



Общая геохимия

Лекция 15

Геохимия эндогенных процессов

Российская Академия наук
Дальневосточное отделение
Дальневосточный геологический институт

МАРТЫНОВ ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ОСНОВЫ МАГМАТИЧЕСКОЙ ГЕОХИМИИ

Учебное пособие издано при финансовой поддержке ДВО РАН

Научный редактор, академик А.И. Ханчук
Латинь и цифры выверены


Владивосток
Дальнзнак
2010

В. С. Антипин, В. А. Макрыгина

ГЕОХИМИЯ ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Учебное пособие

Рекомендовано

*УМО по классическому университетскому образованию
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению 020300 – Геология*

Второе издание, исправленное и дополненное

*Ворогому Александру Бор
от авторов*



В. С. Антипин
В. А. Макрыгина

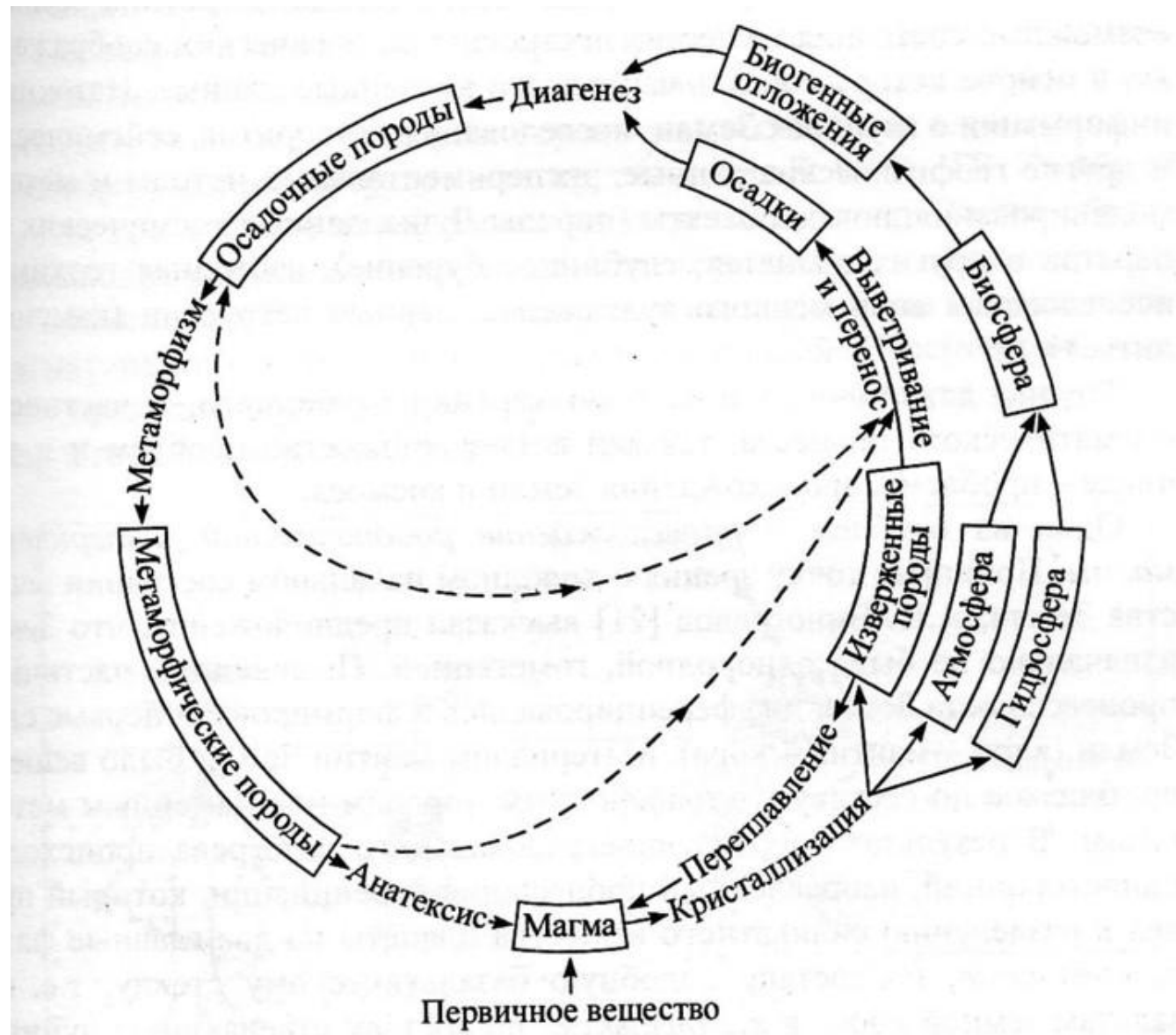


Рис. 35. Геохимический цикл (Б. Мейсон)

Геохимический цикл

Классификация геохимических процессов

- Главными критериями классификации являются значения интенсивных параметров: температуры T и давления P .
- Выделяются две крупные группы процессов: **эндогенные** (область высоких температур и давлений) и **экзогенные, гипергенные** (приповерхностная область низких, в том числе отрицательных, температур и атмосферного давления).

- **Эндогенные процессы** делятся на:
- **магматические**, протекающие в высокотемпературном расплаве и на его контакте с твердыми горными породами;
- **метаморфические**, происходящие в твердых породах под воздействием высоких температур и давлений;
- **гидротермальные** в широком смысле, к которым следует отнести все высокотемпературные процессы, в которых участвует вода (водный раствор) как самостоятельная фаза, в том числе и в надкритической области.

Задачи, решаемые при изучении магматических пород с помощью главных и редких элементов

- Классификация магматических пород.
- Изучение закономерностей эволюции магматических серий, комплексов (реконструкция обстановок процессов плавления и эволюции магматических систем).
- Определение геодинамических обстановок формирования магматических комплексов.

- **Магма** – смесь расплава, кристаллов и флюидной фазы, способная к перемещению.
- **Магма** (греч. — месиво, густая мазь) представляет собой природный, чаще всего силикатный, огненно-жидкий расплав, возникающий в земной коре или в верхней мантии, на больших глубинах, и при остывании формирующий магматические горные породы.
- При застывании магмы образуются **магматические породы**.
- Излившаяся магма - это **лава**.



Stromboli (Italy)



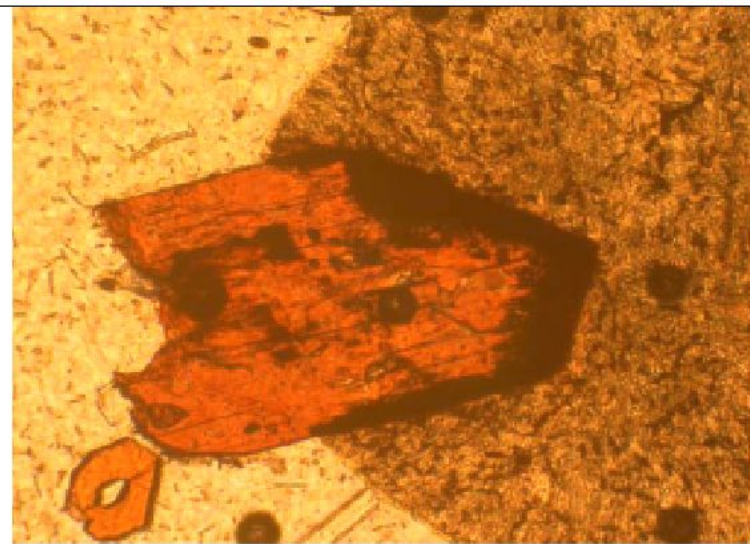
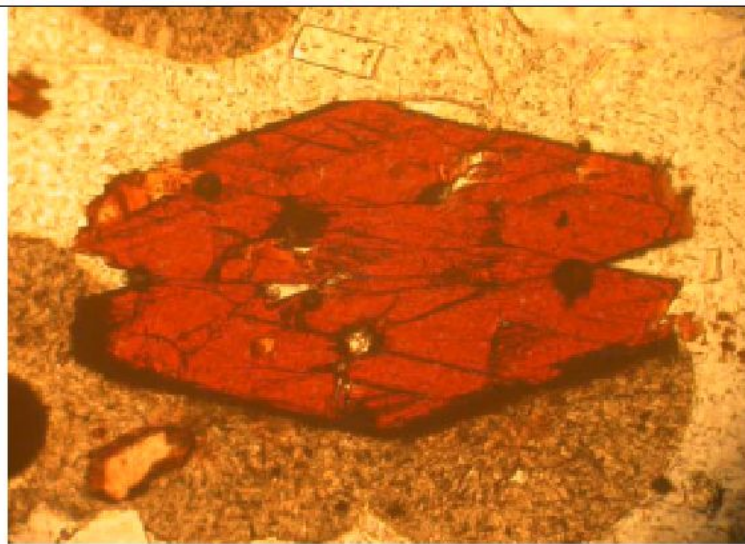
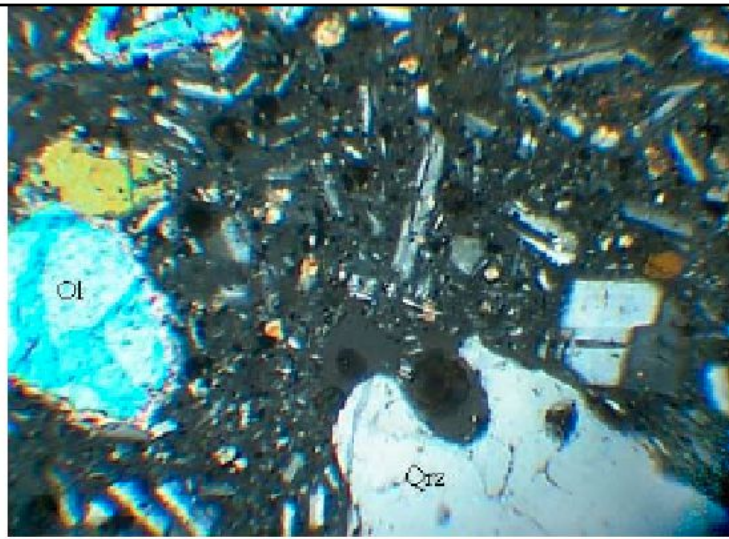
- В магме содержатся практически все элементы, среди которых:
- Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Ti, Na, а также различные летучие компоненты (оксиды углерода, сероводород, H, F, Cl и др.) и парообразная вода.
- Летучие компоненты при кристаллизации магмы на глубине частично входят в состав различных минералов (амфиболов, слюд и прочих).
- В редких случаях отмечаются магматические расплавы несиликатного состава, например щёлочно-карбонатного (вулканы Восточной Африки) или сульфидного. По мере продвижения магмы вверх, количество

- **Состав магмы.** Магма представляет собой гетерогенный расплав, состоящий из тугоплавких и летучих компонентов. Еще М. Фарадей в 1834г. установил электропроводность силикатных расплавов (доказательство их ионизации).
- Главными катионами магмы являются Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , а анионами – комплексные силикатные и алюмосиликатные анионы типа SiO_4^- , AlO_4^{5-} , $\text{AlSi}_2\text{O}_6^-$ и т. д.
- Многие факты указывают на существование в магме так называемых сиботаксических групп, т.е. участков с упорядоченным строением

- Большое влияние на полимеризацию оказывает вода: с увеличением ее количества вязкость расплава уменьшается. Газы также увеличивают подвижность магмы и понижают температуру ее плавления.
- Главным летучим компонентом большинства магм являются водяные пары; их содержание колеблется от 0.5 до 8 %. По А.А. Кадику, при давлении 1 кбар кислые расплавы могут растворить 3.3 % H_2O , основные – 3 %, ультраосновные – 2%. При 5 кбар кислые магмы способны растворить уже 13 % H_2O , основные – 8 % и ультраосновные – 4-5 %.

- При 10 кбар гранитная магма способна растворить 22 % H_2O , а базальтовая – 14%.
- Часть воды, растворенной в магме, диссоциирована, часть связана в соединениях типа $\text{Si}(\text{OH})_{4-6}$, ROH и т. д., а часть находится в молекулярной форме.
- Углекислого газа в магме приблизительно в 20 раз меньше, чем воды. При давлении, к примеру, 3-5 кбар растворимость CO_2 в кислых и основных магмах достигает 0.1–0.6 %.

- Магмы по химическому составу делятся на силикатные, карбонатные, фосфатные, сульфидные и т.д. Наиболее распространены в земных условиях силикатные магмы.
- **Базальтовая** магма имеет большее распространение. В ней содержится около 50 % кремнезема, в значительном количестве присутствуют Al, Fe, Ca, Mg, в меньшем Na, K, Ti, P. По химическому составу базальтовые магмы подразделяются на **толеитовую** (перенасыщена кремнеземом) и **щелочно-базальтовую** (оливин-базальтовую) магму, (недосыщенную кремнеземом, но обогащенную щелочами).
- **Гранитная** (риолитовая, кислая) магма содержит 60-65 % кремнезема, она имеет меньшую плотность, более вязкая, менее подвижная, в большей степени, чем

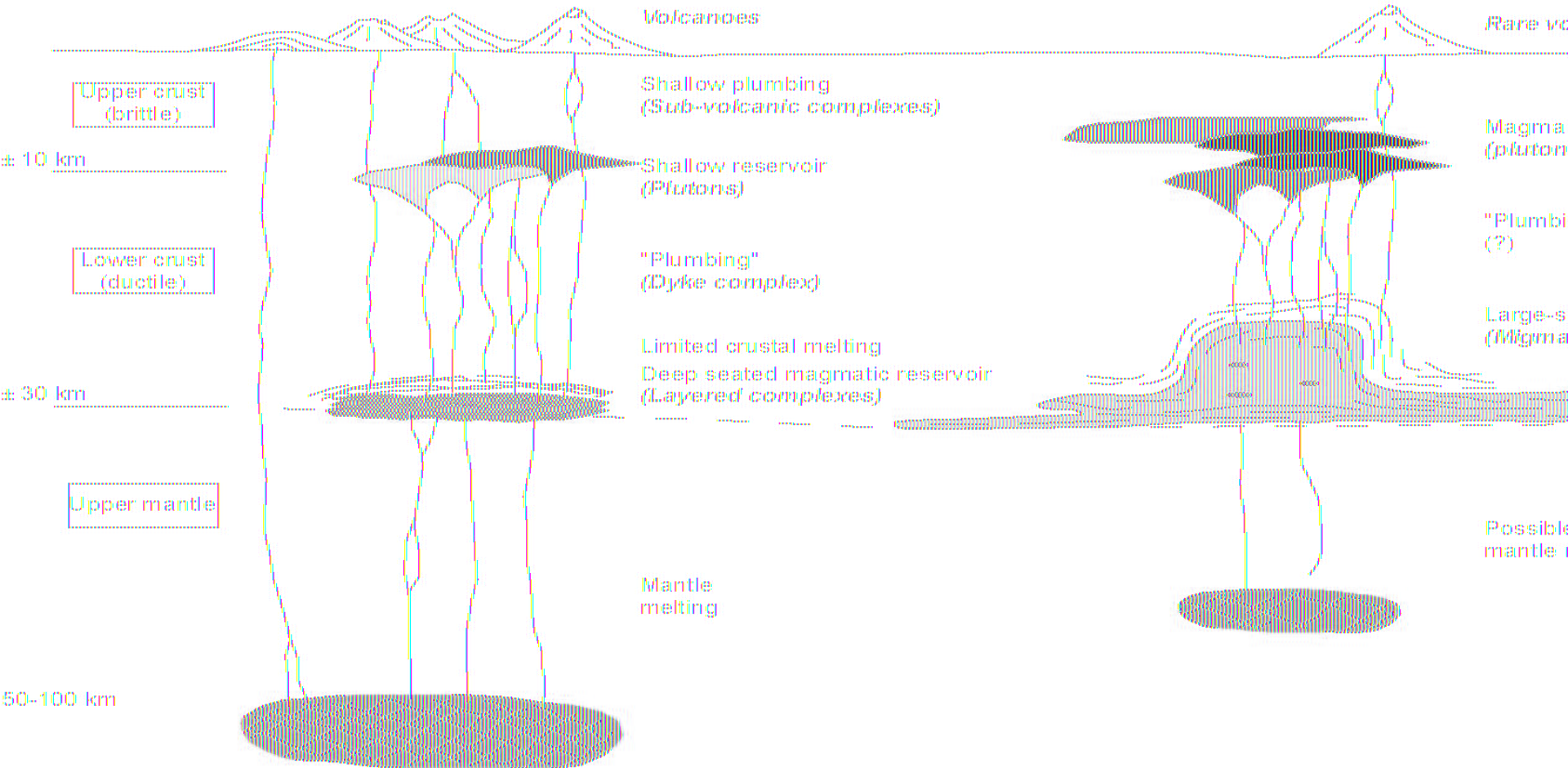


- Признаки смешения основной и кислой магмы в продуктах извержения вулкана Кизимен, Камчатка. А) Вкрапленники кварца и оливина. Б) Сложнозональные вкрапленники плагиоклаза; В, Г) Вкрапленники роговой обманки на границе контрастных по составу расплавов.
- Плечов, 2008.

- Многие явления магматизма и, в частности, кристаллизации изверженных пород связаны с понижением T . По различным данным, температура кристаллизации основных пород $1100-1300^{\circ}\text{C}$, гранитов – $800-900^{\circ}\text{C}$.
- Богатая водяными парами гранитная магма застывает при 700°C , некоторые щелочные породы – при еще более низких температурах.
- С другой стороны, в магме могут наблюдаться и более высокие T : для ультрабазитовых магм приводилась $T = 1800^{\circ}\text{C}$. Другой важнейший термодинамический параметр – P колеблется от 1 бар на земной

Mantle-derived magmas

Crustal magmas



(JFM 06, modified from an original drawing by B. Barbarin)

- С учетом минерального состава выделены серии магматических горных пород:
- **в зависимости от соотношения (K_2O+Na_2O) и SiO_2 –**
 - щелочная,
 - субщелочная,
 - нормальная;
- **от соотношения (FeO/MgO) и SiO_2 –**
 - толеитовая,
 - известково-щелочная;
- **от соотношения (K_2O/Na_2O) и SiO_2 –**
 - натриевая, калиево-натриевая и калиевая.

- **Систематика А. Н. Заварицкого**

предусматривает разделение составов горных пород на три химических класса (ряда):

- **1 - нормальный** (содержание Al_2O_3 больше общего содержания оксидов Na и K, но меньше общего содержания оксидов Ca, Na и K);
- **2 - плюмазитовый** (пересыщ. глиноземом, т. е. содержание Al_2O_3 преобладает над общим содержанием оксидов Ca, Na и K);
- **3 - агпаитовый** (содержание оксидов Na и K преобладает над содержанием Al_2O_3).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ КОДЕКС

**МАГМАТИЧЕСКИЕ,
МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ, МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ,
ИМПАКТНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ**

Издание второе

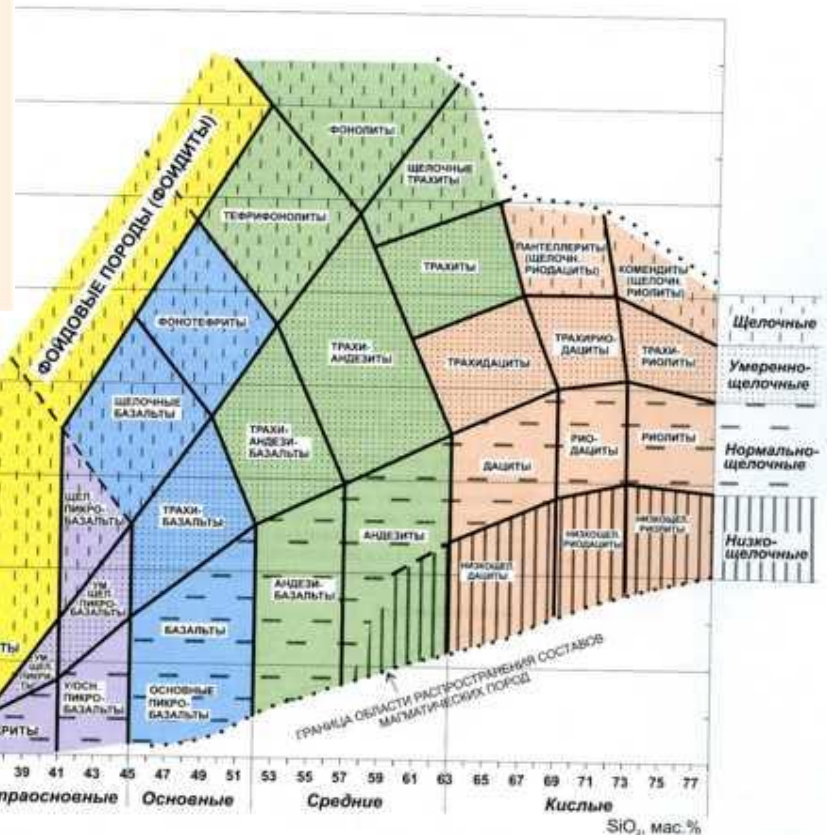
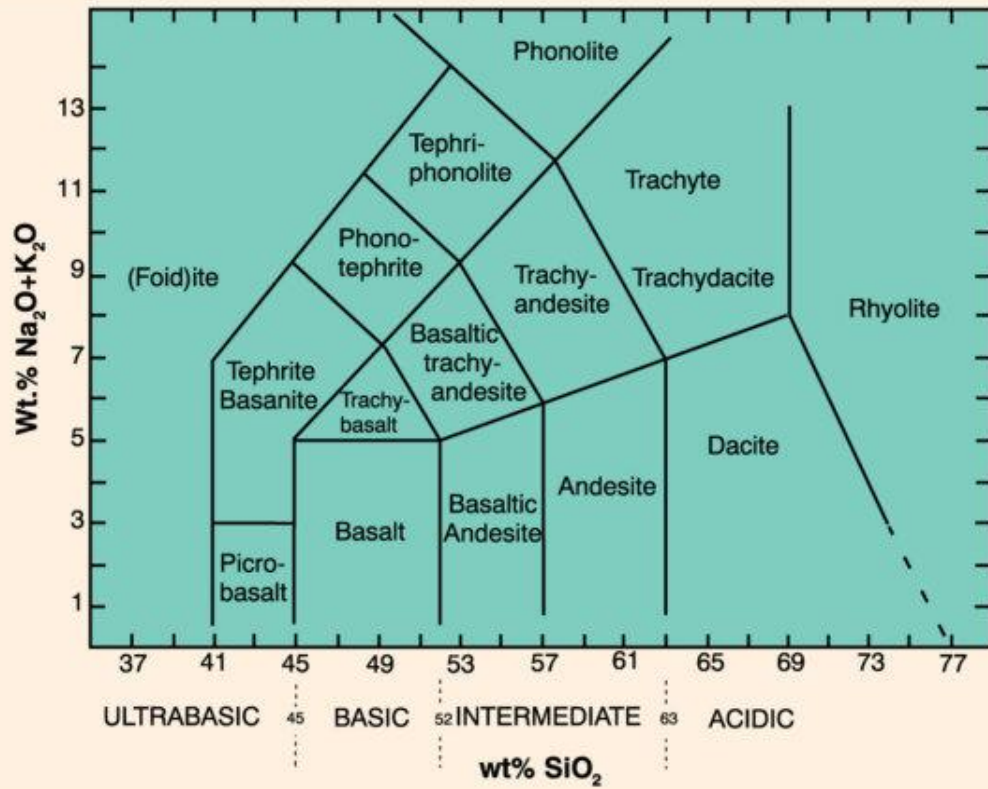


Рис. III.2. Диаграмма сумма щелочей – кремнезем (TAS) для химической классификации магматических (вулканических) горных пород

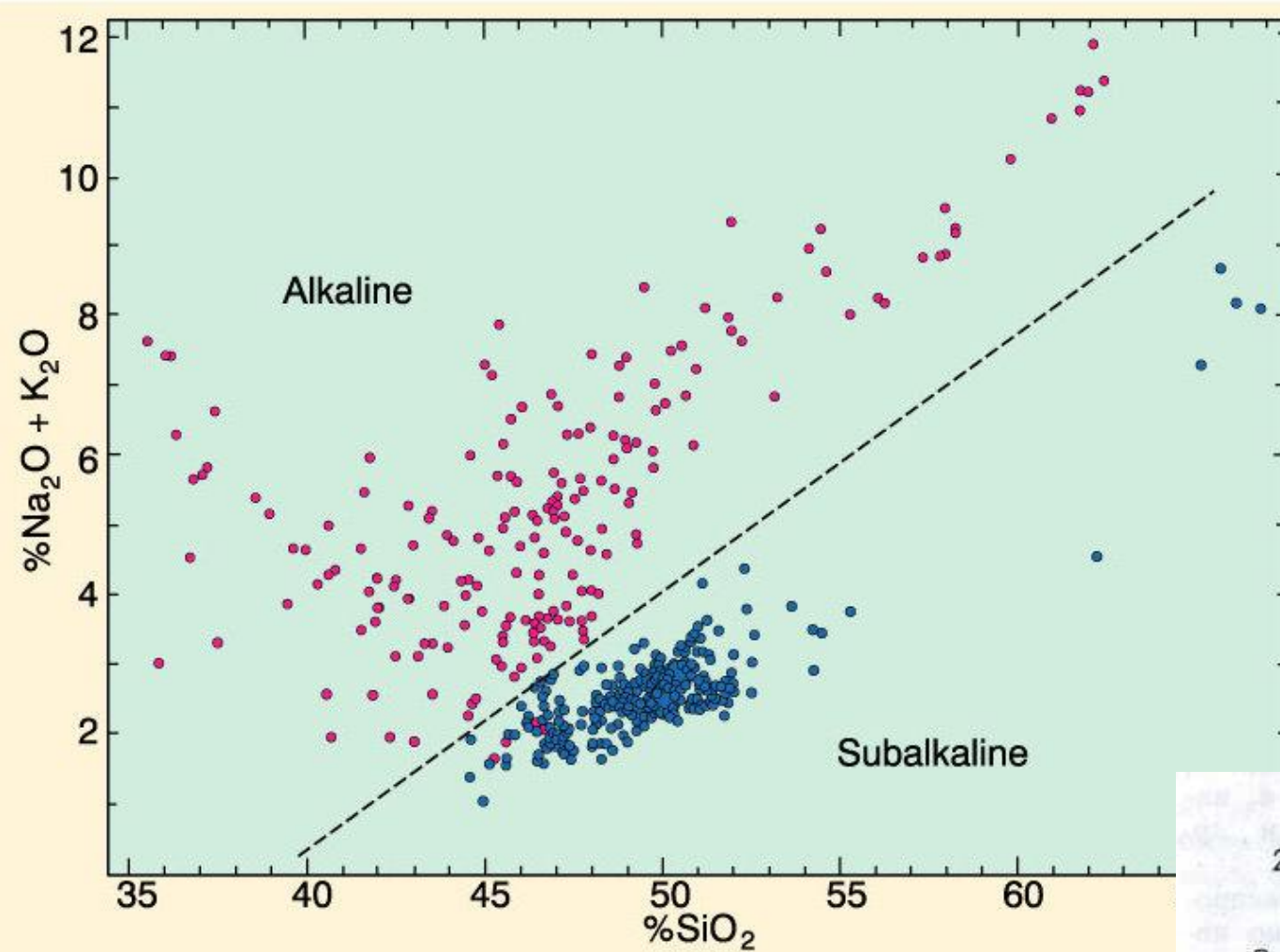
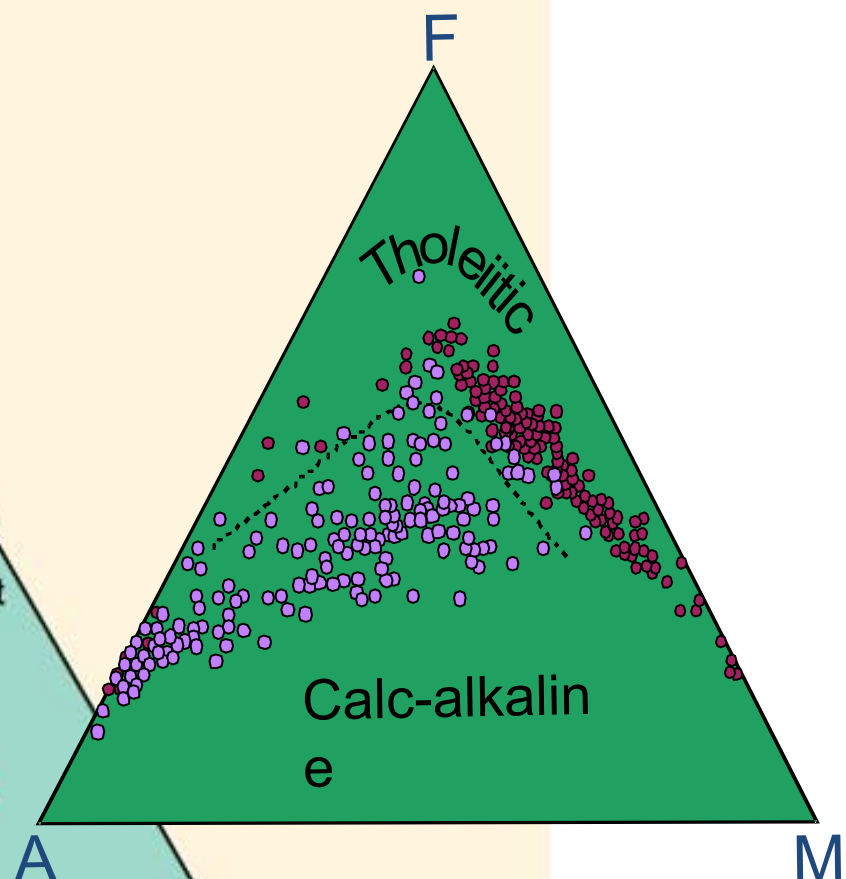
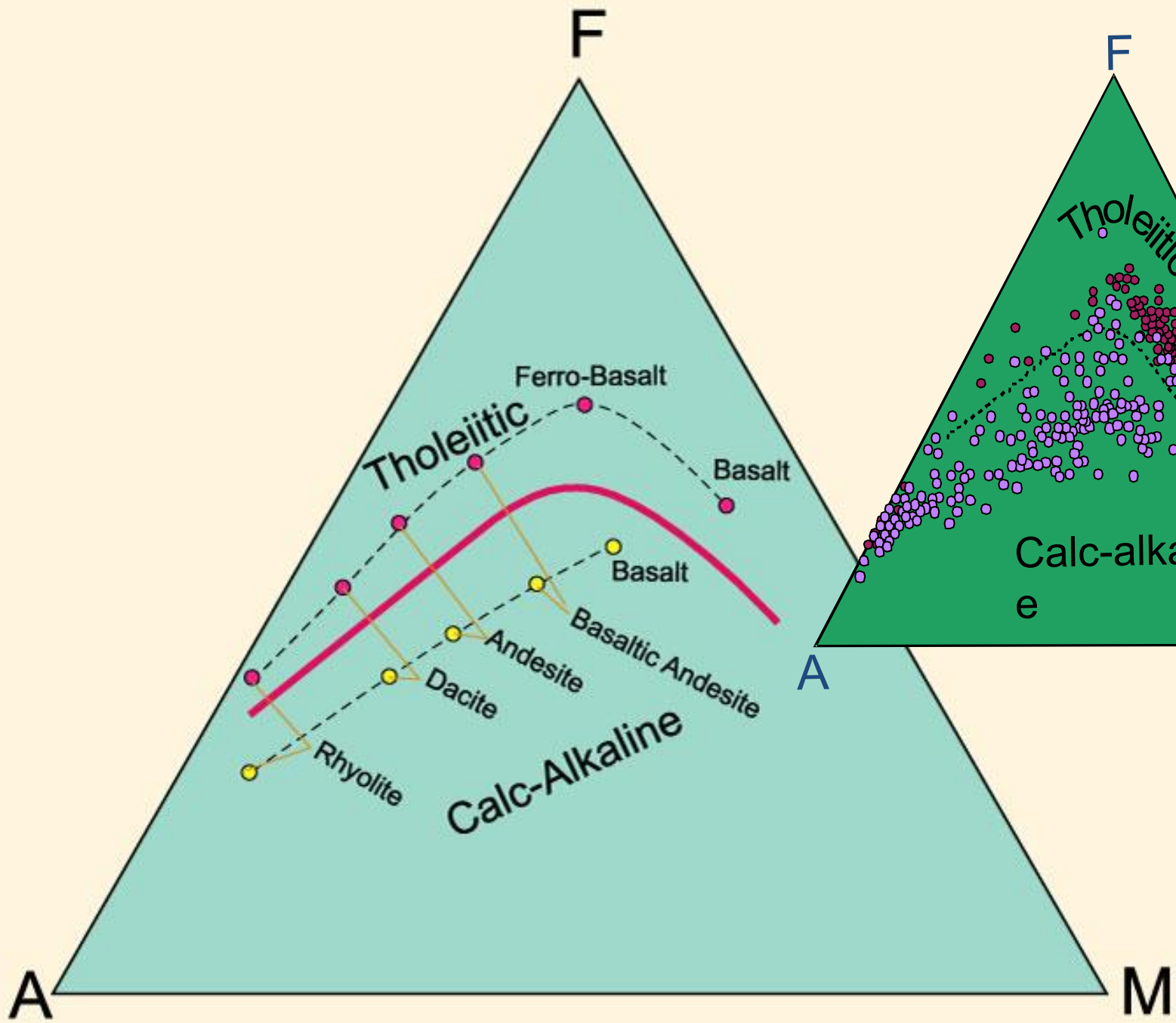


Рис. 289. Химический состав магм: толейтовой, щелочных и глиноземистых базальтов (по Х. КУНО)



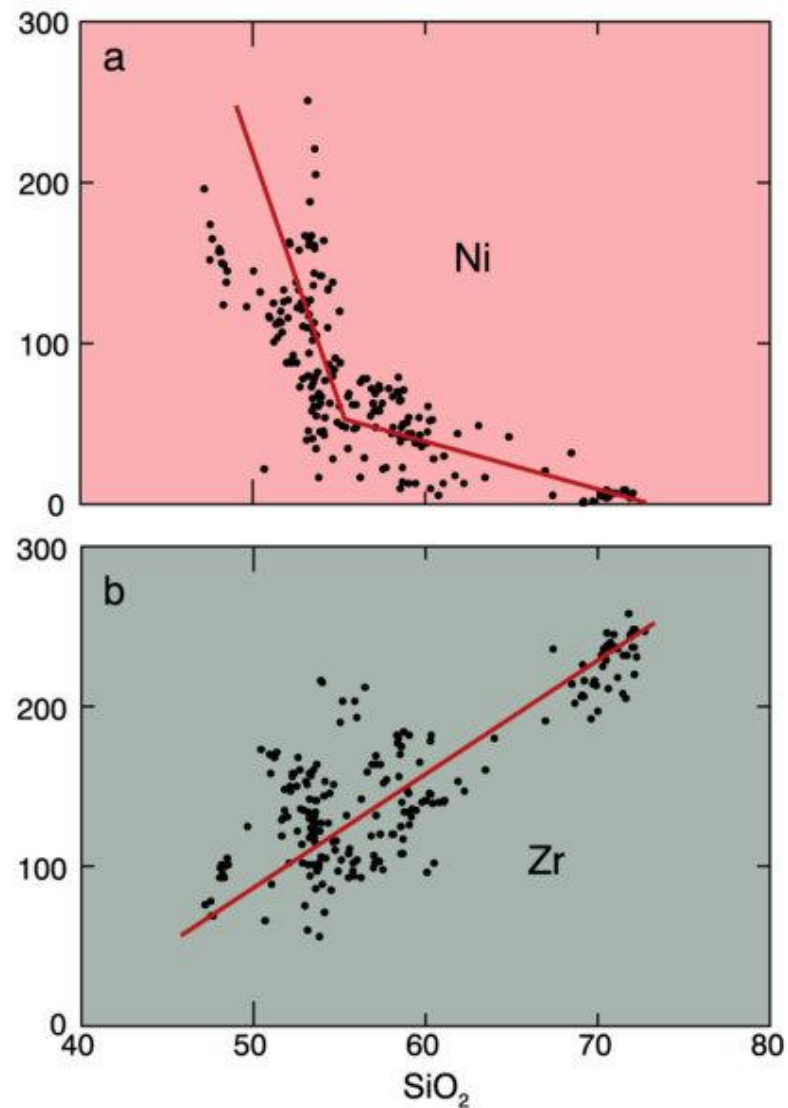
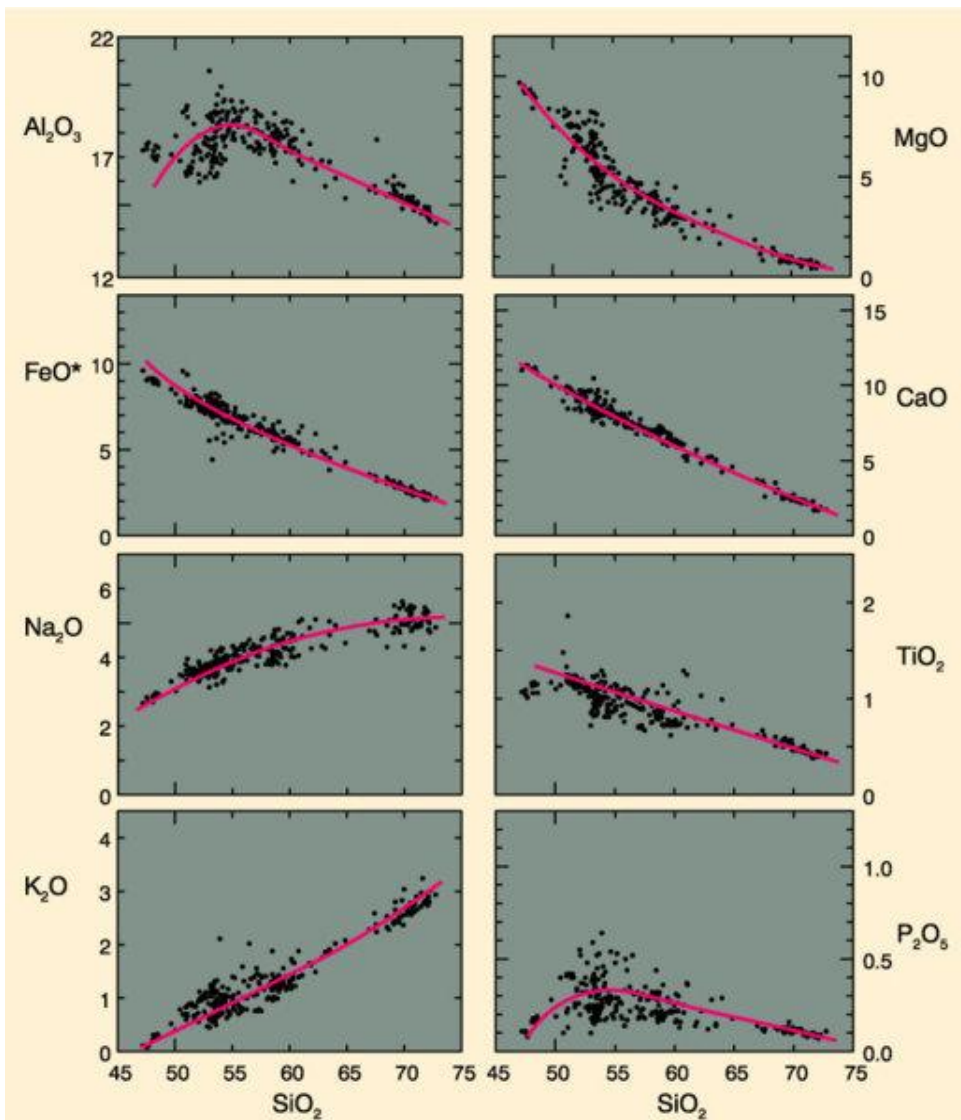


Карбонатитовый вулкан Олдоинье, Танзания





Вариации изменения содержания главных и редких элементов



Фундаментальный закон, который контролирует распределение элемента между сосуществующими фазами, известен как **закон Нернста**.

Распределение редких элементов в минерале и расплаве, из которого минерал кристаллизуется, подчиняется определенной закономерности при достижении равновесия в системе.

Согласно этому закону, при равновесии отношение концентрации редкого элемента в твердом теле (в нашем случае минерале) к его концентрации в растворе/расплаве является постоянной величиной.

Эта постоянная величина (константа) называется коэффициентом распределения и является функцией температуры и давления, но не концентрации редкого элемента (до

Применительно к минералам и равновесным с ними расплавам это означает, что коэффициенты распределения для редких элементов между минералом и расплавом являются постоянными величинами и зависят не от изменения концентрации редких элементов, а от температуры и, в меньшей степени, давления. Коэффициенты распределения индивидуальны для различных типов расплавов (по содержанию кремнезема) и минералов с различной структурой.

Коэффициенты распределения минерал-расплав для базальтовых и андезито-базальтовых расплавов [220]

Элемент	Клинопироксен							Флогопит	Плагиоклаз			Гранат		Магнетит
	Оливин	Ортопироксен	Клинопироксен	Роговая обманка	Флогопит	Плагиоклаз	Гранат		Гранат	Магнетит				
Rb	0,0098	0,022	0,031	0,29	3,060	0,071	0,042							
Sr	0,0140	0,040	0,060	0,46	0,081	1,830	0,012							
Ba	0,0099	0,013	0,026	0,42	1,090	0,230	0,023							
K	0,0068	0,014	0,038	0,96		0,170	0,015							
Y	0,010	0,18	0,900	1,00	[139]	0,03	0,030	[139]	9,00	[161]	[161]	0,2		
Ti	0,020	0,10	0,400	1,50	(андезитобазальты)	0,90	0,040	(андезитобазальты)	0,30	(базальты)	(гавайты)	7,5		
Zr	0,012	0,18	0,100	0,50	1,5640	0,60	0,048	0,0121	0,65			0,1		
Hf	0,013		0,263	0,50	1,5335		0,051	0,0115	0,45	0,14	0,25	2,0-4,0		
Nb	0,010	0,15	0,005	0,80		1,00	0,010		0,02			0,4		
Ta			0,013						0,06			1,0-10		
Th			0,030	0,50			0,010							
U	0,002		0,040	0,10			0,010							
La	[88]	[139]	[88]	[88]	[139]	[88]	[139]	[88]	[88]	[139]	[88]	[161]	[161]	[223]
Ce	0,0069	0,0067	0,02	0,15	0,056	0,20	0,5442	0,034	0,120	0,1477	0,03	0,001	0,026	1,5-3,0
Pr	0,0066	0,0060	0,02	0,15	0,092	0,20	0,8430	0,034	0,120	0,0815	0,03	0,007	0,051	1,3-3,0
Nd	0,0066	0,0059	0,03	0,31	0,230	0,33	1,3395	0,032	0,081	0,0551	0,07	0,026		1,0-3,0
Sm	0,0066	0,0070	0,05	0,50	0,445	0,52	1,8035	0,031	0,067	0,0394	0,29	0,102	0,600	1,1-2,2
Eu	0,0068	0,0074	0,05	0,51	0,474	0,40	1,5565	0,030	0,340	1,1255	0,49	0,243	1,000	0,6-1,5
Gd	0,0077	0,0100	0,09	0,61	0,556	0,63	2,0165	0,030	0,063	0,031	0,97	0,680	2,100	
Tb					0,570							0,705		1,0-2,0
Dy	0,0096	0,0130	0,15	0,68	0,582	0,64	2,0235	0,030	0,055	0,0228	3,17	1,940	4,100	
Ho												1,675	13,200	
Er	0,0110	0,0256	0,23	0,65	0,583	0,55	1,7400	0,034	0,063	0,0202	6,56	4,700		
Tm														1,0-2,0
Yb	0,0140	0,0481	0,34	0,62	0,542	0,49	1,6420	0,042	0,067	0,0232	11,5	6,167	35,600	0,9-1,8
Lu	0,0160	0,0454	0,42	0,56	0,506	0,43	1,5625	0,046	0,060	0,0187	11,9	6,950	41,000	
Ni	5,9-29		5	1,5-14		6,8								29,0
Co	6,60		2-4	0,5-2,0		2,0					0,7-1,8	0,955	0,66	7,40
V	0,06		0,6	1,35		3,4								26,00
Cr	0,70		10	34		12,5					0,6-2,9	1,345	0,06	153,00
Sc	0,17		1,2	1,7-3,2		2,2-4,2						8,500	2,60	
Mn	1,45		1,4	0,3-1,2										

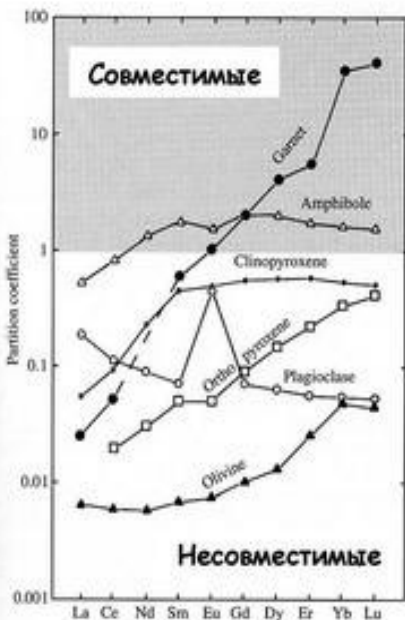
Коэффициенты распределения минерал-расплав для базальтовых и андезитобазальтовых расплавов

- **incompatible** **несовместимые**
элементы концентрируются в
расплаве

$$K_D \text{ or } D \ll 1$$

- **compatible** **совместимые** **элементы**
концентрируются в минерале

$$K_D \text{ or } D \gg 1$$



КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Р.З.Э. МЕЖДУ МИНЕРАЛАМИ И БАЗАЛЬТОВЫМ РАСПЛАВОМ

В случае оливина, плагиоклаза и пироксенов Р.З.Э. проявляют свойства несовместимых элементов, однако для амфиболов и граната коэффициенты распределения тяжелых редких земель оказываются выше единицы.

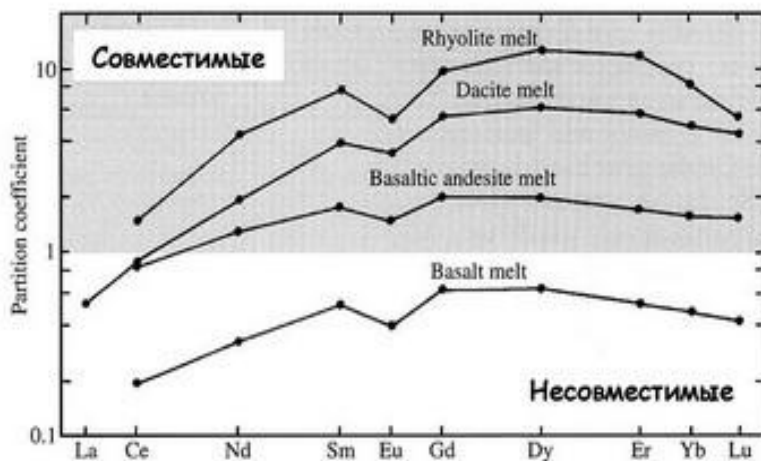
КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛ - РАСПЛАВ В БАЗАЛЬТОВОЙ СИСТЕМЕ

	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	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4
La	0.007	0.03	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	8.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Data from Rollinson (1993)

*Eu²⁺/Eu³⁺ ratios are estimated

КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Р.З.Э. МЕЖДУ АМФИБОЛОМ И РАСПЛАВАМИ РАЗНОГО СОСТАВА



ПРАВИЛА ГОЛЬДШМИДА

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).

Совместимость зависит от минерала и типа расплава

Table 9-1. Partition Coefficients (C_S/C_L) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	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

Пример совместимых элементов:

- Ni сильно фракционирует → olivine > pyroxene
- Cr и Sc → pyroxenes » olivine
- Ni/Cr or Ni/Sc могут оценить эффект оливина и авгита в случае частичного плавления или образования серии пород в результате фракционной кристаллизации

Table 9-1. Partition Coefficients (C_S/C_L) for Some Commonly Used Trace Elements in Basaltic and Andesitic Rocks

	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	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4

Графическое представление г/х данных

- Нормированные мультиэлементные диаграммы - спайдер-граммы (spider-паук)
- Варьирует как набор элементов, так и их последовательность
- Нормирование на состав примитивной мантии, хондрит CI, MORB – примитивные базальты срединно-океанических хребтов
- Используются несовместимые элементы (обычно 13), чьи концентрации высоки в породах основного состава. Рост степени несовместимости справа налево (в соответствии с мантийной минералогией).

MORB-normalized Spider

Separates LIL and HFS

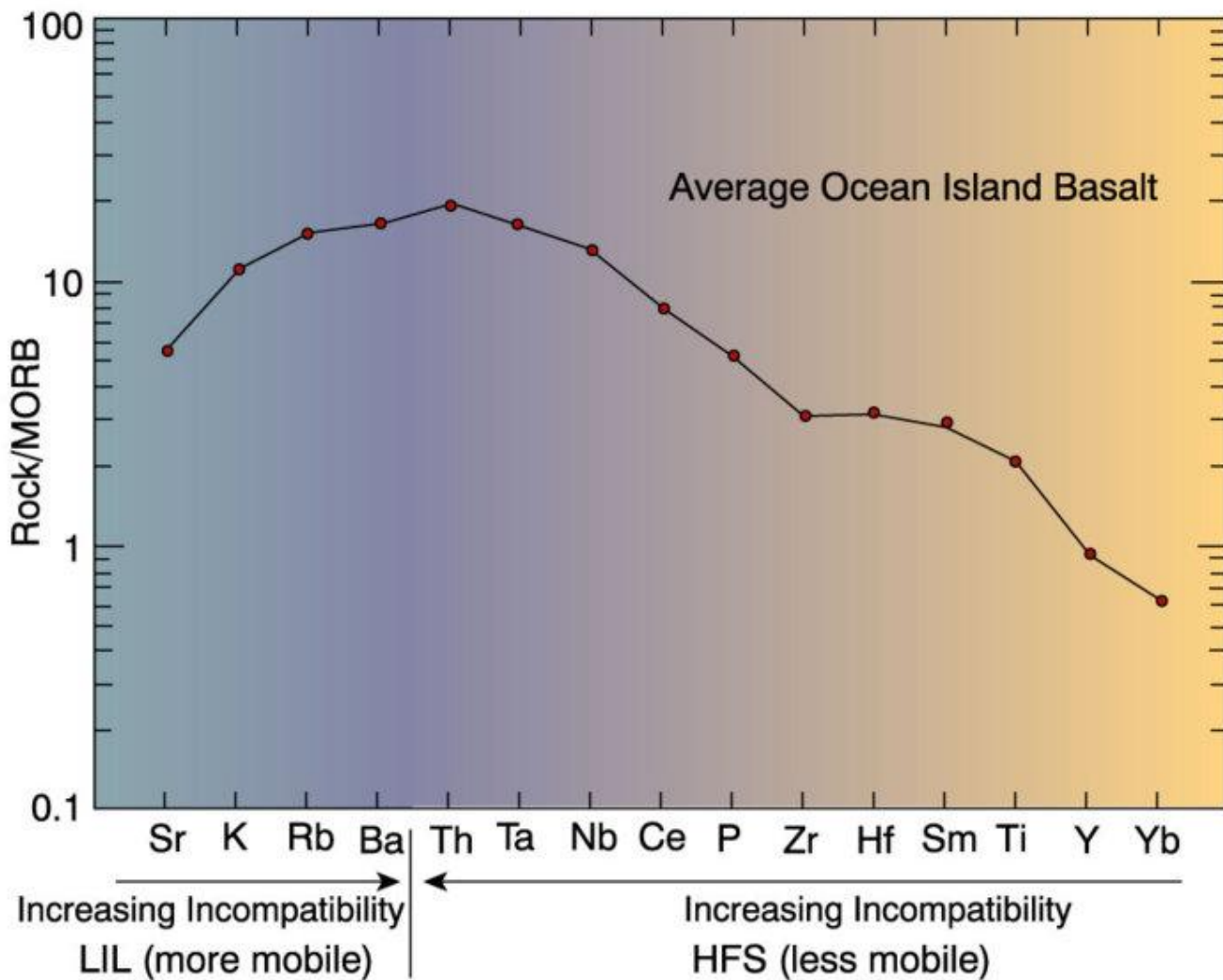


Figure 9-7. Ocean island basalt plotted on a mid-ocean ridge basalt (MORB) normalized spider diagram of the type used by Pearce (1983). Data from Sun and McDonough (1989). From Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Таблица 1.2

**Значения для нормализации по стандартам для построения
спайдер-диаграмм [220]***

Примитивная мантия				Хондриты				MORB	
	[251]	[188]	[237]				[233]		[95]
Cs	0,019	0,023	0,018				Cs	0,188	
Rb	0,860	0,635	0,550	Ba	6,900	Rb	1,880	Pb	2,470
Ba	7,560	6,990	5,100	Rb	0,350	K	850	Rb	2,320
Th	0,096	0,084	0,064	Th	0,042	Th	0,040	Ba	2,410
U	0,027	0,021	0,018	K	120	Ta	0,022	Th	0,029
K	252,0	240,0	180	Nb	0,350	Nb	0,560	U	0,008
Ta	0,043	0,041	0,040	Ta	0,020	Ba	3,600	Ta	0,014
Nb	0,620	0,713	0,560	La	0,329	La	0,328	Nb	0,246
La	0,710	0,708	0,551	Ce	0,865	Ce	0,865	K	545
Ce	1,900	1,833	1,436	Sr	11,80	Sr	10,50	La	0,237
Sr	23,00	21,10	17,80	Nd	0,630	Hf	0,190	Ce	0,612
Nd	1,290	1,366	1,067	P	46,00	Zr	9,000	Sr	7,260
P	90,40			Sm	0,203	P	500	Nd	0,467
Hf	0,350	0,309	0,270	Zr	6,840	Ti	610	P	1220
Zr	11,00	11,20	8,300	Hf	0,200	Sm	0,203	Sm	0,153
Sm	0,385	0,444	0,347	Ti	620	Y	2,000	Zr	3,870
Ti	1200	1280	960	Tb	0,052	Lu	0,034	Ti	445
Tb	0,099	0,108	0,087	Y	2,000	Sc	5,210	Y	1,570
Y	4,870	4,550	3,400	Tm	0,034	V	49,00		
Pb		0,071		Yb	0,220	Mn	1720		
						Fe	265000		
						Cr	2300		
						Co	470		
						Ni	9500		
								Rb	1,00
								Ba	12,00
								K ₂ O	0,15
								Th	0,20
								Ta	0,17
								Sr	136
								La	3,00
								Ce	10,00
								Nb	2,50
								Nd	8,00
								P ₂ O ₅	0,12
								Hf	2,50
								Zr	88,00
								Eu	1,20
								TiO ₂	1,50
								Tb	0,71
								Y	35,00
								Yb	3,50
								Ni	138
								Cr	290

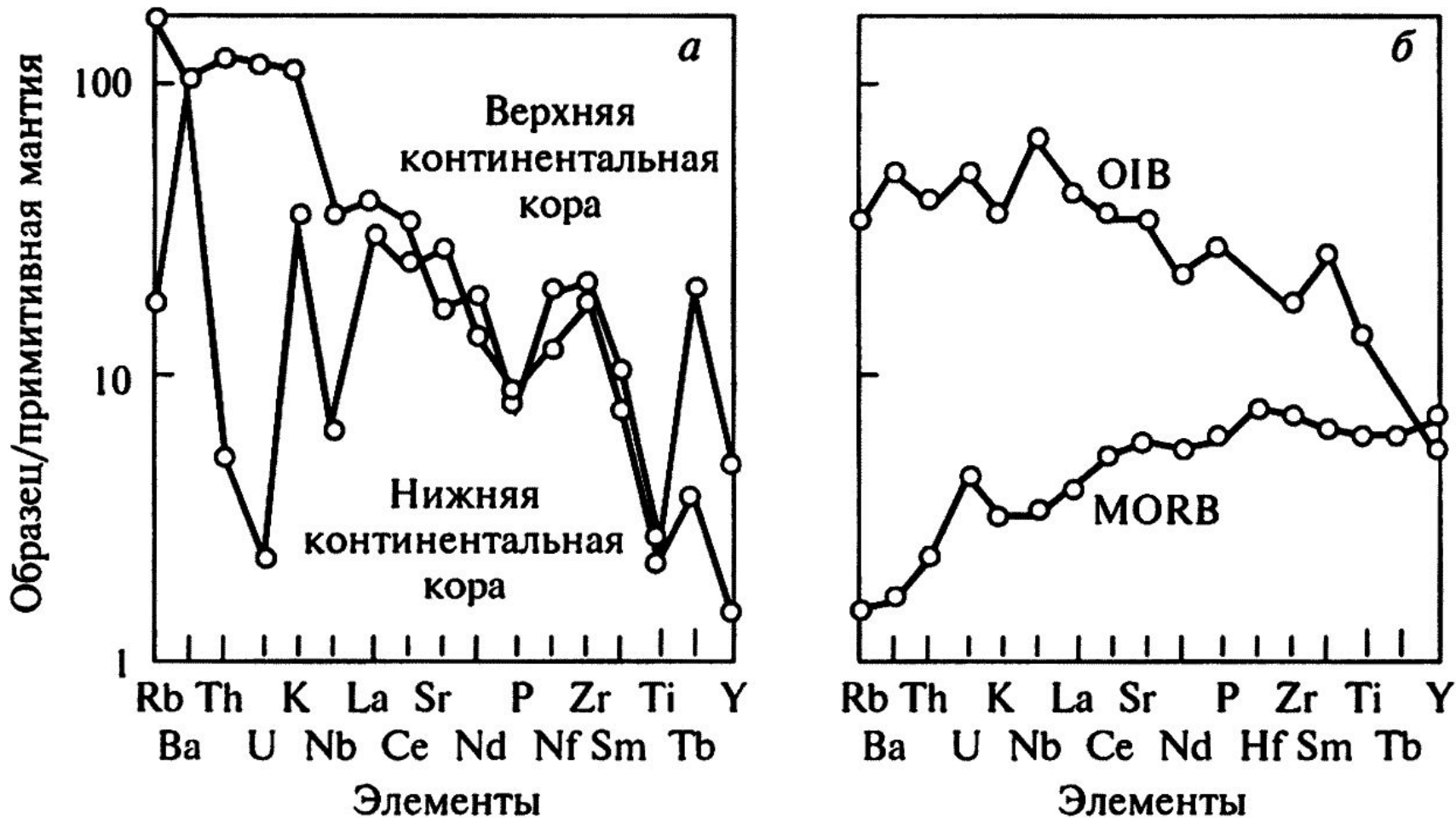


Рис. 1.6. Спайдер-диаграммы, нормированные по составу примитивной мантии (значения для нормализации, McDonough, 1992) для средних составов нижней и верхней континентальной коры (а) и для средних составов базальтов срединно-океанических хребтов и океанических островов (б) [220]

Нормирование на примитивную мантию

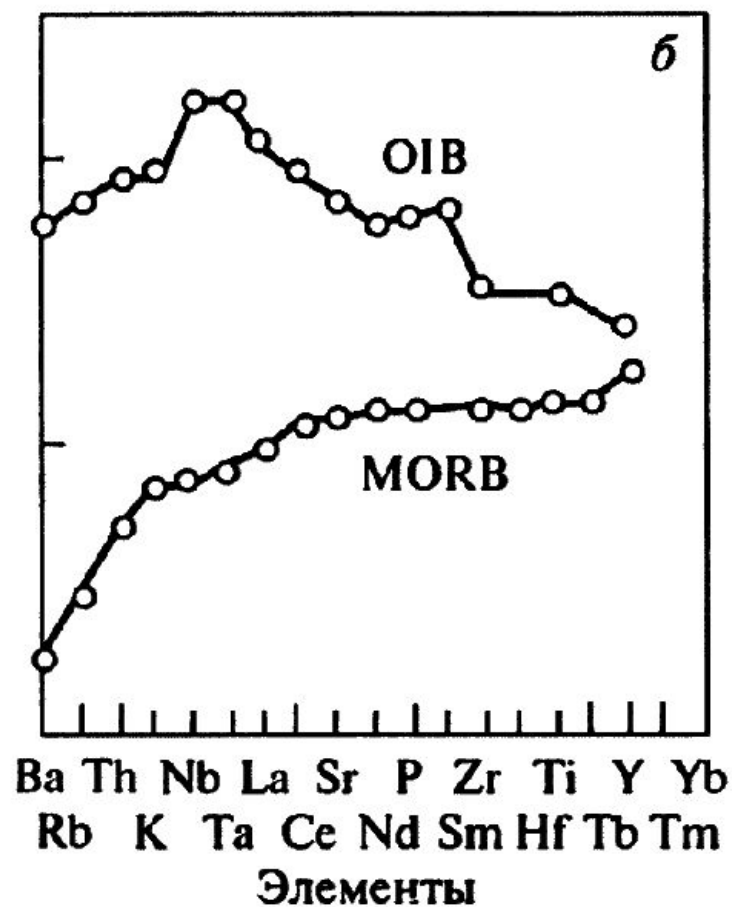
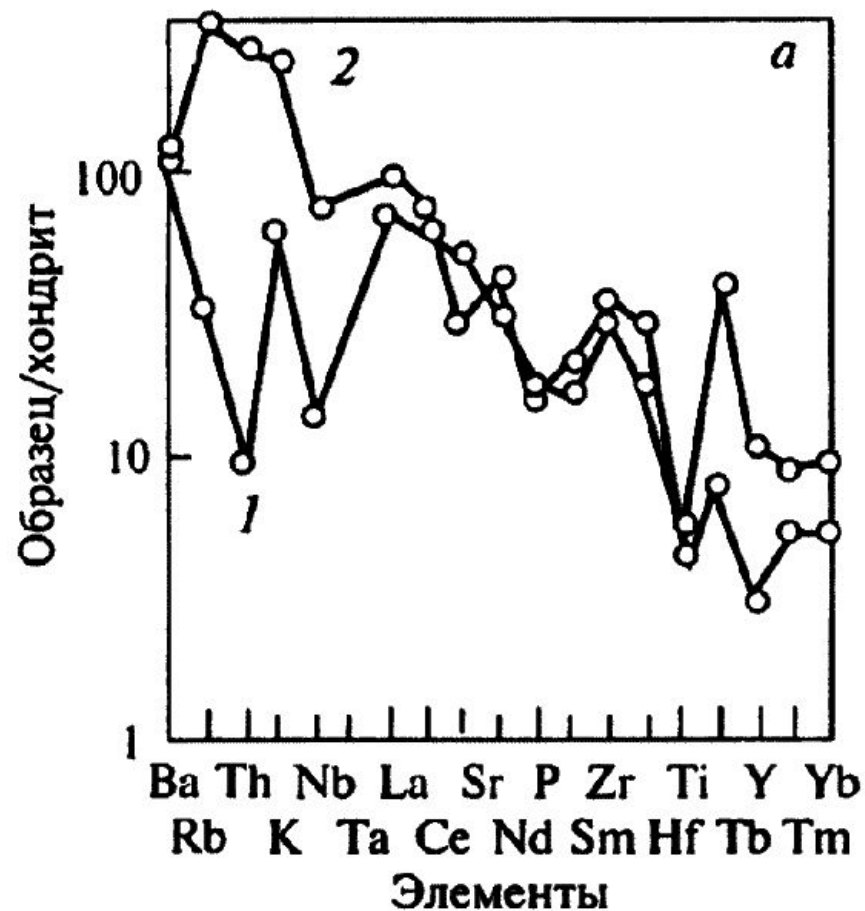


Рис. 1.7. Спайдер-диаграммы, нормированные по хондриту (значения для нормализации по Thompson, 1982) для средних составов нижней 1 и верхней 2 континентальной коры (а) и для средних составов базальтов срединно-океанических хребтов и океанических островов (б) [220]

Нормирование на хондрит С1

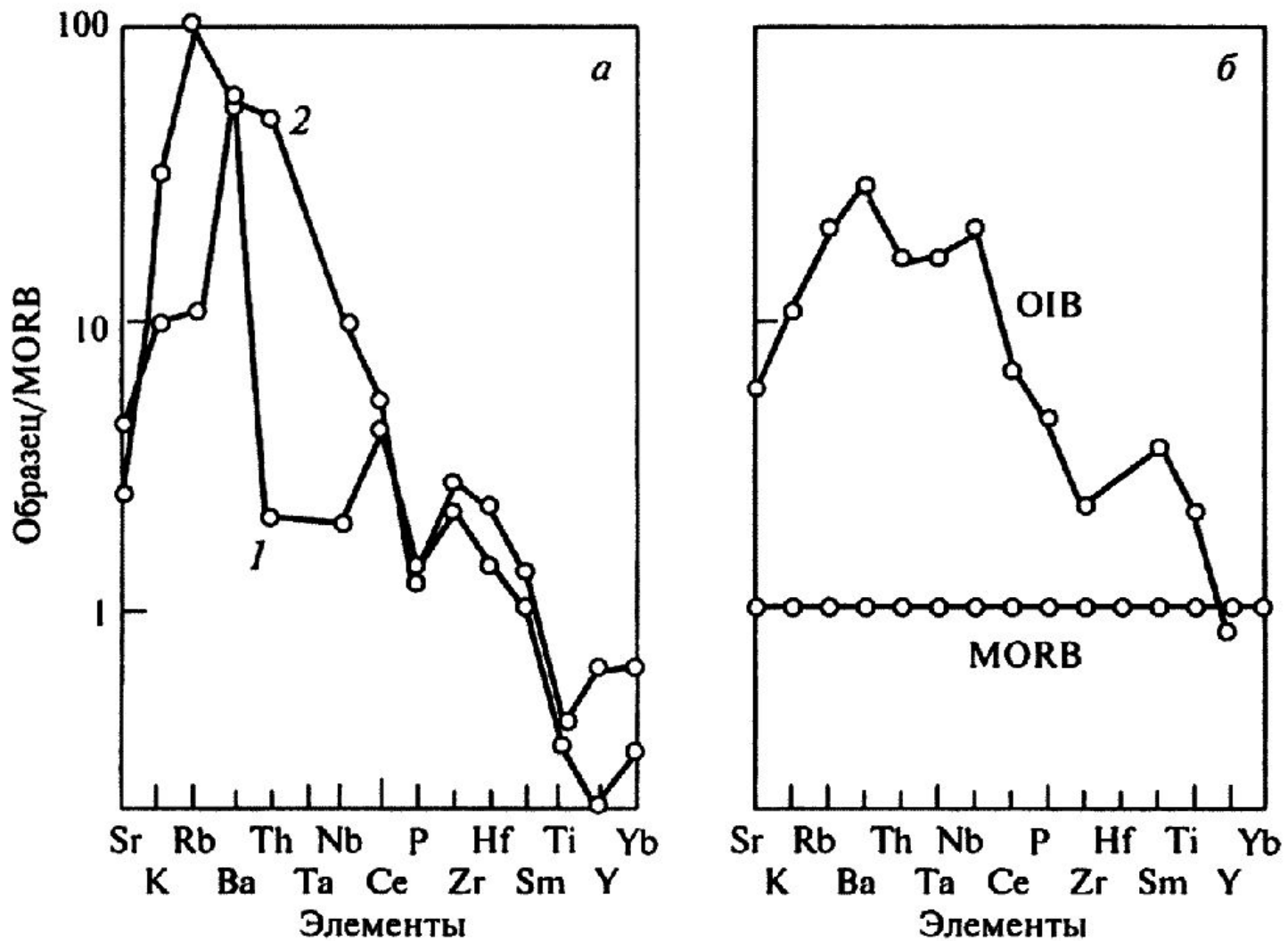


Рис. 1.8. Спайдер-диаграммы, нормированные по MORB (значения для нормализации, Saunders, Tarney, 1984, с дополнениями, Sun, 1980) для средних составов нижней 1 и верхней 2 континентальной коры (а) и для средних составов базальтов срединно-океанических хребтов и океанических островов (б) [220]

Нормирование на MORB

Факторы, определяющие геохимическую специфику магматических пород

- Геохимические особенности магматических пород в значительной степени зависят от химического состава и минералогии родоначальных пород или расплавов.
- Содержание главных и редких элементов определяется типом и степенью плавления, хотя состав магмы может существенно изменяться по мере продвижения к поверхности.

- Наиболее важной характеристикой источника магм является соотношение радиогенных изотопов, так как оно не изменяется в процессе плавления и последующих процессах в магматической камере.
- Важным является изучение мантии: океанические базальты мантийного происхождения являются ключевым объектом.
- P-T-условия и степень плавления определяют состав мантийных выплавов.

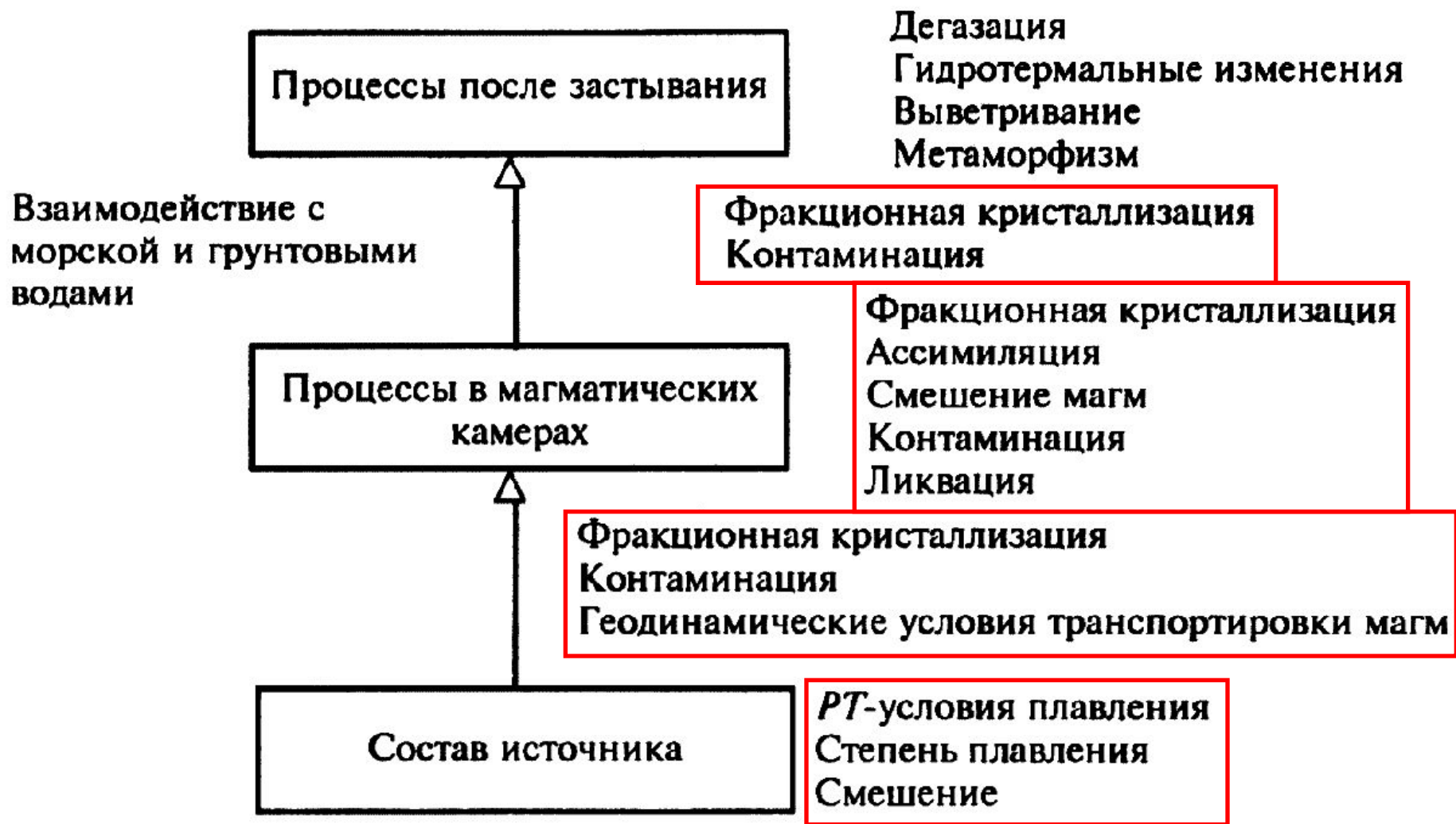


Рис. 1.10. Диаграмма, иллюстрирующая главные процессы, контролирующие химический состав магматических пород

Главная проблема магматической петрологии – процесс формирования земной коры; взаимосвязь с процессами, происходящими в мантии

Вопросы, возникающие при изучении земной коры:

1. **Когда** породы возникли и когда они были добавлены к земной коре?
2. **Как** они произошли: как добавка глубинного вещества из мантии или переработка более древней земной коры?
3. **Что** (какое вещество) было добавлено к земной коре?

Для ответа требуется комплексное исследование:

картирование, изучение петрографии, геохимии

Эволюция магматического очага

- **Плавление** (полное или частичное) – зарождение очага;
- **Кристаллизационная** и **гравитационная дифференциация** при понижении T ;
- **Взаимодействие с вмещающими породами (ассимиляция) и другими магмами (смешение магм, гибридизм).**

Контаминация - изменение первоначального химического или минер. состава в результате взаимодействия с посторонним источником вещества.

- **Ликвация** – распад магмы на несмешивающиеся жидкости.

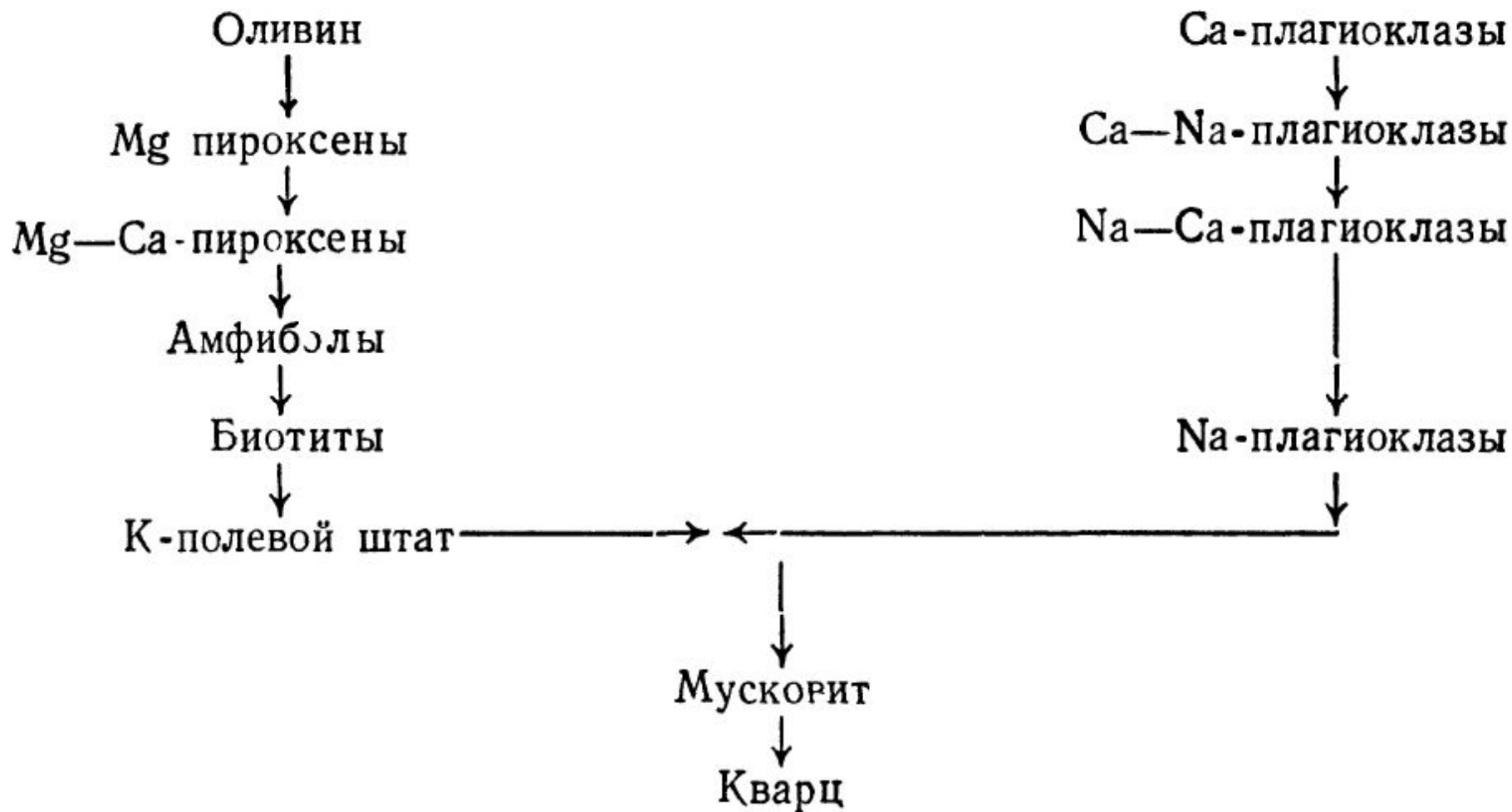
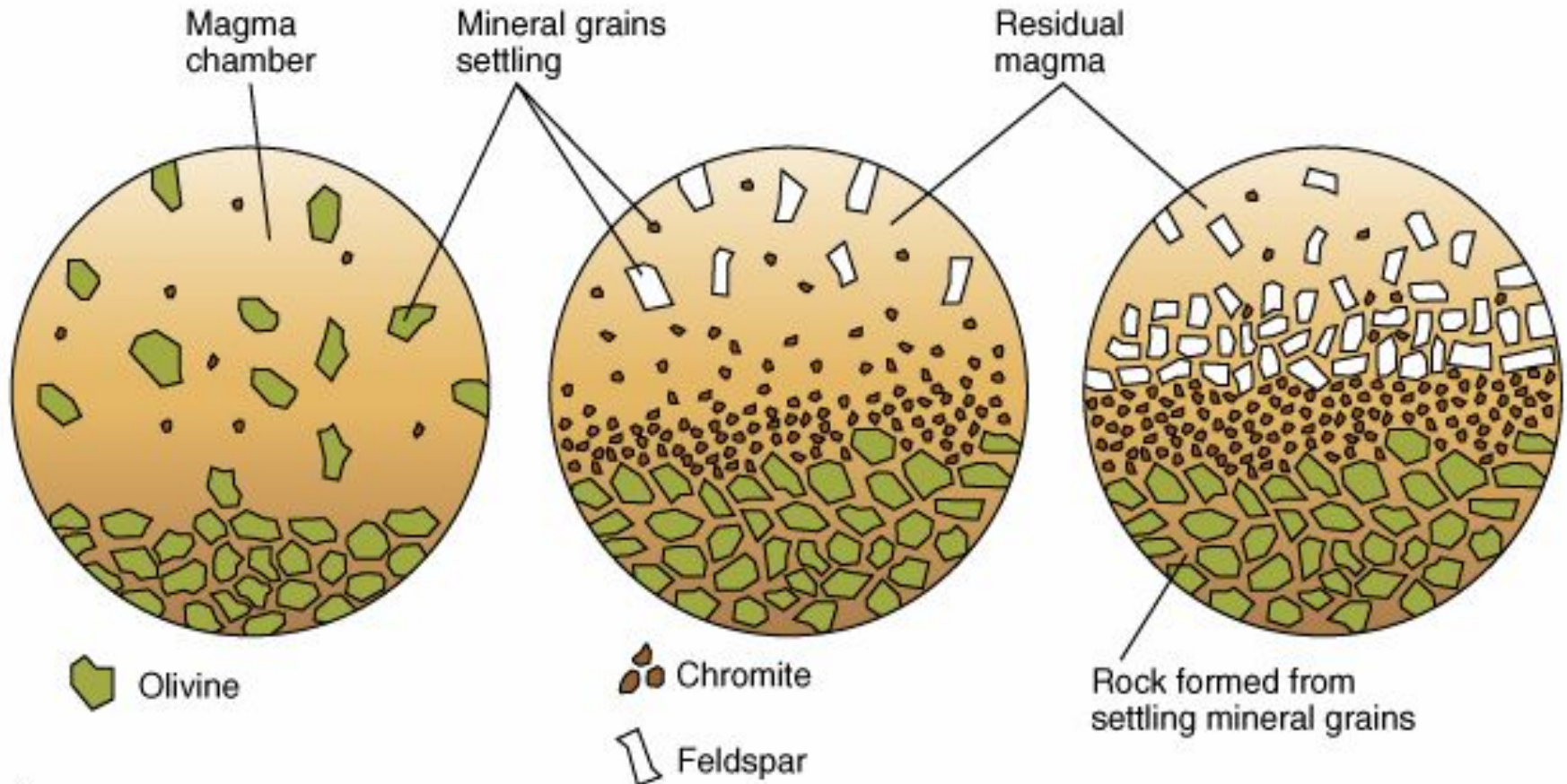


Рис.8. Реакционная схема Н. Боуэна

Fractional crystallisation



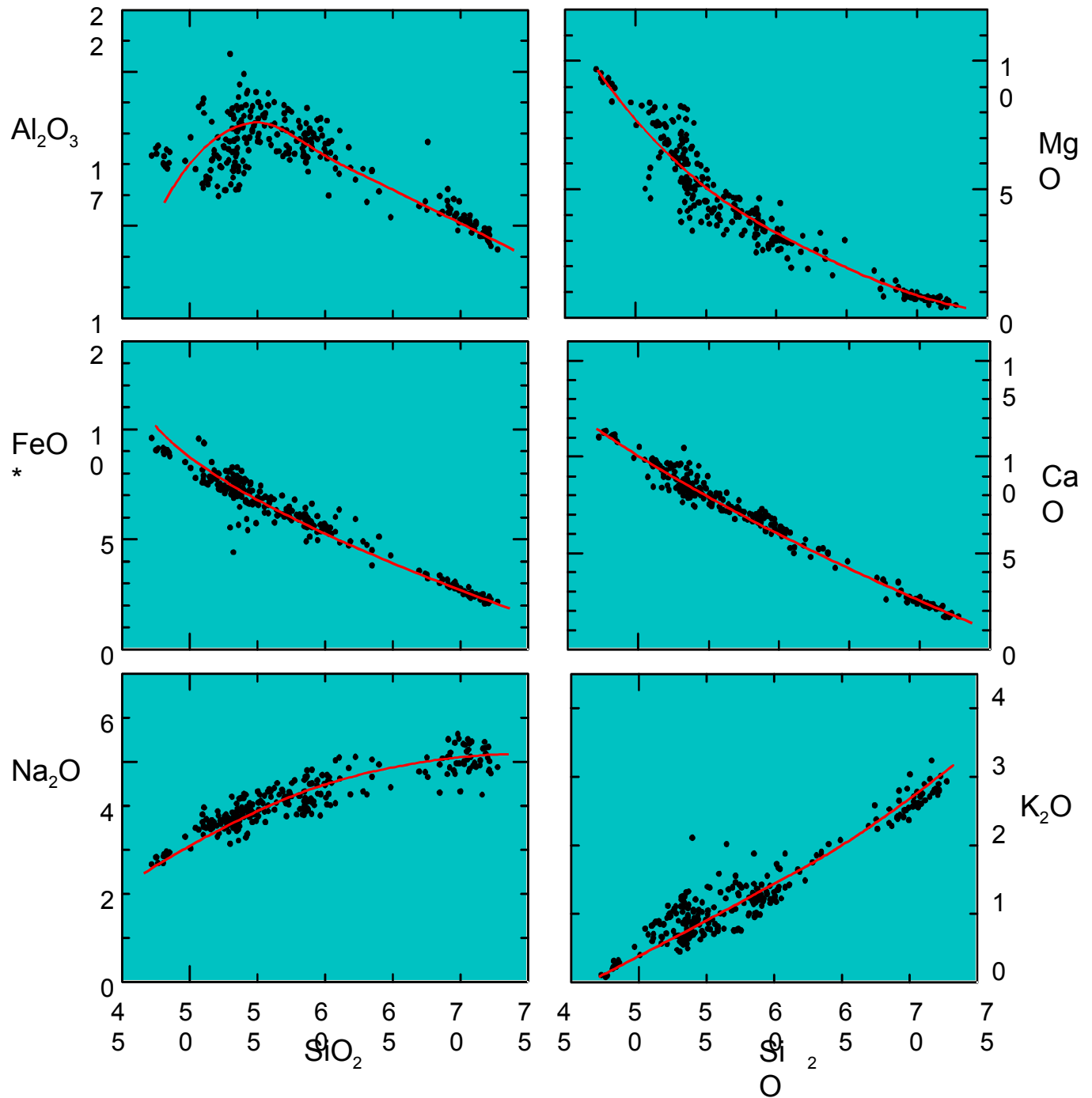
A.



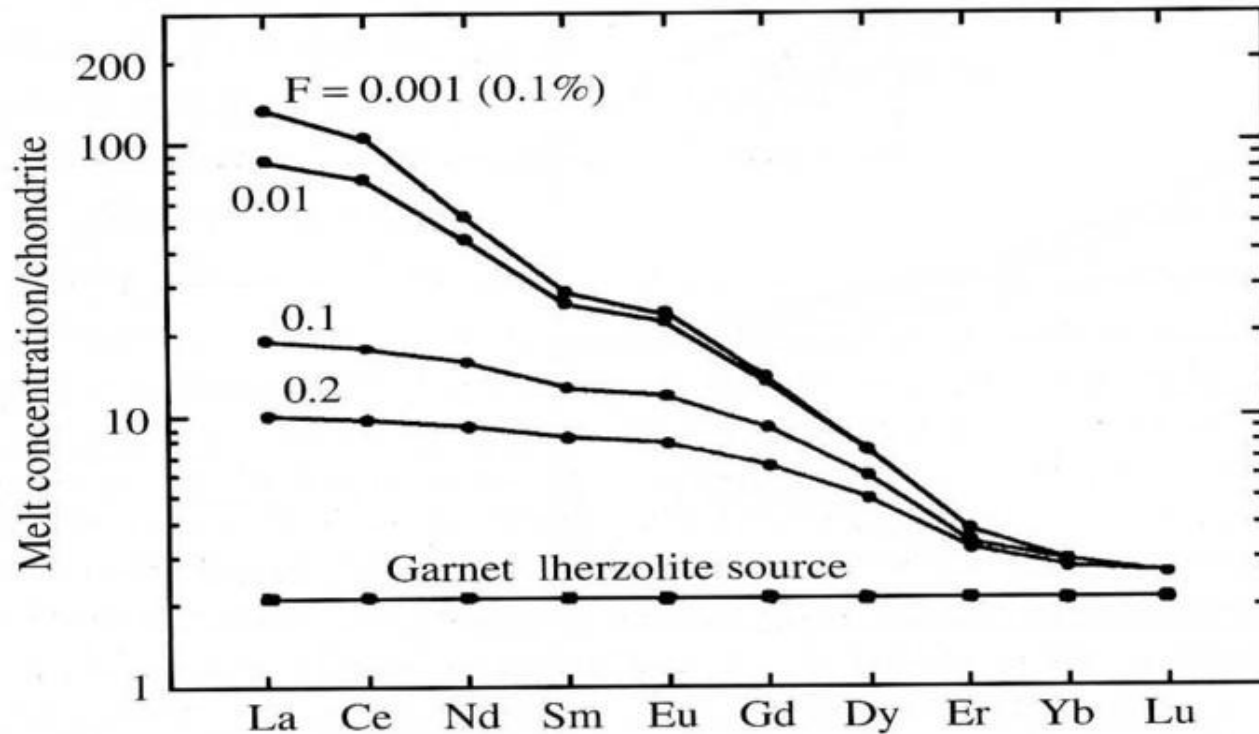
Brian J. Skinner

Liquids composition

Harker diagram for Crater Lake

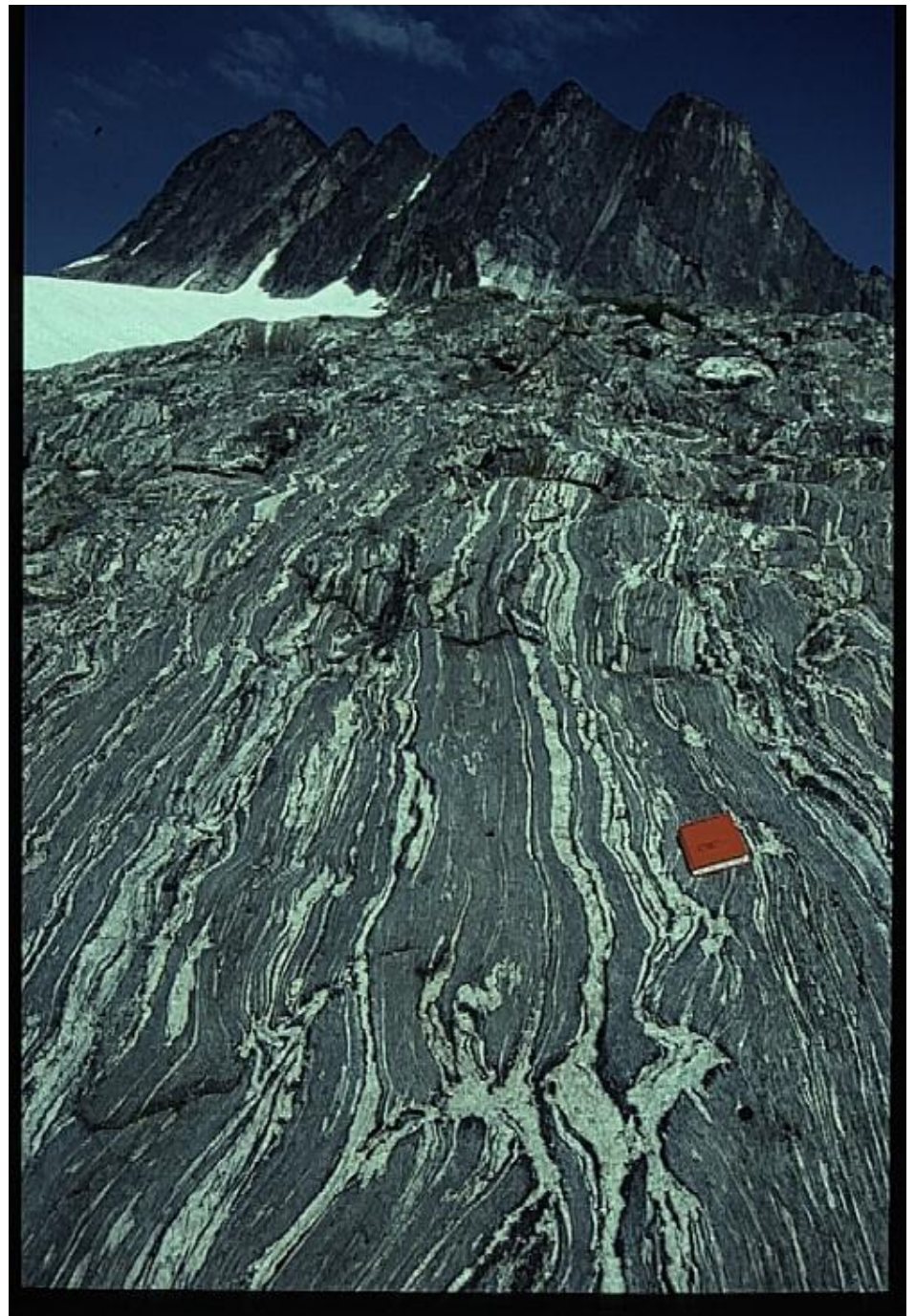


Состав расплава при частичном плавлении Grt-лещолита

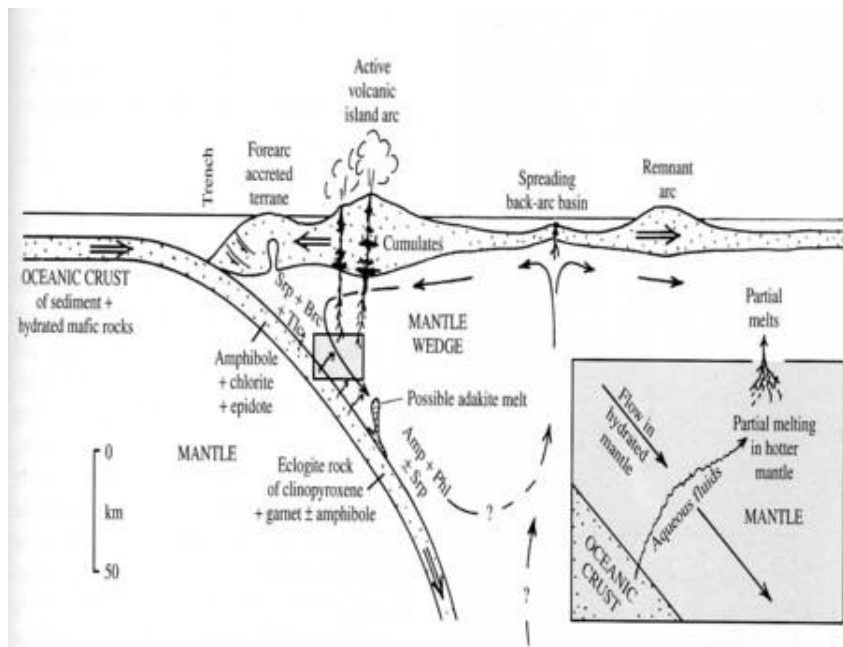


11.15 Chondrite-normalized diagram for rare earth elements in melts generated by varying degrees of partial melting of a garnet lherzolite source. (Data from Rollinson, 1993.)

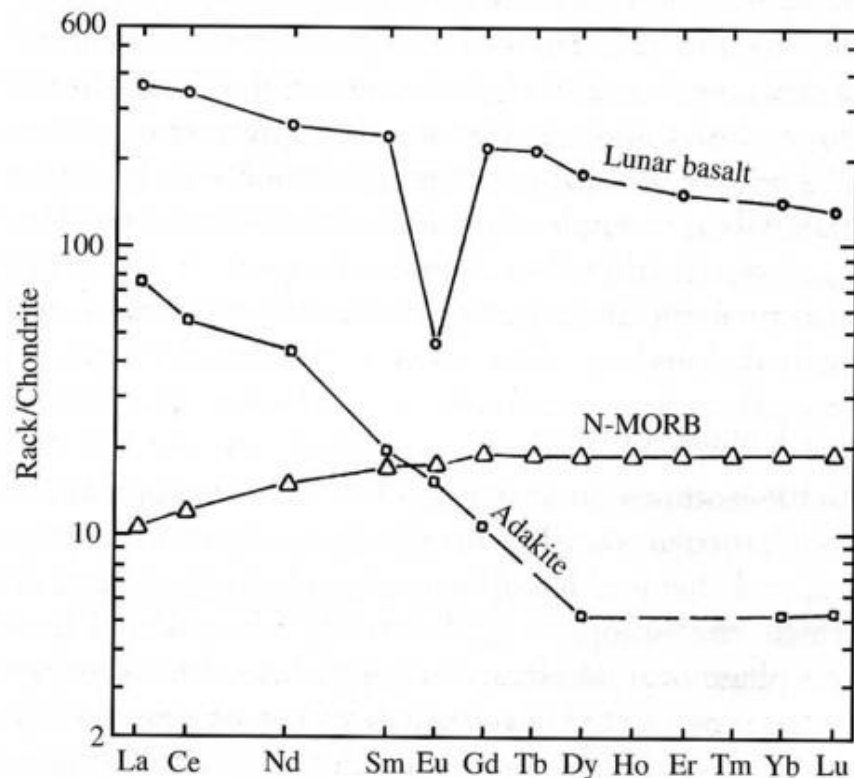
Частичное плавление



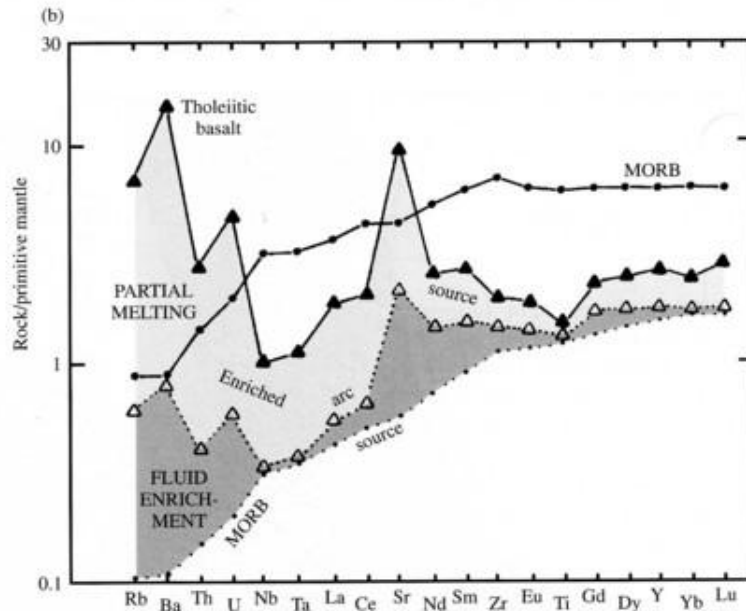
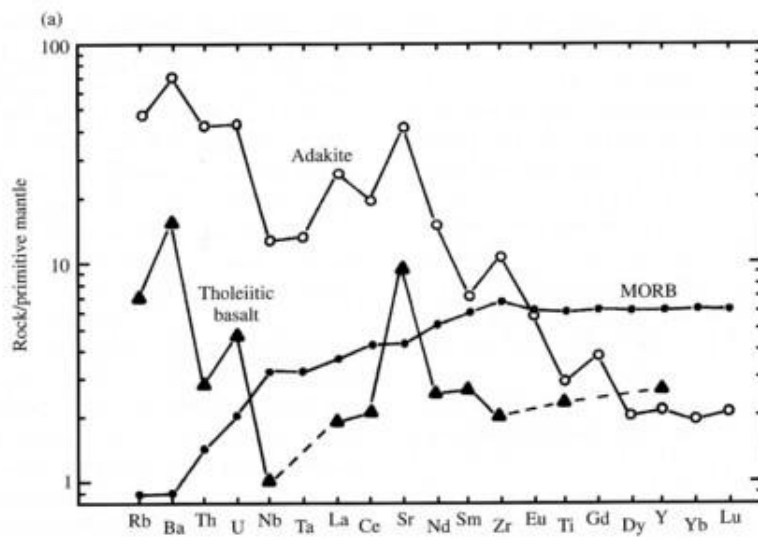
Геохимия адакитов обусловлена остаточным гранатом при плавлении источника с ЭКЛОГИТОВЫМ СОСТАВОМ



11.16 Highly schematic dynamics of an island arc-mantle wedge system. Double-line arrows indicate relative motion of crust (stippled). Subduction of hydrated oceanic crust liberates water in complex dehydration mineral reactions, forming ascending aqueous fluid solutions (wavy arrows). The forearc accreted terrane is built chiefly of scraped-off oceanic sediment and possible mafic-ultramafic rocks (ophiolite). Below this forearc, water liberated from the dehydrating crust hydrates the overlying peridotite in the mantle wedge to serpentine (\pm brucite \pm talc). Some of this buoyant mass of low-density serpentinized peridotite rises as diapirs (see diapir in figure) into the accreted terrane and may be extruded onto the ocean floor. As the descending crust continues to heat up, more water is liberated, and it transforms into drier, high- P eclogite, but amphibole may still be present. In exceptionally young, hot subducting crust, dehydration partial melting of amphibole eclogite may generate adakite melts that rise through the mantle wedge, possibly mixing with andesitic partial melts, before intruding into the arc crust or erupting. Hydrated mantle peridotite overlying the subducting crust may be dragged down in a "corner flow" by viscous coupling, releasing water as the low- T hydrous minerals partially dehydrate into amphibole + phlogopite \pm serpentine that are stable at higher P - T (Figure 11.18). Inset diagram in lower right (enlarged from the box in the main part of the diagram) shows that convective flow in mantle draws rising aqueous fluids laterally away from the crust into the hotter part of wedge where partial melting occurs. It should be noted in this inset diagram that temperatures increase in rocks from the lower left corner to the upper right: That is, there is an inverted thermal gradient.



2.23 Very different **chondrite-normalized REE patterns** in three rocks. Compare patterns of partition coefficients in Figure 2.22, especially the mirror image of lunar basalt and plagioclase and of adakite and garnet.



11.19 Trace-element arc signature in island arc rocks. (a) "Spiky" patterns for island-arc adakite and island-arc tholeiitic basalt compared with smooth pattern for mid-ocean ridge basalt (MORB). (Data from Drummond et al., 1996; Wilson, 1987; Sun and McDonough, 1989.) (b) Differential enrichment of a hypothetical MORB source (lowermost dotted line) by fluid solutions liberated from the subducted oceanic crust (dark shading) produces an enriched mantle peridotite arc source. Partial melts of this arc source (light shading) yield the island-arc tholeiitic basalt magma in (a). (Redrawn from Davidson, 1996.)

- Nb-Ta-Ti аномалия в островодужных базальтах может быть вызвана:**
1. Остаточной тугоплавкой фазой – рутилом.
 2. Фракционированием амфибола – роговой обманки.
 3. Низкой мобильностью HFS-элементов при транспортировке водным флюидом.

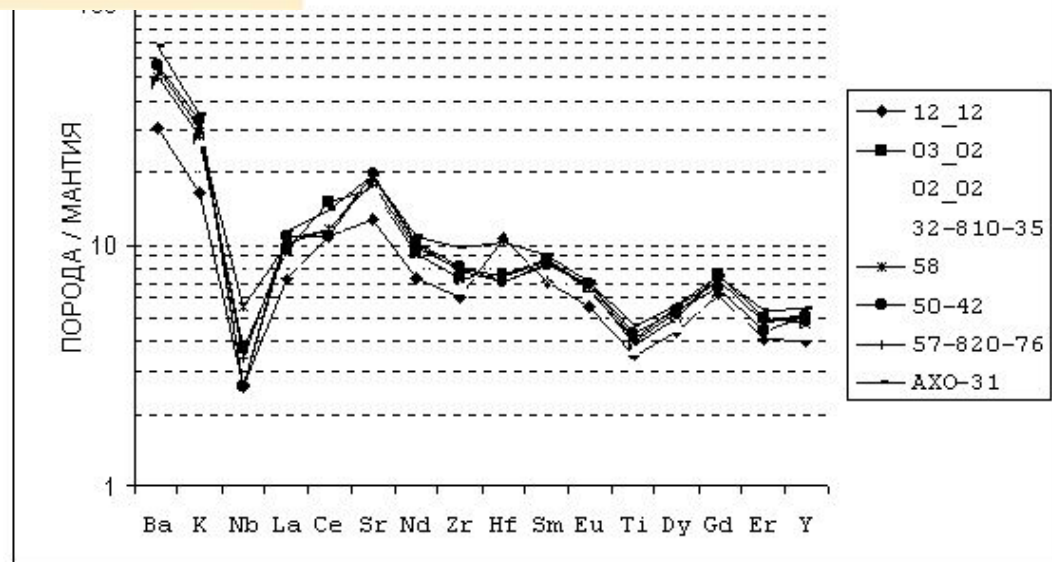
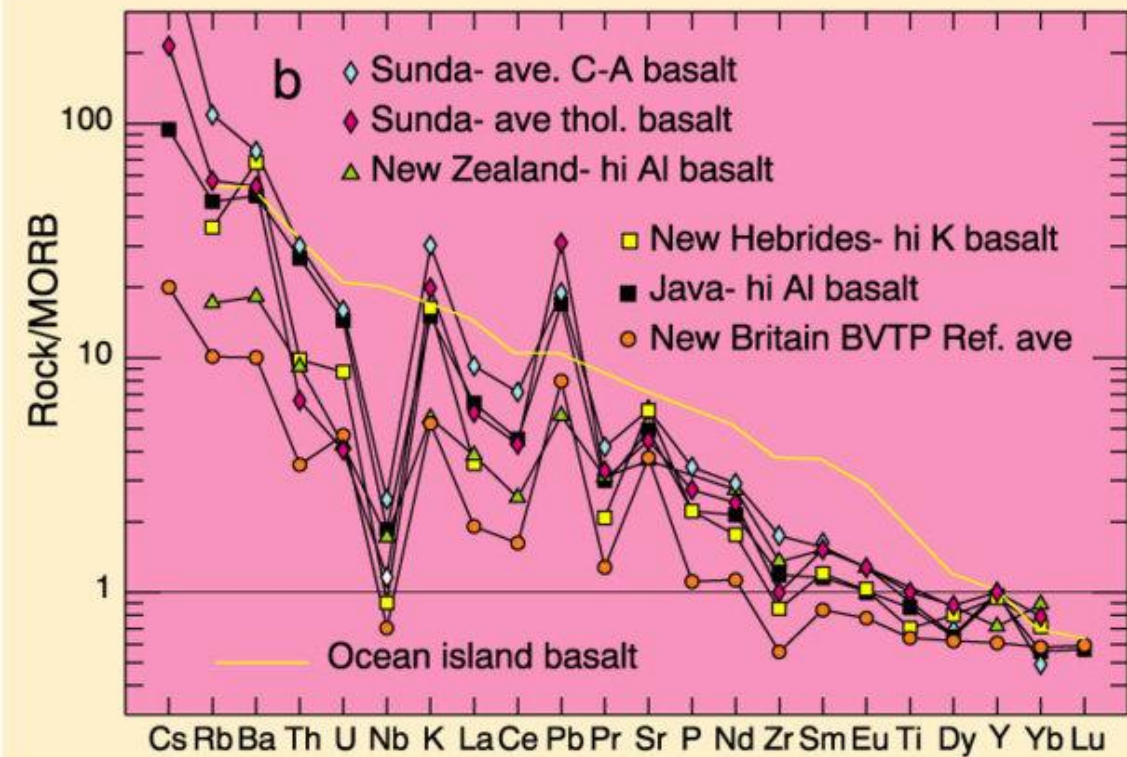
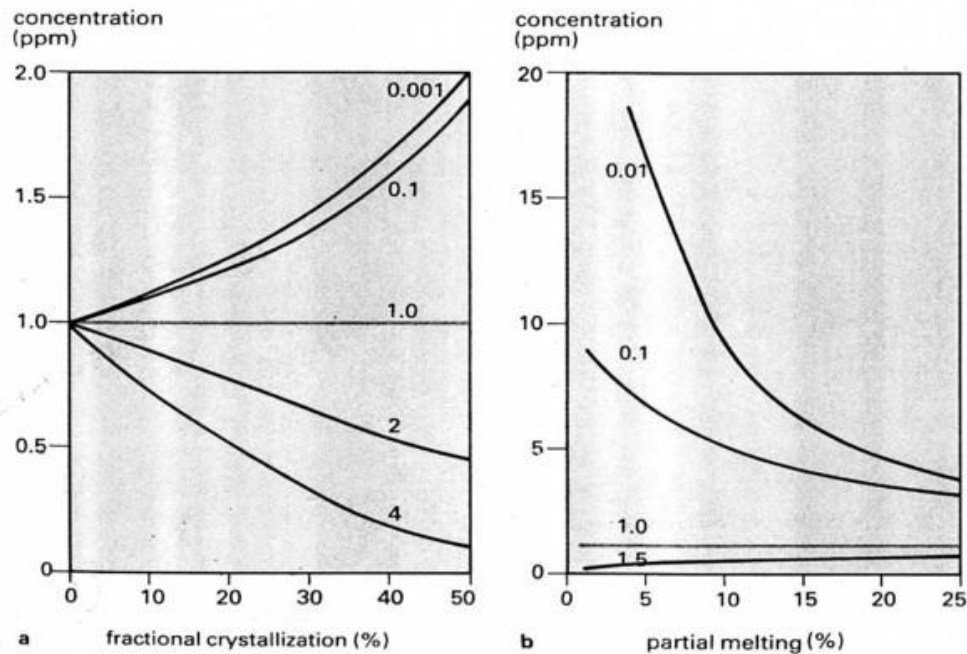


Рис.2. Спайдер-диаграмма составов магнезиальных и высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана

Геохимическое моделирование процессов частичного плавления и фракционной кристаллизации



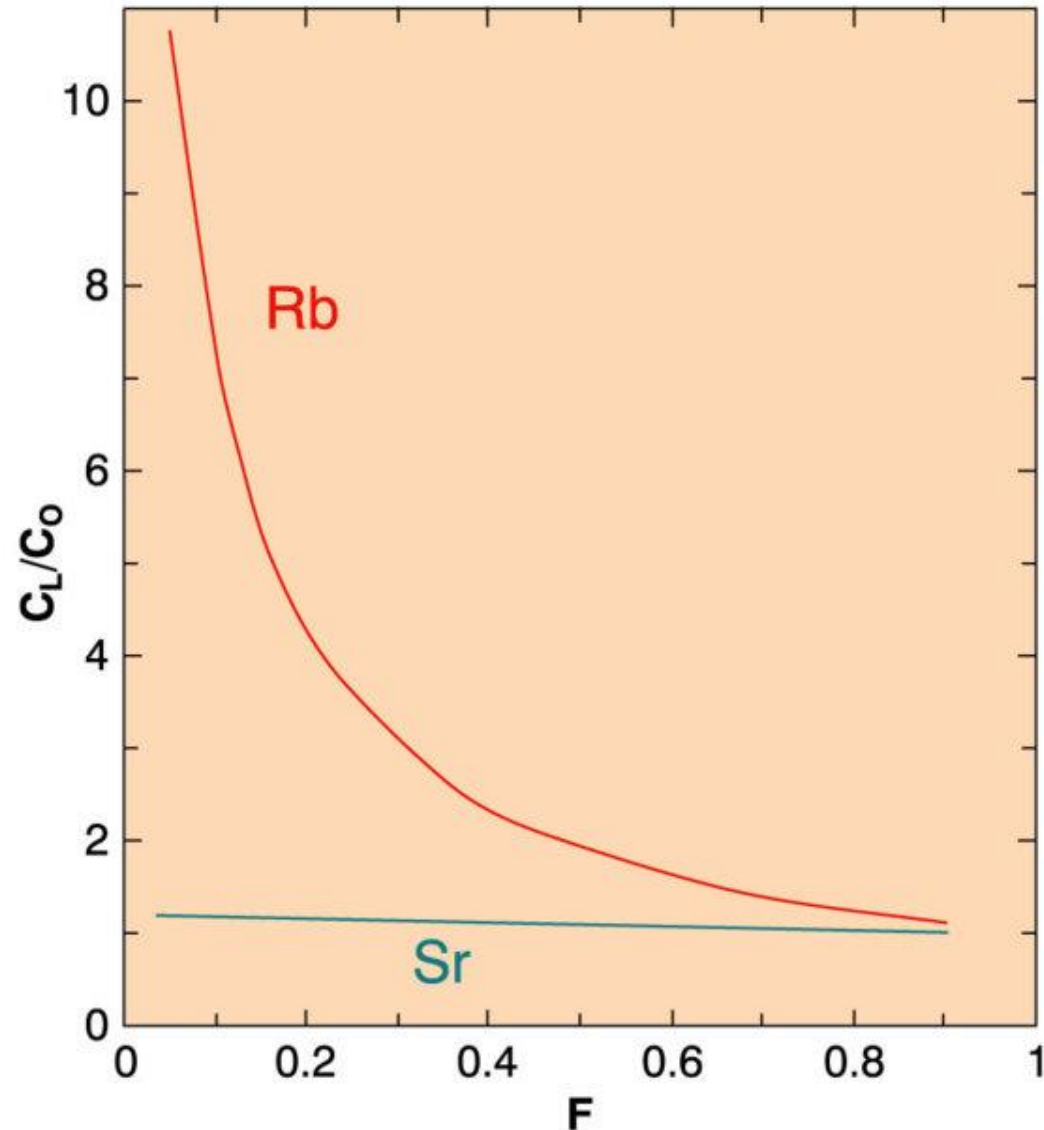
8.4: Calculated relative concentrations of trace elements in a liquid after different degrees of partial melting and fractional crystallization. The original solid and liquid respectively contained 1 ppm, and different curves reflect particular partition coefficients, K_D . For both partial melting and fractional crystallization, elements with small K_D are concentrated in the liquid, whereas those with large K_D (> 1) remain in the crystals and are thus depleted in the liquid.

Частичное плавление (batch melting)

- Изменение содержания Rb и Sr в расплаве при прогрессивном частичном

Table 9-3 . Batch Fractionation Model for Rb and Sr

F	$C_L/C_0 = 1/(D(1-F)+F)$		Rb/Sr
	D_{Rb} 0.045	D_{Sr} 0.848	
0.05	9.35	1.14	8.19
0.1	6.49	1.13	5.73
0.15	4.98	1.12	4.43
0.2	4.03	1.12	3.61
0.3	2.92	1.10	2.66
0.4	2.29	1.08	2.11
0.5	1.89	1.07	1.76
0.6	1.60	1.05	1.52
0.7	1.39	1.04	1.34
0.8	1.23	1.03	1.20
0.9	1.10	1.01	1.09



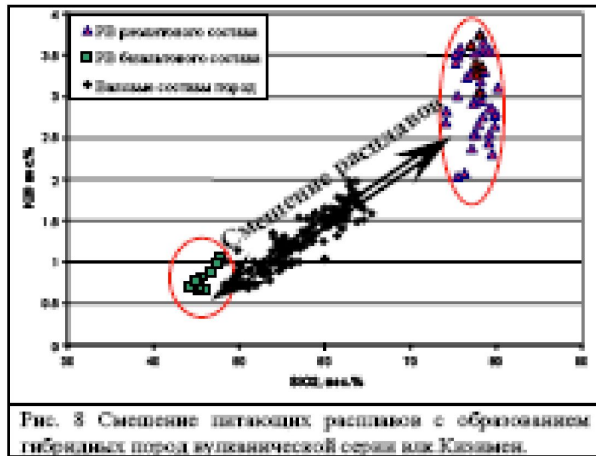
- **Частичное плавление:**

- - равновесное (расплав постоянно реагирует с реститом до момента удаления выплавленной порции магмы). *Постоянный контакт расплава с реститом обеспечивает равновесность этих двух фаз.*
- - фракционное или релеевское (выплавленные небольшие количества расплава мгновенно удаляются из зоны магмагенерации). *Равновесие достигается только между расплавом и поверхностями зерен минералов в источнике плавления.*

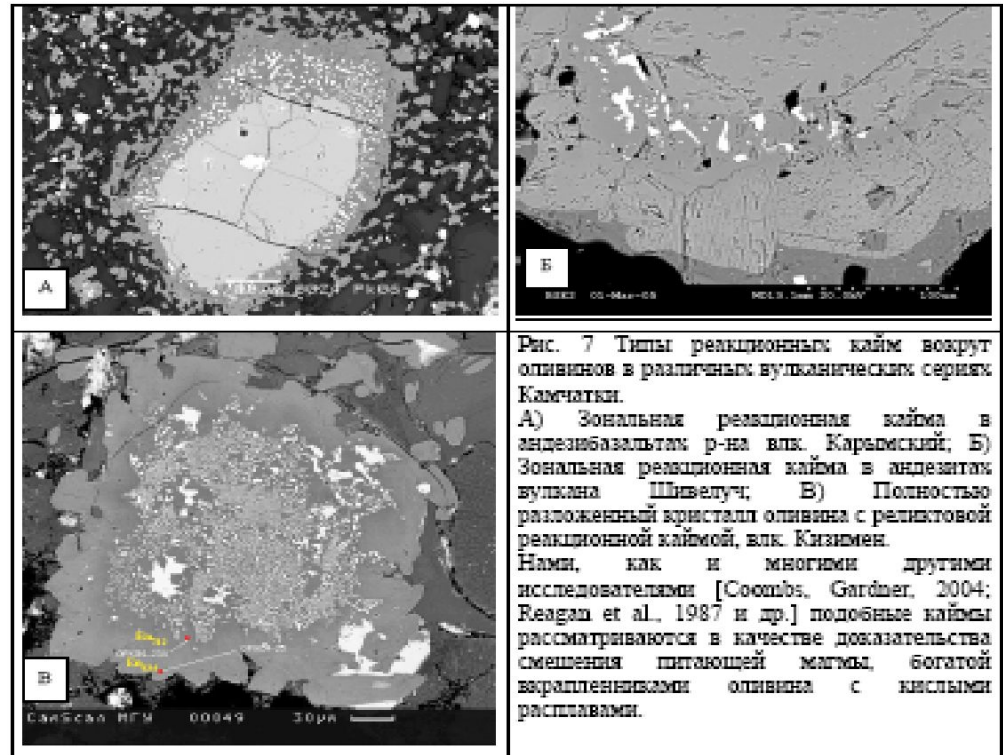
• **Фракционная кристаллизация:**

- - равновесная (полное равновесие между всеми твердыми фазами и расплавом в течение кристаллизации).
- - релеевское фракционирование (описывается законом Релея). Крайний случай извлечения кристаллов из расплава сразу после их образования. *В процессе содержание несовместимых эл-в в минерале уменьшается относительно расплава, а совместимых – растет.*
- - in situ (остаточный расплав отделяется от кристаллической «каши» в зоне солидификации на стенах камеры и возвращается в камеру).

Смешение магм



Плечов, 2008

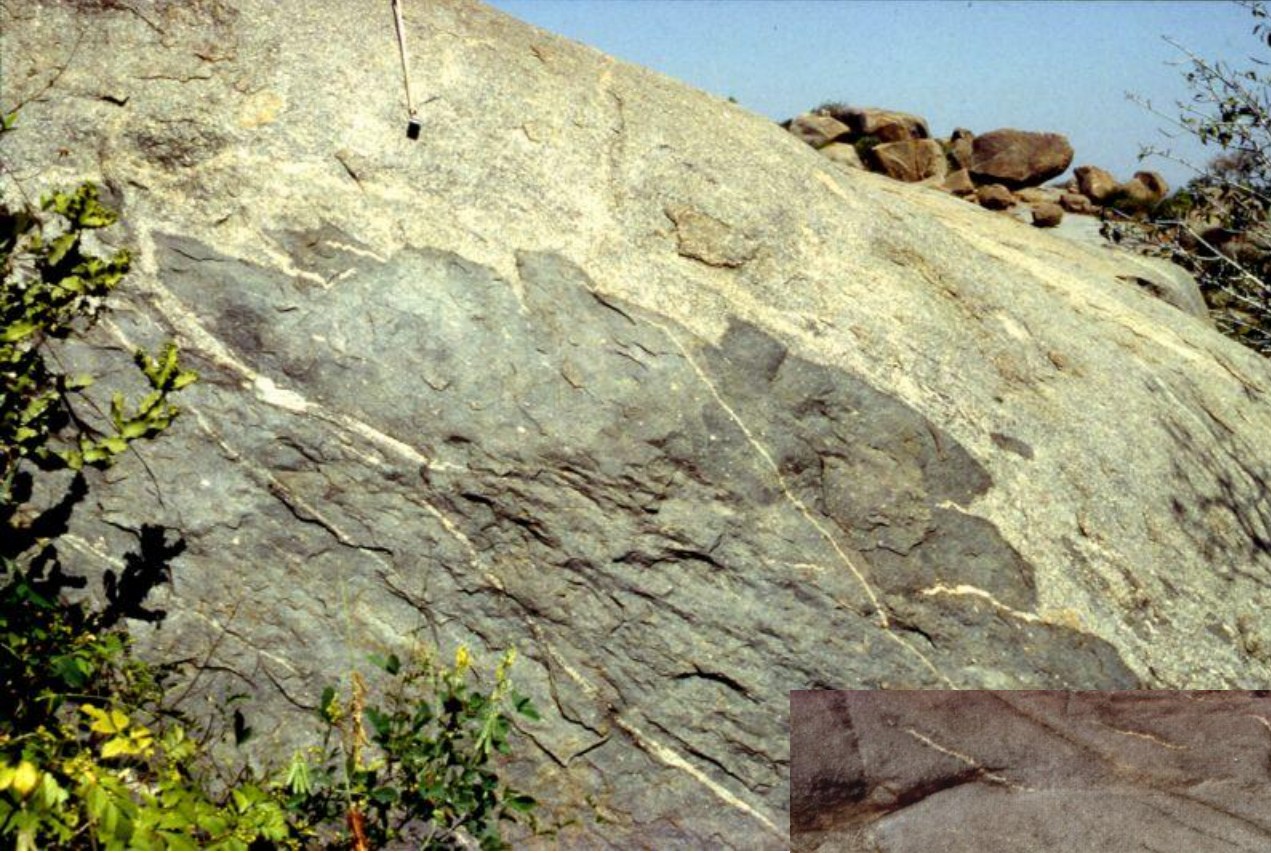


- Типы реакционных кайм вокруг оливинов в различных вулканических сериях Камчатки.
- Подобные каймы рассматриваются в качестве доказательства смешения питающей магмы, богатой вкрапленниками оливина с кислыми расплавами.

2 типа смешения магм

- Полное смешение до относительной однородности (mix – «МИКСИНГ»)
- Механическое перемешивание с сохранением участков (зон) индивидуальных пород (расплавов)
– **МИНГЛИНГ** (mingle)





*Closepet granite
(2.5 Ga), South
India*

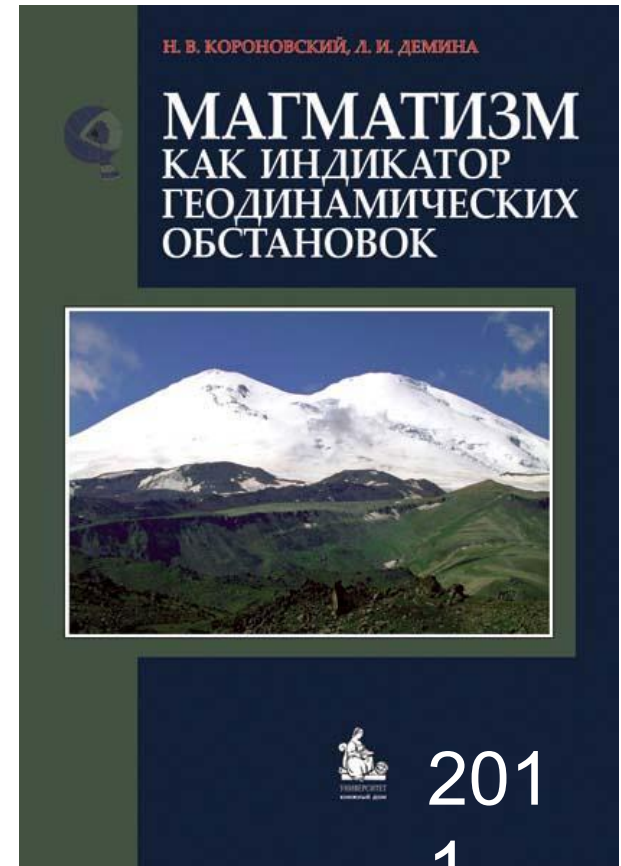


Элемент	Использование в качестве петрогенетического индикатора
Ni, Co, Cr	Высоко совместимые элементы. Ni, Cr входят в оливин, Cr – в шпинель и клинопироксен. Высокие концентрации говорят о мантийном источнике, ограниченном фракционировании.
V, Ti	Сильно фракционируют в Fe-Ti оксиды (ильменит или титаномагнетит). Если различается поведение, то Ti мог фракционировать в акцессорные фазы (сфен или рутил).
Zr, Hf	Высоко несовместимые элементы, не входят в главные силикаты. Высокие концентрации говорят об обогащенном источнике или длительной эволюции расплава.

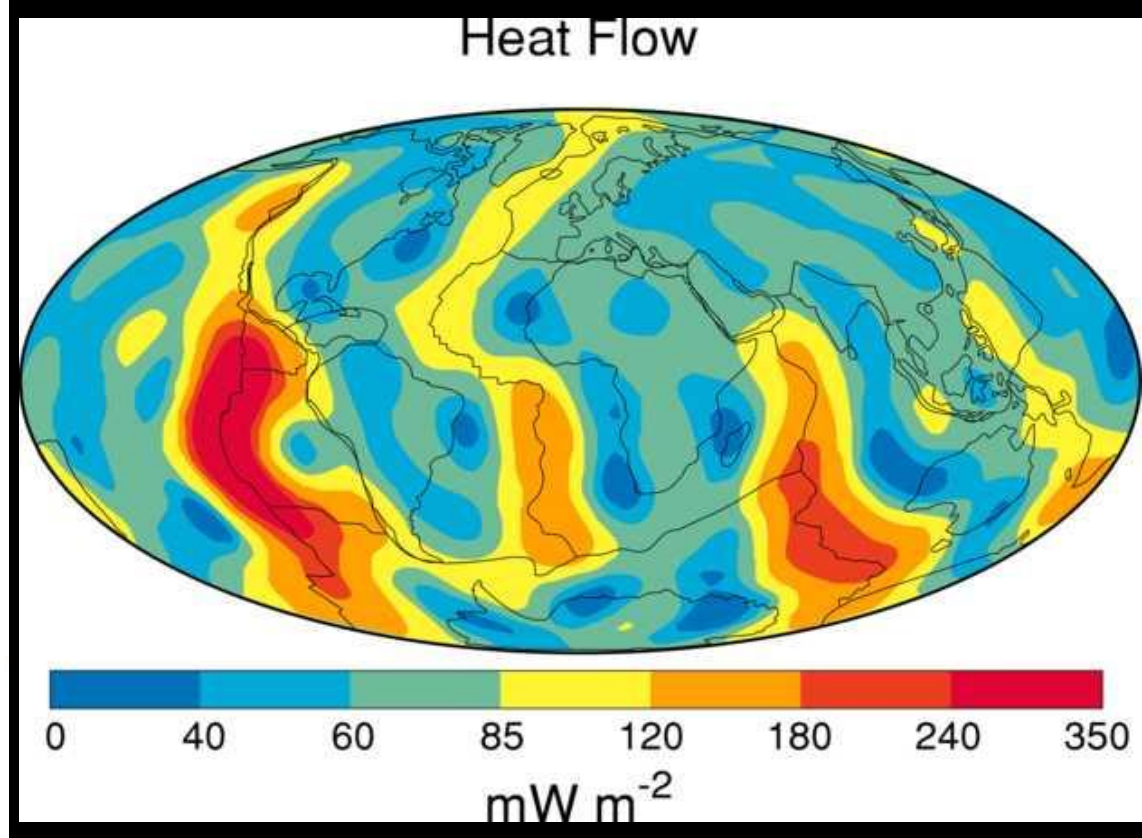
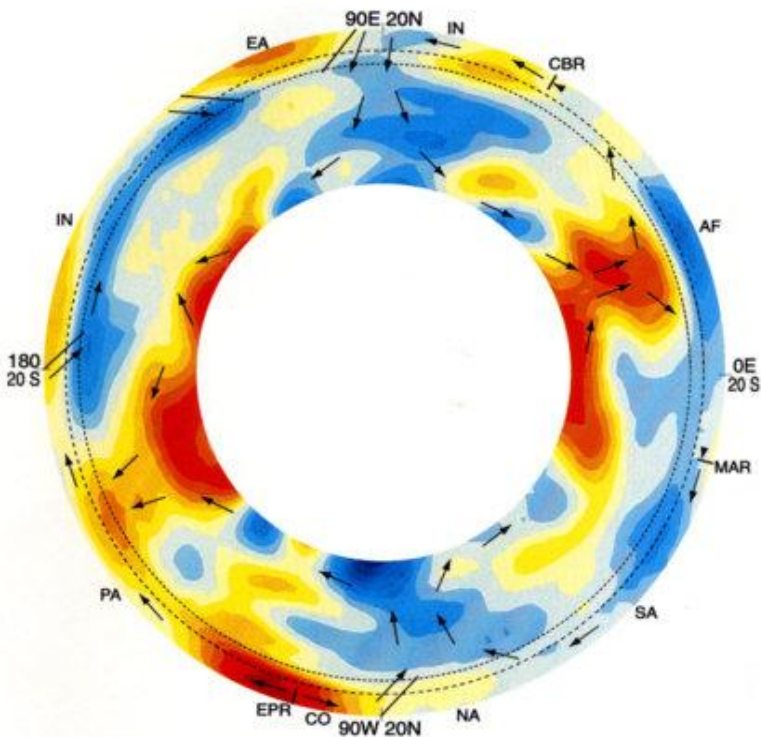
Ba, Rb	Несовместимые элементы, замещают К в слюдах, калиевых полевых шпатах, роговых обманках. Rb хуже входит в рог.обманку. К/Ba отношение может различать эти фазы.
Sr	Замещает Са в плагиоклазе (но не в пироксене), также К в калиевом полево шпате. Совместимый элемент при низких Р (плагиоклаз стабилен и кристаллизуется первым).
REE	Характеристика источника и эволюции расплава. Гранат преимущественно концентрирует HREE. Сфен и плагиоклаз – LREE. Eu^{2+} преимуществ. входит в плагиоклаз.
Y	Обычно несовместимый элемент. Совместим для граната и амфибола. Сфен и апатит концентрируют Y.

Редкие элементы как индикаторы геодинамических обстановок формирования магматических комплексов

- Каждой геодинамической обстановке отвечает специфический тип рудообразования.



Геотермический градиент



Pattern of global heat flux variations compiled from observations at over 20,000 sites and modeled on a spherical harmonic expansion to degree 12. From Pollack, Hurter and Johnson. (1993) *Rev. Geophys.* 31, 267-280.

Cross-section of the mantle based on a seismic tomography model. Arrows represent plate motions and large-scale mantle flow and subduction zones represented by dipping line segments. EPR = East Pacific Rise, MAR = Mid-Atlantic Ridge, CBR = Carlsberg Ridge. Plates: EA = Eurasian, IN = Indian, PA = Pacific, NA = North American, SA = South American, AF = African, CO = Cocos. From Li and Romanowicz (1996). *J. Geophys. Research*, 101, 22,245-72.

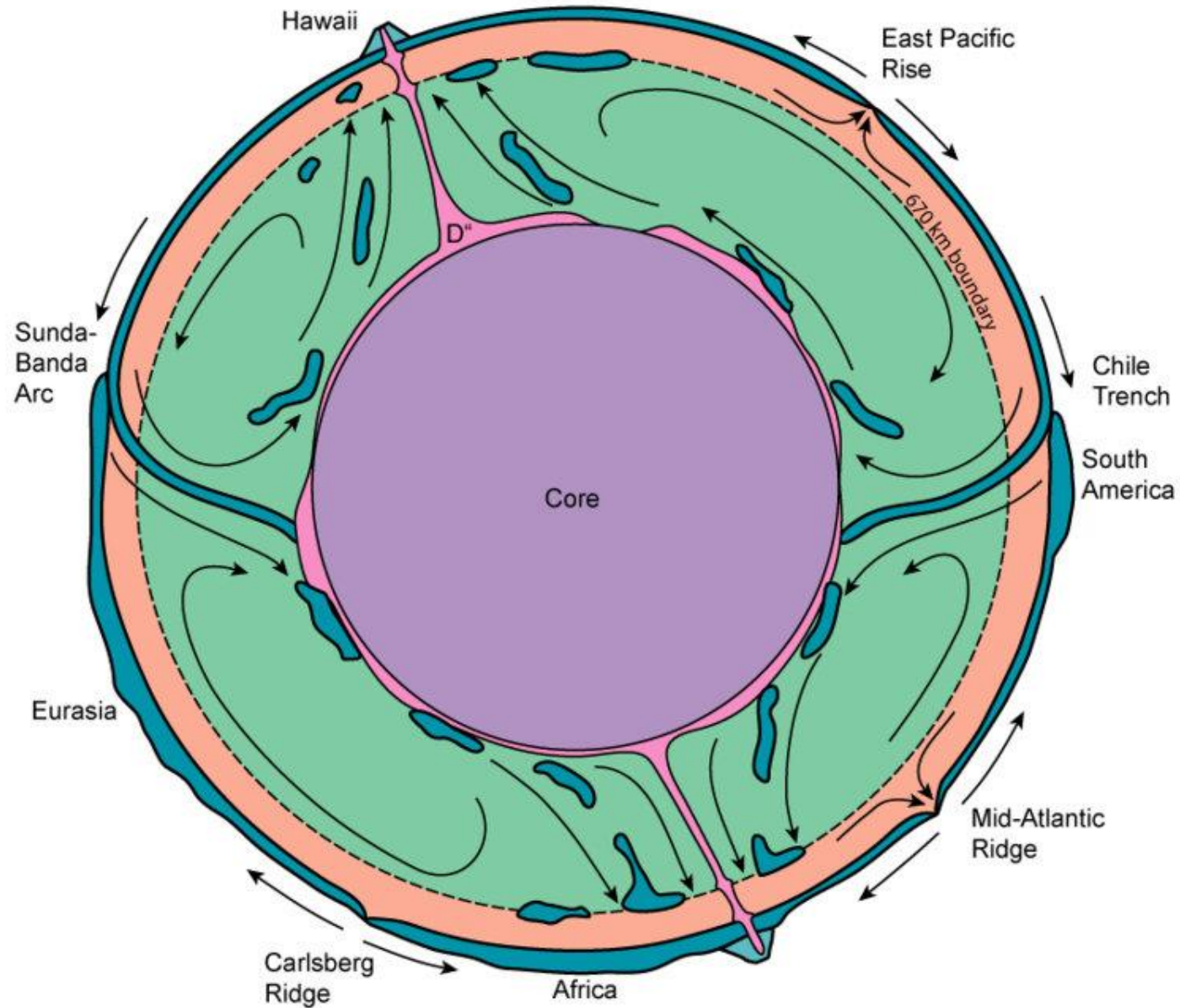
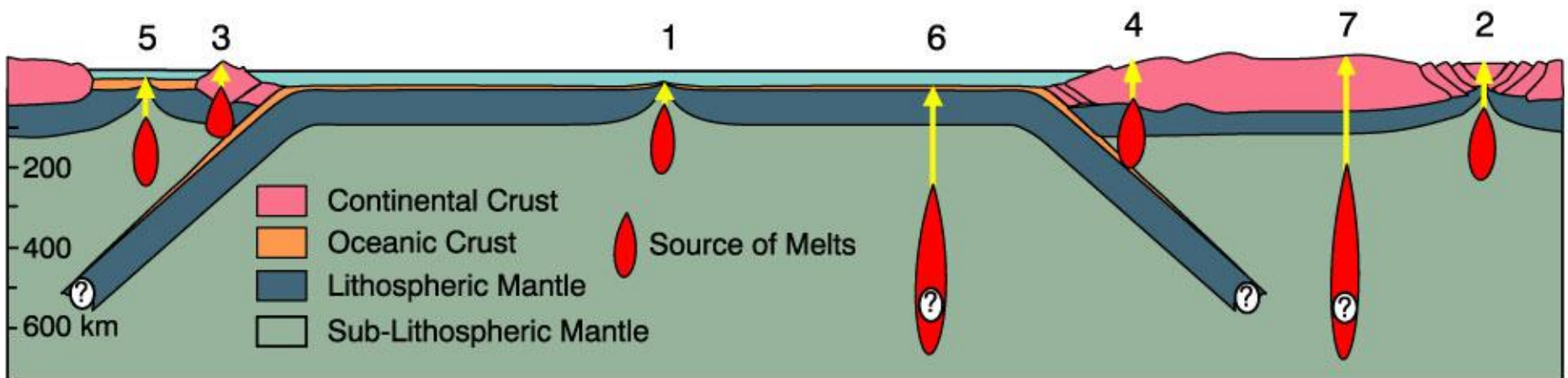


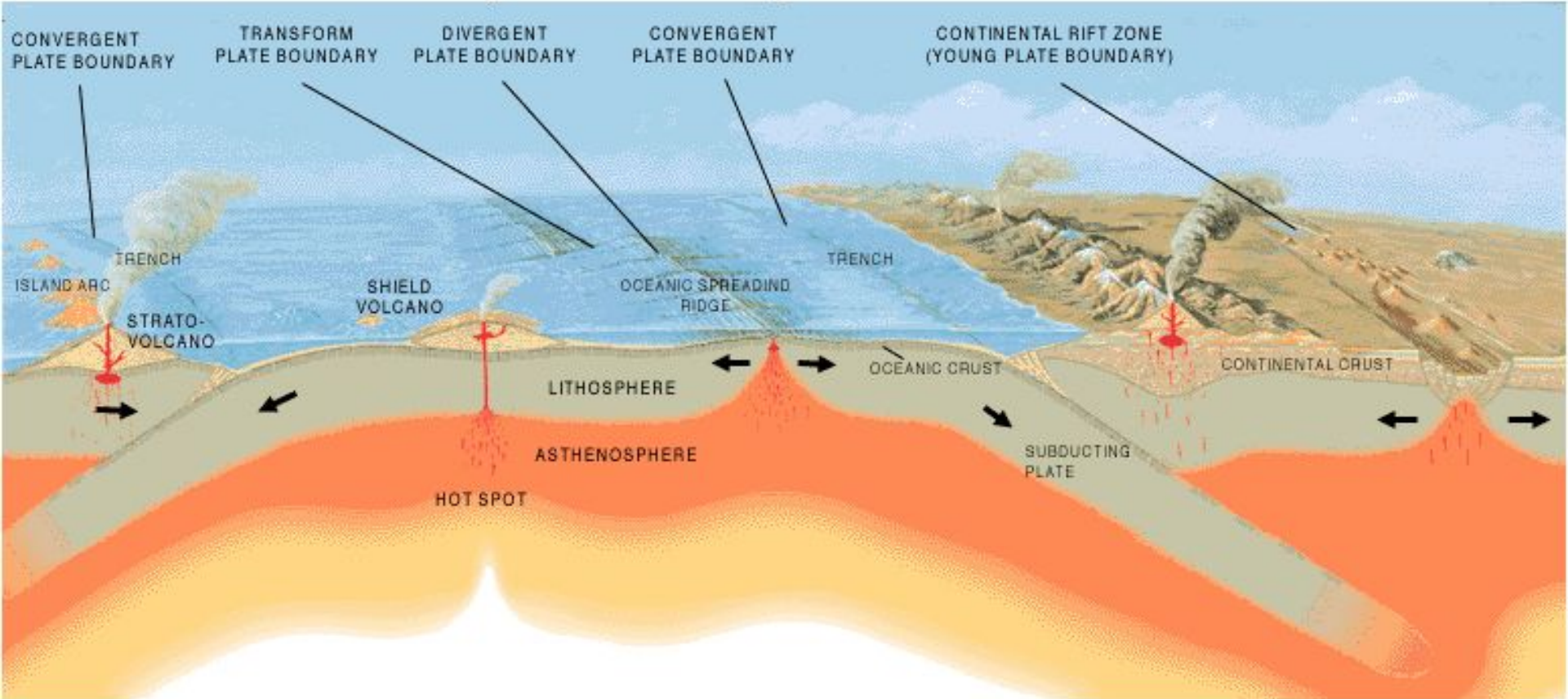
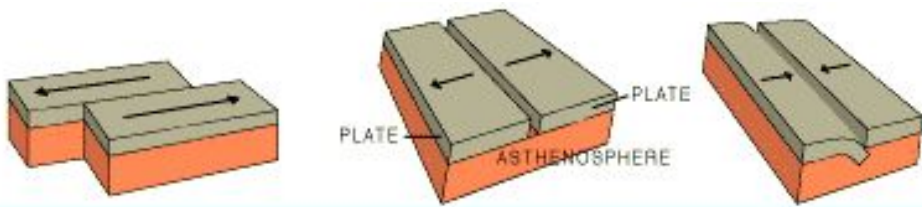
Figure 1-9. Estimated ranges of oceanic and continental steady-state geotherms to a depth of 100 km using upper and lower limits based on heat flows measured near the surface. After Sclater *et al.* (1980), *Earth. Rev. Geophys. Space Sci.*, **18**, 269-311.

Геодинамические обстановки

1. Mid-ocean Ridges
2. Intracontinental Rifts
3. Island Arcs
4. Active Continental Margins

5. Back-arc Basins
6. Ocean Island Basalts
7. Miscellaneous Intra-Continental Activity
 - kimberlites, carbonatites, anorthosites...





Список используемых сокращений

Аббревиатура	Расшифровка
MORB	Mid-Ocean Ridge Basalts – базальты срединно-океанических хребтов
OFB	Ocean Floor Basalts – базальты океанического дна
IAB	Island-Arc Basalts – островодужные базальты
IAT	Island-Arc Tholeiites – островодужные толеиты
VAB	Volcanic-Arc Basalts – базальты вулканических дуг
OIB	Ocean Island Basalts – базальты океанических островов
OIT	Ocean Island Tholeiites – толеиты океанических островов
OIA	Ocean Island Andesites – андезиты океанических островов
BABV	Back-Arc Basin Basalts – базальты задуговых бассейнов
WPT	Within-Plate Tholeiites – внутриплитные толеиты
WPB	Within-Plate Basalts – внутриплитные базальты
LKT	Low Potassium Tholeiites – низкокалиевые толеиты
CAB	Calc-Alkaline Basalts – известковощелочные базальты

DM – деплетированная мантия, обедненная несовместимыми элементами; EM – обогащенная мантия; HIMU – высокое содержание радиогенного свинца (высокое отношение U/Pb).

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

