

Тема 12. Геохимия магматического процесса. Ч.1

Магматические породы классифицируются по глубине образования на:

- плутонические (интрузивные)
- вулканические (эффузивные)

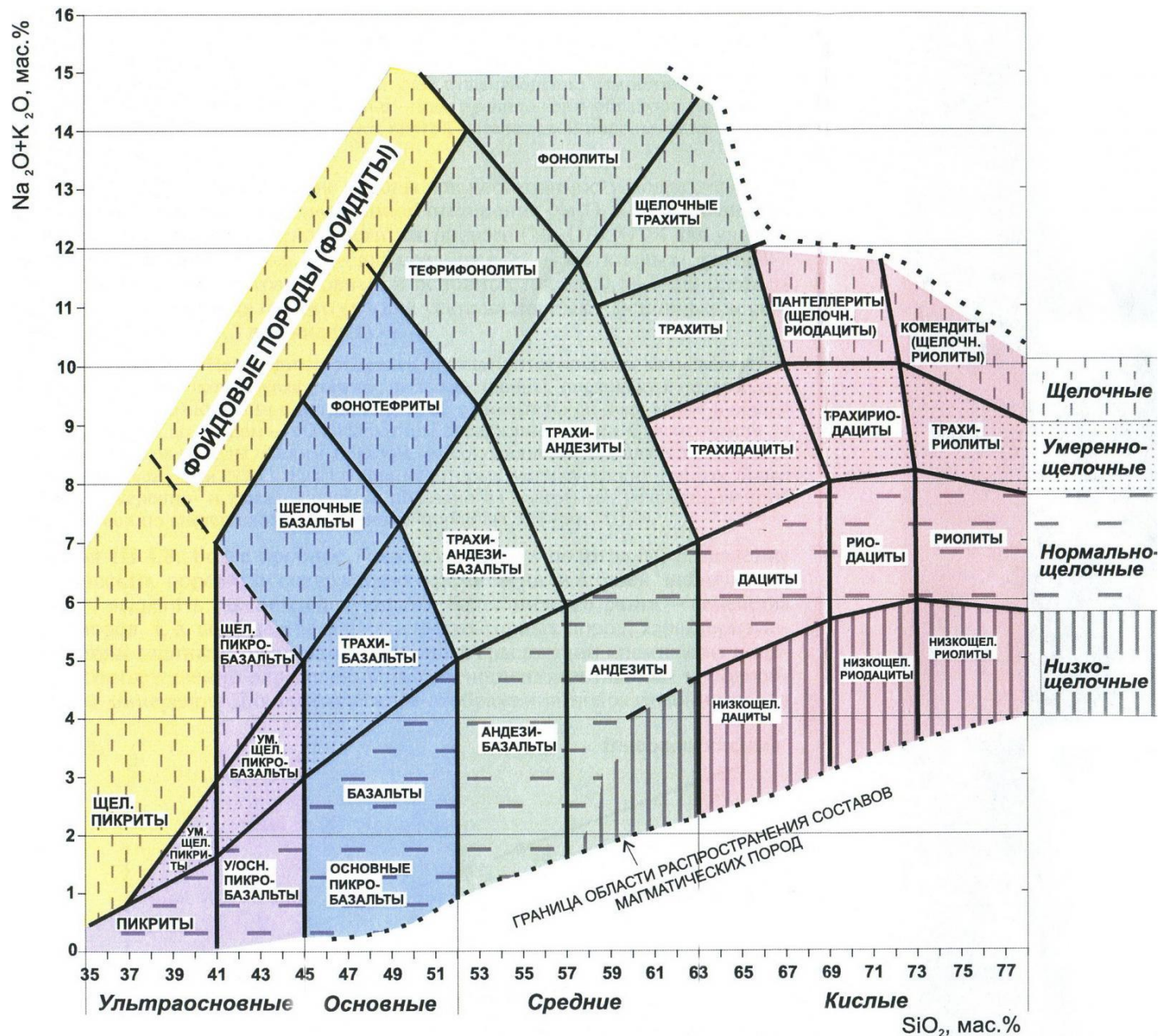
Выделяется также промежуточная группа – гипабиссальные породы, а в составе эффузивных - пирокластические.

По содержанию SiO_2 породы делятся на:

- ультраосновные ($< 45 \%$)
- основные ($45 - 52 \%$)
- средние ($52 - 63 \%$)
- кислые ($> 63 \%$)

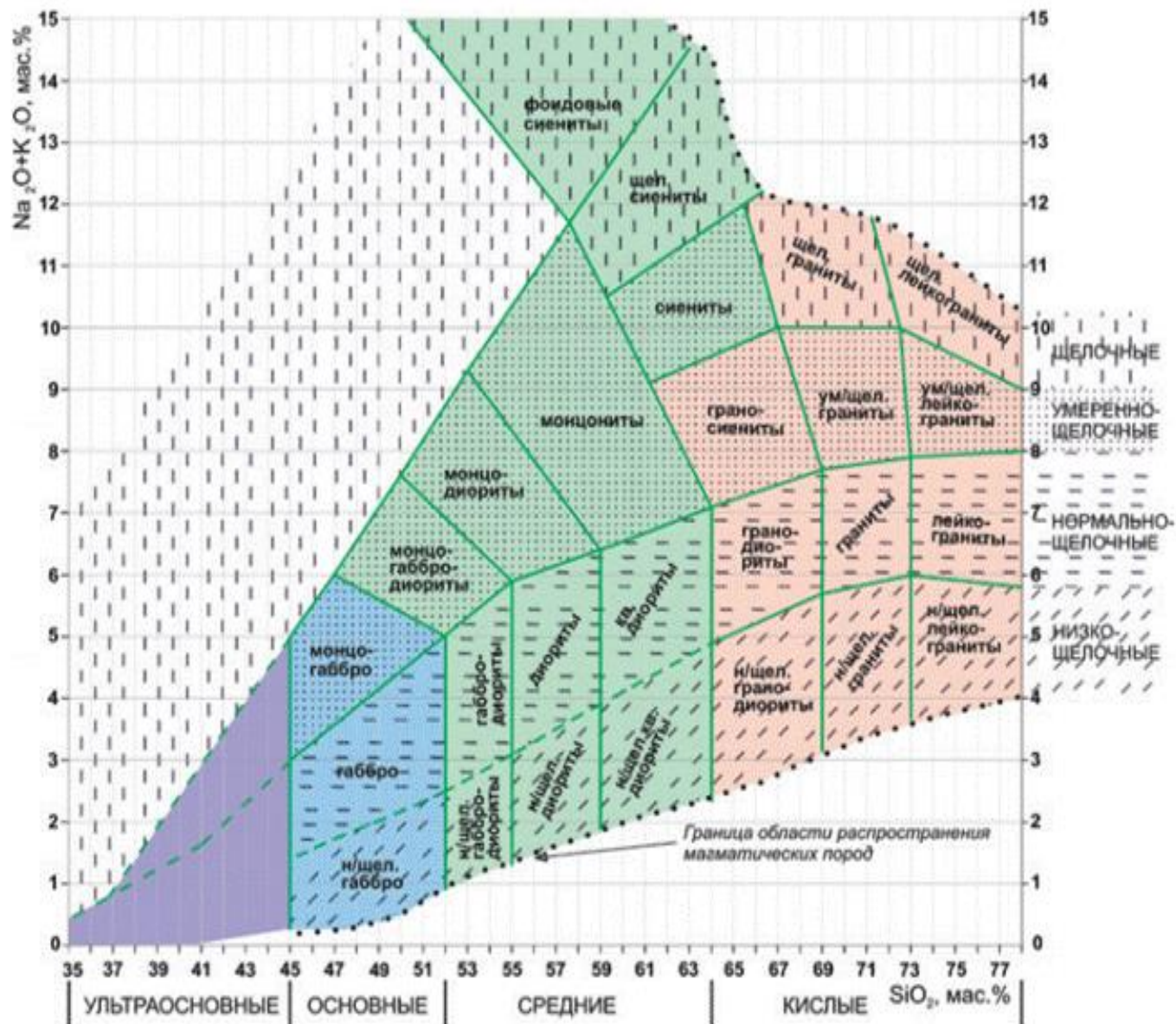
По содержанию щелочных элементов ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) породы делятся на:

- породы нормального ряда
- породы субщелочного ряда
- породы щелочного ряда



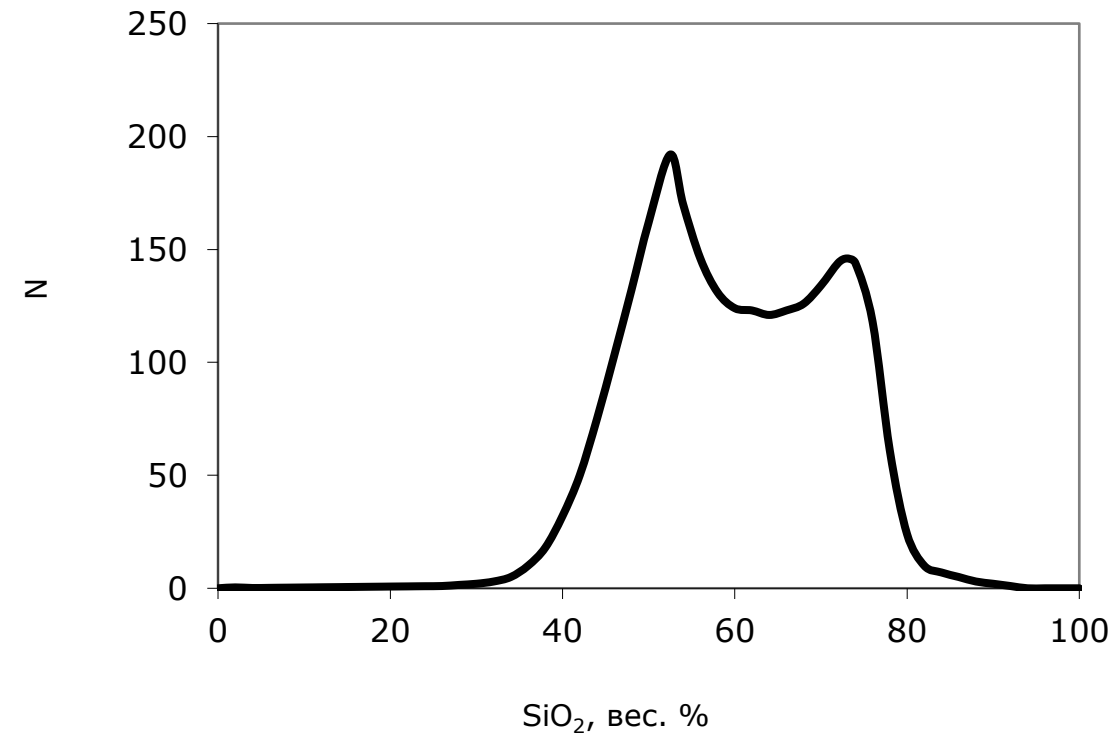
Классификация
эффузивных
магматических пород на
диаграмме TAS (total
alkalinity – silica)

Горизонтальными штрихами
выделены породы нормального
ряда, точками – субщелочного
ряда, вертикальными –
щелочного ряда.



Классификация
интрузивных
магматических пород на
диаграмме TAS (total
alkalinity – silica)

Горизонтальными штрихами
выделены породы нормального
ряда, точками – субщелочного
ряда, вертикальными –
щелочного ряда.



Распределение встречаемости магматических пород разного состава (Richardson, Sneeby, 1923).

Наибольшую распространенность в Земной коре имеют:
среди интрузивных пород – граниты, габбро, диориты;
среди эффузивных пород – базальты, риолиты, андезиты

Доли пород ультраосновного класса и щелочного ряда малы. По данным (Ронов и др., 1990) в земной коре ультраосновных пород <0.1%, пород субщелочного ряда около 3%, щелочного менее 0,1%.

Магматические формации

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 геодинамической обстановке; характеризуется определенным типом металлогении.

В зарубежной литературе примерным аналогом магматических формаций служат петрохимические серии.

Наиболее распространенные в Земной коре магматические формации:

- толеитовая
- гранодиорит-гранитовая
- андезит-базальт-долеритовая
- гранит-граносиенитовая
- трапповая
- расслоенных основных интрузий

Нет ни одной магматической формации (петрохимической серии), которая включала бы полный набор классов пород – от ультраосновных до кислых.

Фундаментальные задачи петрологии и геохимии – объяснить природу разнообразия магматических пород и формирования геохимических закономерностей, проявляющихся в их составе.

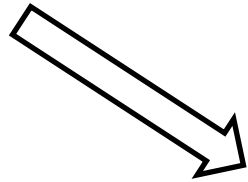
Два основных фактора:

- разные источники первичных магм и разнообразие составов этих магм в зависимости от механизмов и условий их генерации;
- магматическая дифференциация при затвердевании.

Принципиальные источники первичных магм

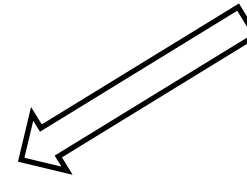
Верхняя мантия

ультраосновные и
основные расплавы



Нижняя кора

основные, средние и
кислые расплавы



Комбинированный источник

— контаминация мантийного
расплава коровым веществом,
основные и средние расплавы

Верхняя мантия и нижняя часть Земной коры имеют различающийся минеральный, химический и изотопный состав. Это позволяет по комплексу геохимических признаков надежно идентифицировать мантийные и коровые первичные магмы.

В пределах каждого источника вариации состава первичных магм определяются следующими факторами:

- вариациями состава пород источника (в мантии – деплетированная vs примитивная мантия, в нижней коре – амфиболиты vs гнейсы);
- температурой и давлением;
- степенью плавления;
- дополнительным поступлением флюидов (при дегазации в зонах субдукции) – добавление флюидов в магматическую систему существенно снижает температуру плавления.

Температуры и давления образования и кристаллизации магматических расплавов.

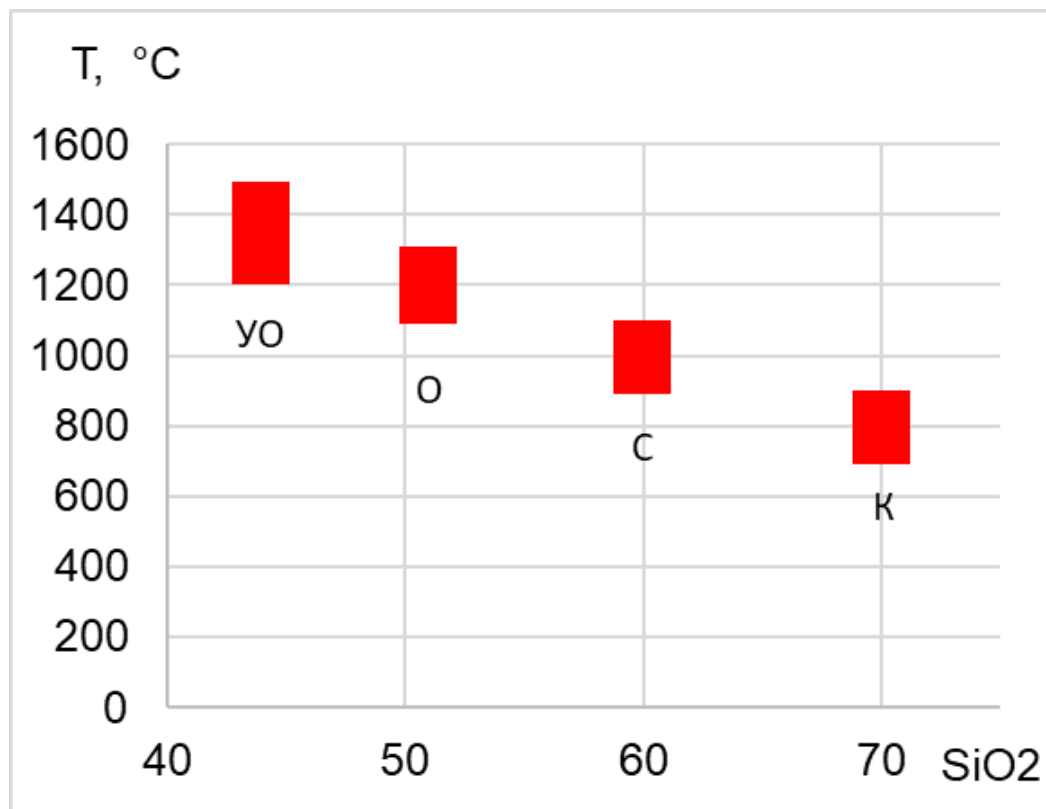
Магмы формируются в верхней мантии и нижней части земной коры на глубинах от 200-250 до 10-15 км. Т-Р-условия зарождения магм варьируют от 1600-1800°C/5-8 ГПа до 500-600°C/0,25-0,5 ГПа, в зависимости от глубины и состава источника.

Магмы возникают за счет плавления ранее существовавших пород, причем полное их плавление происходит редко (это требовало бы очень высоких температур).

В условиях верхней мантии плавление происходит в основном за счет снижения давления при подъеме вещества мантии, в нижней коре – за счет разогрева вещества. В обоих источниках на плавление сильно влияет содержание (добавка?) летучих компонентов, в первую очередь – H_2O .

Кристаллизация магматических расплавов почти во всех случаях – следствие их охлаждения. При этом разные минералы начинают кристаллизоваться в разное время, в зависимости от их свойств и состава магматического расплава. Разновременность образования минералов ведет к изменению состава остаточного расплава и имеет следствием ***магматическую дифференциацию***.

Температуры кристаллизации и состав магматических расплавов.



Примерные интервалы температур кристаллизации магм разного состава. УО – ультраосновные, О – основные, С – средние, К – кислые.

Между температурным интервалом кристаллизации и составом магм – содержанием SiO_2 – существует сильная корреляция. Чем больше кремнезема в магматическом расплаве, тем ниже оказывается температура его кристаллизации.

Это позволяет использовать во многих случаях содержание SiO_2 как индикатор магматической дифференциации (поскольку состав породы определить проще, чем реконструировать температуру ее образования). Диаграмма в координатах SiO_2 – петрогенные окислы (в мас.%) предложена А.Харкером для описания эволюции магматических серий. Такой подход не является строгим, поскольку плавление и кристаллизация сильно зависят от состава системы, в особенности – от присутствия в расплаве воды.

Понижение температуры и рост содержаний сильно увеличивают **вязкость** магматических расплавов.

Контаминация (смешение) вещества мантийной и коровой природы.

- Наиболее масштабное проявление контаминации наблюдается в зонах субдукции, когда нагрев поддвигающейся плиты приводит к дегидратации ее осадочного слоя; выделяющиеся летучие поступают в надвигающуюся плиту вызывают плавление пород верхней мантии и нижней коры. Это вызывает смешение вещества геохимически различных источников.
- Установлены случаи сильного взаимодействия мантийных магматических расплавов с коровым веществом пород, окружающим подводящие каналы и промежуточные магматические камеры (например, обогащение осадочной серой расплавов, образовавших рудоносные интрузии Норильского района).

Контаминация вещества доказывается изотопно-геохимическими методами.

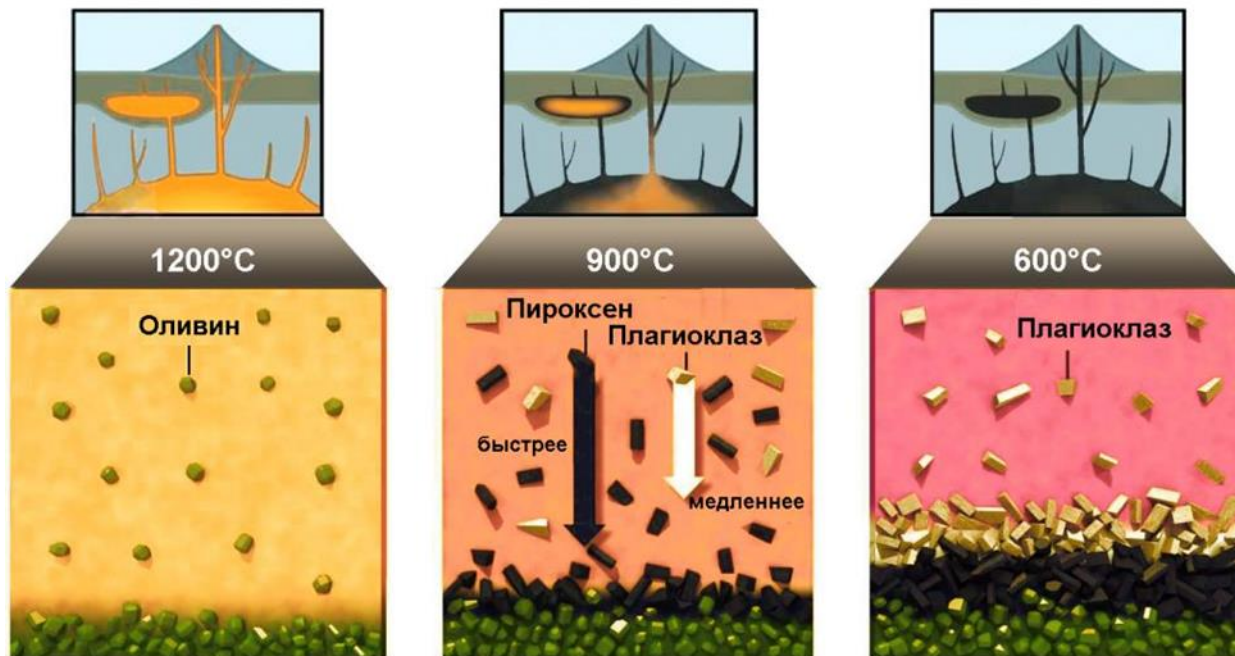
Механизмы магматической дифференциации:

- гравитационная кристаллизационная дифференциация
- ликвация
- флюидная дифференциация

Гравитационная кристаллизационная дифференциация

Сущность этого процесса – появляющиеся при охлаждении магмы кристаллы из-за большей плотности относительно расплава погружаются на дно магматической камеры. При разной температуре выделения кристаллов разных минералов это приводит к накоплению слоев разного минерального состава, дающих после застывания камеры разные породы.

Поскольку порядок кристаллизации минералов определяется составом расплава, последовательность слоев горных пород закономерна. Она может нарушаться конвективным движением расплава в камере, внешними воздействиями (внедрениями дополнительных порций магмы в камеру, и др.



Схема, объясняющая накопление последовательных слоев оливинита, перидотита, габбро и т.д. в расслоенной интрузии.



Пример проявления
расслоенности
интрузивных пород.
Бушвельдский
комплекс, Ю.Африка

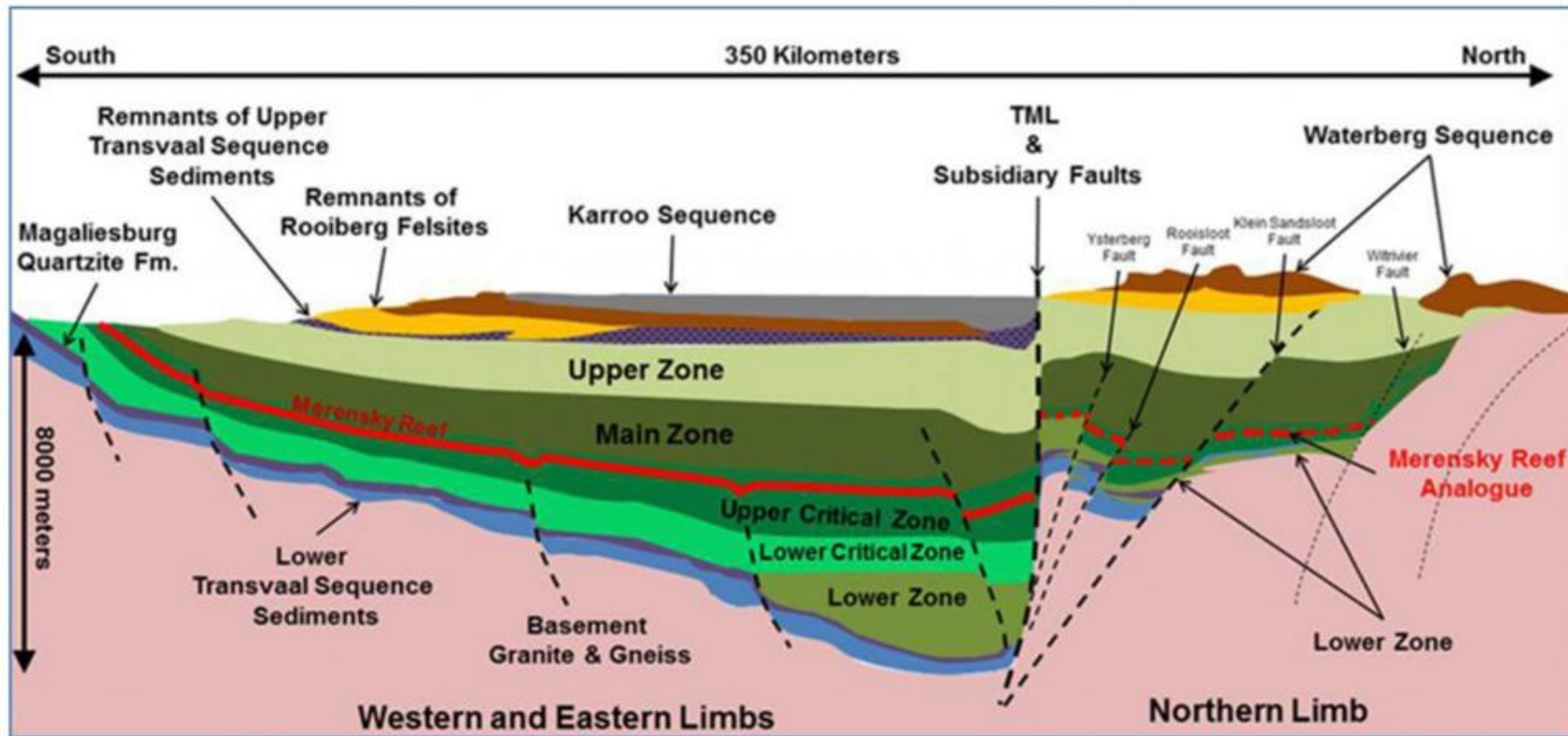
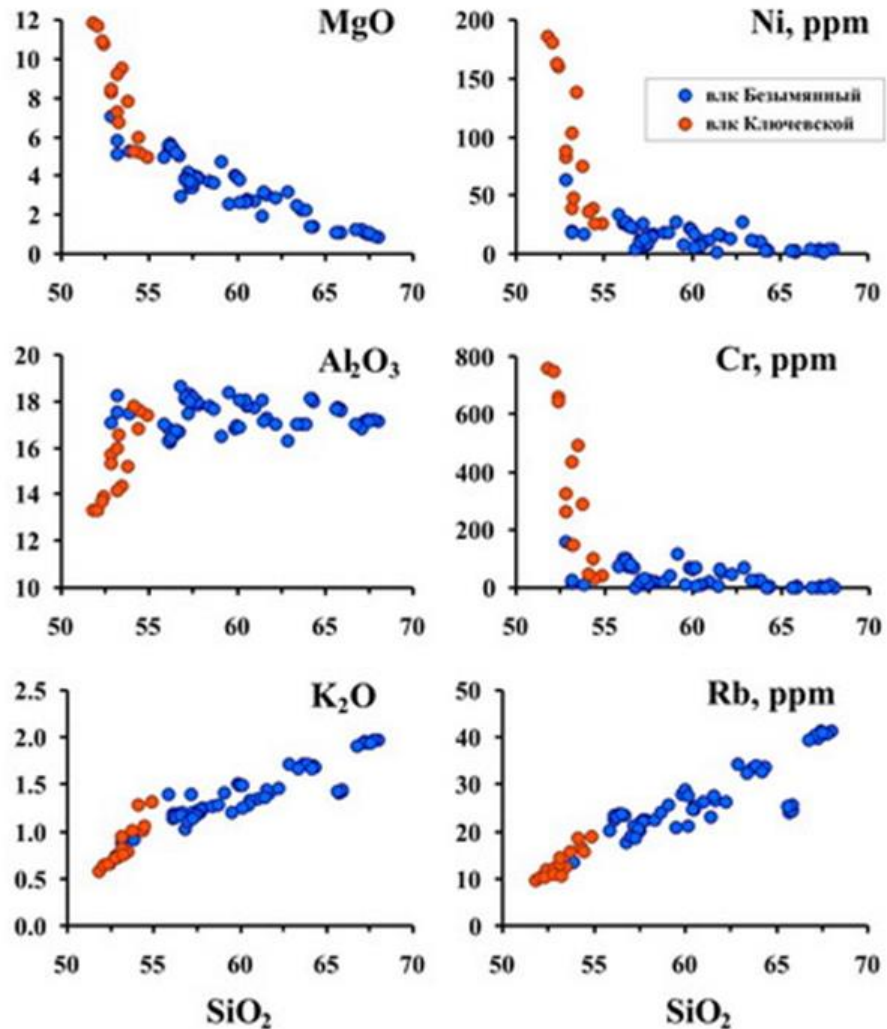


Figure courtesy Ivanhoe, 2012; modified after Kruger, 2005. Figure is schematic and not to scale. Section line illustrated is shown on Figure 7.1.

Схематический разрез расслоенного Бушвельдского комплекса. Красной линией показан «Риф Меренского» – самая богатая рудоносная зона комплекса (пласт с промышленными содержаниями платиноидов и хромита).

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



Отражение эволюции расплава в
промежуточной камере вулкана в составе
излившихся пород. (По А.А.Арискину)

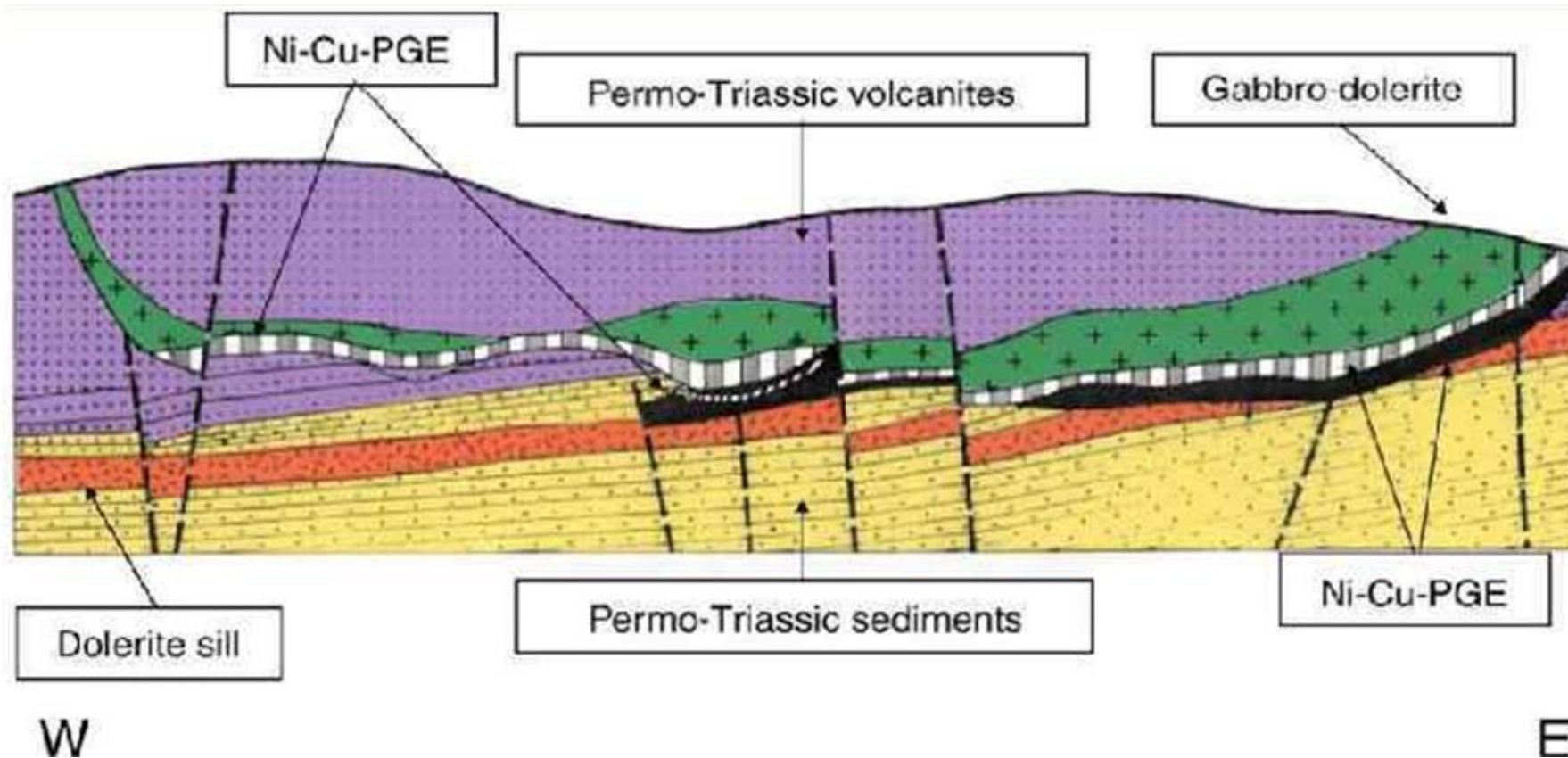
Ликвация

Ликвация – явление несмешиваемости в жидком состоянии. В геологии – это разделение расплава на две несмешивающихся жидкости.

Наиболее распространенная и хорошо изученная ликвация сульфидного расплава в силикатной магме. Этот процесс может приводить к образованию рудных месторождений (пример – Cu-Ni руды Норильска). Доказано развитие ликвации в магматических карбонатитах (силикатный расплав в карбонатной матрице).

Признаки ликвации зафиксированы для соединений Cr, P, Sn, однако роль этих эффектов в природе неясна.

Акад. А.А.Маракушев и его ученики считают возможной ликвацию двух силикатных расплавов разного состава. Достоверных доказательств такого процесса в природе не получено.



Схематический разрез рудоносного габбро-долеритового силла. Норильский рудный район. Ликвационное рудное тело образует донную залежь в силле.

Флюидная дифференциация

На поздних стадиях кристаллизации, богатые летучими расплавы могут отделить флюидную фазу, богатую H_2O , CO_2 , Cl, F и S, которая способна накапливать в себе щелочные и редкие элементы. Примером такого накопления являются **пегматиты** (камерные и жильные).

В вулканическом процессе отделение флюидной фазы от расплава в промежуточном очаге и магматическом канале существенно влияет на характер извержений (эксплозивный) и состав кристаллизующегося вещества.

Геохимические ассоциации элементов

При магматической дифференциации элементы разделяются на группы со сходным поведением – геохимические ассоциации.

Типичные примеры:

- элементы темноцветных породообразующих минералов – Mg-Fe-Ni-Co-Mn-Zn-...;
- элементы лейкократовых гранитов – Si-K-Na-Li-Rb-Cs-Ba-F-PЗЭ-Zr-Nb-Ta-U-Th...;
- элементы железо-сульфидной ликвации – S-Fe-Cu-Ni-Co-As-Se-Ag-Au-...

Некогерентные (несовместимые) элементы

– элементы, не способные входить изоморфно в породообразующие минералы, и поэтому накапливающиеся в магматическом расплаве.

Причины несовместимости – слишком большой (K, Ba, PЗЭ) или слишком маленький радиус иона (Be), высокий заряд иона (Zr, Nb, Ta, ...).

Показателями несовместимости могут служить K_d – коэффициенты распределения порода/расплав: $K_d = C_{\text{ТВ}}/C_{\text{расп}}$. Для некогерентных элементов $K_d \ll 1$.

Для верхней мантии некогерентные элементы – K, Rb, Ba, Sr, Pb, PЗЭ, Zr, Nb, Ta, Th, U.

Степень совместимости/несовместимости непостоянна – она зависит от состава системы. В щелочных породах в сравнении с породами нормального ряда – другие породообразующие минералы, и некоторые элементы (например, Ti) меняют свое поведение.

