

# Лекция 11

## “Геохимия вулканических пород и ее связь с условиями образования и фракционирования магм”

По курсу «динамической вулканологии», механико-математический и геологический факультеты МГУ

<http://wiki.web.ru/wiki/>

Геологический\_факультет\_МГУ:Вулканология

Павел Юрьевич Плечов, кафедра петрологии МГУ

# Элементы-примеси

Элементы-примеси - такие элементы, которые в рассматриваемой системе не входят стехиометрично в формулы минералов.

(LILE):

Li, K, Rb, Cs,  
Sr, Ba

(HFSE):

Zr, Nb, Ta, Hf

(REE):

La, Ce, Nd,  
Sm, Eu, Tb,  
Yb, Lu

Группа Fe:

Ni, Co, Cr, V,  
Mn (Fe)

*The Geochemical Periodic Table*

H																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rd	
Fr	Ra	Ac																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U													

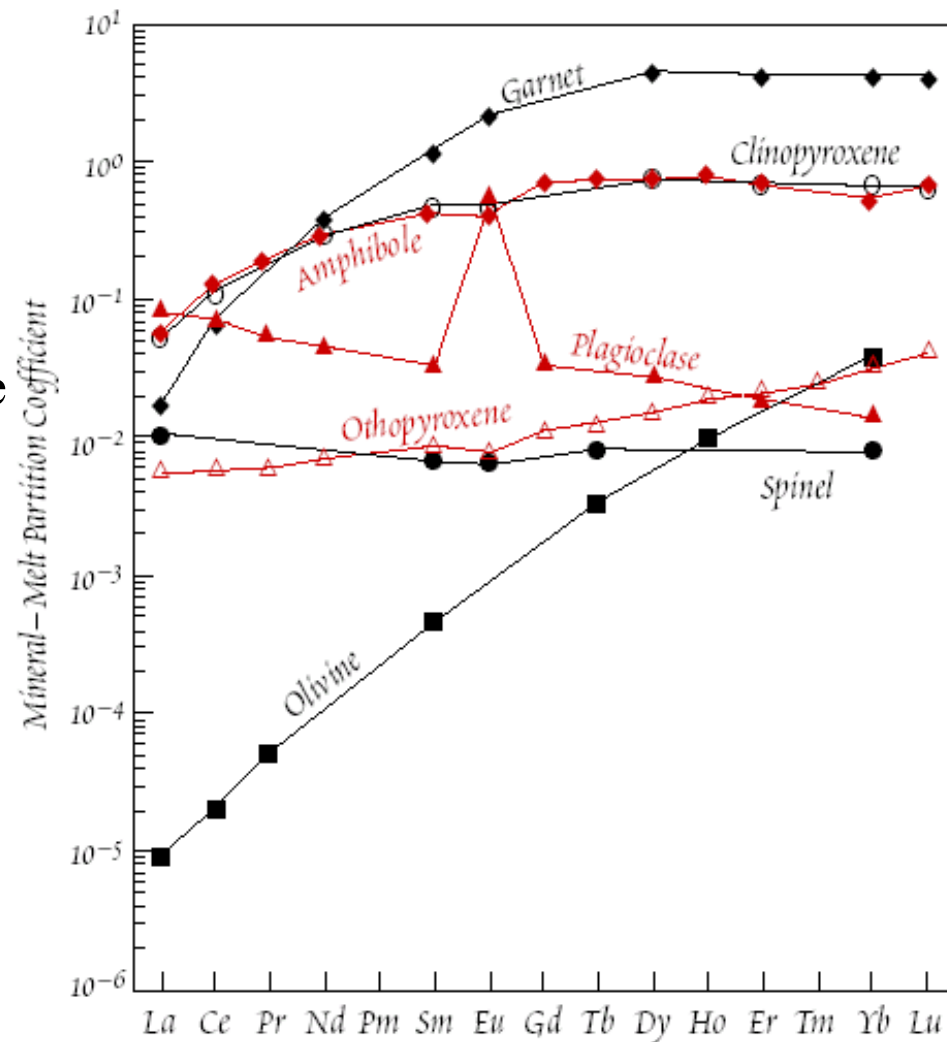
	Volatiles		First Series Transition Metals		Alkali/Alkaline Earth Trace Elements
	Semi-Volatiles		High Field Strength Elements		Rare Earths & Related Elements
	Major Elements		Noble Metals		U/Th Decay Series Elements

# Коэффициент распределения.

$$D_i^{\alpha/\beta} = \frac{C_i^{\alpha}}{C_i^{\beta}}$$

где  $C_i^{\alpha}$  – концентрация элемента в минерале,  
 $C_i^{\beta}$  – концентрация элемента в расплаве.

- когерентные или совместимые элементы ( $Kd \gg 1$ )
- умеренно-когерентные ( $Kd > 1$ )
- умеренно-некогерентные ( $Kd < 1$ )
- некогерентные или несовместимые элементы ( $Kd \ll 1$ )



# Некоторые реперные элементы-примеси

- Ni, Co, Cr - Совместимые (когерентные) элементы. Ni (Co) преимущественно входит в оливин. Cr входит в хромшпинелид и клинопироксен. Высокие концентрации показывают малую степень фракционирования.
- V, Ti - Несовместимые элементы на ранних этапах фракционирования, но сильно совместимы с ильменитом и титаномагнетитом. Раздельное поведение отражает появление самостоятельной фазы титана.
- Zr, Hf - Сильно несовместимые элементы. Должны постоянно накапливаться при фракционировании.
- Ba, Rb - Несовместимые до появления минералов калия (калиевый полевой шпат, слюды - биотит, роговая обманка). Rb предпочитает слюды и Fsp. По K/Ba отношению можно выявить появление K-фаз.
- Sr - Замещает Ca в плагиоклазе (но не в клинопироксене). Совместим при низких давлениях (ранний плагиоклаз), несовместим при высоких (плагиоклаз неустойчив). Оценка глубинности фракционирования.
- REE - Гранат преимущественно накапливает тяжелые REE. Ортопироксен и роговая обманка имеют тот же эффект, но в меньшей степени. Сфен и плагиоклаз содержат преимущественно легкие REE. Eu<sup>2+</sup> преимущественно в плагиоклазе. Степень деплетированности/фракционирования.
- Y - несовместимый (на уровне HREE). Преимущественно входит в гранат и амфибол. Сфен и апатит также могут концентрировать Y.

# Применения уравнения масс-баланса

$$C_{\text{bulk}} = \sum c_i x_i \quad \text{- общий масс-баланс}$$

$$C_{\text{bulk}} = c_1 x_1 + c_2 (1 - x_1) \quad \text{- масс-баланс для двух компонентов}$$

*Для фракционирования в системе минерал-расплав:*

$$C_{\text{bulk}} = c_s X + c_L (1 - X)$$

$$C_s / C_L = Kd = D = \text{const} \quad (\text{для рассеянных элементов})$$

$$C_{\text{bulk}} = c_L DX + c_L (1 - X) \Rightarrow C_L / C_{\text{bulk}} = 1 / (DX + 1 - X)$$

# Поведение когерентных и некогерентных элементов

Случай равновесной кристаллизации

$$\frac{C_i^l}{C_i^0} = \frac{1}{DX + (1-X)}$$

Если  $X=0 \Rightarrow C^l=C^0$

Если  $X=1 \Rightarrow C^l/C^0=1/D$

Если  $D=0 \Rightarrow C^l/C^0=1/(1-X)$ ,

при  $X$  стремящемся к 1,  $C_L$  стремится к  $\infty$

Случай фракционной кристаллизации

$$\frac{C_i^l}{C_i^0} = (1-X)^{D-1}$$

при  $X$  стремящемся к 1 и  $D>1$ ,  $C^l/C^0$  стремится к 0,

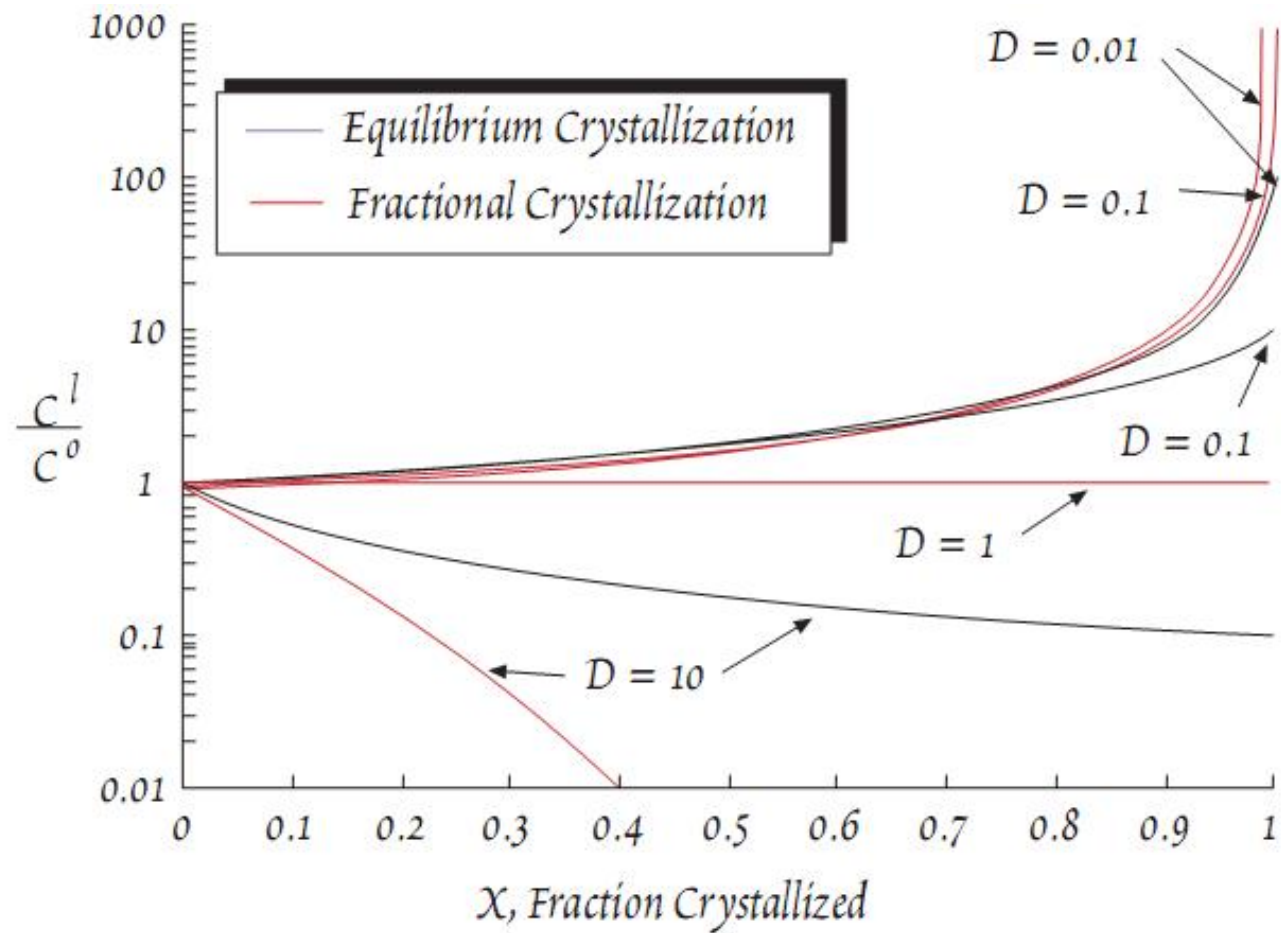
при  $X$  стремящемся к 1 и  $D<1$ ,  $C^l/C^0$  стремится к  $\infty$

Если  $D=0 \Rightarrow C^l/C^0=1/(1-X)$ ,

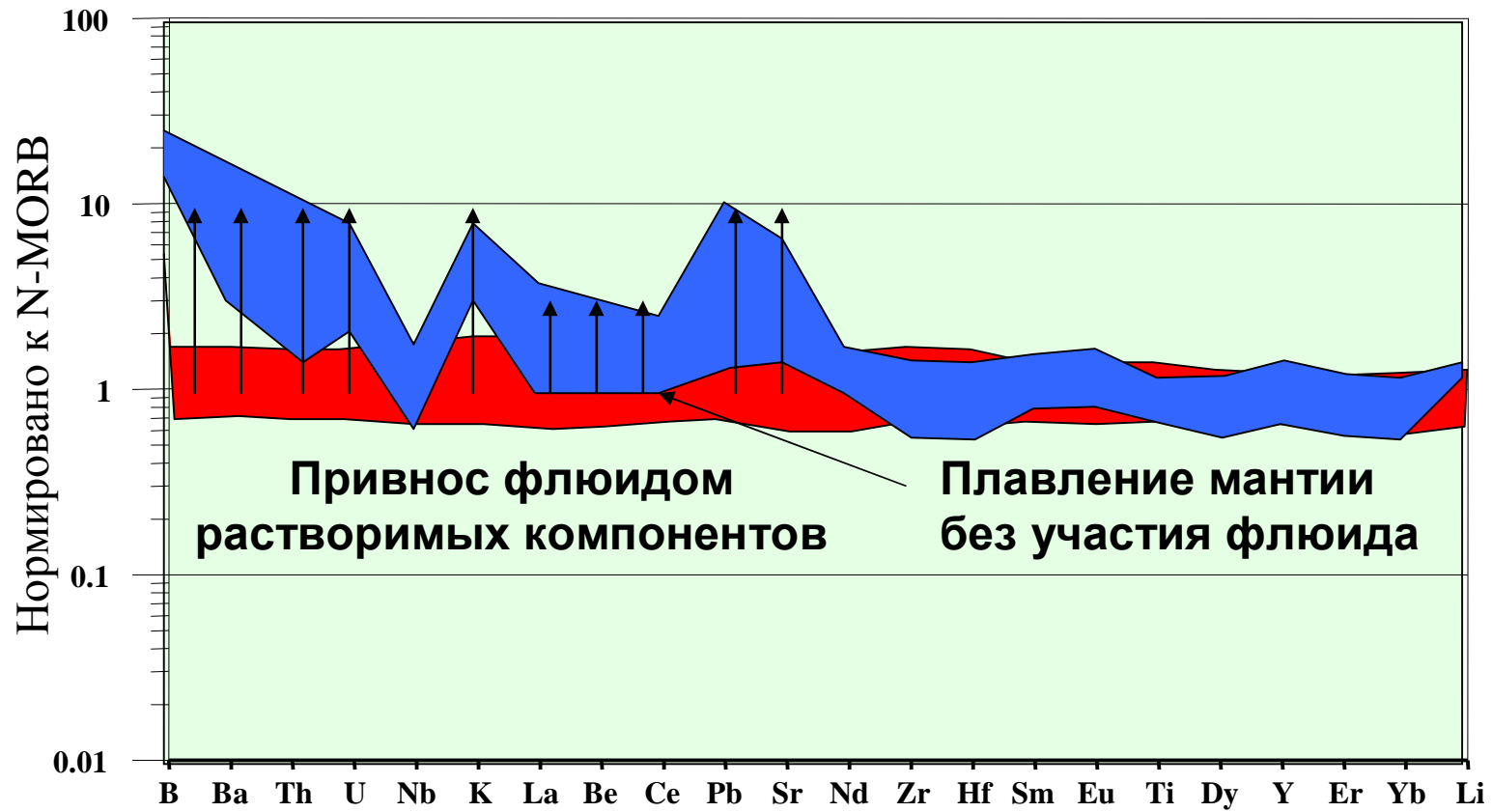
То есть то же, что и при равновесной кристаллизации

Для оценки степени фракционирования используют наиболее некогерентные элементы, принимая их  $K_d=0$ . Для базальтов это Zr, Rb и т.д.

# Различные способы фракционирования



# Островодужная геохимическая специфика



## 4. Изотопные системы.

- Н - водород ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ )
- С - углерод ( $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ )
- О - кислород ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ )
- S - сера ( $^{32}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$ )
- He - гелий ( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ )
- В - бор ( $^{10}\text{B}$ ,  $^{11}\text{B}$ )

# Схема изотопного фракционирования кислорода.

Мантия:  
Оливин 5.1–5.4 ‰  
Пироксен 5.5–6.0 ‰

Базальты:  
Океан 5.7 ‰  
Континент 6.2 ‰

Риолиты:  
6.5–7.5 ‰

Пегматиты:  
9–11 ‰

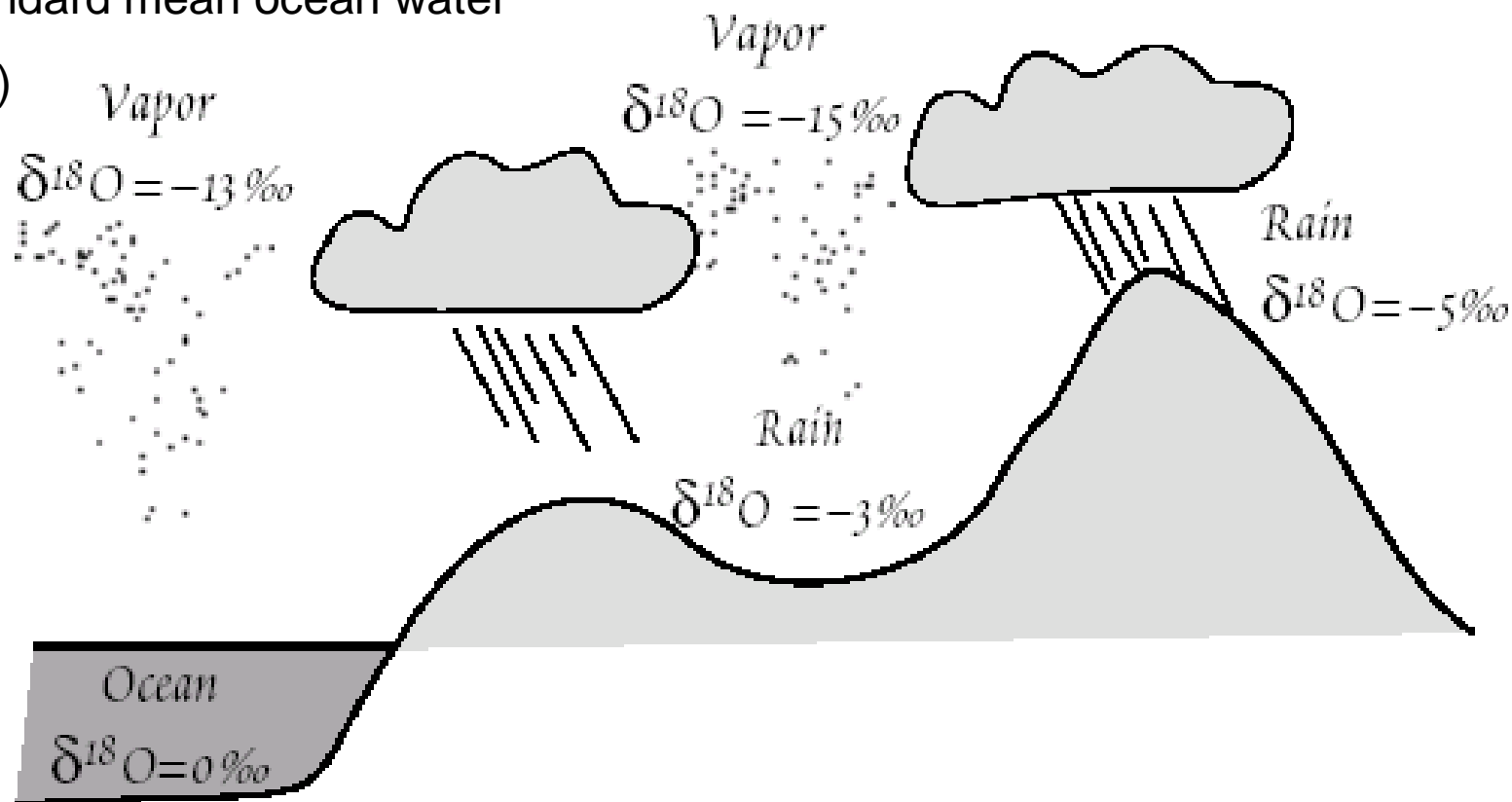
$$\delta^{18}\text{O} = 1000 * (\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \text{ образец} - \text{SMOW}) / \text{SMOW}$$

SMOW – standard mean ocean water

$^{16}\text{O}$  (~99.76%)

$^{17}\text{O}$  (0.039%)

$^{18}\text{O}$  (0.202%)



# Вариации изотопного состава кислорода в базальтах

TABLE 1: O-isotope characteristics of basalts erupted in different tectonic settings

tectonic setting	number	$^{18}\text{O}$ range	mean $^{18}\text{O}$ -value $1 \pm \sigma$
Oceanic bas.(all)	440	2.9 to 7.5	$5.40 \pm 0.75$
MORB	127	5.2 to 6.4	$5.73 \pm 0.21$
OIB	148	4.6 to 7.5	$5.48 \pm 0.51$
Iceland	104	2.9 to 6.2	$4.50 \pm 0.81$
Ocean arc bas.	33	5.3 to 7.5	$6.10 \pm 1.10$
Back-arc bas.	28	5.5 to 6.6	$5.93 \pm 0.26$
Continental bas.(all)	303	4.3 to 11.4	$6.36 \pm 1.06$
CIB	171	4.5 to 8.1	$6.08 \pm 0.66$
CAB	82	4.8 to 7.7	$6.24 \pm 0.65$
CFB	17	4.3 to 6.5	$5.59 \pm 0.64$
Italy	33	6.3 to 11.4	$8.47 \pm 1.44$

Harmon, Hoeffs, 1994 (Mineralogical Magazine)

# Радиоогенные изотопные системы

Радиоогенные системы: Используются для определения источников вещества и определения возраста.

Изотопы нижеперечисленных элементов с большей атомной массой не фракционируют, в отличие от кислорода.

- K-Ar
- Sm-Nd
- Rb-Sr
- U-Pb-Th
- Lu-Hf
- Re-Os
- La-Ce

# Короткоживущие космогенные ИЗОТОПЫ

Используются для получения информации о возрасте и обстановках образования пород.

- $^{10}\text{Be}$
- $^{36}\text{Cl}$
- $^{14}\text{C}$