

ПЕТРОГРАФИЯ

Пактовский Юрий Германович

Ст. преподаватель

кафедры минералогии и петрографии

Рекомендуемая литература по курсу «ПЕТРОГРАФИЯ»

Основная:

- ***Ибламинов Р.Г., Молоштанова Н.Е., Шехирева А.М.*** Петрография (Магматические, метаморфические, метасоматические и импактные породы). Пермь, ПГНИУ, 2012. 240 с.

Дополнительная:

- 1. ***Белоусова О.Н., Михина В.В.*** Общий курс петрографии. М.: Недра, 1972. 344 с.
- 2. ***Емельяненко П.Ф., Яковлева Е.Б.*** Петрография магматических и метаморфических пород. М. : Изд-во МГУ, 1985. 248 с.
- 3. ***Трусова И.Ф., Чернов В.И.*** Петрография магматических и метаморфических пород М., «Недра»1982, 272 с.
- 4. ***Маракушев А.А.*** Происхождение Земли и природа ее эндогенной активности. М.: Наука, 1999. 255 с.
- 5. ***Петрографический кодекс России.*** Магматические, метаморфические, импактные образования. 3-е изд. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 200 с.

Современная систематика горных пород

I. Тип – Магматические горные породы

II. Тип – Метаморфические горные породы

III. Тип – Метасоматические горные породы

IV. Тип – Мигматиты

V. Тип – Импактиты

VI. Тип – Осадочные горные породы

(изучает литология – петрография осадочных горных пород)

Введение

Петрография – наука о горных породах, которые слагают земную кору.

Задачи петрографии:

- Изучение вещественного состава твёрдой Земной коры.
- Разработка рациональных классификаций горных пород, основанных на их вещественном составе и геологических особенностях залегания.
- Изучение взаимосвязи между горными породами и полезными ископаемыми.

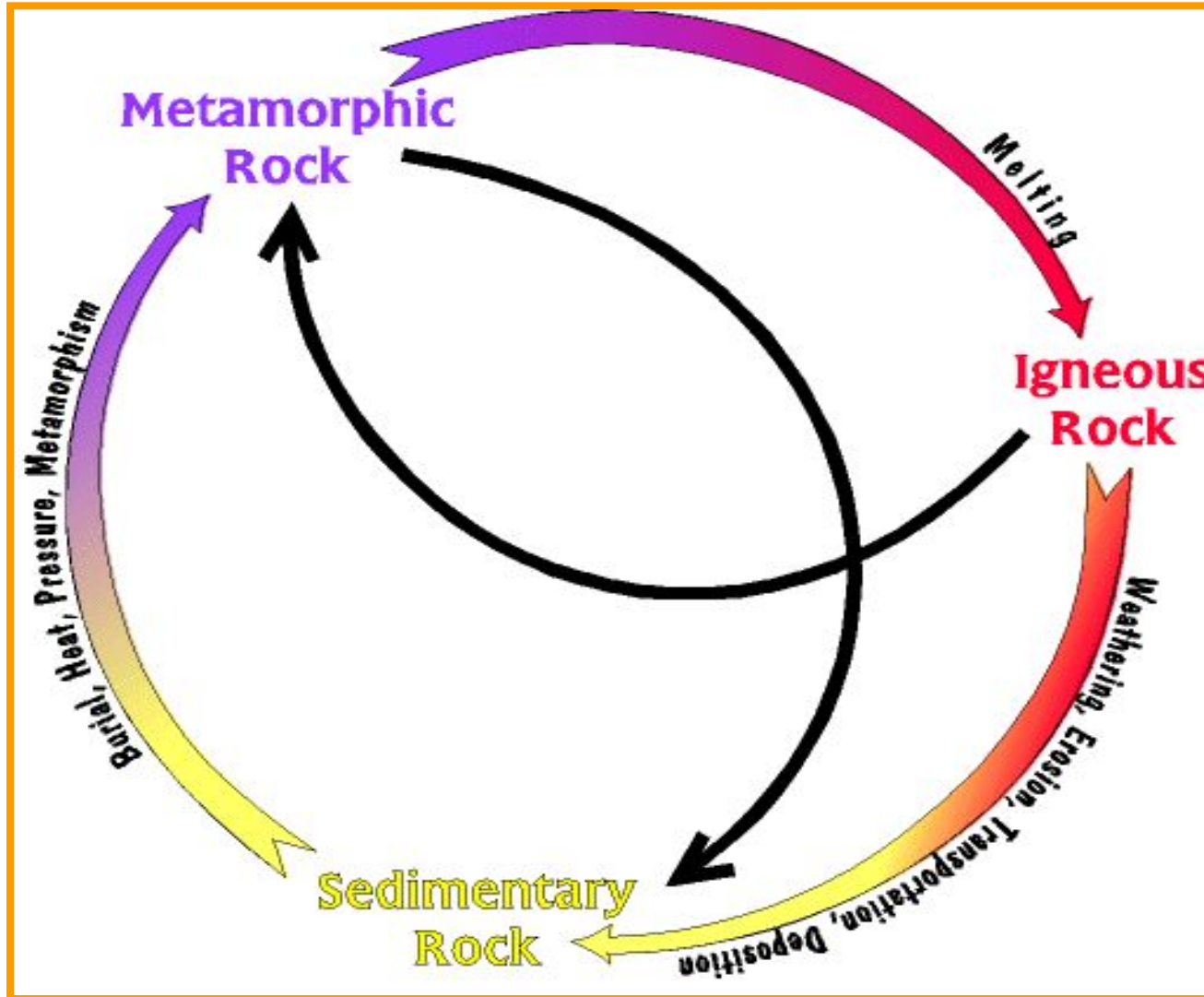
Предмет изучения петрографии –

горные породы, слагающие земную кору и верхнюю мантию.

- Горная порода – это один минеральный агрегат или совокупность нескольких минеральных агрегатов.
- Минеральный агрегат – это совокупность минералов, сформировавшихся в близких геологических и физико-химических условиях земной коры.

КРУГОВОРОТ ГОРНЫХ ПОРОД ЗЕМЛИ

the rock cycle



Методы изучения горных пород

- Горные породы изучаются, во-первых, *как геологические тела* на месте своего залегания (в полевых условиях) и, во-вторых, как минеральные агрегаты в лабораториях. Оба вида исследований необходимы.
- В полевых условиях определяют формы и условия залегания, устанавливают контакты с вмещающими породами, измеряют элементы залегания, характеризуют трещиноватость, отдельность и другие особенности горных пород, делают зарисовки и т.д.
- В лабораторных условиях проводят *аналитические исследования*. Для этого используют методы кристаллооптики, спектроскопии, рентгено-структурного, химического, термического, радиологического, электронно-микроскопического и других анализов.

I. Тип – Магматические горные породы

В соответствии с Петрографическим кодексом 2009 года, выделяют 6 номенклатурных единиц (таксонов):

- 1. тип,
- 2. класс,
- 3. отряд,
- 4. подотряд,
- 5. семейство,
- 6. вид.

К типу магматических – относятся горные породы, образовавшиеся в результате застывания и кристаллизации магматических расплавов.

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ КОДЕКС

МАГМАТИЧЕСКИЕ,
МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ, МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ,
ИМПАКТНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ

Издание третье

Санкт-Петербург ■ 2009

По критерию фации глубинности становления магматические горные породы подразделены на три класса:

- 1. Плутонические** породы формируются на глубинах более 5000 м при температуре 750 – 1100° и характеризуются полнокристаллическими структурами.
- 2. Гипабиссальные, или жильные,** аналоги плутонических пород формируются на глубинах 1500 – 5000 м и характеризуются афанитовыми или пор-фировидными полнокристаллическими структурами.
- 3. Вулканические** породы (*излившиеся аналоги плутонических пород*) формируются на глубинах до 1500 м или изливаются на поверхность при температуре 800 – 1200° и характеризуются порфировыми или стекловатыми структурами.

Отряды

магматических горных пород

выделяются по содержанию кремнезёма (SiO_2) :

- 1. менее 30% кремнезёма – некремнезёмистые и низкокремнезёмистые;*
- 2. 30-45% - ультраосновные;*
- 3. 45-52% - основные;*
- 4. 52-63% - средние;*
- 5. 63-78% - кислые;*
- 6. высококремнезёмистые (ультракислые) – более 78% кремнезёма.*

Подотряды — подразделяются по общей щёлочности:

- *низкощелочные;*
- *нормальнощелочные ;*
- *умереннощелочные;*
- *щелочные.*

Критерием выделения является суммарное содержание $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, соотнесенное с содержанием SiO_2 .

- **Семейства** – выделяют по содержанию главных породообразующих минералов:

например:

породы семейства перидотитов – пикритов содержат Ol и Px;

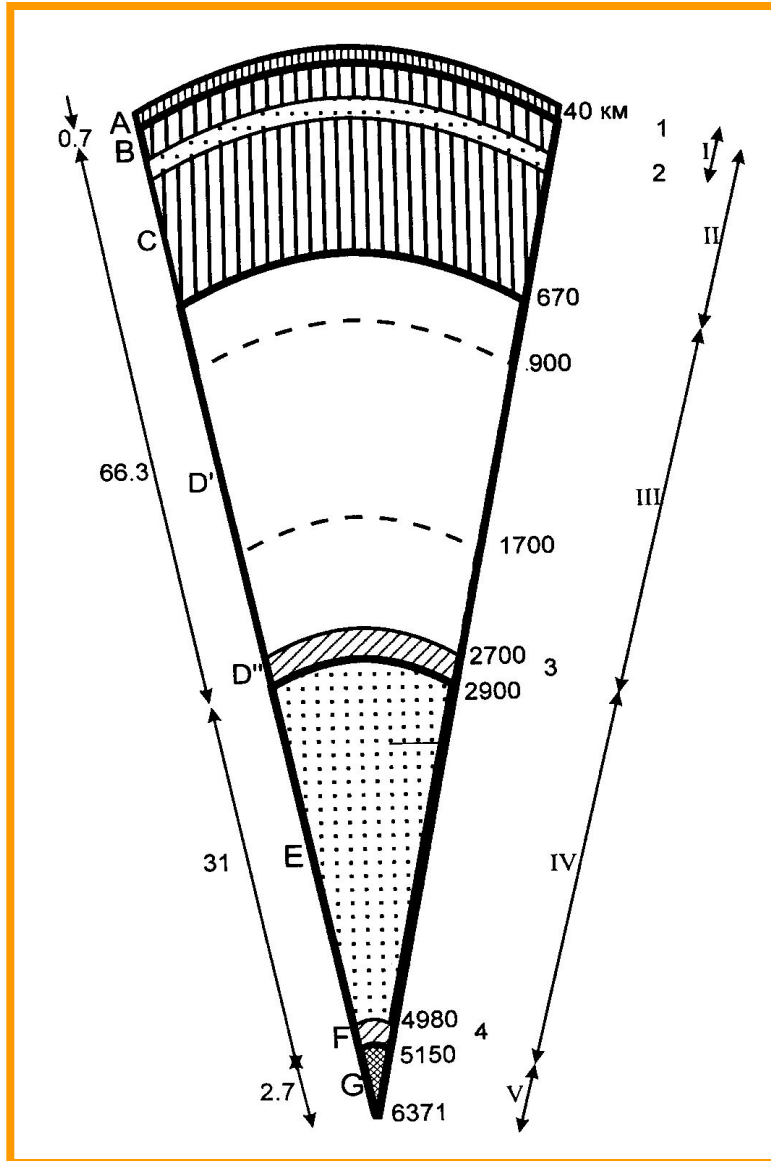
породы семейства габбро – базальтов сложены Px и Pl_{осн.};

породы семейства диоритов – андезитов состоят из Amf (Hb) и Pl_{ср.} (и т.д.)

- **Вид** – представляет собой конкретную горную породу.

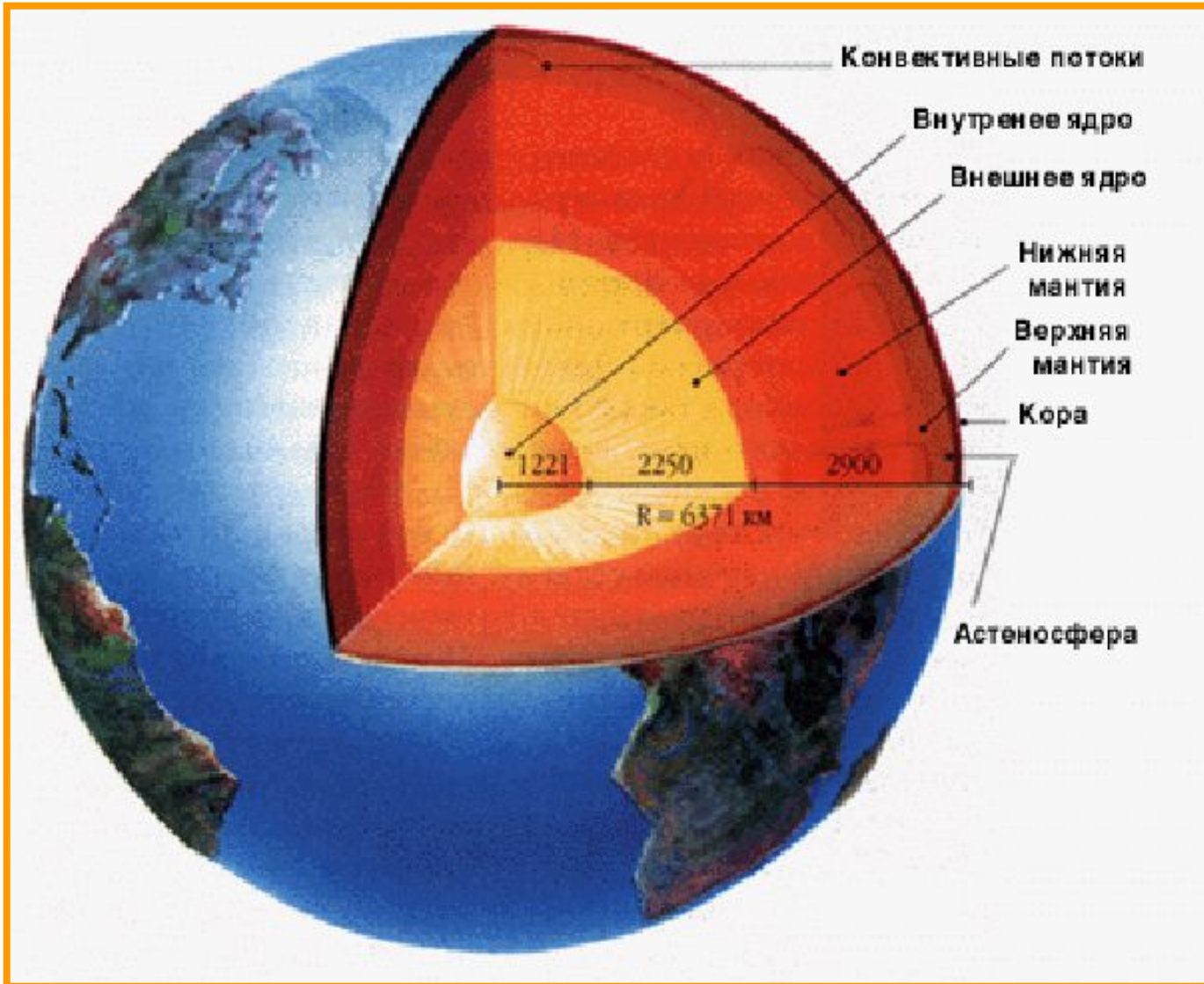
Так, в семействе перидотитов выделяют оливиниты, где обязательным аксессуаром должен быть магнетит; и дуниты – с хромшпинелидом (хромитом).

Строение внутренних геосфер Земли



- 1. Земная кора } Литосфера
- В.П. Верхняя мантия }
- 2. Астеносфера }
- С.П. Слой Голицына (средняя мантия по К. Буллену) }
- Д'.Ш. Нижняя мантия }
- Д''.3.Ш. Переходный слой }
- Е.И. Внешнее ядро }
- Ф. Переходный слой }
- Г.У. Внутреннее ядро }

ВНУТРЕННИЕ ГЕОСФЕРЫ ЗЕМЛИ



Земная кора:

- континентальная,
- океаническая.

Континентальная кора:

- **Верхняя – гранит-метаморфическая** (метаморфические породы фаций зеленых сланцев и амфиболитовой и плутонические горные породы с преобладанием гранитов).
- **Нижняя – гранулит-базитовая** (метаморфические породы амфиболитовой и гранулитовой фаций и плутонические горные породы с преобладанием базитов).

Средняя мощность континентальной земной коры – около **35-40 км** (максимальная – до **70-100 км** – в горных сооружениях, орогенах).

- **Граница** между верхней и нижней корой – сейсмическая поверхность Конрада (**граница Конрада** фиксирует переход от гранитного слоя к базальтовому).
- **Граница** между земной корой и верхней мантией называется **границей Мохоровичича (Мохо, или просто М)**.

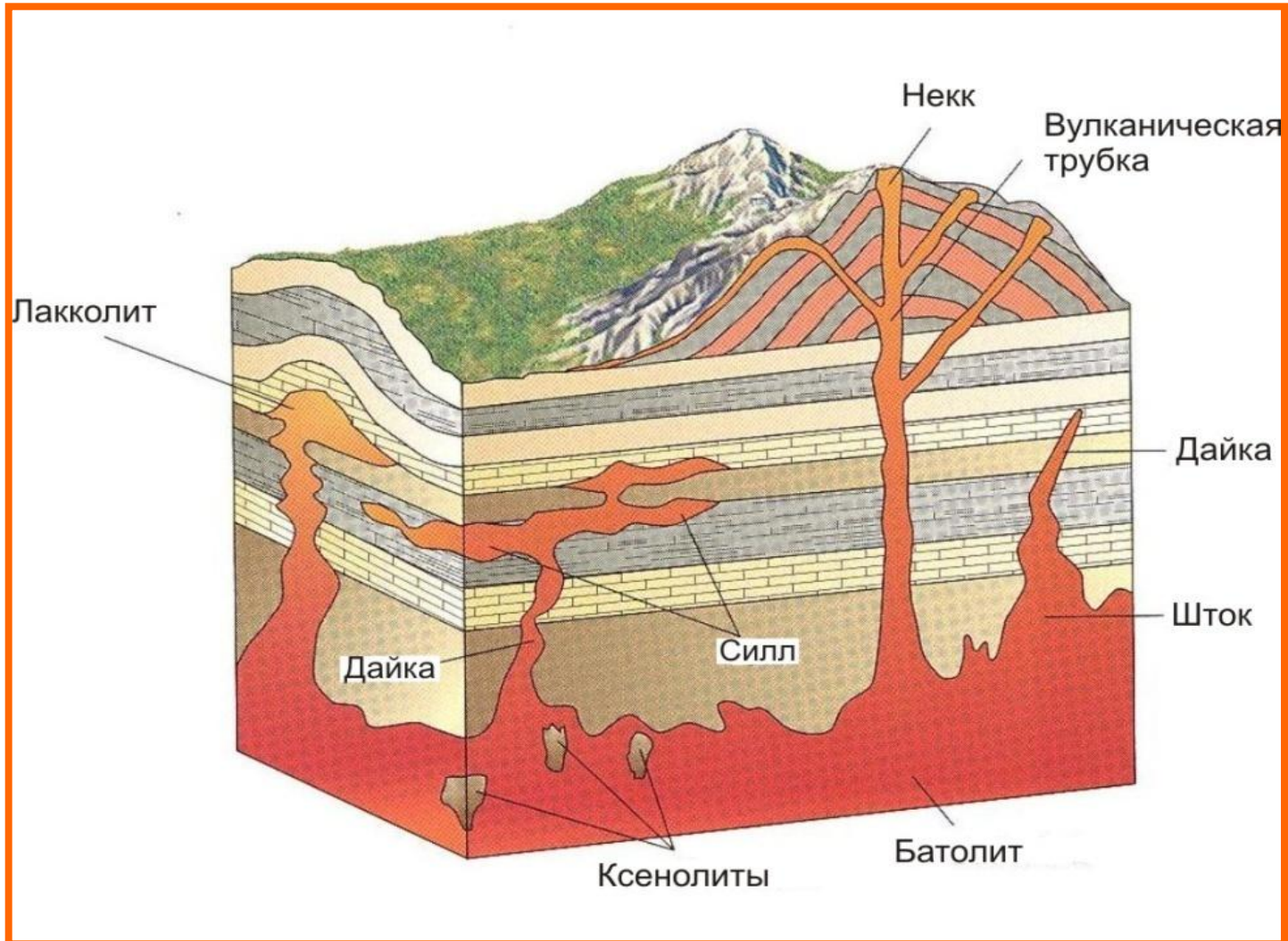
Океаническая кора

представлена только нижним слоем – базальтовым,
в последовательности – сверху вниз (от базальтов к ультрамафитам):

- подушечные лавы – *pillow lavas* (современные излияния базальтовой лавы на дне океанов, в СОХах);
- габбро, метагаббро;
- ультрамафиты (перидотиты, оливиновые породы).

Средняя мощность океанической земной коры – около **7 км**.
Минимальная мощность – в зонах спрединга в срединно-океанических хребтах.

Морфология тел магматических пород



Вещественный состав магматических горных пород

определяется химизмом исходного магматического расплава. Основными компонентами магматических пород являются:

- Девять элементов: O; Si; Al; Fe; Mg; Ca; Na; K; H.

ОСИАЛФЕМАГ КАНАК АШ

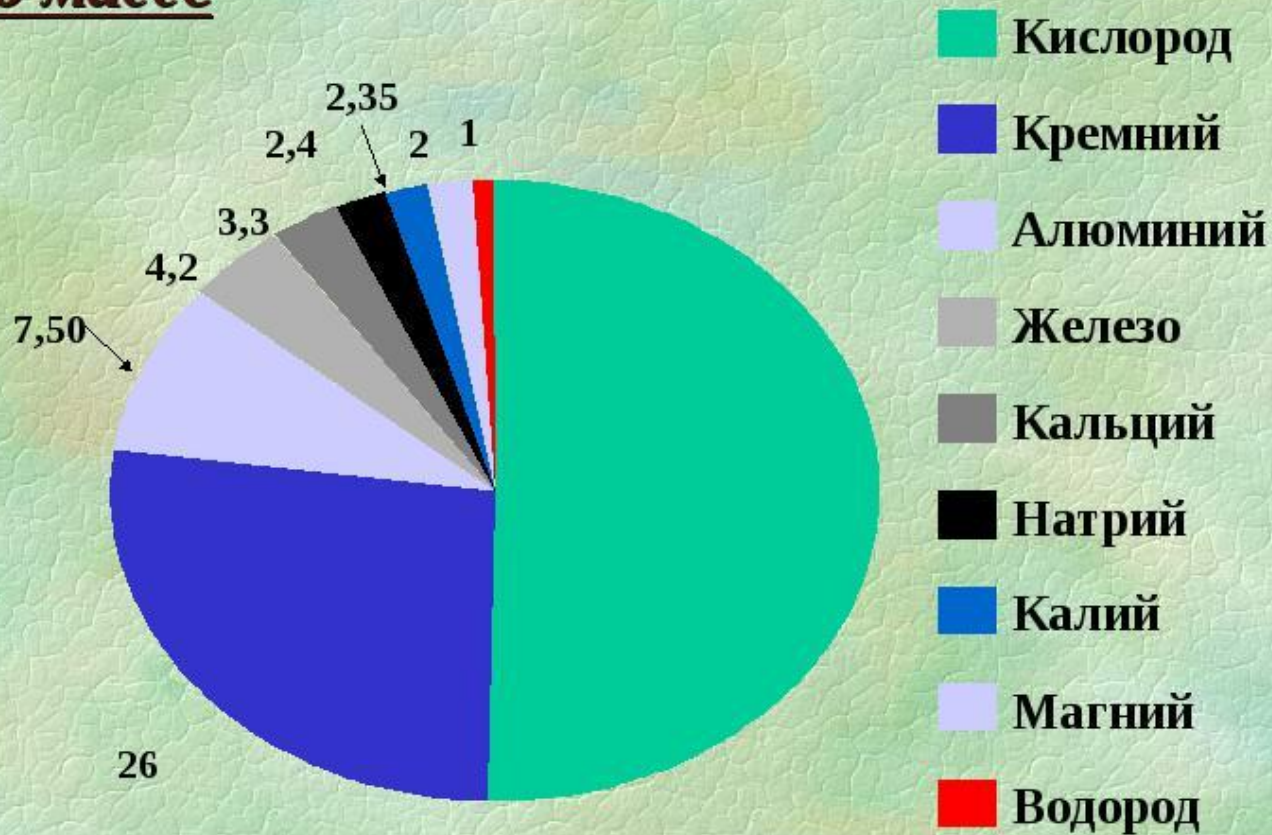
Эти элементы названы Г. Вашингтоном (1924) петрогенными.

- Девять оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O .

Химический состав горных пород выражается в виде процентного содержания оксидов петрогенных элементов.

Сумма главных оксидов составляет 98% (от общего объема состава ГП).

Распространение элементов в природе по массе



Малые химические элементы

- **Малые элементы группы железа:** V, Cr, Mn, Co и Ni – это элементы, которые накапливаются преимущественно в составе железо-магнезиальных минералов и, главным образом, в породах ультраосновного и основного состава.
- **Элементы группы калия (крупные ионы):** Rb, Cs, Sr, Ba, Th, U. Их повышенные содержания характерны для гранитоидов.
- **Элементы, «сопровождающие» титан:** Zr, Hf, Nb, Ta – это группа элементов, характеризующая повышенную щелочность магматического расплава, в котором, кроме того, отмечается высокое содержание CO_2 .
- **Группа редких земель и иттрия:** La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu и Y – это наиболее инертные элементы к изменениям состава расплава.

Минеральный состав магматических горных пород

По генезису выделяют:

- **минералы первичные** – собственно магматические, сформировавшиеся из магматического расплава,
- **вторичные, или постмагматические**, возникшие под влиянием гидротермальных растворов или в экзогенных условиях.

Первичные минералы по их количественной значимости в составе породы разделяются на:

- породообразующие – от 5 до 100%),
- второстепенные – менее 5% ,
- акцессорные – менее 1%.

Главными минералами магматических горных пород являются силикаты и алюмосиликаты, минералы низших сингоний, начиная с ромбической.

Среди них выделяют минералы:

- – феррические (железо-магнезиальные силикаты)
- И
- – салические (алюмосиликаты).

Ряды феррических и силических минералов

Группы феррических минералов:

- **оливина** (*форстерит-фаялит*),
- **пироксенов** (*энстатит-гиперстен; диопсид, авгит, эгирин*),
- **амфиболов** (*роговая обманка обыкновенная и базальтическая, арфведсонит, рибекит*),
- **слюд** (*биотит, флогопит, мусковит*).

Группы силических минералов:

- **плагиоклазы** (*альбит-анортит*),
- **натри-калиевые полевые шпаты**, или **КПШ** (*санидин, ортоклаз, микроклин*);
- **кварц**;
- **фельдшпатиды** (*щелочные алюмосиликаты* – например, *нефелин* – полностью замещающий кварц в щелочных породах).

Распространенность породообразующих минералов

- По химическому составу магматических горных пород, на основании многих тысяч анализов (*Боуэн, Кларк, Заварицкий* и многие др.), установлено, что самыми распространёнными минералами магматических пород являются:
 - **полевые шпаты** – более 60% ;
 - **кварц** – 12%;
 - **пироксены и амфиболы** – 17,0%;
 - **слюды** – 4,0%;
 - **нефелин и оливин** в сумме около 6,0%;
 - **рудные компоненты** – 1,0%.

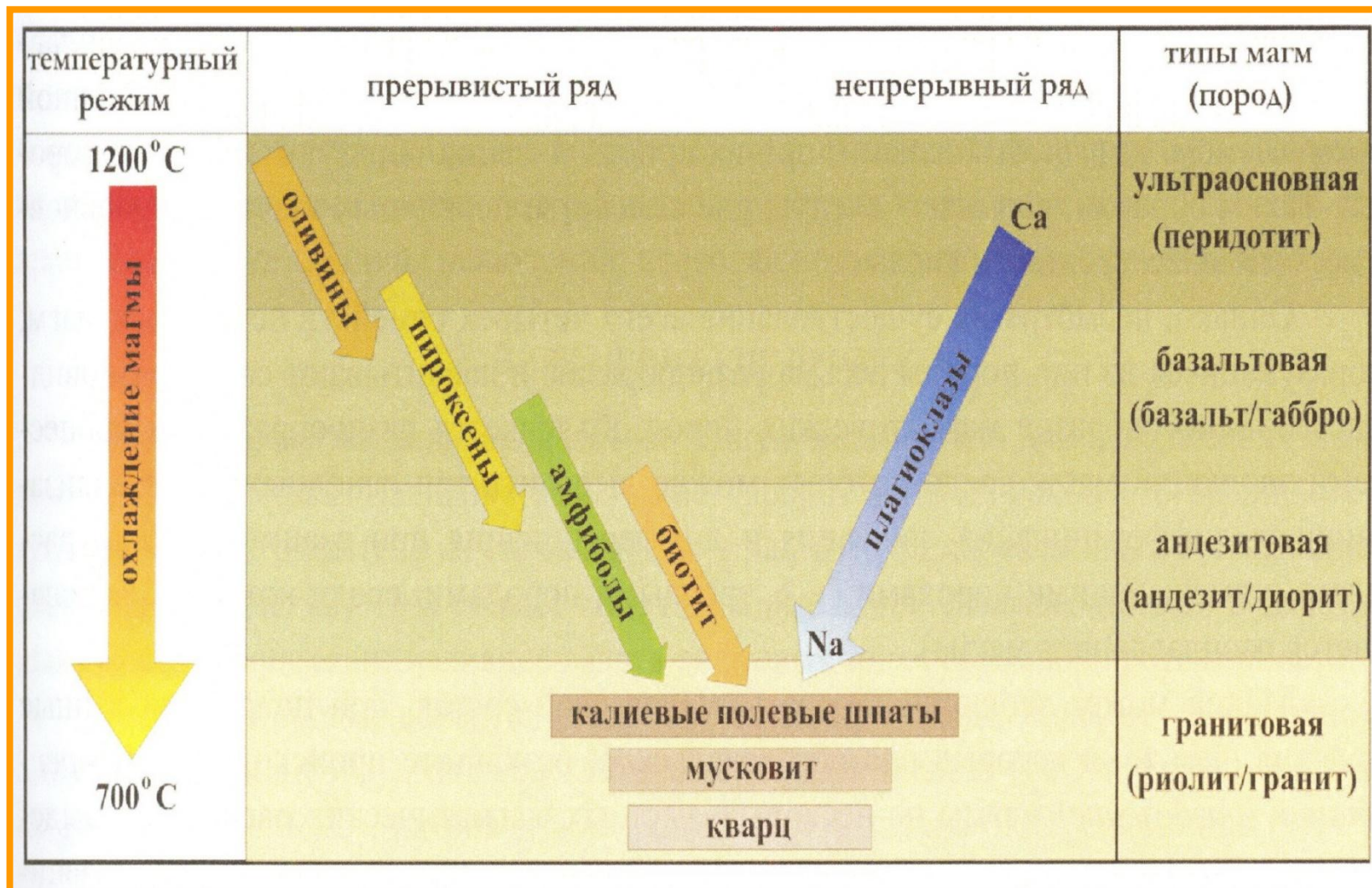
Реакционные ряды минералов (реакционные ряды Боуэна)

Первую физико-химическую модель кристаллизации базальтовой магмы на экспериментальной основе разработал американский ученый

Норман Л. Боуэн (1887 – 1956)



РЕАКЦИОННЫЕ РЯДЫ БОУЭНА (схема)



РЕАКЦИОННЫЕ РЯДЫ БОУЭНА (схема)



Дифференциация и кристаллизация магм

Дифференциация магмы — это процесс разделения исходной магмы на составляющие (компоненты).

Два вида дифференциации магм:

- 1) *докристаллизационная* — в расплаве, в магме, до начала кристаллизации породообразующих минералов;
- 2) *кристаллизационная* — с последовательной кристаллизацией породообразующих минералов, согласно рядам Боуэна.

Докристаллизационная дифференциация магм

- **Ликвация** – процесс разделение магмы на два несмешивающихся расплава (*«как вода и масло»: рудная и силикатная части расплава*).

Ликвационно образуются магматические месторождения сульфидных медно-никелевых руд (*Норильское медно-никелевое месторождение*; массив *Садбери* в Канаде).

Ликвационным процессом А.А. Маркушев объясняет образование месторождений хромовых руд (*рудные нодулы хромитинелидов в дуните*).

- **Газовый перенос** – при извержениях вулканов (*неплого-газово-флюидная смесь*).

При сильных извержениях покрывает собой всю поверхность Земли.

- **Диффузия** вещества в расплаве – наименее значимый процесс в докристаллизационной дифференциации магм.

Она возможна вследствие миграции ионов в тех участках камеры, где возникает разница в концентрации компонентов, но эта вероятность мала.

Ведущая роль в докристаллизационной дифференциации магм принадлежит процессу ликвации

Кристаллизационная дифференциация магм

Кристаллизационная дифференциация обусловлена
последовательной кристаллизацией породообразующих минералов в
расплаве.

По Н. Боуэну, породообразующие минералы должны быть близки по температуре кристаллизации для того, чтобы образовать горную породу.

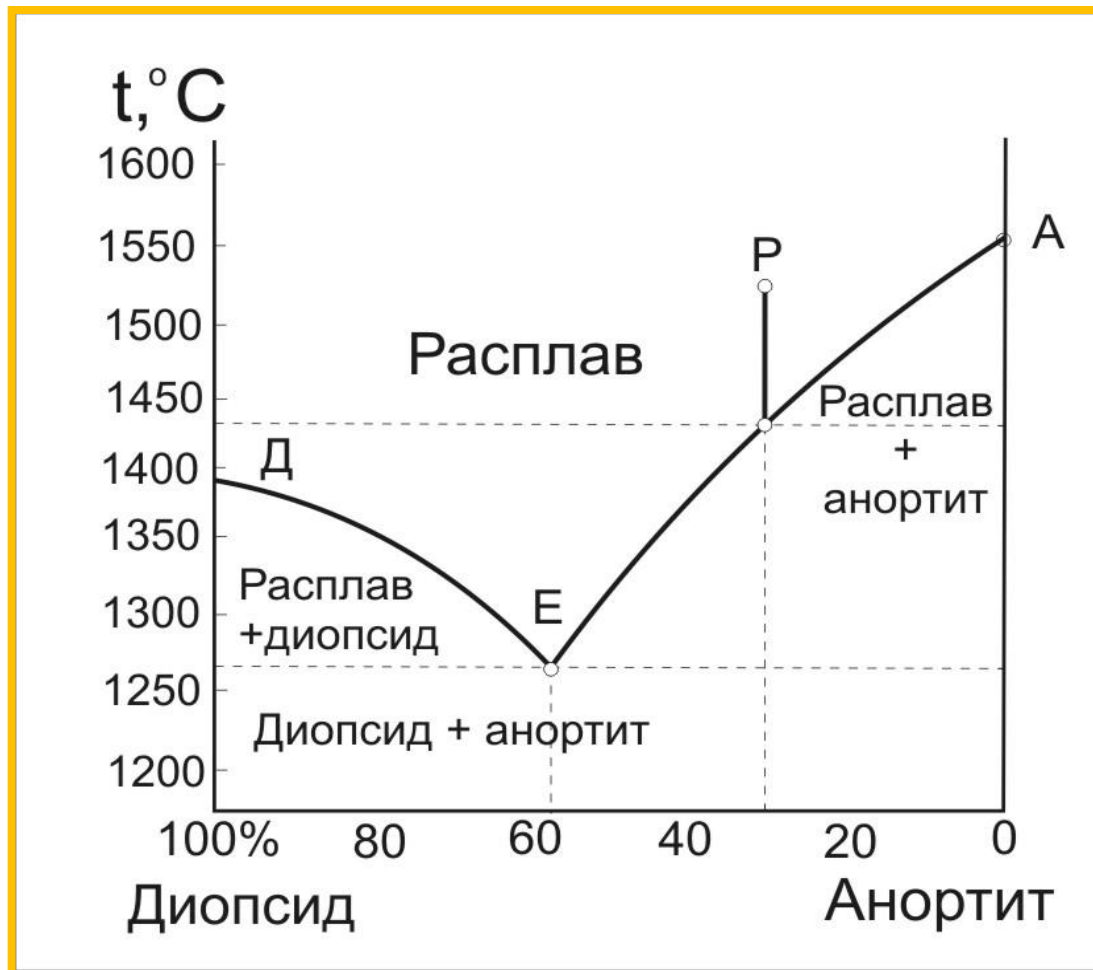
Пути кристаллизационной дифференциации :

- *1. – эвтектика;*
- *2. – кристаллизация с образованием твердых растворов;*
- *3. – инконгруэнтное плавление.*

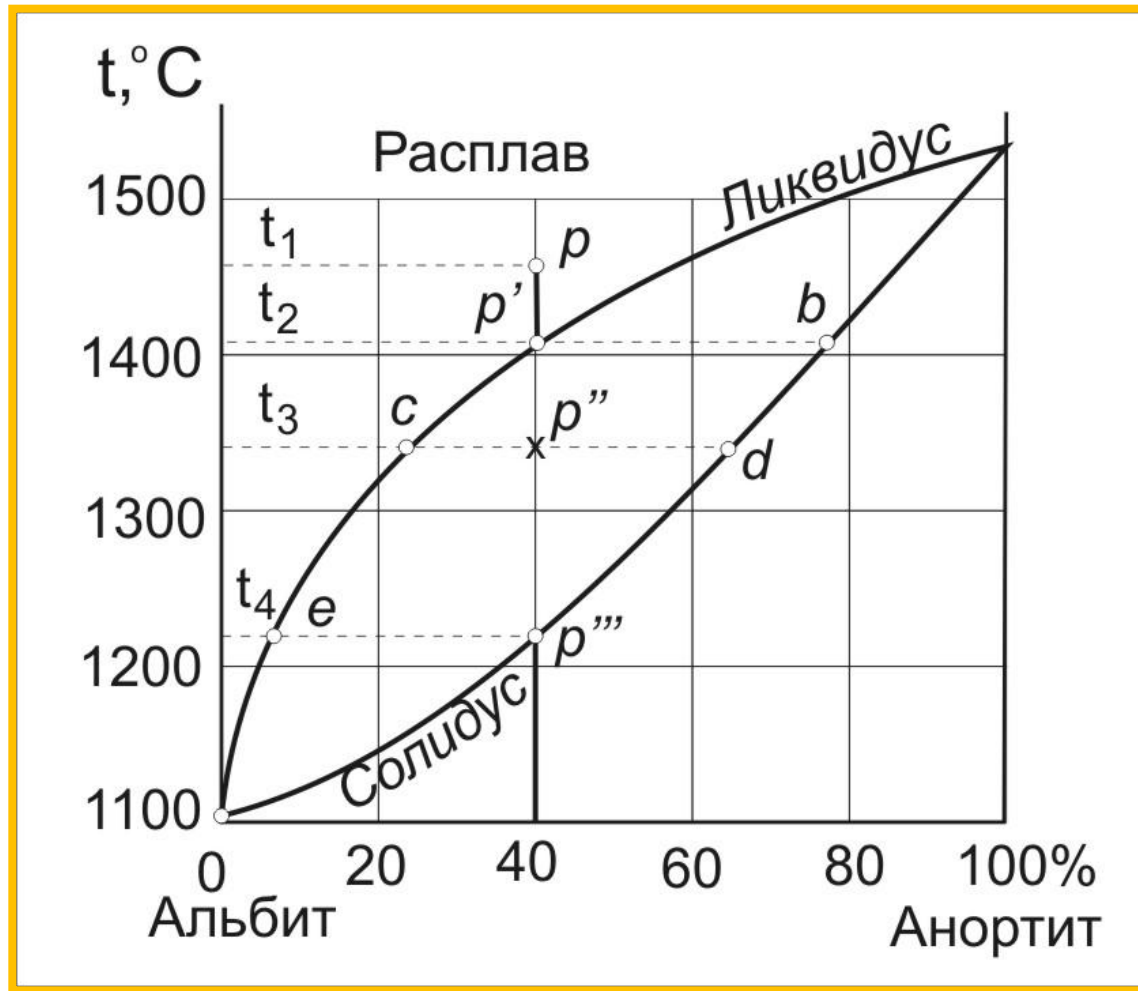
Кристаллизация с эвтектикой (система: $Di - An$)

Эвтектика – одновременная кристаллизация исходных компонентов при понижении температуры исходной системы.

Так, например, кристаллизуется габбро.

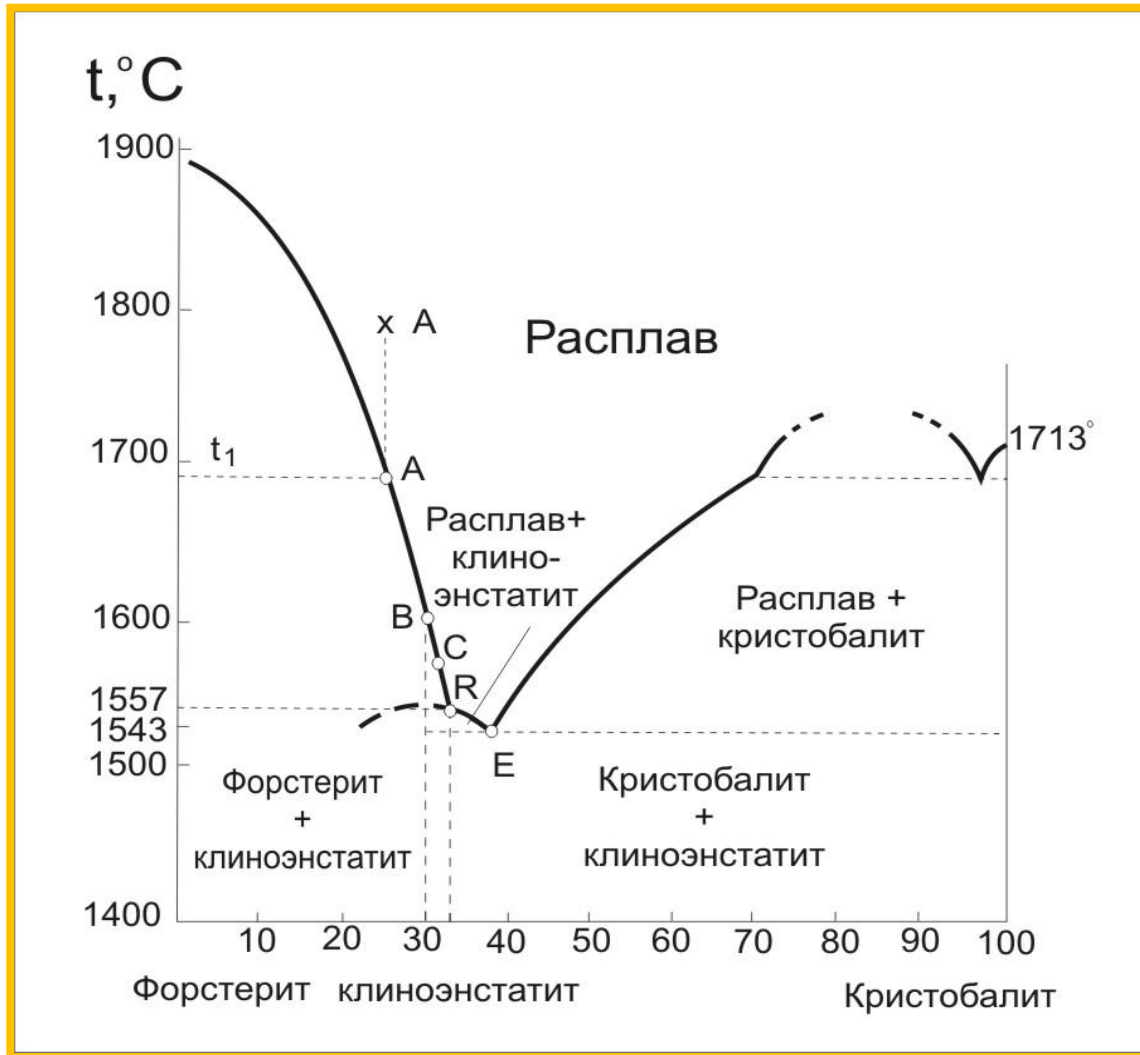


Кристаллизация с образованием твердых растворов (непрерывный изоморфный ряд плагиоклазов)

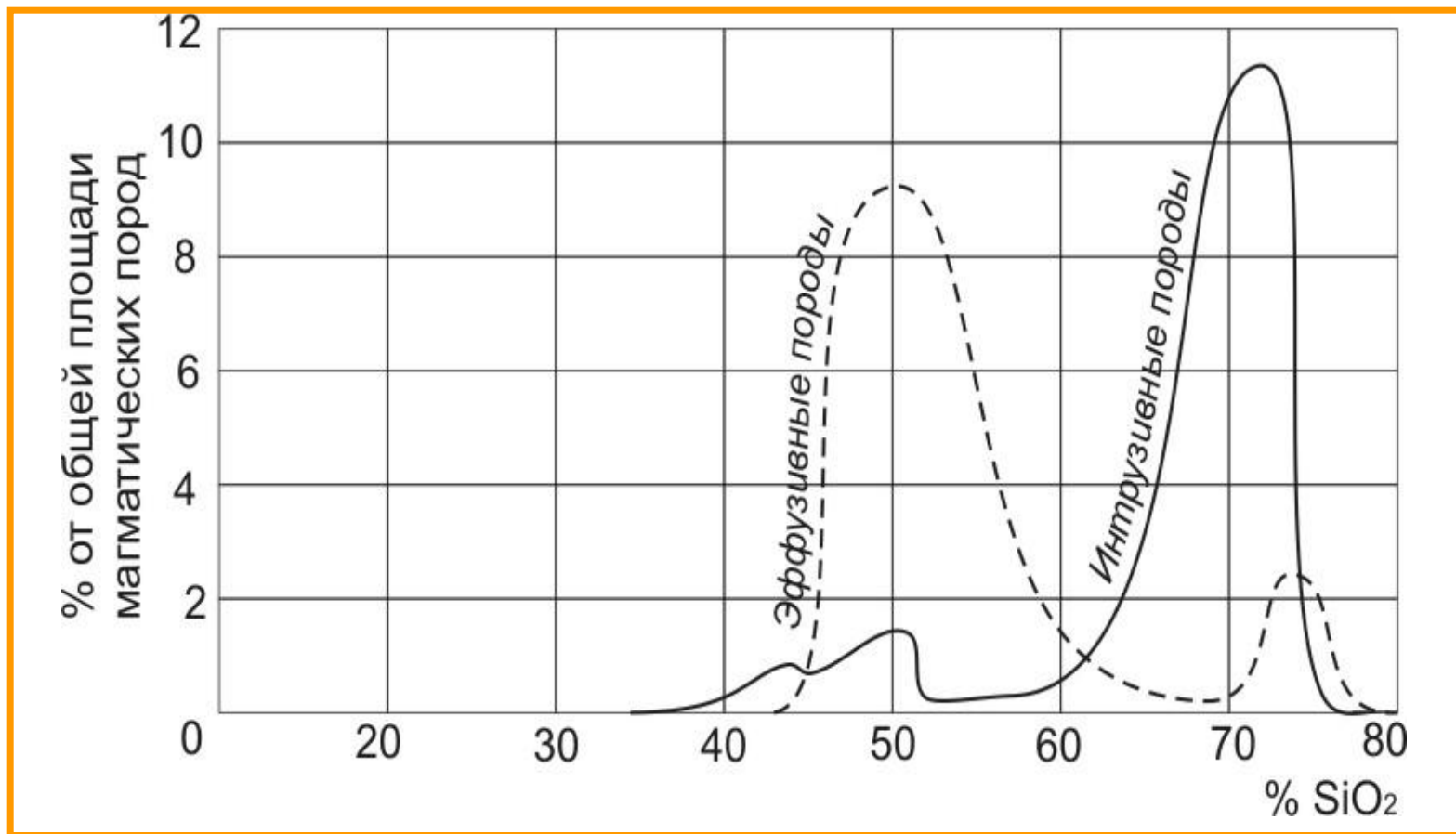


Кристаллизация с образованием соединений, плавящихся инконгруэнтно

(система: форстерит – кремнезем)



Распространение магматических горных пород на Земле (континенты), исходя от общей площади, занимаемой ими (по С.П. Соловьеву, 1952)



Химический состав магмы

Минерализаторы – это легколетучие вещества:

H₂O (парообразная), Cl, F, B, CO, **CO₂**, H, H₂S и др., растворенные в магме и выделяющиеся при ее охлаждении и уменьшении давления (или декомпрессии).

Кислые магмы богаты минерализаторами, основные магмы легко теряют летучие.

Минерализаторы играют роль катализаторов при образовании и росте минералов – отсюда их название.

Кислые магмы при прочих равных условиях являются более вязкими, чем основные:

- снижают вязкость компоненты: **FeO, MgO, CaO, MnO, Na₂O, K₂O**;
- повышают вязкость: **Al₂O₃, SiO₂, Cr₂O₃, TiO₂**.

Причины разнообразия магматических пород

- Тектонические обстановки образования магматических пород.
- Химический состав исходного магматического расплава.
- Родоначальные магмы.
- Ассимиляция и гибридизм.

Тектонические обстановки образования магматических пород

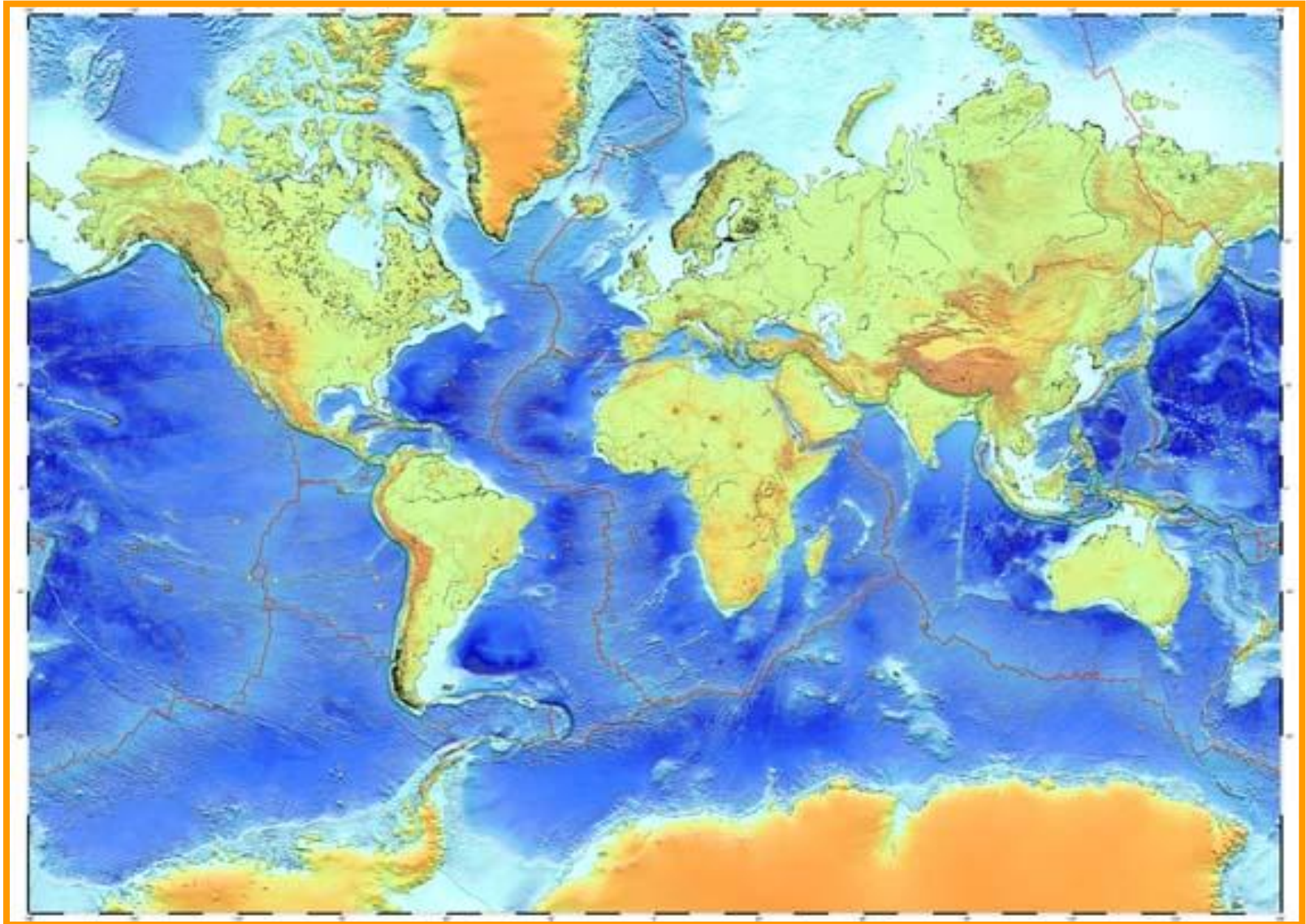
Магматические породы образуются в определенной последовательности, общей для регионов, имеющих сходное геологическое строение.

Магматизм основных геотектонических элементов земной коры – геосинклиналей (подвижных зон) и платформ (устойчивых областей) имеет разный характер.

В начале XX века А. Харкер отметил, что обычный порядок магматических процессов следующий:

- **1-ый этап** – излияние лав,
- **2-ой этап** – внедрение крупных интрузивных массивов,
- **3-ий этап** – образование даек, лакколитов и других небольших интрузивных тел.

Литосферные плиты Земли



- **Джон Уилсон** (*Jhon Tugo Wilson; 1908-1993*), а также его современники из четырех стран в 1960–1970 гг. положили начало **неомобилизму** (тектоника литосферных плит).

Д. Уилсон говорил, собственно, только об одном суперконтинентальном цикле, начиная с распада Пангеи, когда существовали: один океан – один континент.

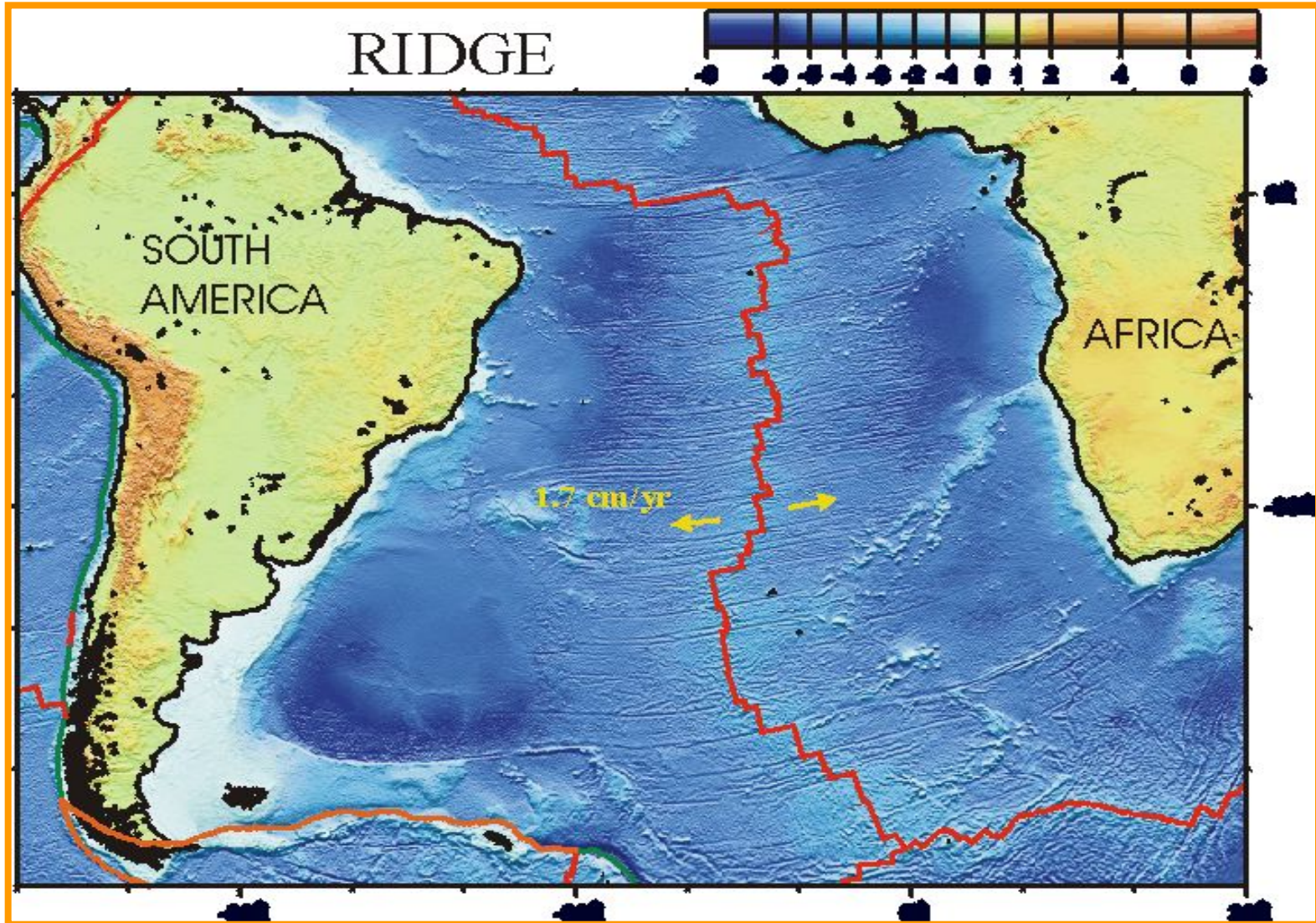
Периодически повторяющиеся объединения и распады континентов, экстраполированные в геологическое прошлое Земли, названы именем Уилсона.

Циклы Уилсона,

или

***Круговорот горных пород в геологической истории
Земли***

1. *Первая стадия цикла Уилсона* связана с раскрытием океана в результате *спрединга*.



- ***Первая стадия*** цикла Уилсона соответствует первому этапу развития геосинклиналей.

Раскрытие океанов обусловлено подъемом струй мантийного вещества под литосферной плитой.

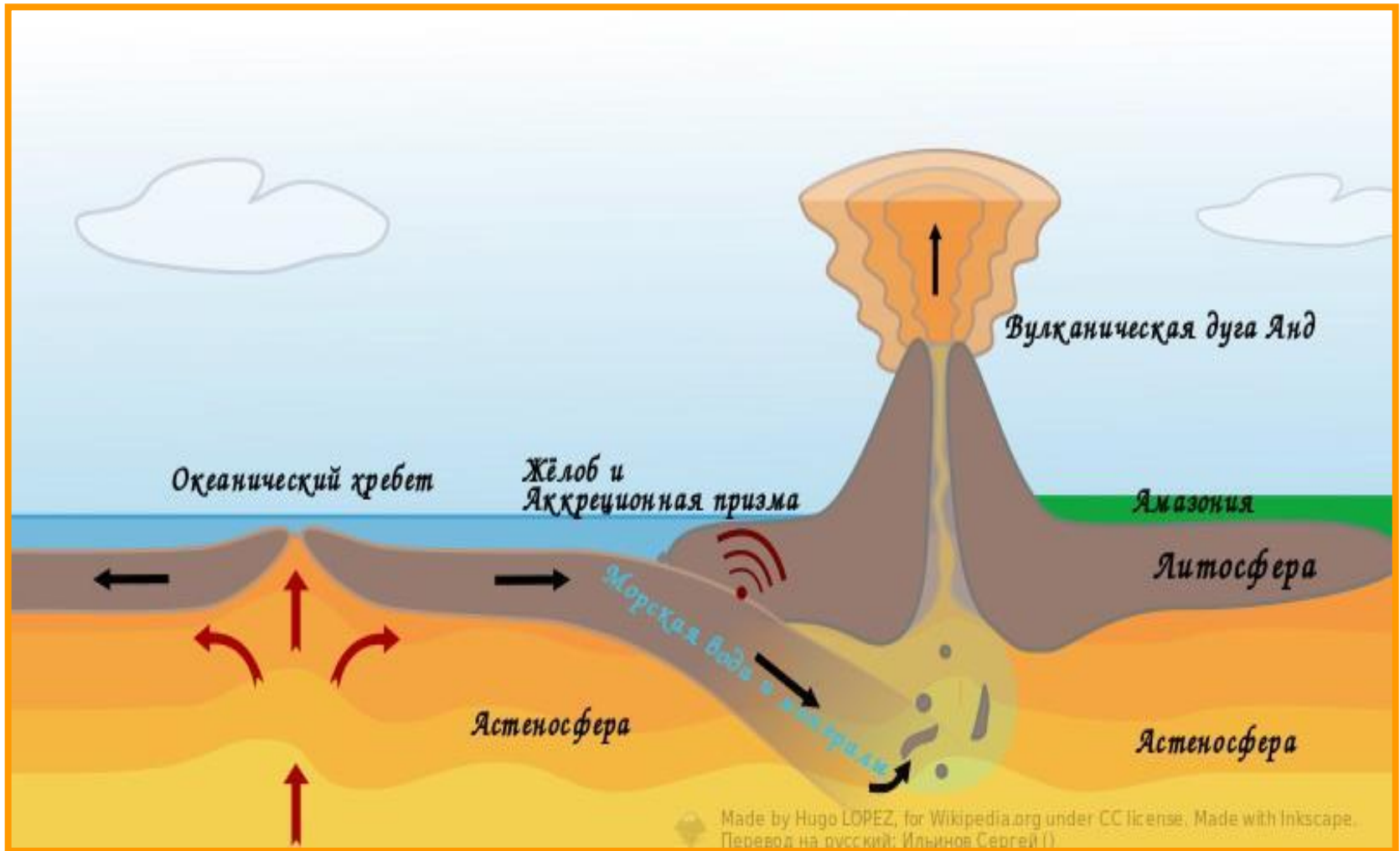
Базальтоиды – результат извержения из зон спрединга продуктов деплетирования мантии, а ультраосновные и основные плутонические породы – реликты океанической коры.

- **Офиолиты** – лежат в основании разреза геосинклиналей и бывают двух типов: 1) спрединговые офиолиты и 2) рифтовые (для пассивных континентальных окраин). Различаются они по типу разреза: 1) глубоководному (относительно маломощные отложения красных илов, кремнистых толщ) и 2) мощные толщи прибрежно-морских, склоновых отложений, флишей, турбидитов и т.д.

В конечном счете, на первой стадии цикла Уилсона из магматических пород образуются базальты и их дифференциаты, габброиды, перидотиты и дуниты. **Т.е. – основные и ультраосновные породы.**

2. Вторая стадия цикла Уилсона обусловлена началом закрытия океана и связана с субдукцией – явлением погружения и поддвига плотной океанической коры под континентальную.

Субдукция (схема)



- Крутая субдукция приводит к образованию **островодужных активных окраин**;
- пологая субдукция – к образованию **приконтинентальных окраин андского типа**.

Вулканические дуги характеризуются ***активным андезит-дацитовым вулканизмом***.

I-граниты и S-граниты

В условиях субдукции в пределах активных окраин **образуются плутонические породы гранодиоритового семейства**, продукты дифференциации базальтовой магмы.

Их называют **I-гранитами** (по Чаппелу и Уайту, 1974), или **инъекционными (мантийными)**.

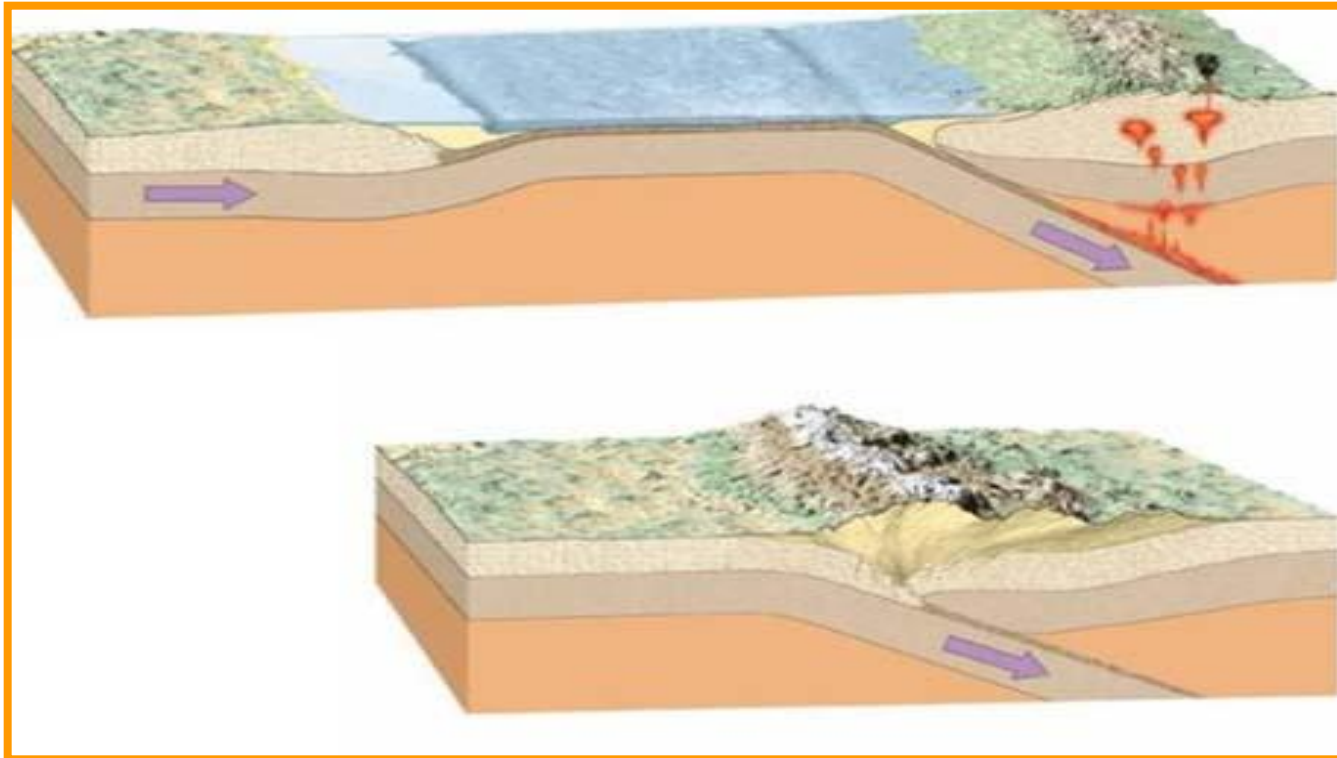
Кроме того, формируются породы лейкогранитового семейства, которые относят к **S-гранитам** – **породам коровым**, т.е. продуктам преобразования и плавления осадочных пород.

3. Третья стадия цикла Уилсона, коллизионная.

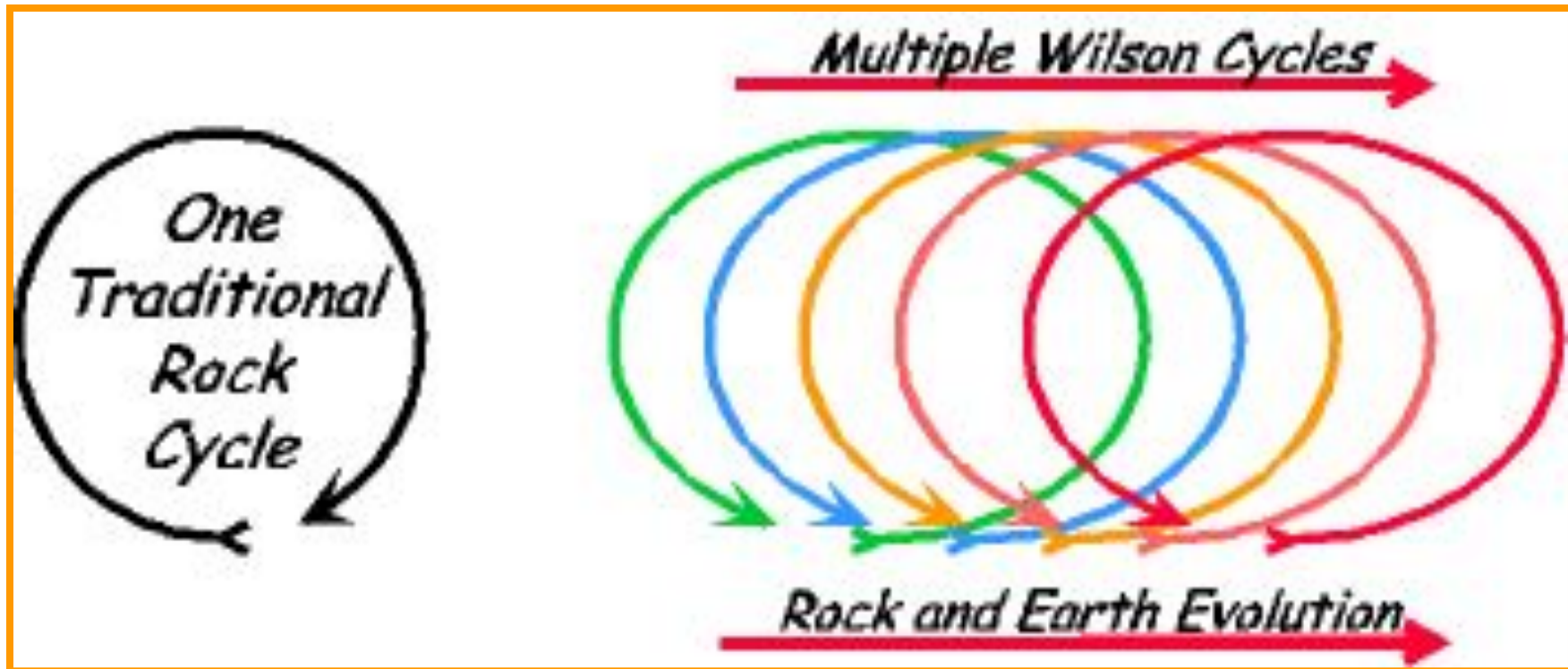
При столкновении континентальных плит происходит общее воздымание территории, формируются горные системы (например, Гималаи). Образуются коллизионные граниты S-типа, которые завершают тектономагматический этап развития геосинклиналей.

Островодужные окраины причленяются к континенту.

Схема перехода субдукции в коллизию



Последовательность циклов Уилсона в геологической истории Земли (мультипликативный вектор развития)



Разнообразие магматических пород платформ

1) Докембрийские формации пород фундамента:

коматииты – породы из семейства пикритов (Mg до 30 вес.%),

анортозиты – породы из семейства габброидов (анортит, битовнит).

2) Формации магматических пород зон тектоно-магматической активизации:

- - траппы,
- - кимберлиты,
- - щелочные и щелочно-ультраосновные интрузии центрального типа.

Батолиты на платформах не образуются.

Родоначальные магмы

Вопрос о родоначальных магмах остается дискуссионным.

Три основных версии XX-го века

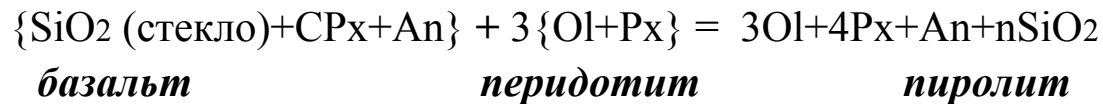
- 1) Одна родоначальная магма базальтового (основного) состава.
Это – версия Н. Л. Боуэна.
- 2) Две первичные магмы: гранитная (кислая) и базальтовая (основная).
Это – точка зрения Ф. Ю. Левинсона-Лессинга
(в полемике с точкой зрения Н. Л. Боуэна).
- 3) Гипотеза о существовании трех родоначальных магм
– базальтовой, гранитной и перидотитовой –
выдвинута британским петрографом Артуром Холмсом.

4) А.А. Маракушев, по сути, вернулся к идее Н. Боуэна об одной родоначальной магме, но на новом этапе развития петрографии

Главным поставщиком материала магмы, считает А.А. Маракушев, является астеносфера, сложенная гипотетическим веществом — «**пиролитом**» (термин Рингвуда, 1968).

- **Пиролит** состоит из базальтового и перидотитового вещества в соотношении 1:3.

Минеральный состав пиролита:



Т.е., по существу, это – состав каменных метеоритов.

ВЫВОД:

Дифференциация одной родоначальной магмы – пиролитового состава – приводит к образованию всех магматических горных пород на Земле.

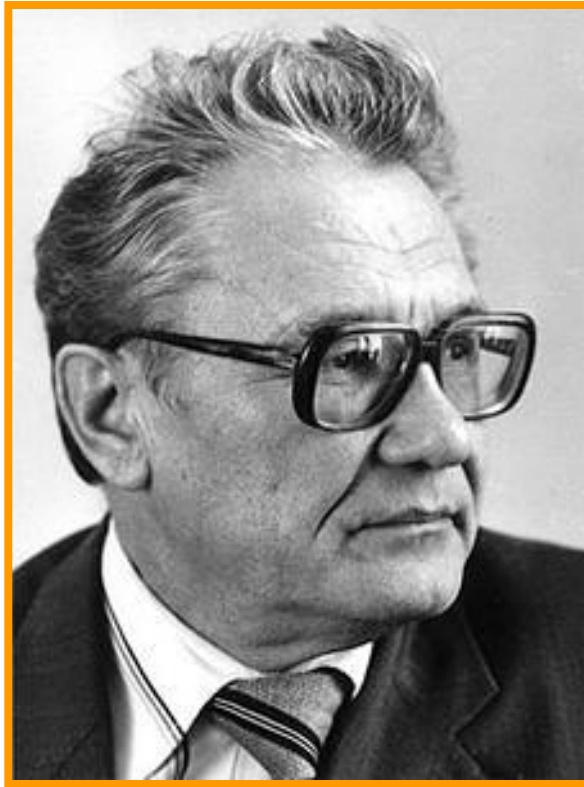
Каменные метеориты (*хондриты и ахондриты*)

Хондры – округлые выделения силикатного состава (стекло). **Матрица** – из О1 и Рх.



По А.А. Маракушеву, зарождение магматизма Земли связано с восходящими флюидными углекисло-водно-водородными потоками, под воздействием которых вещество мантии и земной коры подвергается полному плавлению, и возникают очаги первичных магм.

Магматический расплав в земную кору поступает по глубинным разломам с глубины около 400 км.



**Алексей Александрович Маракушев
(1925 – 2014)**

Ассимиляция и гибридизм

- **Ассимиляция** – процесс поглощения магмой вмещающих пород.

В случае если магма и вмещающие породы химически неравновесны, т.е. отличаются по составу, и в магме имеется достаточный запас тепла, чтобы обеспечить протекание реакции взаимодействия её и вмещающих пород, состав исходной магмы изменяется.

- **Гибридизм** – процесс неполного растворения магмой вмещающих пород.

В гибридных породах сохраняются ксенолиты – обломки нерастворенных вмещающих пород.

II. Тип – Метаморфические горные породы

Термин «метаморфизм» введен в научную литературу в классическом труде Ч. Лайеля «Основы геологии» (Lyell, 1833). Термин происходит от греческого слова *μεταμορφόω* – превращаю.

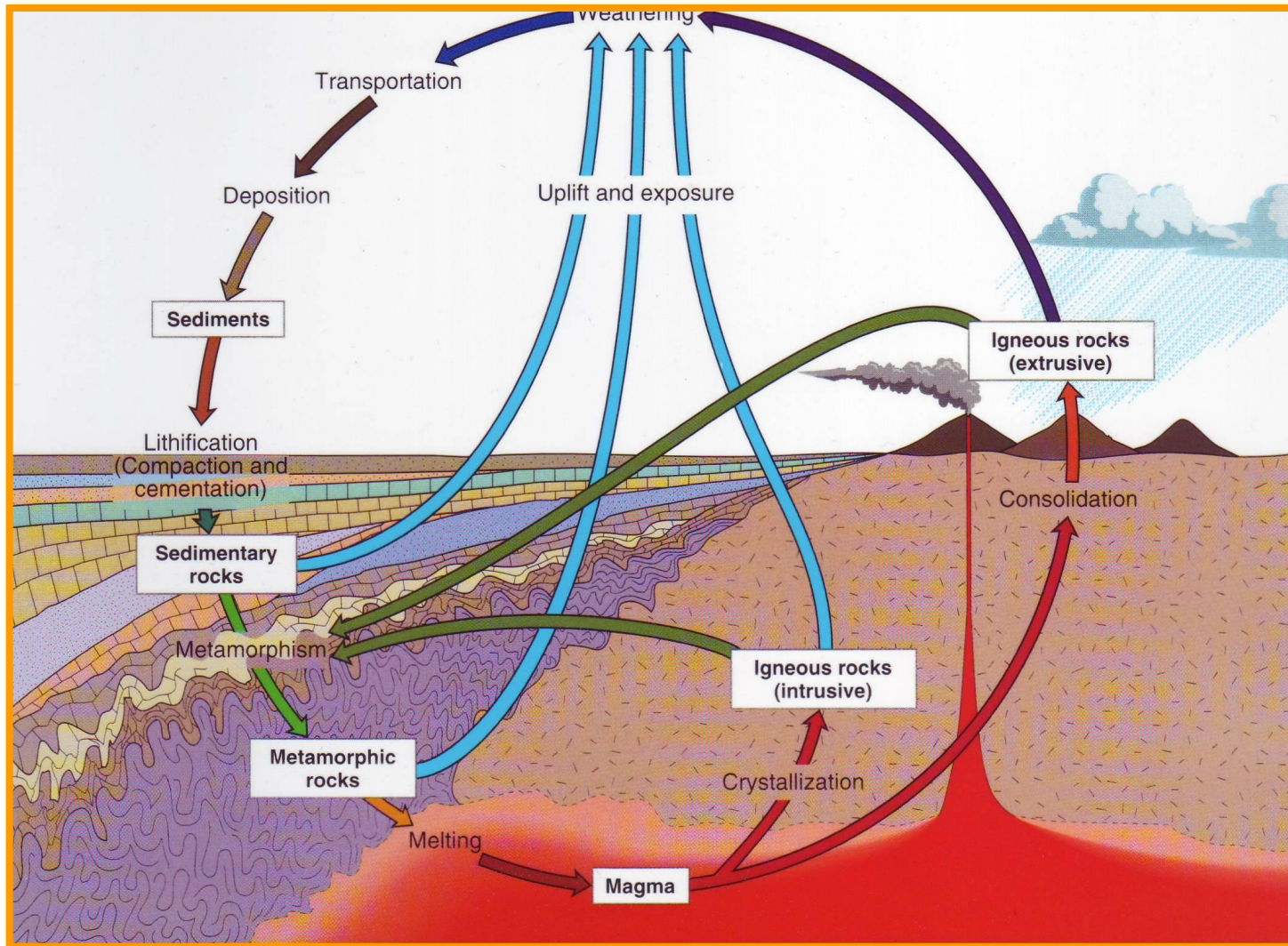
- **Метаморфизм – процесс преобразования в твёрдом состоянии без расплавления ранее существовавших осадочных, магматических и других горных пород под воздействием температуры, давления и глубинных флюидов, с сохранением в общих чертах их первичного химического состава.**

Геолого-структурное положение метаморфических горных пород в составе земной коры

- 1. Кристаллические щиты** – архейские основания древних континентальных платформ.
- 2. Консолидированный фундамент континентов** – архей-протерозойские основания современных континентов (скрытые под толщей осадочных пород).
- 3. Зоны складчатости и тектогенеза** – в литифицированных фанерозойских толщах.
- 4. Зоны субдукции (погружения)** – до точки плавления исходных горных пород (амфиболиты, гранулиты, эклогиты).

Таким образом, метаморфические породы входят в состав верхней и нижней континентальной земной коры.

Место метаморфических пород в круговороте горных пород Земли ("the rock cycle")



Особенность метаморфических пород в том, что они **образуются в результате изменения уже существующих горных пород** как магматических, так и осадочных.

При этом образуются определенные минералы – метаморфогенные – и горные породы, сложенные из этих минералов, – метаморфические.

Факторы метаморфизма

Метаморфизм, в широком смысле, охватывает все существенные изменения структуры, текстуры, минералогического и химического состава горных пород в недрах Земли под воздействием:

- **глубинных флюидов,**
- **температуры,**
- **давления.**

По термодинамическим параметрам различают:

- *прогрессивный метаморфизм*, который протекает в условиях увеличения температуры и давления, и характеризуется процессами дегидратации, декарбонатизации, восстановления и др.
- *регрессивный метаморфизм* – протекающий в условиях уменьшения температуры и давления и характеризующийся процессами гидратации, карбонатизации, окисления.

- Роль *флюидов* (паров H_2O , CO_2 , H_2 , CO , H_2S и др.) в метаморфической перекристаллизации горных пород.
- Перемещение флюидов относительно минеральных агрегатов называется *инфильтрацией*.
- Метаморфические флюиды имеют глубинный (подкоровый) источник.
- Проницаемость горных пород для флюидов усиливается при одностороннем давлении, *стрессе*, т.е. наличии тектонических движений.

Изохимический и аллохимический метаморфизм

Степень химического преобразования пород повышается в ряду процессов:

- *изохимический метаморфизм,*
- *аллохимический метаморфизм,*
- *метасоматоз.*

- *Изохимический метаморфизм* происходит без заметного изменения состава пород, помимо летучих компонентов.
- *Аллохимический метаморфизм* происходит с неполным изменением объема, увеличением числа минералов и привносом – выносом компонентов (кроме H_2O и других летучих).

- ***Региональный метаморфизм*** охватывает огромные объемы горных пород, в пределах которых отсутствуют переходы к неметаморфизованным отложениям.

Региональный метаморфизм протекает на значительных глубинах и связан с общим развитием структуры земной коры и горообразованием.

- ***Локальный метаморфизм*** контролируется конкретными структурными элементами: разломами, контактами с интрузивными породами, пликативными структурами и. т.д. Образующиеся в результате локальнометаморфизованные породы связаны постепенными переходами с неметаморфизованными.

Классификация метаморфических пород

- 1. Тип
- 2. Класс
- 3. Надотряд
- 4. Отряд
- 5. Подотряд
- 6. Семейства (фации)
 - 7. Род
 - 8. Вид

2. Классы метаморфических горных пород

- 1) **динамо-термально-, или регионально-метаморфический** (*региональный метаморфизм*);
- 2) **термально-, или контактово-метаморфический** (*контактово-термальный*);
- 3) **динамо-, или дислокационно-метаморфический** (*динамометаморфизм*).

Два последних класса характеризуют *локальный метаморфизм*.

3. Надотряды

шесть н/отрядов подразделяются по содержанию кремнезема (*как у магматических отрядов: низкокремнеземистые, ультраосновные, основные, средние, кислые, высококремнеземистые надотряды метаморфических г.п.*).

4. Отряды метаморфических горных пород по главному компоненту или по глиноземистости (Al_2O_3)

Например, известковистых, магнезиальных и железистых пород, пересыщенных, насыщенных и недосыщенных глиноземом.

5. Петрохимические подотряды по щёлочности:

- *низкощелочные,*
- *нормальнощелочные,*
- *умереннощелочные,*
- *щелочные.*

Критерием для выделения подотрядов служит суммарное содержание в горных породах оксидов натрия и калия ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$).

6. Петроминеральные семейства метаморфических горных пород

-выделяют по устойчивому минеральному парагенезису горной породы, то есть

– *фации.*

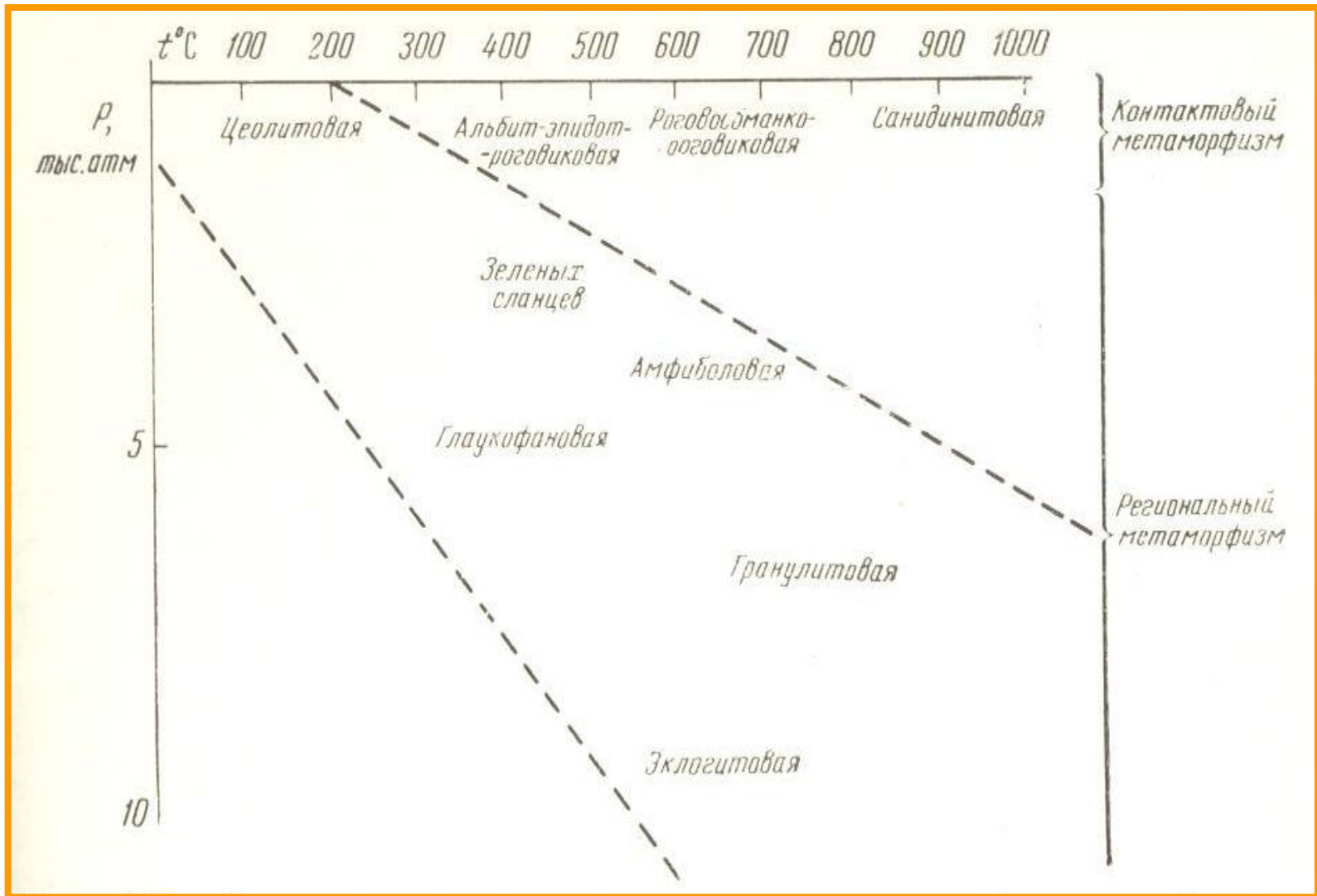
Так рекомендует и новый Петрографический кодекс (2009).

Таким образом, с таксона «семейство» (фация) начинается определение метаморфической горной породы .

- **Фация метаморфизма** – комплекс метаморфических пород, сложенных минеральными ассоциациями, равновесными для определённых условий метаморфизма (*P-T условия, глубинные флюиды*).

Так, для класса *регионального метаморфизма* рекомендуется использовать схему фаций Пентти Эскола (1920), согласно которой выделяют четыре фации:

- 1. зелёносланцевая,*
- 2. эпидот-амфиболитовая,*
- 3. амфиболитовая,*
- 4. гранулитовая.*



Физические условия возникновения метаморфических фаций

(по сути, реакционный ряд Боуэна в обратном порядке: от низкотемпературных минералов – к высокотемпературным)

7. Текстурно-структурные роды

- выделяются по характерным текстурным и структурным признакам метаморфических пород, например: *сланцы, гнейсы и т.д.*

8. Вид

• *Вид метаморфической горной породы* так же, как и вид магматической породы, является элементарным таксоном в систематике.

• *Вид выделяется по модальному минеральному составу горной породы, то есть по минералам-индикаторам.*

(Например: *хлоритовый сланец, гранат-роговообманковый амфиболит и т.д.*)

Фации и степени метаморфизма

1. Фация зелёных сланцев (низкая степень метаморфизма).

Минералы-индикаторы: серпентин, тальк, актинолит, хлорит, серицит, андалузит, кислые плагиоклазы.

Термобарические характеристики: давление около 300 МПа, температура 350-550⁰С.

(550⁰С – температура образования Mt при метаморфических условиях).

2. Амфиболитовая фация (средняя степень метаморфизма).

Минералы-индикаторы: Hb, Vt, Ms, дистен, средний плагиоклаз.

Термобарические характеристики: давление 400-600 МПа, температура – 550-800⁰С.

3. Гранулитовая фация (высокая степень метаморфизма).

Минералы-индикаторы: Vt, Px, плагиоклаз основного состава.

Термобарические характеристики: давление до 1000 Мпа, температура 750-1000⁰ С.

4. Эклогитовая фация –

определяется до температуры плавления пород в данной геологической ситуации.

Минеральные фации выделяются по минералам-индикаторам (МИ).
МИ – это минералы, которые существуют в строго определенных термобарических (P - T) условиях.

Фация зеленых сланцев	Амфиболитовая фация	Гранулитовая фация
<i>Тальк</i>	<i>Hb, Bt</i>	<i>Px</i>
<i>Серпентин</i>		
<i>Актинолит</i>		
<i>Хлорит</i>		
<i>Серицит</i>	<i>Ms</i>	<i>Bt</i>
<i>Андалузит</i>	<i>Дистен</i>	<i>Силлиманит</i>
<i>Кислые плагиоклазы</i>	<i>Средние Pl</i>	<i>Основные Pl</i>
	<i>Гранат</i>	

Название метаморфической горной породы дается по минералам-индикаторам (МИ): например, хлорит-серицитовый сланец.

Минералы, которые встречаются во всех фациях и не являются МИ, это: кальцит, кварц, КПШ, все рудные минералы.

Минеральный состав и исходные породы метаморфических горных пород

Исходные породы	Метаморфические породы	Главные минералы
Аргиллиты	роговики	кварц, полевые шпаты, биотит
	гнейсы	кварц, полевые шпаты, слюды, гранат
	слюдяные сланцы	кварц, слюды
	филлиты и глинистые сланцы	кварц, слюды, хлорит
Кварцевые песчаники	кварциты	кварц (акцессорные: слюды, полевые шпаты)
Карбонаты	мраморы	кальцит (доломит, магнезит, флогопит)
Базальтоиды и габброиды	амфиболиты, пироксен-плагиоклазовые основные и кристаллические сланцы	плагиоклаз, роговая обманка, пироксен, гранат
	эклогиты	гранат, пироксены, амфиболы, плагиоклазы
Кислые эффузивы, гранитоиды, аркозовые песчаники	серицитовые сланцы	серицит, альбит, кварц, хлорит
	гнейсы	кварц, полевые шпаты, биотит
Перидотиты	амфиболовые, хлоритовые, тальковые сланцы, серпентиниты	оливин, пироксены, амфиболы, магнетит, тальк, серпентин

- Наиболее широко распространенными в метаморфических комплексах являются продукты метаморфизма литифицированных глинистых отложений (аргиллитов) и основных вулканогенных пород (базальтоидов).

- В глубоких зонах метаморфизм имеет интенсивный аллохимический характер и сопровождается значительным изменением состава пород, при котором первичная их природа полностью затушевывается.

В результате возникают метаморфические образования, не имеющие химических аналогов среди осадочных или изверженных пород.

Среди подобных пород наиболее распространены продукты щелочного метаморфизма в офиолитовых поясах (многие глаукофановые, рибекитовые, эгириновые, альбитовые и другие сланцы, подчиненные им эклогиты, щелочные гнейсы и др.).

1) Класс динамо-термально-, или регионально-метаморфический
2) *(региональный метаморфизм);*

1. группа пород низких ступеней метаморфизма:

сланцы: серицит-хлоритовые, хлорит-серицитовые, филлиты (глинистые сланцы), эпидот-хлорит-альбитовые, актинолитовые, глаукофановые, тальковые, серпентиновые и т. д.

2. породы средней ступени метаморфизма:

амфиболиты (с гранатом, эпидотом), биотит-мусковитовые, ставролитовые, кианитовые гнейсы и слюдяные сланцы, жадеитовые породы и др.

3. группа глубокометаморфизованных пород:

гнейсы (силлиманитовые, кордиеритовые, гранатовые),
кристаллические сланцы (пироксеновые и роговообманково-пироксеновые основные),
ЭКЛОГИТЫ.

2) Класс термально-, или контактово-метаморфический (*контактово-термальный*) –

объединяет породы, образовавшиеся в ореоле термального воздействия магматических тел на вмещающие горные породы.

Главным регулирующим фактором их образования является температура.

Интенсивность метаморфизма и масштабы его проявления зависят от размеров внедрившегося плутона, его состава, запаса тепла и удельной теплоёмкости вмещающих пород.

Так, карбонатные породы преобразуются в мраморы;
кварцевые песчаники – в кварциты;
глины – в роговики.

3) Класс динамо-, или дислокационно-метаморфический (динамометаморфизм)

– породы образуются в результате тектонических, разнонаправленных движений горных масс, при отсутствии существенного эндогенного теплового потока.

Тектониты – горные породы, образующиеся при дислокационном метаморфизме.

В их образовании действуют факторы физического воздействия на породу: дробление в брекчию.

В этот класс включены:

- **тектонические брекчии,**
- **катаклазиты,**
- **милониты.**

Отличаются эти породы по нарастающей степени динамометаморфизма и по структурно-текстурным признакам.

Динамометаморфизм проявляется не только в дроблении, но и в *пластическом течении горной породы*, проявляющейся до определенного предела.

Гнейсы. Карелия



III. ТИП — МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

Горные породы, образовавшиеся в результате инфильтрационного и сопутствующего ему диффузионного метасоматоза, выделяют в самостоятельный тип метасоматических пород.

• Метасоматоз — это процесс реакционного приспособления химического состава горной породы к изменению физико-химических условий её существования.

Понятие о метасоматозе

- **Метасоматоз** – это процесс, при котором происходит привнос одних **компонентов** и вынос других из системы горных пород.

Процесс протекает *без существенного изменения объёма породы при условии сохранения её в твёрдом состоянии.*

Калиевый метасоматоз: вынос ионов **К** из гранитоидов – первый шаг на пути гранитизации вмещающих пород с образованием в последних КПШ. А натриевый метасоматоз приводит к образованию альбита. Так образуются альбититы.

- Главным агентом метасоматоза является термальный флюид, содержащий хлориды щелочных металлов, серу, фтор, бор и другие компоненты.

Необходимо отметить, что все тектонические зоны, особенно активные в тектоническом отношении, проницаемы для флюидов, привносящих новую минерализацию в состав исходных пород.

Факторы метасоматоза

- температура и градиент её изменения;
- давление флюида, которое в свою очередь зависит от температуры;
- градиент химических потенциалов компонентов в системе порода – флюид;
- эволюция окислительно-восстановительного (Eh) и щелочно-кислотного (pH) потенциалов среды в колонне фильтрующегося флюида.

Открытие метасоматоза

(Д.С. Коржинский)

- ***Инфильтрационный метасоматоз*** — под давлением флюида в зонах повышенной проницаемости, которыми могут быть участки трещиноватых и сланцеватых пород. При этом каждое зерно породообразующих минералов находится в контакте с агрессивными растворами и попадает под их воздействие.
- ***Диффузионный метасоматоз*** — в застойных зонах земной коры. При этом просачивание растворов идёт по межпоровому пространству от породы с высокой концентрацией какого-либо химического элемента к породам с его меньшей концентрацией.
- **Процесс метасоматоза прекращается, как только концентрации растворов в каждой из сред выравниваются.**
- **Как и метаморфизм, метасоматоз может быть *прогрессивным и регрессивным.***



Д.С. Коржинский (1899—1985)

Первооткрыватель метасоматоза. Основатель и первый директор (1969 – 1979) ИЭМ в г. Черноголовка.

Д.С. Коржинский считал, что магматические, метаморфические, метасоматические и металлогенические процессы неразрывно связаны между собой.

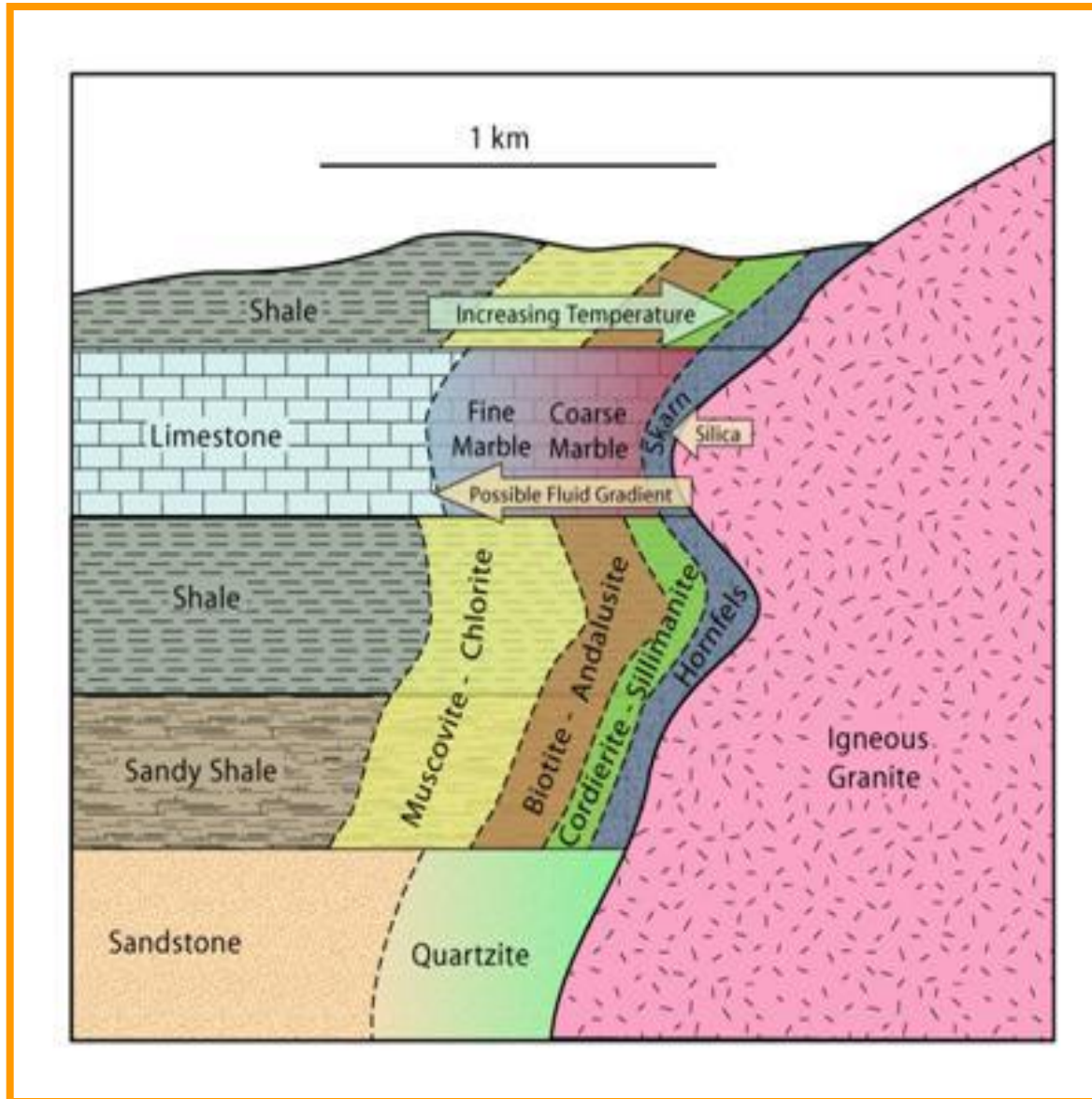
Все эти процессы обусловлены поднятием флюидов и магм из недр Земли.

Тип метасоматических пород
по условиям метасоматоза подразделяется на
три генетических класса:

1. Контактво-метасоматический класс включает породы, образовавшиеся в зоне контактового воздействия флюидов и теплового потока остывающего магматического тела как на вмещающие его породы, так и на затвердевшие части интрузива.

К этому классу отнесены также породы автометасоматоза, которые образуются под влиянием собственных флюидов интрузива на его же застывшие и успевшие закристаллизоваться краевые части.

Метасоматическая зональность



Высокотемпературный (волластонитовый) скарн и зона ороговикования:

Кордиерит-силлиманитовые (алюмосиликатные) кристаллические сланцы;

Биотит-андалузитовые сланцы;

Мусковит-хлоритовые сланцы;

Кварциты
Крупно-зернистые мраморы;
Мелко-зернистые

мраморы

Стадии метасоматоза

- Для гранитоидов, по Д.С. Коржинскому, метасоматоз разделяется на три основные стадии:
- 1. – ранняя, щелочная. Образование скарнов на контакте пород: гранит (интрузив) – карбонаты (вмещающие; обычно - это мраморы). Скарны образуются в интервале глубин 0,5 - 2 км, в интервале температур 700 – 800 С.
- 2. – средняя, кислая. Образование грейзенов (Ms+Q), вторичных кварцитов.
- 3. – поздняя, щелочная, рудобразующая (регрессивного метасоматоза). Образуются березиты и листвениты.

2. Регионально-метасоматический класс объединяет породы, образование которых связано с широким региональным эндогенным тепломассопереносом, захватывающим громадные участки земной коры.

К процессам регионального метасоматоза можно отнести серпентинизацию океанических ультрабазитов, происходящую в зонах срединных океанических хребтов при конвективной циркуляции морской воды.

Вопрос о региональном метасоматозе до конца не разработан.

3. Гипергенно-метасоматический класс

(нововведение Петрографического кодекса, 2009)

включает породы, образовавшиеся в зоне гипергенеза, в коре выветривания, под действием фильтрующихся сквозь неё сверху вниз метеорных водных растворов.

Это – вопрос литологии.

IV. ТИП — МИГМАТИТЫ

Термин «мигматит» предложен финским геологом Я.И. Седерхольмом в 1907 г. для обозначения пород, состоящих из гнейсового субстрата и тонко пронизывающего его жильного инъекционного материала, преимущественно гранитного состава.

Мигматит — это полигенная горная порода, в которой макроскопически устанавливаются две разнородные части: более древний *субстрат (палеосома)* и новообразованный *жильный материал (неосома)*.

- ***Палеосома*** имеет состав и структуру, аналогичные метаморфическим породам.
- ***Неосома*** чаще всего бывает представлена гранитом, аплитом или пегматитом.

- **Мигматиты, по объему вещества, играют огромную роль в корневых системах континентальных кор.**
- На поверхности Земли мигматиты встречаются в глубоко эродированных кристаллических щитах и в зонах современного рифта.

Мигматиты. Калифорния



- **Мигматизация** – процесс, заключающийся в смешении вещества субстрата и жильного материала, имеющего иной химический состав.

Различают несколько форм мигматизации:

- 1) инъекция расплава в метаморфические горные породы,
 - 2) метасоматическое замещение,
 - 3) выплавление жильного вещества из субстрата в результате анатексиса,
 - 4) метаморфическая дифференциация.
- Возможна комбинация нескольких форм мигматизации.

Мигматиты по условиям образования подразделяется на три генетических класса:

- метасоматический,
- метаморфический,
- инъекционно-магматический.

- В пределах каждого класса по особенностям химического состава выделяют *петрохимические отряды*. Породы первых двух классов (метасоматического и метаморфического) по типу щелочности лейкосомы разделяют каждый на два отряда: *калиевый и натриевый*.
- Отряды делят по температуре образования (минеральной фации) на два *семейства: 1) высокотемпературные (гранулитовые) породы и 2) среднетемпературные (амфиболитовые) породы*.
- Далее по текстурному признаку выделяют *роды пород*, а по модальному минеральному составу – *виды пород*.

Класс метасоматических мигматитов

- Класс включает породы, по минеральному и химическому составу, близкие к гранитам.
- К отряду калиевых мигматитов относятся те, в составе которых преобладают калиевые полевые шпаты: ортоклаз (моноклинный $K[AlSi_3O_8]$) или микроклин (триклинный $K[AlSi_3O_8]$), *ортоклазовые или микроклиновые мигматиты*
- В породах отряда натриевых мигматитов в составе лейкосомы преобладает кислый плагиоклаз, содержащий в превалирующих количествах натриевый полевой шпат – альбит ($Na[AlSi_3O_8]$). Такие породы носят название *«плагиомигматиты»*.

Класс метаморфических мигматитов

- Мигматиты класса отличаются контрастным по цвету обликом. Это связано с наличием в породе лейкократовых прослоев и жил, содержащихся в меланократовой основной массе (палеосоме).
- К классу метаморфических мигматитов также относят *пятнистые мигматиты*, образование которых объясняют изначальным присутствием в гетерогенном субстрате лейкократовых обособлений, минеральный состав которых соответствует гранитной эвтектике.

Класс инъекционно-магматических мигматитов

- Инъекционно-магматические мигматиты характеризуются присутствием неосомы в тонких тектонических трещинах палеосомы.
- Инъекционный метаморфизм всегда имеет ярко выраженный *аллохимический* характер и сопровождается привнесением кремнезема и щелочных металлов – преимущественно натрия при плагиомигматизации и калия в процессах развития нормальных ортоклазовых или микроклиновых мигматитов.

- Класс инъекционно-магматических пород, в отличие от метасоматического и метаморфического, предлагается подразделять, в соответствии с систематикой магматических пород.
- В этом классе *отряды* должны выделяться по содержанию кремнезёма (ультраосновной, основной, средний, кислый), *подотряды* – по общей щелочности, *семейства* – по минеральному составу.

Мигматитизация и гранитизация

Развитием мигматитов завершается эволюция метаморфических комплексов.

- Мигматизация происходит в период воздымания территорий в связи с формированием купольных структур.

Мигматит-плутоны залегают среди древних кристаллических сланцев докембрийских щитов.

- Гранитизация – это процесс замещения гранитными магмами горных пород разнообразного состава.

V. ТИП — ИМПАКТНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ

- *Импактные* горные породы образуются в результате удара метеоритов об земную поверхность.

(Импактные — от английского *impact* — удар, столкновение), или **коптогенные** (от греческого *κόπτο* — разрушать ударами).

- **Причина образования импактитов** — высокоскоростной удар, взрыв, при котором в одно мгновение выделяется огромная масса энергии, поднимающая температуру до 10 000 С и давление до 40–50 тыс. атм. Т.е. — до геодинамических условий верхней мантии, где образуются алмазы.

Возникают особые **кольцевые морфоструктуры** – метеоритные кратеры с обрамляющими их валами. Древние погребенные кратеры – **астроблемы**.

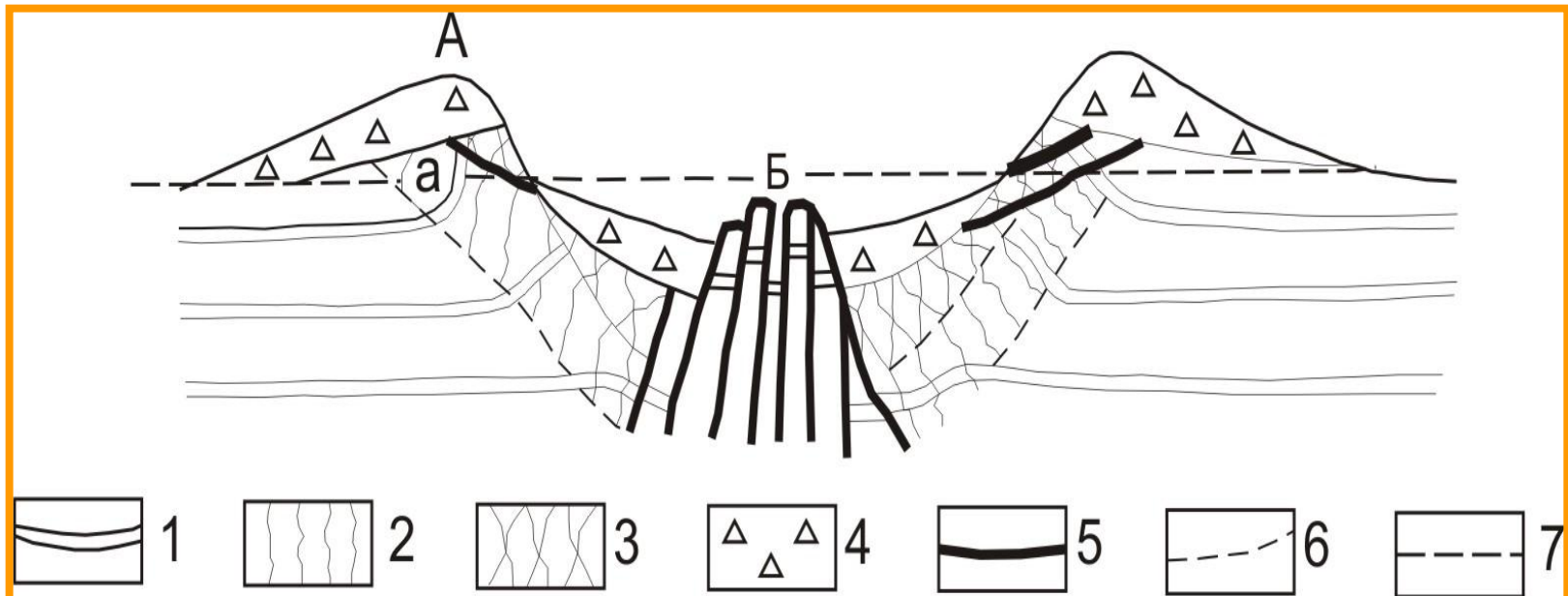
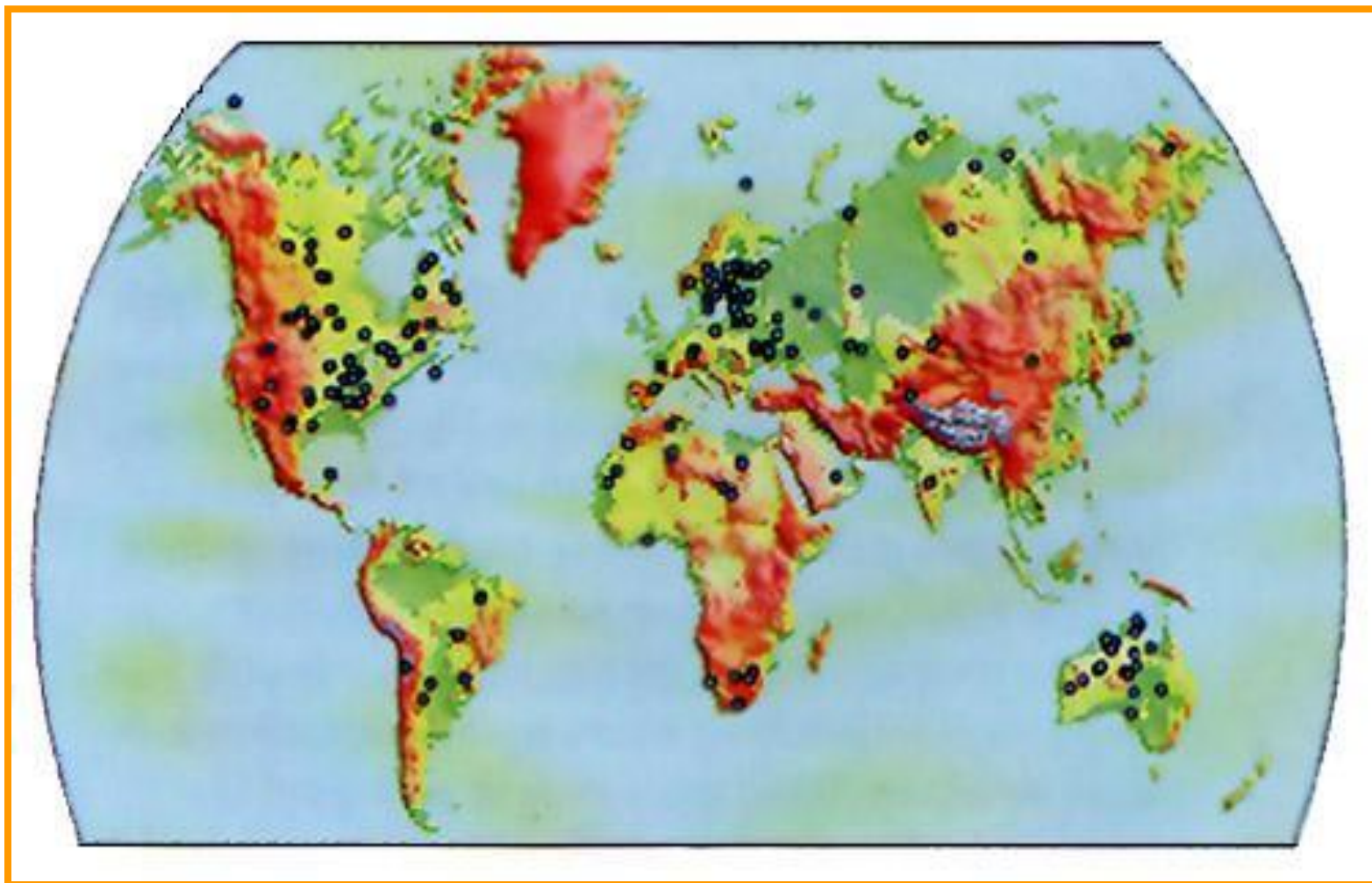


Рис. . Схема строения метеоритного кратера (астроблемы) с центральным поднятием (по В.И. Фельдману): А - вал кратера (а - цокольный, б - насыпной); Б - центральное поднятие; 1 - маркирующие пласты в породах мишени; 2 - подкратерная зона трещиноватости в породах мишени; 3 - аутигенная брекчия; 4 - аллотигенная брекчия, зювиты, тагамиты коптогенного комплекса; 5 - разломы; 6 - геологические границы; 7 - дократерная поверхность

Астроблемы Земли



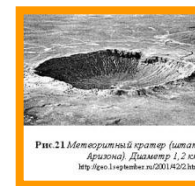
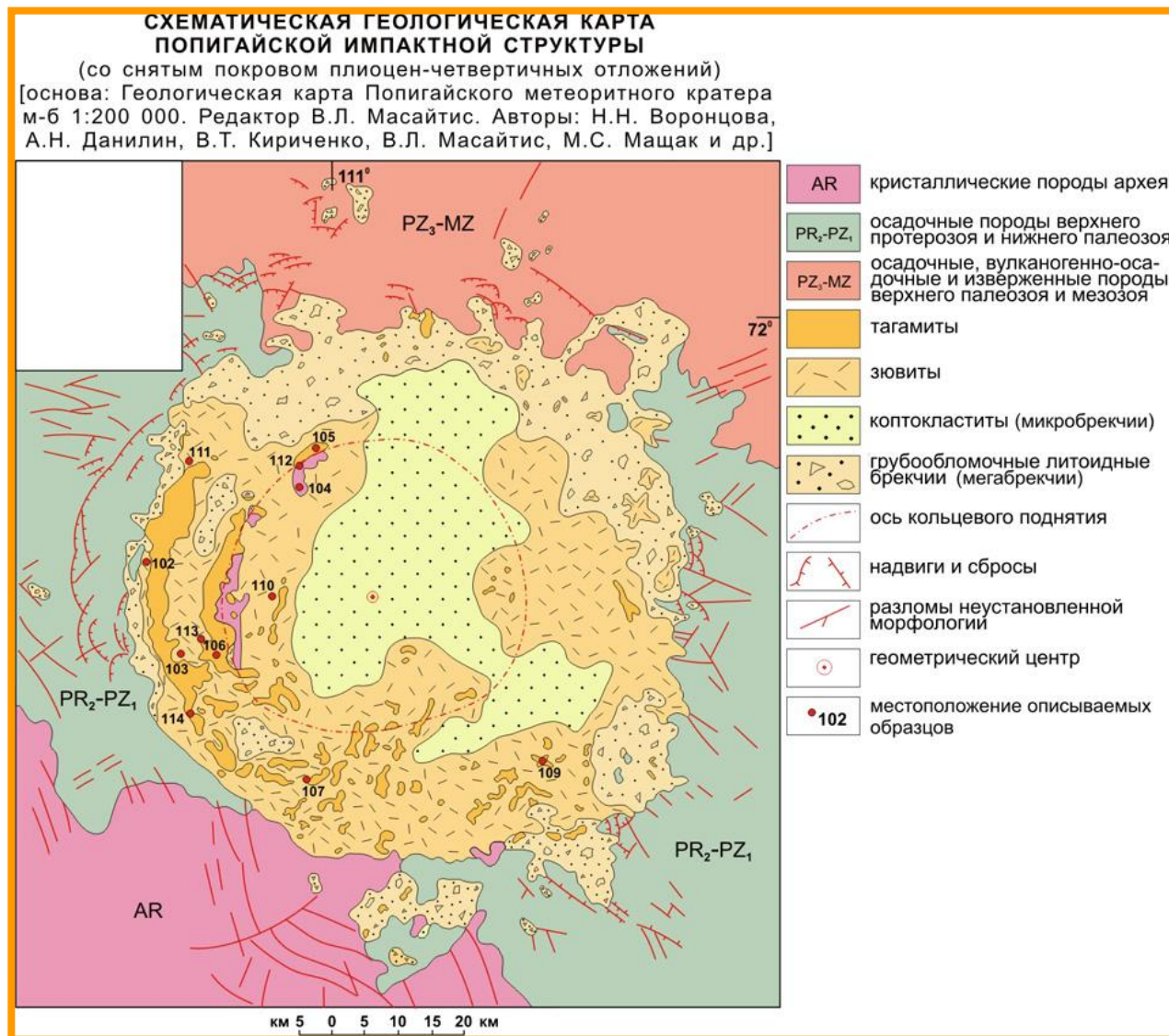
Алмазы и астроблемы

- При ударном метаморфизме создаются локальные условия для образования алмазов, причем в промышленных содержаниях (Попигайская астроблема).
- Однако, алмазы при этом – мелкие, настолько мелкие, что пока не представляют интереса для добычи, даже при больших содержаниях.

Попигайская астроблема



Попигайская астроблема



Импактные породы подразделяются на три класса:

1. *Класс ударно-метаморфизованных пород* включает земные породы, преобразованные в результате ударного метаморфизма под воздействием космического тела.
2. *Класс импактных литических брекчий* объединяет кластиты, возникшие в результате дробления пород субстрата под действием ударного метаморфизма.
3. *Класс импактитов* представлен продуктами плавления вещества исходных пород, его перемешивания, переноса и последующей закалки или кристаллизации в результате охлаждения.

Образование пород и минералов импактитов

- При ударе метеорита об поверхность Земли выплавленный материал в виде капель – **ТЕКТИТОВ** – разлетается на расстояние до десятков тысяч км.
- **Тектиты** – представляют собой каплевидные или гантелеобразные стекловатые формы, похожие на обсидиан, с содержанием кремнезёма до 75% и включающие **космические минералы: стешевит, коэсит, лешательерит.**

Аризонский кратер



*Рис.21 Метеоритный кратер (штат
Аризона). Диаметр 1,2 км
<http://geo.1september.ru/2001/42/2.htm>*