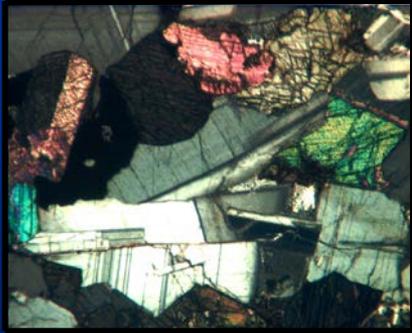


Лекция № 19

**МЕХАНИЗМЫ ВНУТРИКАМЕРНОЙ
ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ ТРАПТОВЫХ МАГМ И
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОЕНИЯ
СИЛЛОВ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

Основные закономерности строения дифференцированных силлов



Габбродолерит:
Pl + Crx ± Ol ± Mt



*Такситроопитовый
долерит:*
Ol + Pl + Crx



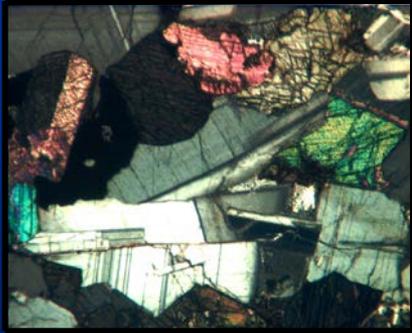
*Пойкилоопитовый
долерит:*
Ol + Pl

1. Последовательная
(снизу вверх) смена
структуры долеритов



2. Последовательное
(снизу вверх) изменение
набора первичных
котектических минералов

Основные закономерности строения дифференцированных силлов



3. Соответствие этой последовательности котектик порядку кристаллизации толеитовой магмы (по результатам экспериментальных исследований):

$(OI) \rightarrow$

$OI + PI \rightarrow$

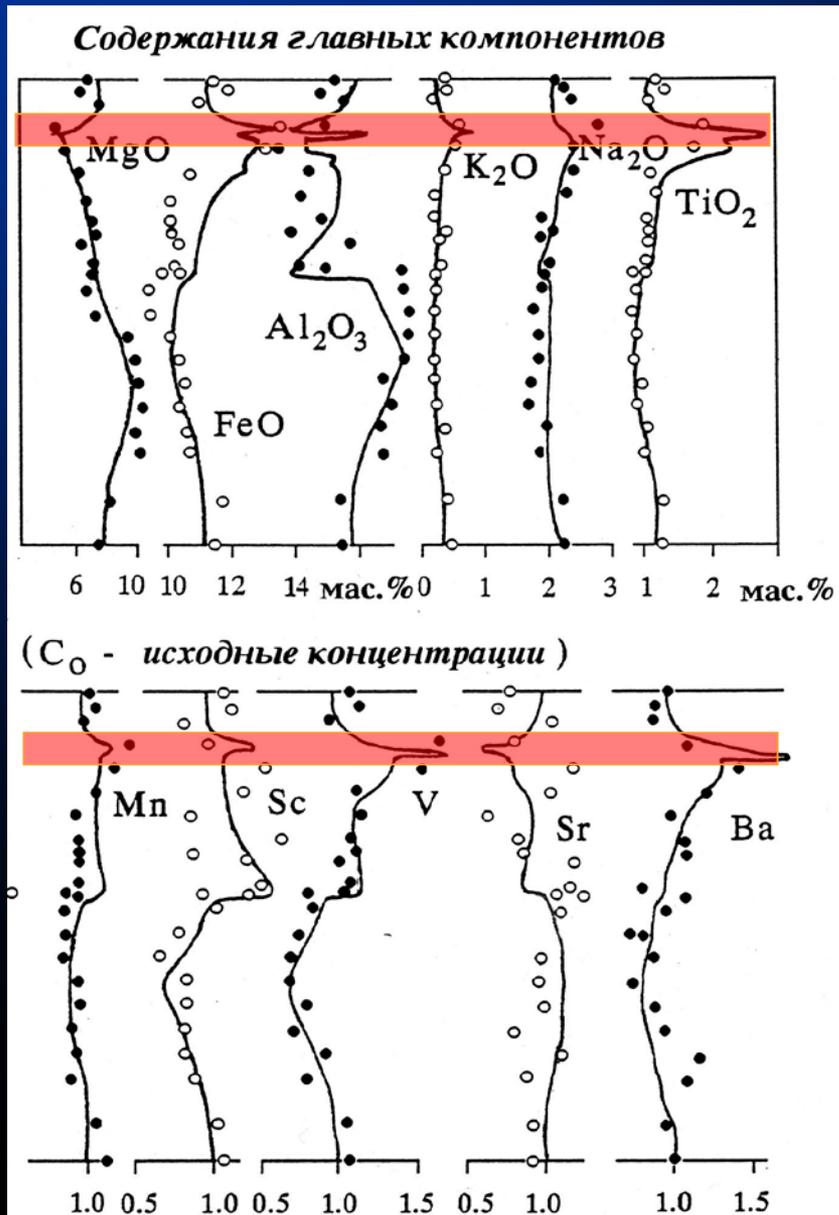
$OI + PI + Cpx$

$\rightarrow PI + Cpx \pm OI \pm Mt$



4. Как вывод - смена кристаллизующихся высокотемпературных парагенезисов низкотемпературными (снизу вверх)

Основные закономерности строения дифференцированных силлов



5. Присутствие шпиров пегматоидных феррогаббро и гранофиоров в верхах разрезов, обогащение этих пород Fe, Ti, V, K, Ba и другими несовместимыми элементами также указывает, что самые низкотемпературные продукты дифференциации магмы были сосредоточены в прикровельной части остывающих камер

Распределение главных и примесных элементов в разрезе Вавуканского интрузива (верховья р. Вилъю)

Вариации магнезиальности пород и состава оливина в разрезах интрузивов норильского типа

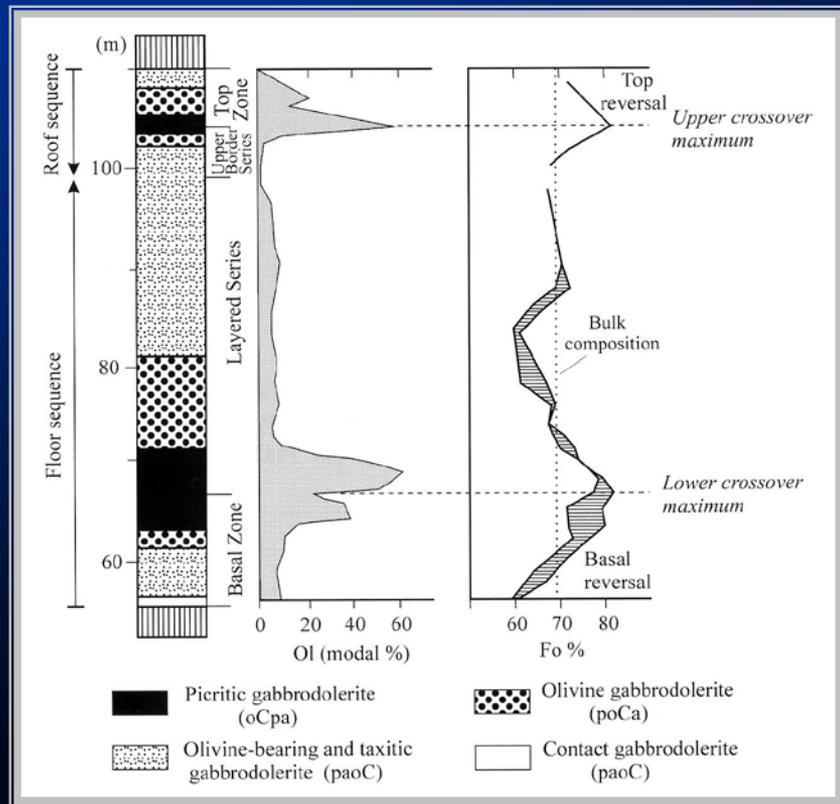


Схема строения Верхне-Талнахского интрузива

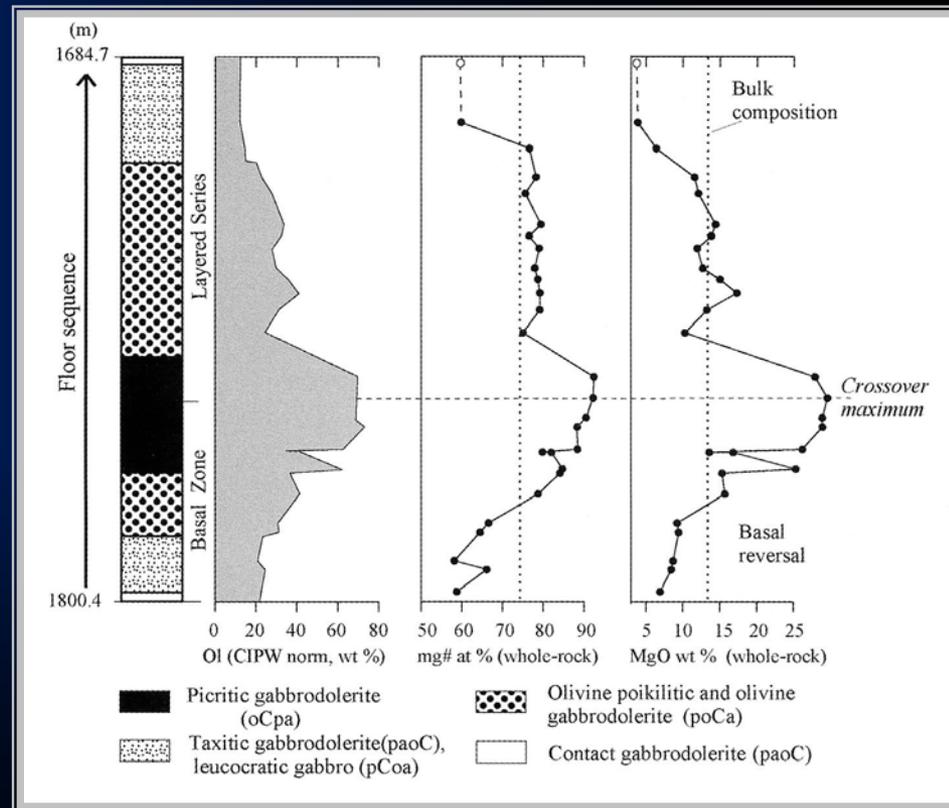
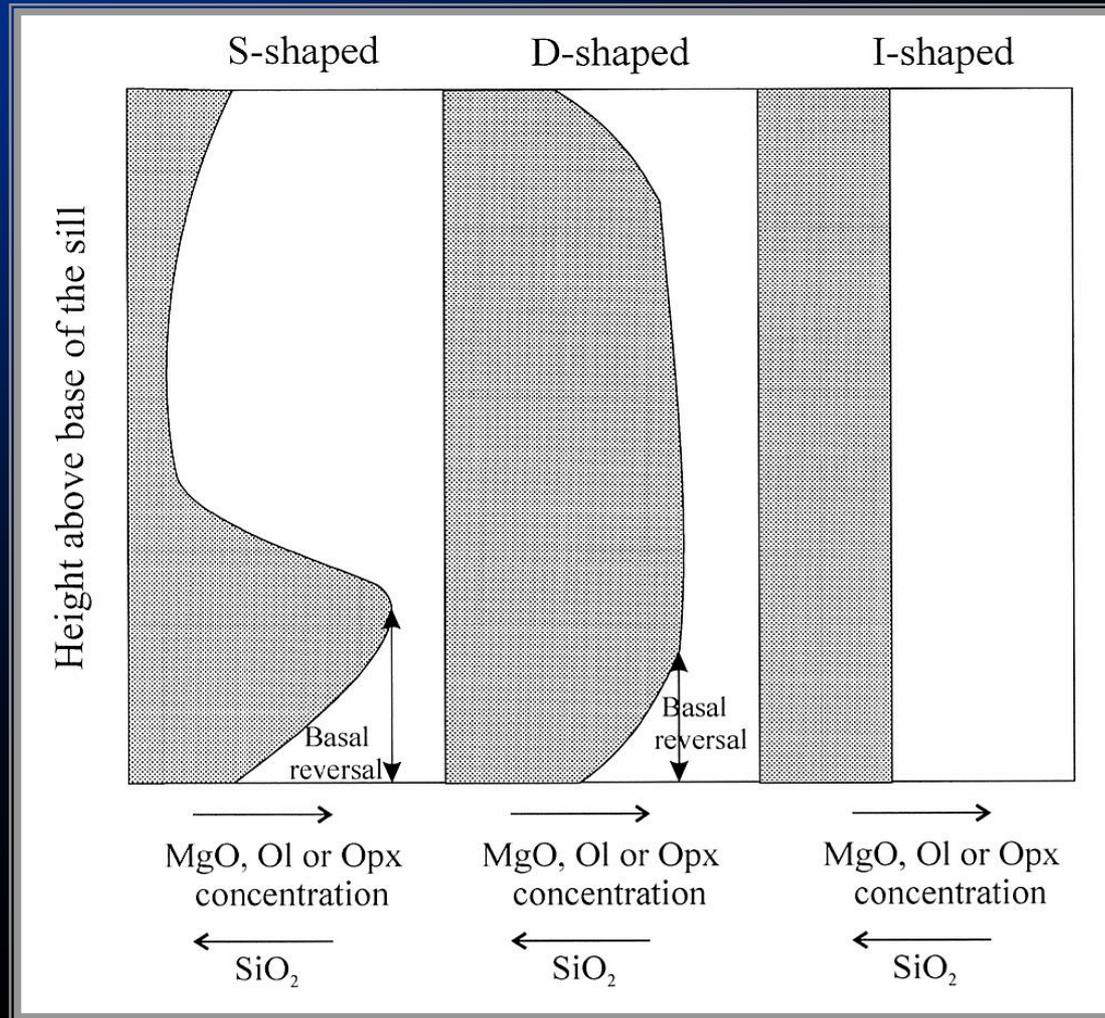
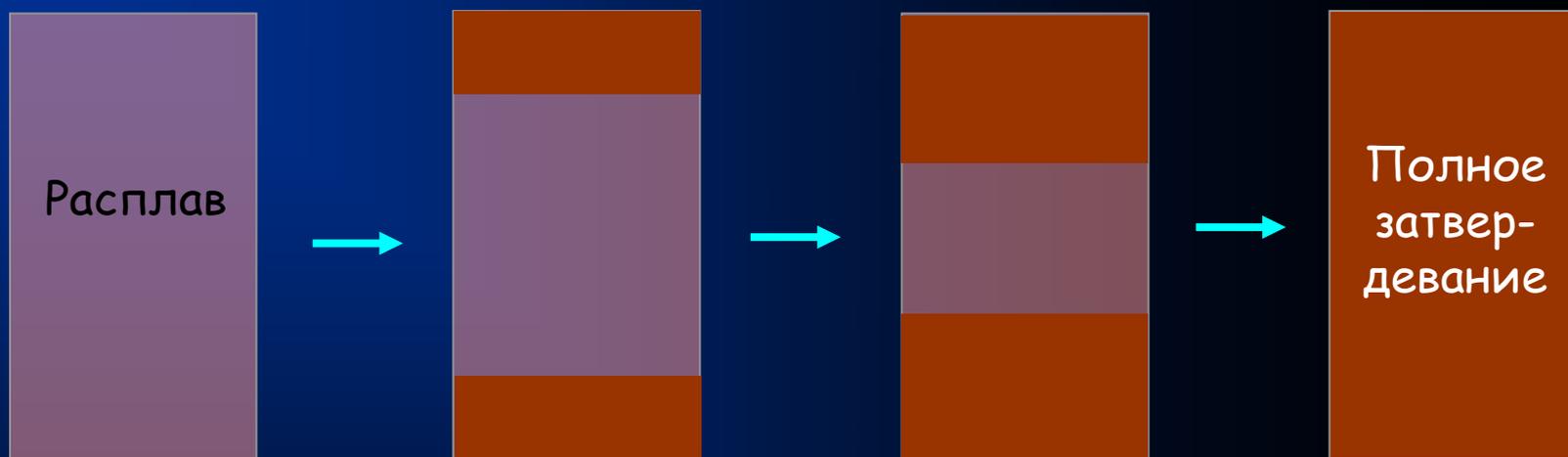


Схема строения Хараелахского интрузива

Типичные распределения минерального и химического состава пород в разрезах сильно и слабо дифференцированных силлов (Latypov, 2000)



Направленная кристаллизация по схеме синхронного и равномерного продвижения фронтов затвердевания



Время

**Ожидаемые распределения
состава магмы при
затвердевании интрузивов
по механизму направленной
кристаллизации**

Важнейшие выводы:

- (1) процессы внутрикамерной дифференциации трапповых магм развивались *по законам кристаллизации толеитовых магм*,
- (2) наблюдаемые особенности строения этих маломощных интрузивов несут *признаки фракционирования исходного магматического расплава*,
- (3) характер пространственного распределения составов пород и минералов, их структурных соотношений указывают, что фракционная кристаллизация магмы в камере сопровождалась *накоплением твердой фазы снизу вверх*,
- (4) Асимметрия строения дифференцированных силлов – т.е. накопление относительно высокотемпературных минералов (ОI и P1) внизу разрезов и концентрирование легкоплавких остаточных дифференциатов в прикровельной части магматической камеры.

Физико-химические аспекты дифференциации магмы

Термодинамика

Порядок кристаллизации
Эволюция состава
расплава и минералов

Динамика

Типы конвекции магмы в
камере
Скорости продвижения
фронтов кристаллизации
Оседание кристаллов

Асимметрия строения силлов:

Распределение минералов

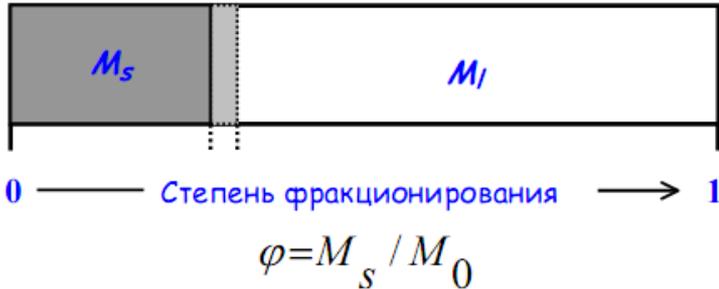
Вариации структуры пород

Распределение состава пород
(главные и примесные элементы)

Вспомним уравнение про уравнение Рэлея – Макфри...

СХЕМА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

Кристаллы + Жидкая фаза = M_0



ГЛАВНОЕ УРАВНЕНИЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФОРМЕ

$$dx_i^l = \frac{x_i^l - x_i^s}{1 - \varphi} d\varphi$$

Уравнение Рэлея-Макфри

или с учетом $k_i^s = D$
(коэффициенты распределения
“твердая фаза - расплав”):

$$x_i^l = x_i^{l(0)} (1 - \varphi)^{D-1}$$

УРАВНЕНИЕ В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЕ

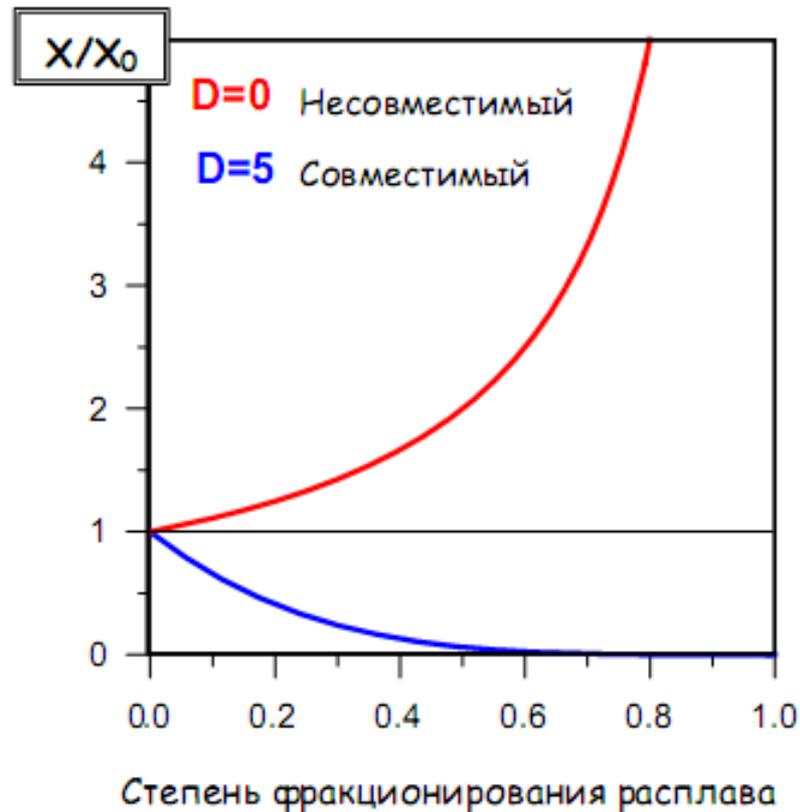
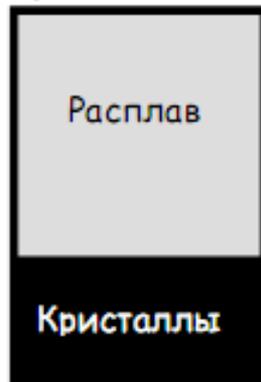
$$x_i^l = x_i^{l(0)} (1 - \varphi)^{k_i^s - 1}$$

$x_i^{l(0)}$ — содержание элемента
в исходной жидкости

Эволюция состава расплава при идеальном фракционировании

$$x_i^l = x_i^{l(0)} (1 - \varphi)^{D-1}$$

Идеальное
разделение



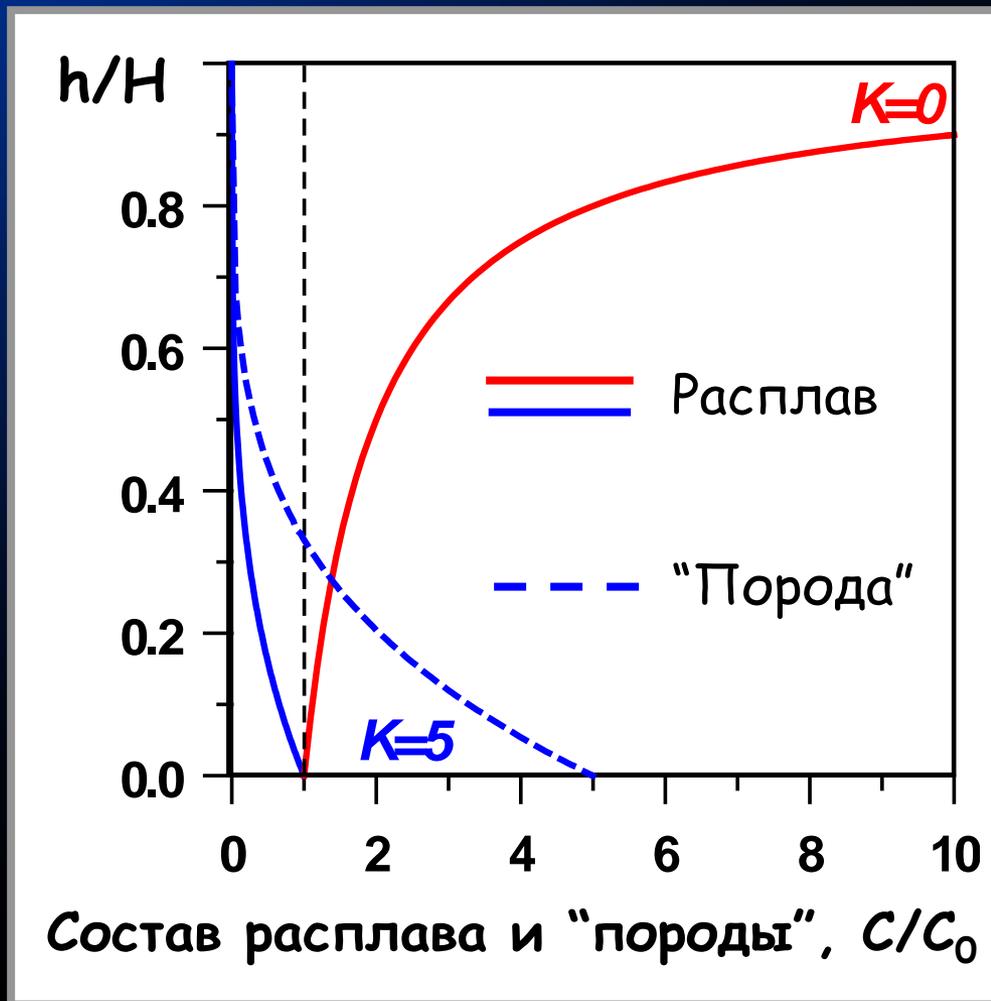
Эволюция состава "магмы" и "породы" при идеальном фракционировании в камере

Состав
расплава

$$C_i^L$$

Состав
"породы"

$$C_i^S$$

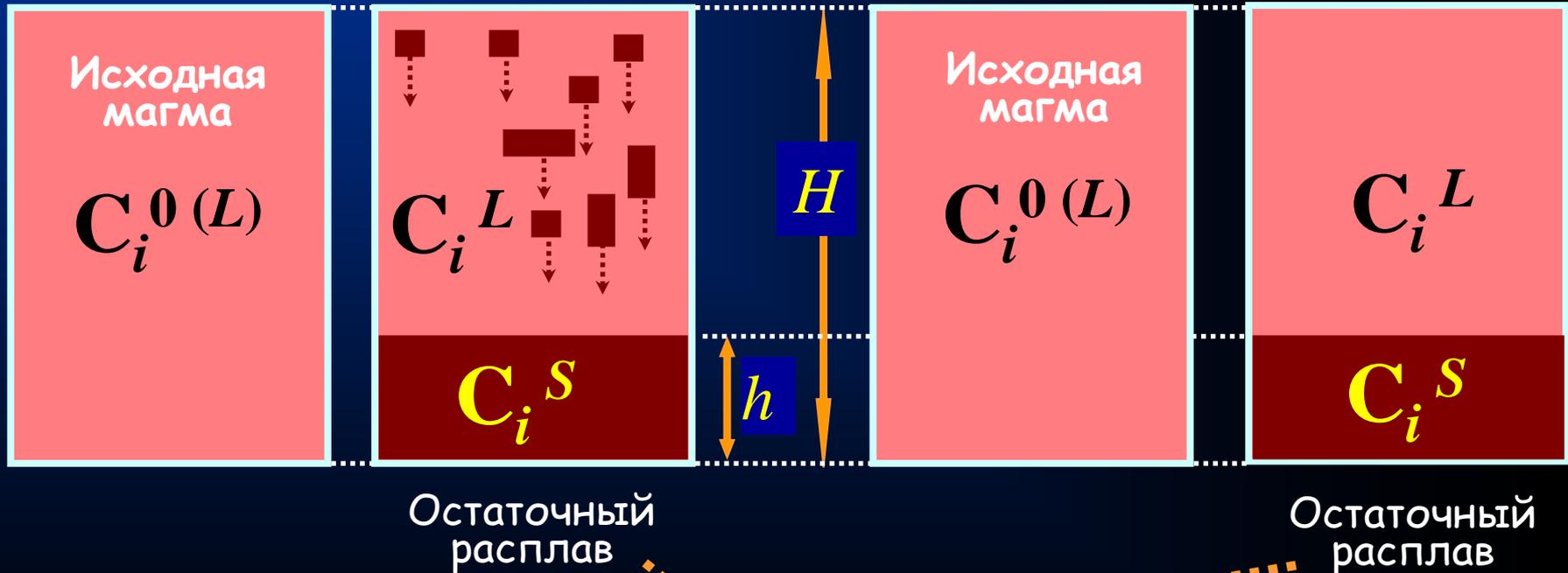


Состав расплава и "породы", C/C_0

Два главных механизма внутрикамерной дифференциации магм

Оседание кристаллов

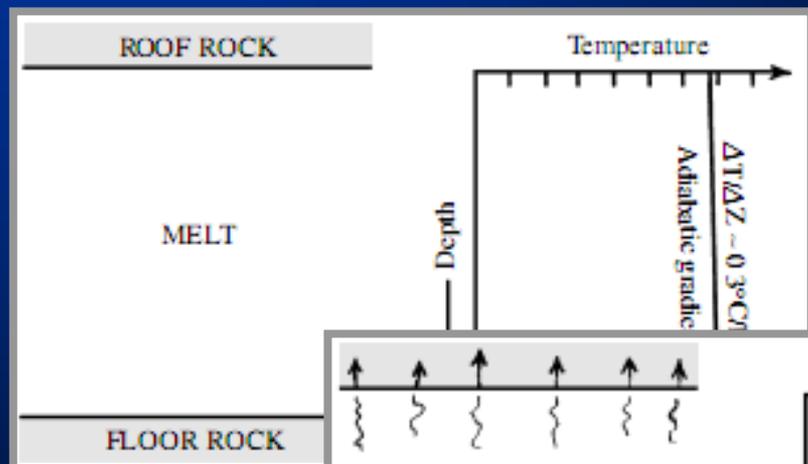
Направленная кристаллизация



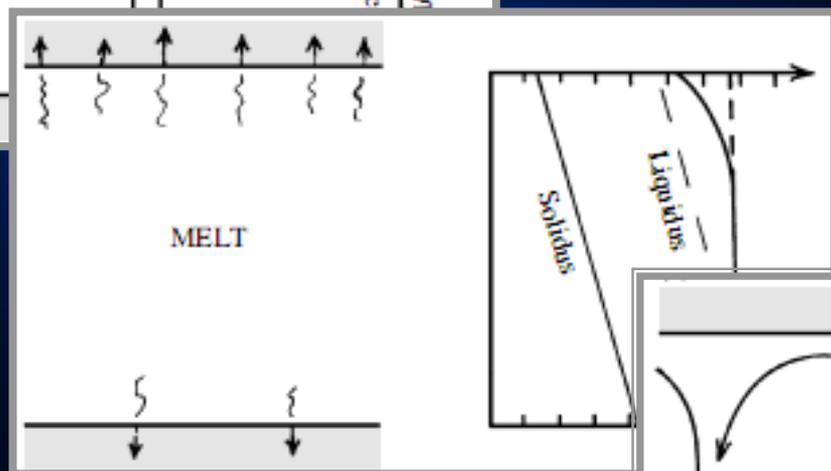
$$C_i^L = C_i^0(L) (1 - \varphi)^{K-1}, \quad C_i^S = K C_i^L,$$

где $\varphi = h / H$

Теоретический базис концепции направленной (*in situ*) кристаллизации от дна камеры

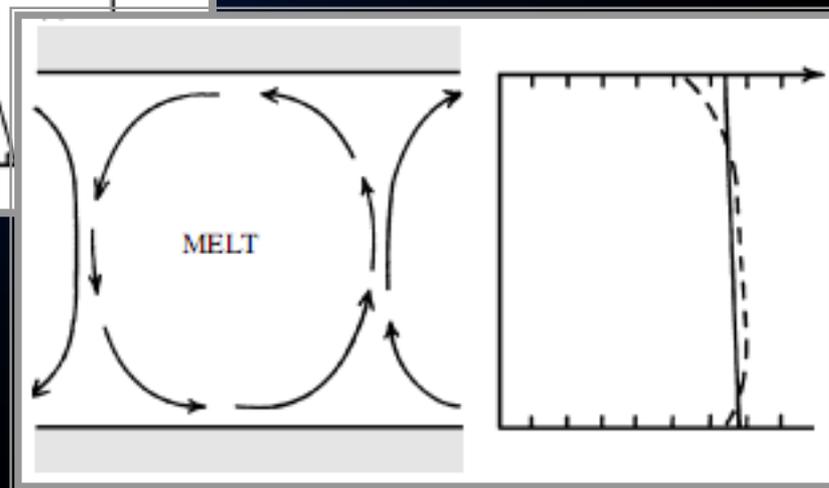


Начальное распределение температуры



Последствия охлаждения кровли и дна камеры

Развитие термической (Бенаровской) конвекции

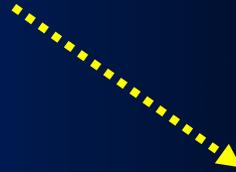
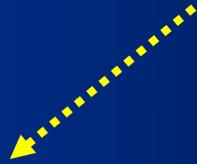


Адиабатическое распределение температуры в конвектирующем расплаве

Противоречия применения концепции направленной кристаллизации для маломощных тел (силлов)

- (1)** Реальные коэффициенты диффузии компонентов в силикатной жидкости настолько малы, что *диффузионный перенос не в состоянии обеспечить сколь-нибудь значимое фракционирование* основного объема магмы
- (2)** *реальные магмы не бывают перегреты относительно ликвидуса* – они всегда несут некоторое количество кристаллов
- (3)** *Нет смысла сопоставлять разницу ликвидусных температур для тел мощностью порядка 100 м* – эти различия не превышают долей градуса.
- (4)** *Асимметрия строения дифференцированных силлов* – наличие S-образных профилей распределения состава пород и минералов

Две разновидности седиментационной переноса кристаллических фаз от кровли к дну камеры



Стоксовское оседание кристаллов – кристаллических индивидов

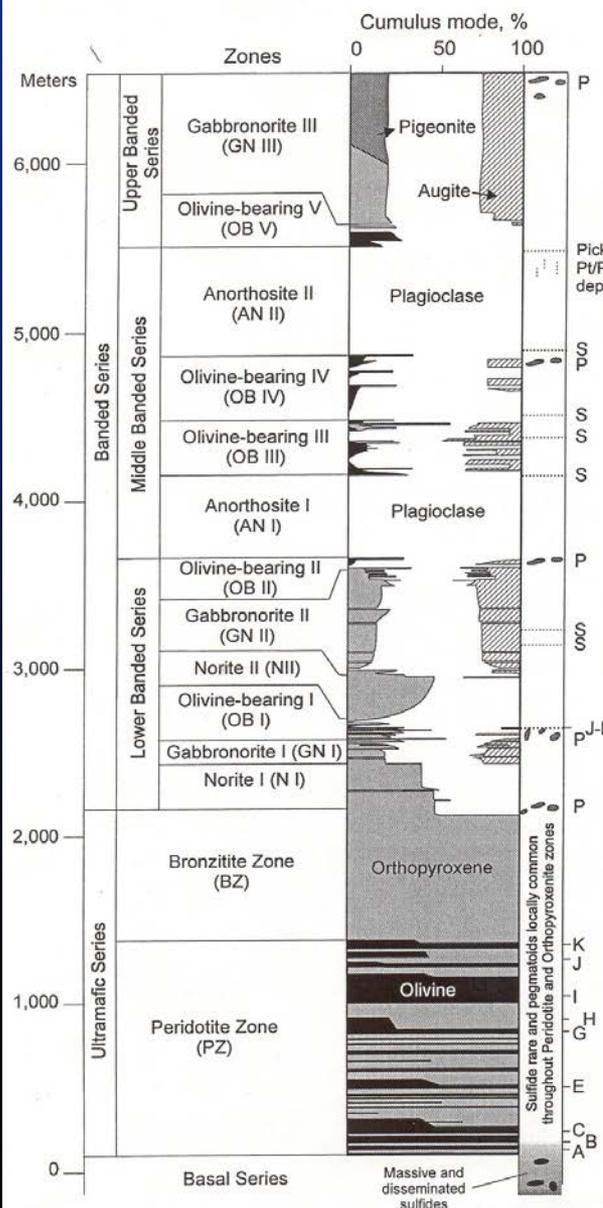
Суспензионные течения – направленные вниз потоки магмы, относительно обогащенной взвешенными в ней кристаллами

Главная проблема – трудности интерпретации структуры интрузивных пород, которые редко имеют порфировидный облик и обычно не несут признаков оседания отдельных кристаллов

Такой перенос должен включать полную контекстическую ассоциацию минералов и их срастаний, возможно даже вместе с межзерновым расплавом.

Эта предполагает образование “непорфировых” долеритовых структур, включающих и ойкокриссты и отдельные вкрапленники кумулусных фаз.

Цитируем Хесса (Hess, H.H., 1960. *Stillwater Igneous Complex, Montana. Geol. Soc. Amer. Memoir 80, 230 p.*)



“...ниже кровли интрузива может возникать слой жидкости, который становится плотнее подстилающего его расплава вследствие охлаждения и насыщения взвешенными кристаллами.

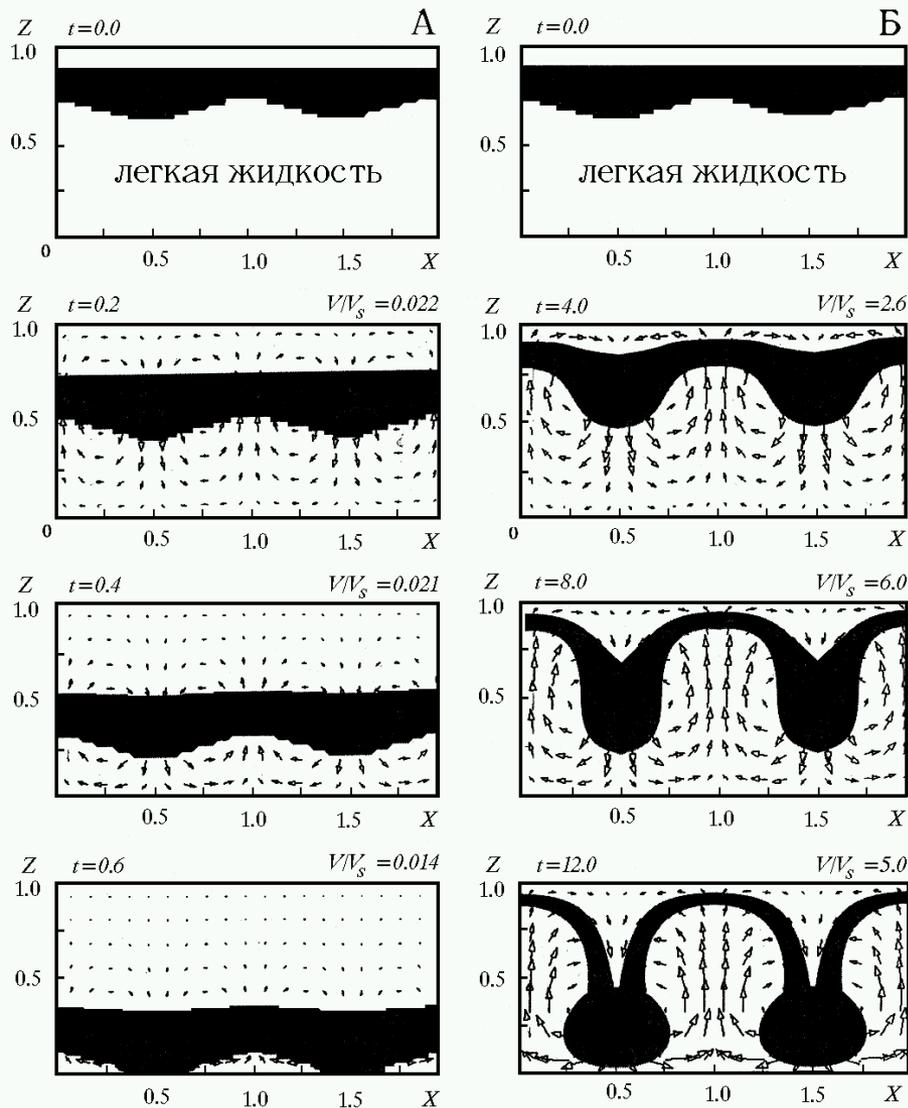
Неоднородность этого метастабильного слоя может привести к тому, что он начнет собираться в одном участке. Скопившаяся масса более тяжелой жидкости должна опускаться вниз, причем передняя часть этого гигантского пузыря должна двигаться с нарастающим ускорением.

Скорость перемещения таких масс гораздо больше скорости осаждения кристаллов. Всякая нисходящая колонна более плотной жидкости может увлекать за собой целый слой магмы, располагающейся у кровли камеры. У дна резервуара опустившаяся жидкость быстро растекается и приходит в состояние покоя”.

Результаты физических экспериментов с двуслойными водносолевыми системами (Jaupart & Tait, 1981?)



Эволюция распределений оседающей плотной фазы для различных моментов безразмерного времени t (Трубицын, Харыбин, 1997)



A Случай высоких значений V_s при докритическом седиментационном числе Рэля $Rs=10$,

B Случай низких значений (в 100 раз меньше, чем для левой серии графиков) при закритическом значении $Rs=1000$.

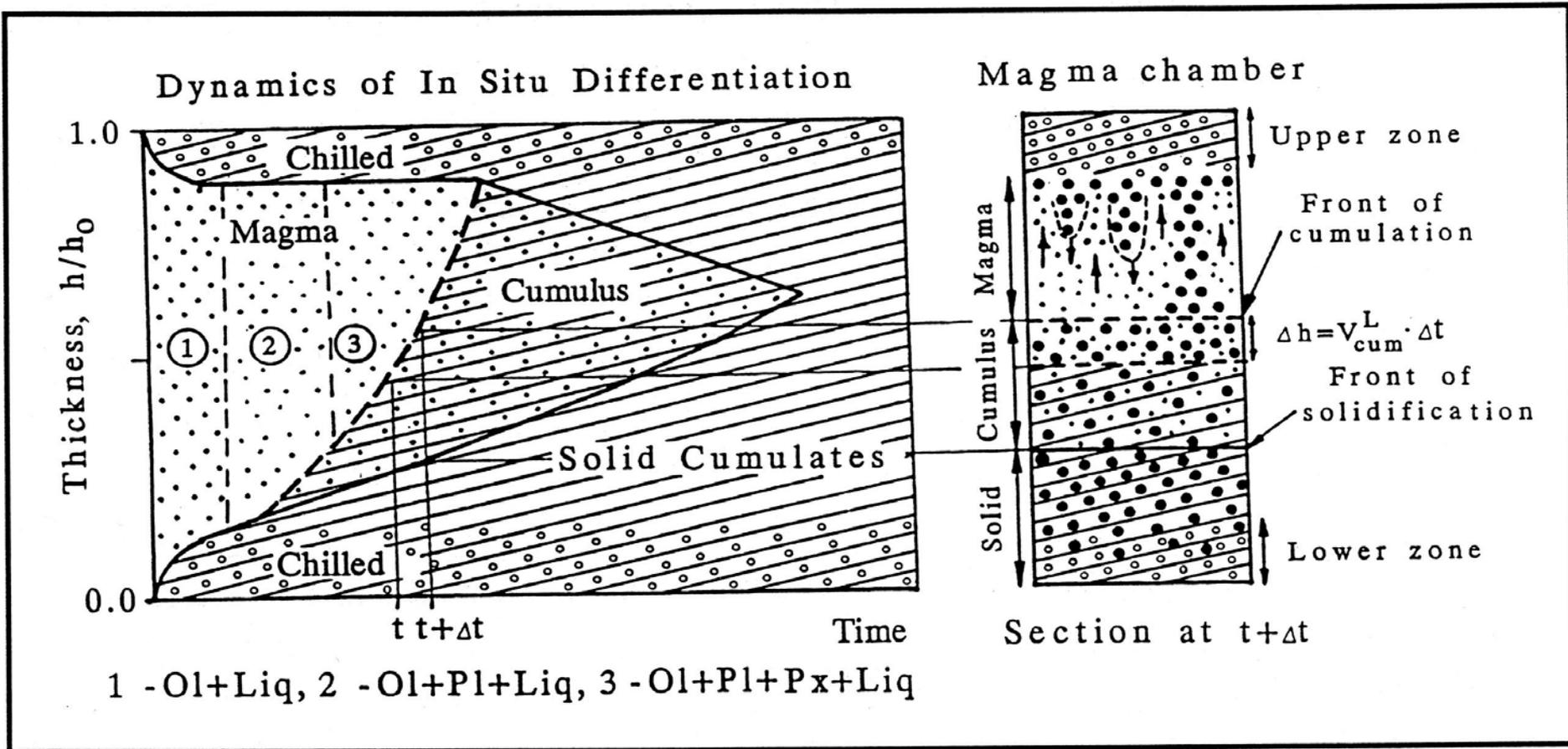
$Z=h/h_0$ - относительная высота, где h_0 - мощность слоя "магматического" расплава

РАБОТЫ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ РАССЛОЕННОСТИ ПЛАСТОВЫХ ИНТРУЗИВОВ



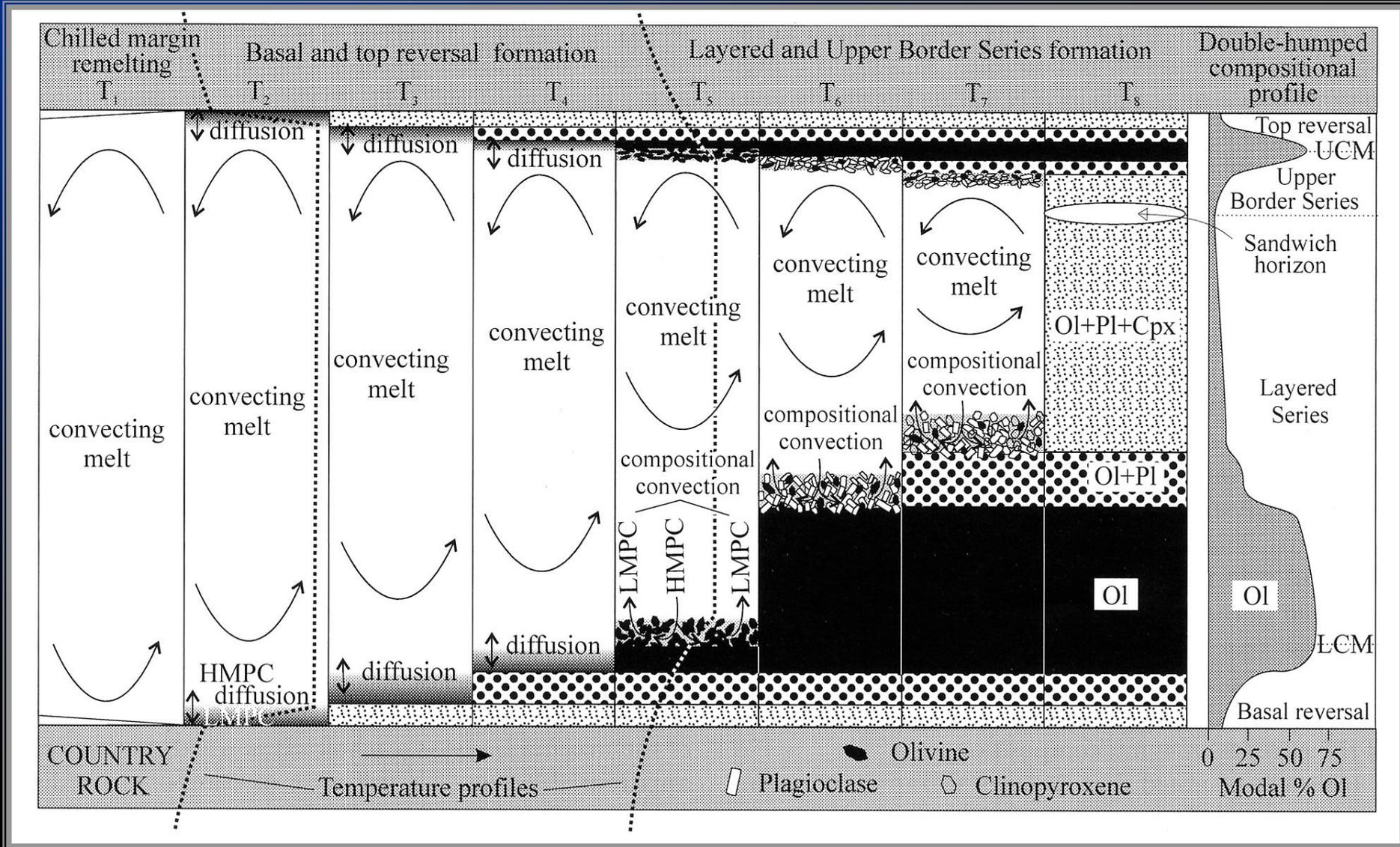
М.Я. Френкель (слева) и А.А. Ярошевский (1978 г.)

Динамика внутрикамерной дифференциации по конвекционно-кумуляционному механизму Френкель и др. (1988)



*Главный процесс фазовой и химической дифференциации
прекращается после заполнения камеры
осадком кристаллических фаз*

Схема динамики конвекционно-кумуляционной модели (рисунок из обзора Латыпова (Latypov, 2000))



Блок ДИНАМИКА (программа ИНТРУЗИВ)

$\varphi_{cr} = \varphi_{int}$ → Расчет мощности зон закалки

Нет

Потоки тепла через контакты интрузива
Потоки направленной кристаллизации минералов
Потоки объемной кристалли-

*Скорость
мощности
напр*

$$F_L^{сум} \geq F_L^{CR}$$

Расчет химического состава пород и остаточной магмы

“Интрузивный блок”
программы
КОМАГМАТ

ISSN 0016-7029, *Geochemistry International*, 2006, Vol. 44, No. 1, pp. 72–93. © Pleiades Publishing, Inc., 2006.
Original Russian Text © A.A. Ariskin, A.A. Yaroshevsky, 2006, published in *Geokhimiya*, 2006, No. 1, pp. 80–102.

Crystallization Differentiation of Intrusive Magmatic Melt: Development of a Convection–Accumulation Model

A. A. Ariskin* and A. A. Yaroshevsky**

* *Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences,
ul. Kosygina 19, Moscow, 119991 Russia*

** *Division of Geology, Moscow State University, Vorob'evy gory, Moscow, 119992 Russia*

Received July 7, 2005

Начальные условия и подгоночные параметры модели

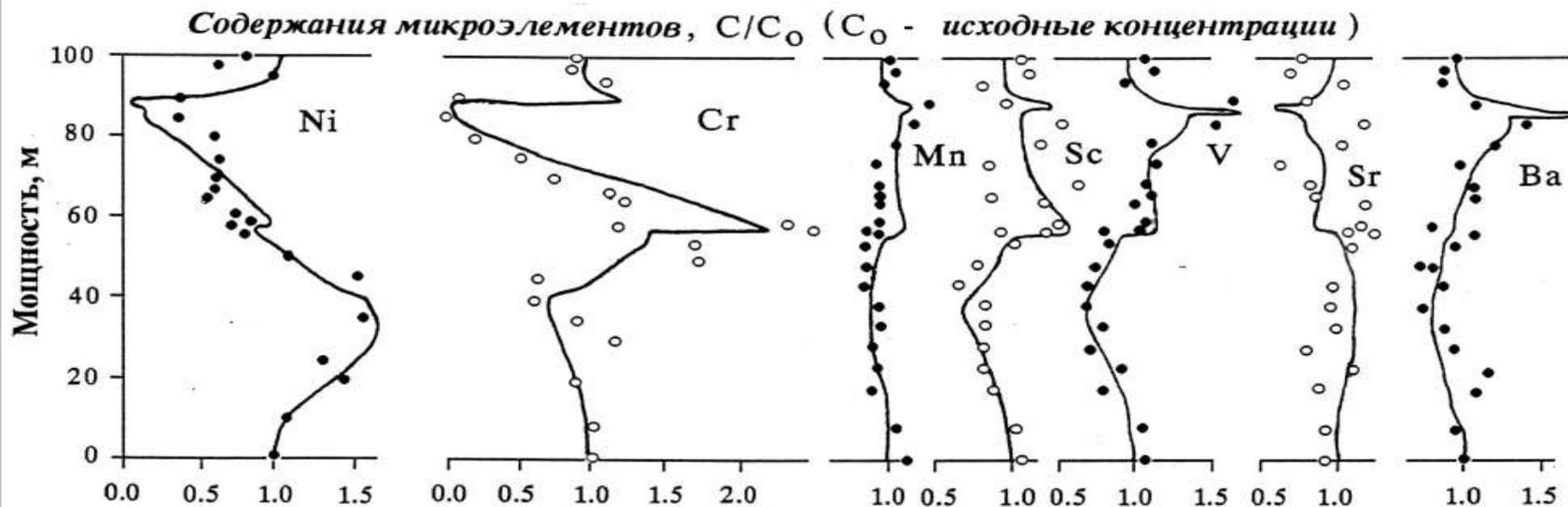
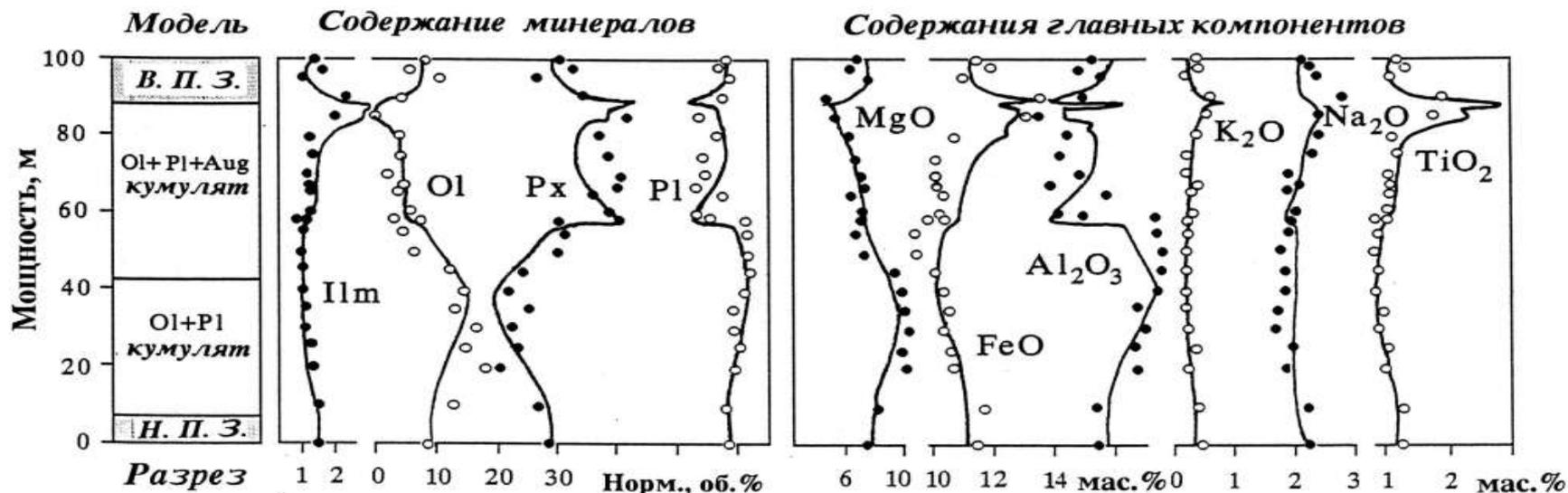
К начальным условиям относятся:

1. мощность интрузива,
2. состав исходной магмы,
3. теплофизические свойства вмещающих пород (температура и плотность расплава рассчитываются по мере кристаллизации),
4. давление и режим f_{O_2} .

Подгоночные параметры включают:

5. долю интрателлурических вкрапленников в момент внедрения,
6. длительность закалки,
7. предельную плотность кумулуса на нижнем и верхнем фронтах кристаллизации
8. эффективные скорости оседания минералов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОЕНИЯ ВАВУКАНСКОГО ИНТРУЗИВА

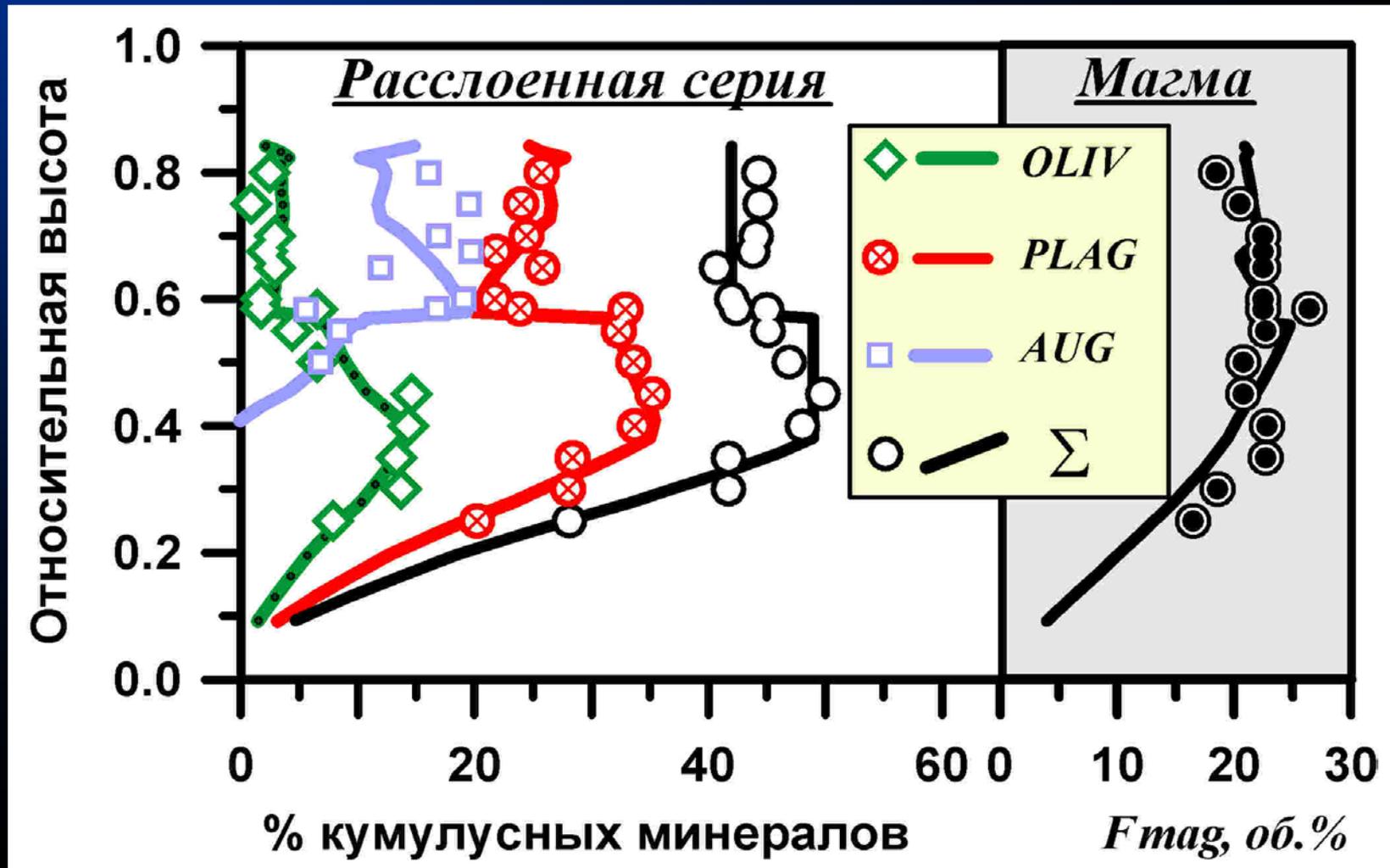


○ Природные данные

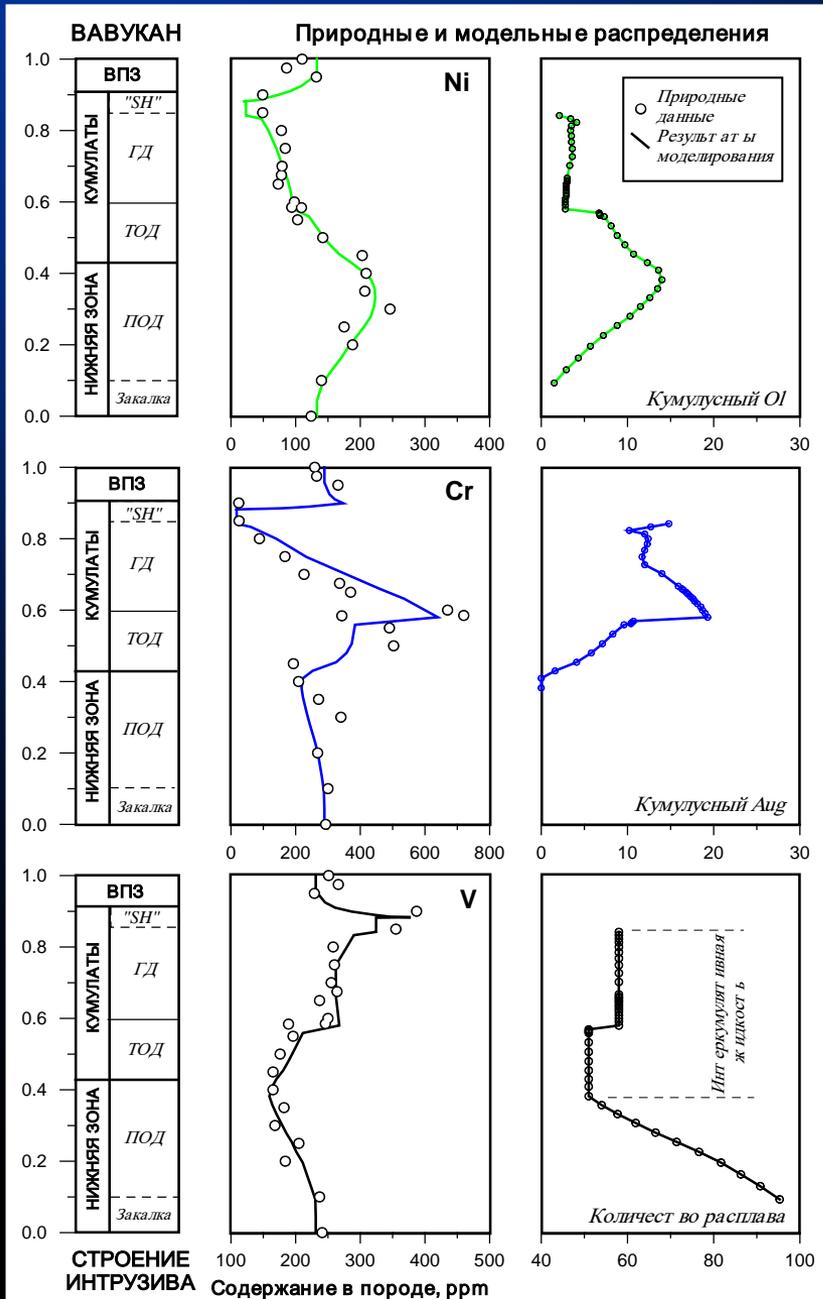
— Результаты расчетов

Результаты моделирования Вавуканского интрузива:

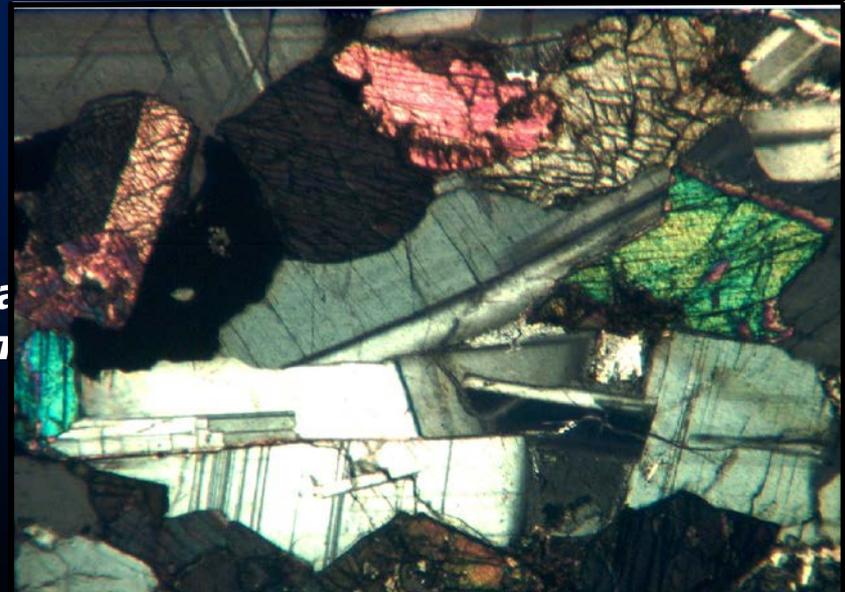
первичные пропорции минералов кумулуса и
модальный состав остаточной магмы



Результаты моделирования Вавуканского интрузива:



Зависимость содержания Ni в породе от количества OI в кумулусе



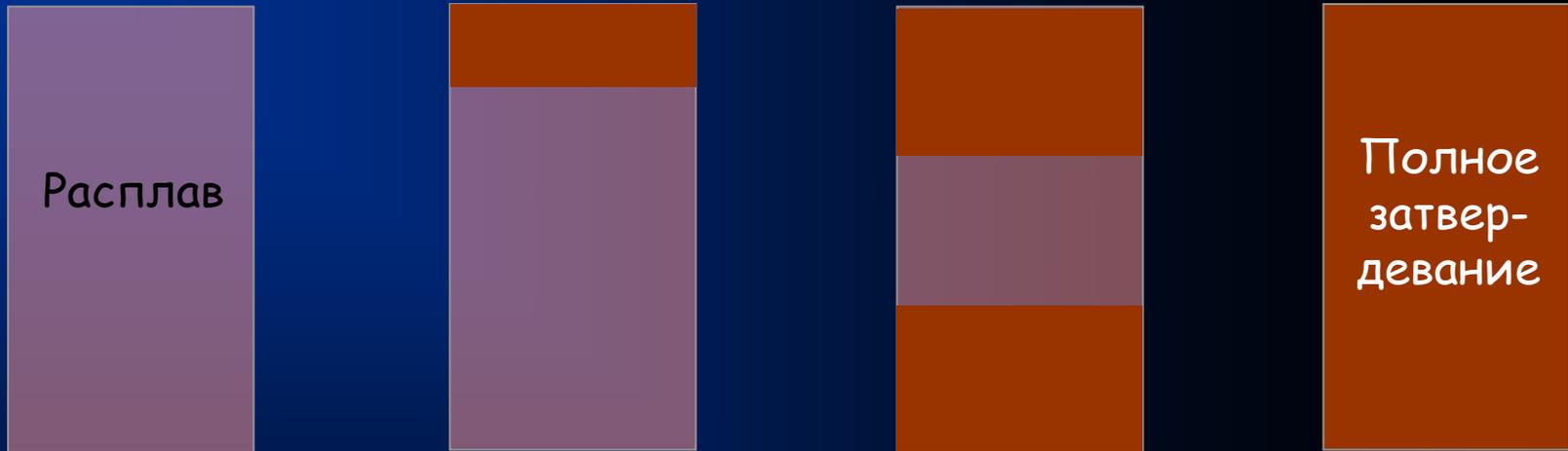
За
OI

де

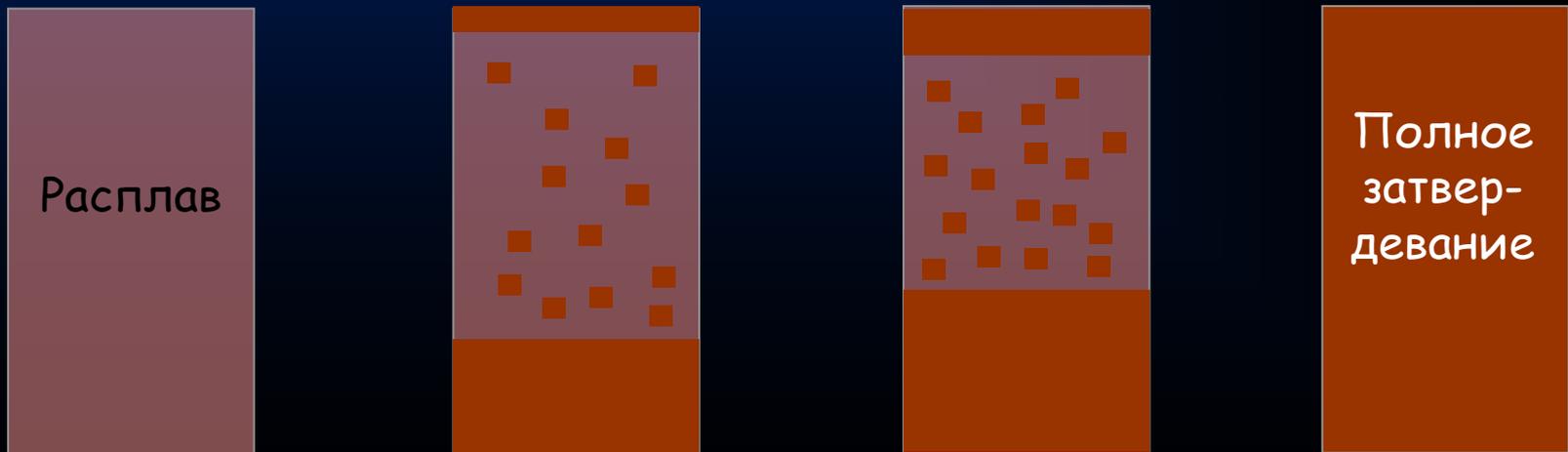
Зависимость содержания V в породе от количества интеркумулясного расплава

Две главные гипотезы внутрикамерной дифференциации

Направленная (*in situ*) кристаллизация



Направленная кристаллизация + оседание кристаллов



Примеры S-образных распределений состава пород в разрезах долеритовых силлов

