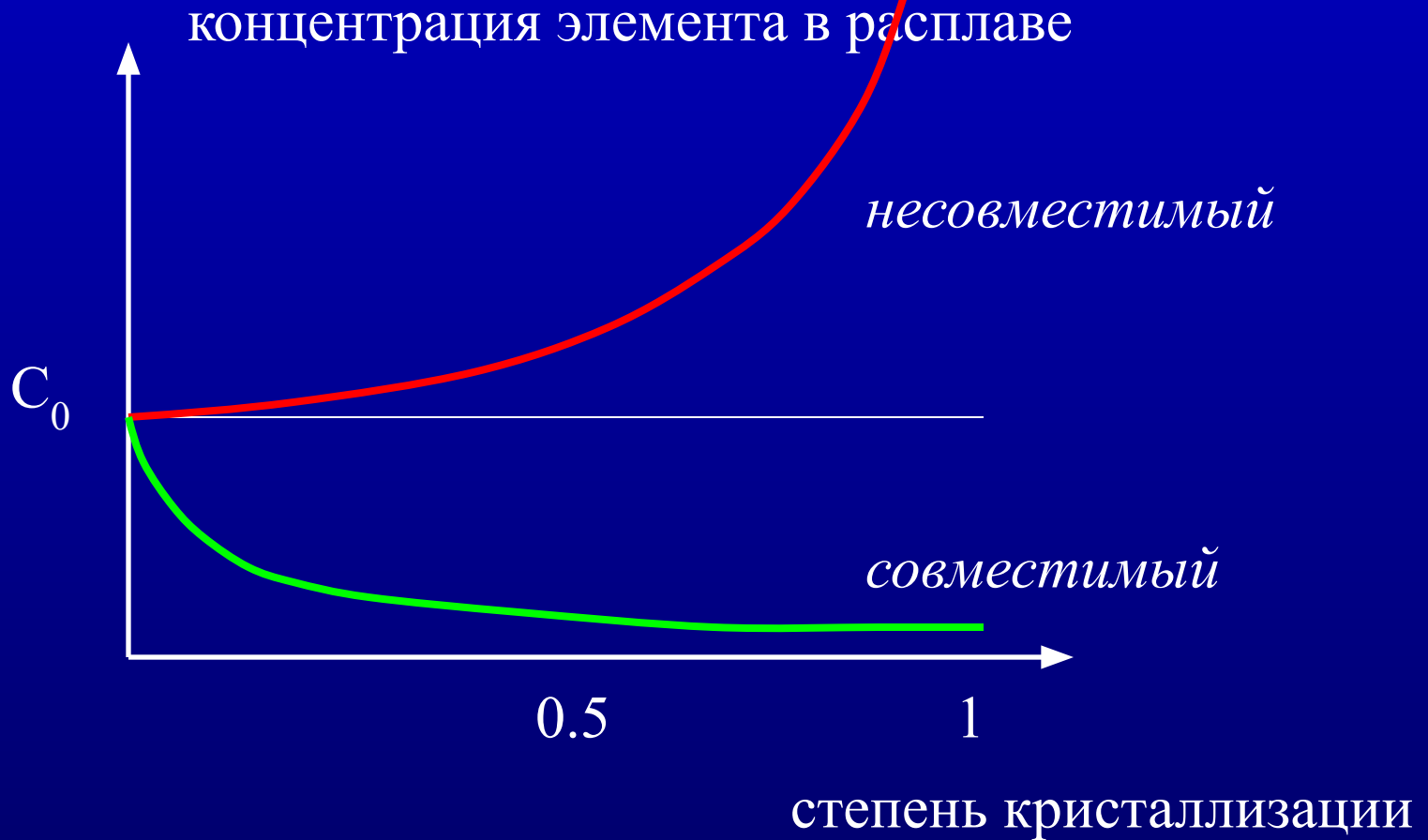
Факторы, определяющие состав магматических пород:

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

Поведение элементов при плавлении источника



Поведение элементов при кристаллизации расплава



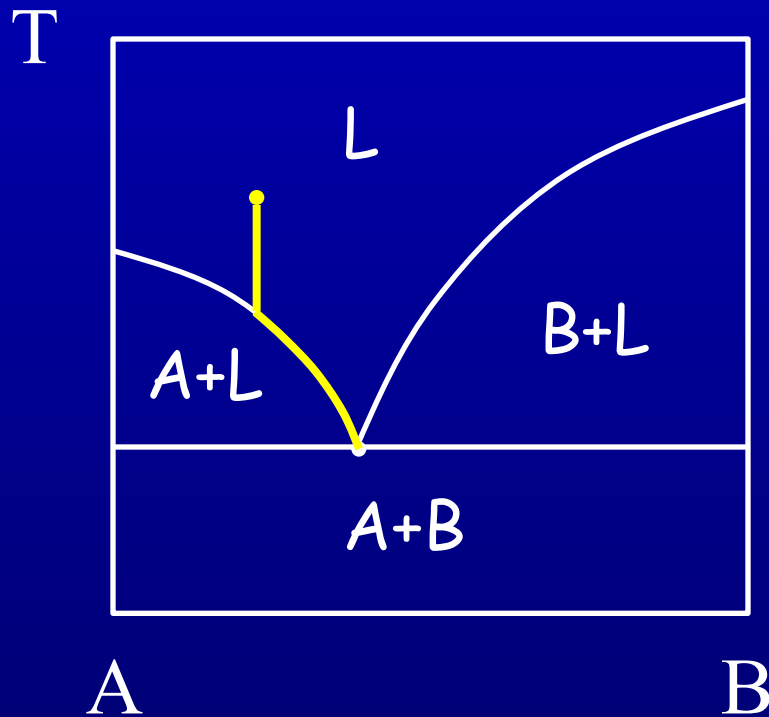
Осложнение - зависимость от состава кристаллизующихся фаз

Факторы, определяющие состав магматических пород:

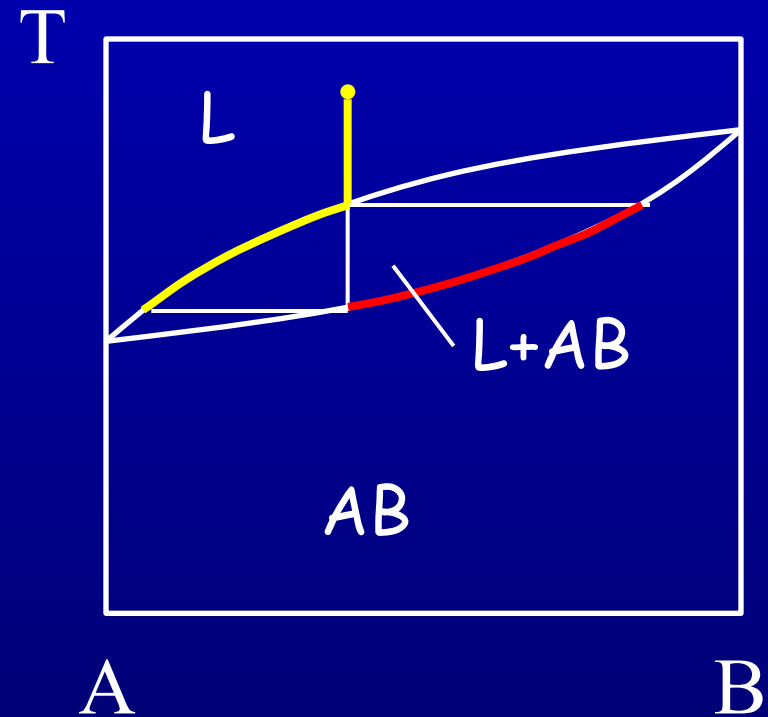
- состав источника (протолита)
- вариации степени плавления источника (PM)
- фракционирование кристаллов (CF)
- контаминация
- смешение магм
- несмесимость расплавов (ликвация)

Фракционирование кристаллов:

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА ОСТАТОЧНОГО РАСПЛАВА

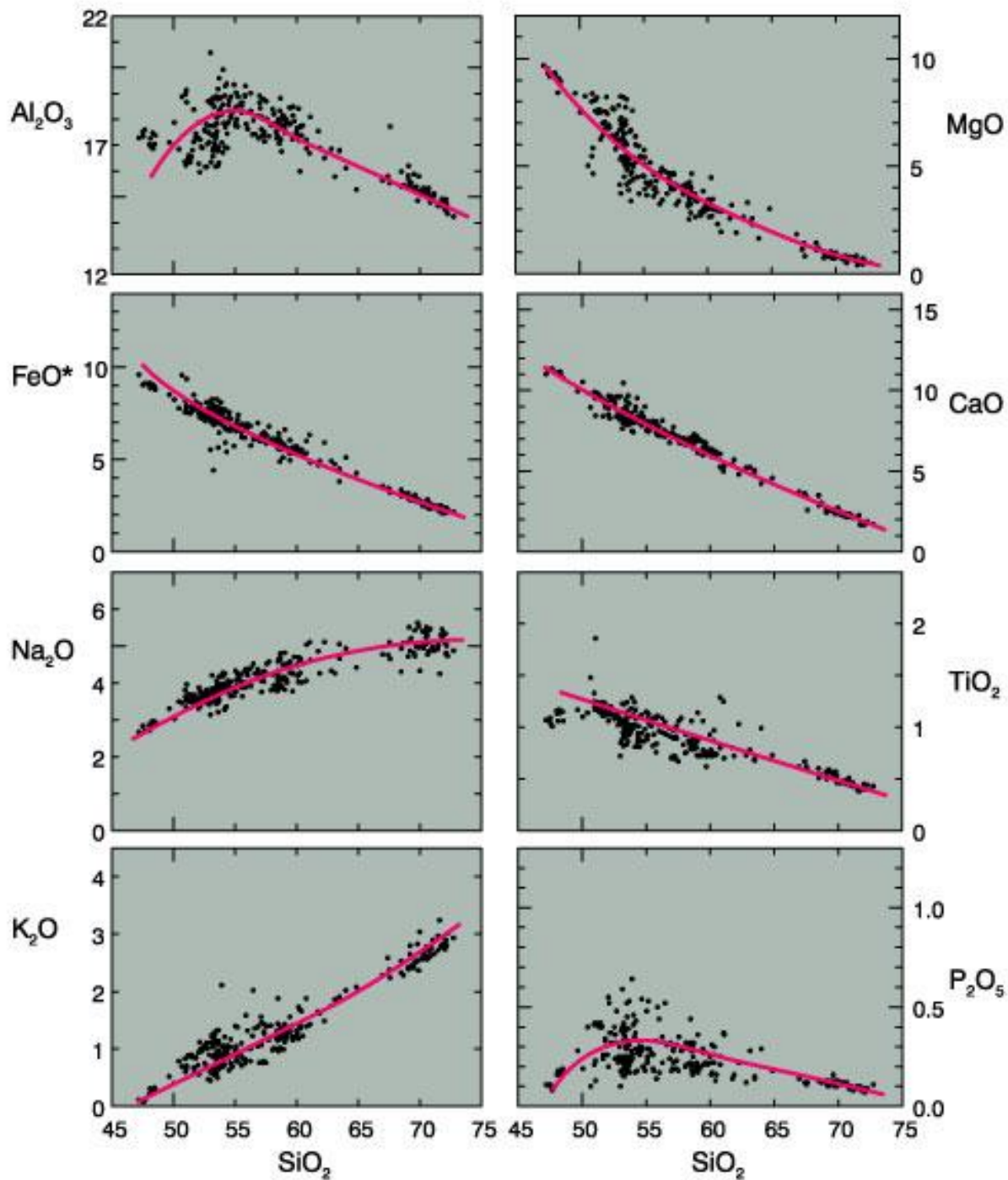


A и B не смешиваются
(напр, $p\text{l}$ и $p\text{x}$)



A и B – непрерывный
твердый р-р (напр, $o\text{l}_{\text{Fe}}$ и $o\text{l}_{\text{Mg}}$)

Тренды кристаллизационного фракционирования



*Ведущая роль в формировании
трендов -*

**качественный состав фаз, уходящих
из системы**

Минералы — хозяйева !

Источники информации:

Состав пород:

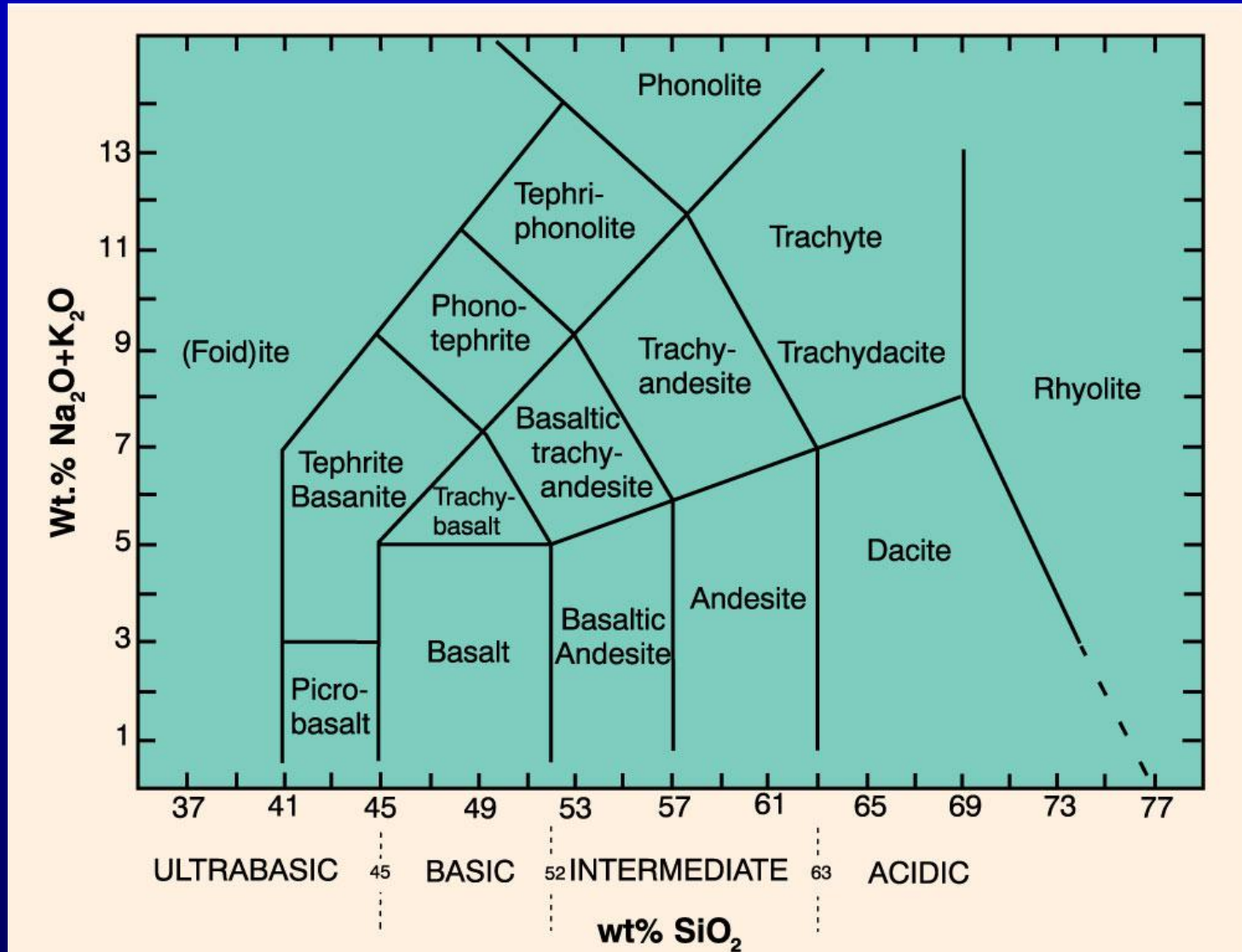
- петрогенные элементы
- элементы-примеси
- изотопы

Состав минералов

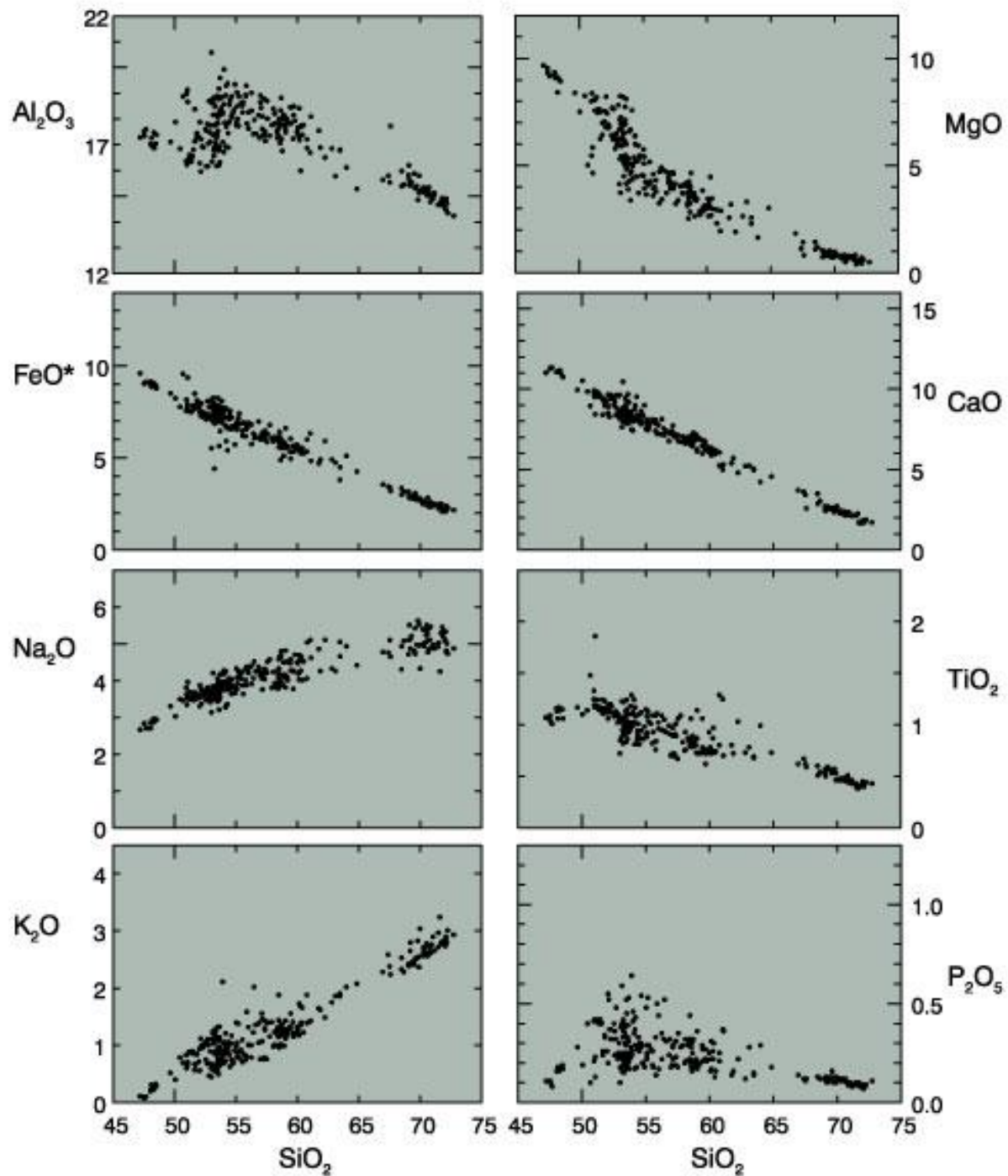
Петрогенные элементы

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

Классификационная диаграмма TAS



Вариационные диаграммы (Харкеровские)



CIPW нормы

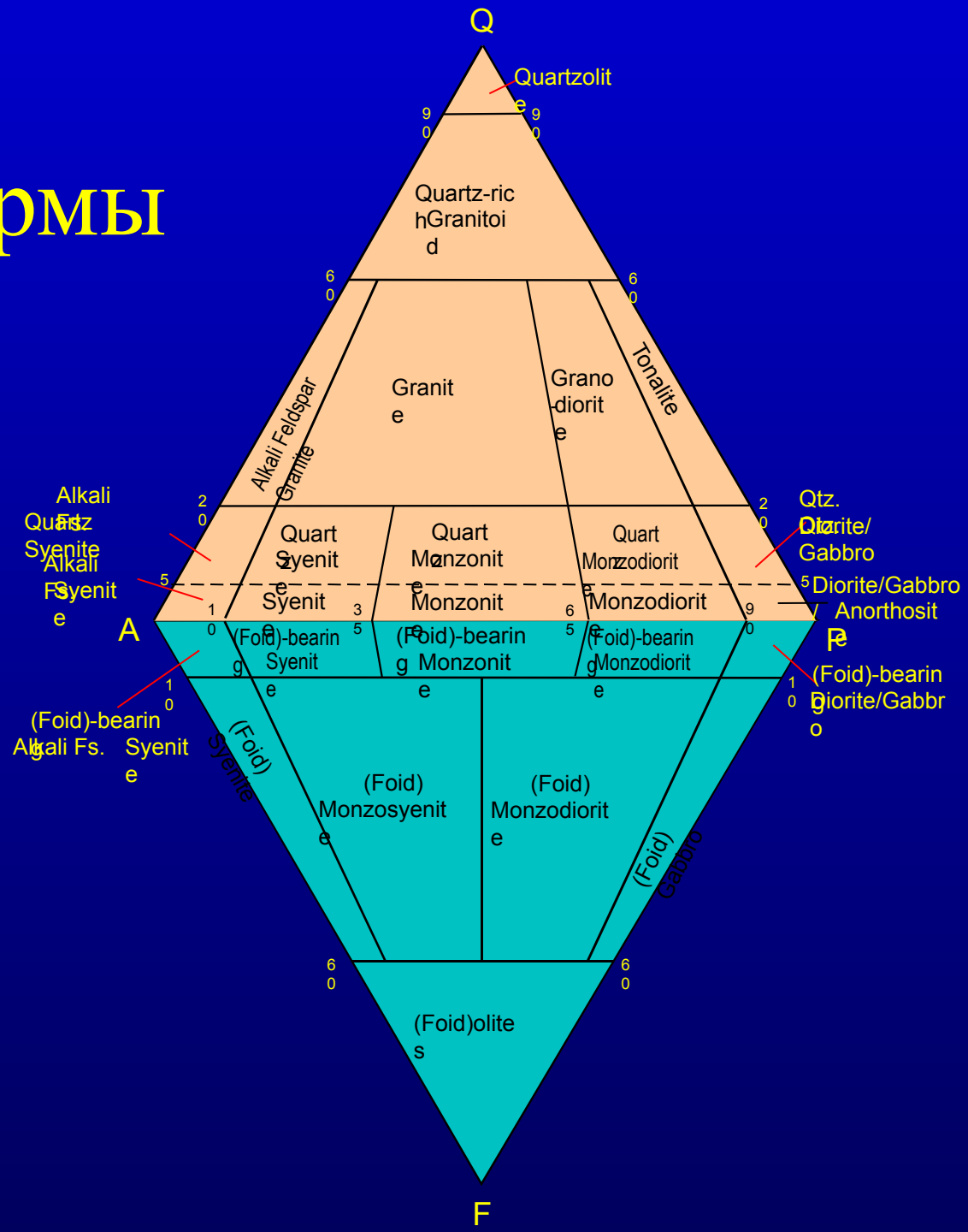
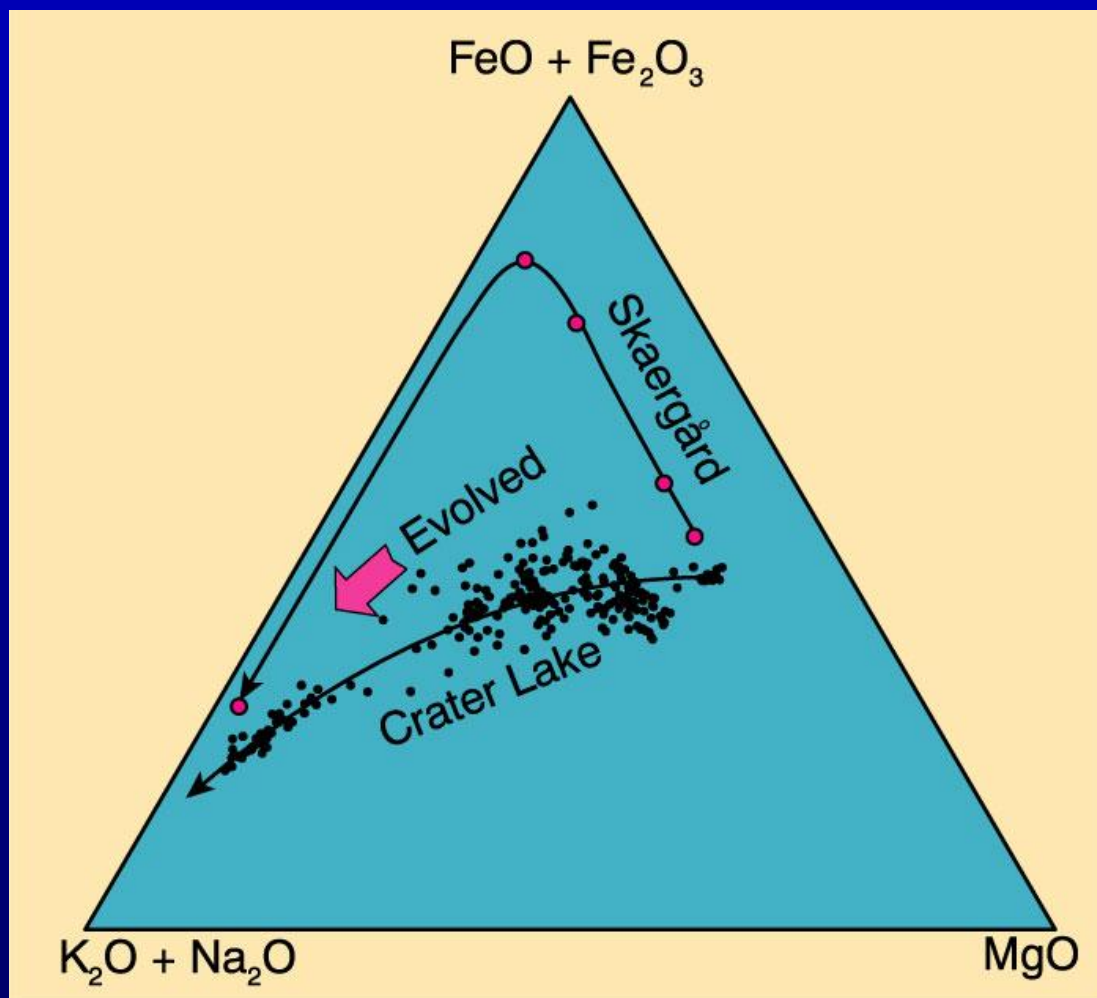
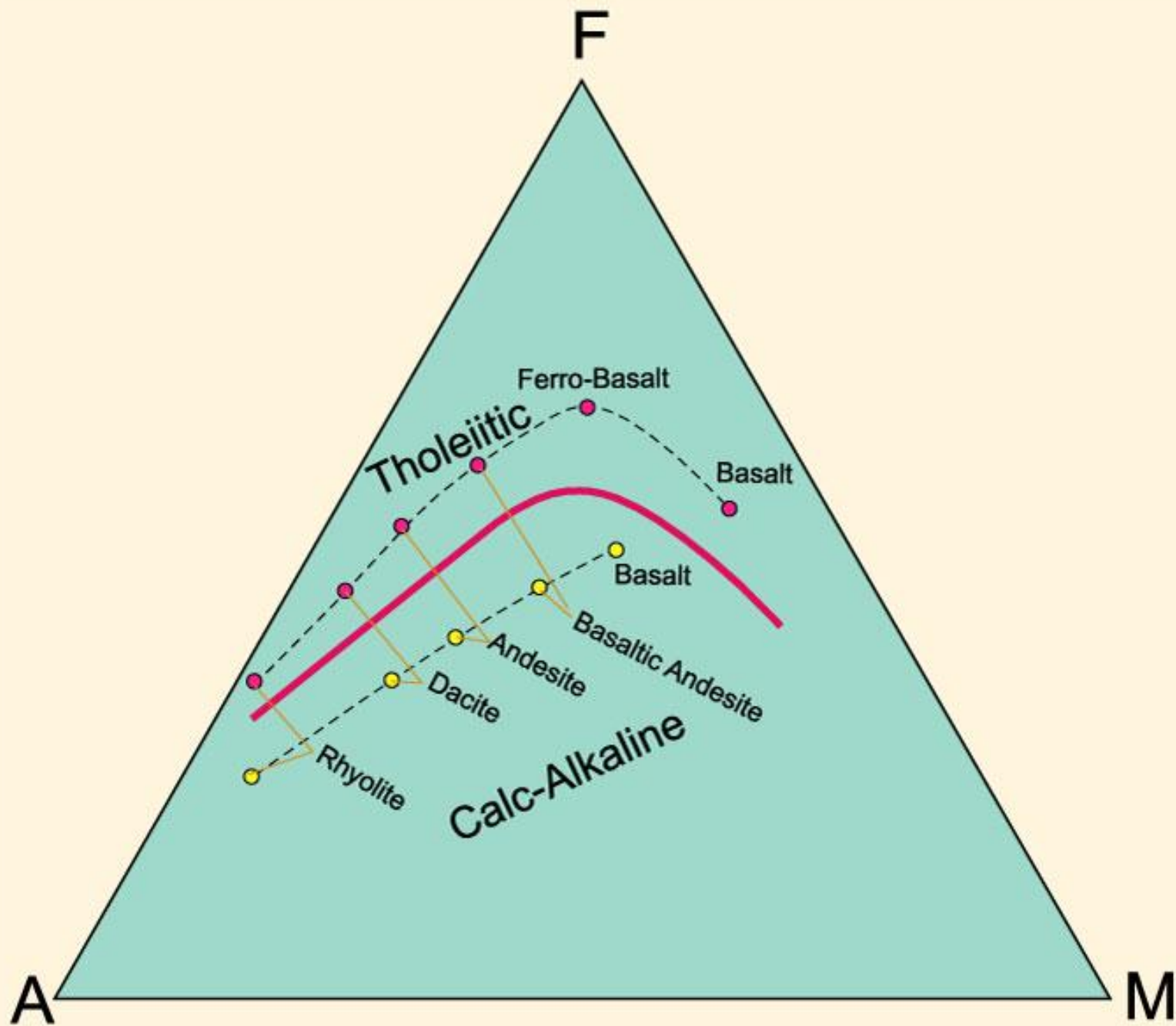
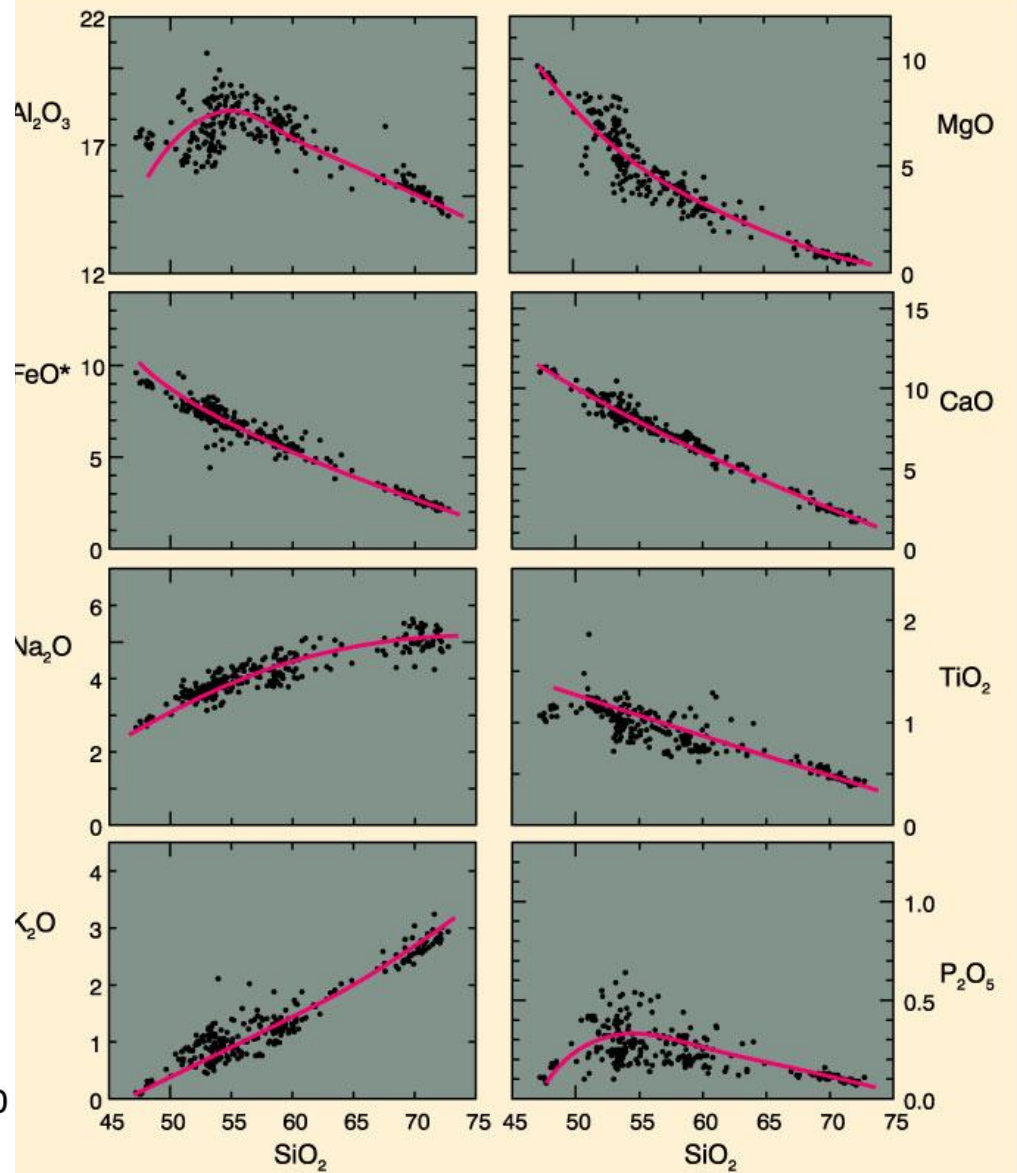
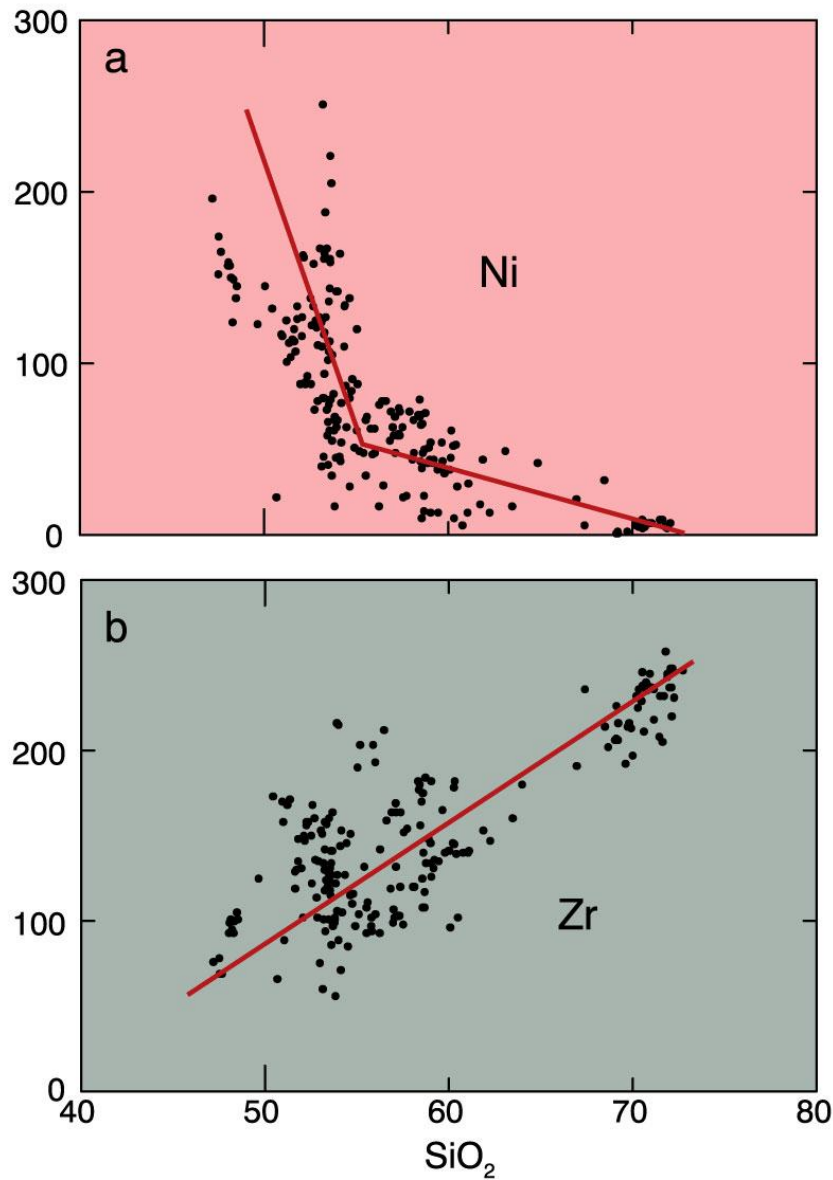


диаграмма AFM

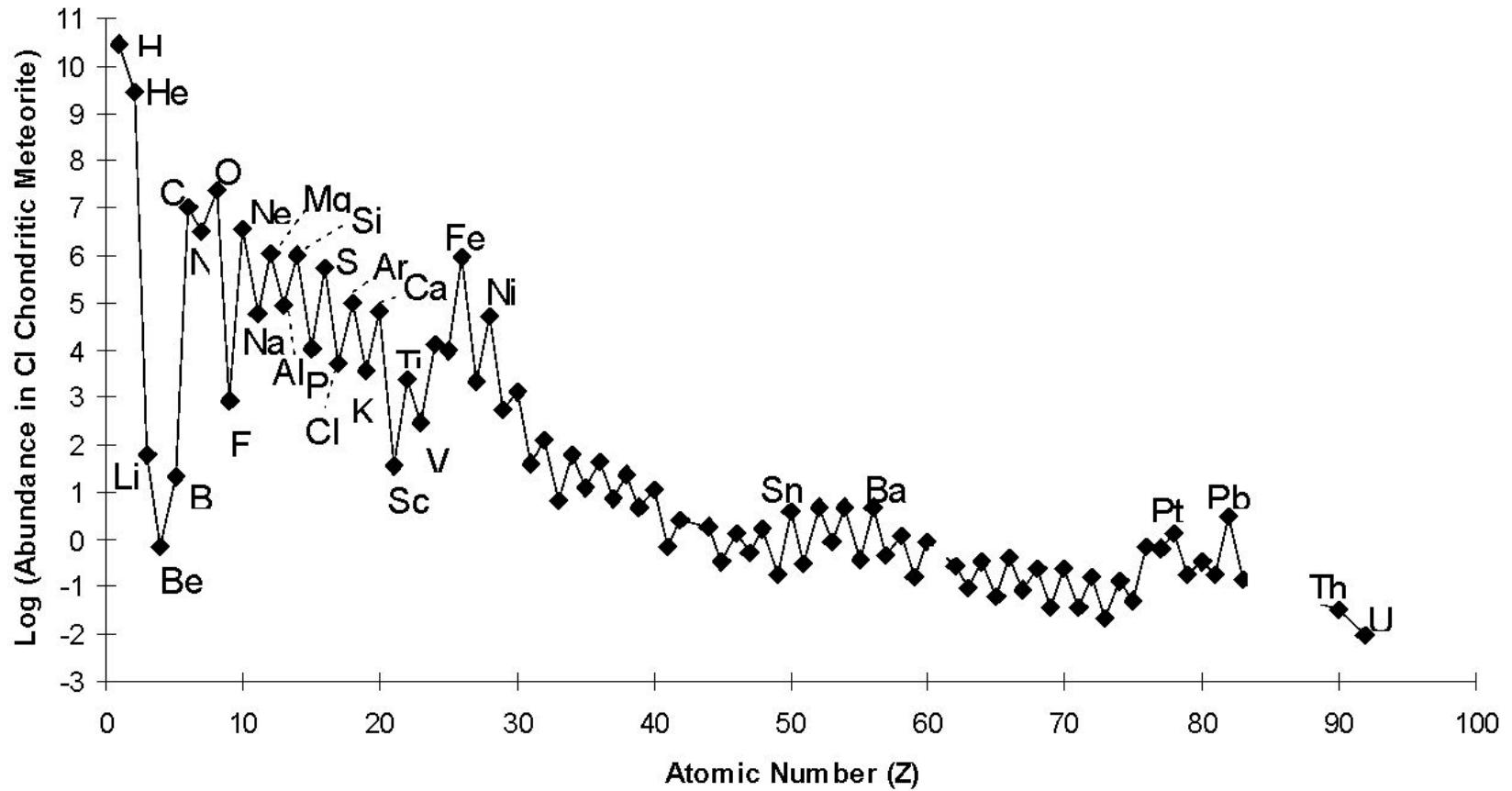




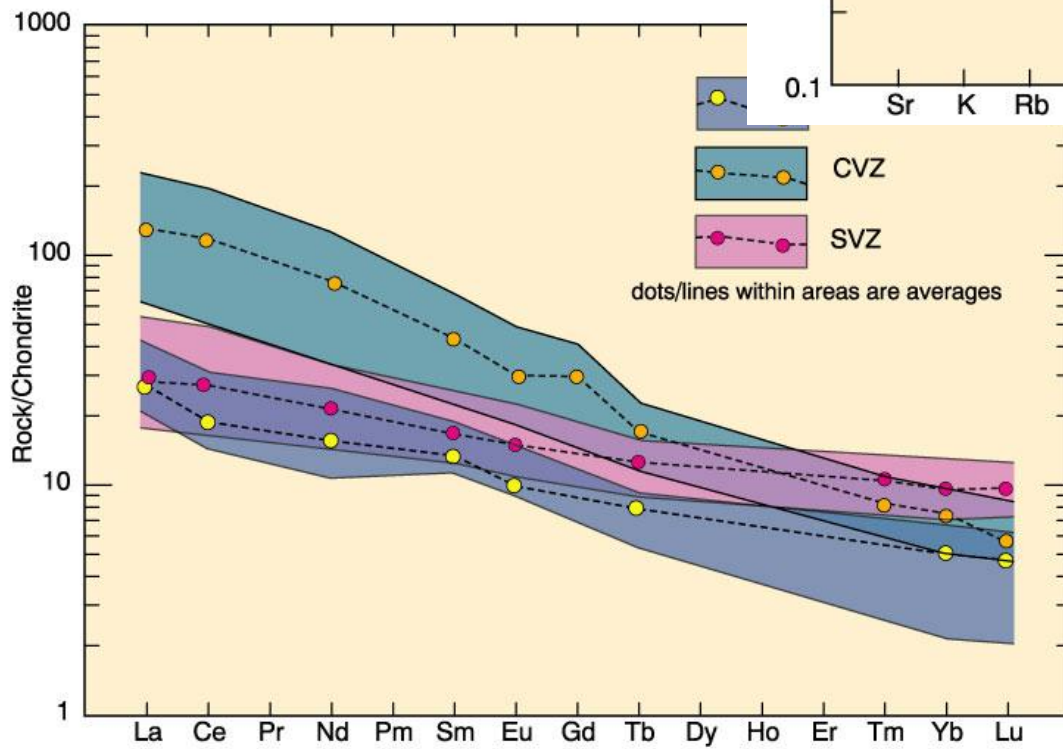
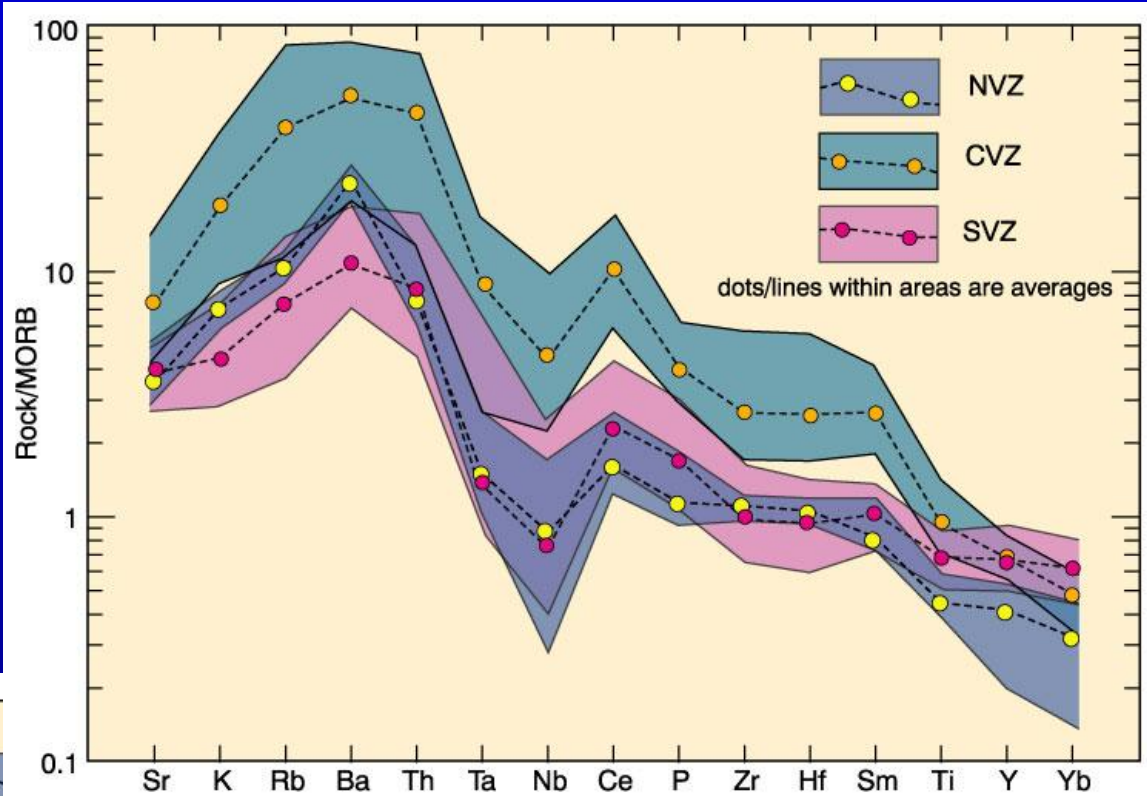
Элементы-примеси



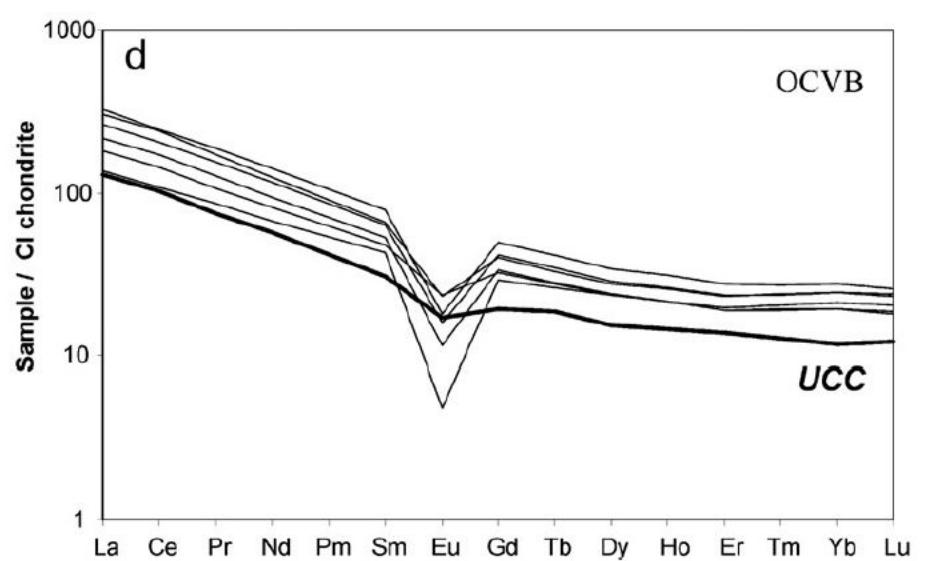
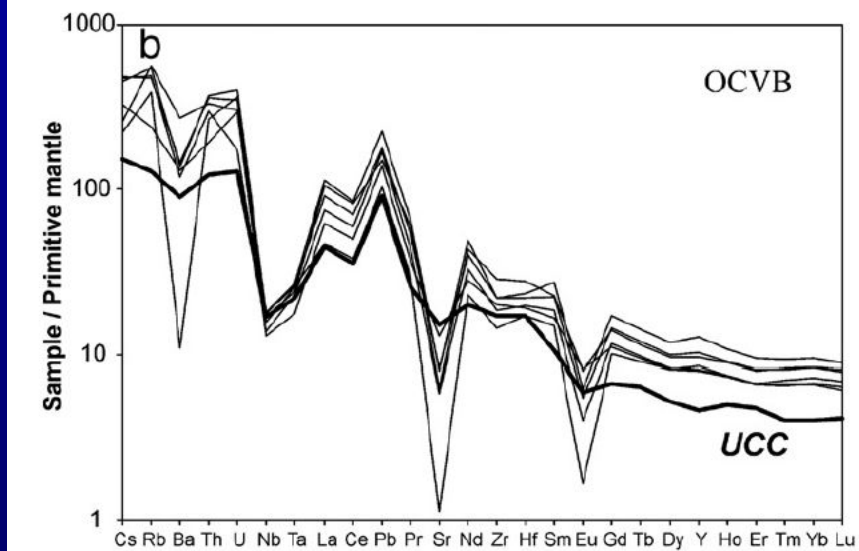
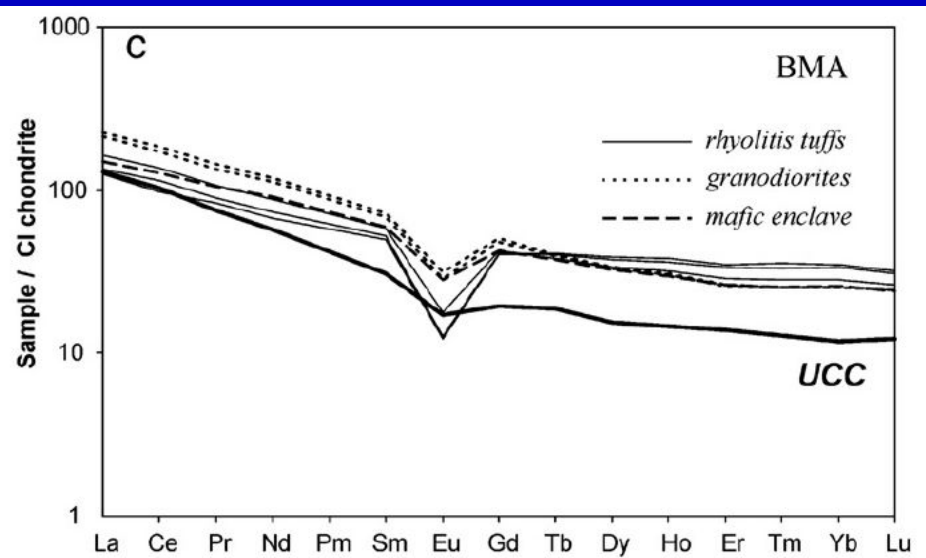
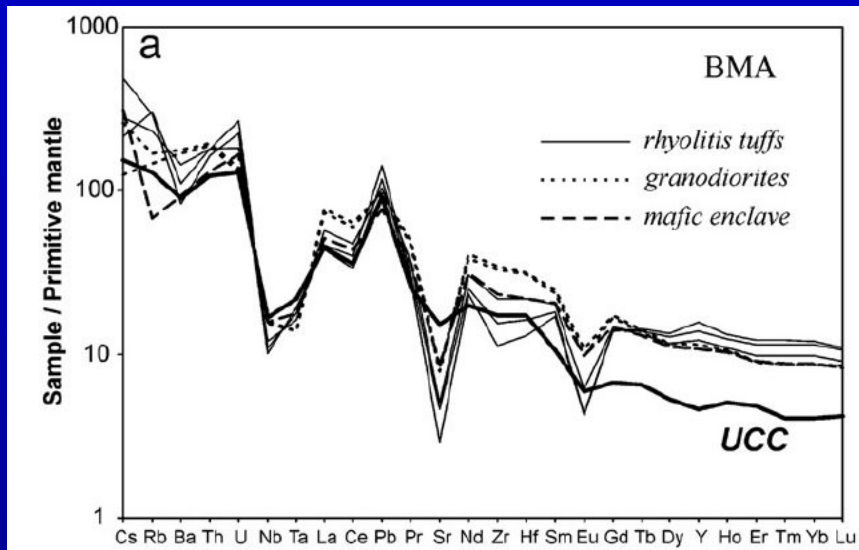
построение спайдеграмм



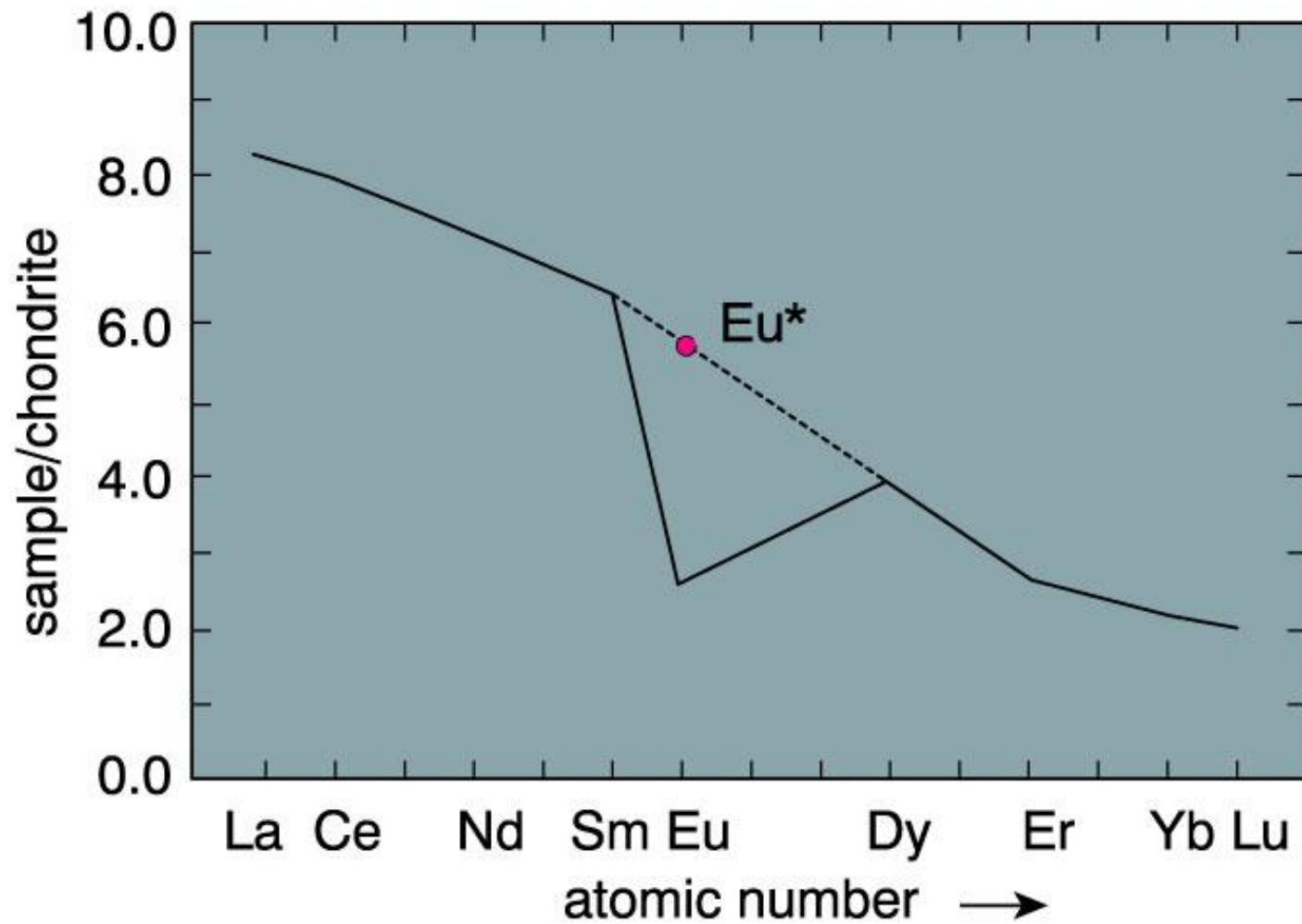
построение спайдеграмм



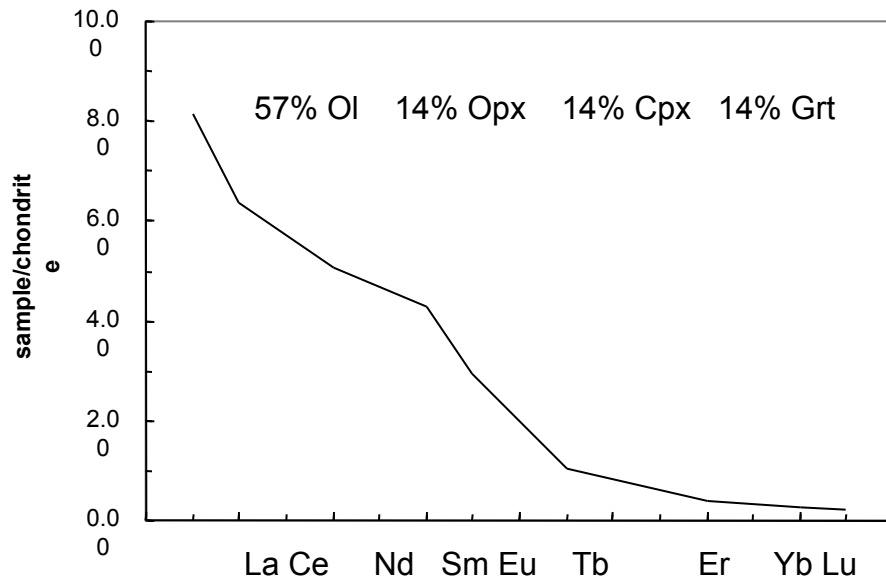
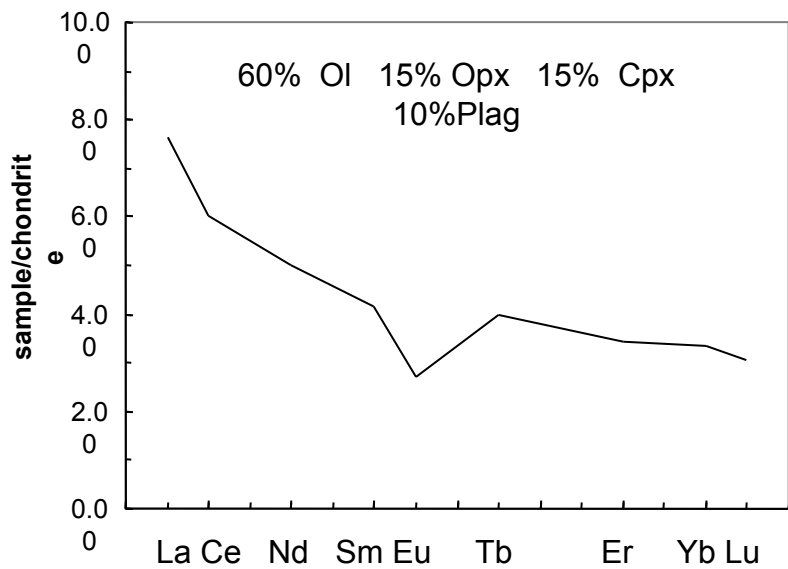
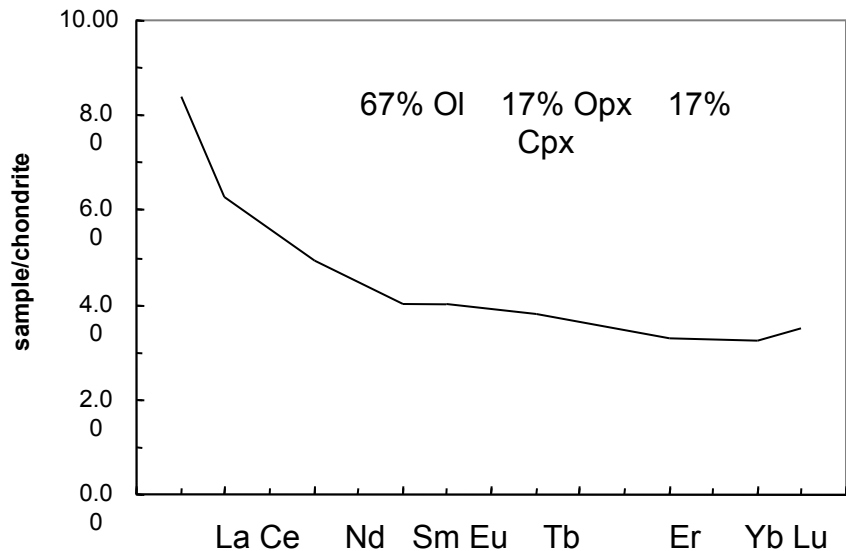
построение спайдеграмм



Аномалия европия



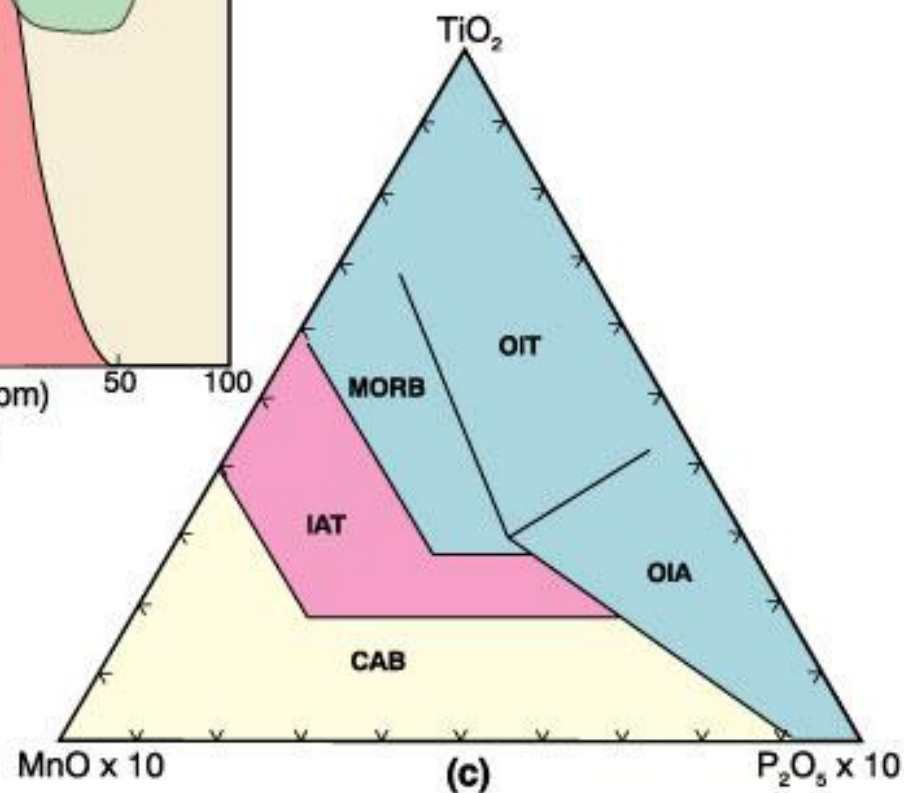
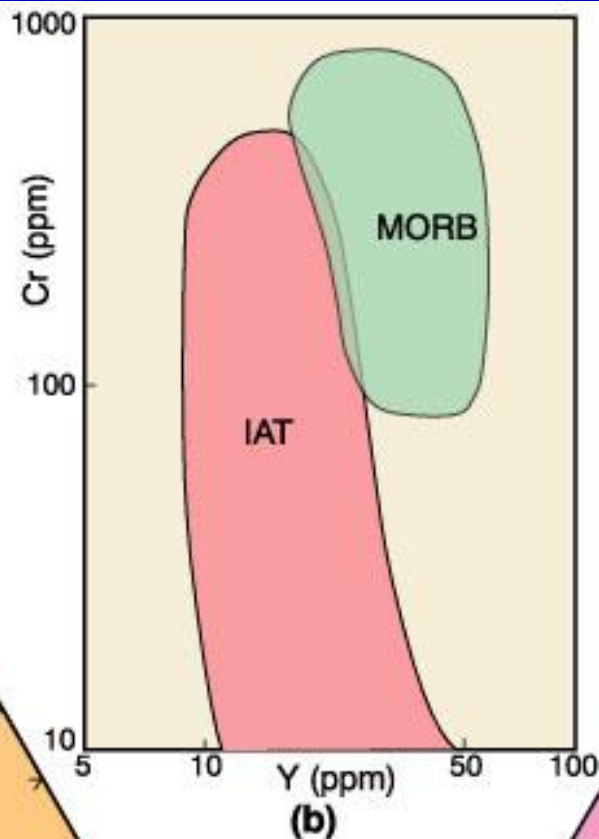
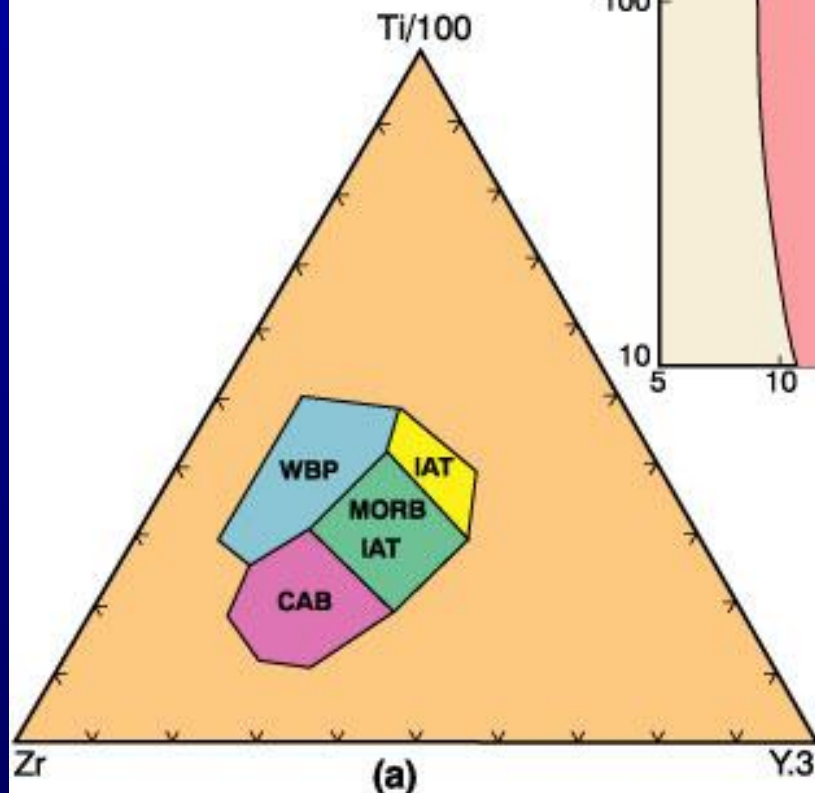
Эффект фракционирования фаз



Дискриминационные 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



Изотопная геохронология

(кратко)

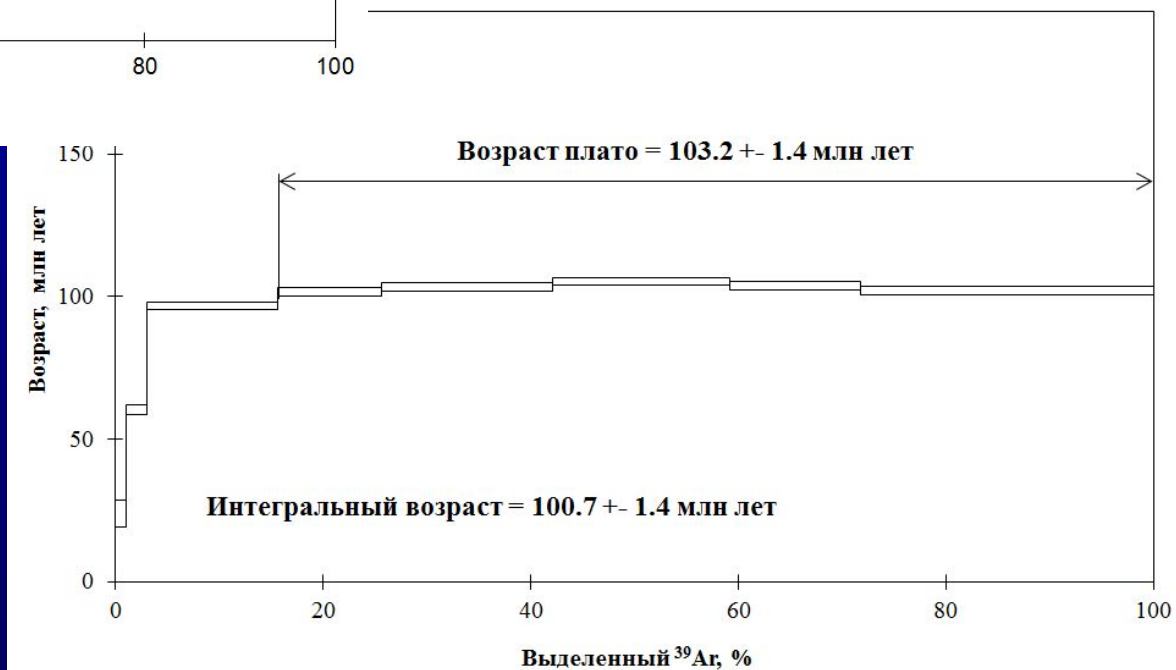
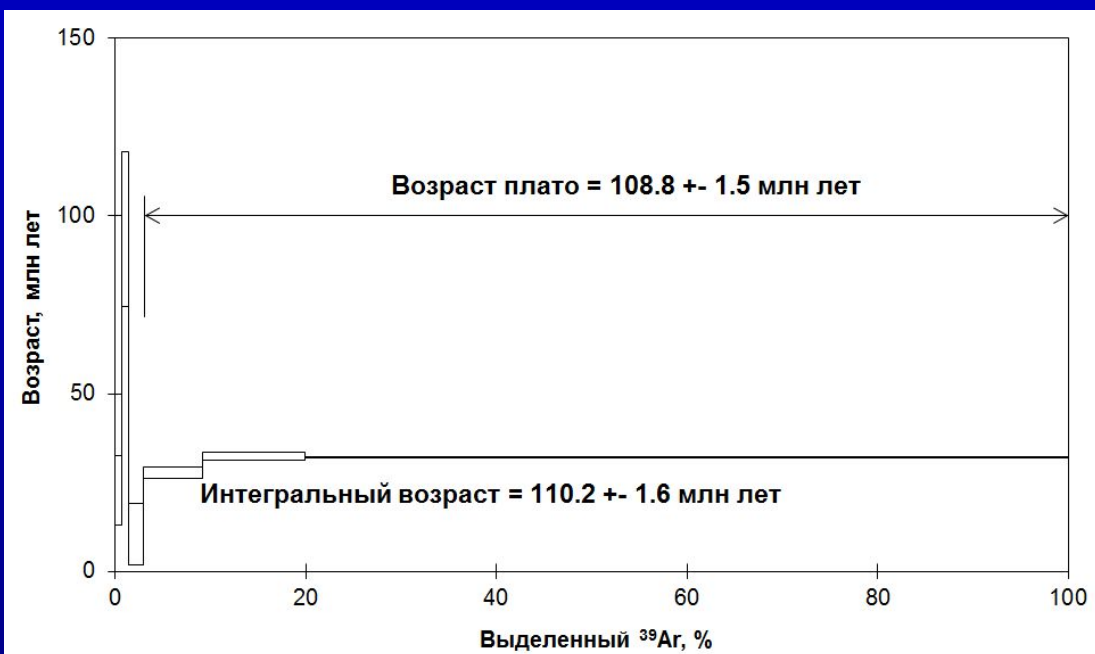
Рекомендованная литература

Г. Фор . Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1986 + более поздние издания.

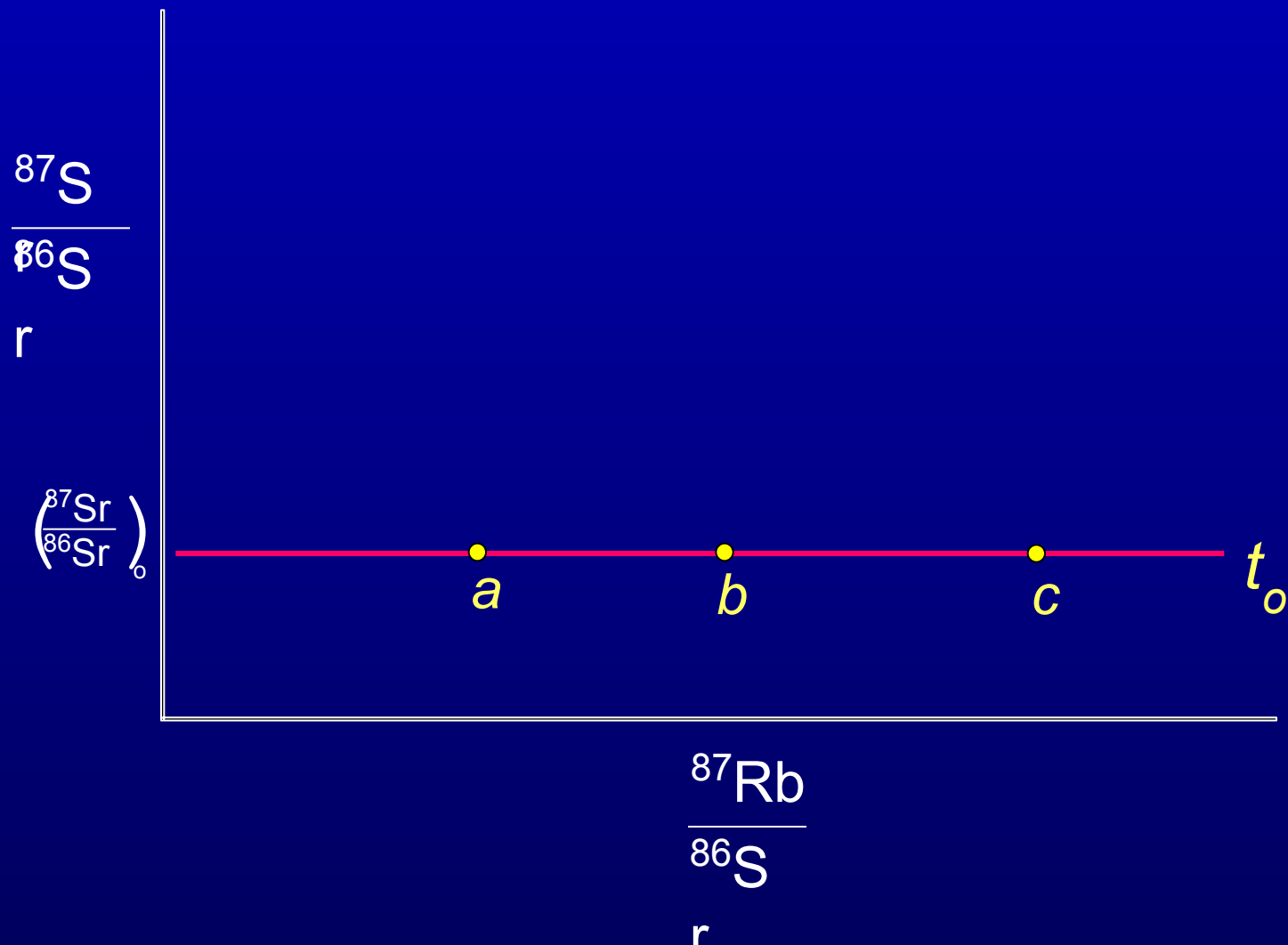
Радиоактивные / радиогенные ИЗОТОПЫ



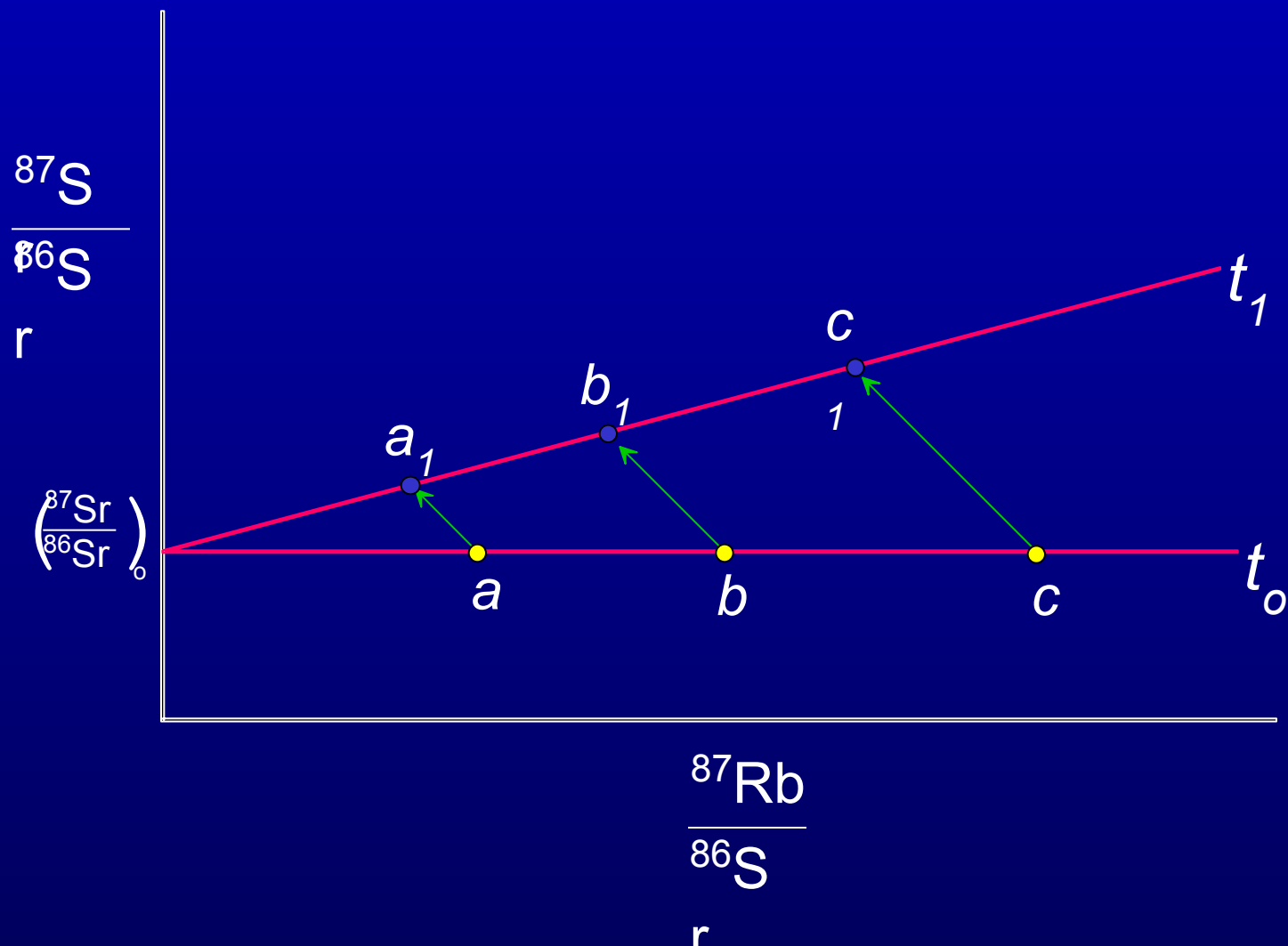
$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод *ступенчатый нагрев (step heating)*



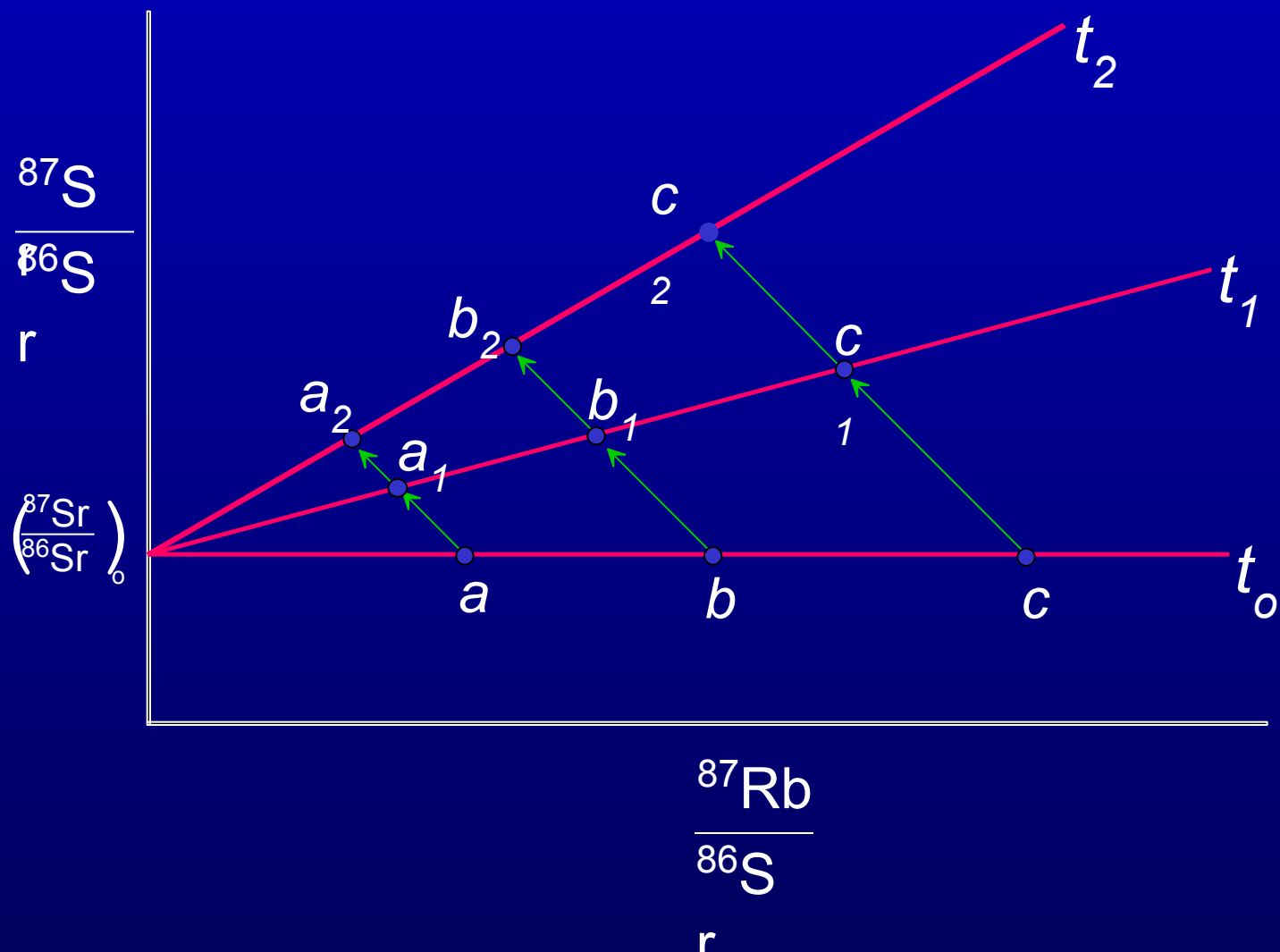
Формирование изохроны: 1



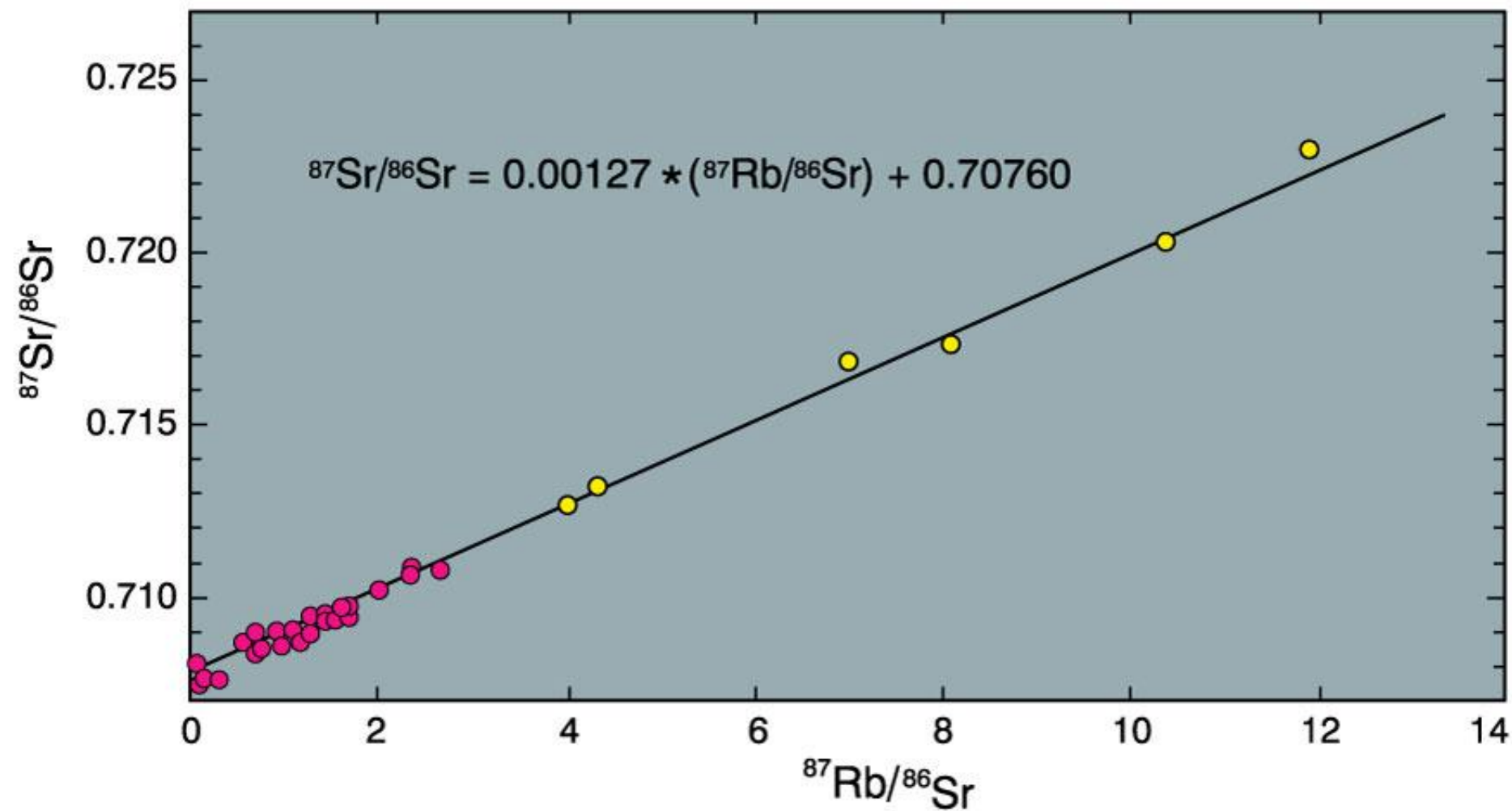
Формирование изохроны: 2



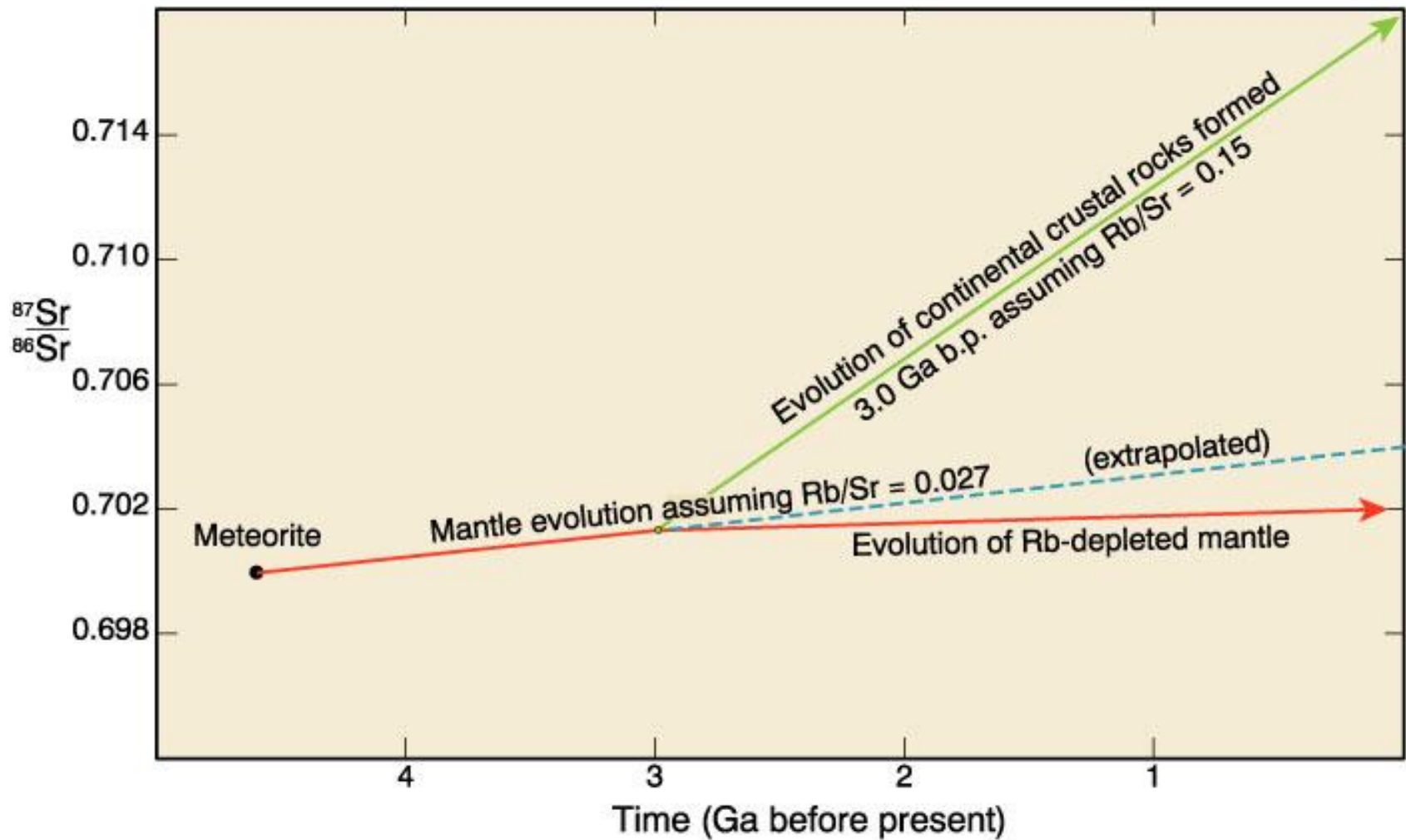
Формирование изохроны: 3



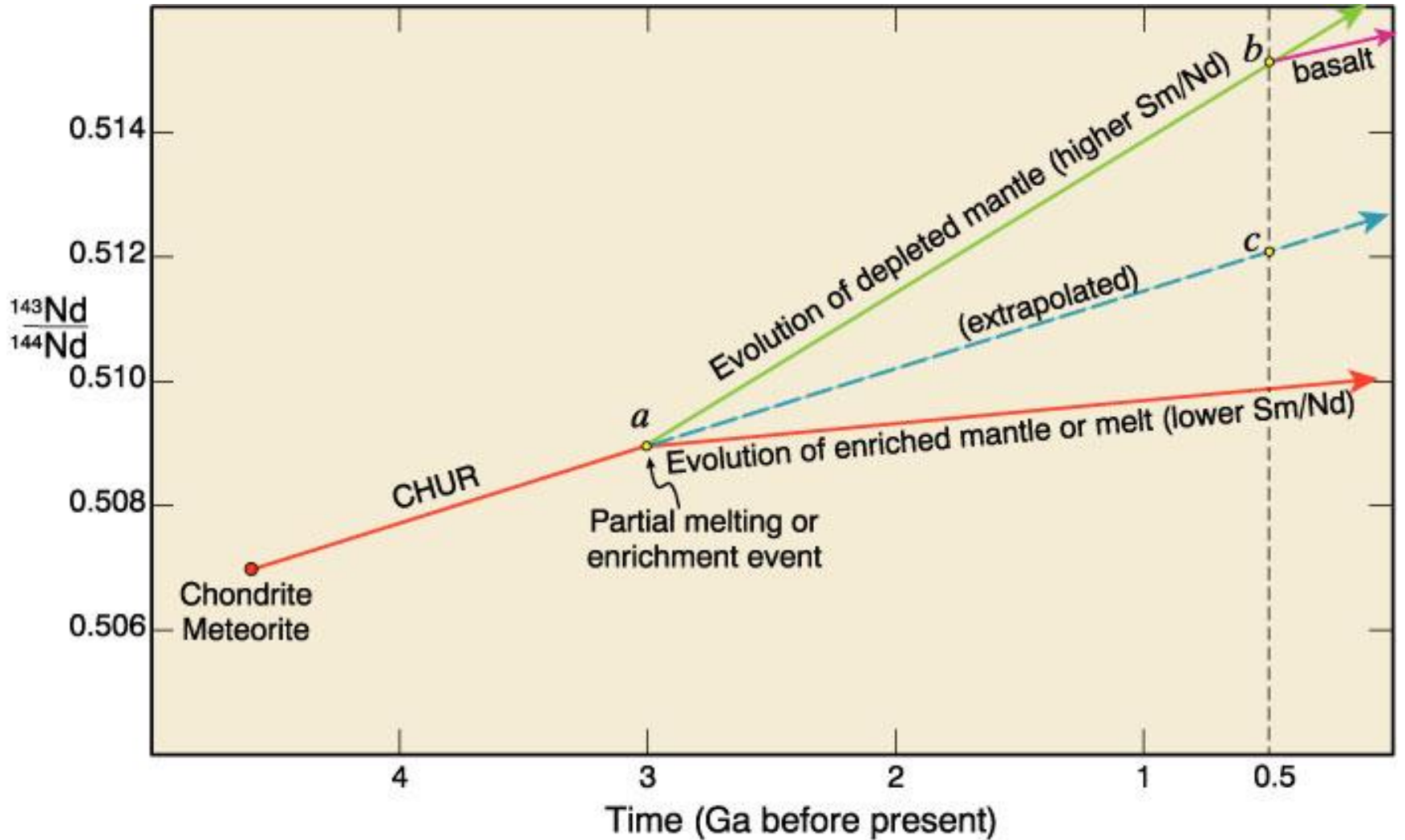
Rb-Sr Isochron, Eagle Peak Pluton, Sierra Nevada Batholith



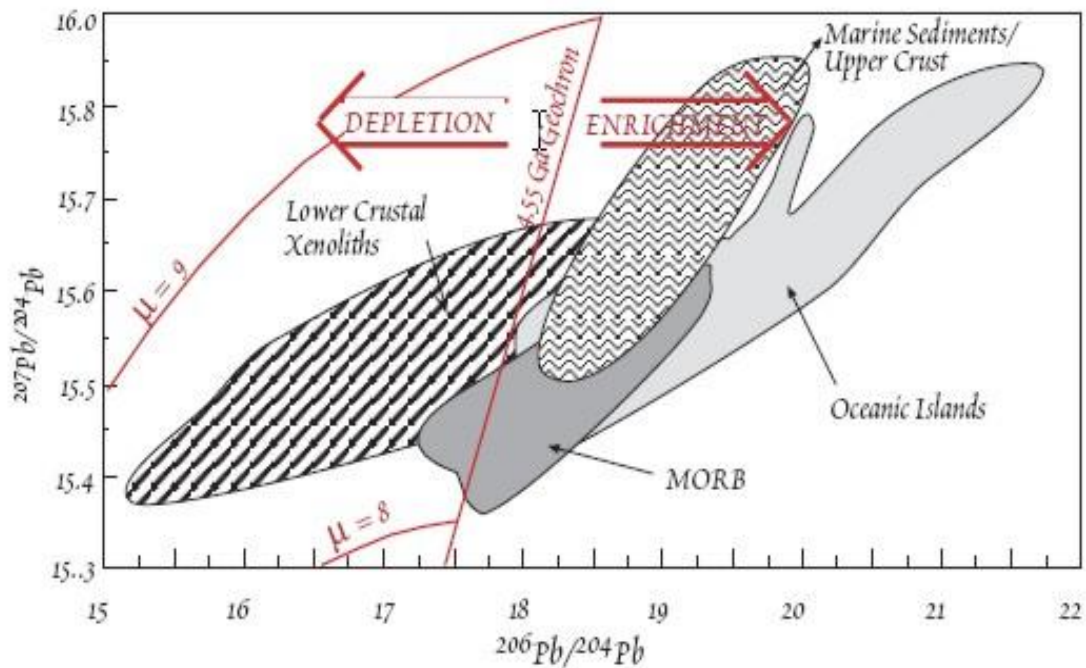
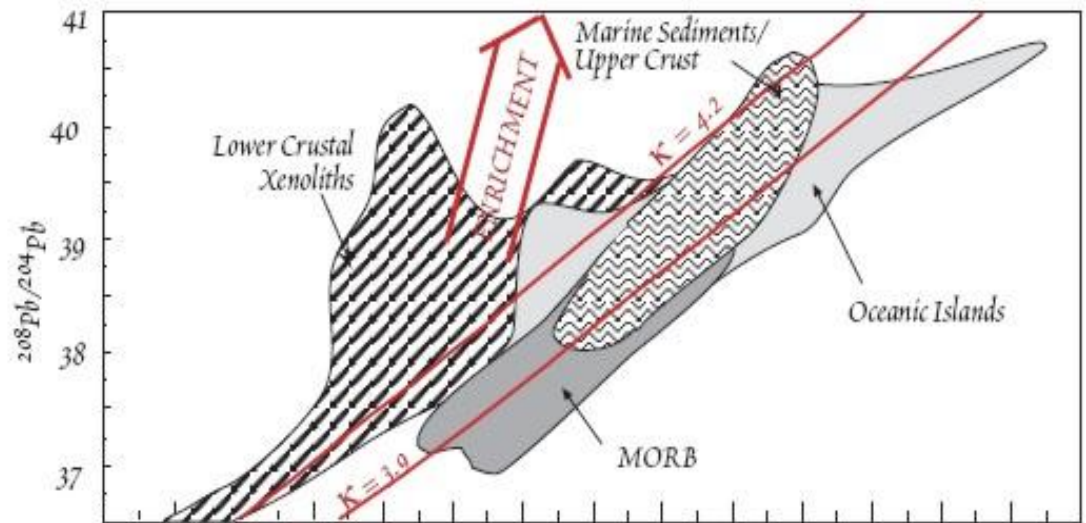
Эволюция изотопного состава Земли



Эволюция изотопного состава Земли

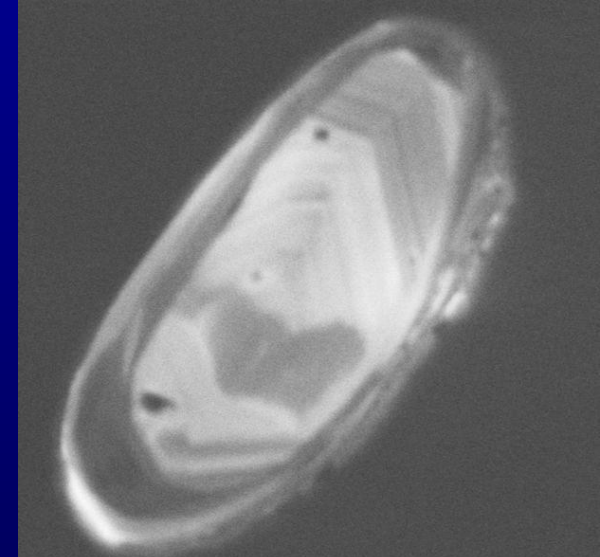
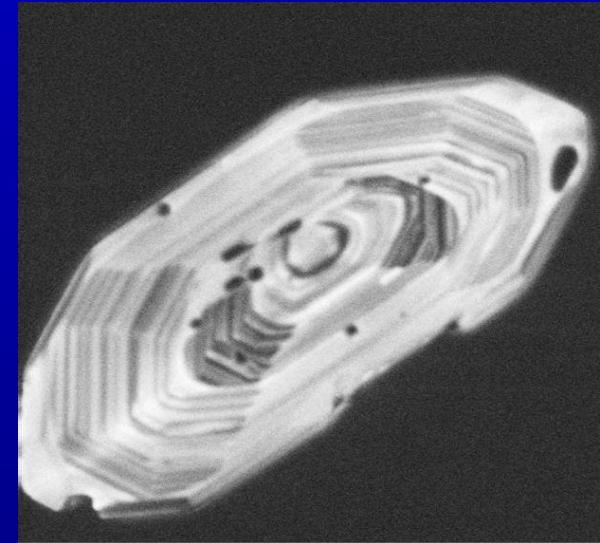
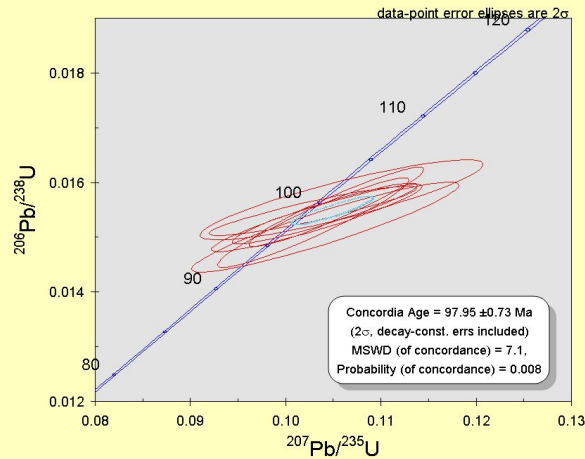
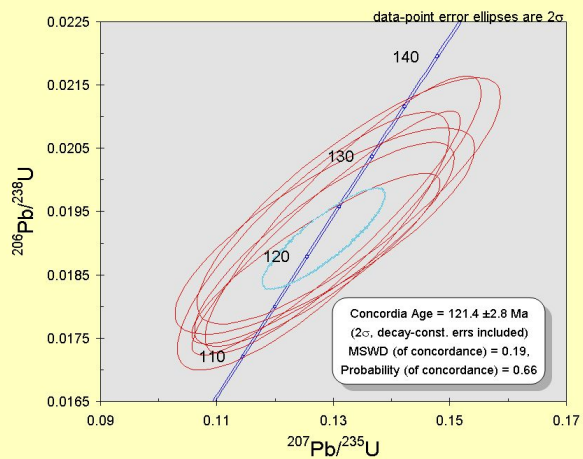
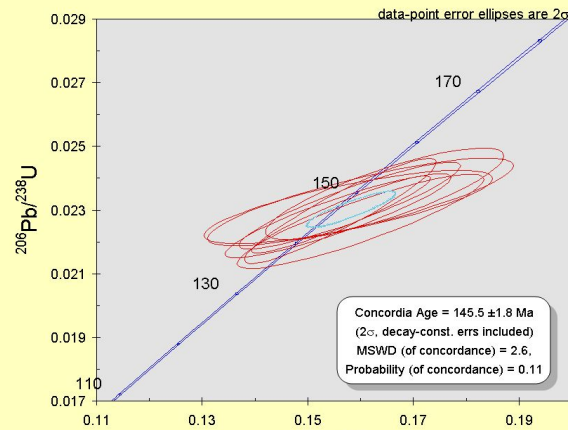
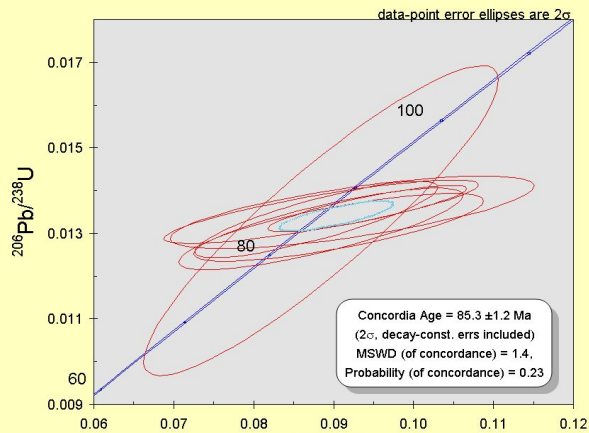


U-Pb-Th система



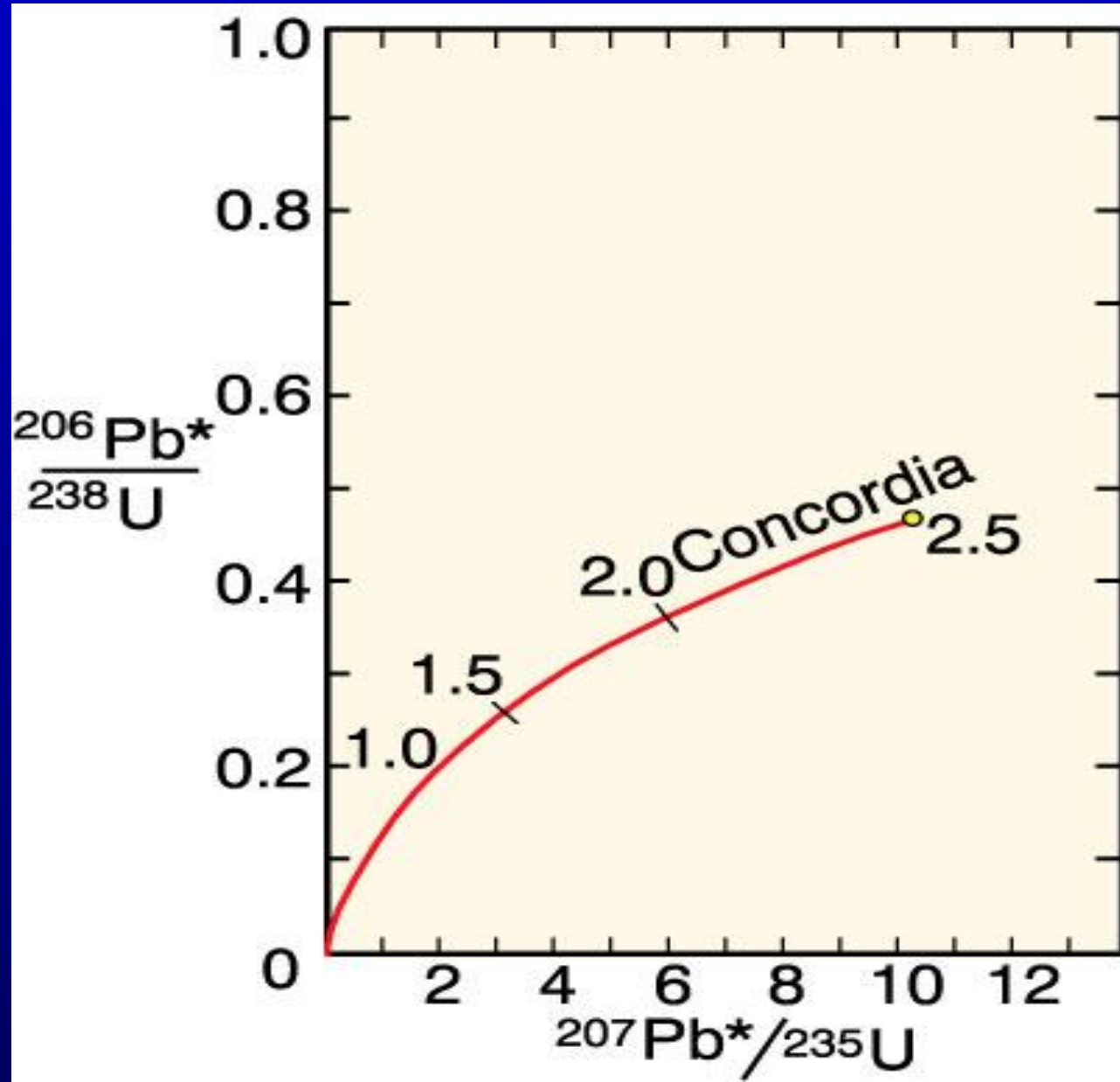
U-Pb-Th система

Цирконовая геохронология



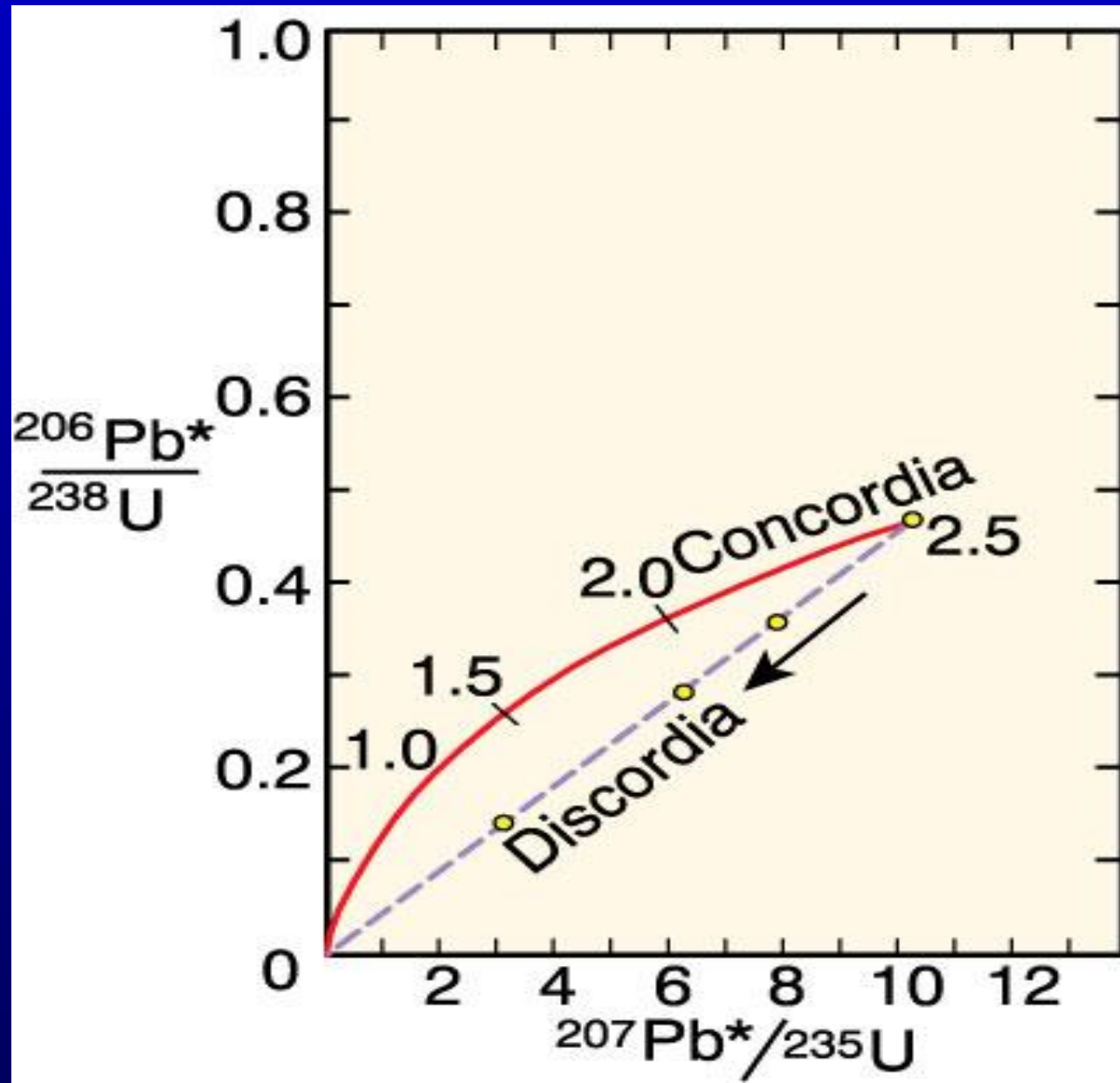
U-Pb-Th система

Конкордия



U-Pb-Th система

Дискордия



U-Pb-Th система

Дискордия

