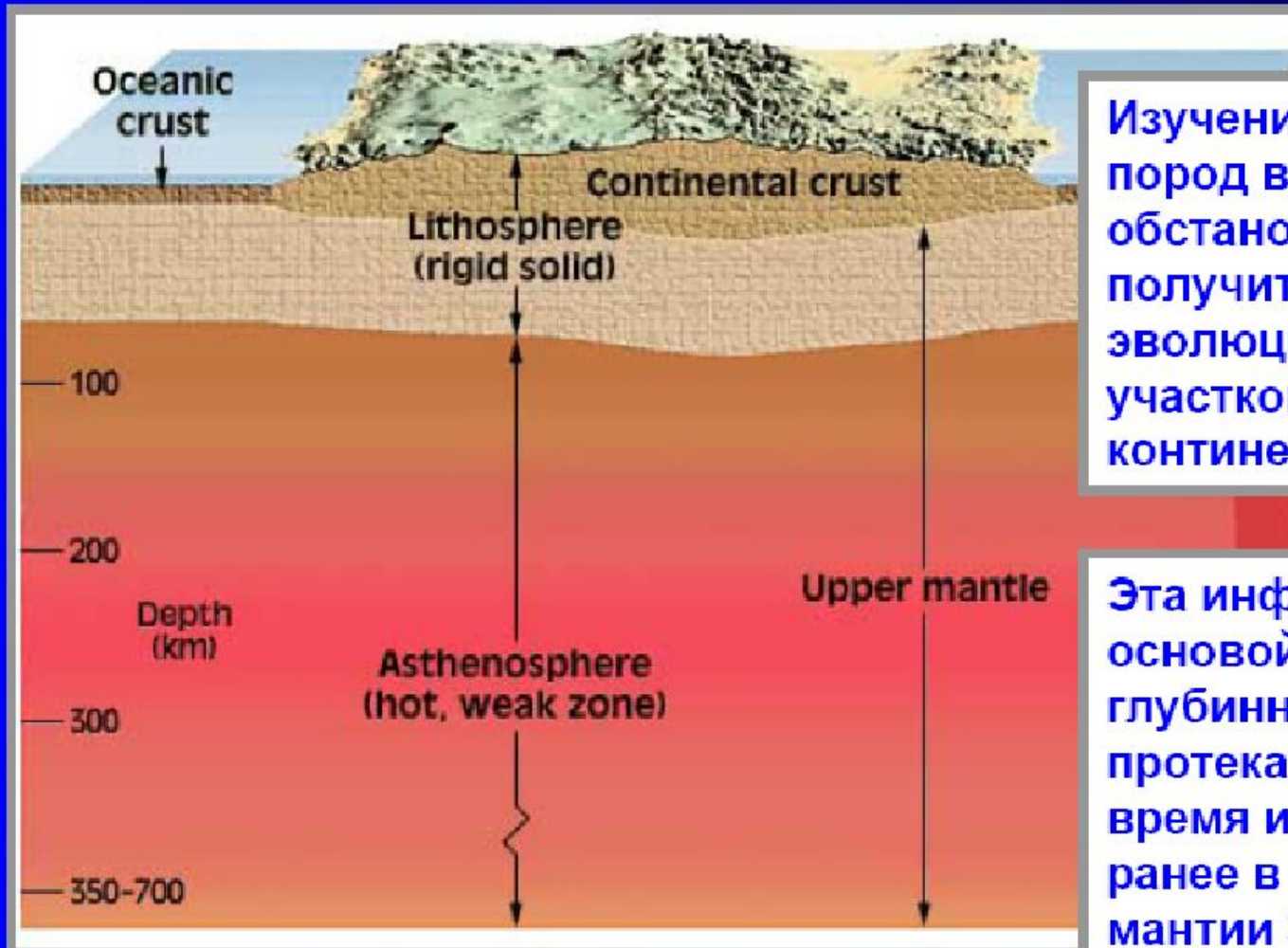


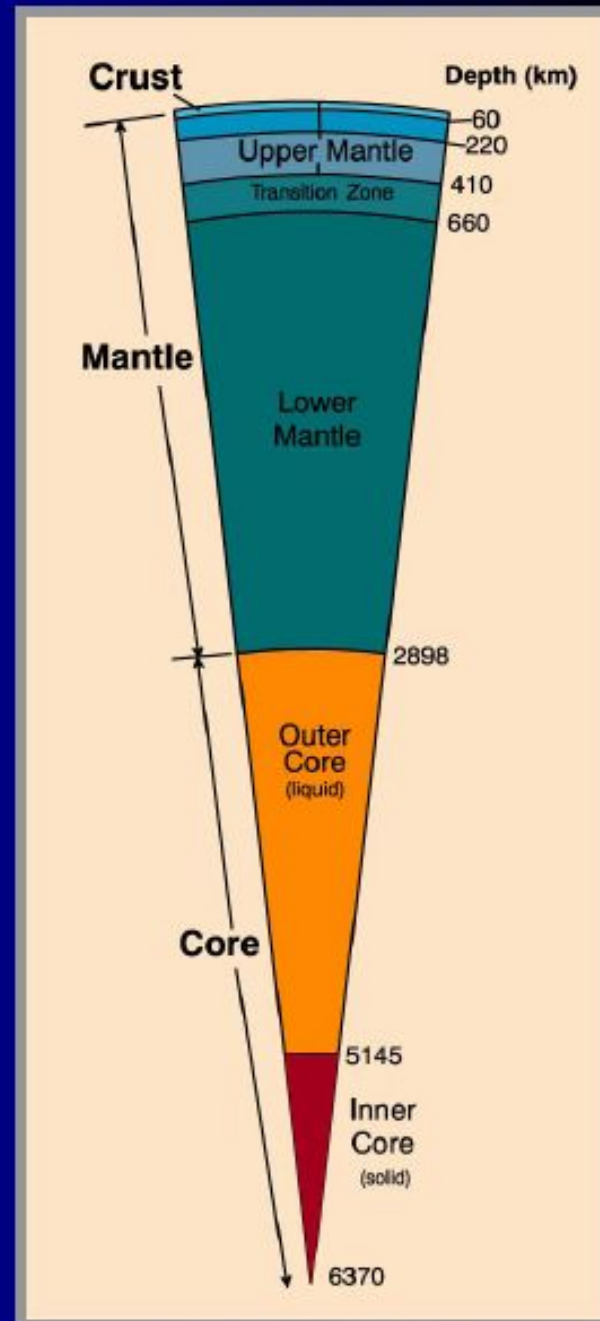
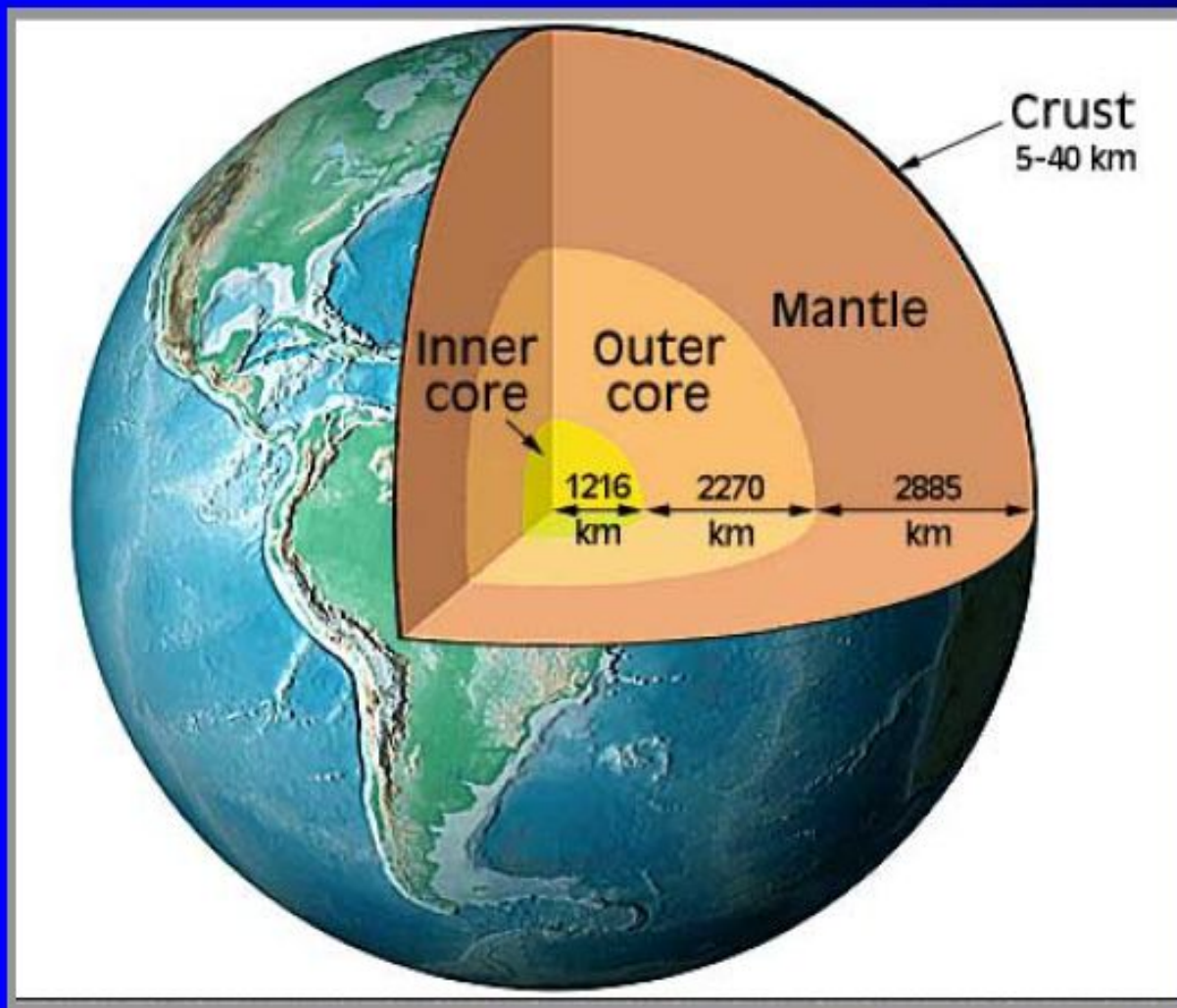
МАГМАТИЗМ – ИНДИКАТОР СОВРЕМЕННЫХ И ДРЕВНИХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ ЭВОЛЮЦИЮ ЗЕМЛИ



Изучение магматических пород в различных обстановках позволяет получить информацию об эволюции крупных участков океанической и континентальной коры.

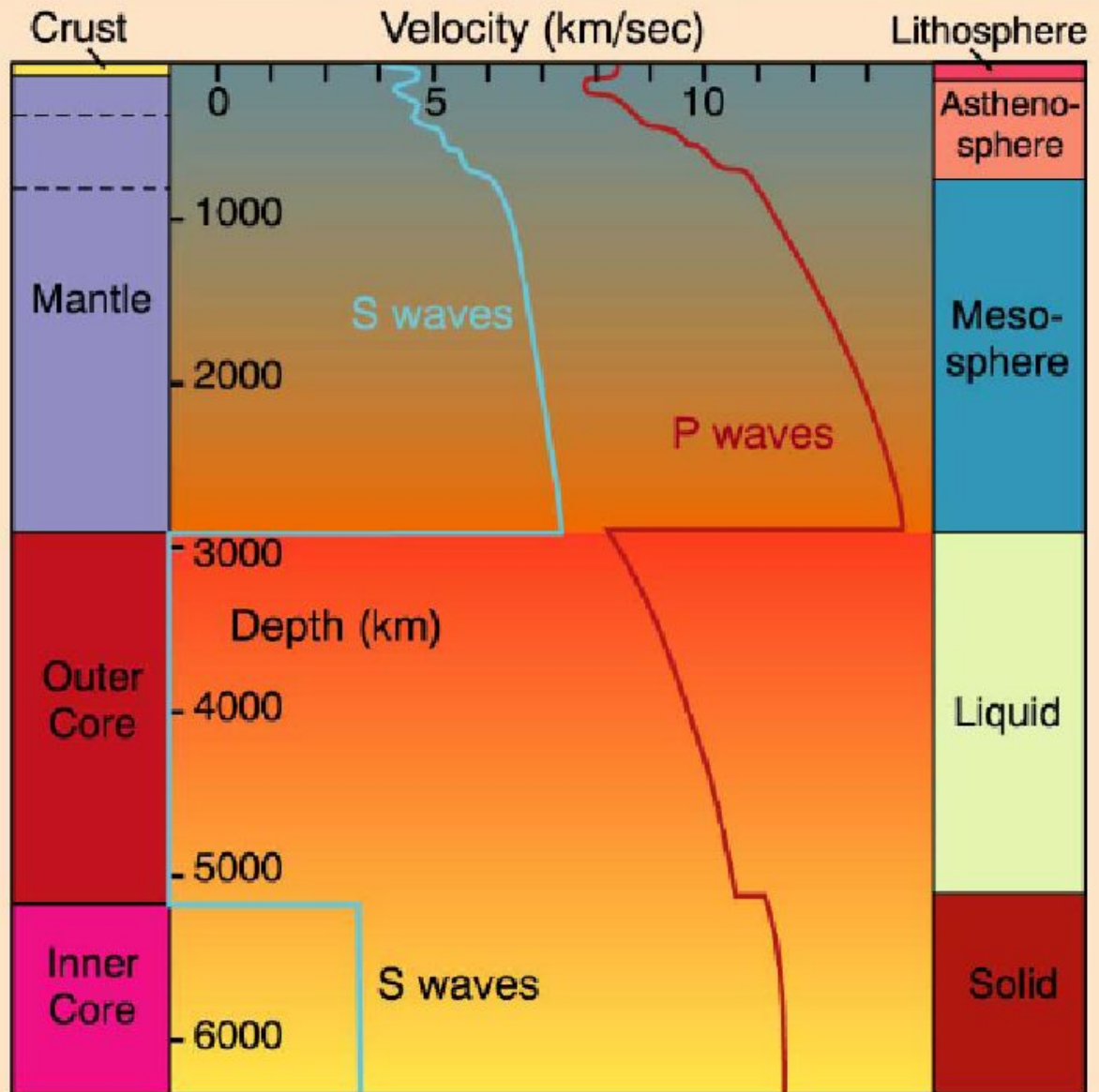
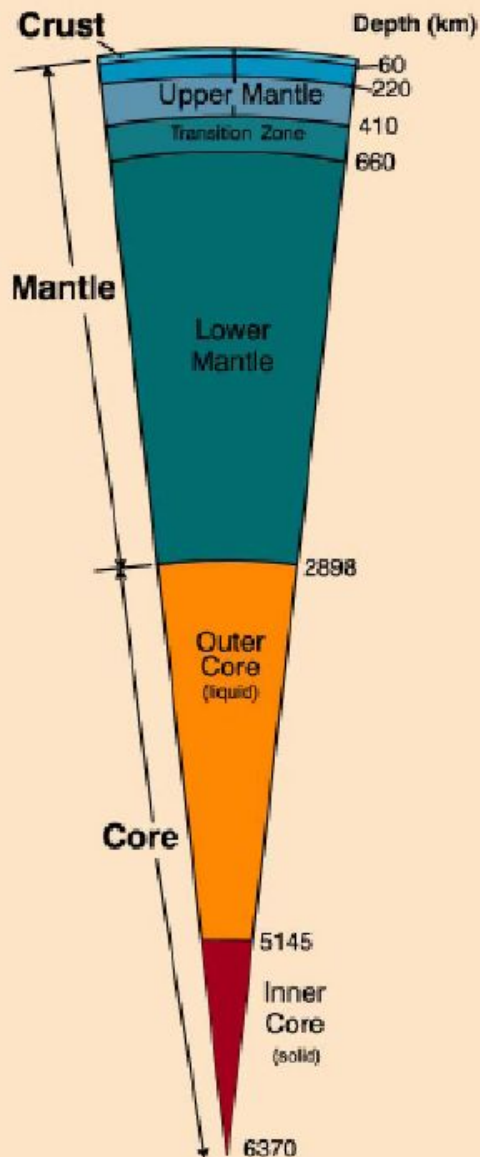
Эта информация служит основой для расшифровки глубинных процессов, протекающих в наше время и происходивших ранее в литосфере и мантии Земли.

ОБЩЕПРИНЯТАЯ СХЕМА ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ЗЕМЛИ



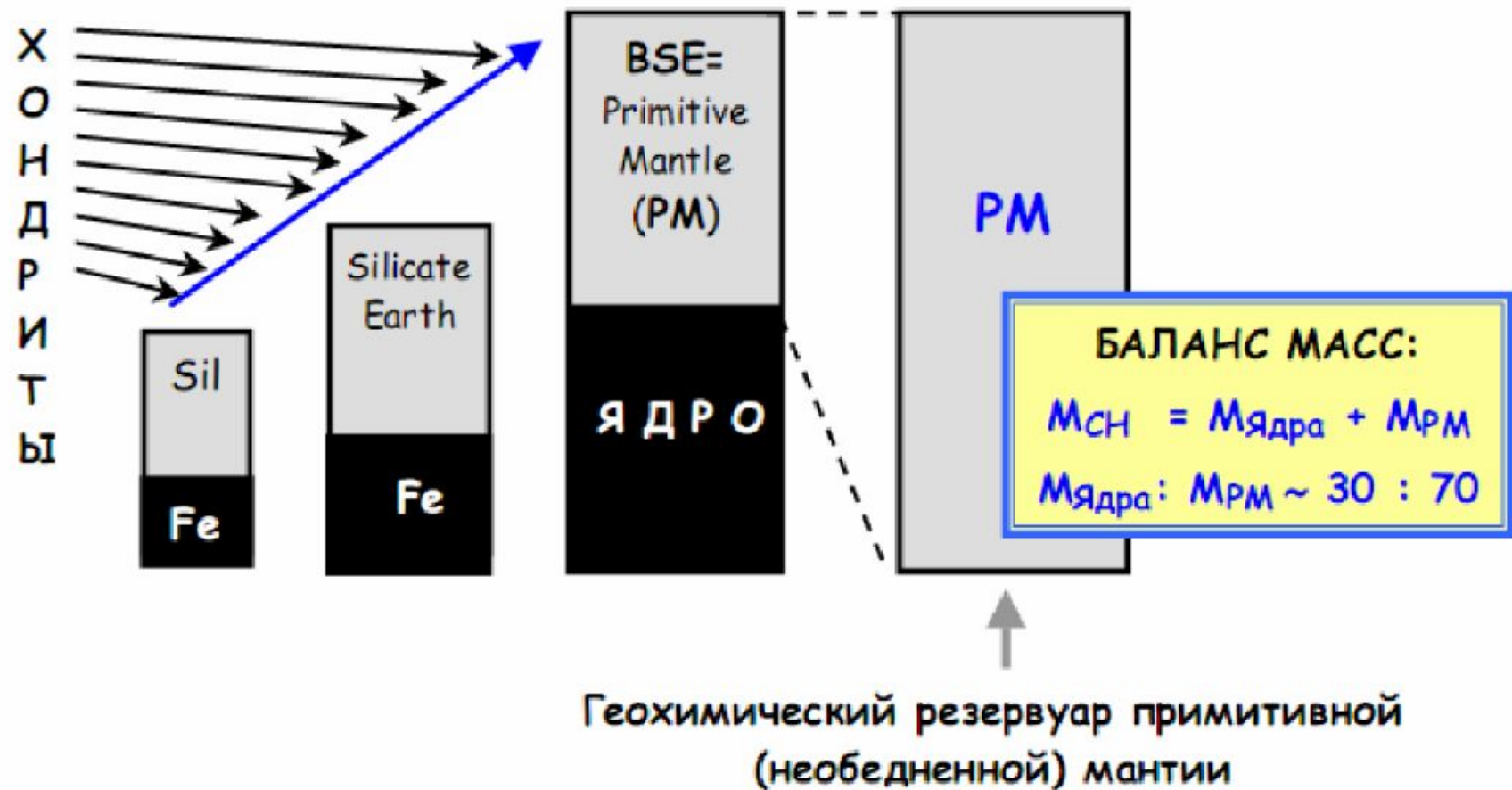
КАНОНИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН

(*P* – продольные, *S* – поперечные)



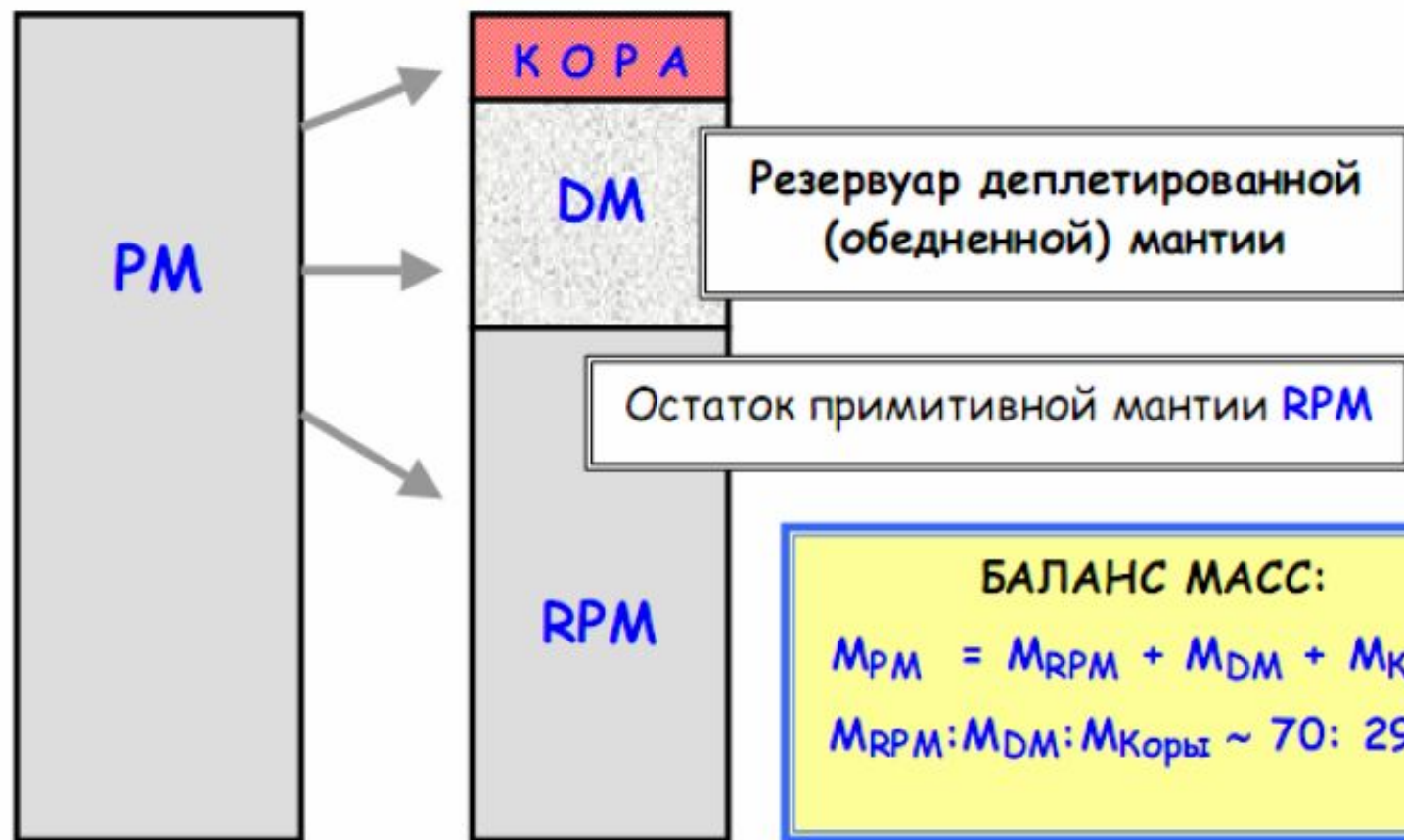
Главные стадии образования Земли - I

Рост Земли и образование ядра



Главные стадии образования Земли - II

Образование коры и деплетированной мантии



- **Магматическая ассоциация** — любая совокупность пространственно сопряженных магматических горных пород. *термин употребляется в тех случаях, когда невозможно установить принадлежность магматических пород к определенным комплексам, сериям или формациям.*
- **Магматический комплекс** — конкретный парагенезис магматических горных пород, обладающих общими особенностями состава, строения, соотношения с вмещающей средой и слагающих геологические тела в пределах определенного геологического пространства. *Магматический комплекс является ключевой петрографической единицей, которая выделяется на геологической карте (картируется). Каждый магматический комплекс имеет индивидуальное название, отражающее его основной петрографический состав и географическое положение (Лицко-Арагубские гранитоиды).*

- **Магматическая формация** — естественная ассоциация комплексов магматических горных пород, закономерно проявляющаяся в определенной геодинамической обстановке в ходе развития разновозрастных, но однотипных геотектонических элементов земной коры.
 - **совокупность магматических пород, устойчиво повторяющаяся во времени и пространстве в конкретной геотектонической обстановке. Характеризуется определенным типом металлогении**

Магматическая формация является частью геологической формации.

- **Геологическая формация** по Н.С. Шацкому (1965) — естественные комплексы, сообщества или ассоциации горных пород, отдельные части которых (породы, слои, отложения) тесно парагенетически связаны друг с другом как в возрастном (переслаивание, последовательности), так и в пространственном отношении (фациальные смены).

Н.С. Шацкий пишет: «Если минералы — это парагенезы элементов, горные породы — парагенезы минералов, то геологические формации — парагенезы горных пород».

При региональных петрологических исследованиях используются также понятия о временных и латеральных рядах магматических формаций.

- Временной ряд — ряд магматических формаций, образующихся последовательно в ходе поступательного развития геологических структур (тектонических элементов). Последовательность формаций в таком ряду отражает эволюцию магматического процесса, ограниченного в пространстве отдельной геотектонической структурой, а во времени — стадией определенного геодинамического режима.*
- Латеральный ряд объединяет магматические формации, возникающие синхронно в смежных разнотипных тектонических структурах (структурно-формационных зонах).*

Магматические формации определяются по вещественному (**петрографическому**) составу, например:

дунит-перидотитовая; андезит-базальтовая; габбро-анортозитовая; мигматит-плагиогранитная; аляскитовая и др. (Магматические формации СССР, 1979).

В зарубежной литературе используются понятия, близкие к понятию “магматическая формация”. Широко известной является классификация Чаппела и Уайта (Chappell, White, 1974). Выделяется 4 типа гранитоидов: S-, I-, M-, A-граниты, исходя из того, что состав гранитов отражает материал их источника, что предполагает различие уровней генерации расплавов.

S — (sedimentary) — продукты плавления метасадочных субстратов,

I — (igneous) — продукты плавления метамагматических субстратов,

M — (mantle) — дифференциаты толеит-базальтовых магм,

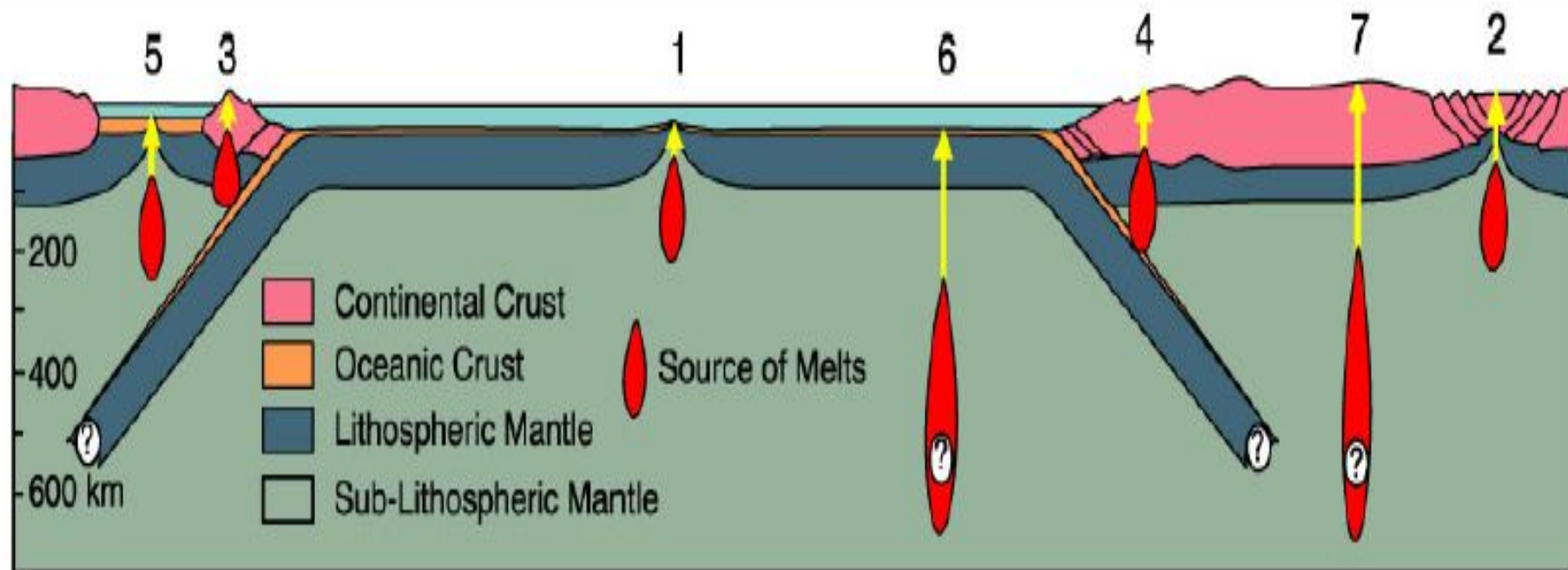
A — (anorogenic) — продукты плавления нижнекоровых гранулитов или дифференциаты щелочно-базальтоидных магм.

- **Магматическая серия** — **естественный последовательный ряд магматических горных пород** с определенной направленностью (трендом) изменения **химического состава**, образовавшихся в результате эволюции родоначальных магм в конкретных геодинамических условиях.
- *Главнейшие типы серий были выделены на примере кайнозойских магматических пород, поскольку для них наиболее достоверно установлены геодинамические режимы.*

Попадая в новые термодинамические условия верхних слоев Земли, так называемая, материнская магма изменяет свой состав. Этот процесс носит название ***магматический дифференциации или эволюции магмы или магматического фракционирования.***

При этом исходная гомогенная масса дает фракции различного состава – жидкие или кристаллические. Возникает ряд или ***серия магматических пород*** – *породы*, генетически связанные процессами дифференциации и характеризующиеся систематическим изменением химического состава.

Главные типы геодинамических обстановок

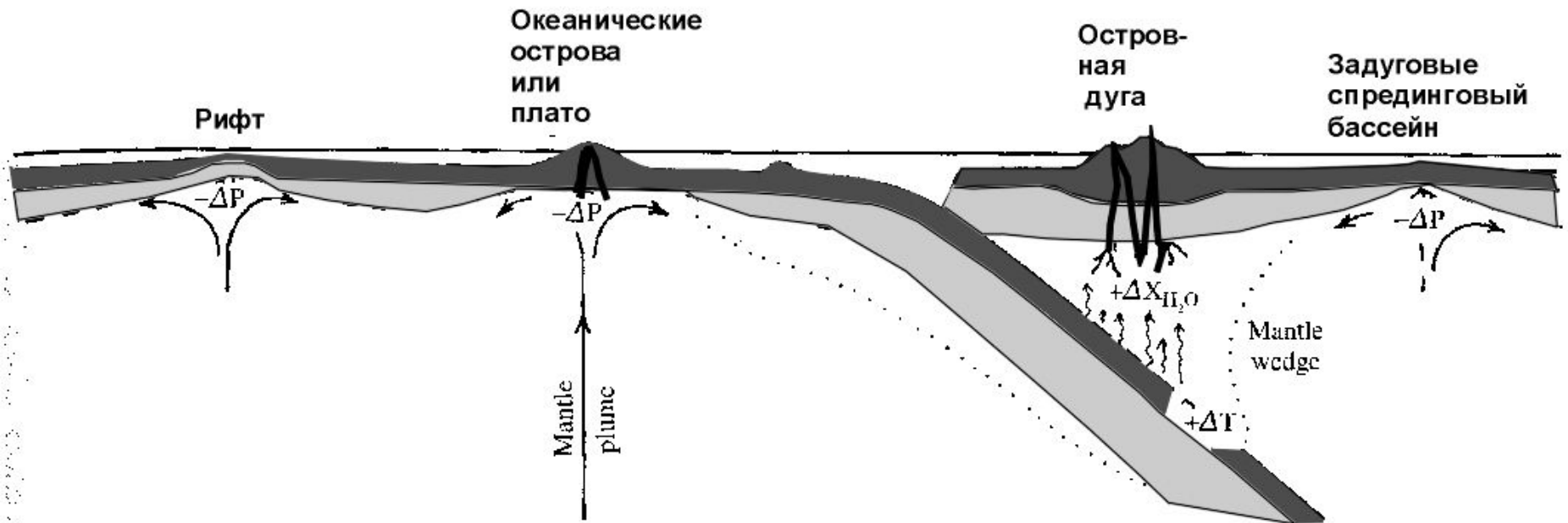


1 – Срединно-океанические хребты
2 – Континентальные рифты
3 – Островные дуги
4 – Активные континентальные
окраины

5 – Задуговые бассейны,
6 – Океанические острова,
7 – Внутриплитный
магматизм

Магматическая деятельность в океанических обстановках

Океаническая литосфера



Магматическая деятельность в континентальных обстановках

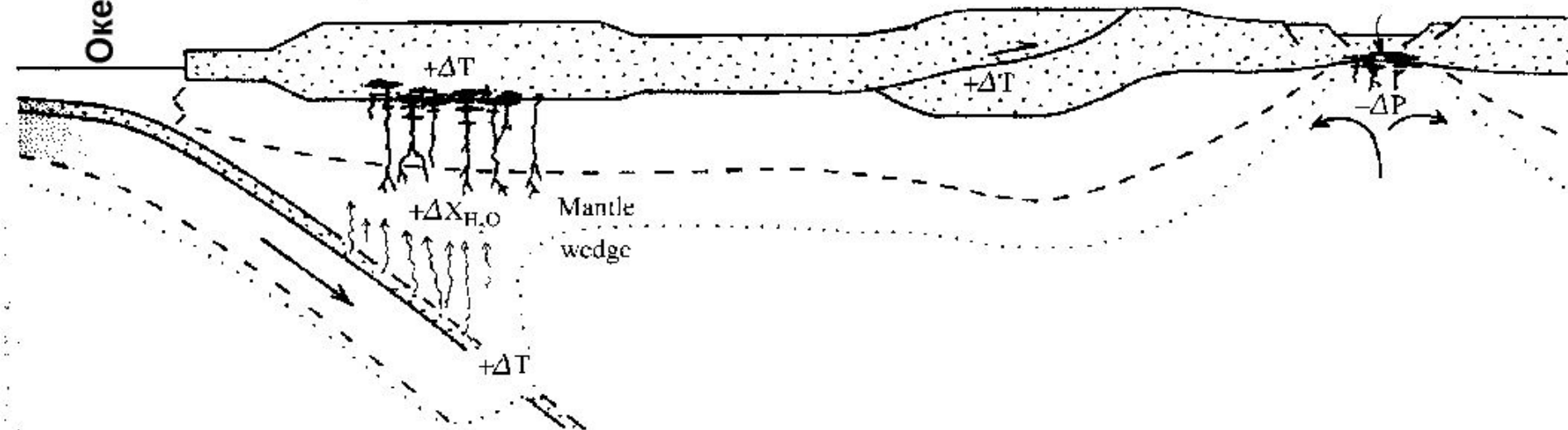
Континентальная литосфера

Океаническая впадина

Субдукционная
зона
активной
континентальной
окраины

Зона
коллизии

Континен-
тальный
рифт



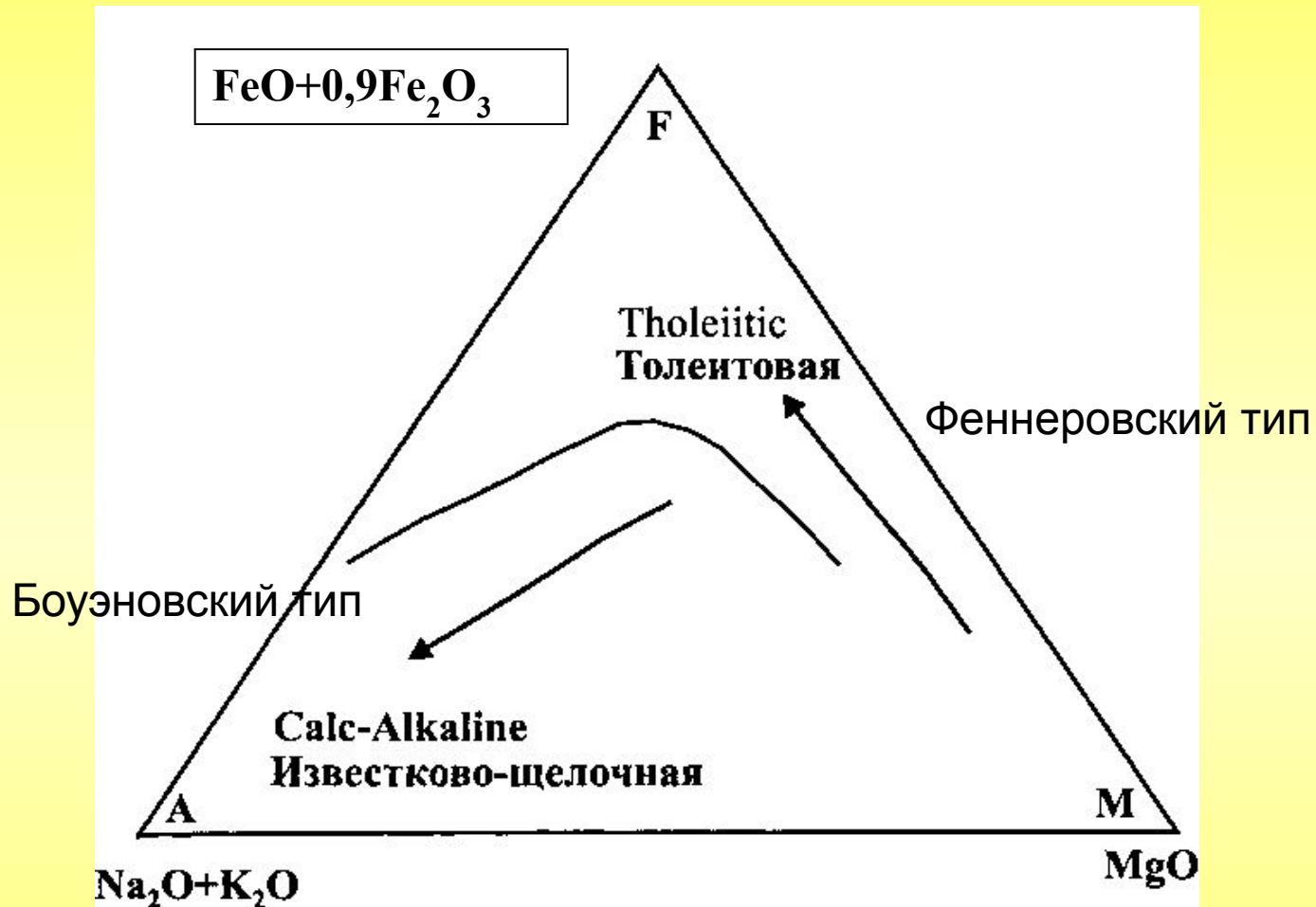
Петрохимические серии

Число основных типов серий невелико, что связано с ограниченным количеством ведущих механизмов магматического петрогенезиса.

- **Толeutовая серия** включает базальты, андезибазальты, андезиты и небольшие объемы дацитов и риолитов. SiO_2 - в пределах 48-63% (среднее SiO_2 – 53%). В основной массе присутствуют авгит и пижонит. Характерен тренд обогащения железом.
- **Известково-щелочная серия** - андезиты, дациты и риолиты (подчиненная роль базальтов и андезибазальтов). SiO_2 колеблется от 52 до 70% (среднее SiO_2 – 59%). В основной массе присутствует ортопироксен, а пижонита нет. Отсутствует тренд обогащения железом.
- **Субщелочная калиево-натриевая серия** - субщелочные оливиновые базальты, гавайиты, муджериты, трахиты, трахиандезиты, трахидациты и трахириолиты. С ростом содержания SiO - увеличение железистости (также для клинопироксенов в ряду основные – средние – кислые породы).

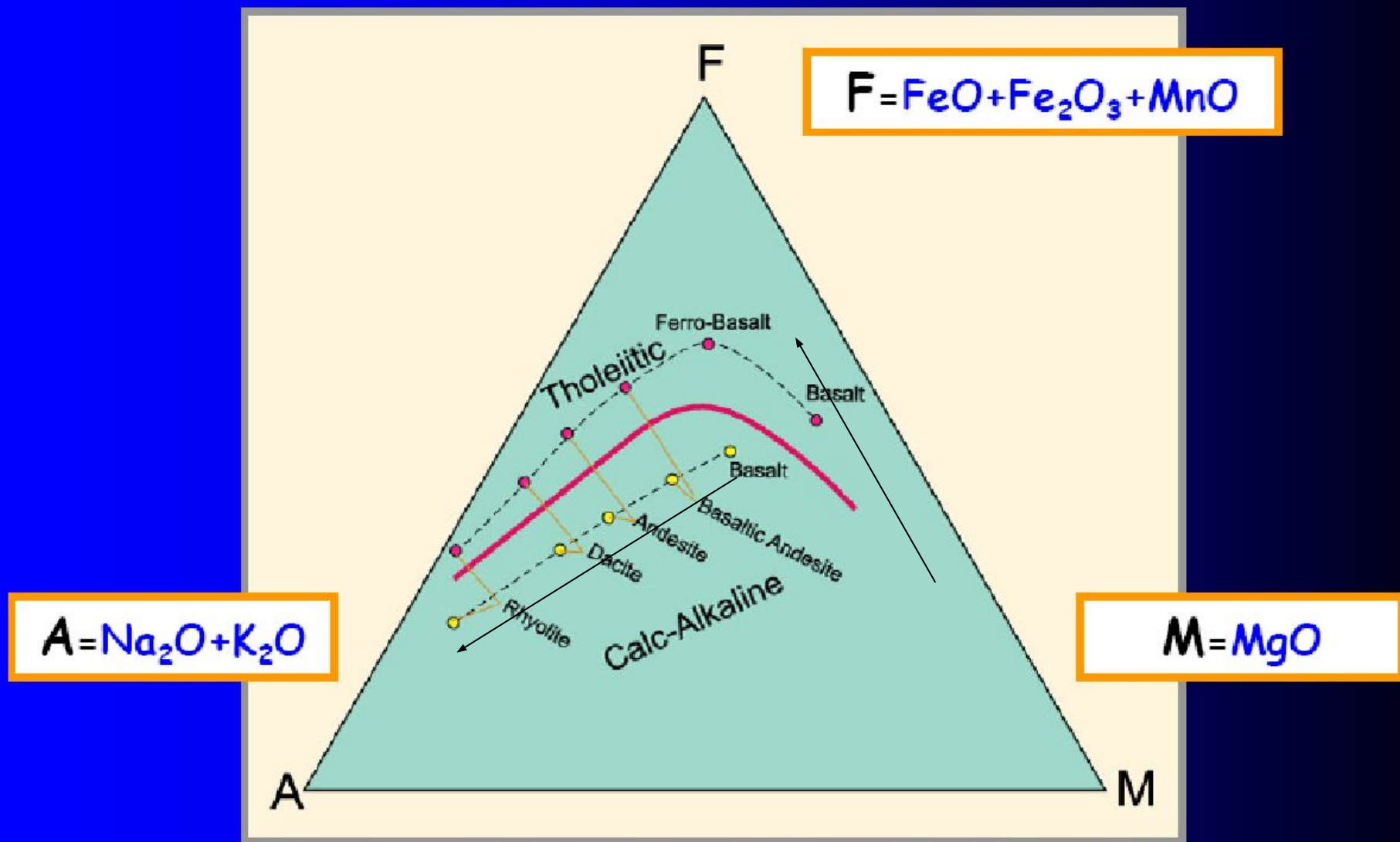
- В основе известково-щелочной и толеитовой серий лежат два главных типа магматической дифференциации вещества по законам последовательной кристаллизации **Боуэна и Феннера**.
- При процессах магматической дифференциации по **Феннеровскому типу** происходит последовательное увеличение железистости ($\text{FeO} + 0,9\text{Fe}_2\text{O}_3$) / MgO в конечных продуктах, так что на диаграмме AFM тренд изменения химического состава конкретных толеитовых серий располагается субпараллельно стороне FM (рис.).
- Процессы кристаллизационной дифференциации по **Боуэновскому типу** не приводят к существенному изменению железистости конечных продуктов, и на диаграмме AFM тренды располагаются вдоль линий с постоянным соотношением железа к магнию.

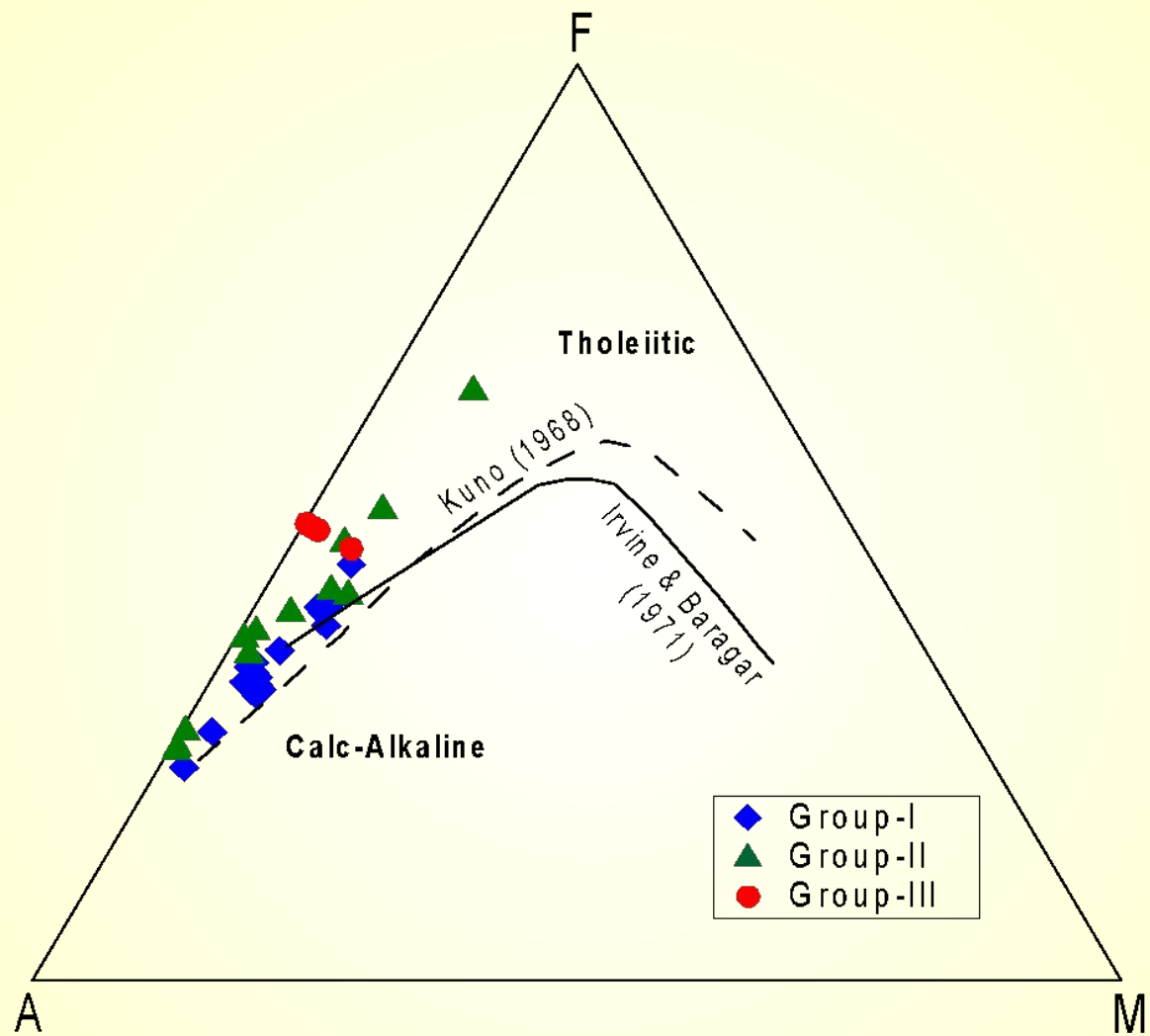
Диаграмма AFM



- **Рис.** Диаграмма AFM. Стрелками показано направление дифференциации магмы толеитовых и известково-щелочных серий. Линия раздела между сериями по Т. Ирвайну и В. Барагару (1971)

ДИАГРАММА "AFM"





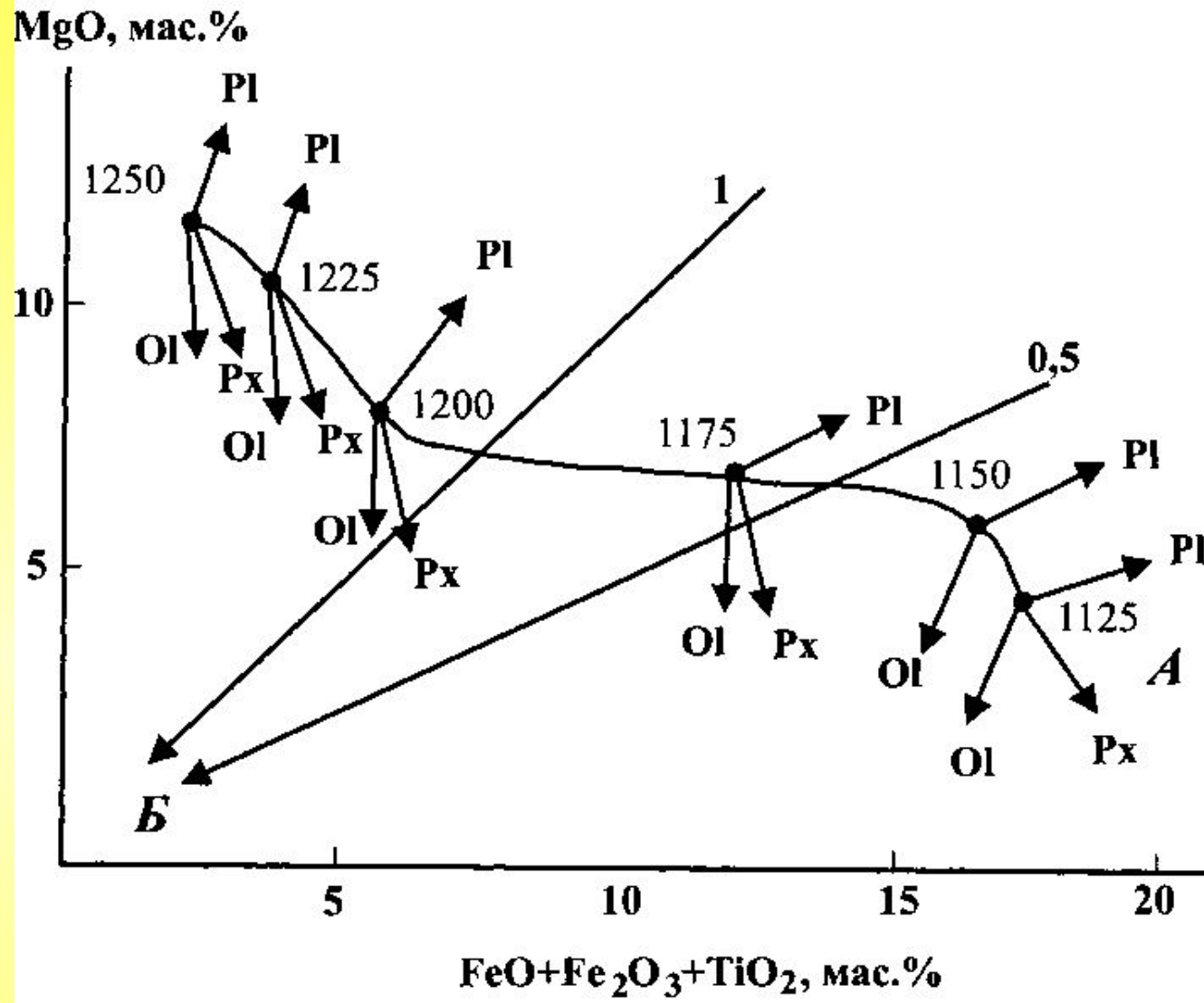


Рис. Феннеровский толеитовый (А) и боуэновский известково-щелочной (Б) тренды магматической дифференциации (Маракушев, 1983). Стрелками показаны направления изменения состава магмы, обусловленные фракционированием оливина (Ol), пироксена (Px), плагиоклаза (Pl) для толеитовых магм и соотношениями MgO с суммой $\text{FeO} + 0,9\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, равными 1 и 0,5 для известково-щелочных магм. Цифры у точек — температура (°C)

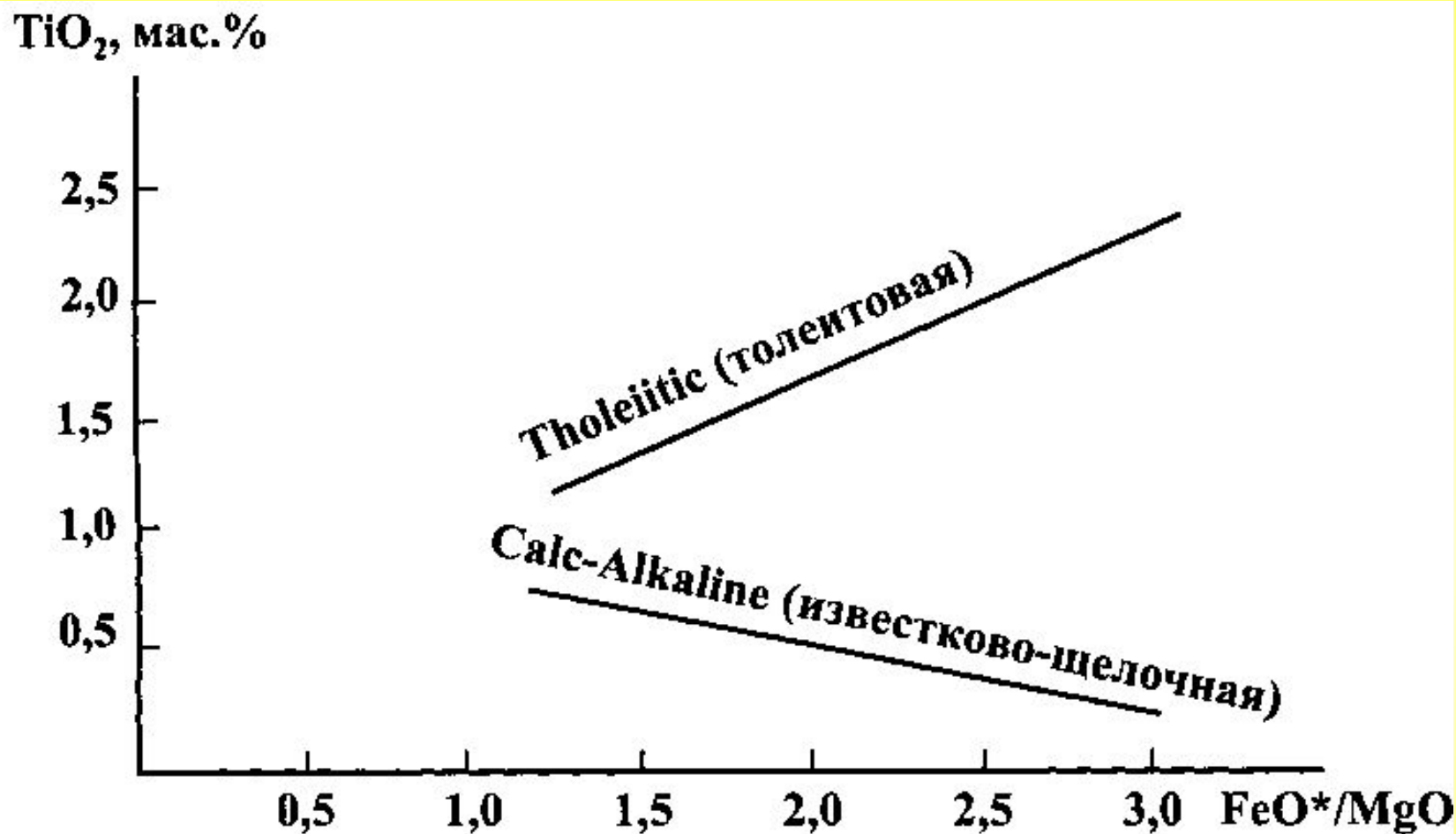


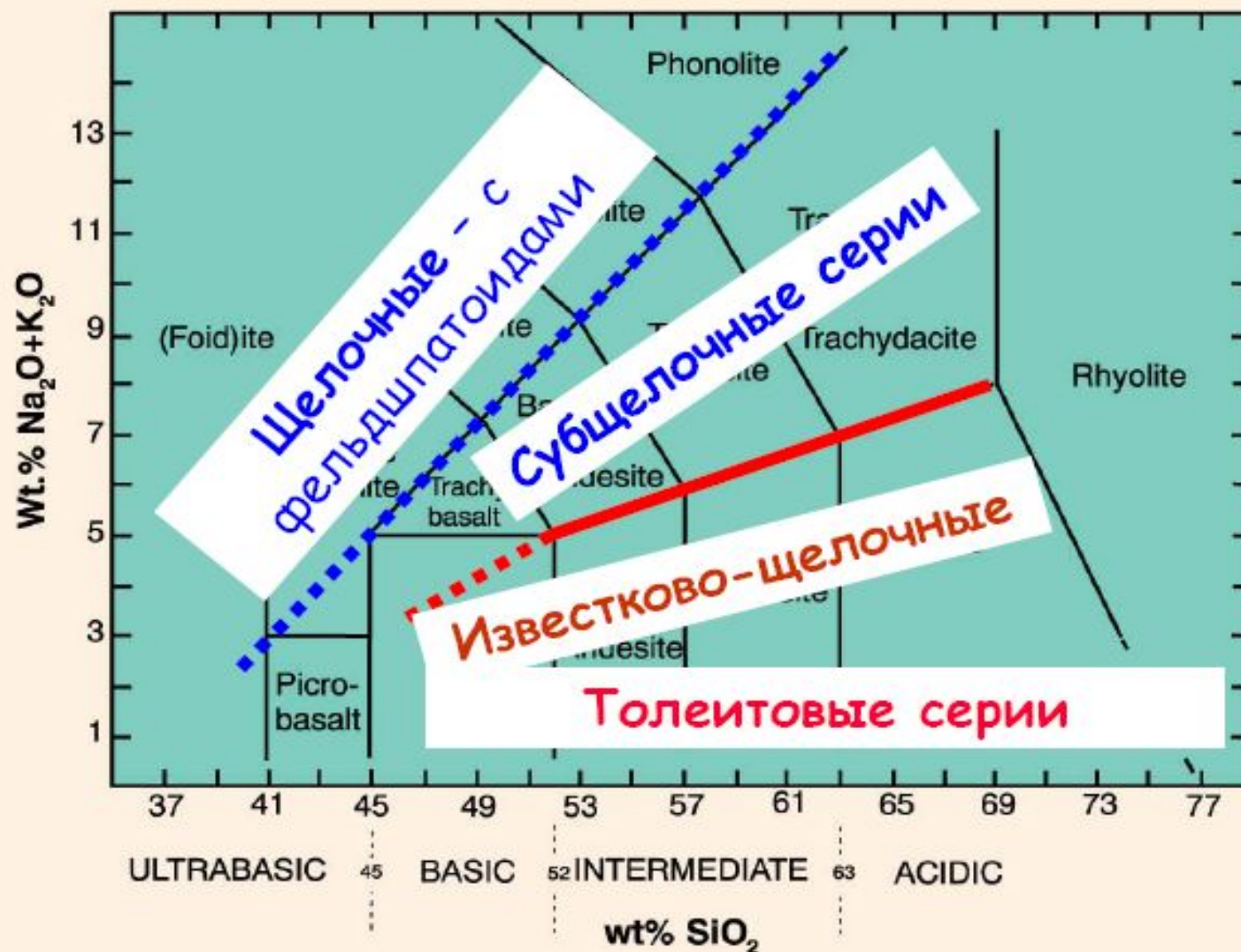
Диаграмма А. Мияширо для разделения толеитовых и известково-щелочных серий по соотношению $(\text{FeO} + 0,9\text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{MgO} - \text{TiO}_2$.
Линии дифференциации вулканитов.



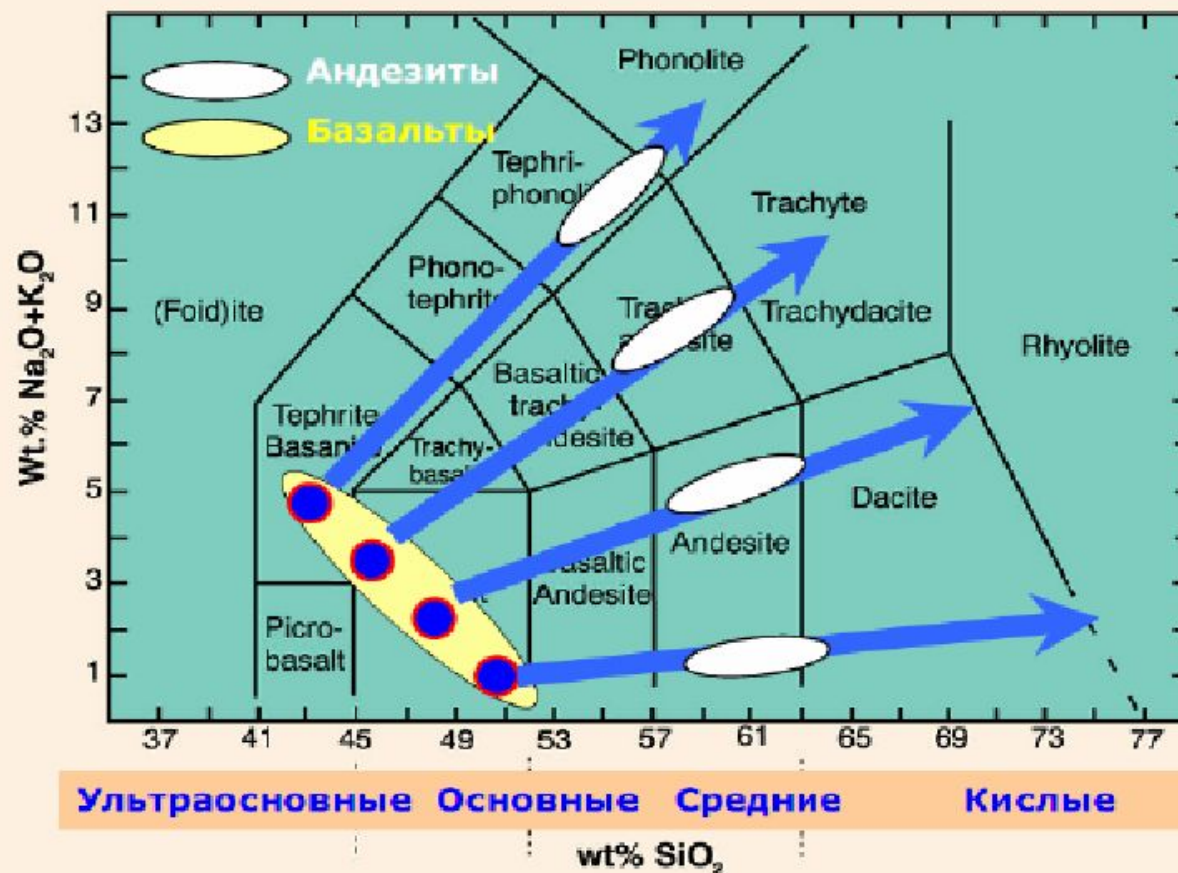
Классификационная петрохимическая диаграмма вулканических серий по щелочности (Фролова, Бурикова, 1997)

КЛАССИФИКАЦИЯ СЕРИЙ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД

(Петрографический комитет АН СССР, 1981)



БАЗАЛТЫ КАК ПРИМИТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ИЛИ ИСТОЧНИК (ИСХОДНЫЕ РАСПЛАВЫ) ДЛЯ МАГМАТИЧЕСКИХ СЕРИЙ



Главные генетические типы базальтов отвечают главным типам петрохимических серий:

толеитовые, известково-щелочные, щелочные и т.д.

Первичные магмы и их эволюция

Магматические серии представляют собой продукты дифференциации единых родоначальных или первичных магм

Магмы, зарождающиеся при определенных термодинамических условиях, в результате движения к поверхности Земли изменяют свой состав, т. е. происходит их эволюция. Эволюция магм обусловлена тремя главными процессами: 1) кристаллизационной дифференциацией; 2) взаимодействием с флюидами; 3) взаимодействием с вмещающими породами.

- Сущность процесса **кристаллизационной дифференциации** состоит в том, что при восходящем движении частично раскристаллизованных магм кристаллы обычно отстают от несущей их остаточной жидкости, при этом кристаллы являются более плотными, так что происходит их погружение в магме. Таким образом, химический состав остаточных магм изменяется.
- **Н. Боуэном** была установлена следующая последовательность выделения кристаллов из магм нормальной щелочности: 1) для темноцветных (железо-магнезиальных минералов): оливин — пироксен — роговая обманка — биотит; 2) для лейкократовых минералов: основной плагиоклаз — средний плагиоклаз — кислый плагиоклаз, ортоклаз, кварц. (расплав непрерывно обогащается Si, Na, K и другими легкоплавкими компонентами).
- *Для магм, отличающихся по щелочности от нормальных, порядок кристаллизации может не сохраняться.*

NORMAN L. BOWEN

(1887 - 1956)



**Bowen N.L. Evolution of Igneous
Rocks.**

- Основой **магматического расплава** являются кремнекислородные тетраэдры с различной степенью полимеризации. В магматических расплавах удастся идентифицировать реальные химические вещества различной природы. Среди них имеются ионы металлов (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Na^+ и т.д.), а также анионные группы - $(\text{OH})^-$, $(\text{HCO}_3)^-$ и Cl^- . Все эти ионы удерживаются в прерывистой несколько изменчивой связующей массе, образуемой атомами Si, Al, и O, разнообразно связанными друг с другом наподобие эмбриональной и несовершенной кристаллической структуры.

- Основное деление магм (как и пород) происходит по содержанию SiO_2 . Содержание других главных элементов зависит от содержания кремнезема. Более независимы от содержания SiO_2 являются содержания щелочей.
- Увеличение содержания SiO_2 ведет к увеличению вязкости расплава, так как увеличивается степень полимеризации расплава.
- Чем больше кремнекислоты содержится в магме, тем выше доля прочных ковалентных (мостиковых) связей между катионами кремния и анионами кислорода и тем менее подвижен расплав.
- H_2O резко понижает вязкость магматических расплавов. При накоплении летучих компонентов магма становится подвижной, теряет вязкость.

Температуры и давления образования магматических расплавов

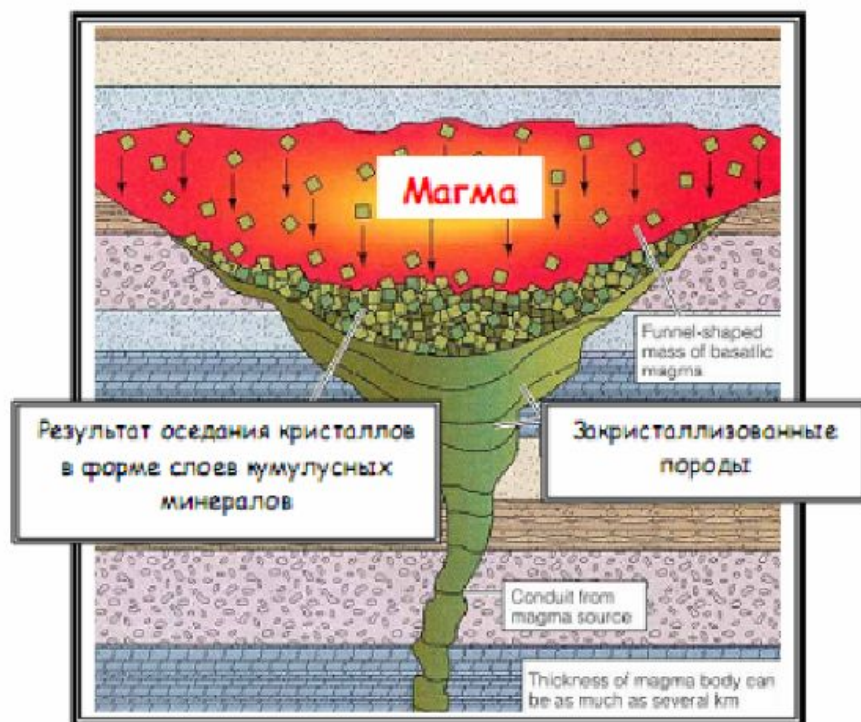
Первичные источники всех магм, внедрявшихся в земную кору или изливавшихся на поверхность земли, располагаются в мантии и, по-видимому, в коре.

Магмы формируются на глубинах от 10-15 до 200-250 км при литостатическом давлении от 0,25-0,5 ГПа до 5-8 ГПа. Температура силикатных магм в момент зарождения варьирует от 500-600 °С до 1600-1800 °С в зависимости от глубины источника и состава расплава.

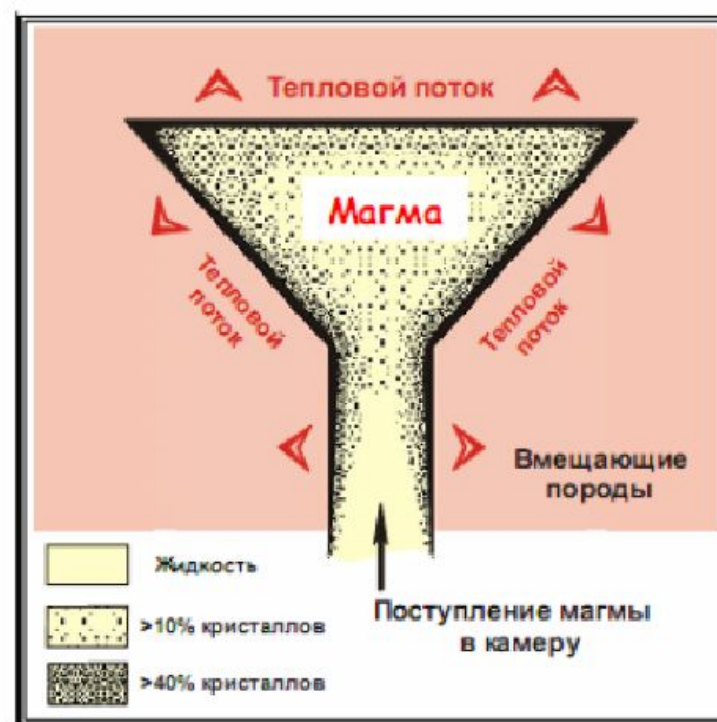
По геофизическим данным Земля в целом (за исключением внешнего ядра) твердая. Следовательно, магмы возникают за счет плавления ранее существовавших пород. Полное плавление таких пород происходит редко, из-за очень высоких температур их плавления.

Как правило, происходит частичное плавление твердого вещества земной коры и верхней мантии, то есть при P-T условиях между солидусом и ликвидусом.

Вариации фазового состава магм в воронковидной камере



Геологическая модель камеры
(традиционные представления)



Результаты термофизических расчетов
динамики заполнения магмой камеры
(Шарапов и др., 1998)

Схема строения магмовода как системы сообщающихся магматических камер (Mursh, 1998)

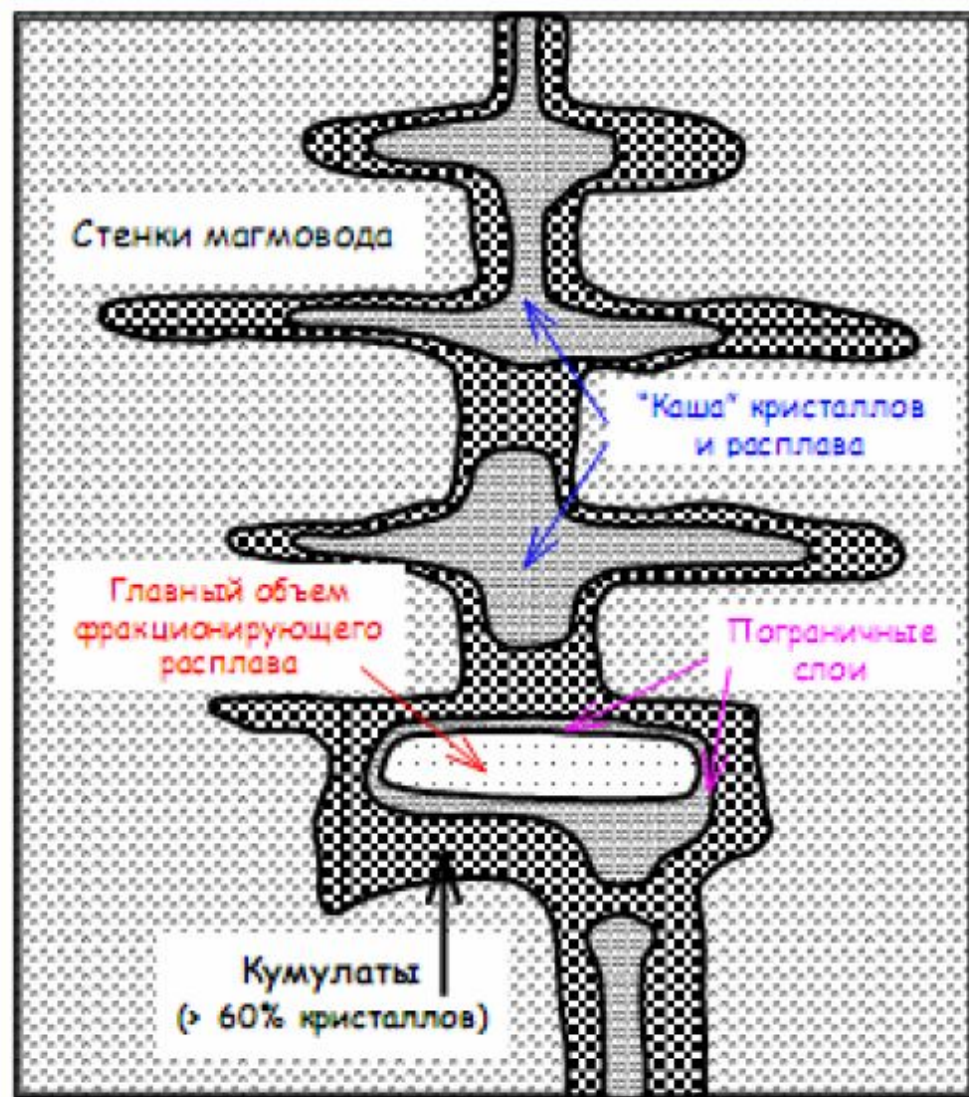
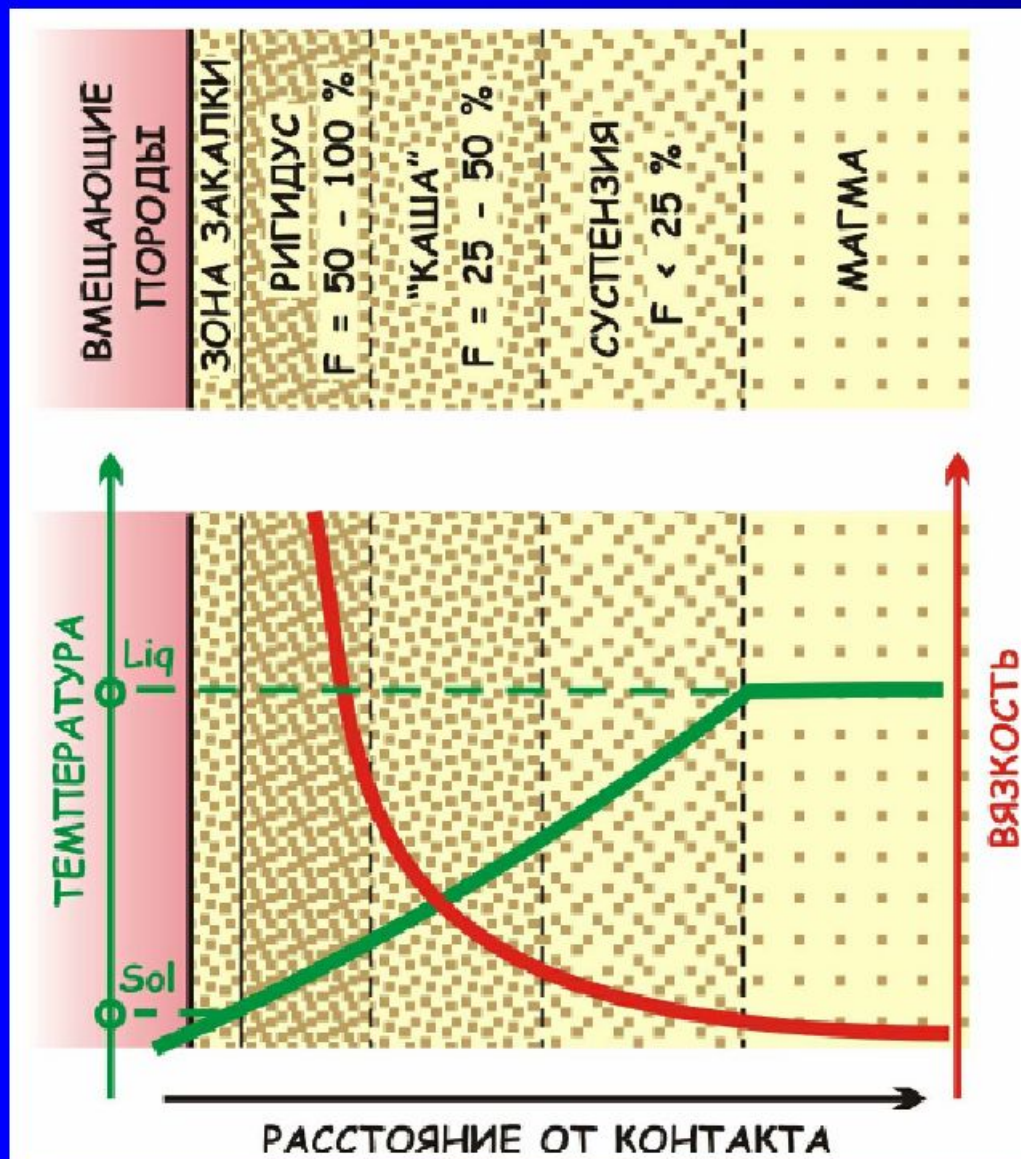


Схема демонстрирует гетерофазовую природу магм, для которых не характерно состояние совершенно свободной от кристаллов магматической жидкости.

Изменение температуры и вязкости магмы вглубь от контакта камеры



Магма – это гетерогенная расплавно-кристаллическая система (как правило силикатная), в которой пропорция жидкой фазы превышает долю критического расплава.

Последнее условие подчеркивает взаимосвязь кристалличности и вязкости магмы с возможностью перемещения субстанции в коре и мантии.

Жидкая часть магмы называется магматическим расплавом.

- **Флюиды** играют решающую роль в генерации магматических расплавов и их эволюции. Они имеют глубинное подкоровое происхождение и связаны либо с дегазацией внутренних оболочек Земли, либо с переработкой погружающихся в мантию пластин океанической литосферы. Значительное количество флюидов может образовываться при дегидратации и декарбонатизации пород. Пути их миграции определяются геодинамическим режимом. Флюиды проходят через магматические расплавы, а также опережают их подъем, вызывая метасоматические изменения окружающих горных пород (Д. С. Коржинский (1972, 1973)).
- «флюид» - газовое или жидкое вещество, отличающееся от горных пород и магм более низкими значениями плотности и вязкости. Природный флюид — это прежде всего надкритическая гидротермальная фаза, которая способна переносить и отлагать химические элементы, растворяться в магматических расплавах, на порядки увеличивать скорости протекания геологических процессов. Глубинные флюиды имеют достаточно сложный состав: H_2O , H_2 , CO_2 , CO , CH_4 , N_2 , S_2 , Cl_2 , F_2 и др.
- Высокие концентрации флюидов в расплавах существенно снижают температуры их кристаллизации. Соответственно и плавление при высоком давлении флюида происходит при существенно более низких температурах.

Контаминация - (загрязнение) веществом земной коры первичных магм при движении магм к земной поверхности. Неопровержимым доказательством участия корового вещества в формировании магм являются изотопные данные.

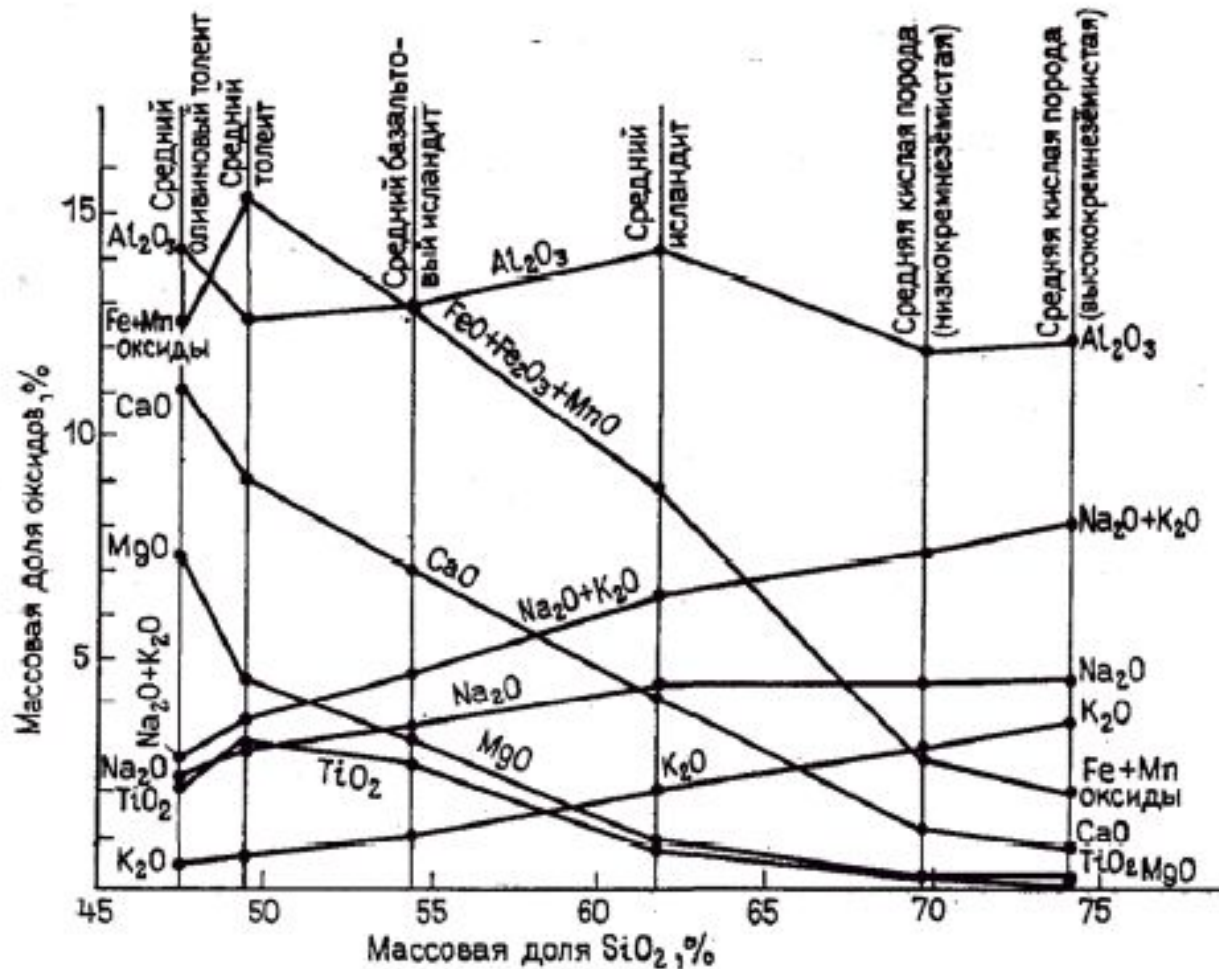
Кроме коровой контаминации взаимодействия магм с вмещающими породами в магматических камерах и подводящих каналах, существует мантийная контаминация, т. е. происходит контаминация источника, из которого выплавляются магматические расплавы. Одним из наиболее ярких подтверждений реальности подобного процесса являются высокие концентрации в вулканитах некоторых островных дуг короткоживущего изотопа бериллия, образующегося в атмосфере и накапливающегося в океанических осадках (Brown et al., 1982).

Таким образом, на химический состав магматических образований большое влияние оказывают такие эффекты, как мантийная и коровая гетерогенность, контаминация, метасоматоз, кристаллизационная дифференциация и т. д.

В конкретной геодинамической обстановке эти явления проявляются в различной степени и только немногие из них могут быть для нее уникальными.

Типизация конкретных формаций включает сравнение выделенных ассоциаций с ранее изученными эталонами внутри региона или за его пределами. Эталонные формации называются “абстрактными” формациями – в том смысле, что не привязаны к конкретному региону, структуре или времени образования. Абстрактные формации называют еще формационными типами.

Диаграммы Харкера.



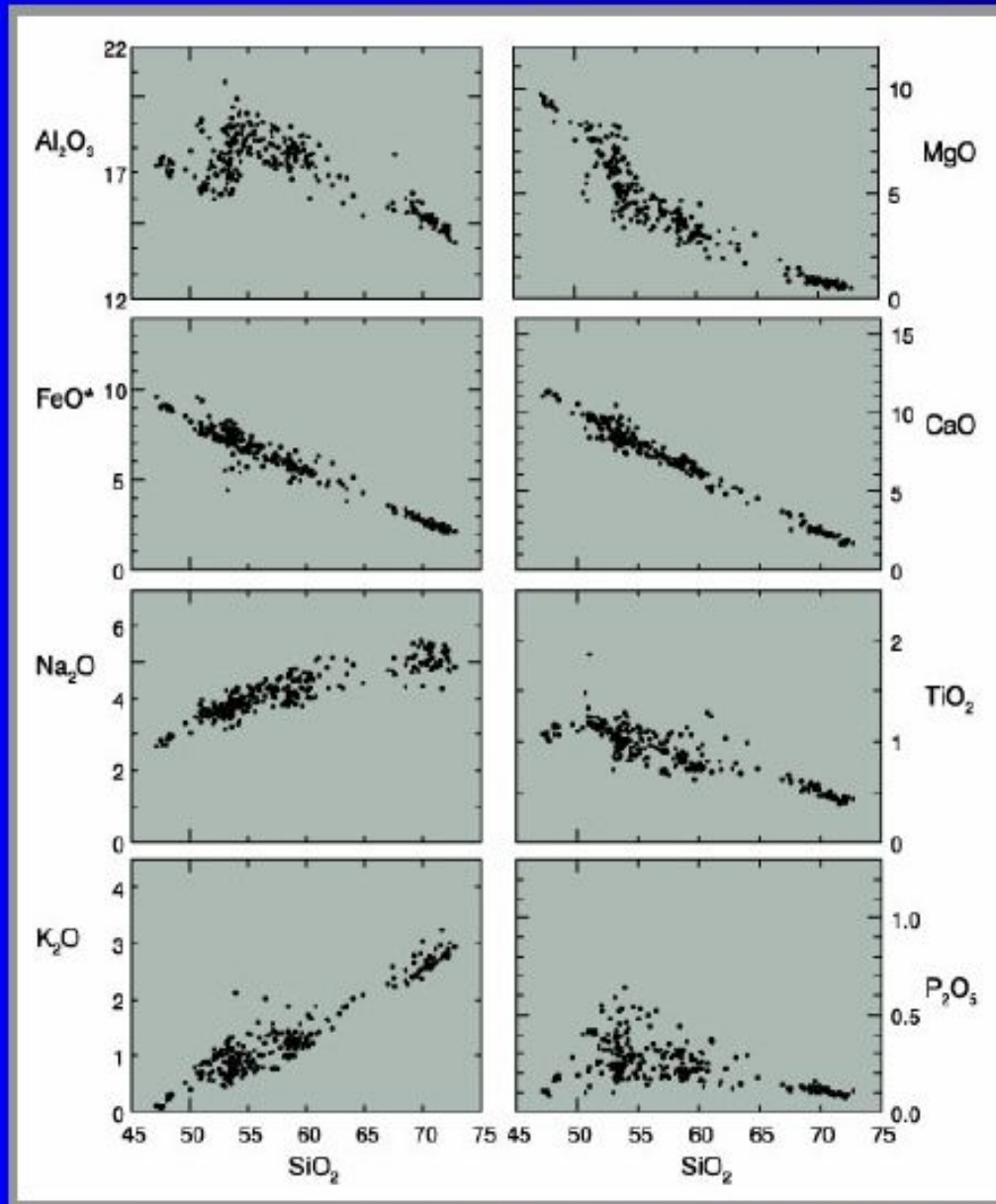
- Петрологи обычно пытаются воспроизвести такие изменения на вариационных диаграммах. Одной из таких диаграмм является диаграмма Харкера, в которой различные главные оксиды наносятся относительно кремнезема в качестве абсциссы
- Вариационная диаграмма Харкера для серии толеитовых лав Тингмули (Исландия)

Диаграммы петрохимические бинарные

1) **диаграммы Харкера**. Тип диаграмм, на которой по оси X откладывается SiO_2 в мас.%, а по оси Y содержания петрогенных окислов в мас.%. Предложены Харкером для описания эволюции магматических серий. При этом, SiO_2 выступает индикатором степени дифференциации.

2) **диаграммы Феннера** – в качестве индикатора степени фракционирования используется MgO .

СЕРИАЛЬНОСТЬ ПОРОД В МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ



Составы пород конкретных магматических комплексов обычно выстраиваются в сублинейные последовательности содержаний оксидов, которые называются **петрохимическими трендами**

ДИАГРАММЫ ХАРКЕРА (зависимость от SiO_2)

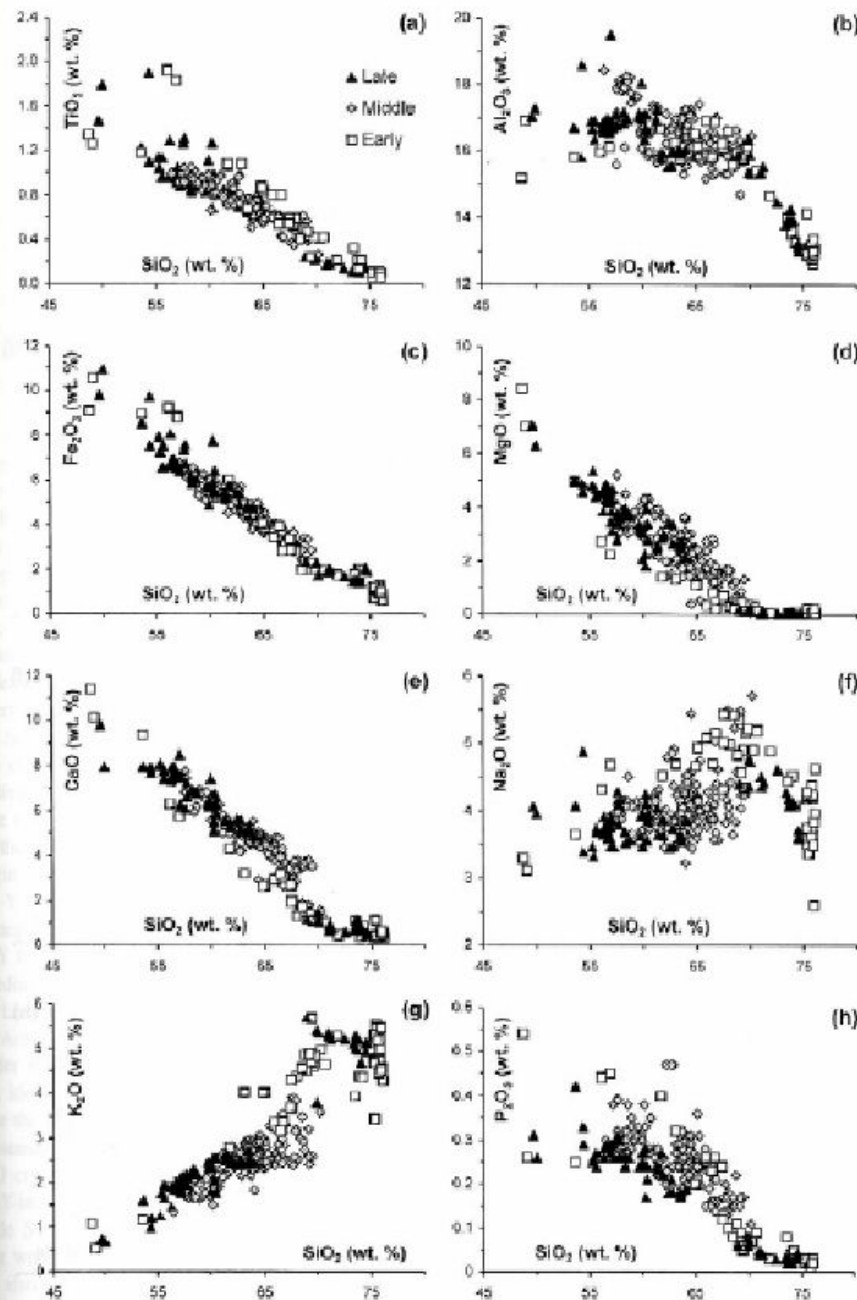
Составы 310 вулканических пород из Кратерного озера г.Мазама (штат Орегон, США)

Другой пример диаграмм Харкера

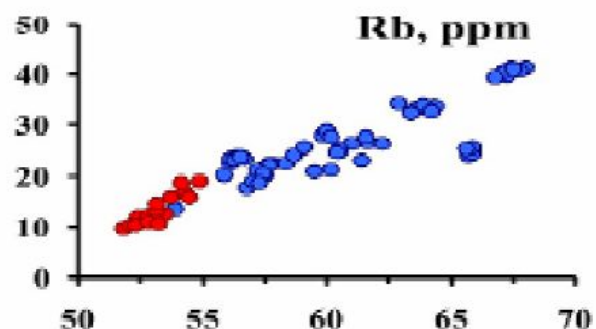
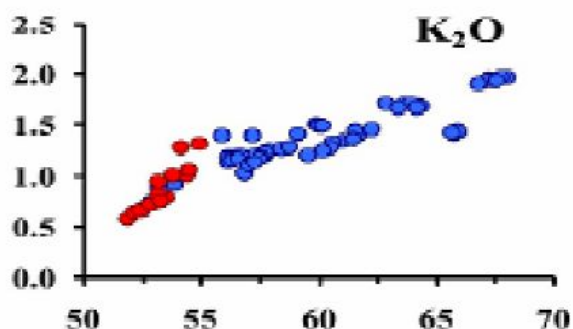
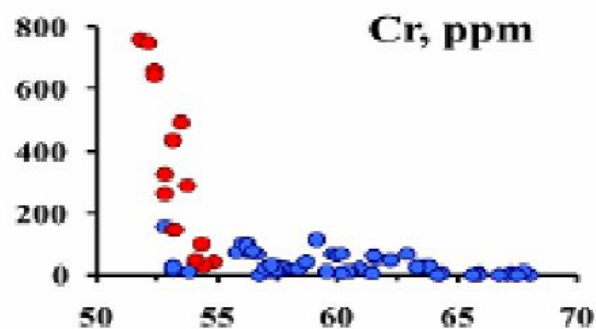
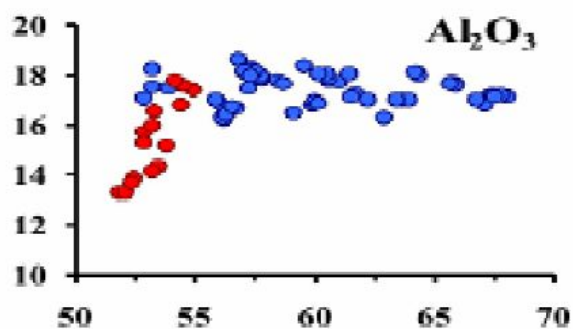
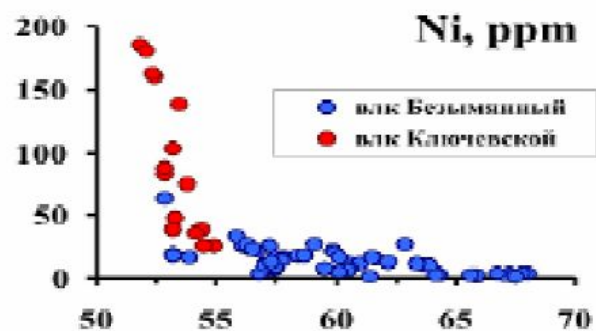
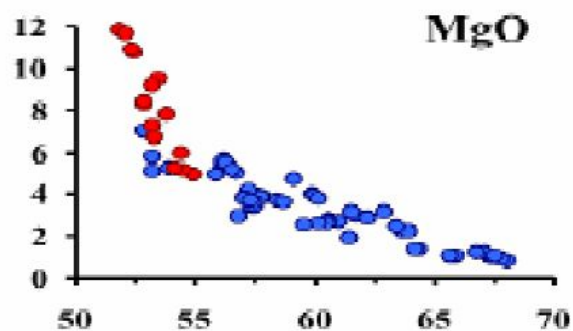
Вновь прослеживаются суб-линейные тренды содержаний оксидов

Подобные соотношения установлены в сотнях магматических комплексов Земли

Составы вулканических пород плато Эрзерум (северо-восточная Турция)

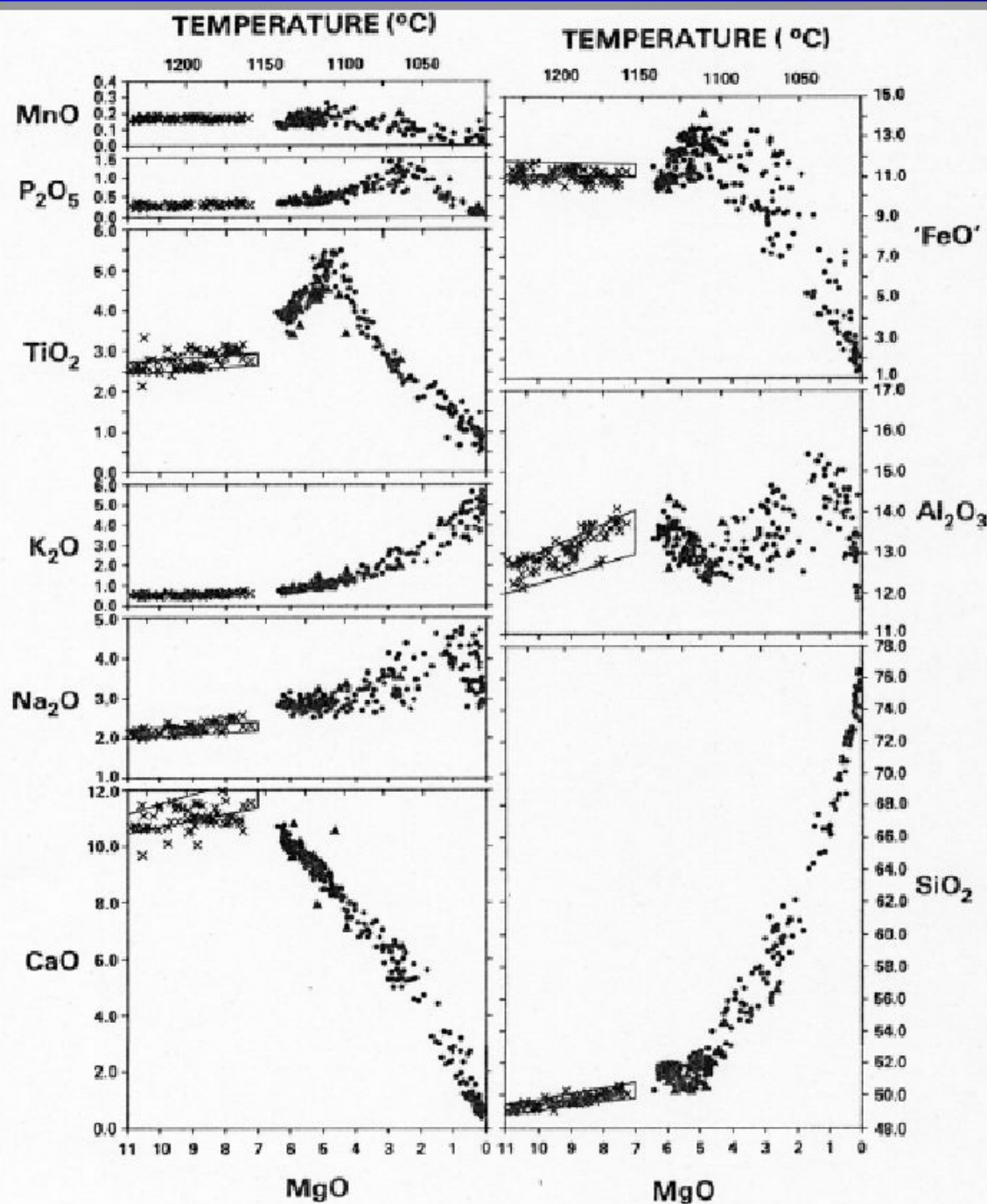


ЭВОЛЮЦИЯ ГЛАВНЫХ И
ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В
ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНОЙ СЕРИИ
ВУЛКАНОВ КЛЮЧЕВСКОЙ И
БЕЗЫМЯННЫЙ (Вост. Камчатка)



SiO₂

SiO₂



Графики зависимости составов пород от содержания MgO и температуры

Графики интересны тем, что сериальность пород проявляется не только в виде композиционных трендов, но также зависимости от температуры ликвидуса пород и стекол

Это подсказывает, что формирование сериальности каким-то образом связано с изменением температуры !

Составы базальтов и интерстициальных стекол из лавового озера на о. Гавайи

КЛАССИФИКАЦИИ МАГМАТИЧЕСКИХ СЕРИЙ

ПО ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ОБЪЕМАМ ДИФФЕРЕНЦИАТОВ

1. **Однородные** – представлены одним типом пород (напр., базальтами или андезитами)
2. **Непрерывные** – без разрыва составов на вариационных диаграммах (напр., базальт – андезит – дацитовые серии)
3. **Контрастные** – с явным разрывом составов на вариационных диаграммах (как правило бимодальные, напр., базальт – риолитовые серии)

ПО ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ С УЧЕТОМ

1. **Петрохимических характеристик** – соотношения щелочей и кремнезема, отношения FeO/MgO и т.д.
2. **Геохимических особенностей** – распределение РЗЭ, отношения La/Yb , Y и Zr и многие другие
3. **На основе петрохимических и геохимических характеристик** (наиболее достоверный подход в плане геодинамических реконструкций)

КЛАССИФИКАЦИЯ СЕРИЙ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД

(Петрографический комитет АН СССР, 1981)

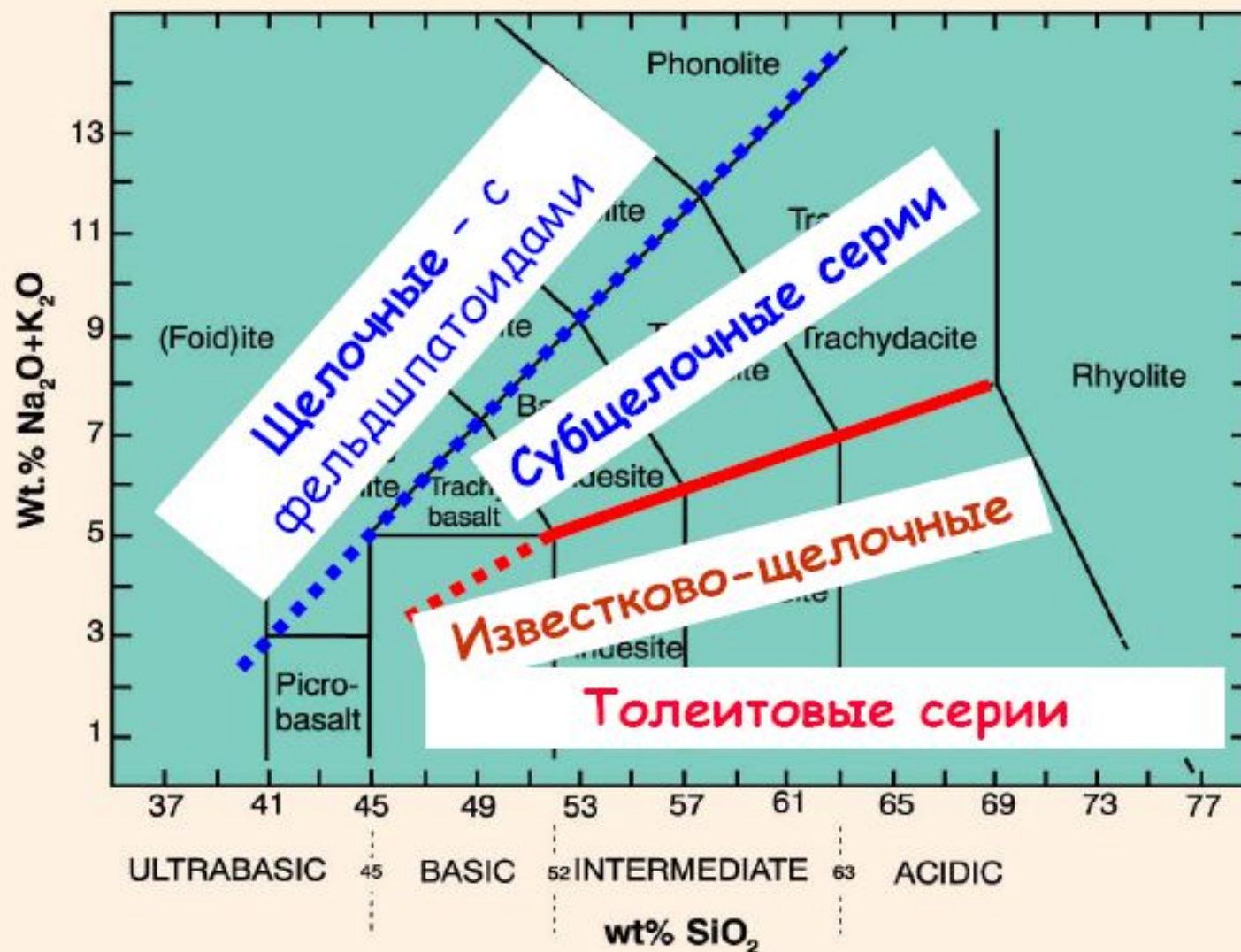


ДИАГРАММА ПИКОКА

По величине **индекса Пикок** (точке пересечения двух трендов) магматические серии можно разделить на:

Щелочные

$$\text{SiO}_2 < 51$$

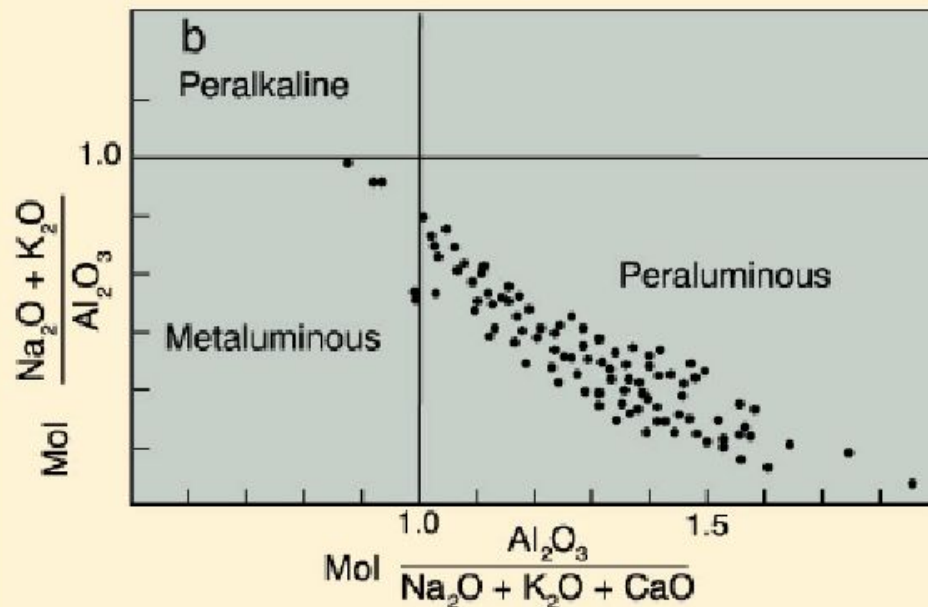
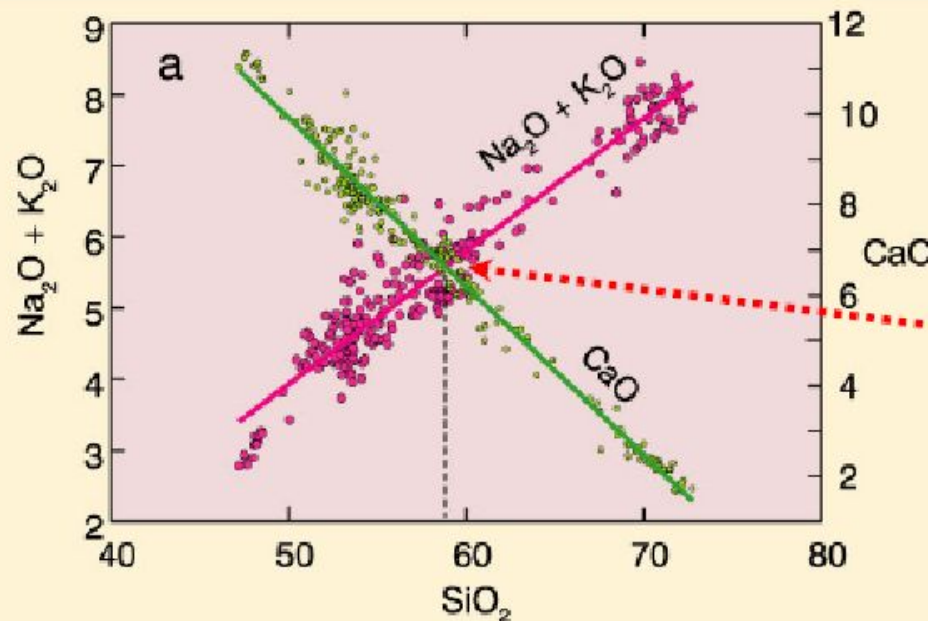
Щелочно-известковые

$$51 < \text{SiO}_2 < 56$$

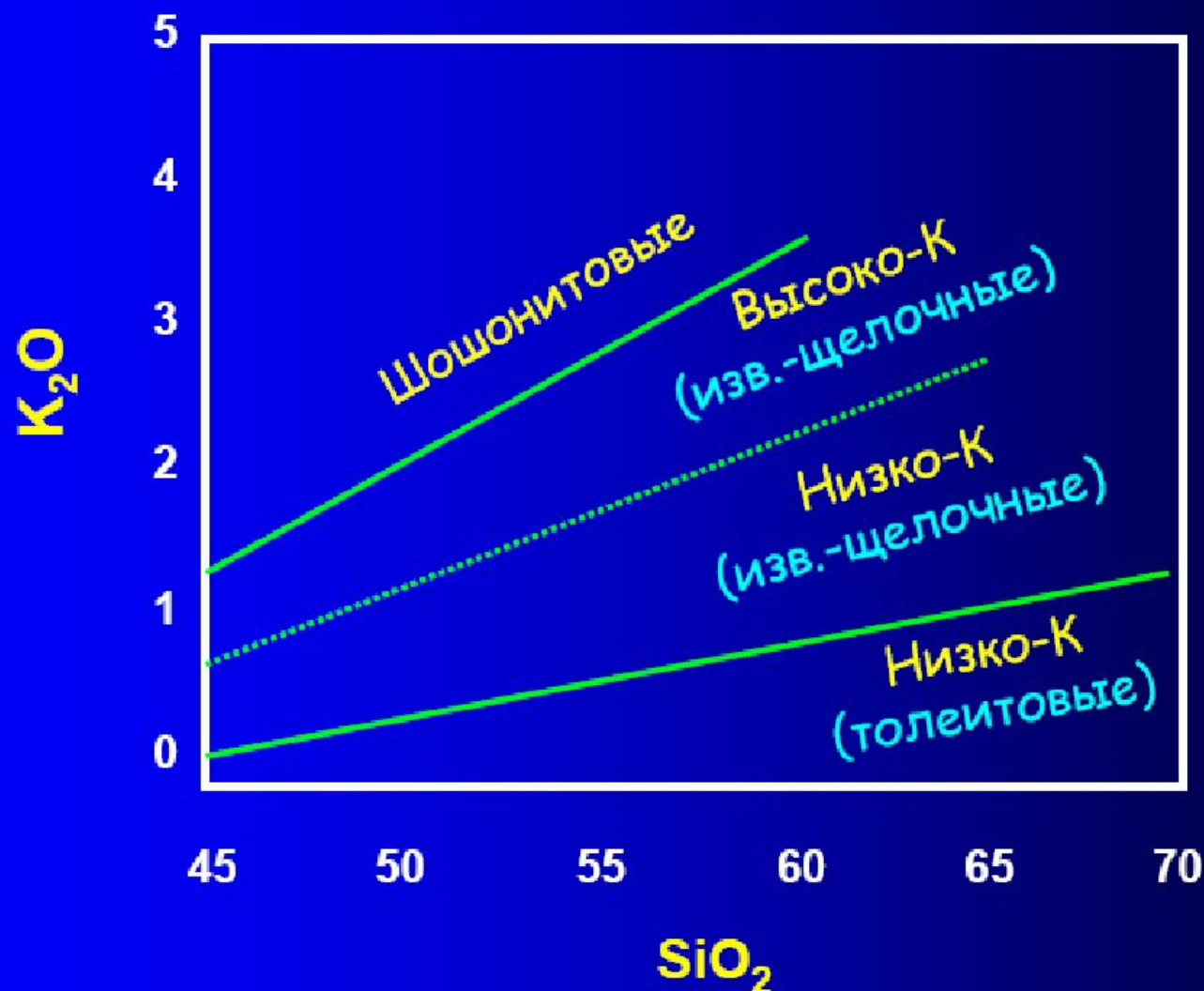
Известково-щелочные

$$56 < \text{SiO}_2 < 61$$

Известковые = толеитовые
 $\text{SiO}_2 > 61$

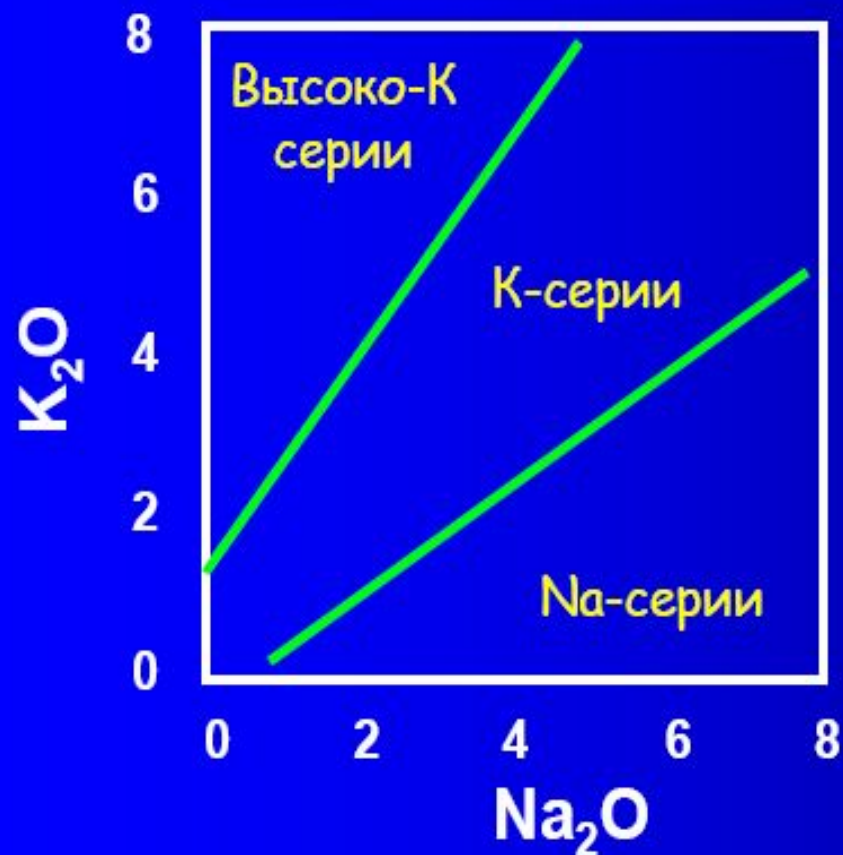


ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ДЕЛЕНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ СЕРИЙ ПО СОДЕРЖАНИЮ K_2O



РАЗДЕЛЕНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ СЕРИЙ ПО СООТНОШЕНИЮ K_2O И Na_2O

Зарубежные
специалисты



Российские
петрологи

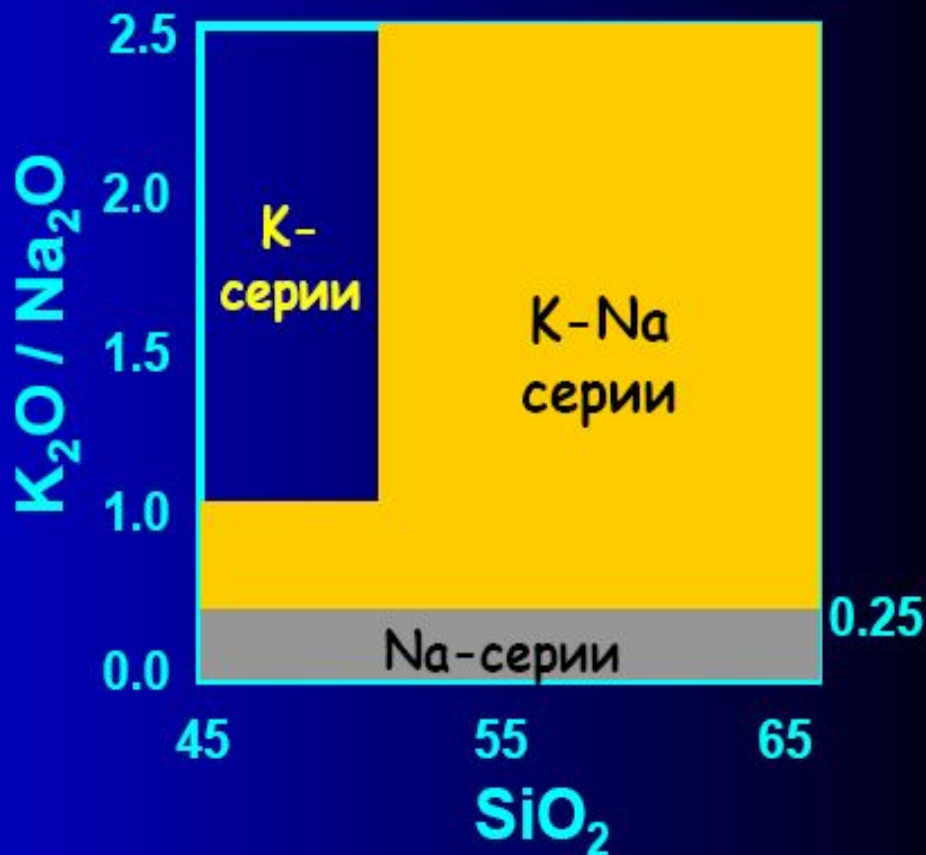


СХЕМА ПЕТРОХИМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ СЕРИЙ

Выборка составов пород

ЩЕЛОЧНЫЕ (с модальным FS)

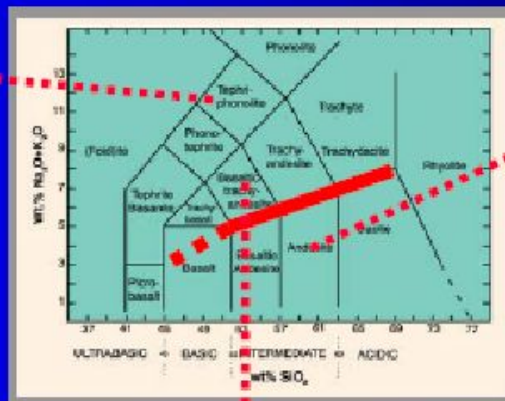
K₂O/Na₂O

SiO₂

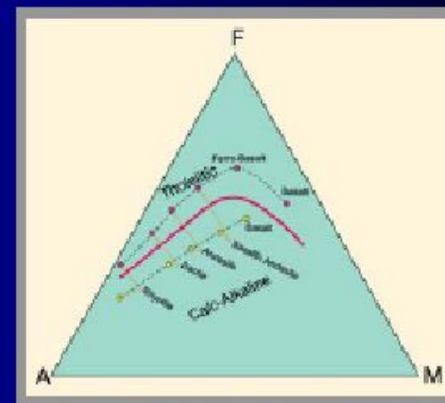
К-серии

К-Na-серии

Na-серији



НОРМАЛЬНОЙ ЩЕЛОЧНОСТИ



СУБЩЕЛОЧНЫЕ (без модального FS)

К-серии

К-Na-сери

Na-серији

Известково-щелочные

К-серии

К-Na-серии

На-серии

Толитовые

К-Na-серии

Na-серији