

КРУПНЫЕ РАССЛОЕННЫЕ ИНТРУЗИВЫ

- *От маломошных силлов к крупным телам*
- *Главные признаки расслоенных интрузивов*
- *Типы магматической расслоенности*
- *Понятие кумулуса и кумулатов*
- *Структуры кумулатов и их интерпретация*

СКЕРГААРДСКИЙ МАССИВ

- *Петрогенетическое значение*
- *Закономерности строения*
- *Методы интерпретации состава кумулатов*

Главные признаки крупных расслоенных интрузивов (*Large Layered Intrusions*)

1. **Мощность** - от 1 до 10 км
2. **Форма тел** - лополиты, воронки, кольцевые
3. **Возраст** - чаще Докембрий (>570 млн. лет)
4. **Расположение** - на платформах (*комагматичны
формациям платобазальтов*)
5. **Состав пород** - мафит - ультрамафитовый
6. **Структуры** - кумулятивные
7. **Расслоенность** - фазовая, модальная, скрытая,
ритмическая и пульсирующая

Соотношения между мощностью и протяженностью интрузивных тел от силлов до батолитов

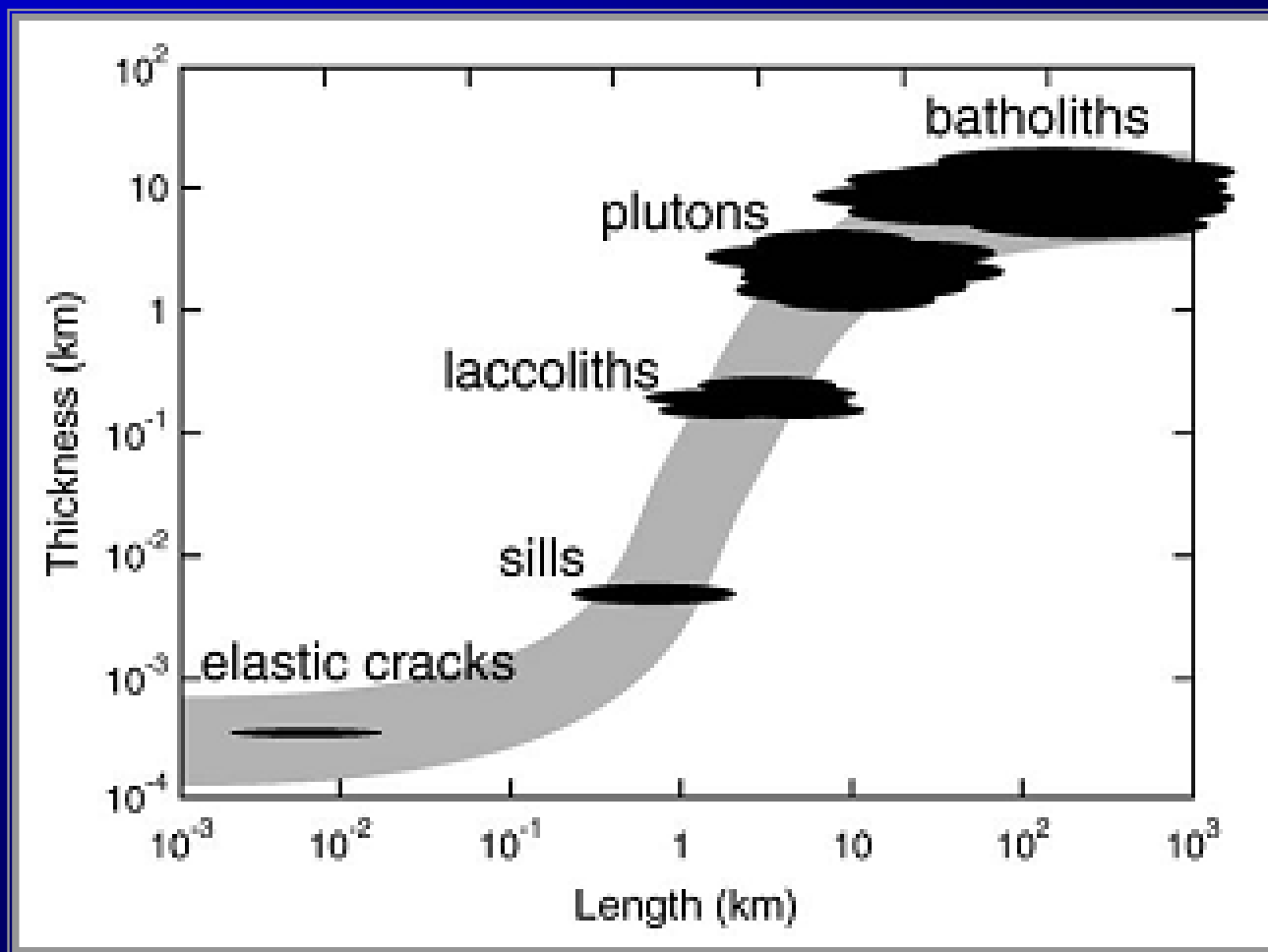


Fig. 1. Schematic diagram showing the scaling relationship between sills, laccoliths, plutons and batholiths based on Cruden and McCaffrey (2002) and McCaffrey and Cruden (2002). Each type of intrusion appears to be linked to the others following an S-shaped growth law over several orders of magnitude.

The mechanics and dynamics of sills in layered elastic rocks and their implications for the growth of laccoliths and other igneous complexes

Thierry Menand

Интрузив МАСКОКС – типичный лополит



Механизмы образования интрузивных тел: маломощные силы

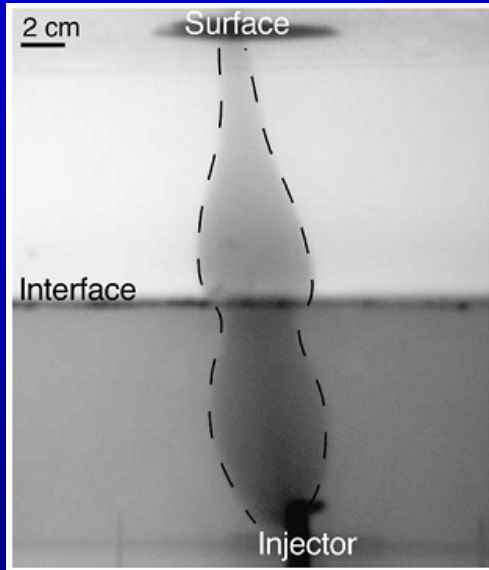


Fig. 4. Photograph of experimental dyke formation in a two-layered system with a less dense and less rigid upper layer (Experiment 3). The dyke (with dashed outline) has propagated through both layers to the surface, with no horizontal propagation parallel to their interface occurring. Note the dyke narrows at the interface and tapers towards the surface. The camera angle is not parallel to crack axis.

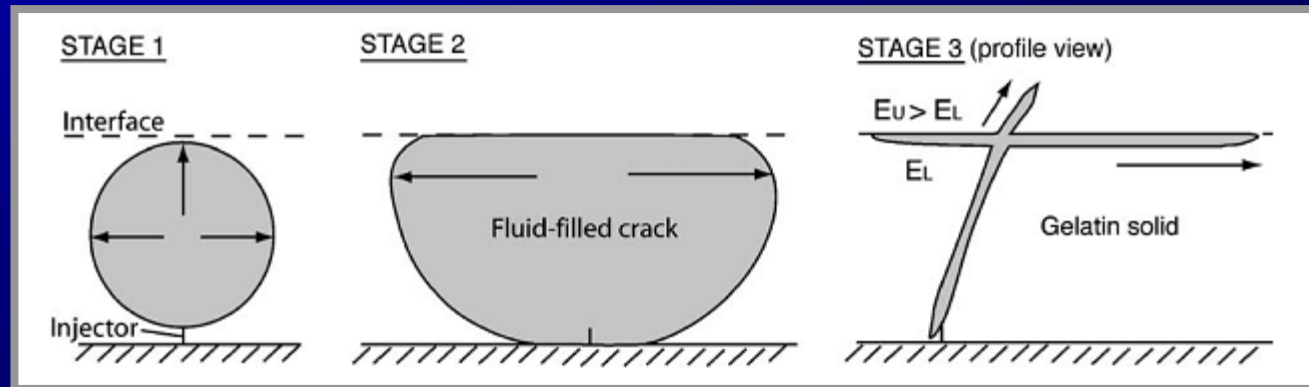
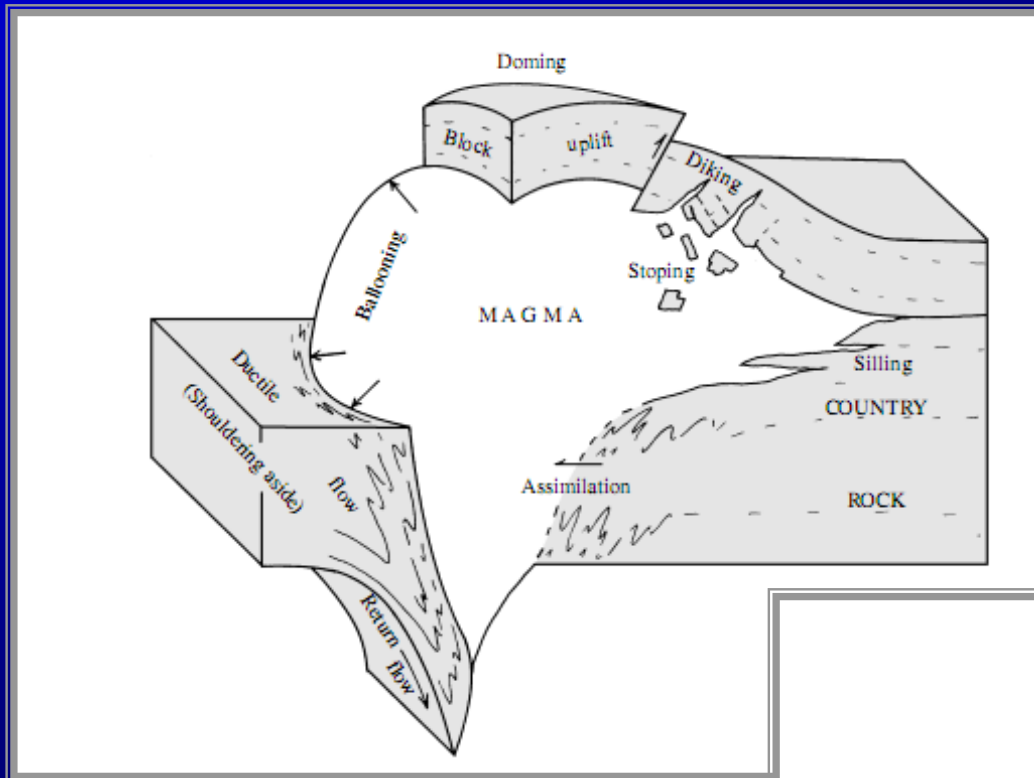
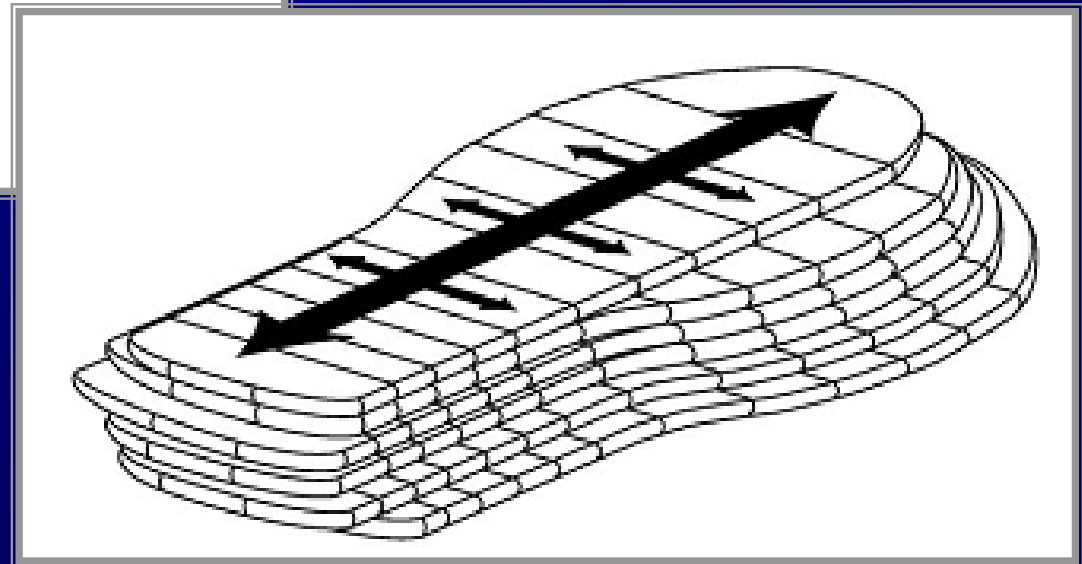


Fig. 5. A schematic sketch of the three stages of sill formation under initially hydrostatic conditions and with an upper more rigid gelatine layer. Stage 1: front view, the initial dyke formation is a circular to elliptical disc. Stage 2: front view, the vertical dyke propagation has stalled at the interface between the contrasting solid layers. The propagation is now lateral along the crack breadth and is perpendicular to the interface. Stage 3: side view, the dyke has fractured parallel to the interface separating upper rigid layer from lower layer forming a sill with contemporary dyke protrusion into the upper more rigid layer.

Механизмы образования крупных интрузивных тел: лакколиты и плутоны

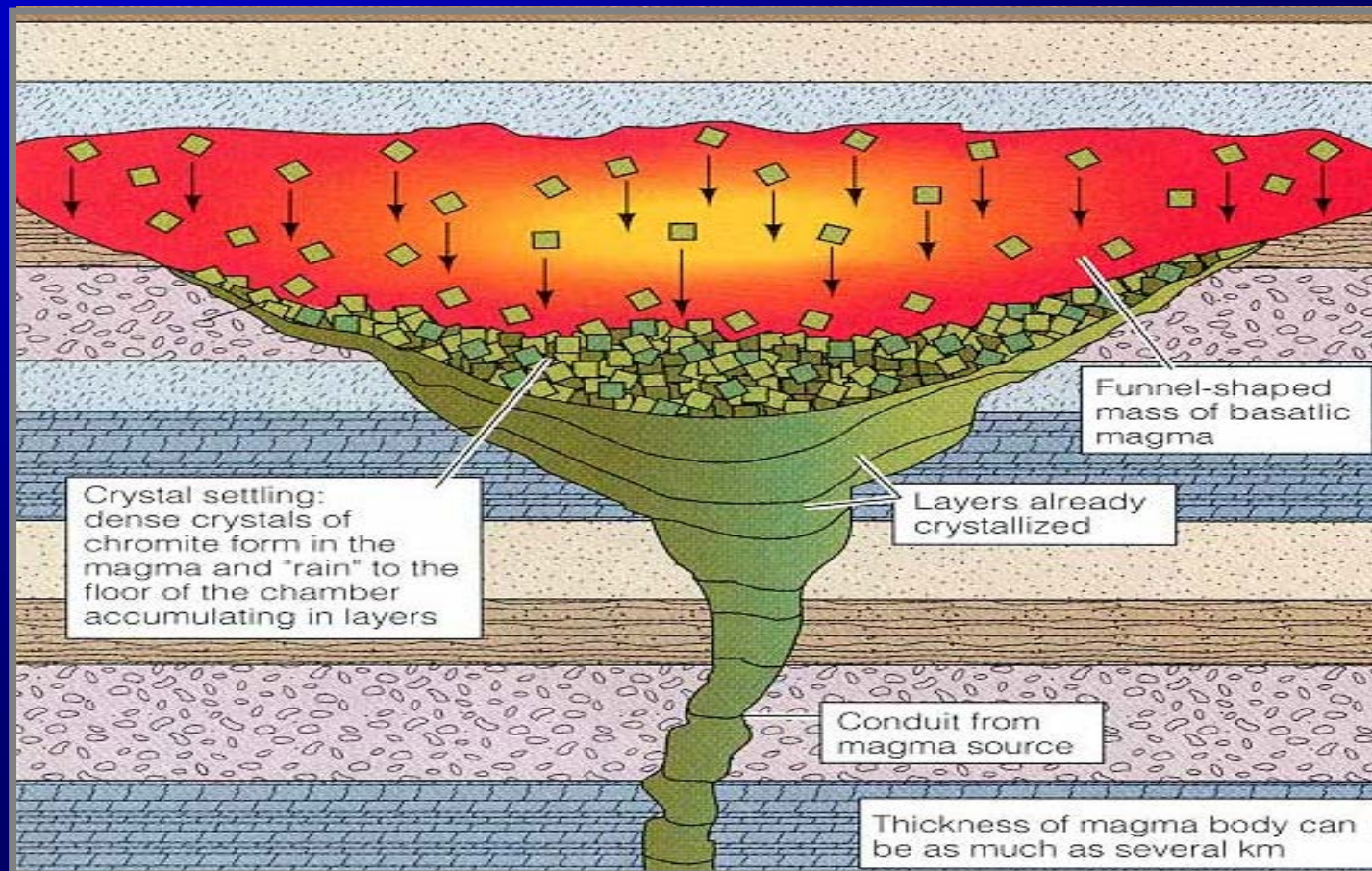


1. Подъем кровли (*lift the roof*)
2. Ассимиляция
3. “Storing” – погружение крупных блоков
4. “Ballooning” –



5. Аккумуляция (*amalgamation*) последовательности силлов

Каноническая схема образования воронковидной магматической камеры



“Блюдцеобразные” интрузивы (*saucer-shaped intrusions*)

Saucer-shaped intrusions: Occurrences, emplacement and implications

Stéphane Polteau ^{a,*}, Adriano Mazzini ^a, Olivier Galland ^a,
Sverre Planke ^{a,b}, Anders Malthe-Sørenssen ^a

Earth and Planetary Science Letters 266 (2008) 195–204

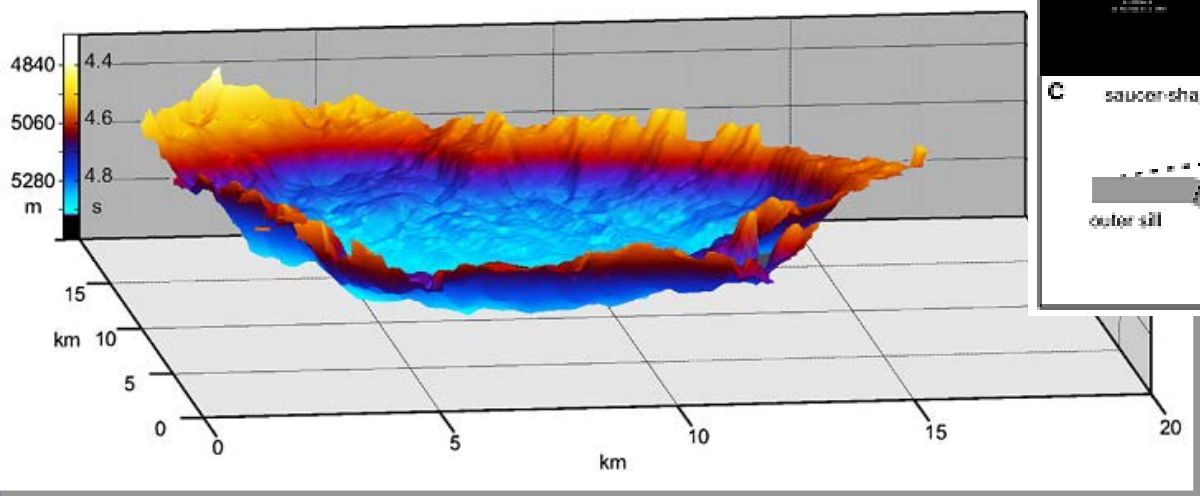
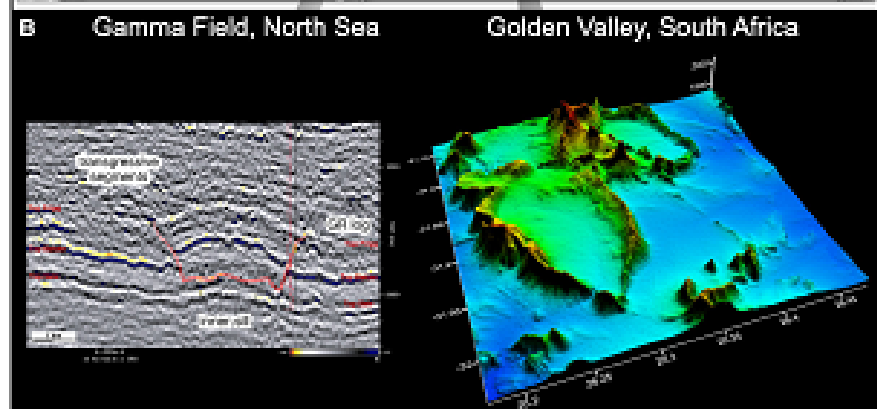
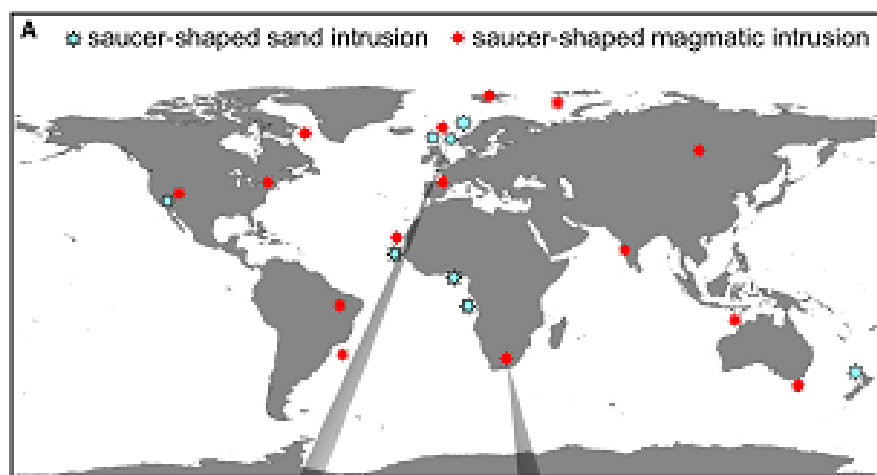
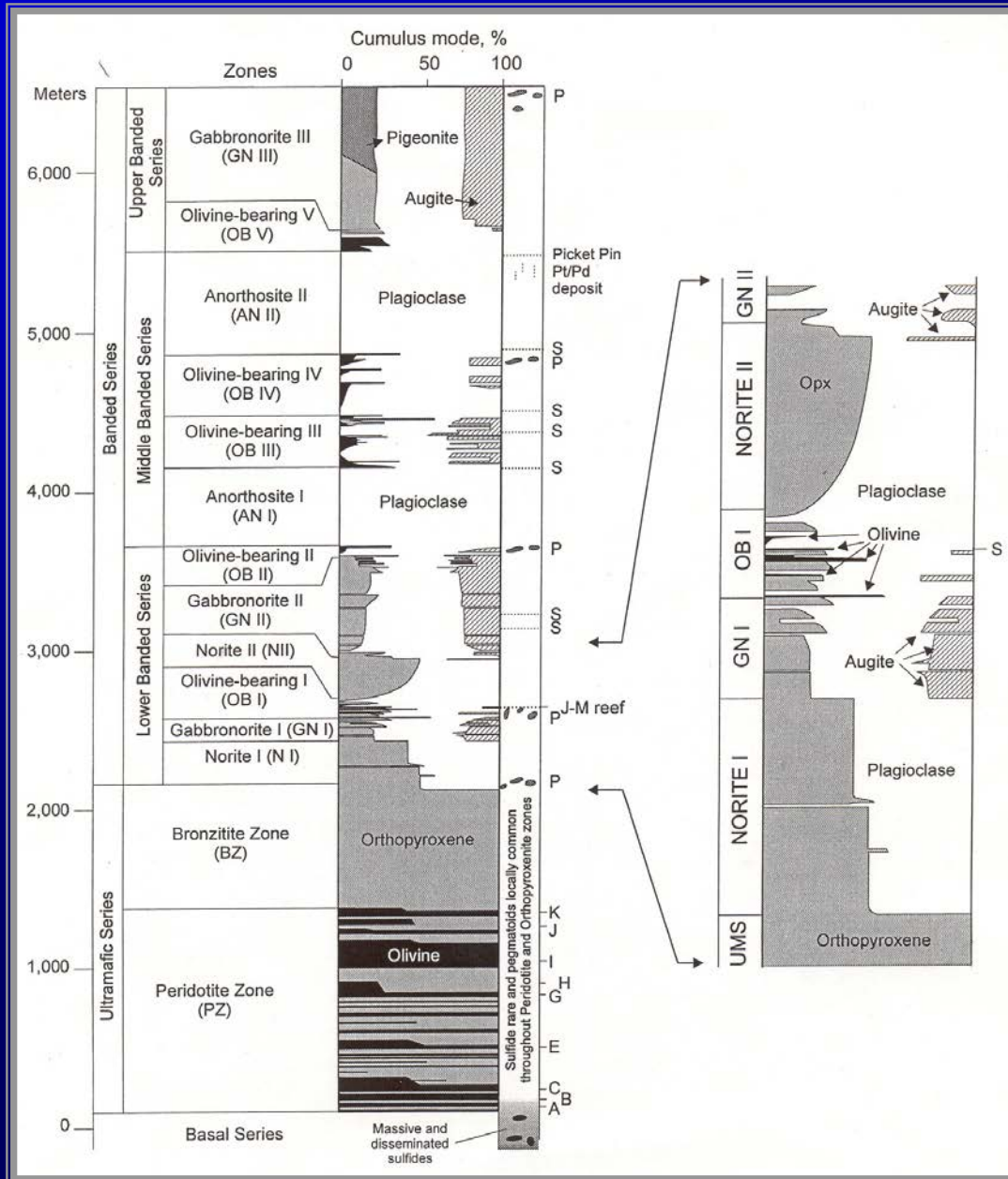


Fig. 2. Visualizations of a saucer-shaped sill interpreted from 3D seismic data in the Møre Basin offshore Mid-Norway. Depths are measured in meters and seconds (two-way travel time).

Примеры крупных комплексов расслоенных пород

Интрузив	Место-положение	Возраст, млн. лет	Площадь выходов, км ²	Мощность, км
Скергаардский	Гренландия	56	55	3.5
Рам	Шотландия	61-58	115	> 2
Дулутский комплекс	Миннесота, США	1100	5000	< 12 крупных интрузивов
Маскокс	С-3 Канады	1270	< 1500	?
Киглапейт	Лабрадор	1400	< 500	9
Бушвельд	ЮАР	2050	65000	7-9
Бураковско-Аганозерский	Заонежье, Россия	2500	630	6-8
Стиллуотер	Монтана, США	2700	450	7

Примеры строения расслоенных интрузивов



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

Примеры магматической расслоенности



Слои пород и их разновидности

Слой: любой пласт пород, различимый на основании состава и/или структуры:

- ☞ **однородные** по структуре и минеральному составу



Однородные слои хромита между пластами обогащенных плагиоклазом пород (Бушвельдский комплекс, Южная Африка)

Слои пород и их разновидности

- ☞ **неоднородные** варьируют вдоль или поперек расслоенности (часто демонстрируют **постепенные переходы к породам другого минерального состава** или отличающимся размером минеральных индивидов)



Расслоенность по модальному минеральному составу

Слои пород и их разновидности

- **неоднородные** варьируют вдоль или поперек расслоенности (часто демонстрируют **постепенные переходы к породам** другого минерального состава или **отличающимся размером минеральных индивидов**)

Гранулометрическая
расслоенность



ТИПЫ (ГЕНЕТИЧЕСКОЙ) РАССЛОЕННОСТИ КРУПНЫХ МАФИТ-УЛЬТРАМАФИТОВЫХ МАССИВОВ

Явление расслоенности включает последовательность слоев, происхождение которых связано с определенными механизмами разделения продуктов эволюции магмы в камере

1. **Модальная** - вариации пропорций одних и тех же минералов

Результат сортировки и перераспределения зерен минералов, представляющих постоянный набор котектических фаз (Ol+Pl или Ol+Pl+Crх)

2. **Фазовая** - характеризует смену набора первичных котектических фаз

Результат появления нового минерала или исчезновения одной из фаз минерального парагенезиса.

Может быть связана с кристаллизацией или процессами метасоматического воздействия поровых расплавов на минеральный каркас кристаллического осадка

3. **Скрытая** - включает вариации состава минералов или распределение микроэлементов, недоступное наблюдению в полевых условиях

Обычно указывает на процессы внутрикамерного фракционирования исходной магмы и заполнение камеры твердой фазой снизу вверх

4. **Ритмическая** – включает **регулярно повторяющиеся** слои пород или их последовательности

Макроритмы объединяют структурные единицы мощностью от первых метров до нескольких десятков метров.

Микроритмы представлены слоями мощностью в несколько сантиметров.

Природа не установлена.

5. **Пульсирующая** – характеризует появление слоев, случайным образом нарушающих установленные ритмические последовательности

Природа не установлена.

Примеры ритмической и пульсирующей расслоенности в крупных интрузивах



Вертикальная расслоенность см-масштаба за счет вариаций относительных пропорций P_1 и P_x (Стиллуотер комплекс)



Пульсирующая расслоенность в виде градационных слоев, разделенных прослоями постоянного минерального состава (Скергаардский интрузив)

Механизмы образования расслоенности в крупных интрузивных телах

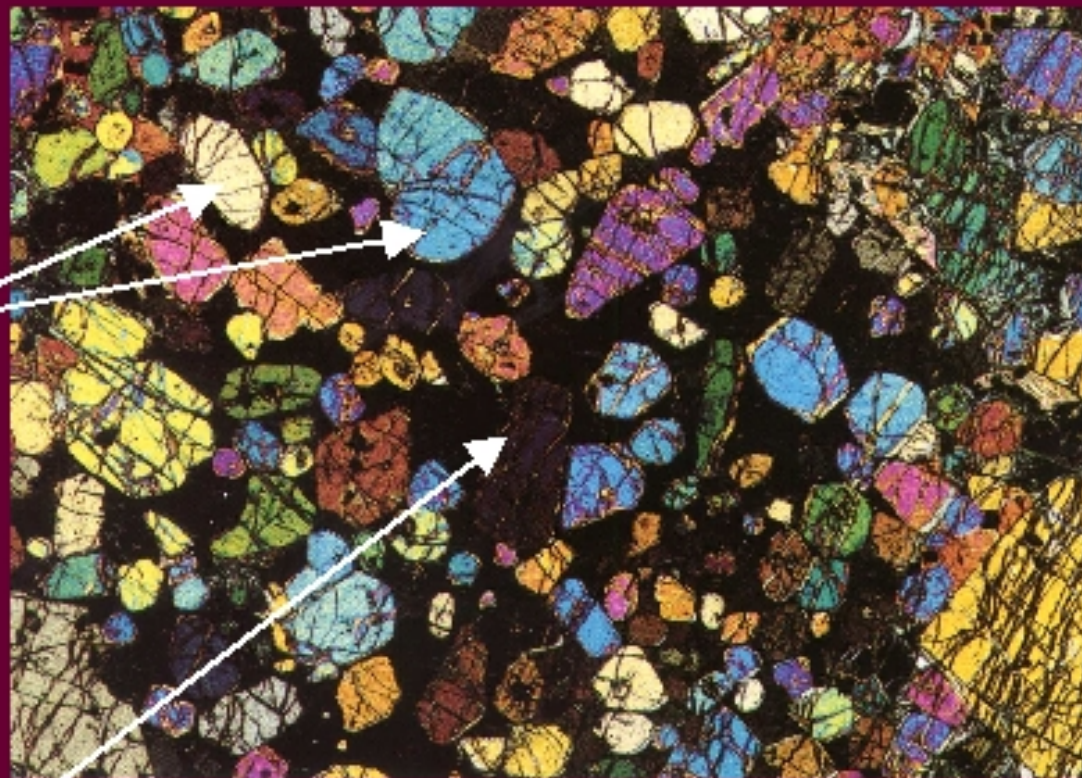
(1) **Механизмы, ответственные за образование первично-магматической расслоенности**, т.е. такой, которая формируется на стадии ранней котектической кристаллизации и отложения минералов из вязких седиментационных потоков (о которых мы говорили в начале занятия).

(2) **Вторая группа механизмов связана с последующей эволюцией этих кристаллических осадков**, которая включала уплотнение (или как говорят) компакцию первичной “расплавно-кристаллической каши”, отжим и миграцию межзерновых расплавов, нередко перекристаллизацию первичных минералов.

Понятие кумулуса и определение кумулата

Кумулус - результат осаждения (всплывания) кристаллов в магме
Интеркумулус - поровое пространство между зернами минералов кумулуса, заполненное (интеркумулусным) расплавом

Кумулат - порода, представляющая продукт затвердевания магматического осадка после полной кристаллизации интеркумулусной жидкости



Augite oikocryst at extinction

Терминология и номенклатура кумулатов

Кумулятивные породы (кумулаты) обычно подразделяются по набору кумулусных минералов, например $OI-Pl$ или $Pl-Px-Mt$ кумулат.

Эти парагенезисы кумулусных минералов рассматриваются как набор котектических фаз – аналогично ассоциациям фенокристаллов в вулканических породах.

Однако не всегда удается адекватно классифицировать кумулаты только на основании набора минералов кумулуса.

В ряде случаев приходится привлекать данные о составе, структуре и относительном количестве интеркумулусного материала.

Терминология и номенклатура кумулатов

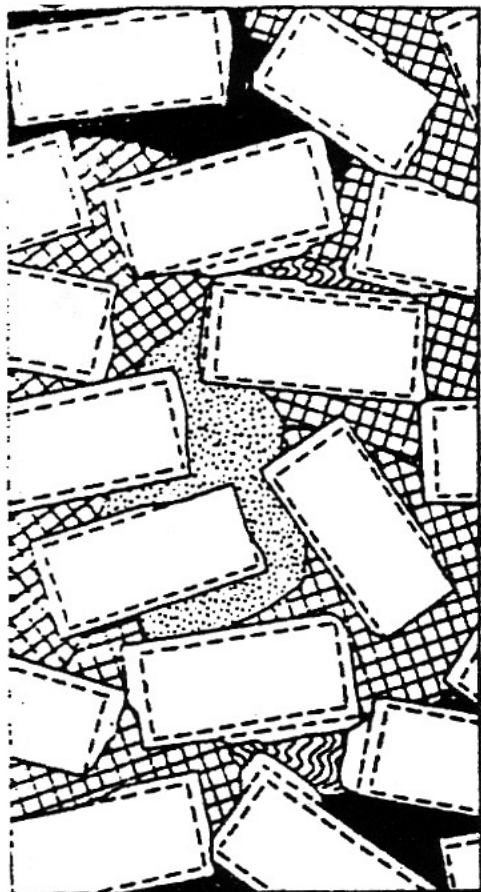
В 60-х годах Уэйджер (Wager, 1960) предложил разделить кумулаты на три главные группы:

ОРТОКУМУЛАТЫ – породы, включающие много интеркумулусного материала, где зерна первичных кумулусных фаз сохраняют исходные кристаллографические очертания.

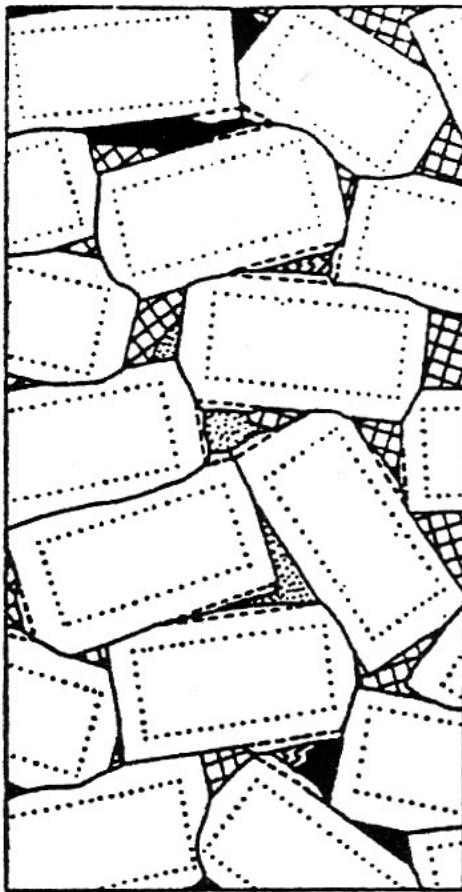
МЕЗОКУМУЛАТЫ – содержат меньше интеркумулусного материала (чаще в виде интерстиций), а зерна первичных кумулусных фаз за счет дорастания начинают соприкасаться, формируя ажурный каркас породы.

АДКУМУЛАТЫ – почти не содержат интеркумулусного материала (частично за счет дорастания, частично за счет уплотнения кумулятивного каркаса породы и экстракции интрекумулусной жидкости).

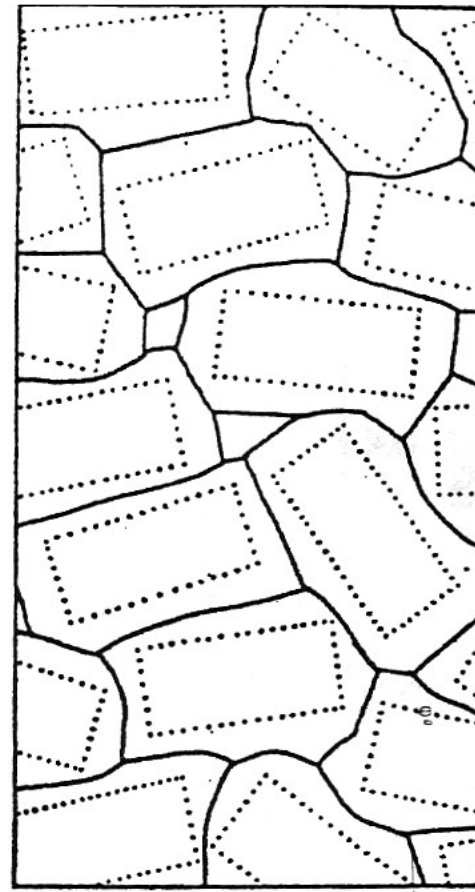
Главные типы кумулатов



ОРТОКУМУЛАТ



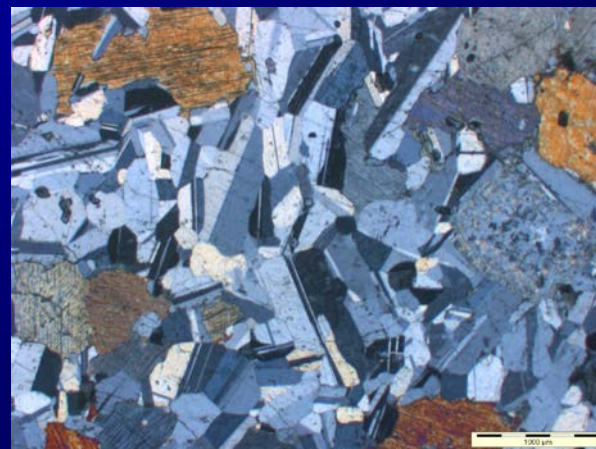
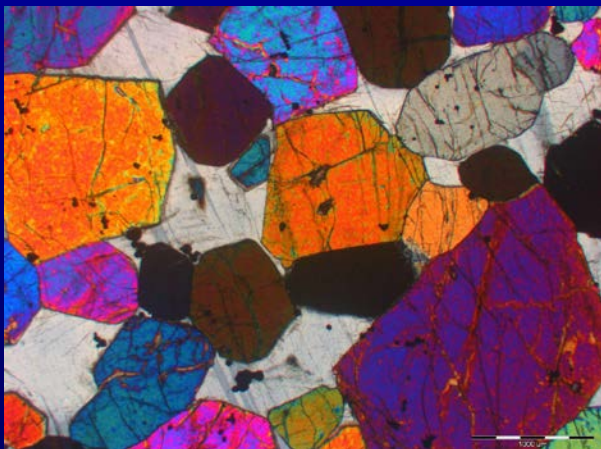
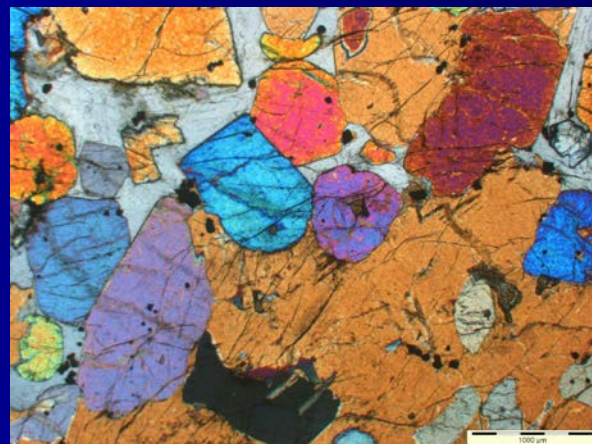
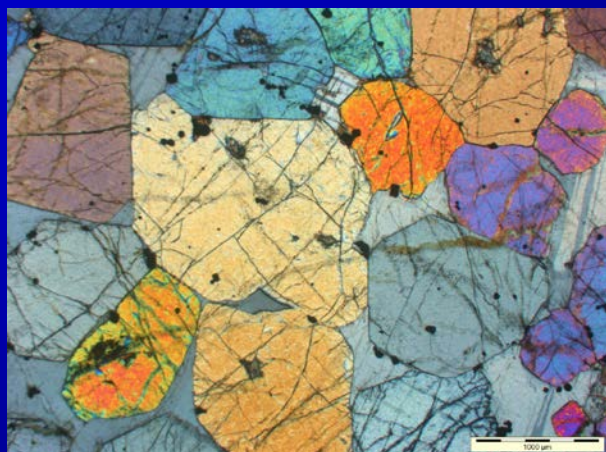
МЕЗОКУМУЛАТ



АДКУМУЛАТ

Понижение доли интеркумулуса 

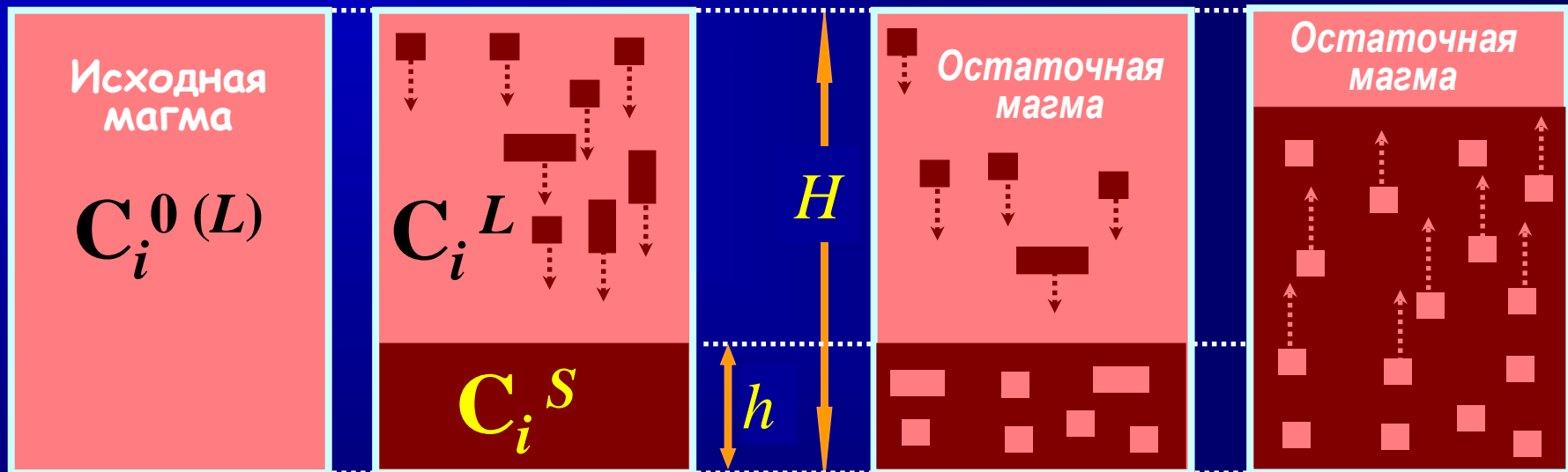
Примеры реальных кумулатов из Йоко-Довыренского массива (Сев. Прибайкалье)



Схемы идеального фракционирования и реальных процессов в магматических камерах

100% Оседание кристаллов

Судьба интеркумулусного расплава



Идеальное фракционирование

$$C_i^L = C_i^0(L) (1 - \phi)^{K-1},$$

$$C_i^S = K C_i^L, \text{ где } \phi = h / H$$

Образование
первичного
"ортокумулуса"

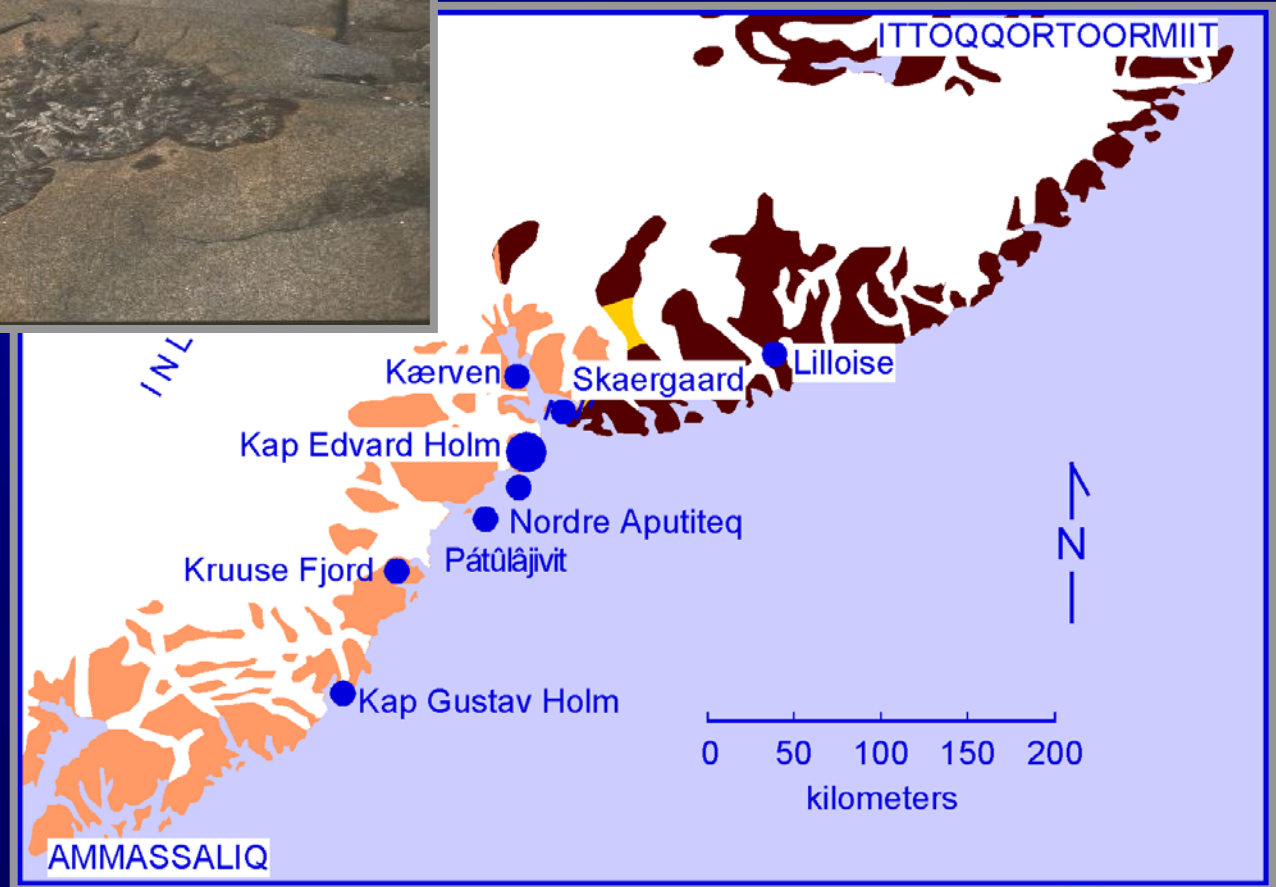
Формирование
ортокумулатов

Образование
адкумулатов, как
результат отжима
и инфильтрации
интеркумулусного
расплава

ПРИМЕРЫ КРУПНЫХ РАССЛОЕННЫХ ИНТРУЗИВОВ

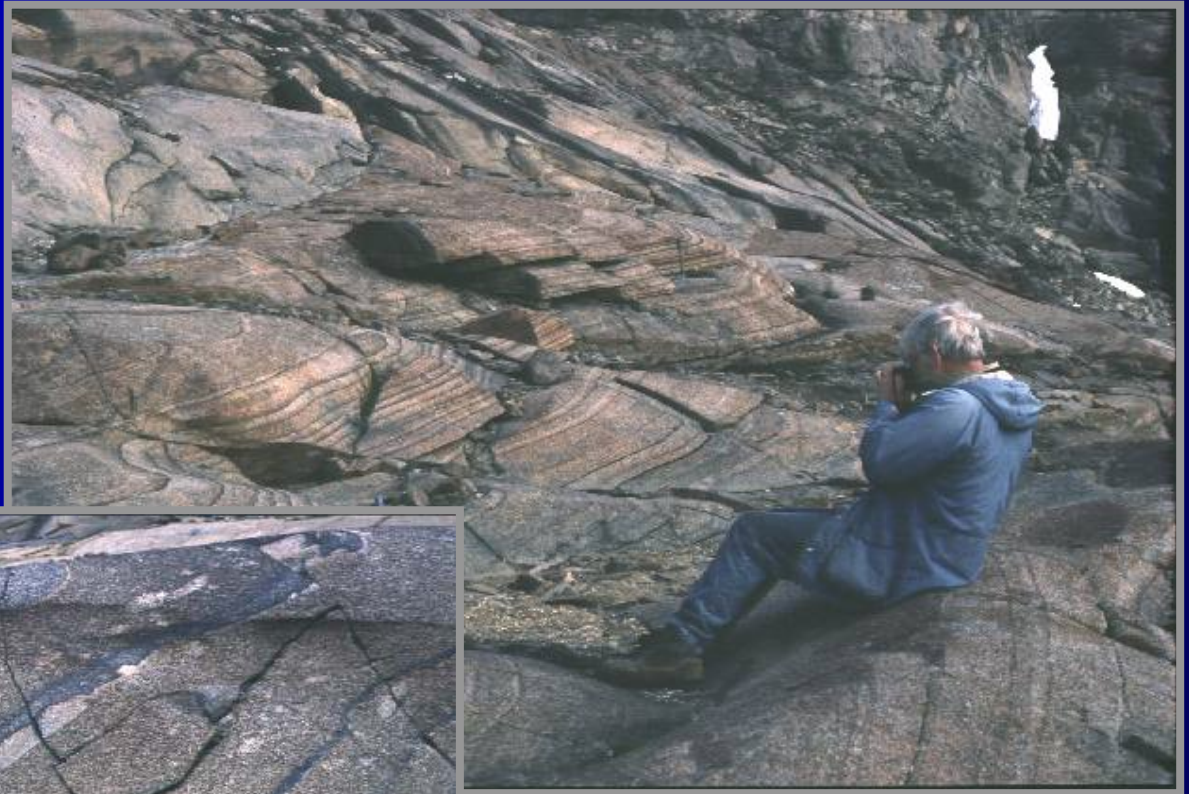
Интрузив	Место-положение	Возраст, млн. лет	Площадь выходов, км ²	Мощность, км
Скергаардский	Гренландия	56	55	3.5
Рам	Шотландия	61-58	115	> 2
Дулутский комплекс	Миннесота, США	1100	5000	< 12 крупных интрузивов
Маскокс	С-3 Канады	1270	< 1500	?
Киглапейт	Лабрадор	1400	< 500	9
Бушвельд	ЮАР	2050	65000	7-9
Бураковско-Аганозерский	Заонежье, Россия	2500	630	6-8
Стиллуотер	Монтана, США	2700	450	7

СКЕРГААРДСКИЙ ИНТРУЗИВ В ГРЕНЛАНДИИ

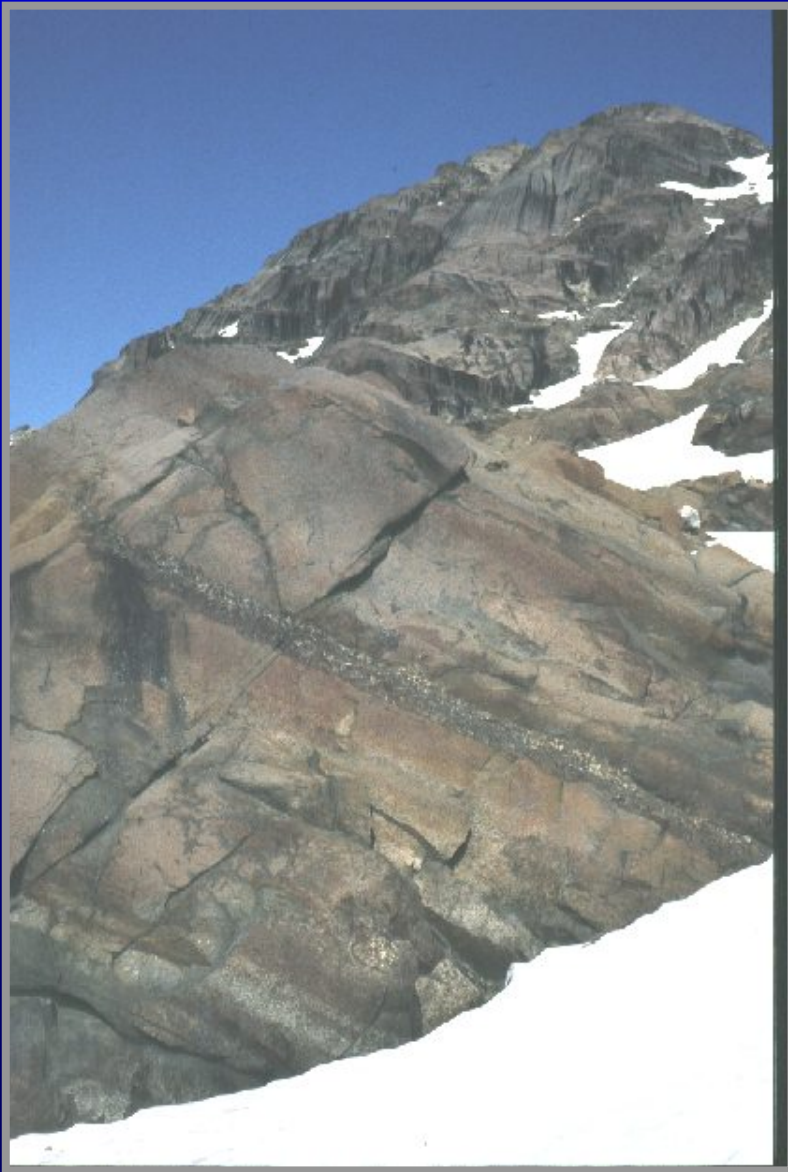


Положение пос.
Скергаард

Примеры расслоенности Скергаардского массива



Ритмическая расслоенность Скергаардского массива



Геологическая карта Скергаардского массива

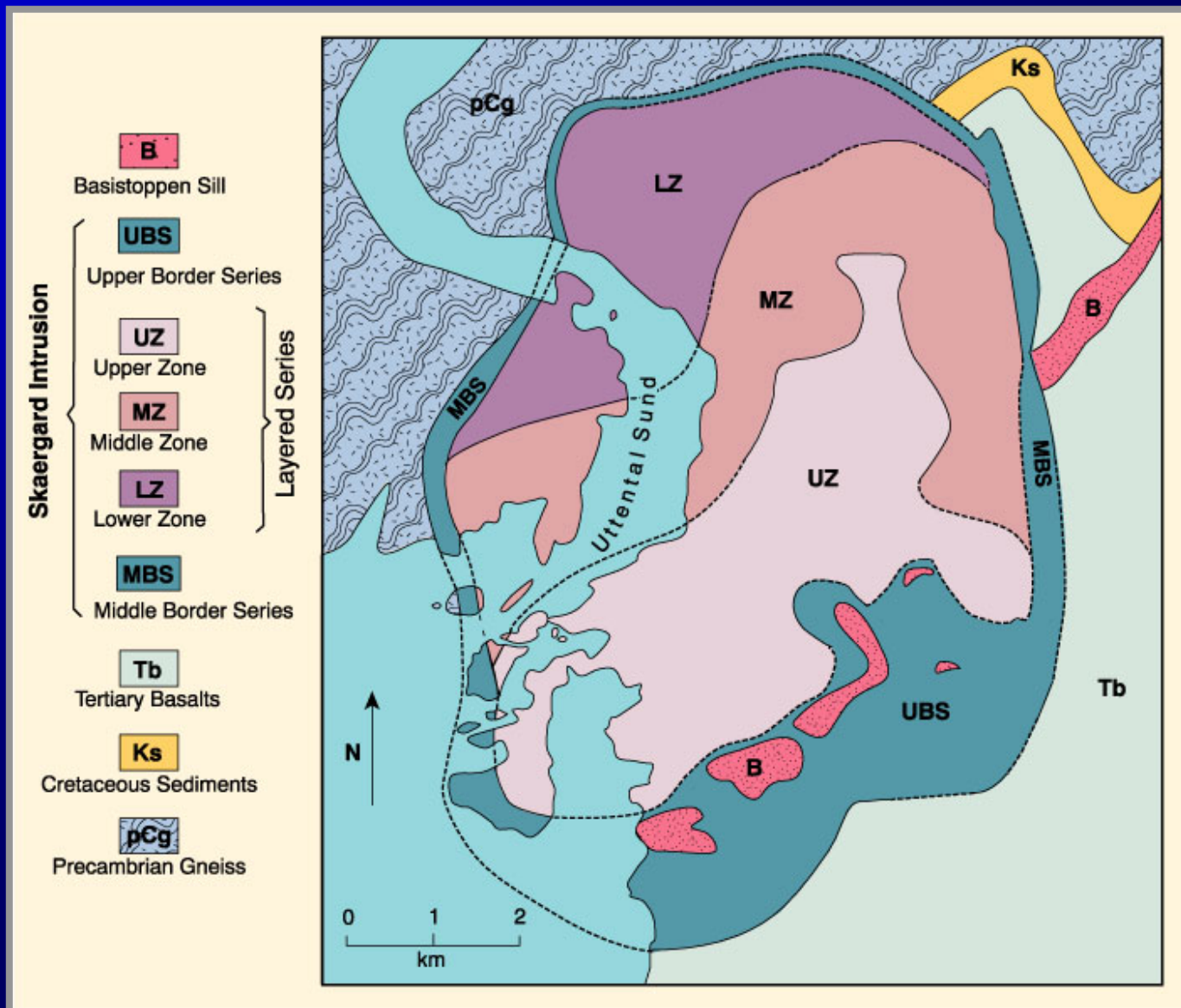
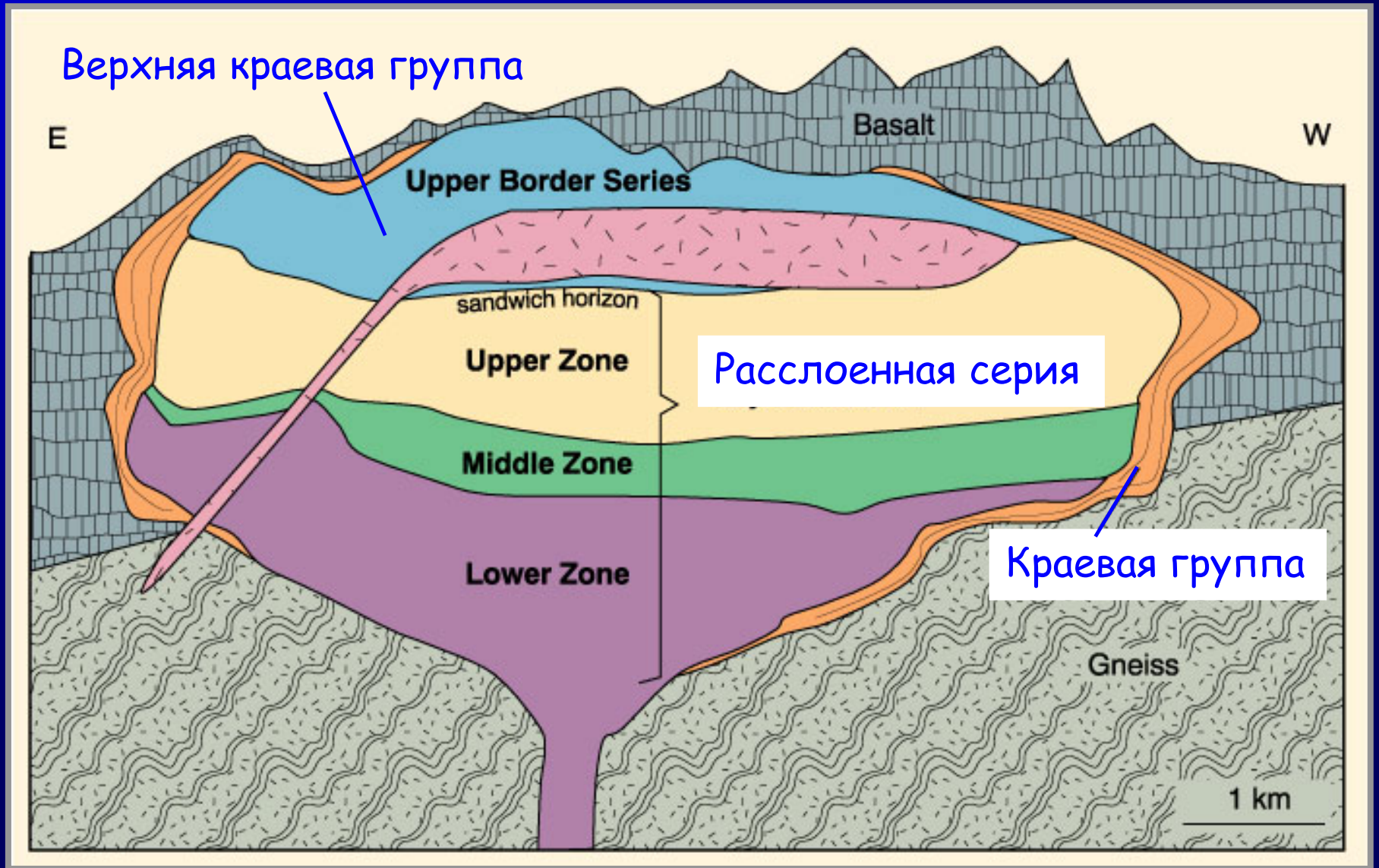
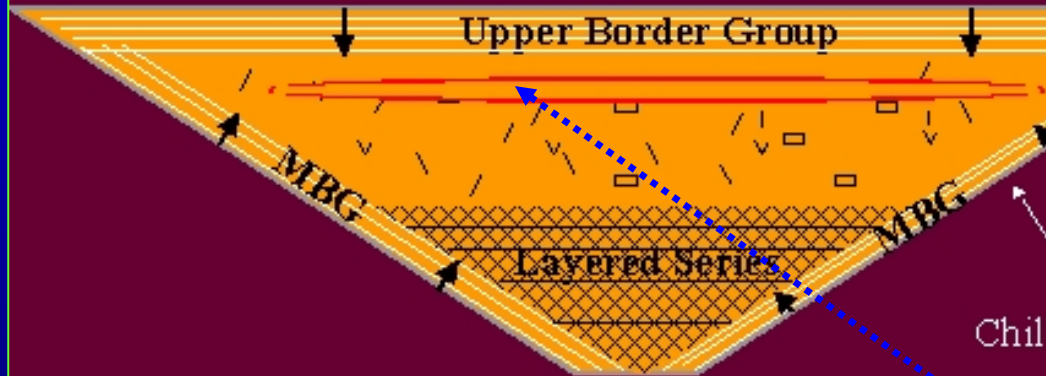


Схема строения Скергаардского массива



Состав и значение "Сандвичева горизонта"

Crystallization



Last Liquid was trapped at the "Sandwich Horizon"

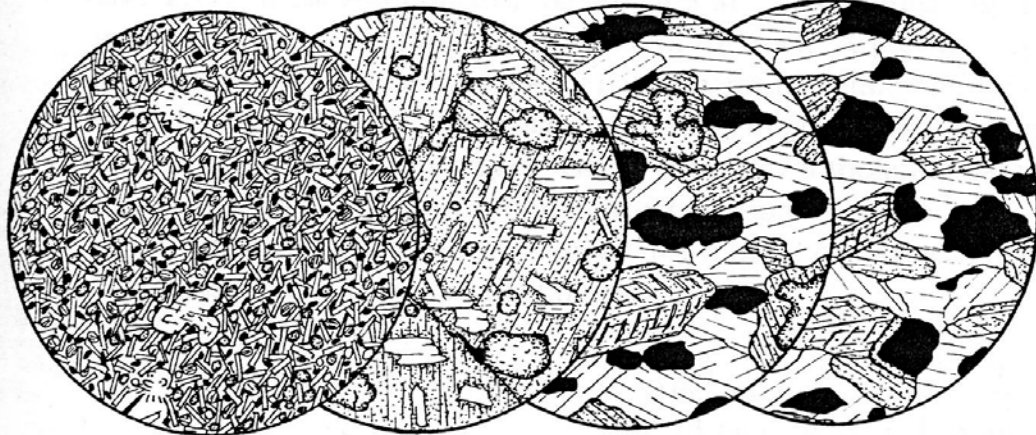
Это группа пород, кристаллизовавшихся из наиболее фракционированных расплавов

ФЕРРОГАББРО - Na-Plag + Fe Ol и пироксены

ГРАНОФИР - сегрегации кварца и полевого шпата

Предполагается, что **ФЕРРОГАББРО + ГРАНОФИР** представляют продукт ликвации осточной магмы на самых поздних стадиях внутрикамерной дифференциации

Структуры пород из разных горизонтов

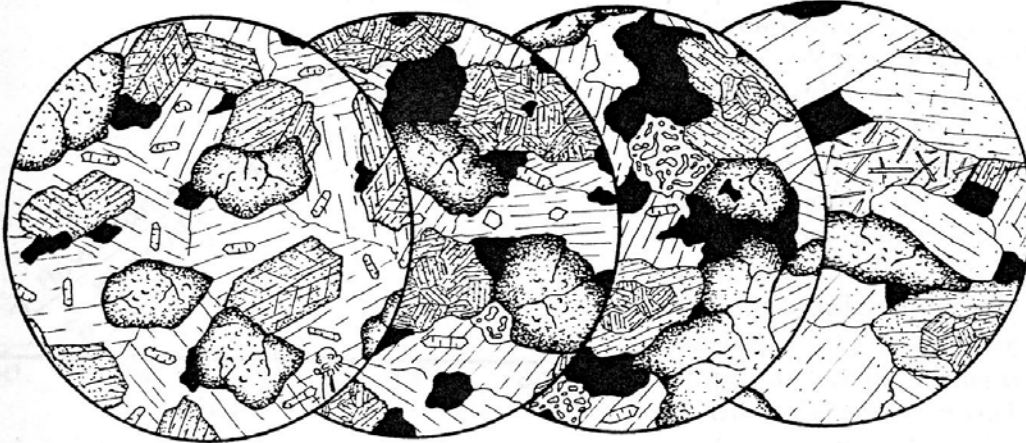


(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

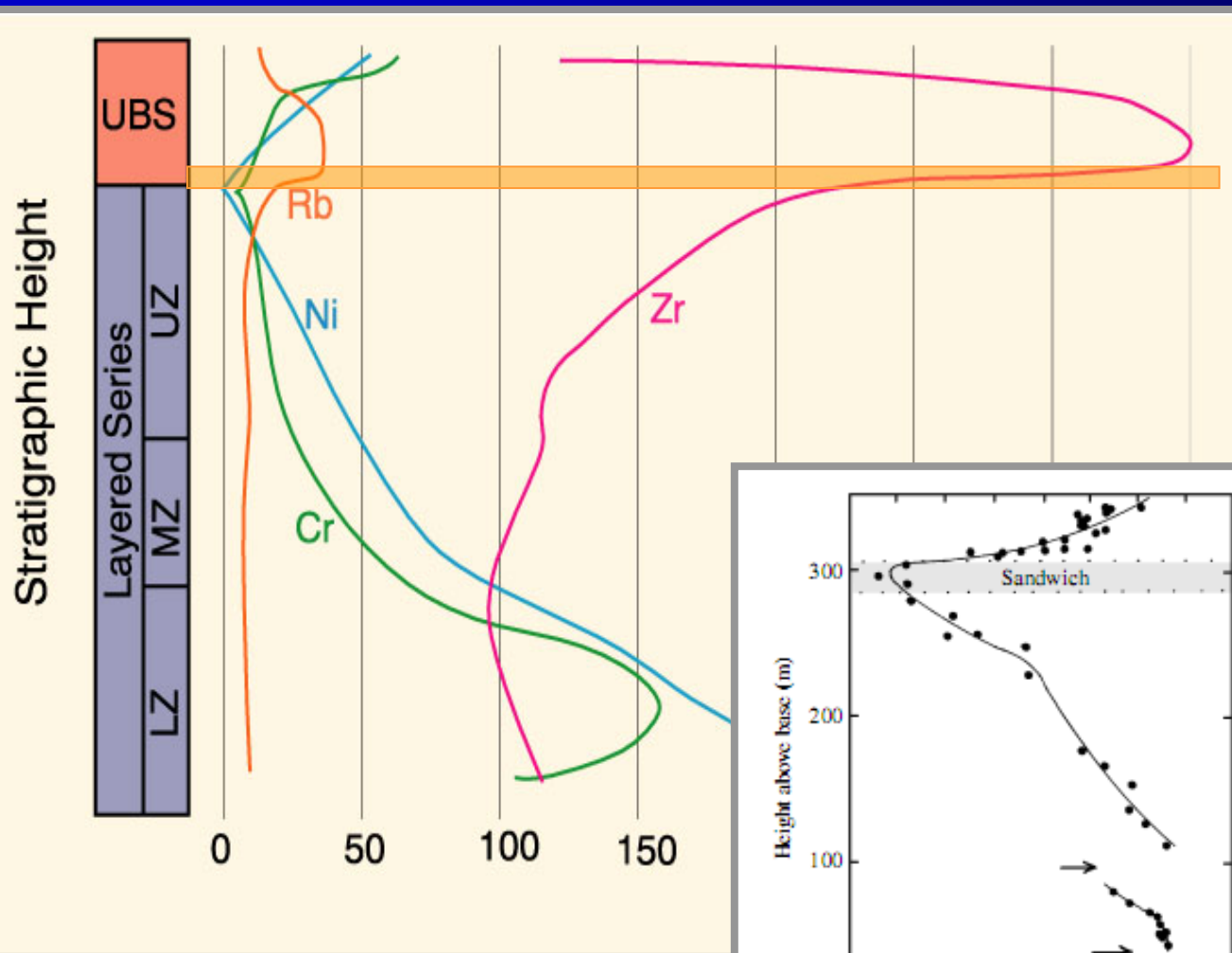
(f)

(g)

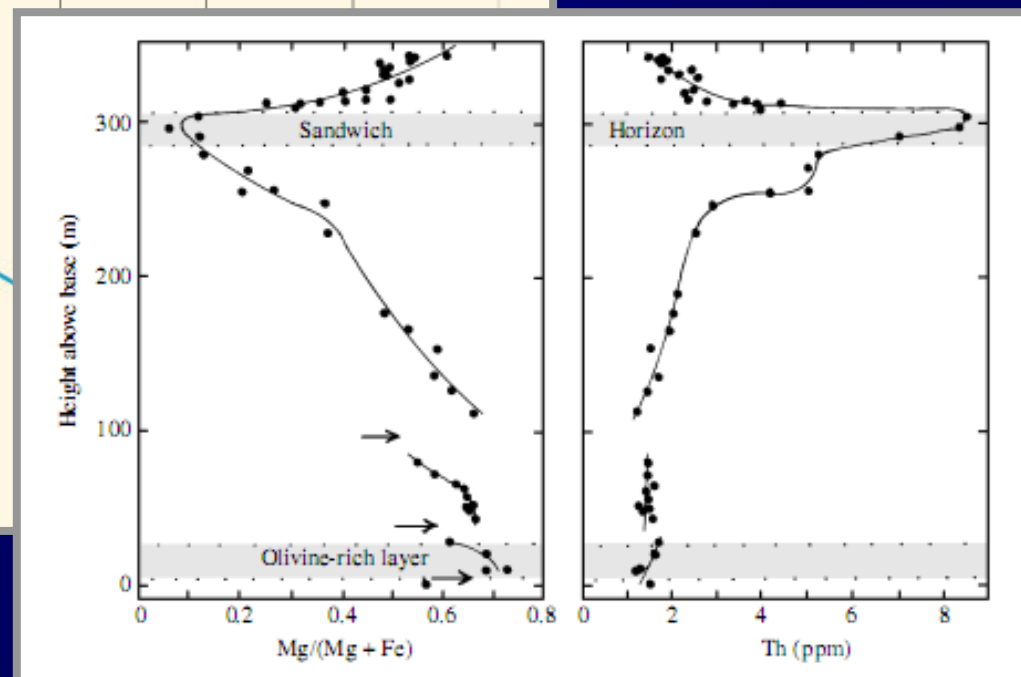
(h)

- (a) закаленное габбро
- (b) LZa ($OI+Pl+$ пойкилитовый Crx);
- (c) LZc, Mt - габбро (+ кум. Crx и Mt);
- (d) MZ (отсутствие OI);
- (e) UZb (появление OI + апатит);
- (f) UZc (мозаичный геден-бергит);
- (g) Сандвичевый горизонт;
- (h) Верхняя Краевая группа

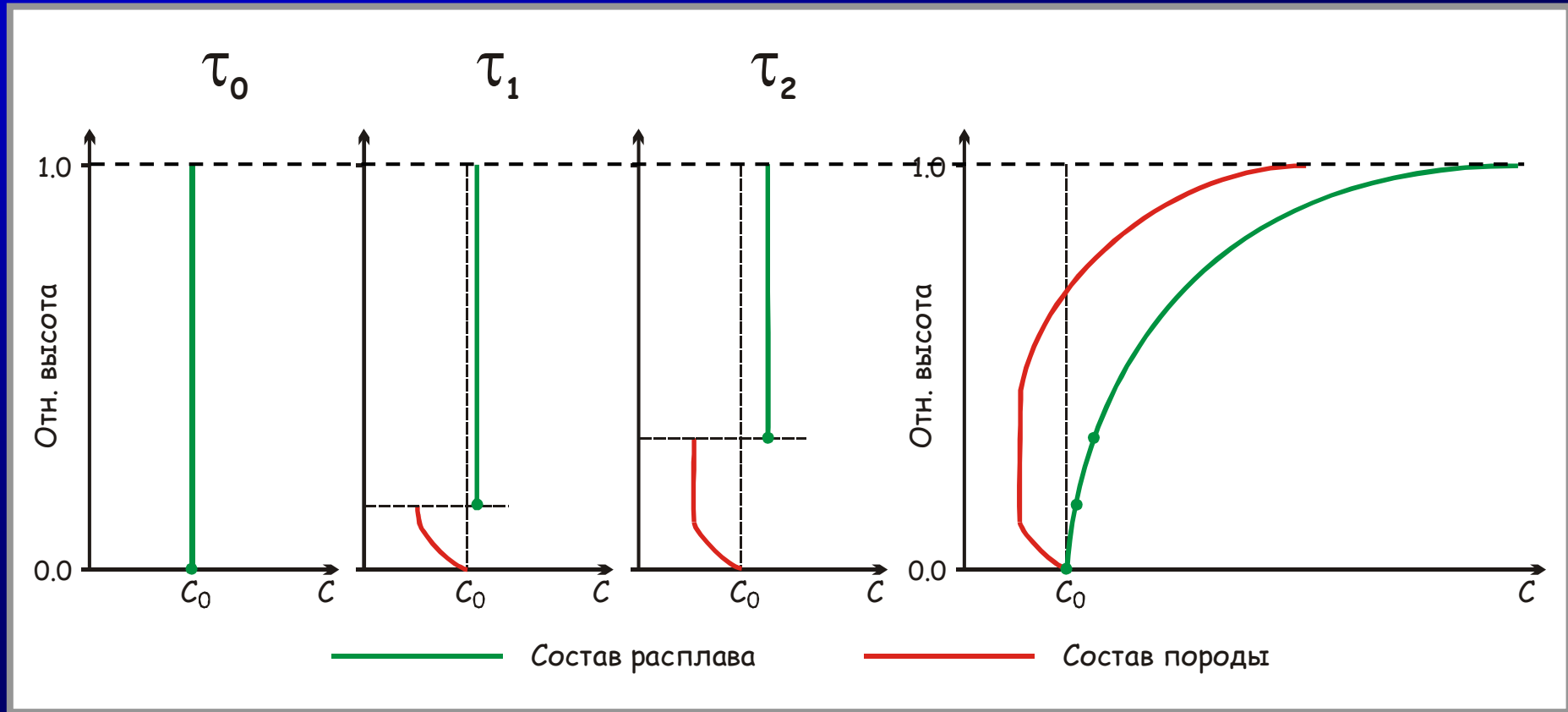
Вариации содержания микроэлементов по разрезу Скергаардского интрузива



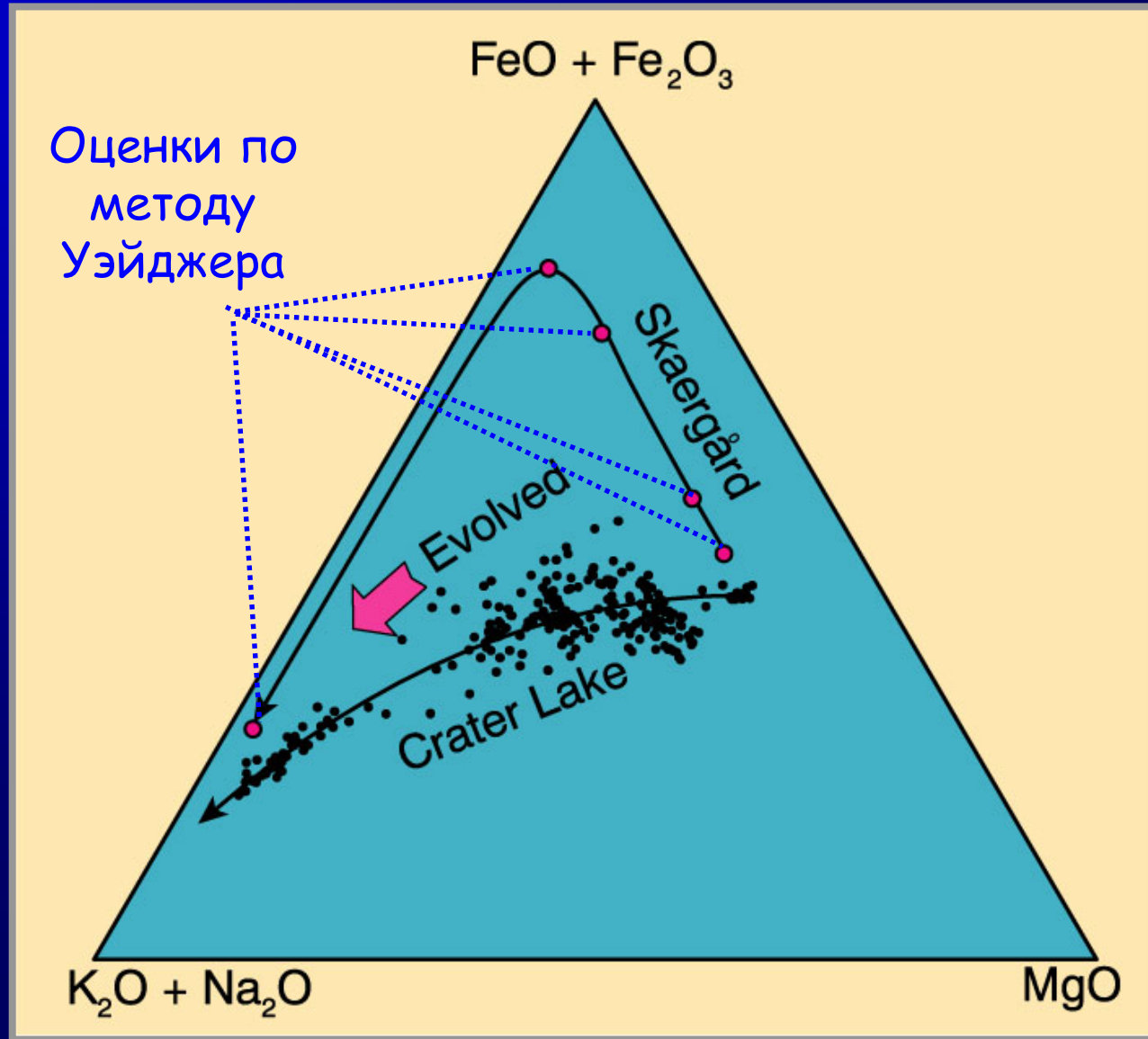
Силл Палисэйд
(Нью-Джерси,
США)



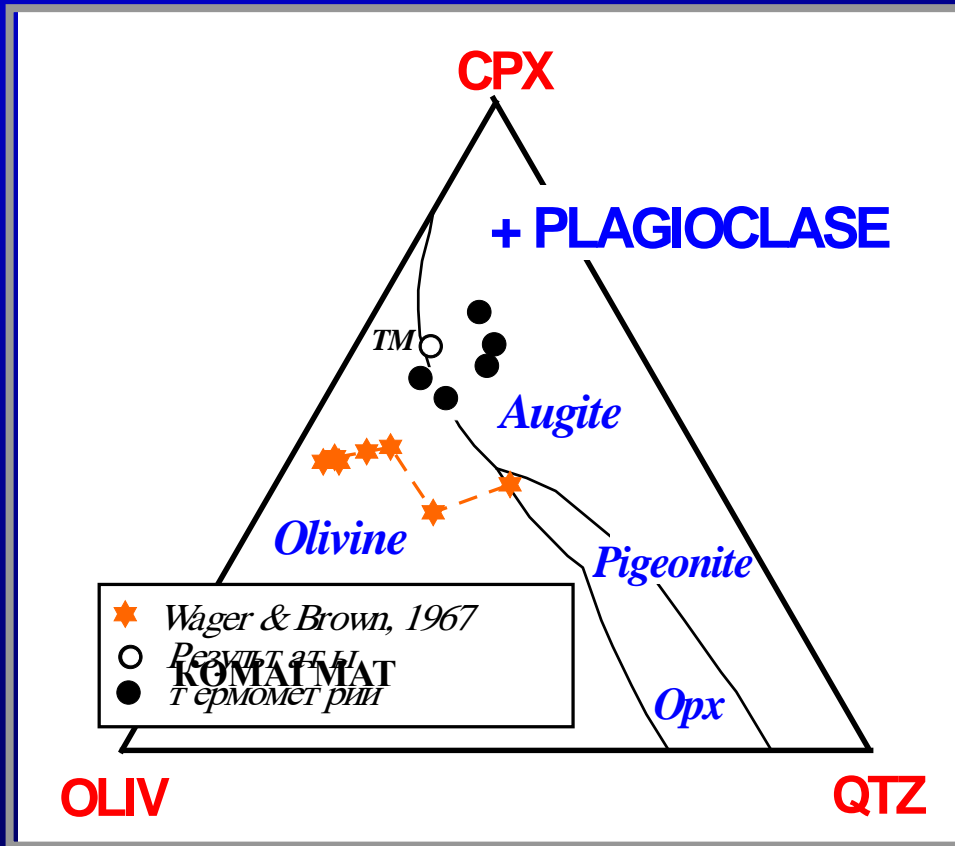
Эволюция состава дифференциатов исходной магмы в приближении гомогенности остаточного расплава (оценки по методу Уэйджера)



Канонический тренд дифференциации Скергаардской магмы



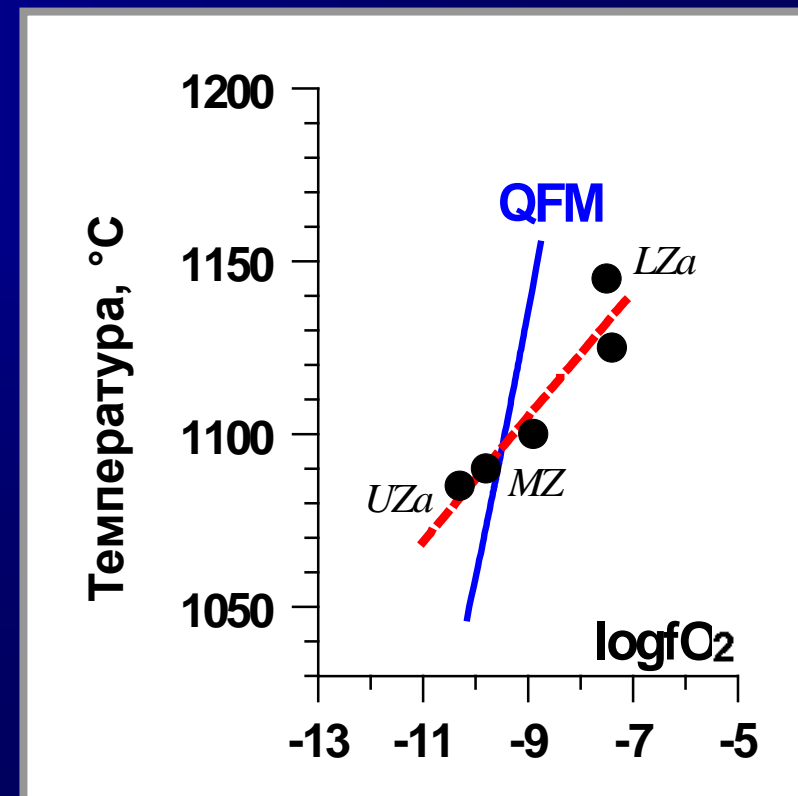
РАСЧЕТ СОСТАВА ОСТАТОЧНЫХ МАГМ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИ КОМАГМАТ



Проекция расчетных составов на плоскость OLIV-CPX-SiO₂

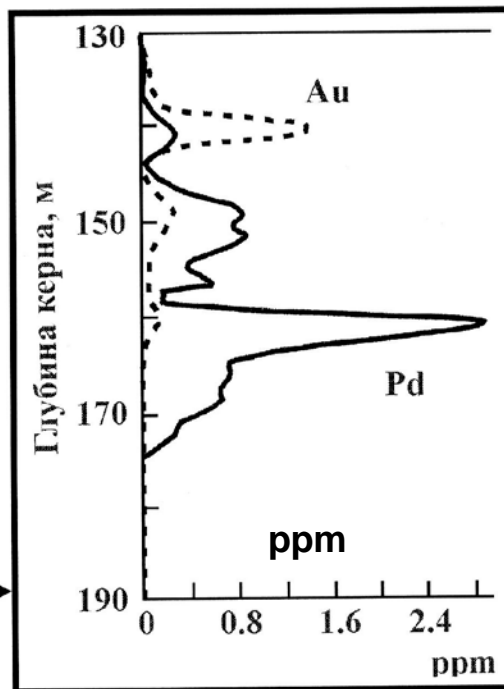
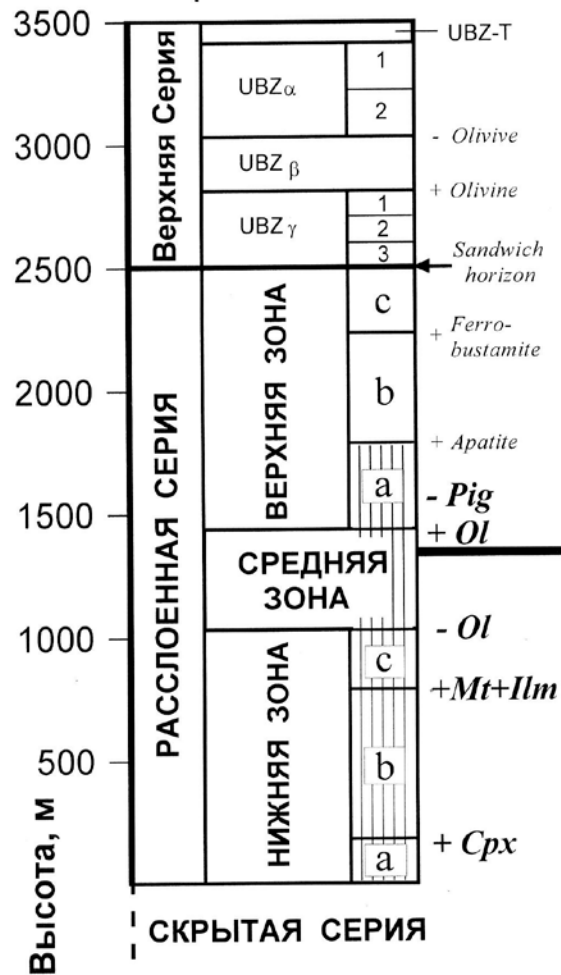
Установлен диапазон температур кристаллизации остаточных магм:

1160-1085 °C



НЕОБХОДИМОСТЬ БОЛЕЕ ТОЧНОЙ ОЦЕНКИ СОСТАВА ОСТАТОЧНЫХ МАГМ

ОБОБЩЕННЫЙ РАЗРЕЗ



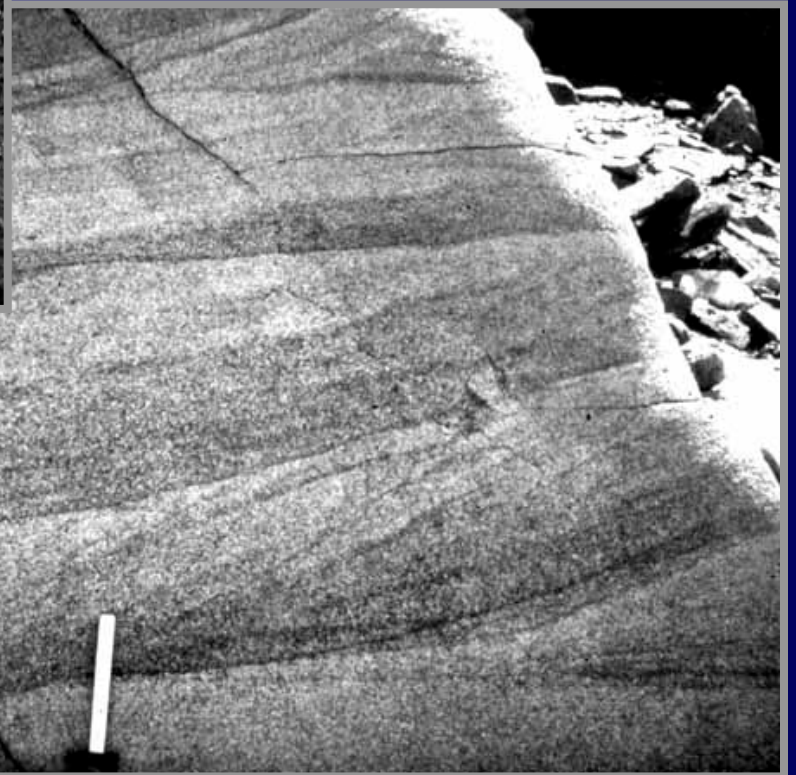
Распределение Au и Pd в породах рифа **Platinova** (Средняя Зона)

КОСАЯ СЛОИСТОСТЬ КАК РЕЗУЛЬТАТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУСТЕНЗИОННЫХ ПОТОКОВ И КУМУЛУСА

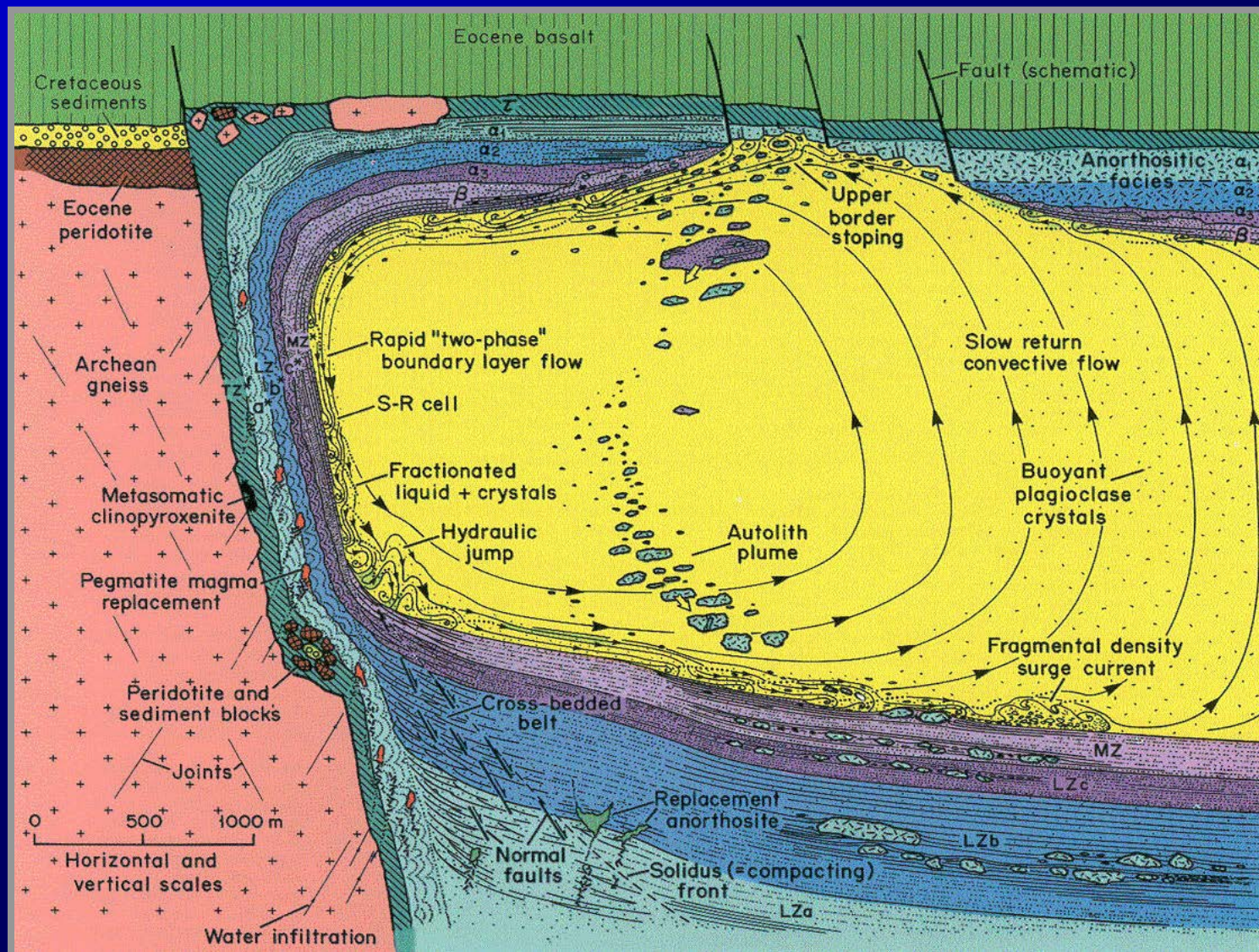


Массив острова
Дюка на Аляске

Скергаардский
интрузив

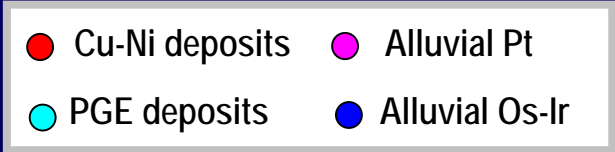
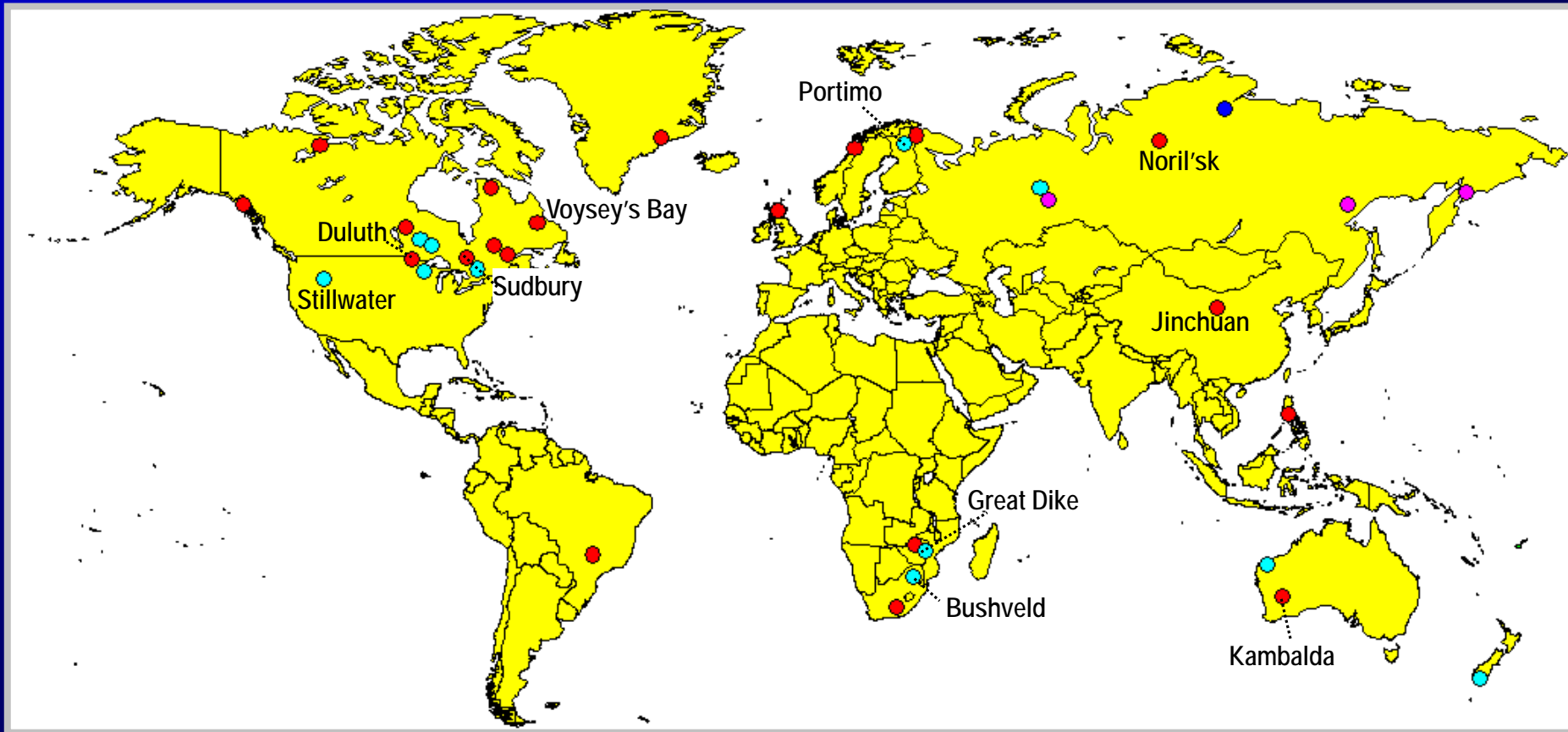


ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА КОНВЕКЦИОННЫХ ПОТОКОВ ВБЛИЗИ СТЕНОК МАГМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ



ПРИМЕРЫ МАГМАТИЧЕСКОЙ РАССЛОЕННОСТИ

Distribution of Cu-Ni and PGE deposits (after Naldrett, 2003)



Petrotectonic classification of Cu-Ni deposits

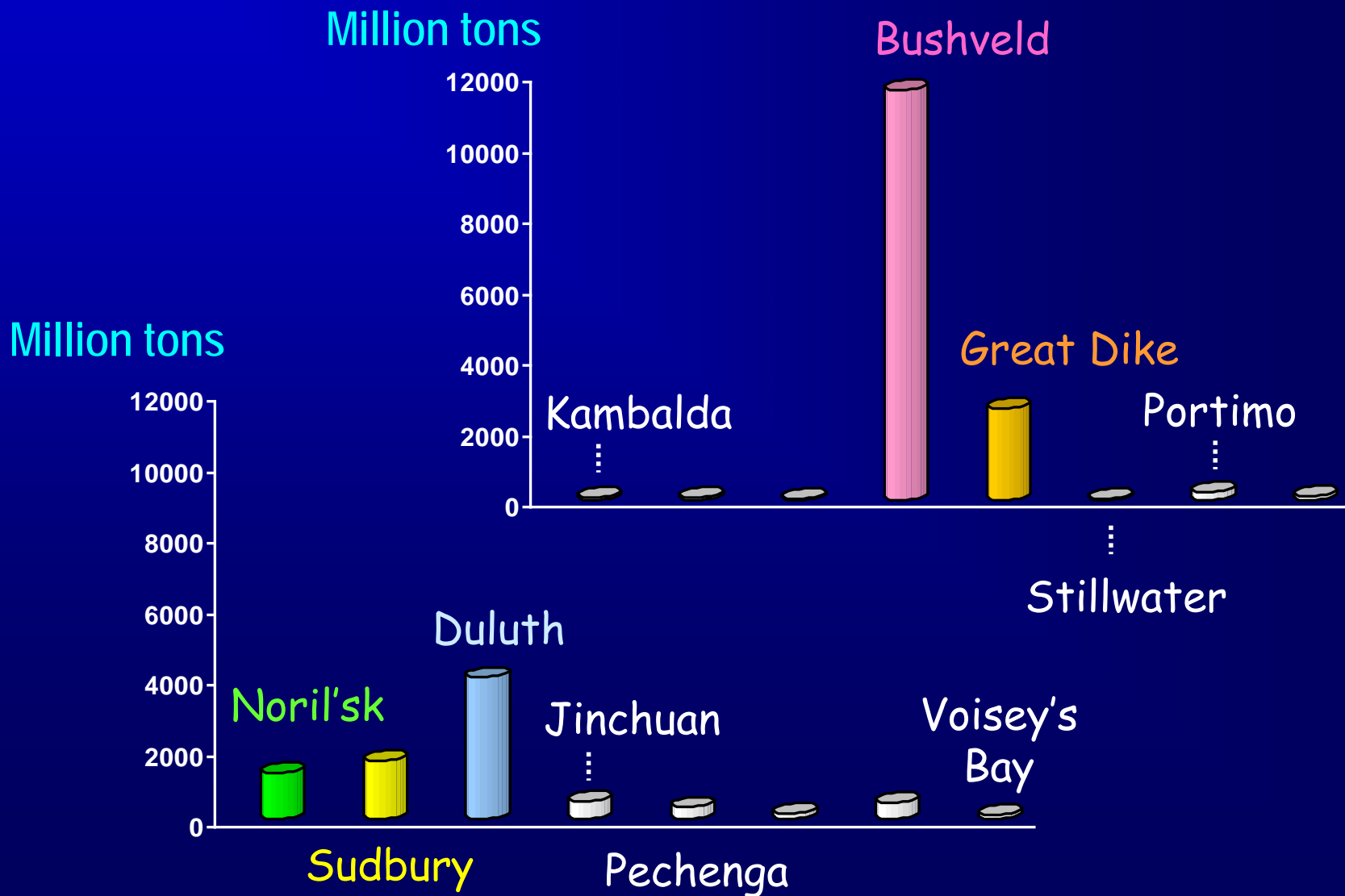
Type	Magmatism	Ore fields and intrusions	Age	Settings
1	Komatiitic	Kambalda (<i>Western Australia</i>), Abitibi (<i>Canada</i>)	AR	Greenstone belts (rifts?)
2	Flood-basaltic (intrusive traps)	Noril'sk (Siberia), Maskox, Duluth Complex	P ₂ -T ₁ PR ₃ PR ₃	Rift of continental margin “---”
3	Ferro-picritic	Pechenga (Kola Peninsula, Russia)	PR ₂	“---”
4	Anorthosite- troctolitic	Voisey's Bay (Canada)	PR ₃	Rifting zone
5	“Heterogeneous”	Jinchuan (China)	PR ₂	Continental margin
6	Hybrid (impact- induced)	Sudbury (Canada)	PR ₂	Meteoritic impact

Petrotectonic classification of PGE deposits

Type	Magmatism	Intrusions	Age	Settings
1	High-Mg bas.-andesite (HMBA) and tholeiites	Bushveld, Stillwater, Great Dike	PR ₁ AR AR	Craton ? Cratonic rift
2	HMBA and tholeiites	Munni-Munni <i>(Western Australia)</i> Portimo <i>(Finland)</i>	AR	Craton
3	Tholeiitic	Skaergaard	PR ₂ KZ	Rift of continental margin
4	Calc-alkaline	Volkovskiy Pluton <i>(Russia)</i>	PZ ₁	Island arcs
5	Alkaline (<i>Ural-Alaskan type</i>)	Koryakian intrusions <i>(Russia)</i>	PZ ₁	Island arcs
6	Alkaline Ultramafic	Gulinskii Pluton <i>(Siberia, Russia)</i>	P ₂ -T ₁ ?	Rifting

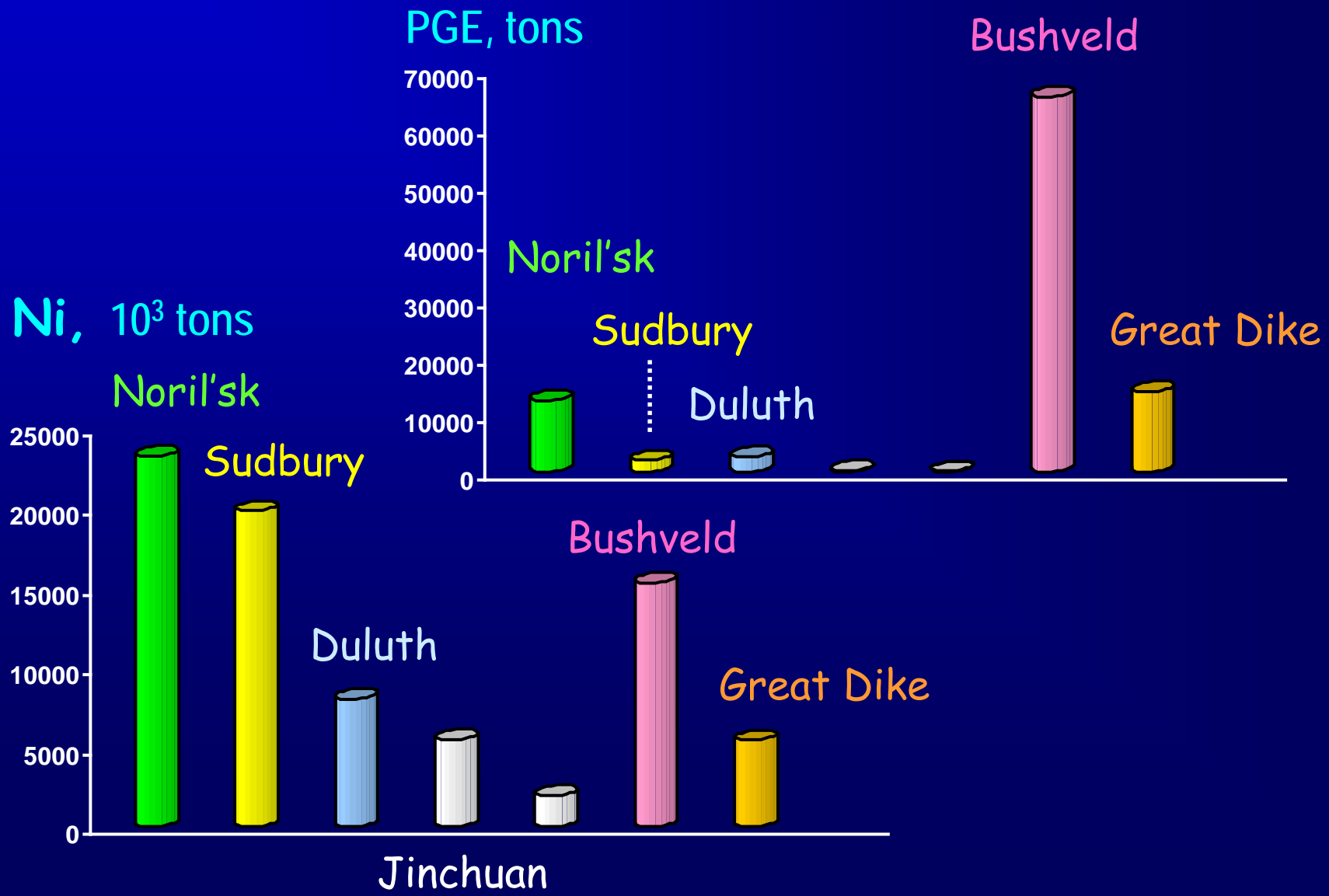
Total ore resources of largest Cu-Ni-PGE deposits

(after Naldrett, 2003)



Resources of metals in largest Ni-PGE deposits

(after Naldrett, 2003)



ПРИМЕРЫ МАГМАТИЧЕСКИХ

Origin of Fe-Ti Oxide Ores in Mafic Intrusions: Evidence from the Panzhihua Intrusion, SW China

KWAN-NANG PANG^{1*}, MEL-FU ZHOU¹, DONALD LINDSLEY², DONGGAO ZHAO³ AND JOHN MALPAS¹

Fig. 2. Geological map of the Panzhihua intrusion (modified after Zhou et al., 2005). The star indicates the location of the Lanjiahuoshan open-pit mine.

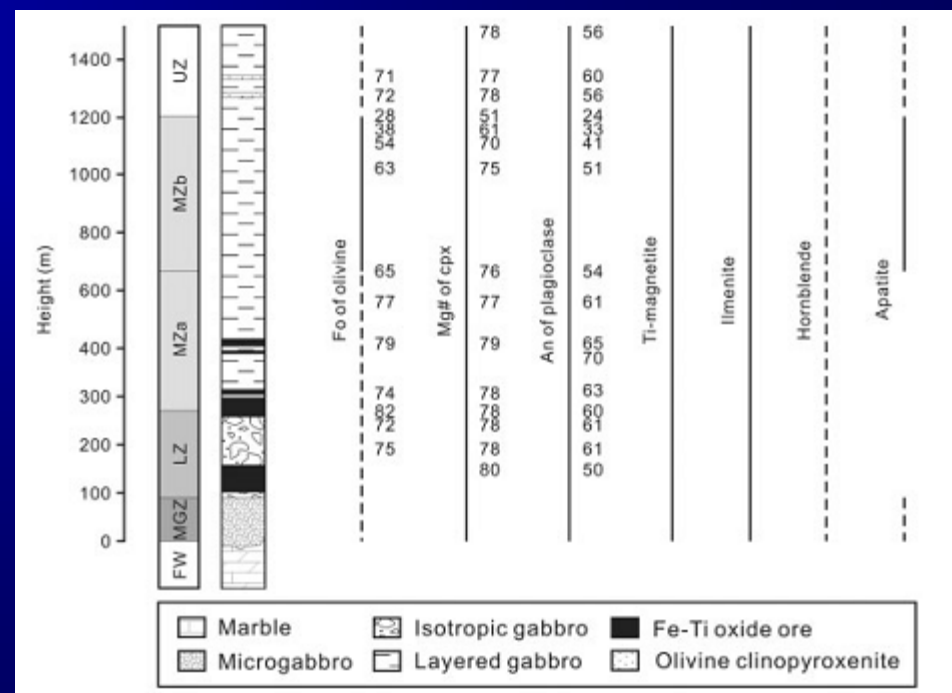
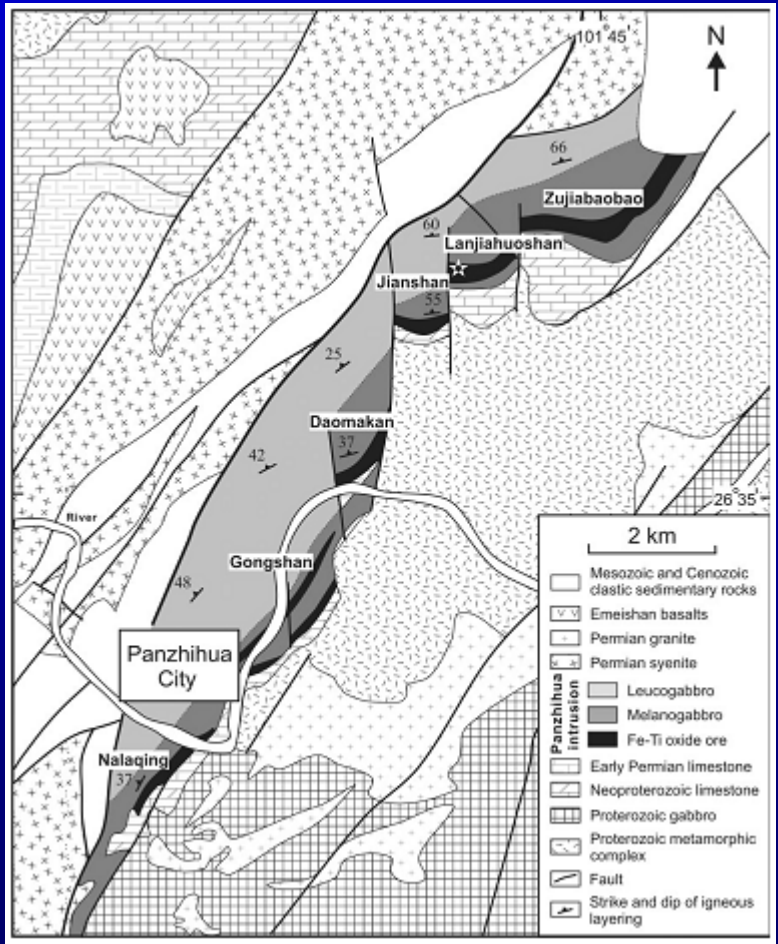


Fig. 3. Generalized stratigraphic section, showing the mineral occurrence and composition in the Panzhihua intrusion (K.-N. Pang & M.-F. Zhou, unpublished data). FW, footwall; MGZ, Marginal zone; LZ, Lower zone; MZa, Middle zone a; MZb, Middle zone b; UZ, Upper zone. Continuous line indicates ubiquitous occurrence; dashed line indicates sporadic occurrence.

ПРИМЕРЫ МАГМАТИЧЕСКОЙ РАССЛОЕННОСТИ

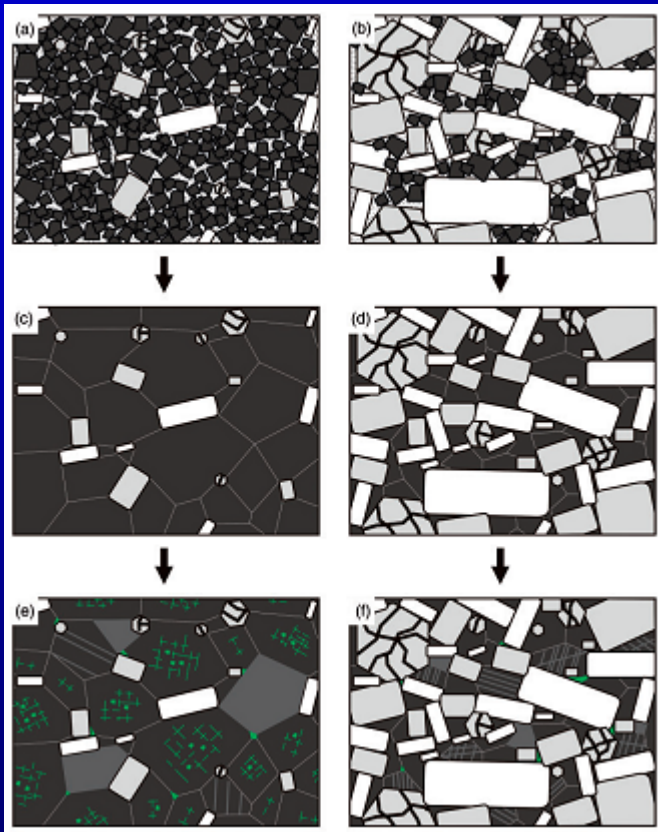


Fig. 10. Schematic diagram illustrating the crystallization sequence with progressive cooling in rocks with different oxide contents of the Benbulbin intrusion. (a, b) Partially solidified oxide ore and oxide-gabbro in the late magmatic stage. (c, d) Oxide ore and oxide-gabbro at high subolidus temperatures. (e, f) Oxide ore and oxide-gabbro at low subolidus temperatures. (See text for discussion.)

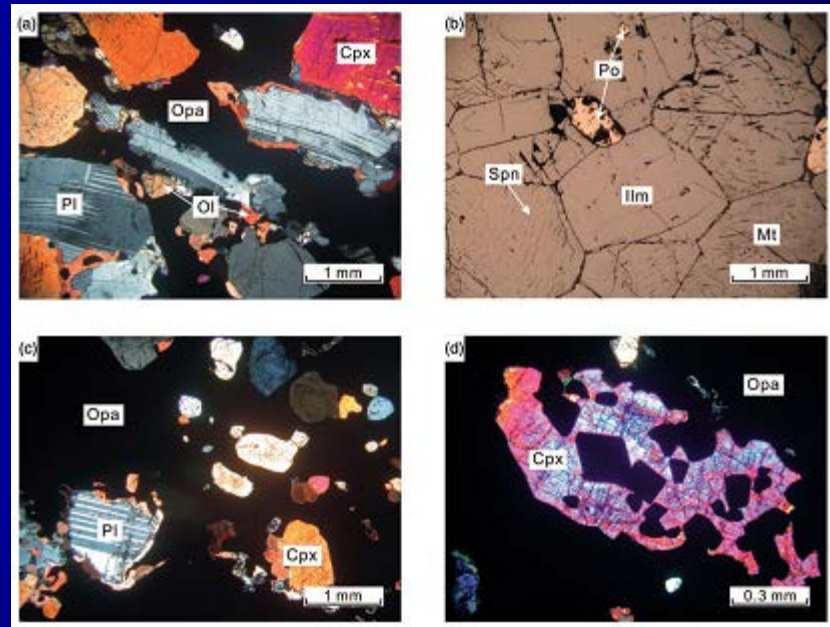
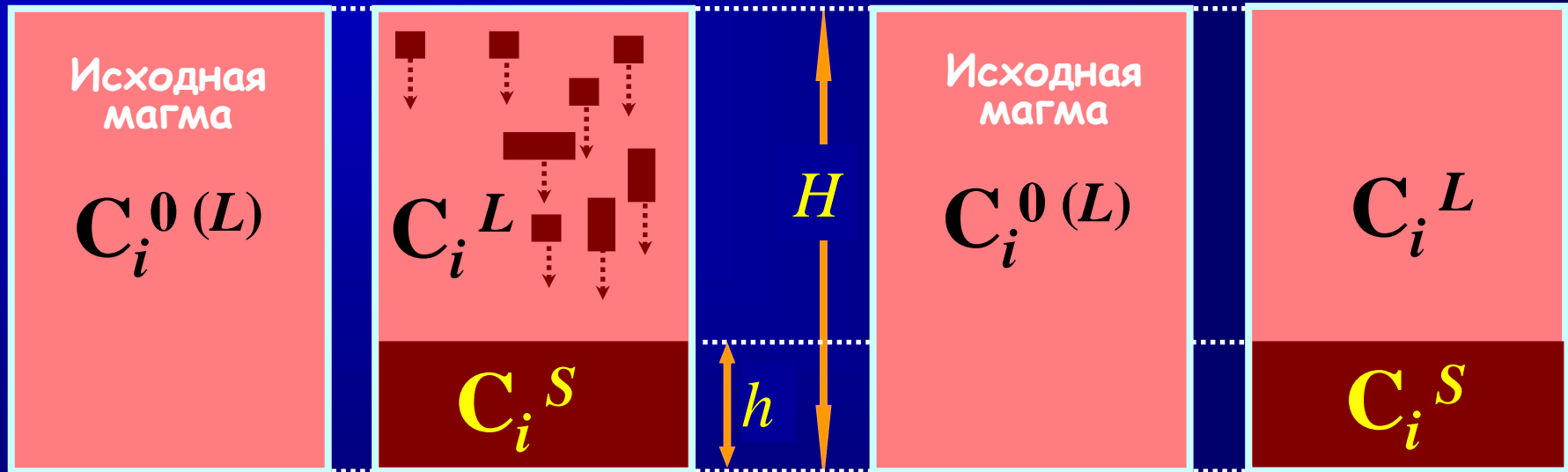


Fig. 5. Thin-section textures of Fe-Ti oxides in the rocks of the Benbulbin intrusion. (a) Oxide-gabbro consisting of cumulus clinopyroxene and plagioclase surrounded by interstitial Fe-Ti oxides. (b) Grains of polygonal magnetite and ilmenite with boundaries that meet at $\sim 120^\circ$ triple junctions in Fe-Ti oxide ore; the presence of hercynitic spinel lamellae in the magnetite host should be noted. (c) Oxide ore containing isolated grains of clinopyroxene and plagioclase in an oxide matrix. (d) Euhedral magnetite inclusions in a clinopyroxene grain in Fe-Ti oxide ore. Cpx, clinopyroxene; Ilm, ilmenite; Mt, magnetite; Ol, olivine; Opa, opaque oxides; Pl, plagioclase; Sp, pyrrhotite; Spn, hercynitic spinel.

СХЕМЫ ВНУТРИКАМЕРНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ МАГМЫ ПРИ ИДЕАЛЬНОМ ФРАКЦИОНИРОВАНИИ

Оседание кристаллов

Направленная кристаллизация



Остаточный расплав

Остаточный расплав

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

где $\varphi = h / H$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭВМ-МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРОЕНИЯ СИЛЛА ВАВУКАН ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ КОМАГМАТ

Блок ДИНАМИКА (программа ИНТРУЗИВ)

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

Нет

Потоки тепла через контакт интрузива
Потоки направленной кристаллизации минералов
Потоки объемной кристаллизации минералов

Скорости фронтов кристаллизации
мощность и фазовый состав зон направленной кристаллизации

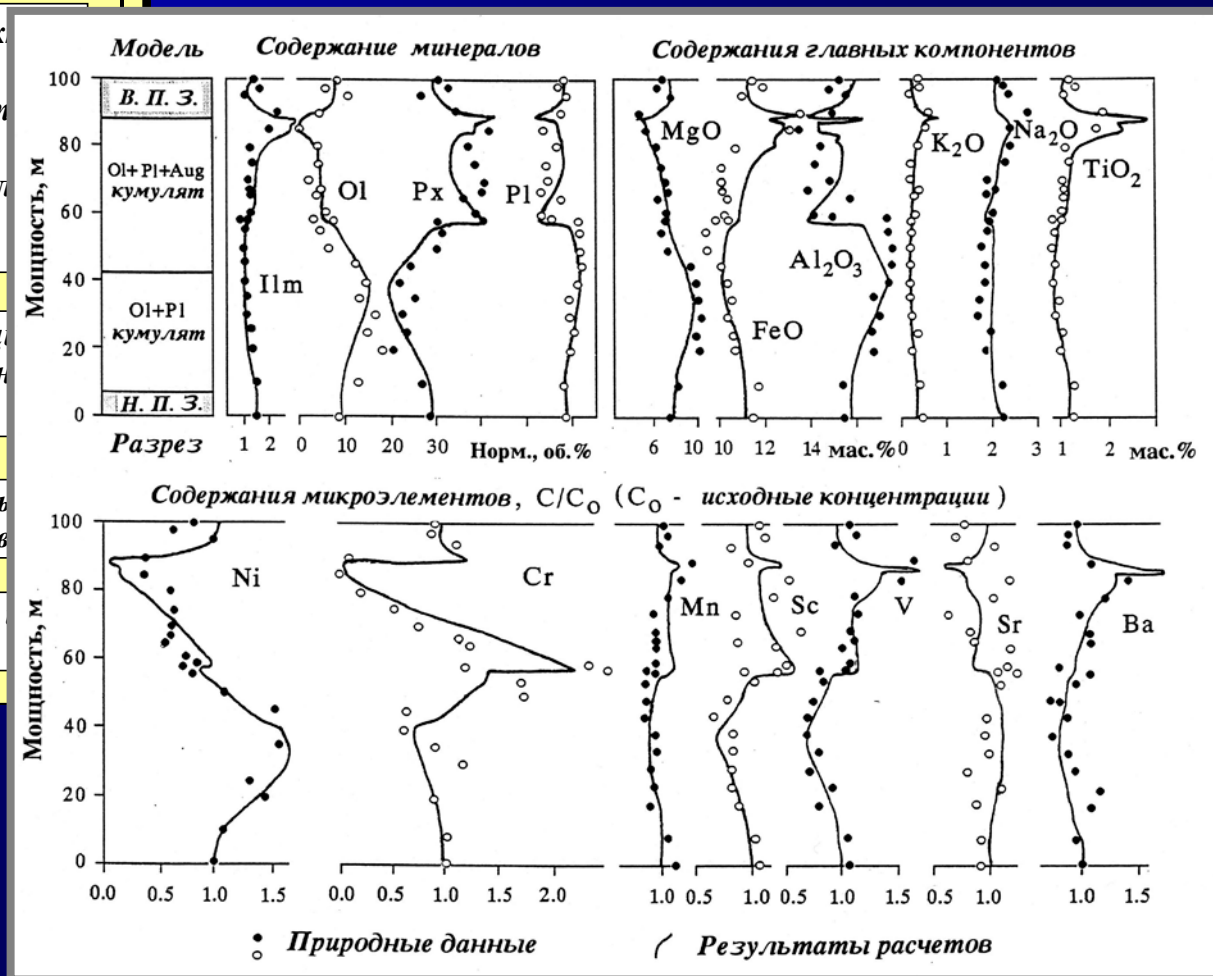
$F_L^{cum} \geq F_L^{CR}$

Да

Мощность и фазовый состав кумулятов

Расчет химического состава пород остаточной магмы

Модельные и природные распределения



Динамический блок модели КОМАГМАТ