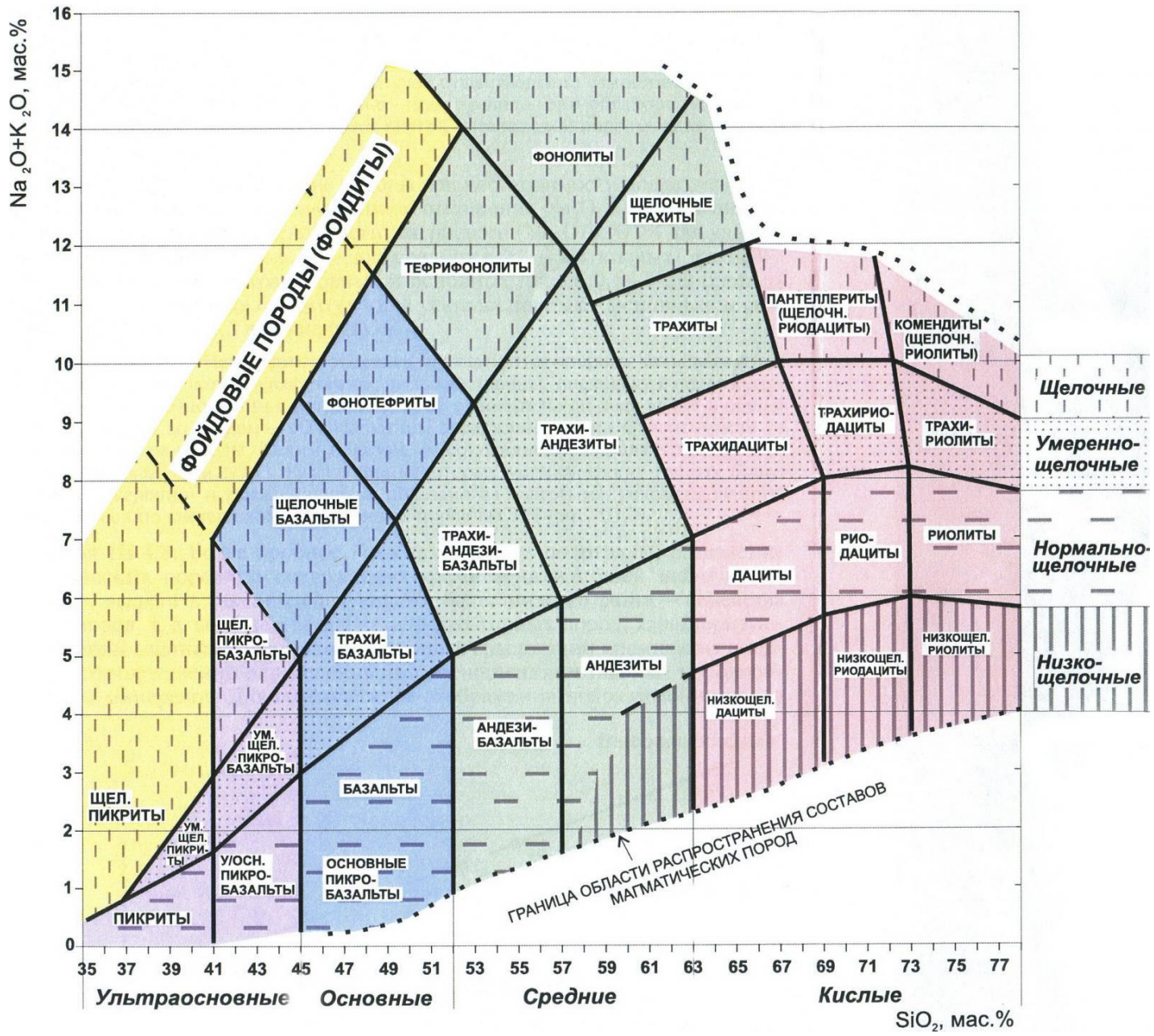
Тема 14. Геохимия магматического процесса, часть 1.

Магматические породы классифицируются по глубине образования на:
- плутонические (интрузивные)
- вулканические (эффузивные)

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

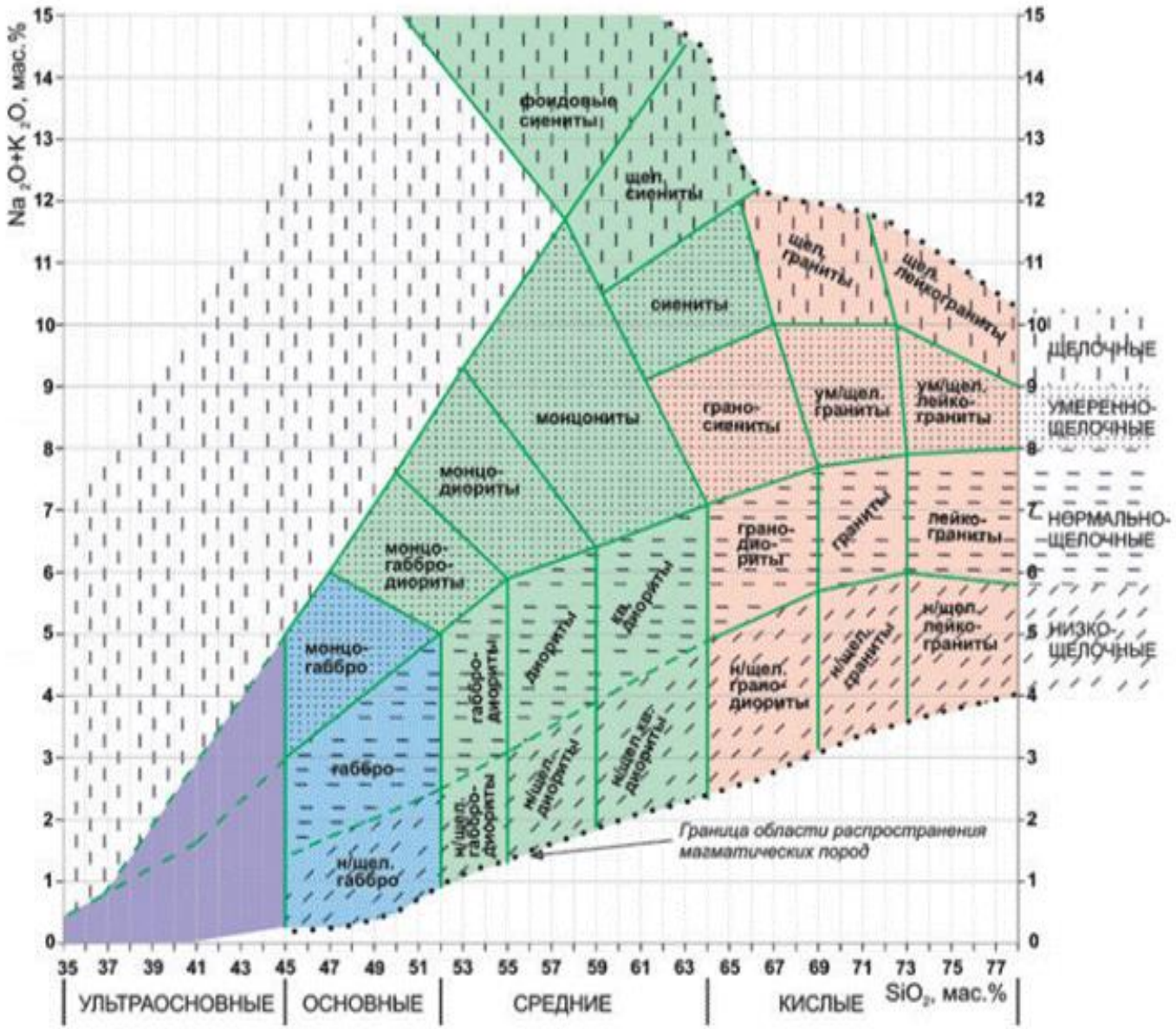
По содержанию SiO_2 породы делятся на:
- ультраосновные (< 45 %)
- основные (45 – 52 %)
- средние (52 – 63 %)
- кислые (> 63 %)

По содержанию щелочных элементов ($Na_2O + K_2O$) породы делятся на:
- породы нормального ряда
- породы субщелочного ряда
- породы щелочного ряда



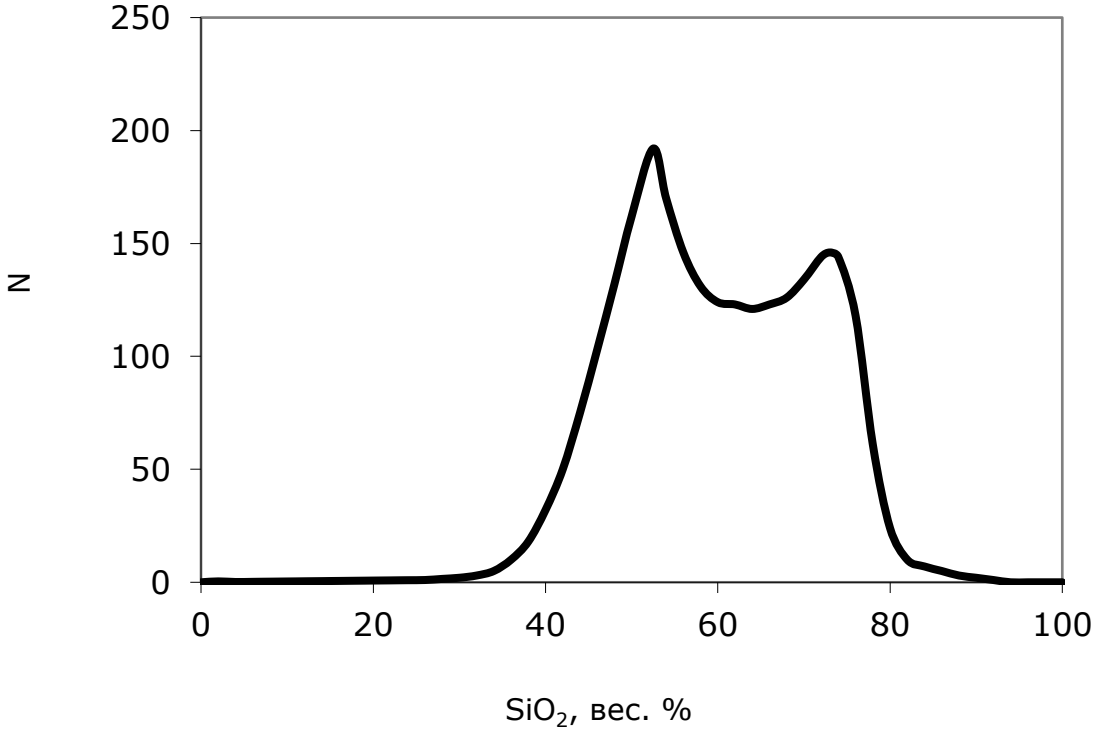
Классификация эффузивных магматических пород на диаграмме TAS (total alkalinity – silica)

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, Sneesby, 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:

- 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; мантийных (?)); добавление флюидов в магматическую систему существенно снижает температуру плавления.

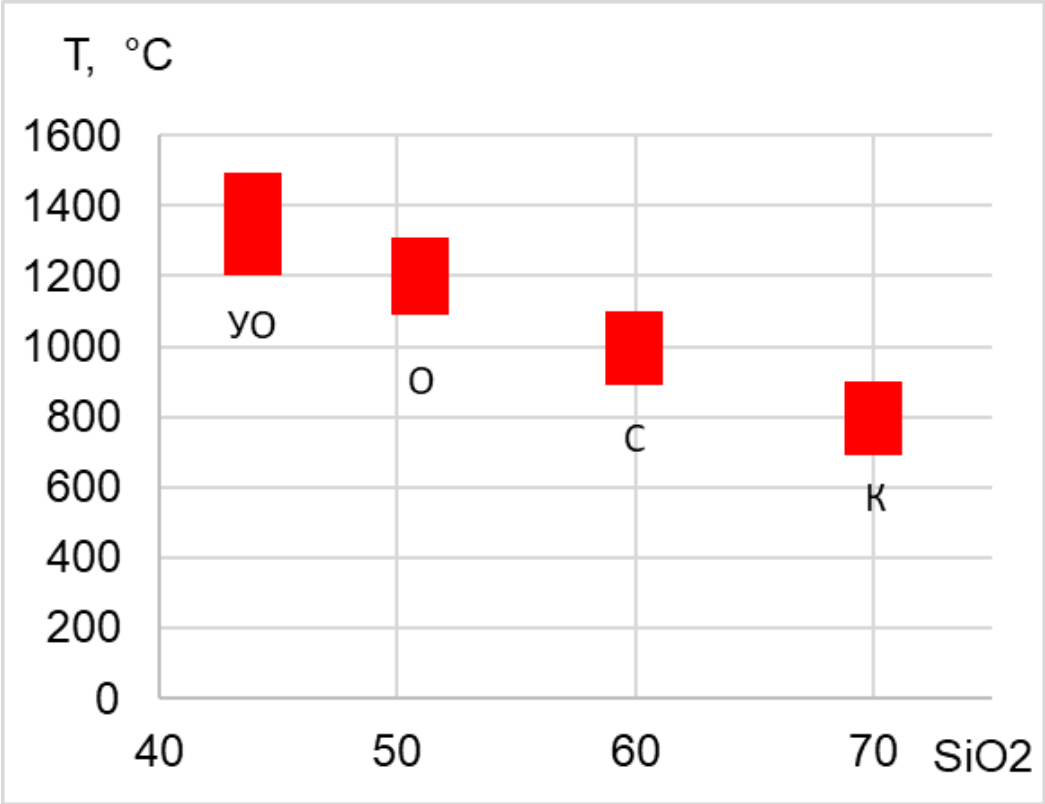
Температуры и давления образования и кристаллизации магматических расплавов.

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°С/5-8 ГПа до 500-600°С/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 ниже температура кристаллизующегося природного магматического расплава, тем больше в нем оказывается кремнезема.

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 пододвигающейся 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 доказана изотопно-геохимическими методами.

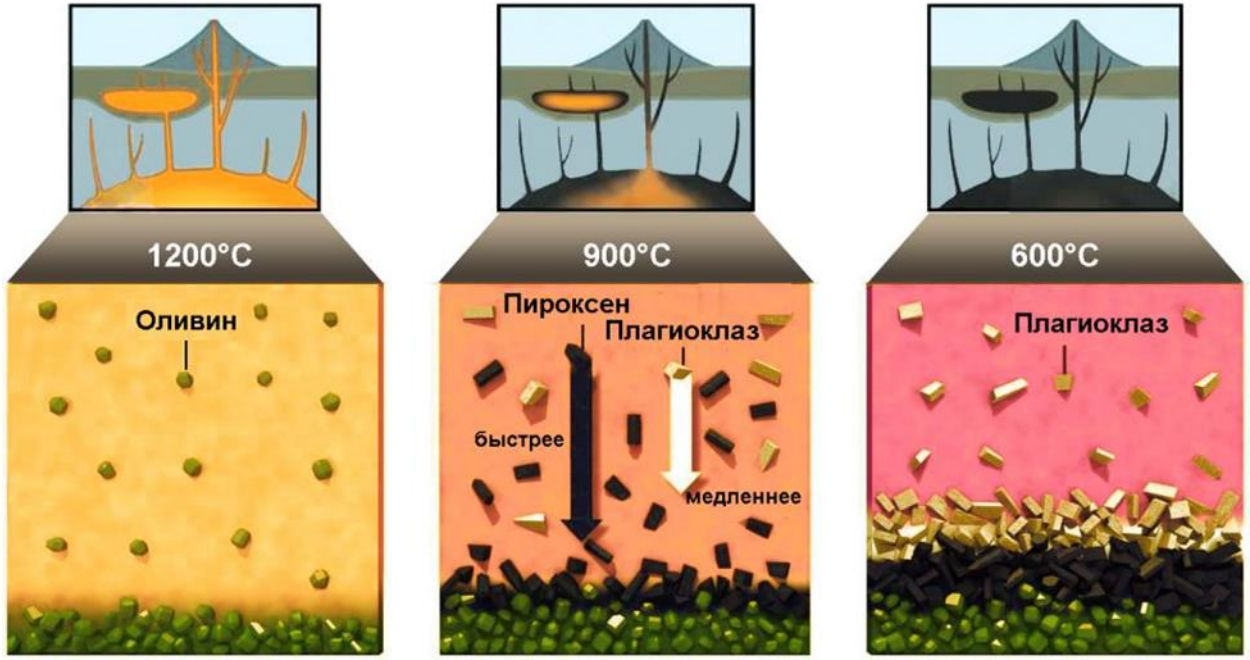
Механизмы магматической дифференциации:

- 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

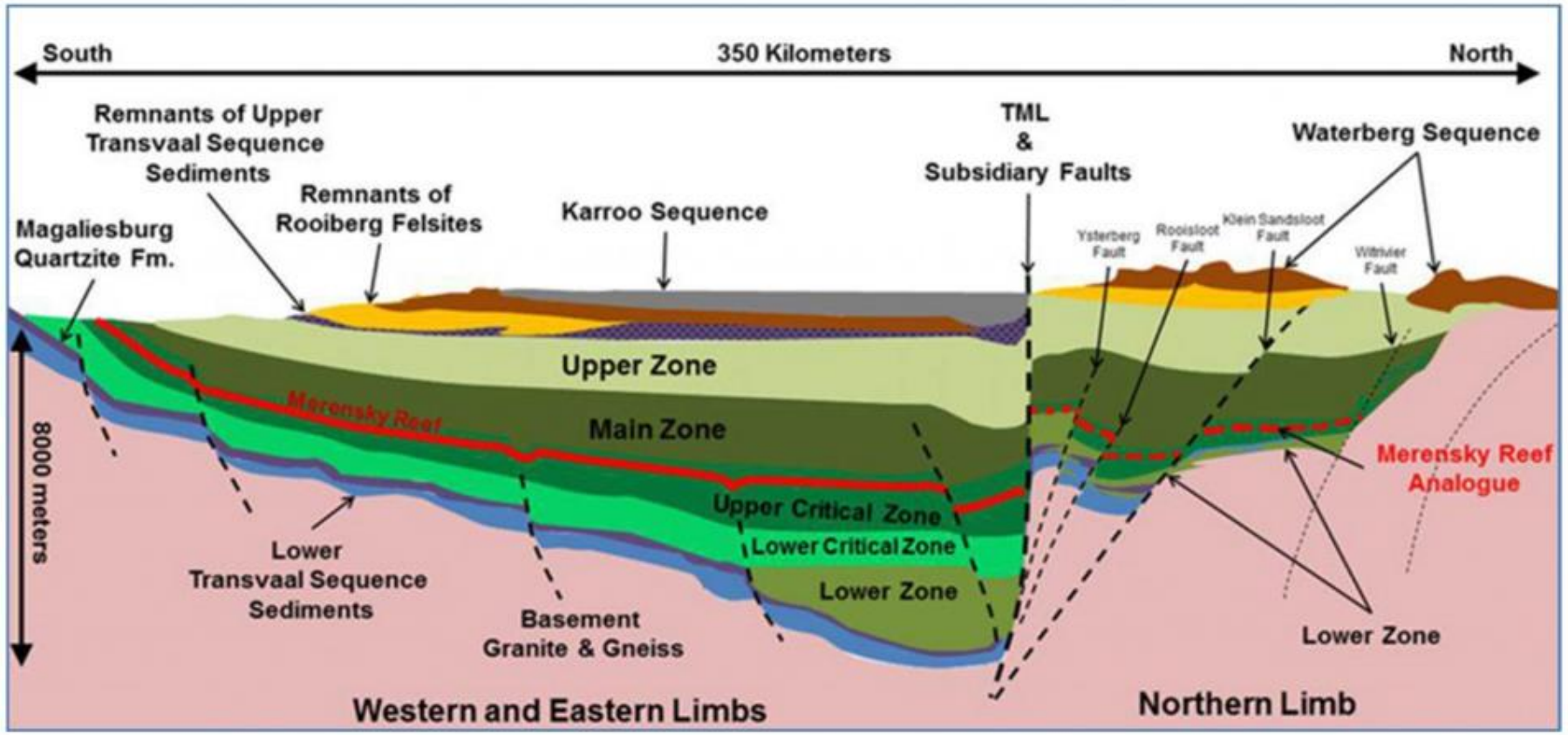
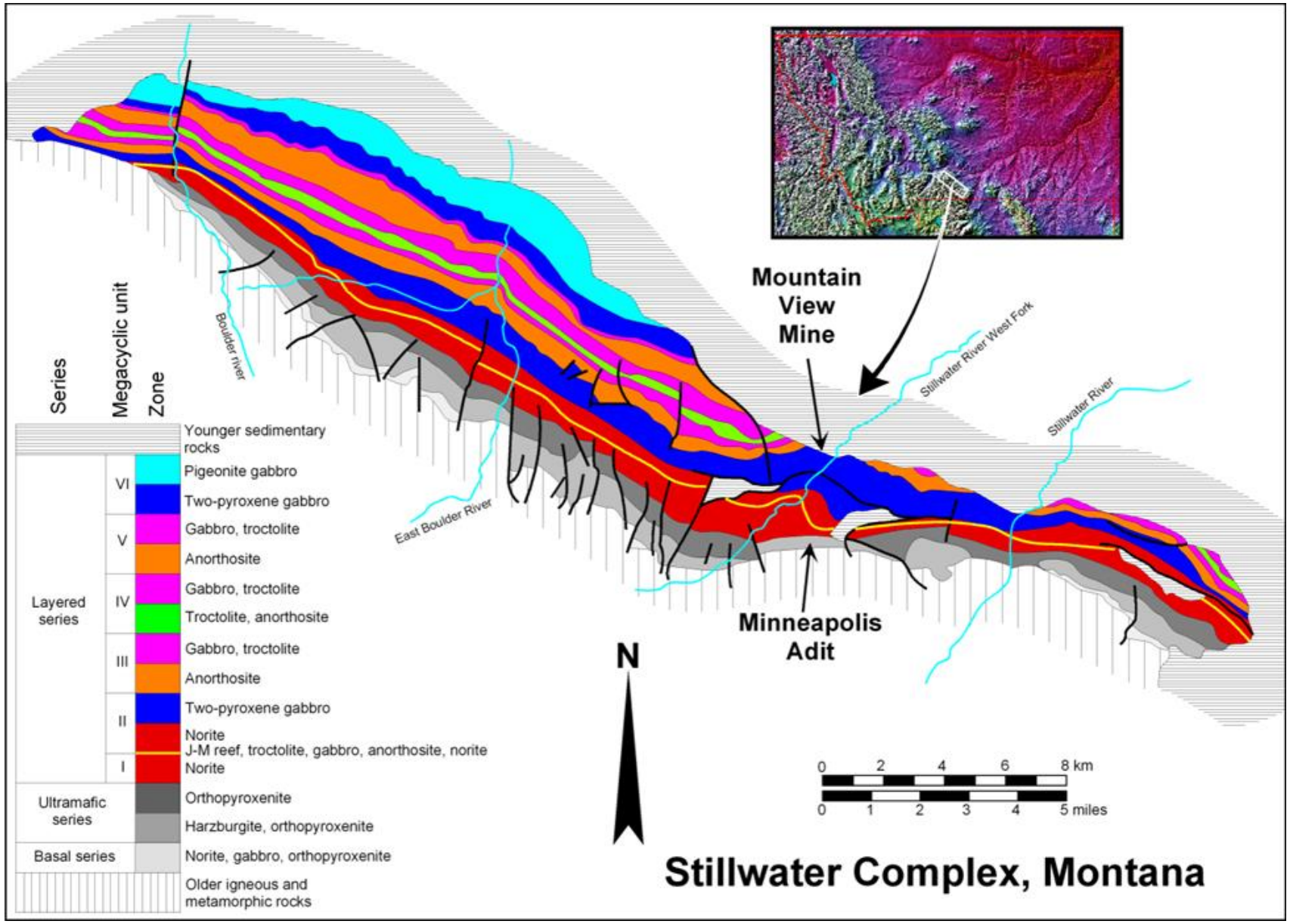


Figure courtesy Ivanhoe, 2012; modified after Kruger, 2005. Figure is schematic and not to scale. Section line illustrated is shown on Figure 7.1.

Схематический разрез расслоенного Бушвельдского комплекса.

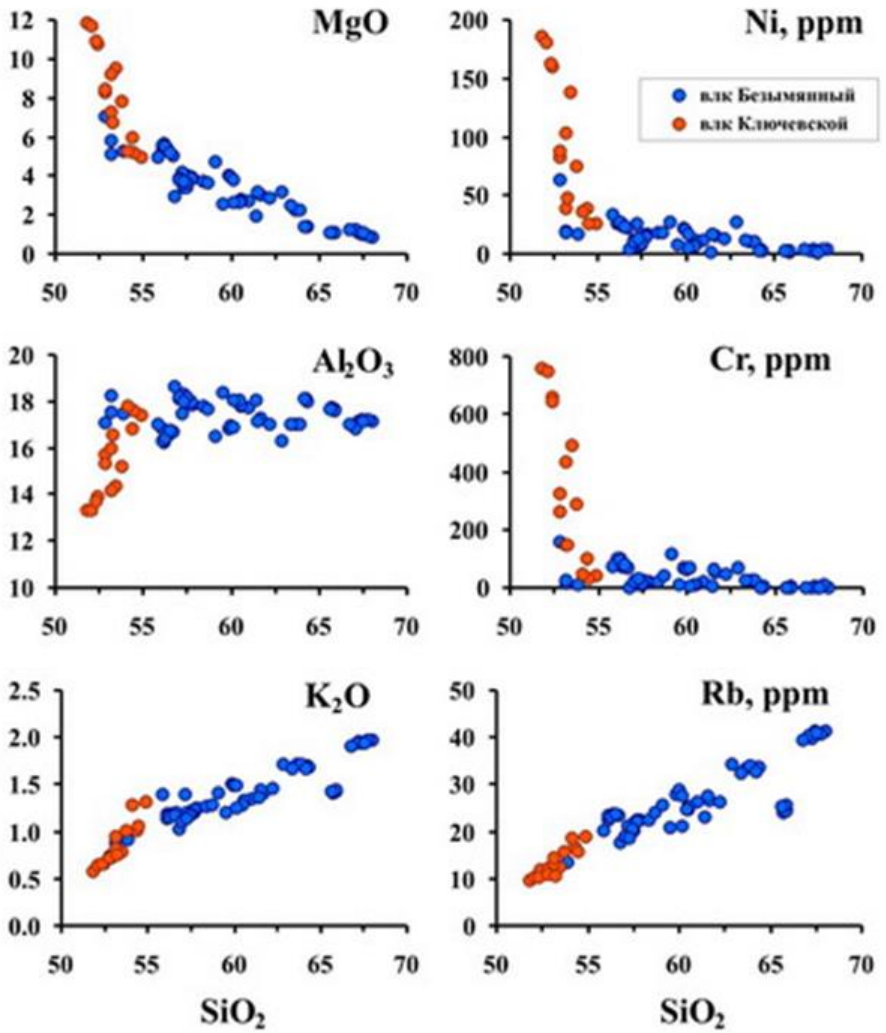
Красной линией показан «Риф Меренского» – самая богатая рудоносная зона комплекса.



Геологическая карта платиноносного расслоенного интрузива Стилуотер (США).

На врезке хорошо видно ритмичное строение интрузива с повторением слоев габброидов и анортозитов. Платиноносный горизонт показан желтой линией.

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



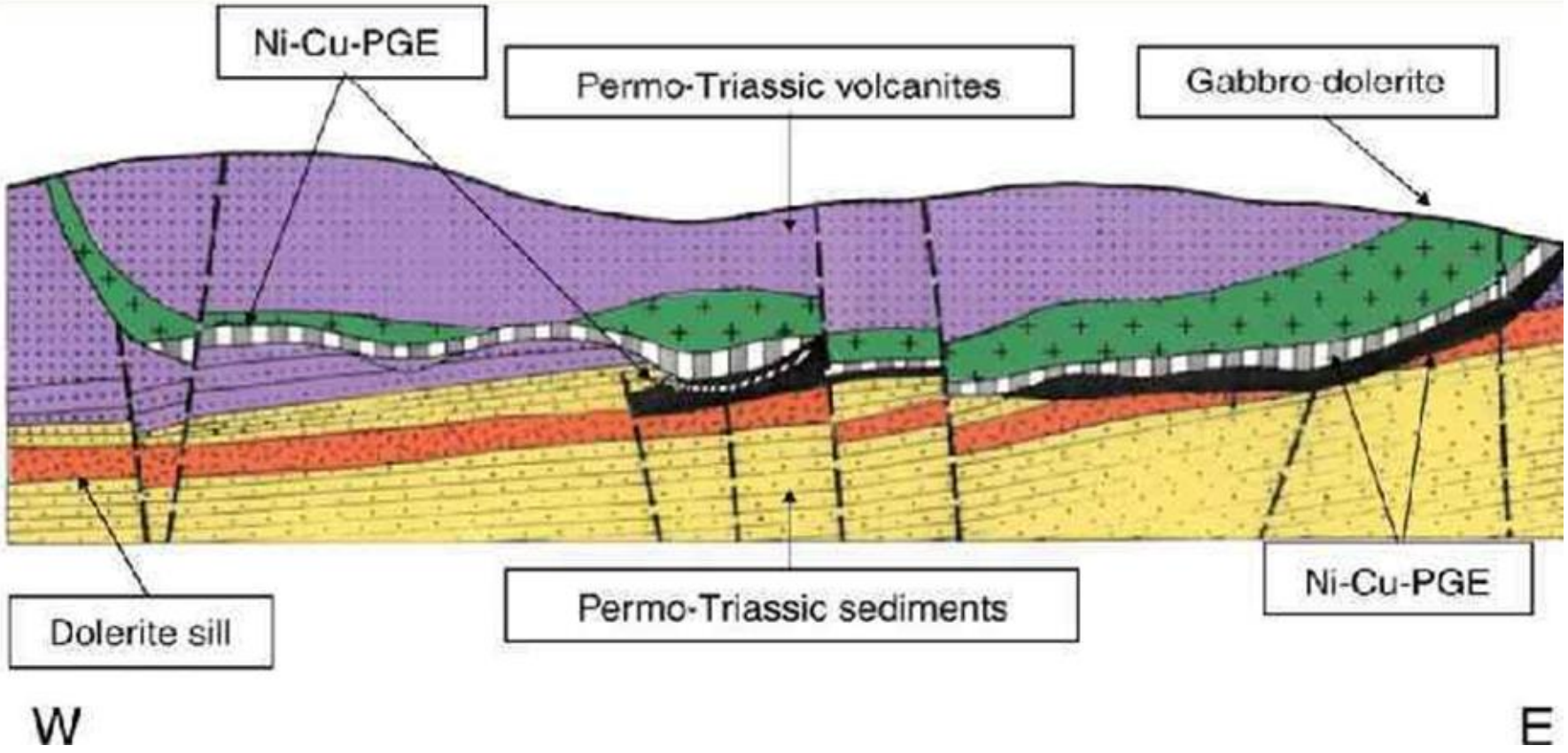
Отражение эволюции расплава в промежуточной камере вулкана в составе излившихся пород. (По А.А.Арискину)

Ликвация – явление несмесимости в жидком состоянии.
В геологии – 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 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-Na-K-Li-Rb-Cs-Ba-РЗЭ-Zr-Nb-Ta-F-…;

– элементы железо-сульфидной ликвации – S-Fe-Cu-Ni-Co-As-Se-Te-Au-…

Некогерентные (несовместимые) элементы

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

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

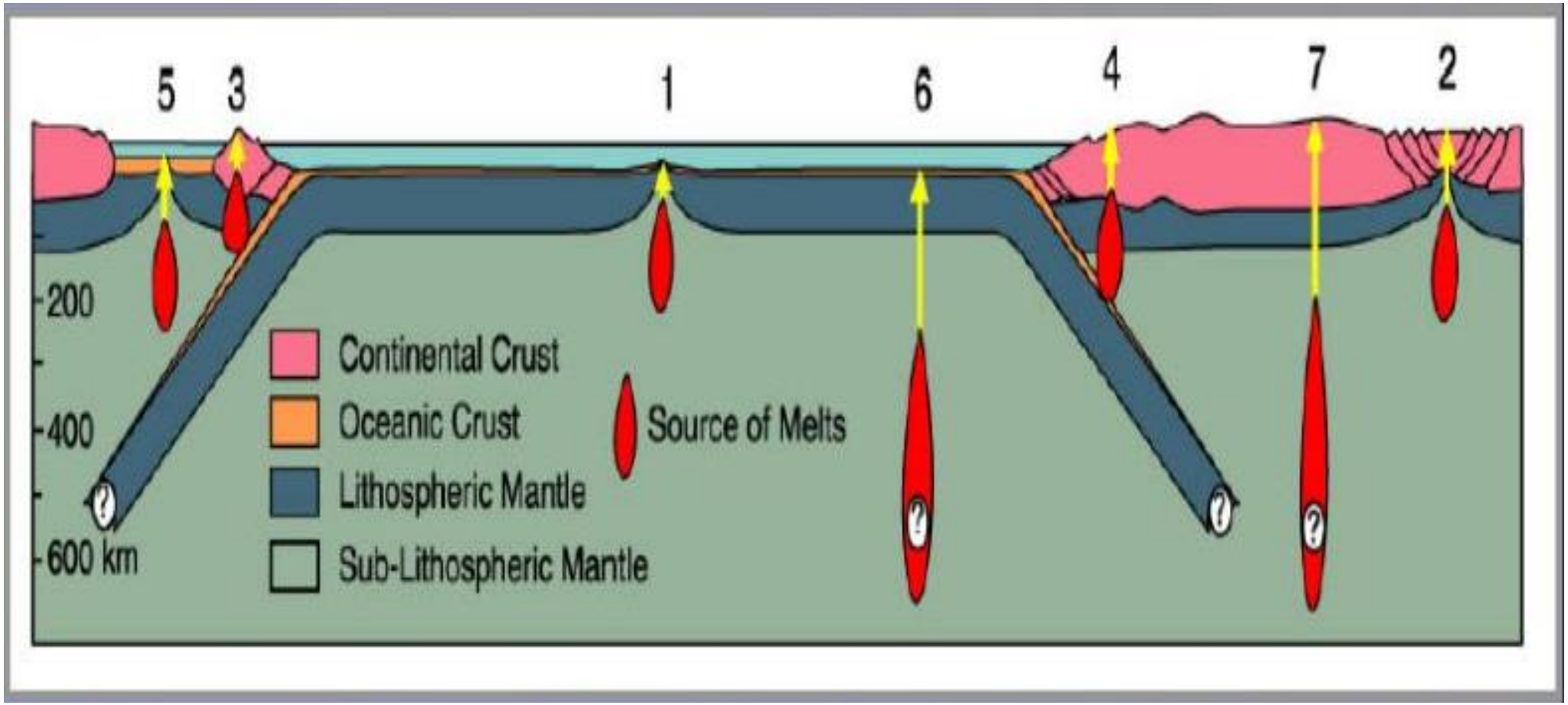
Показателями несовместимости могут служить K_d – коэффициенты распределения порода/расплав: $K_d = C_{тв}/C_{расп}$. Для некогерентных элементов K_d <<1.

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

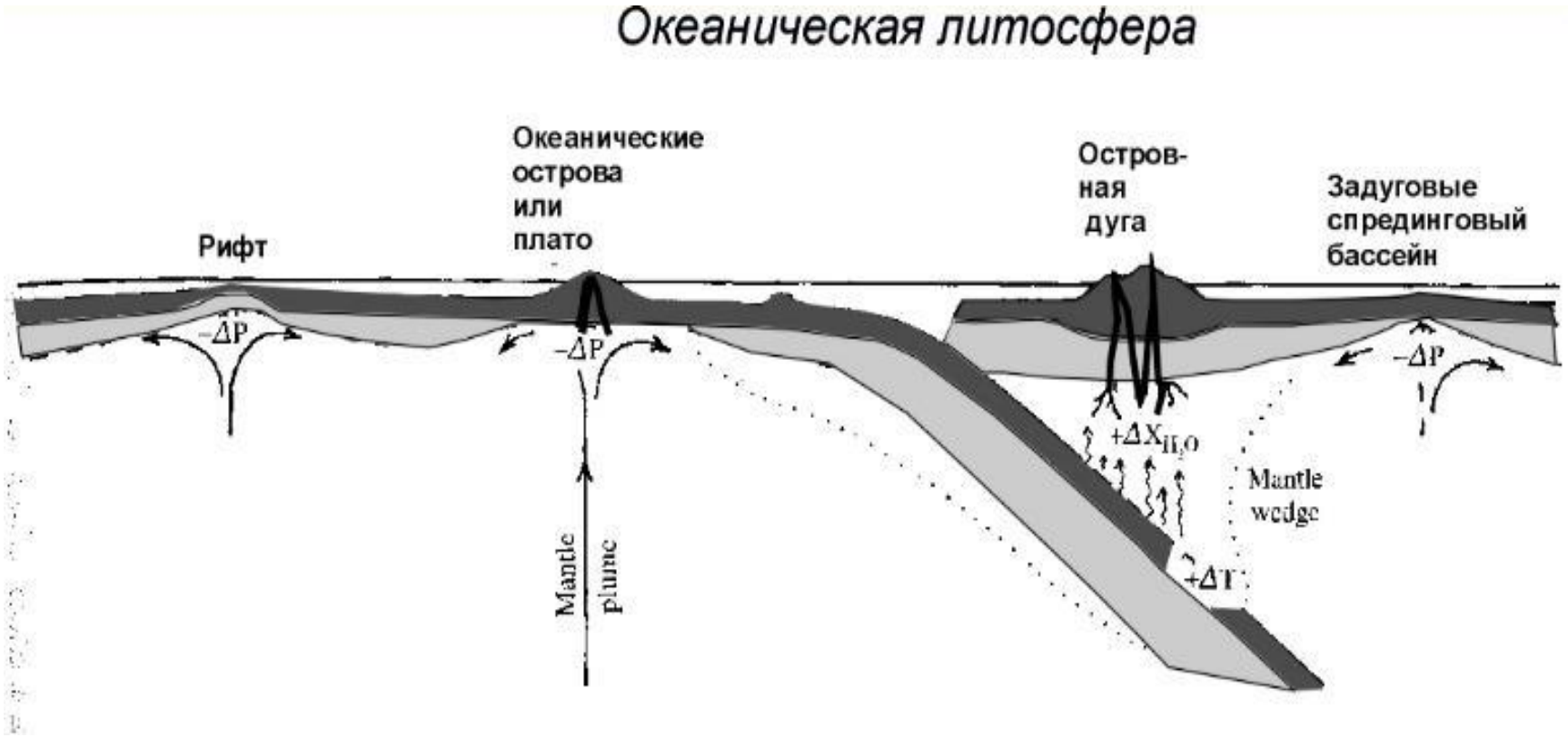
Степень совместимости/несовместимости непостоянна – она зависит от состава системы. В щелочных породах в сравнении с породами нормального ряда – другие породообразующие минералы, и некоторые элементы (например, Ti) меняют свое поведение.

Связь магматизма с геодинамикой

Главные типы геодинамических обстановок проявления магматических процессов



1 – срединно-океанические хребты
2 – континентальные рифты
3 – островные дуги
4 – активные окраины континентов
5 – задуговые бассейны
6 – океанические острова
7 – внутриплитный магматизм



Магматическая деятельность в океанической обстановке
(в свете концепции тектоники литосферных плит)

Образование океанической коры в срединно-океанических хребтах при спрединге литосферных плит – самый мощный магматический процесс на Земле. Он дает массу пород в 20 раз больше всех остальных проявлений магматизма. При этом состав пород очень однороден – это толеитовые базальты группы MORB. Первичная магма этих базальтов формируется под срединными хребтами в верхней мантии на глубинах 30-50 км из вещества верхней мантии, в большинстве случаев – уже деплетированного, и в процессе подъема и излияния не претерпевает заметной дифференциации.

Базальты океанических островов имеют существенно более глубинную область генерации (> 100 км), и отличаются по составу от MORB, образуя собственную группу (OIB). Базальты OIB часто связаны с существованием «горячих точек», имеющих глубинный источник питания в мантии.

Магматическая деятельность в континентальной обстановке
(в свете концепции тектоники литосферных плит)

Граниты – кислые интрузивные породы кварц-полевошпатового состава, наиболее распространенные породы верхней части континентальной коры.

Полевыми наблюдениями и экспериментальными исследованиями доказано, что они не являются продуктом дифференциации мантийных расплавов, а получились в коре при переплавлении пород – предшественников (протолита) среднего и кислого составов, как магматических (I-граниты), так и осадочных (S-граниты).
Характерной геохимической особенностью гранитов является утяжеленный изотопный состав кислорода ($\delta^{18}O$) (от +7 до +13‰) относительно мантии (+5,5‰), что указывает на реакции вещества протолита с водой при низких температурах – т.е. его выветривание или осадочное происхождение.
Это свидетельство того, что граниты образовались в коре в результате ее переплавления.

Что привело к плавлению коры?

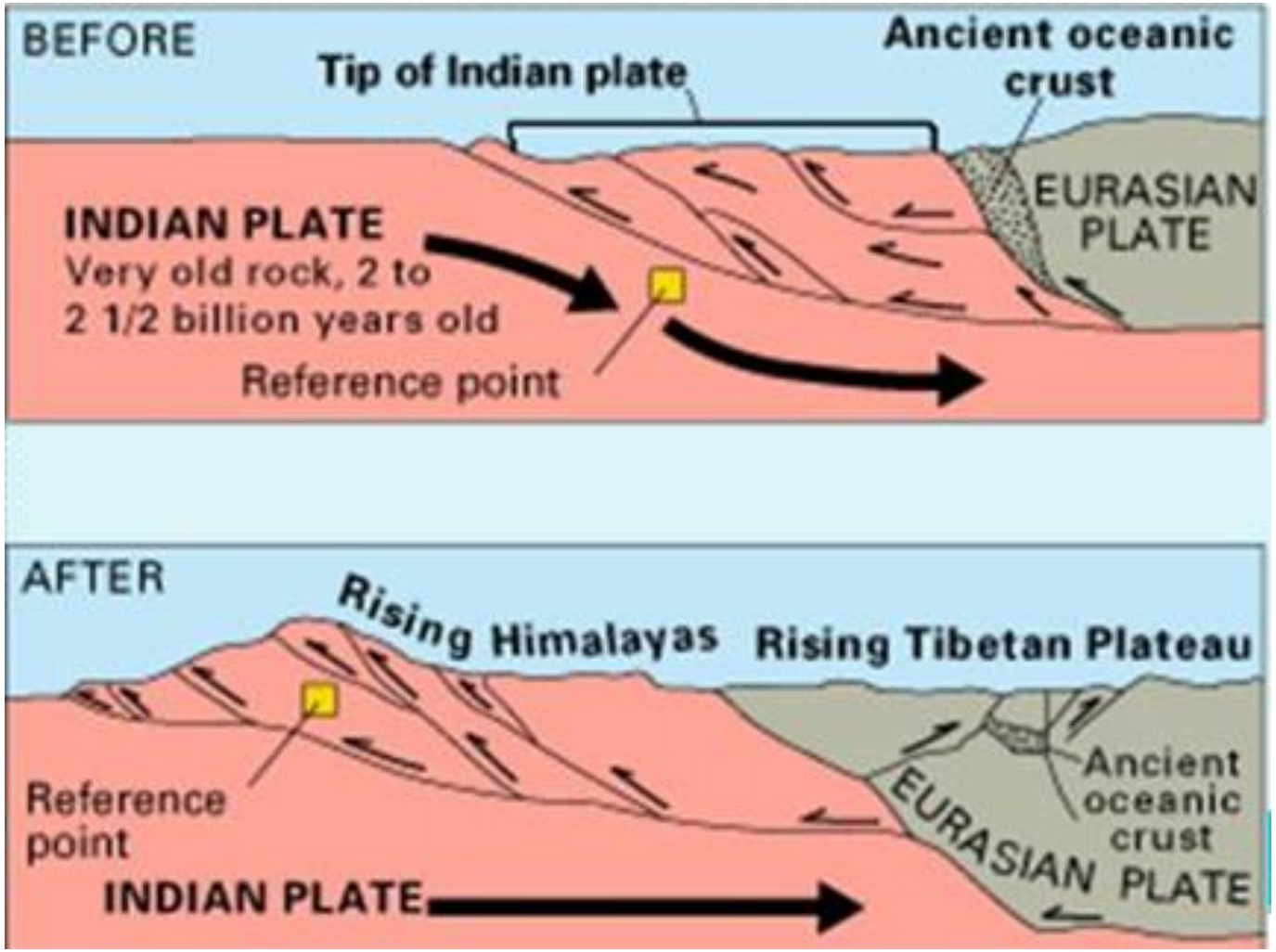
Два варианта объяснения:

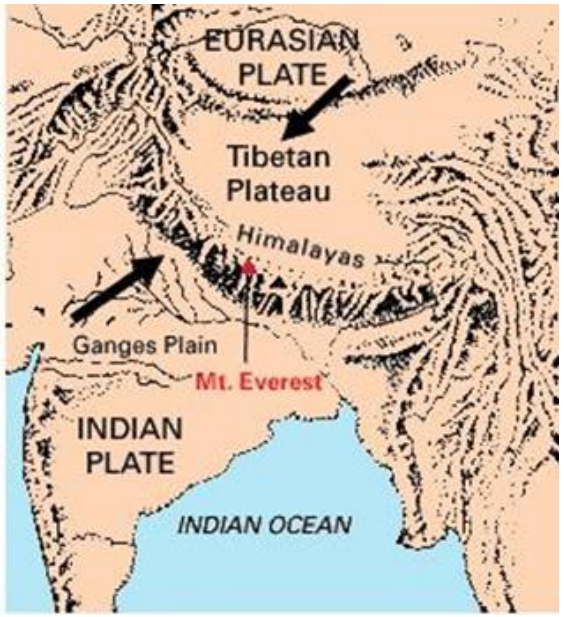
Гипотеза анатексиса – граниты образовались в Земной коре за счет ее разогрева (радиоактивным распадом). [Нужна большая мощность коры для плавления вещества.]

Гипотеза гранитизации – граниты образовались под воздействием поступления мантийных флюидов, которые (а) понизили температуру плавления пород и (б) принесли в кору дополнительно щелочные и редкие элементы. [Гипотеза не объясняет малое количество мафических элементов – Fe, Ni, Cr и др. в гранитных расплавах.]

Гипотеза анатексиса – расчеты тепловых моделей показали, что для радиационного разогрева требуется мощность коры порядка 80-100 км, что вдвое превышает среднюю мощность континентальной коры.

Решение этого вопроса найдено при изучении зон коллизии континентальных плит. В зоне столкновения Индостанской и Евро-Азиатской плит установлено пододвижение – обдукция одной плиты на другую.





Наблюдаемое по геофизическим данным увеличение мощности континентальной коры под Тибетским плато достаточно для развития процессов плавления в пододвинутой плите.
С этим хорошо согласуется образование в Тибете в палеогене и неогене множества гранитных батолитов.

Гипотеза гранитизации:

Экспериментально получен водно-силикатный флюид, равновесный с минералами ультраосновных пород при T-P-параметрах верхней мантии (Л.Ходоревская, ИЭМ).

Однако для получения из среднего состава континентальной коры гранитного расплава надо не только добавить Si и щелочи, но также вынести Fe, Mg, Ca и тяжелые металлы. Но вокруг гранитных батолитов нет ореолов выноса. Гипотеза гранитизации не может объяснить это несоответствие.

[Механизм образования магматических расплавов при поступлении флюидов оказался применим для процессов в зонах субдукции.]