

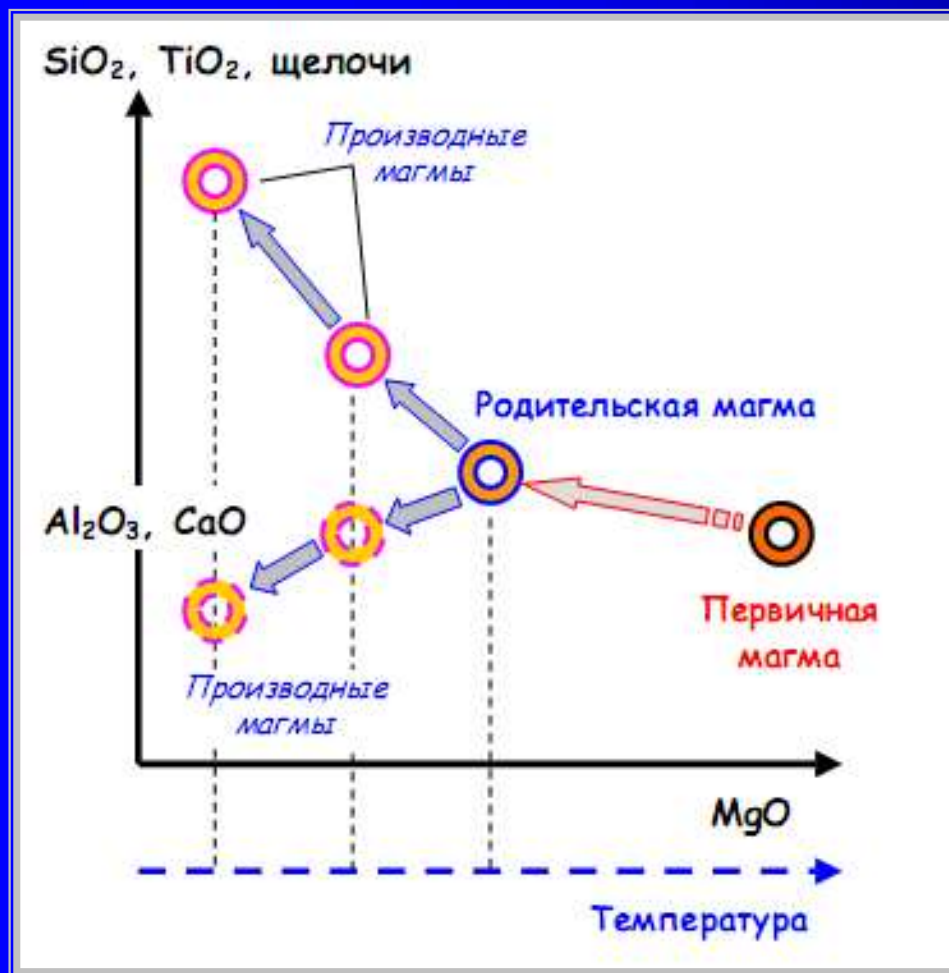
Тема занятий (лекции № 6–8):

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ МАГМ

лекция № 6:

**Концепция фракционной
кристаллизации исходной магмы
и простейшие модели
фракционирования**

Определения “первичной” и “родительской” магмы



Исходной или родоначальной (*parental*) называется магма, при дифференциации которой сформировалась данная серия или ассоциация магматических пород

Примитивные расплавы

Расплавы, формирующиеся непосредственно в зоне плавления мантийного вещества, называются **первичной** (*primary*) **магмой**

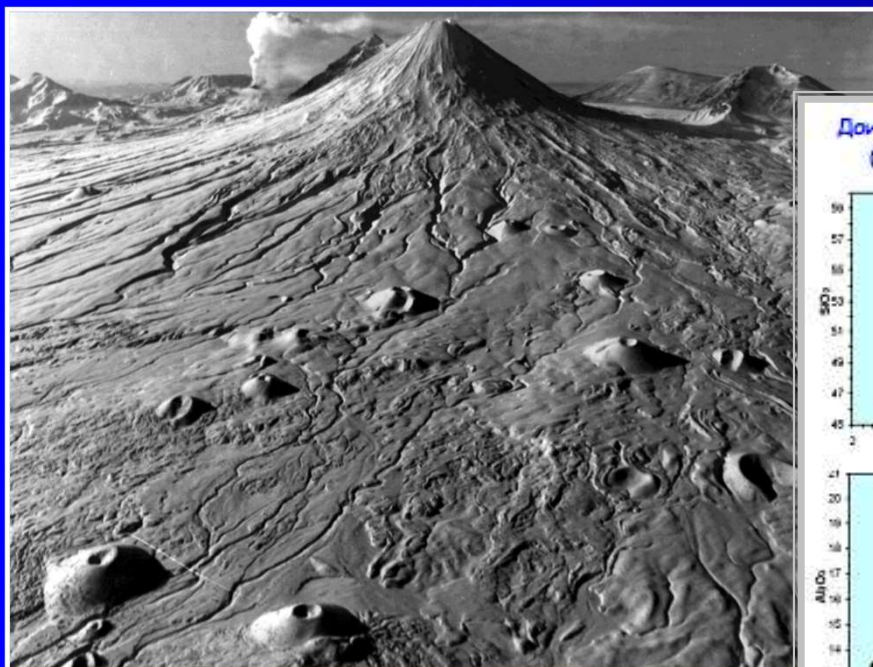
Главные проблемы образования магматических пород

1. **Оценки состава и условий кристаллизации родительских магм** как источника химического разнообразия производных расплавов (дериватов), которые затвердевают с образованием магматических пород (*формируя конкретную серию или ассоциацию*)

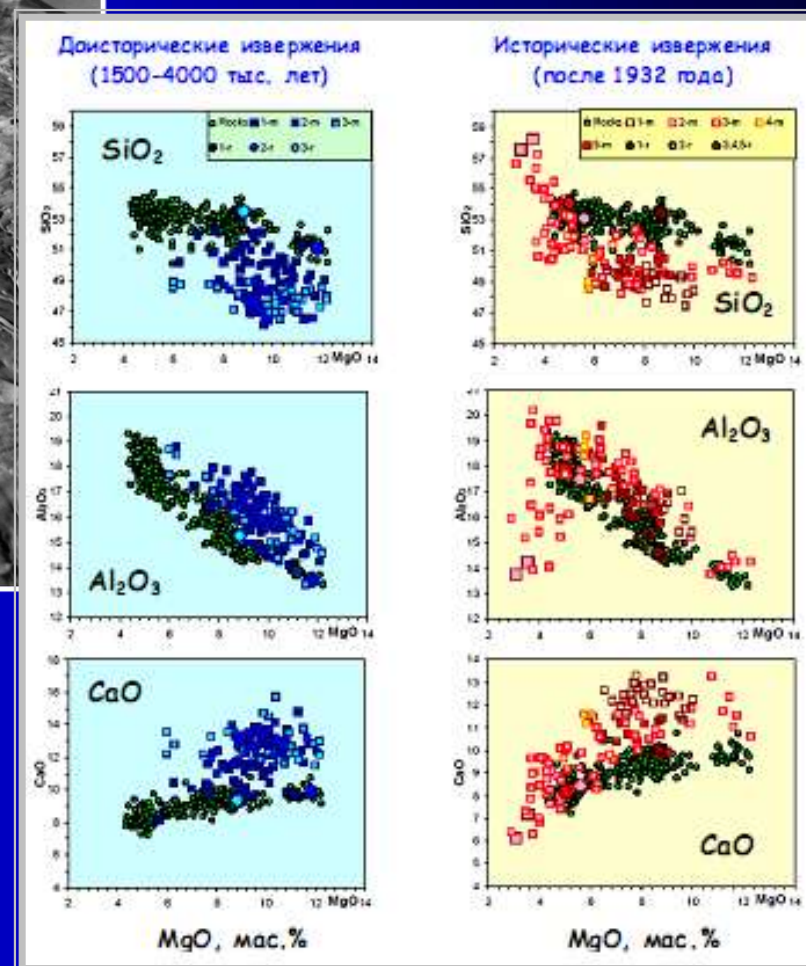
2. **Условия образования наиболее примитивных – первичных расплавов**, являющихся источником родительских магм.

Составы расплавных включений и базальтовых лав Ключевского вулкана на Камчатке

(данные Н.Л.Миронова, М.В.Портнягина и П.Ю.Плечова)



Общий вид Ключевского
вулкана



Зависимость содержания Al_2O_3 от MgO в базальтовых лавах Ключевского вулкана

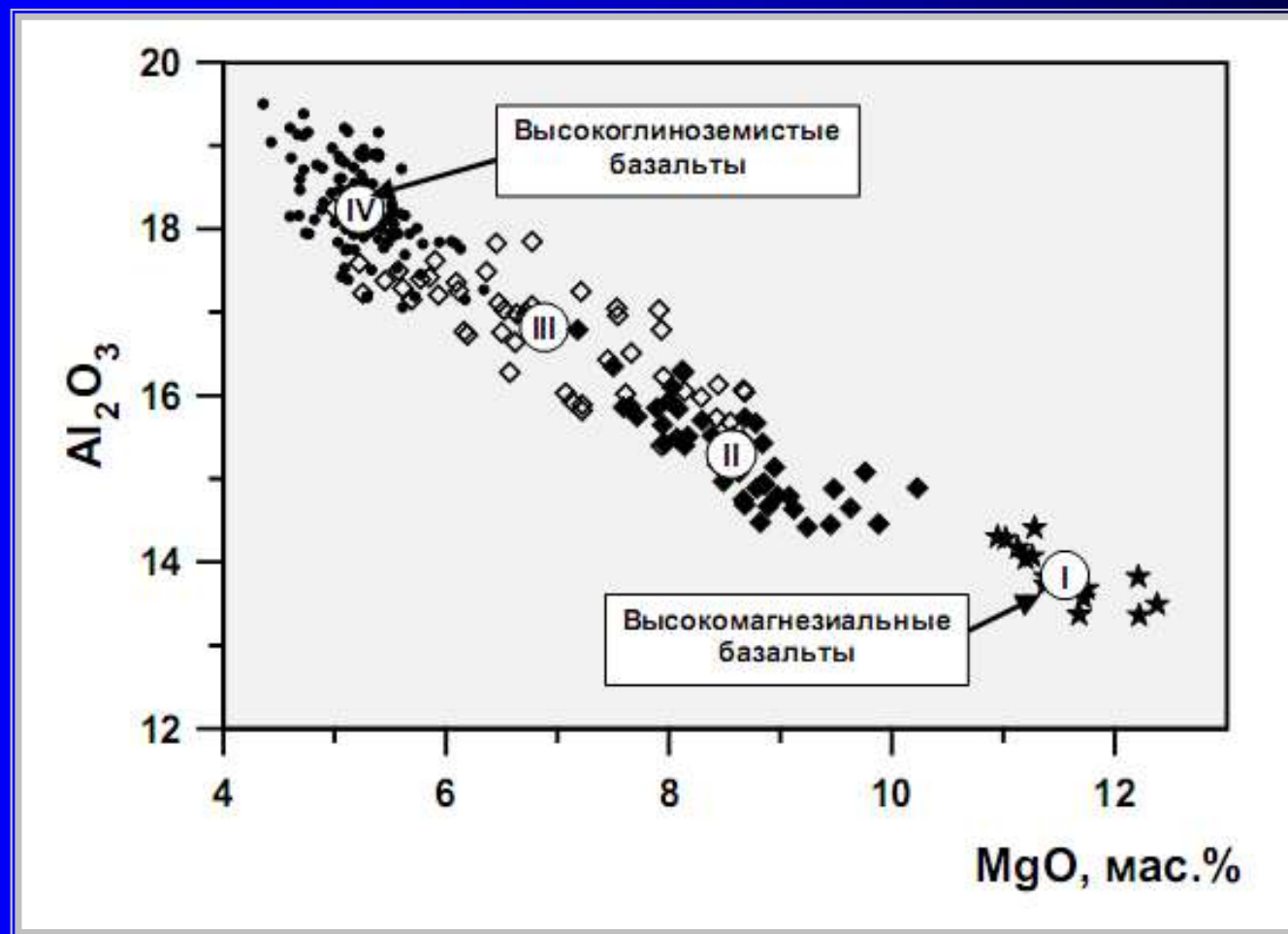
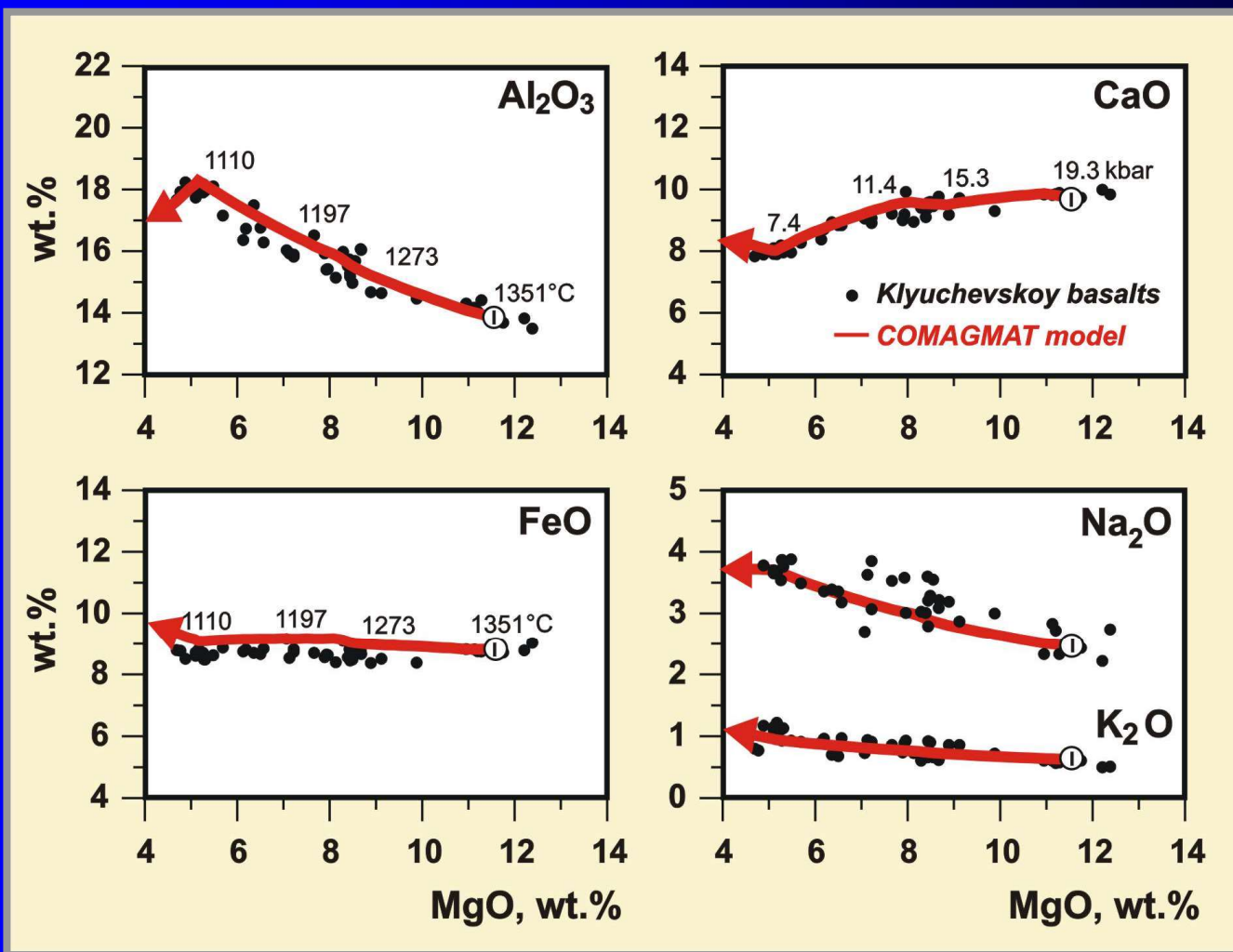
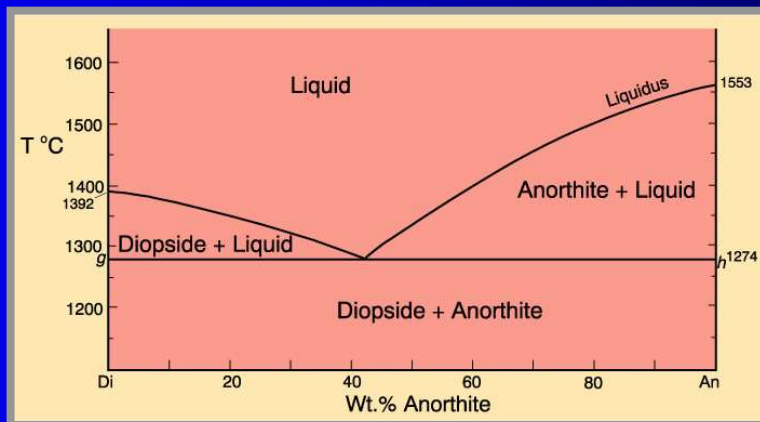
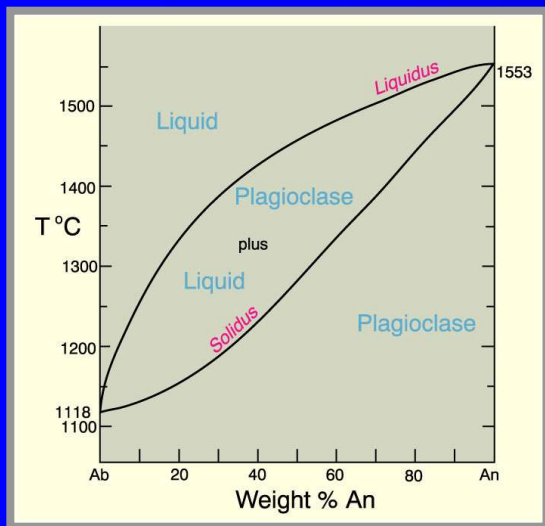


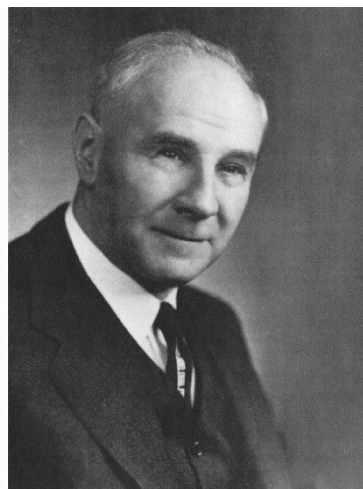
Схема химической эволюции Ключевского вулкана (Арискин и др., 1995)



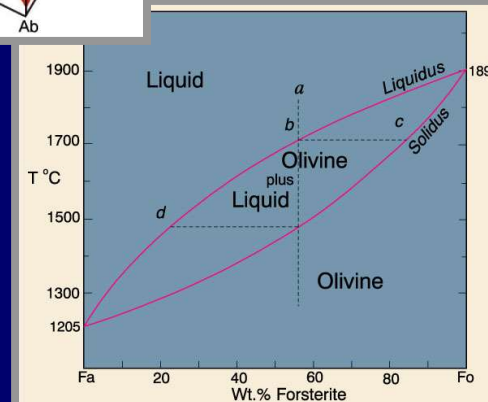
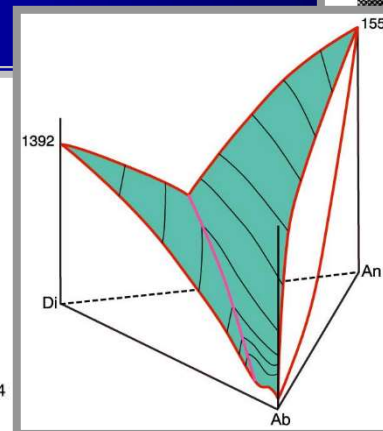
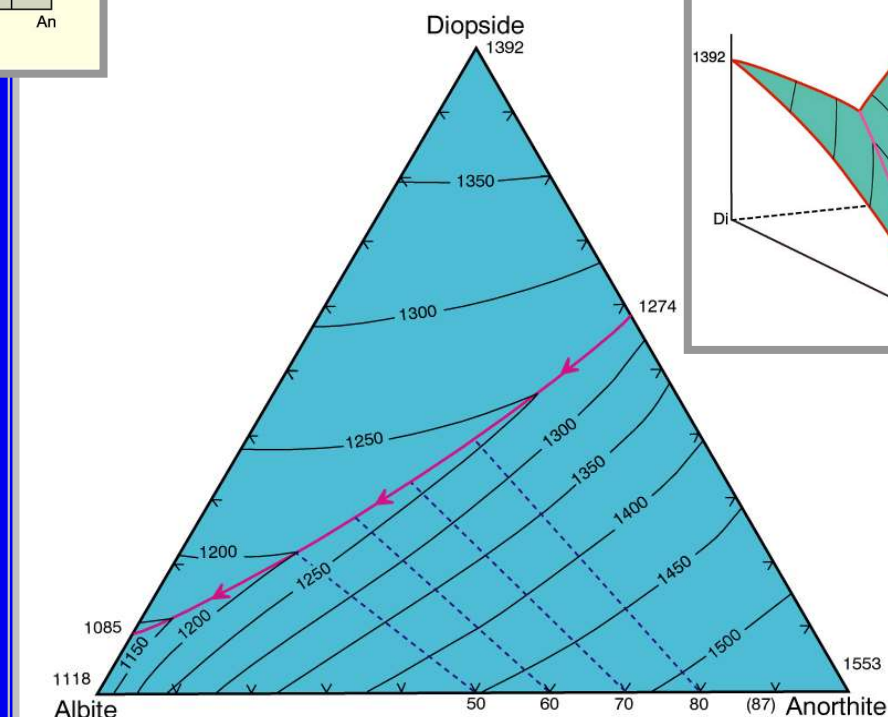
Диаграммы плавкости для простых силикатных систем



NORMAN L. BOWEN
(1887 - 1956)



Norman L. Bowen



Принципы генетической интерпретации изверженных пород (по Боуэну)

(1) Полевое изучение ассоциаций пород и выделение генетически связанных пород по результатам петрохимических и геохимических исследований;

(2) Проведение экспериментов по плавлению и кристаллизации типовых систем, максимально близких природным образцам;

(3) Анализ полевых и петролого-геохимических данных при помощи экспериментальных диаграмм плавкости;

(4) Более детальные полевые исследования с целью проверки или опровержения выводов, полученных при сопоставлении данных природных наблюдений с экспериментальной информацией.

(5) построение и исследование численных моделей петрогенетических процессов.

Bowen N.L., 1928, **The evolution of the igneous rocks:** Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 334 p.

Аналогии природных систем и топологии диаграмм плавкости

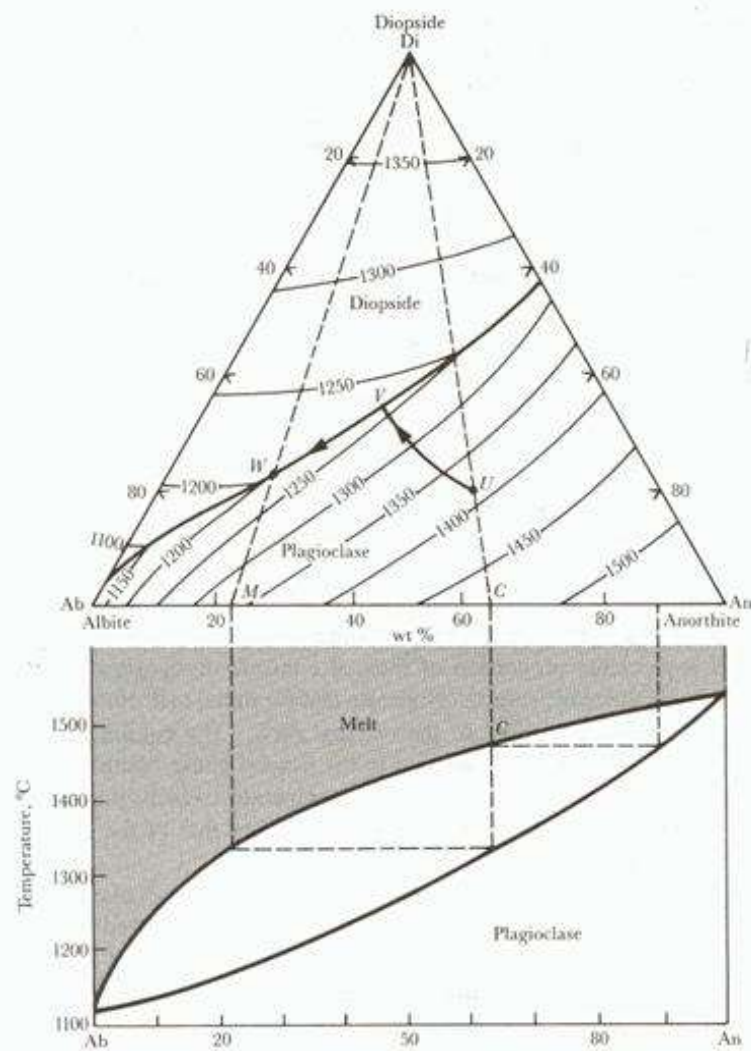
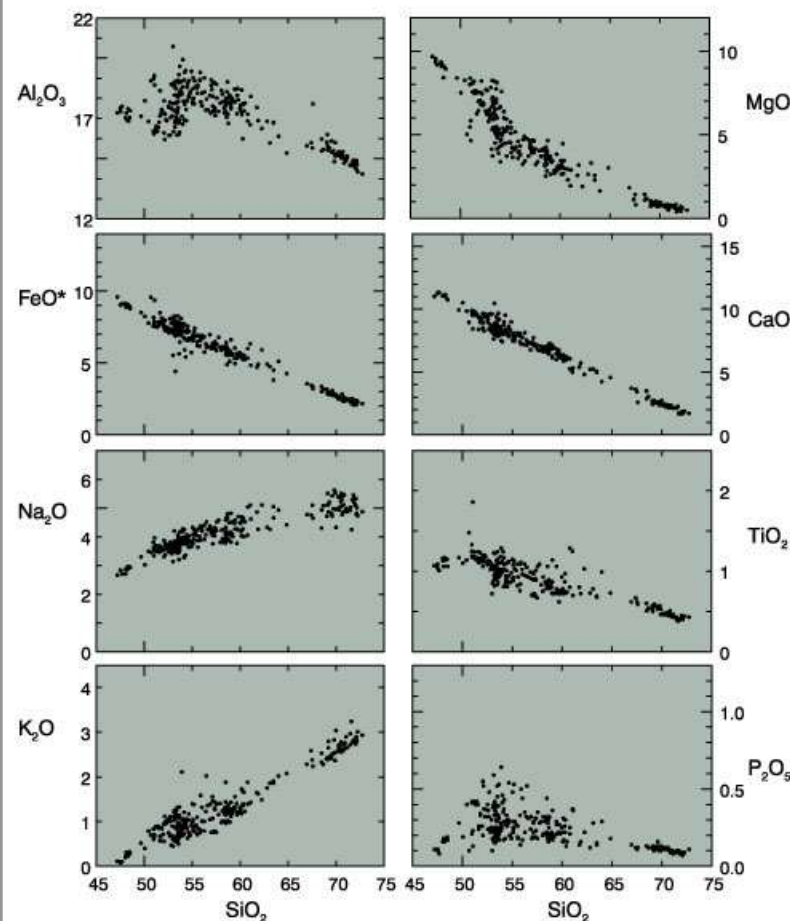
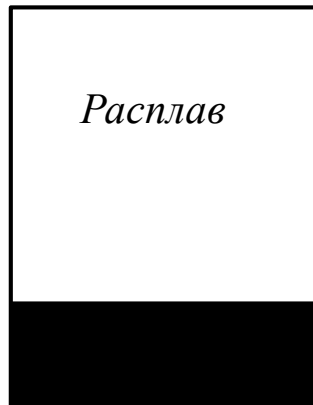


Figure 4-10 The system diopside-anorthite-albite at $P_{H_2O} = 1$ bar. See text for discussion of crystallization paths. (After Bowen, 1915; modified by Kushiro, 1973.)

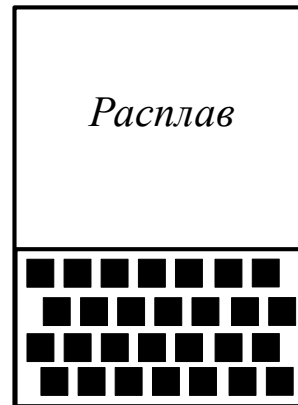


Типы фракционирования природных магм (в режиме гравитационной сепарации кристаллов)

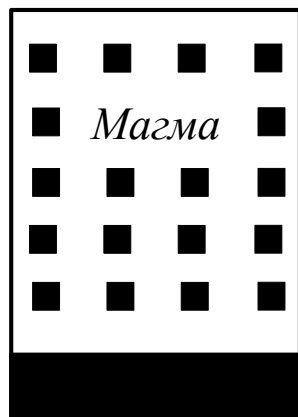
Идеальное



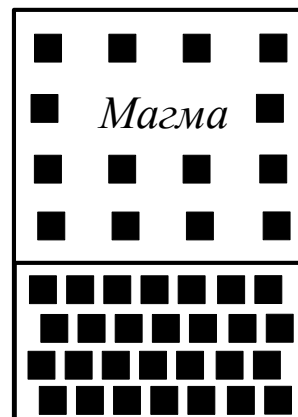
Частичное



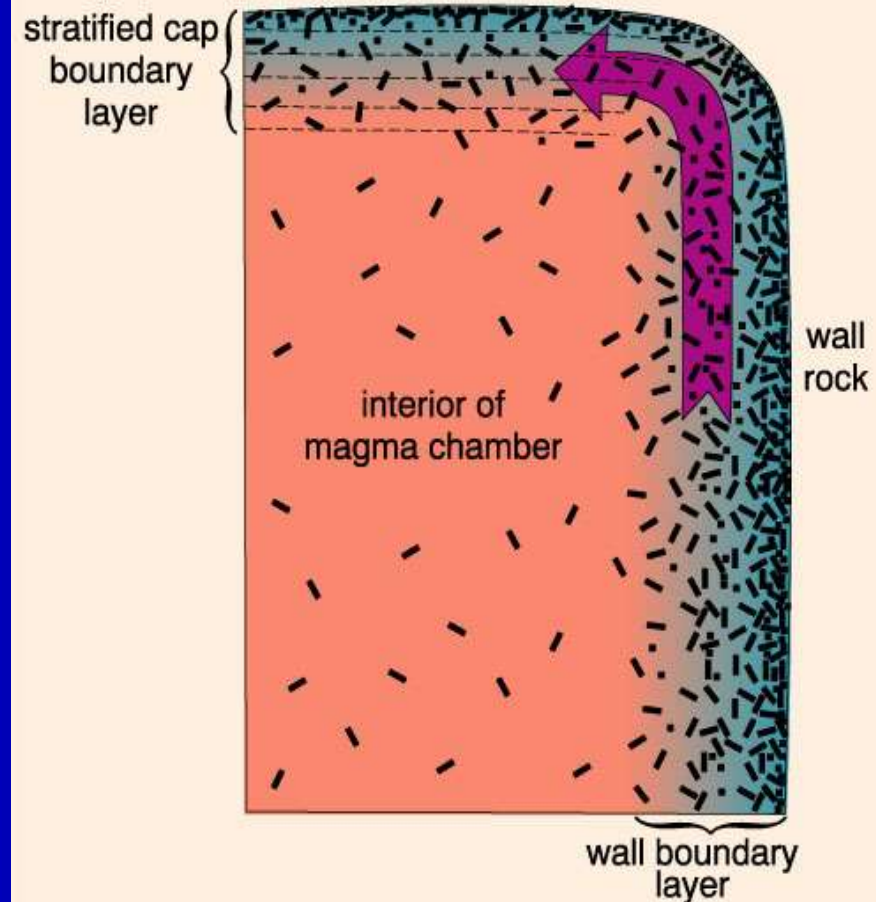
Промежуточное



Реальная ситуация

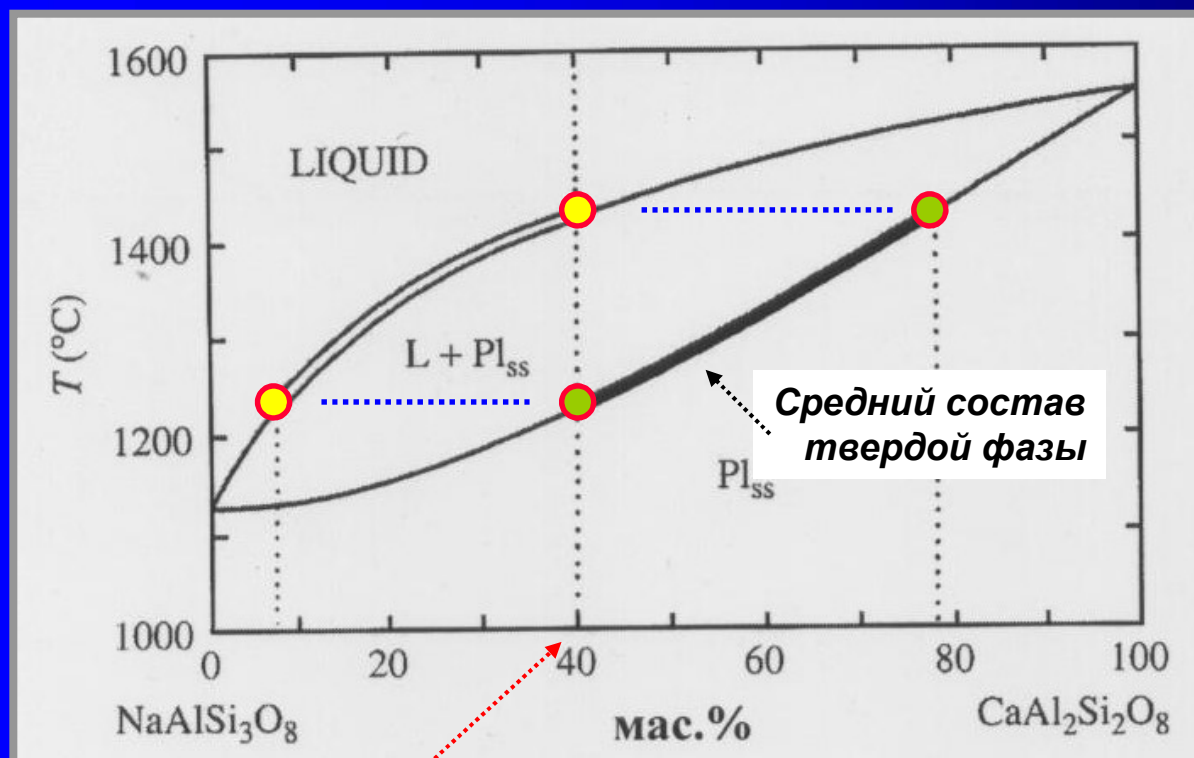


■ Кристаллы



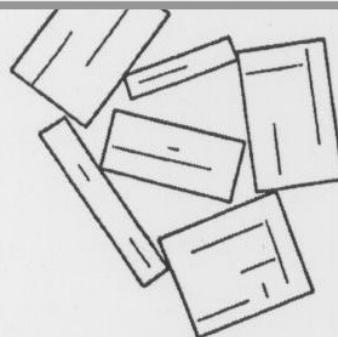
Фракционирование за счет обмена
материалом с пограничным слоем
(Langmuir, 1989) – **BLF process**

Равновесная кристаллизация в системе *Ab-Ab*



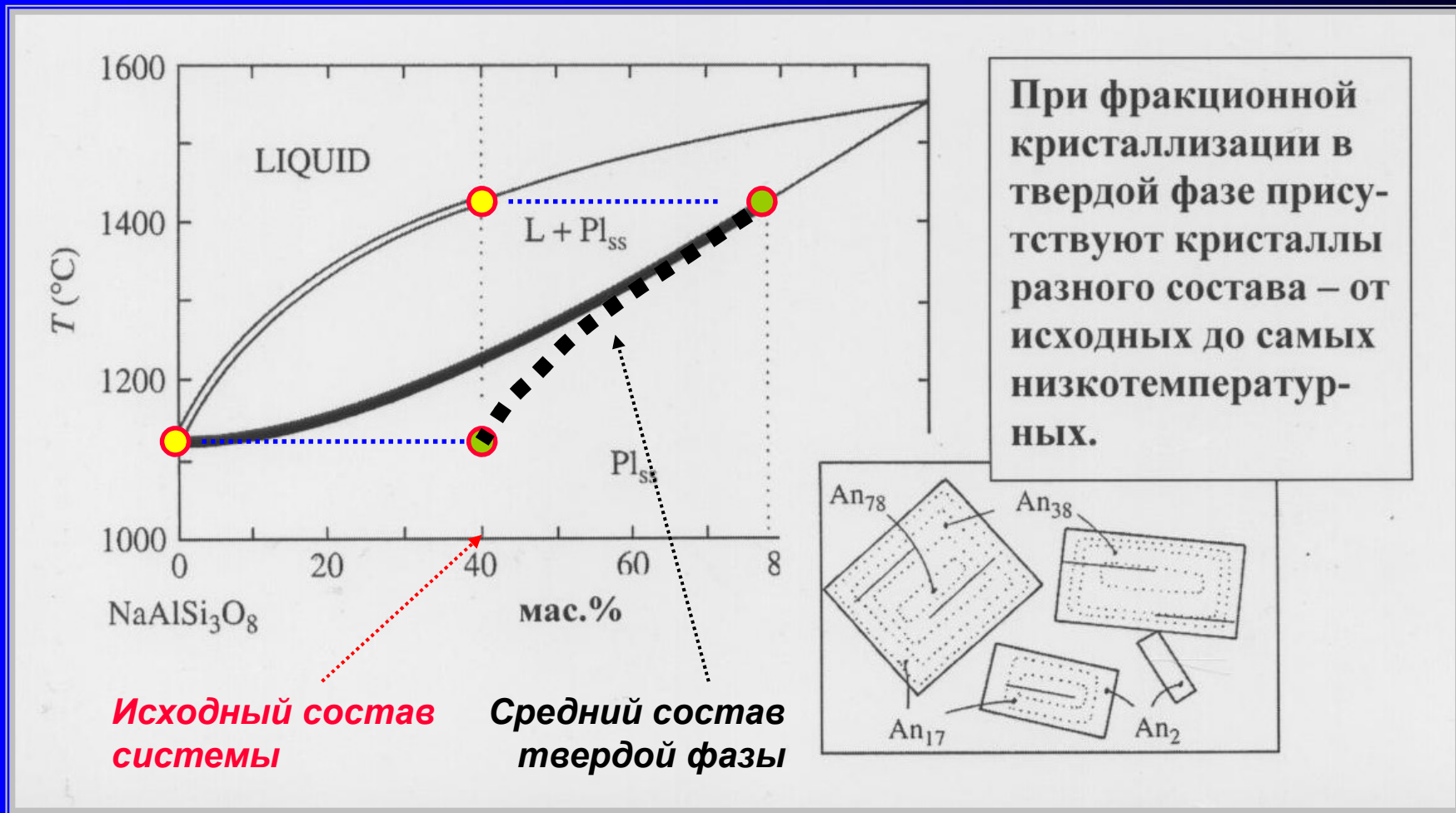
“Средний” состав Pl на каждой стадии кристаллизации постоянный и отвечает равновесию со всем объемом остаточного расплава

Исходный состав системы



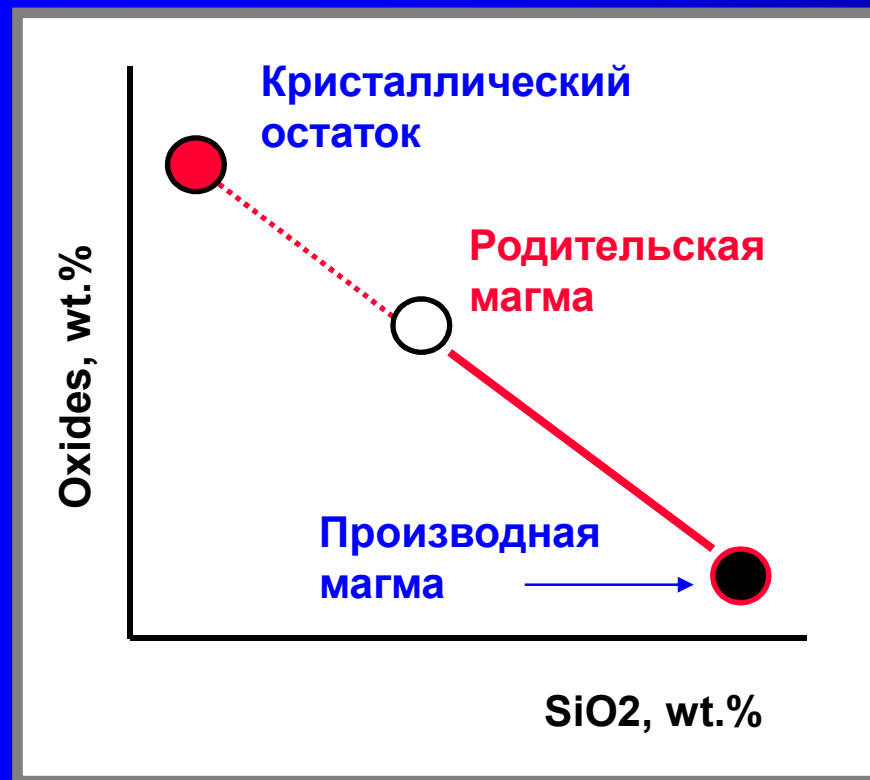
В результате равновесной кристаллизации процесс завершается образованием однородных кристаллов (An40).

Фракционная кристаллизация в системе $Ab-Ab$



“Средний” состав ранее выделившегося Pl на разных стадиях кристаллизации разный, хотя состав (бесконечно малого количества) Pl , кристаллизующегося в данный момент и отвечает равновесию со всем объемом остаточного расплава

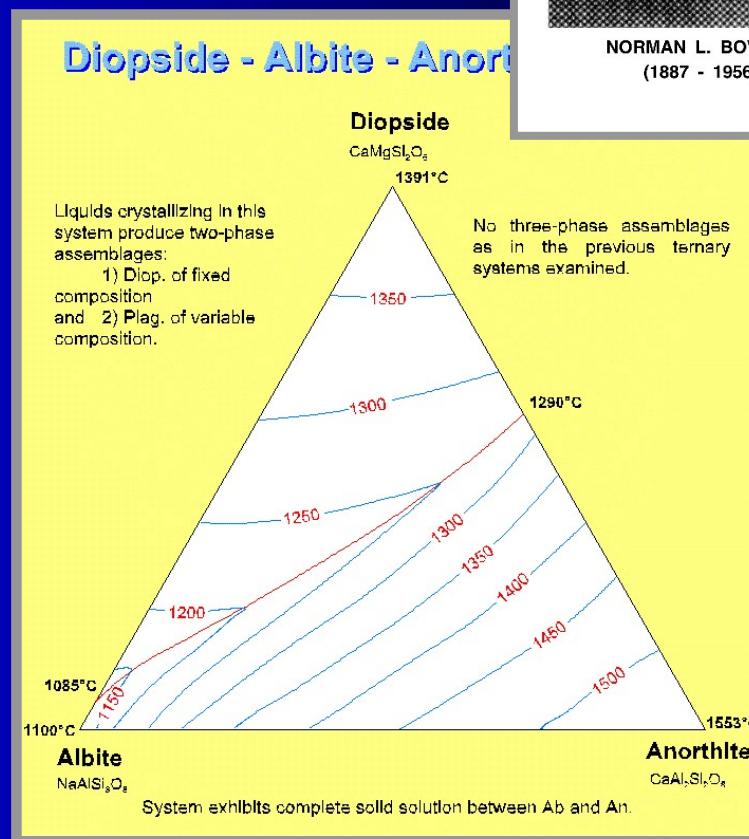
Как доказать фракционную кристаллизацию родительских магм?



Принцип построения
“диаграмм вычитания”



NORMAN L. BOWEN
(1887 - 1956)



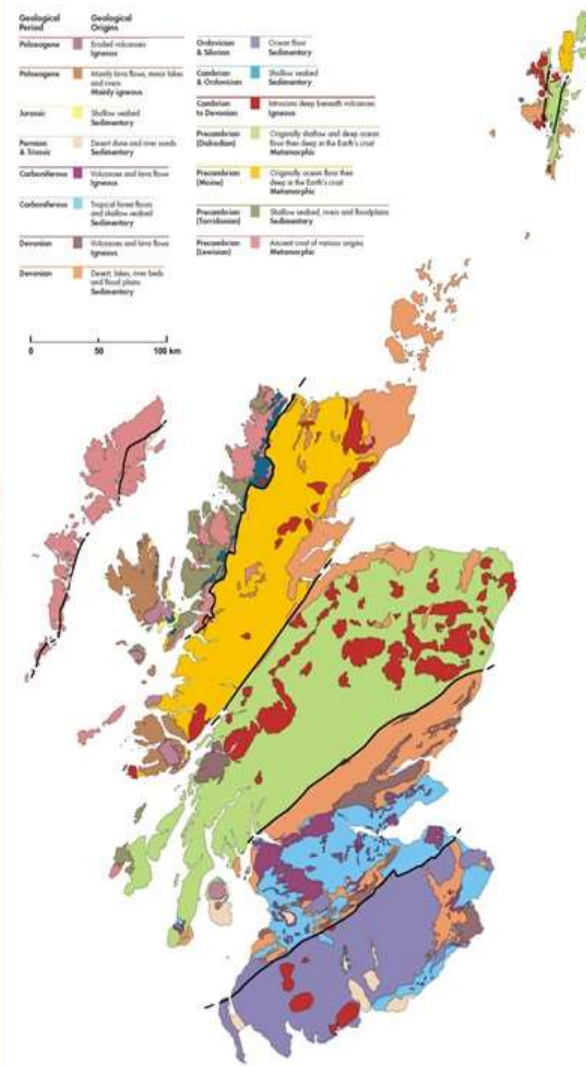
МАГМАТИЗМ ГЕБРИДСКИХ ОСТРОВОВ

как части Британо-Арктической провинции



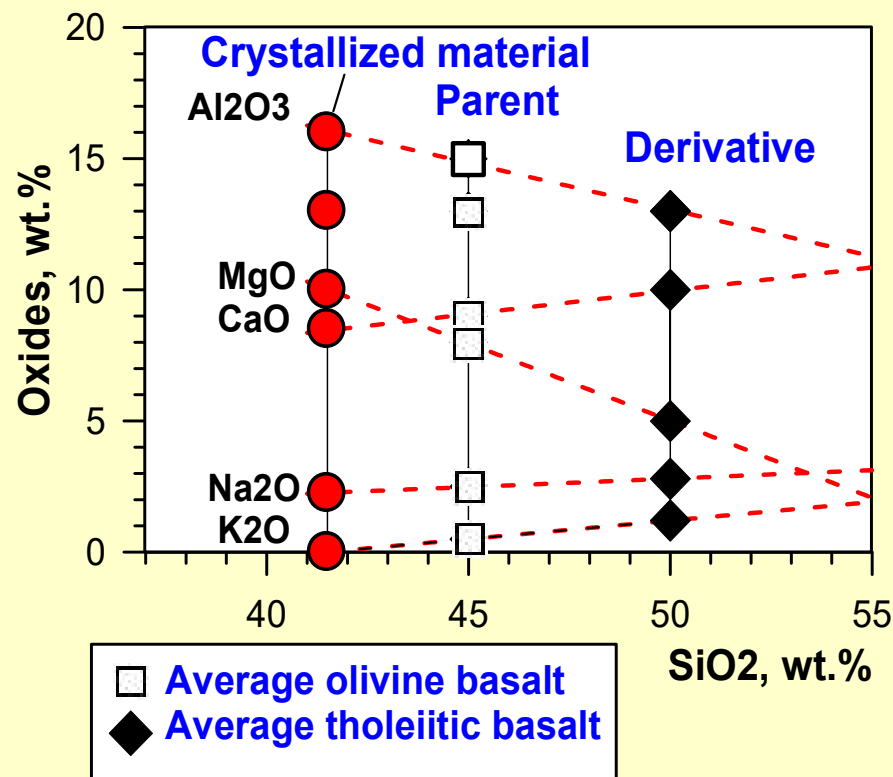
Расширим геологическую эрудицию...

*Are you ready to study of
the Geology of Scotland?*



Диаграммы вычитания (subtraction diagrams),

предложенные Боуэном для интерпретации базальтов острова Малл Гебридского архипелага (Bowen, 1928)



Bowen first suggested that more siliceous and less magnesian **tholeiitic basalts were originated from olivine-rich basalts.**

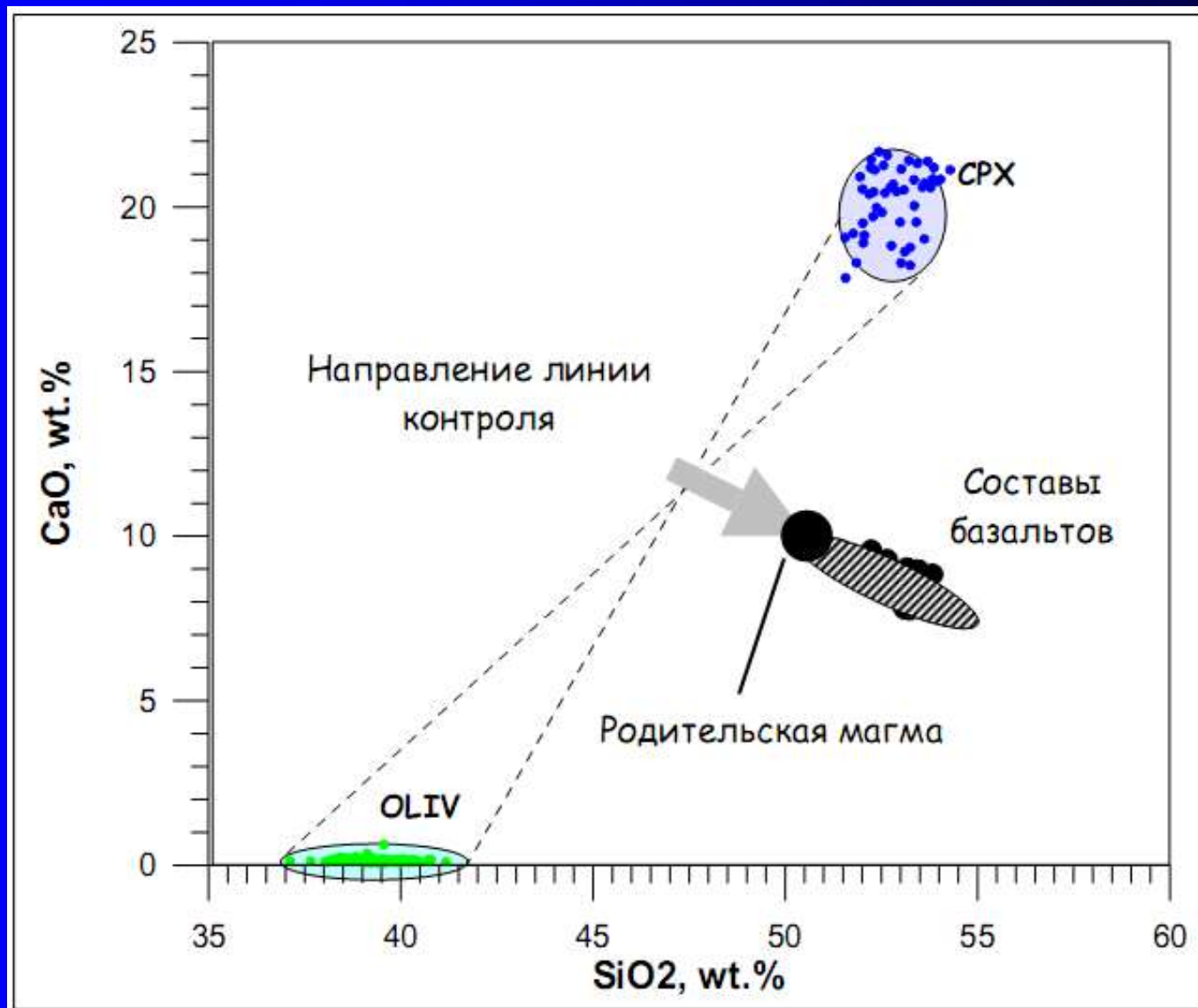
The construction of control lines allowed him to define the concentrations of components in the crystallized material.

Using the extract composition an average proportion between crystallized *Pl* and *OI* has been calculated.

It proved to be of about 2:1.

Only in the end of 60s this plotting technique has been replaced with more accurate mass-balance calculations.

Линия котектического контроля Ol-Cpx, определяющая эволюцию состава магм Ключевского вулкана



Еще примеры? Вспомним про MORBs!

Проецирование базальтовых составов на плоскость OLIV-PLAG-SIL

Компонент	Мол. %		Мол. к-во	Мол. %
SIL (=Hyp)	22.69		22.69	26.61
PLAG (An+Ab)	30.09		30.09	35.29
DIOP	14.74			
OLIV (Ol+Hyp)	32.48		32.48	38.10
SUM	100.00		85.26	100.00

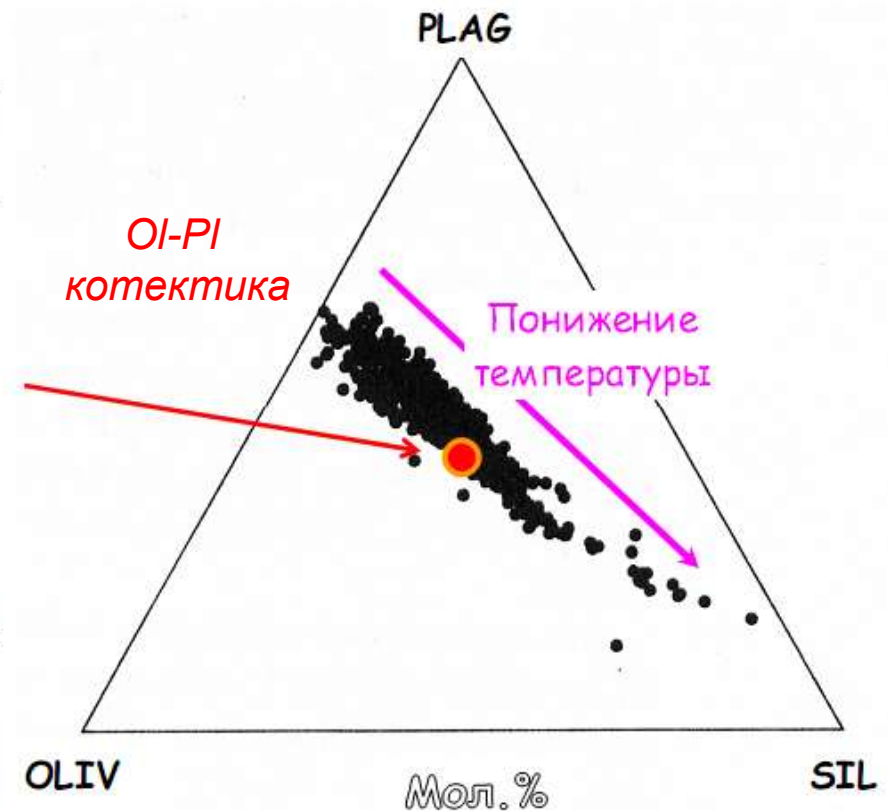
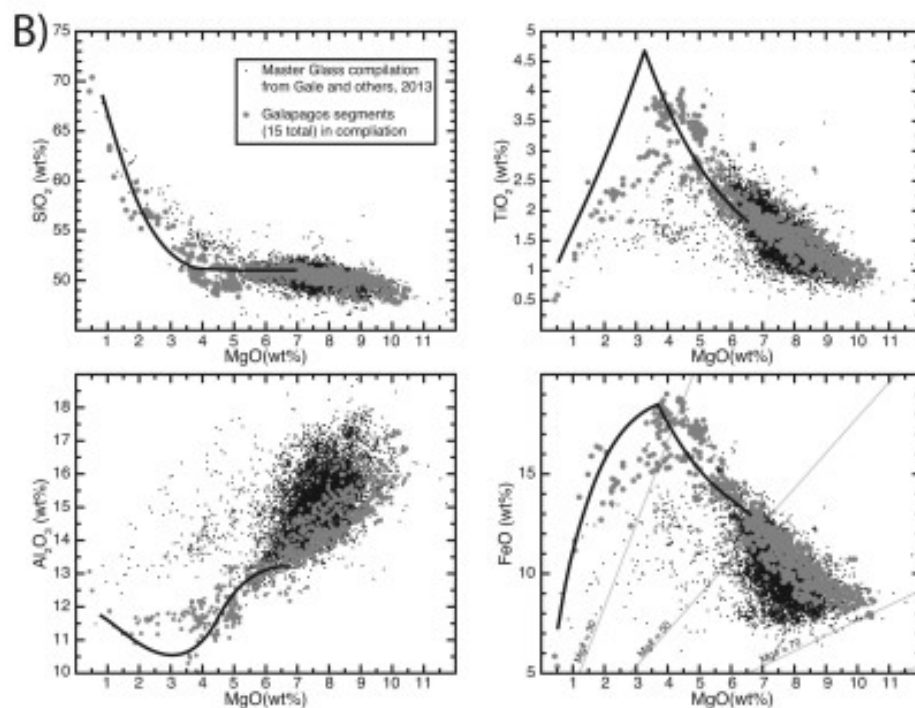
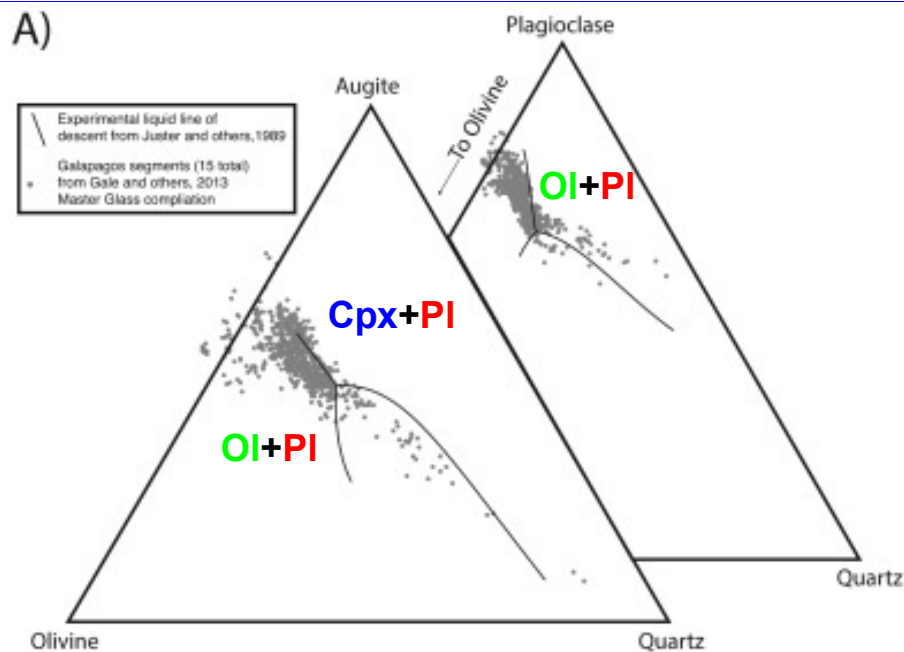


Диаграмма показывает, что совместная (котектическая) кристаллизация Ol и Pl является характерной особенностью эволюции толеитовых магм по линии накопления нормативного кремнезема.

Проекция состав толеитовых стекол срединных хребтов (MORB) из Di-вершины тетраэдра DIOP-OLIV-PLAG-SIL



В действительности
сложнее...

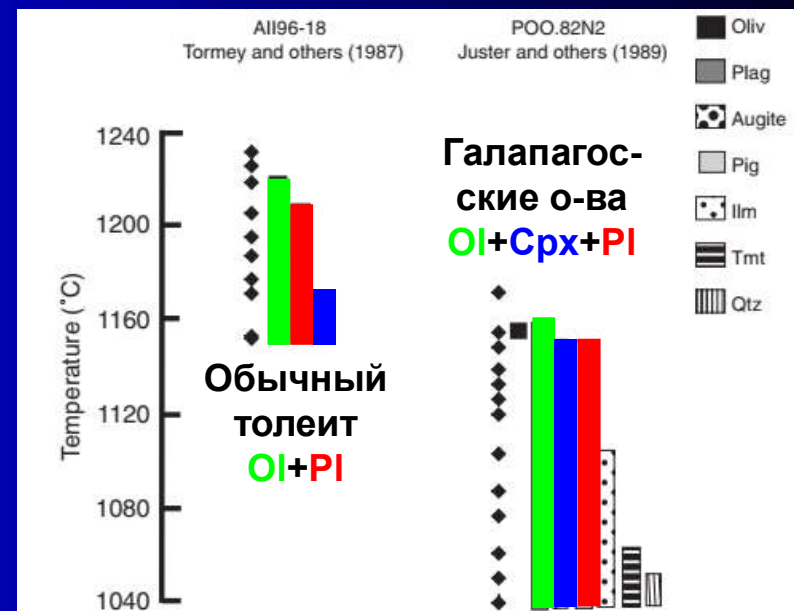


Fig. 2. Experimentally determined liquid lines of descent at 1 atm for the primitive KANE fracture zone basalt (All96-18) and the Galapagos basalt (POO.82N2). The black diamonds indicate the temperature of an experiment. All 96-18 had a higher liquidus temperature (it is more primitive) and crystallizes olivine, olivine + plagioclase, olivine + plagioclase + augite. POO.82N2 initially crystallizes olivine + plagioclase and soon reaches the peritectic reaction boundary: olivine + liquid = plagioclase + augite + pigeonite. Once all the olivine has been consumed, ilmenite joins the crystallization assemblage, followed by titanomagnetite (tmt), and then quartz.

[AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE, VOL. 318, JANUARY, 2018, P. 1-28, DOI 10.2475/01.2018.02]

MAGMATIC PROCESSES LEADING TO COMPOSITIONAL DIVERSITY IN IGNEOUS ROCKS: BOWEN (1928) REVISITED

TIMOTHY L. GROVE[†] and STEPHANIE M. BROWN

Fig. 1. (A) Saturation boundaries determined in experiments on a Galapagos lava (Juster and others, 1989) are plotted along with glass compositions measured in mid-ocean ridge basalts from 15 segments along the Galapagos Spreading Center (Gale and others, 2013) in the pseudoternary projections Olivine – Augite – Quartz and Olivine Plagioclase – Quartz using oxygen units (see Tormey and others, 1987). (B) Experimentally determined liquid lines of descent from Juster and others (1989) are plotted with glass analyses from the same 15 segments along the Galapagos Spreading Center as in figure 1A (Gale and others, 2013) on MgO vs. SiO₂, MgO vs. Al₂O₃, MgO vs. TiO₂ and MgO vs. FeO variation diagrams.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ,
ИСПОЛЬЗУЯ АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ДАННЫХ ПО
МЕТОДУ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

РАСЧЕТЫ ПО МЕТОДУ БАЛАНСА МАСС

There are a number of computer programs which can be used to interpret chemical trends on the variation diagrams. These programs are based on computations, by least-squares method, the proportions of the relative fractionating minerals.

For instance, the formation of a differentiated rock DM may be expressed as a numeric subtraction of some amount of crystallized minerals from a primitive rock PM assumed to be the parent:

$$\begin{array}{lcl} \text{Differentiated} & \text{Primitive} & \\ \text{rock} & \text{rock} & \\ \mathbf{DM} & = & \mathbf{PM - (mineral X + mineral Y + mineral Z)} \\ \text{Derivative} & & \\ \text{melt} & \text{Parental} & \\ & \text{magma} & \text{Crystallized mineral assemblage} \\ & & \text{Crystalline material (extract)} \end{array}$$

Использование метода наименьших квадратов

(basic principles and equations)

The above mentioned relations should be written in the form of **mass-balance equations** for an arbitrary element i :

$$M^{\text{DM}} C_i^{\text{DM}} = M^{\text{PM}} C_i^{\text{PM}} - M^{\text{Crys}} C_i^{\text{Crys}}$$

The indices M are masses of the parent and derivatives,

the indices C denote bulk concentrations of the element i in the parent and derivatives.

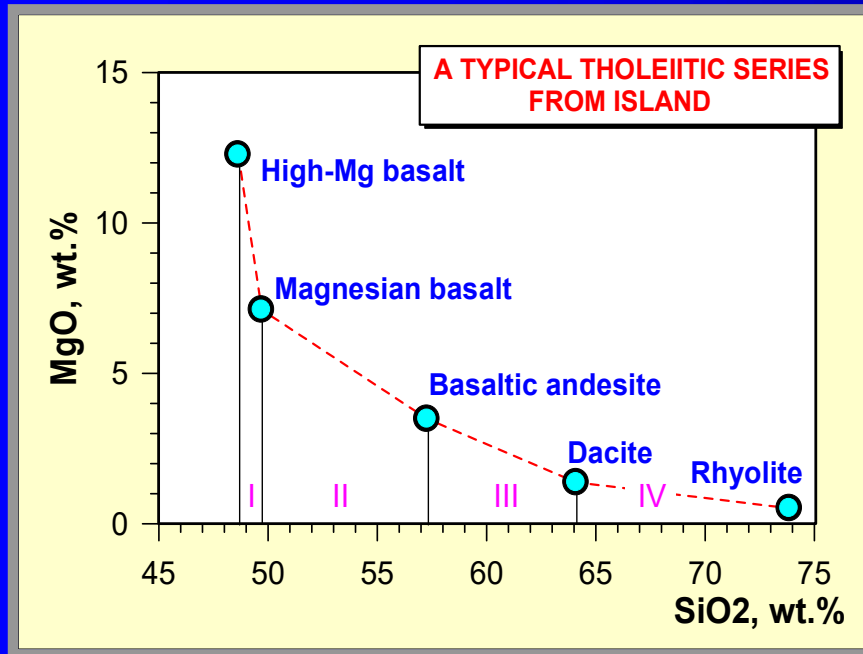
The parent – derivative equation:

$$C_i^{\text{PM}} = F^{\text{Crys}} C_i^{\text{Crys}} + (1 - F^{\text{Crys}}) C_i^{\text{DM}}$$

where $F^{\text{Crys}} = M^{\text{Crys}} / M^{\text{PM}}$ is the total degree of crystallization the parental magma.

These two equations define relationships between abundances of a specified element in the parent and fractionation products **in terms of the total degree of crystallization of the parental system.**

Моделирование “фракционного” механизма образования толеитовых серий Исландии



Interval	Parent → Derivative
I	High-Mg bas → Mg-basalt
II	Mg-basalt → Bas-andesite
III	Bas-andesite → Dacite
IV	Dacite → Rhyolite

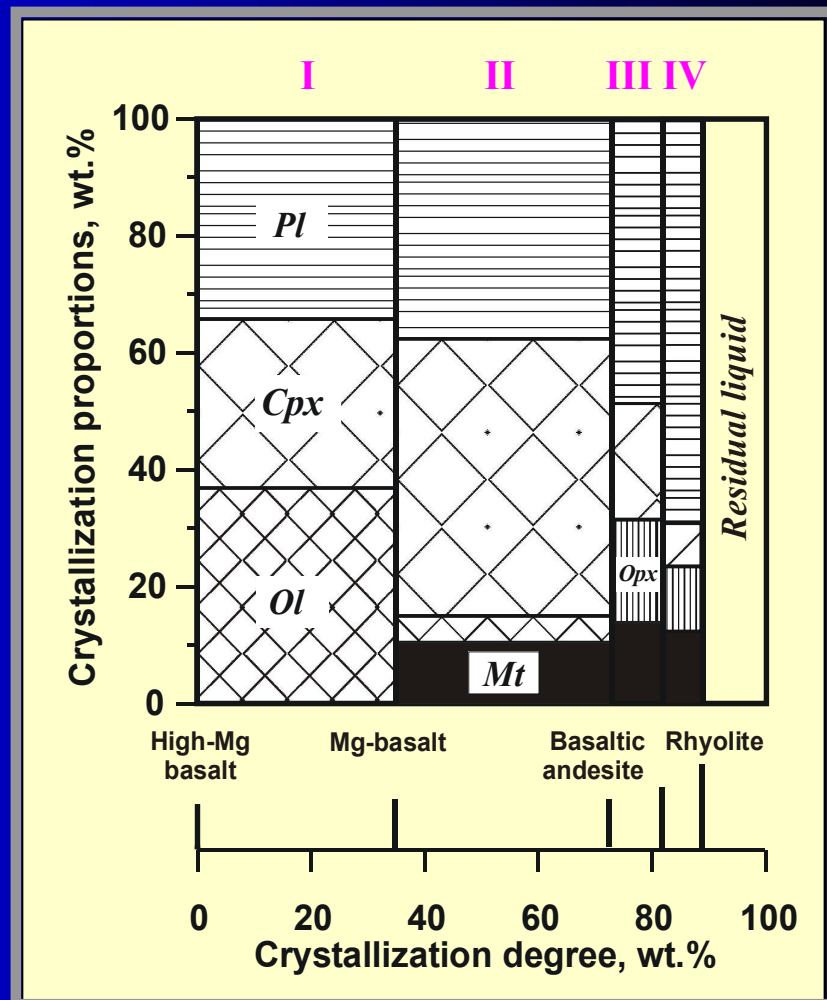
The main idea was to postulate the high-magnesia basalt as a parental magma for the whole rock sequence, whereas each of its derivatives is assumed to be an intermediate parent for more evolved rocks.

To conduct the calculations, a group of five representative samples were selected. These compositions divide the range of fractionation to four intervals.

Моделирование “фракционного” механизма образования толеитовых серий Исландии

Following from petrographic studies, a specific mineral assemblage was assumed to crystallize at the selected intervals.

Interval	Assemblage
I	<i>Ol + Pl + Cpx</i>
II	<i>Ol + Pl + Cpx + Mt</i>
III	<i>Pl + Cpx + Mt + Opx</i>
IV	<i>Pl + Cpx + Mt + Opx</i>



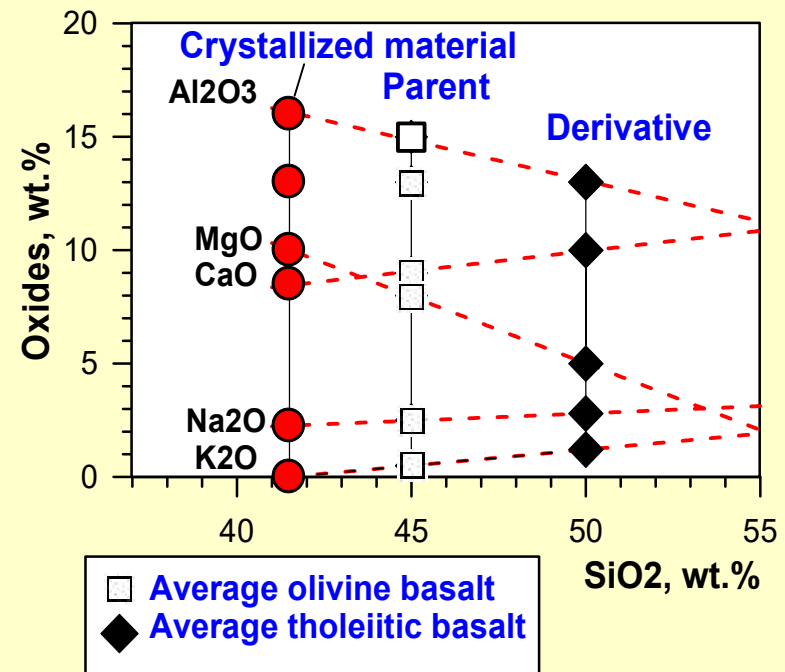
ГЛАВНЫЕ ВЫВОДЫ

The numeric solution of the mass-balance equations is a formal mathematical procedure that does not guarantee correspondence of the calculated mineral proportions to experimental data on mineral-melt equilibria.

Thus, we should treat both the graphical and the least-squares method calculations as at best semi-quantitative.

As an example of this weakness of mass-balance reconstructions one could cite the end of the story with Bowen's interpretation of the Hebrides basalts.

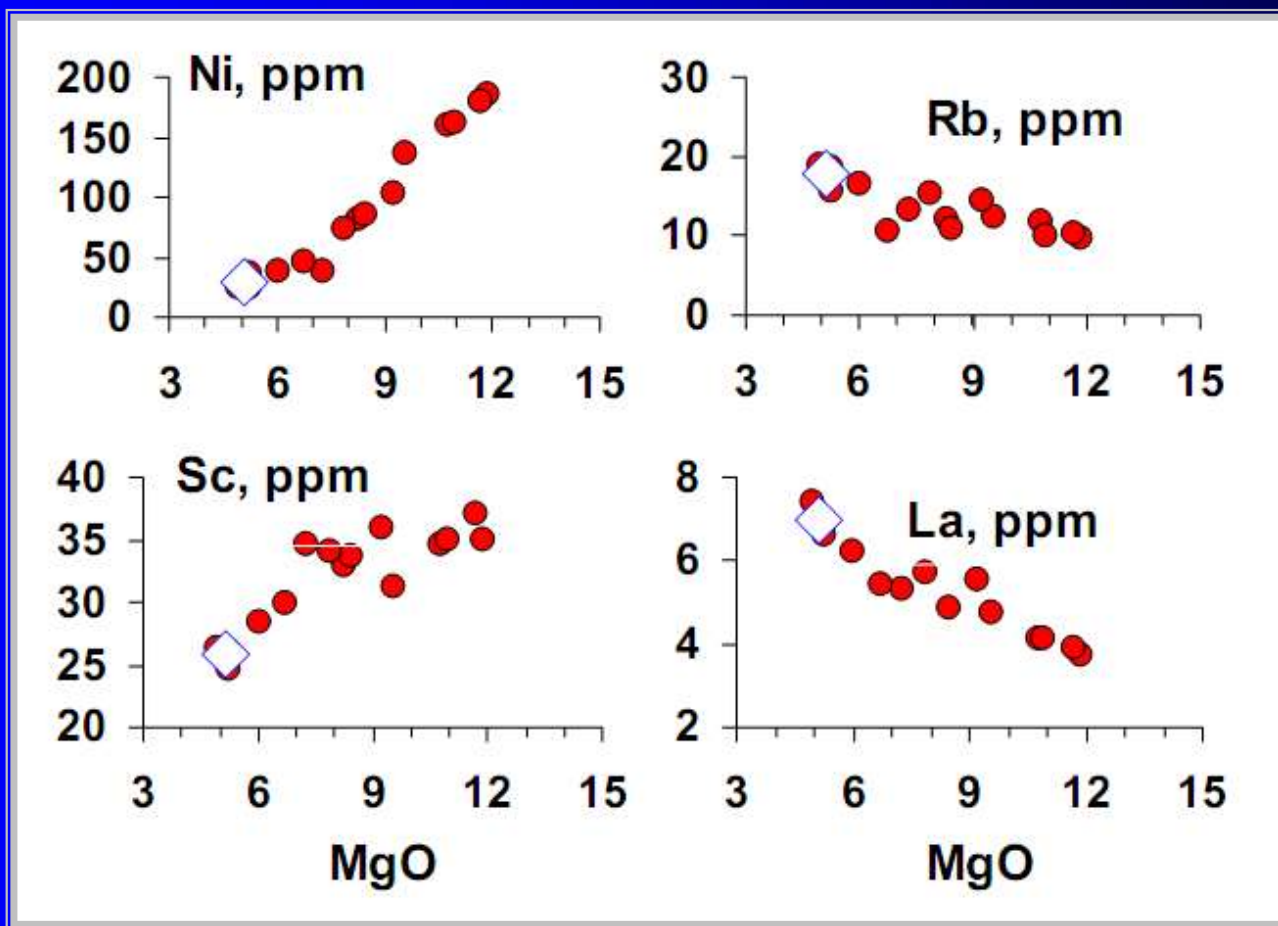
The Bowen's reconstructions



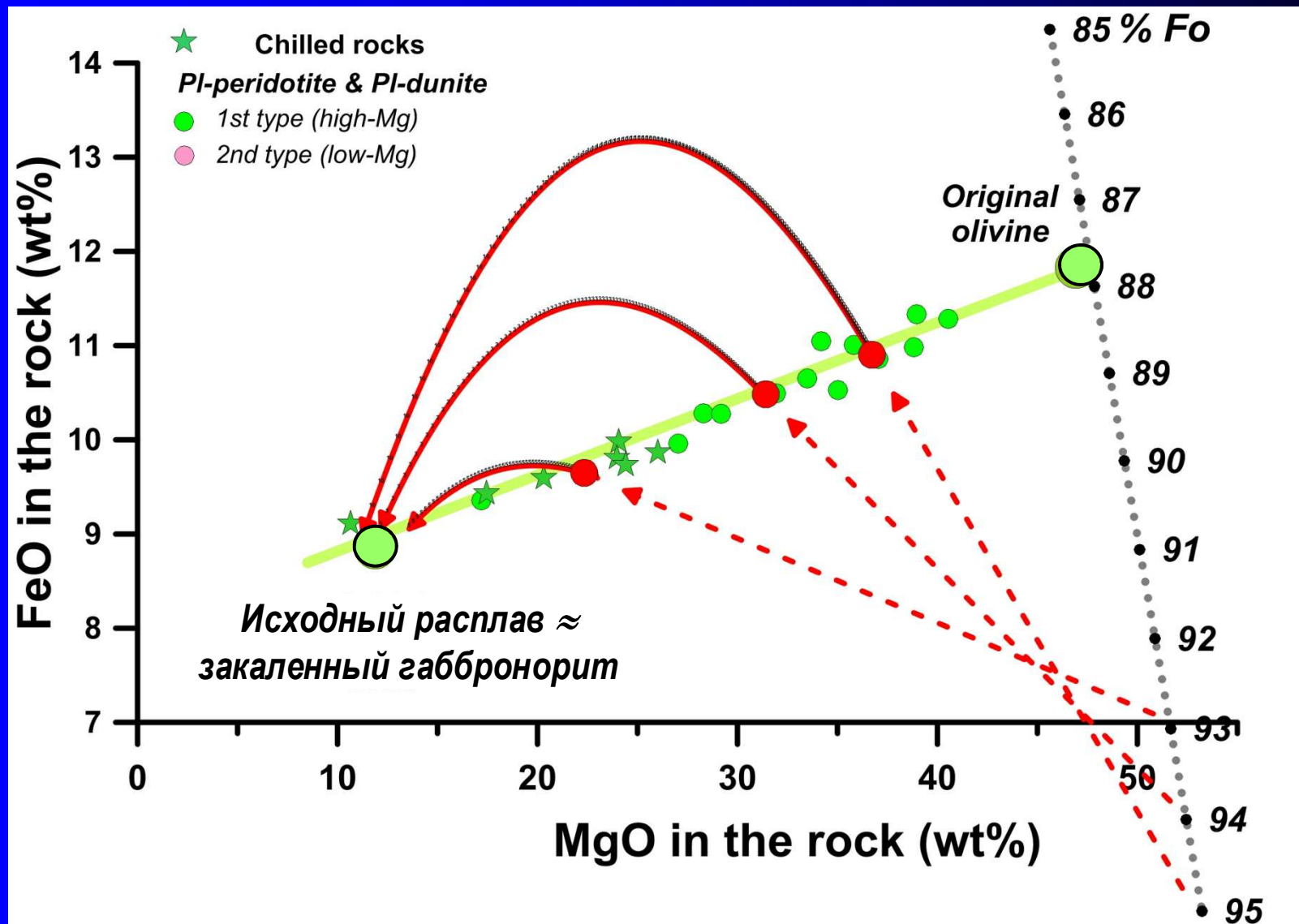
The olivine-basalt is not really a parent for the tholeiitic basalt. In fact, it gives rise to the alkaline-basaltic series.

Вариации содержаний микроэлементов в базальтовых лавах Ключевского вулкана

(данные Р.Р.Альмеева и А.А.Арискина)



Конфигурация линий эволюции состава расплава в поле кристаллизации оливина





Каждый может ошибиться...
А если о чем-нибудь долго
размышлять, уж наверняка
ошибешься!