

Геохимия метасоматического процесса

Термин «метасоматизм» или «метасоматоз» был предложен в середине 19 столетия К.Ф. Науманном для процесса образования минеральных псевдоморфоз.

Линдгрэн (1925) определил метасоматоз «как процесс практически одновременного капиллярного растворения и отложения, с помощью которого минерал, имеющий частично или полностью иной химический состав, может расти в теле исходного минерала или минерального агрегата».

Под **метасоматозом** понимают изменение минерального и химического состава пород в твердом состоянии при воздействии флюидов разного генезиса.

То есть **метасоматоз** – это преобразование горной породы или минерала в другую породу или минерал иного состава под воздействием привноса и выноса вещества.

Именно этим он отличается от процесса метаморфизма, где при изменении минерального состава и структуры состав породы в целом практически не меняется.

Еще одним важным отличием процесса метасоматоза от метаморфизма является сохранение объема породы при замещении. Это обусловлено тем, что при метасоматозе внешнее давление, как правило, бывает постоянным. Фактором равновесия является давление флюида. При прогрессивном метаморфизме давление растет, что приводит к уменьшению объема пород.

Привнос и вынос при метасоматизме неограничены: $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaF}_2$ (нацело). Процесс в целом локальный.

Время жизни гидротермальной системы не более 10 000 лет
(застывание интрузии от 100 тыс. до 1 млн. лет).

В масштабах замещения одного зерна метаморфизм и метасоматоз не различимы, металлогенические следствия этих процессов совершенно различны, поэтому важно их разделять.

Метасоматические образования широко распространены и включают как **региональный метасоматоз**, являющийся продолжением метаморфизма на регрессивном этапе, так и **локальный контактово-реакционный метасоматоз**. С последним связано образование многих рудно-магматических систем с крупными месторождениями.

Однако масса химических элементов, вовлеченная в перераспределение в ходе гидротермально-метасоматических процессов, пренебрежимо мала по сравнению с их полной массой в составе верхней части континентальной коры

Распределение концентраций химических элементов в гидротермально-метасоматических образованиях земной коры характеризуется очень высокой дисперсией, огромной степенью локального концентрирования, формированием большого разнообразия геохимических ассоциаций химических элементов;

повторяемость этих ассоциаций не только в различных географических точках земной коры, но и в различной геодинамической обстановке свидетельствует о глубоких геохимических закономерностях, которым подчинено поведение химических элементов в гидротермально-метасоматических процессах.

.

Примеры геохимических ассоциаций гидротермально-метасоматических месторождений

Тип месторождений	Ведущие элементы	Характерные второстепенные элементы
Скарновые Fe	Fe	Cl, иногда Cu, Zn, Pb
Скарновые Fe - Co	Fe, Co	Cl, Ni
Скарновые W - Mo	W, Mo	иногда Sn, Be
Mg-скарновые	B	Sn
Грейзеновые W - Mo - Sn	W, Mo, Sn	Be, Li, Bi, F
Альбититовые	Nb, Zr, TR	Li, Be, Th
Касситерит-сульфидные	Sn	B, In
Колчеданные	Fe	Ni, Co, Cu, Ge
Cu-колчеданные	Fe, Cu	Ni, Co
Cu-порфировые	Cu	Mo
Cu, Mo-порфировые	Cu, Mo	Re
Полиметаллические	Pb, Zn, Ag	Cu, As, Sb, Bi, Ga, Ge, Tl, In, Ba, Se, Te
Пятиэлементные	Ni, Co, As, Bi	Ag, U
Арсенидные Ni, Co, Fe	Fe, Ni, Co, As	Bi, Sb
Уран-молибденовые	U, Mo	
Золото-мышьяковые	Au, As	Bi, Mo, W, Co
Золото-серебряные	Ag, Au	Se, Te
Сурьмяно-ртутные	Hg, Sb	As
Вольфрам-сурьмяные	W, Sb	As
Олово-вольфрам-висмутовые	Sn, W, Bi	Ag
Фтор-бериллиевые	F, Be	TR

БС 7-11-11111

Геологическая позиция гидротермально-метасоматических образований часто, но далеко не всегда, свидетельствует о корреляции гидротермально-метасоматических и магматических процессов в геологическом пространстве-времени. Нельзя говорить о прямой их генетической связи.

Перераспределение химических элементов в гидротермально-метасоматических процессах сопровождаются наиболее контрастной, наиболее эффективной их **дифференциацией**, что значительно увеличивает возможности возникновения **локального обогащения многими редкими элементами вплоть до появления их собственных минералов.**

Примеры минералов редких и рассеянных элементов гидротермально-метасоматических месторождений

Элемент	Минералы
Li	Лепидолит, циннвальдит и др. слюды
Be	Берилл, фенакит, бертрандит
Sc	Тортвейтит, бацит, джервисит, каскадит
Y	Иттрокразит, ксенотим, черновит
Re	Ренит
Co	Шмальтин, скуттерудит
Cd	Гринокит, шадлунит, баркеллит
Ga	Галлит
In	Индит, рокезит, лафоретит, петрукит
Tl	Более 30 сульфидов и сульфосолей
Ge	Германит, реньерит, аргиродит, бреартит, баркеллит
Se	Более 20 селенидов и обогащенных Se сульфидов и сульфосолей
Te	Более 20 теллуридов и обогащенных Te сульфидов и сульфосолей

Берилл (аквамарин)



Берtrandит

Примеры минералов
Be в гидротермально-
метасоматических
месторождениях



Фенакит

Исследование метасоматических образований обнаруживает много черт, указывающих на значительную роль химического равновесия при метасоматозе. В то же время метасоматические системы являются открытыми, поскольку обмениваются веществом с внешней средой. Академик Д.С. Коржинский разработал принцип **локально-мозаичного равновесия**, когда изменение параметров системы в каждом элементарном участке немедленно уравнивается изменением состава породы.

Минеральная (метасоматическая) фация – это совокупность пород, образованных в зонах единой метасоматической колонки в результате воздействия определенных растворов в данной области температур и давлений.

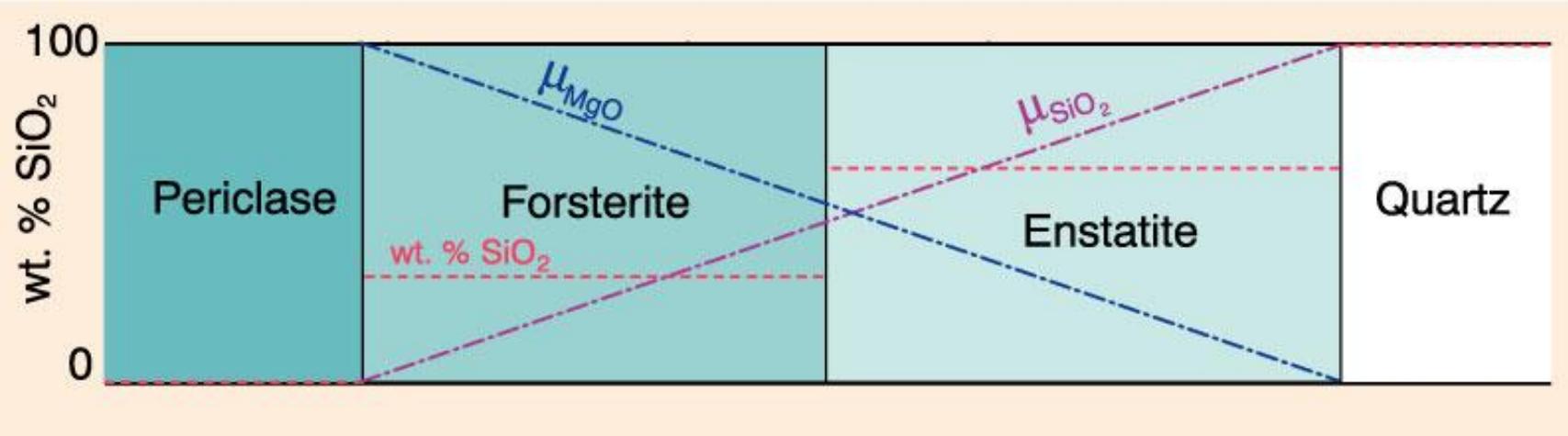
Дифференциальная подвижность компонентов – фундаментальное понятие в учении о метасоматозе.

Метасоматическая зональность – устойчивая и закономерная смена пород, наблюдаемых как единая, повторяющаяся совокупность, которая обусловлена дифференциальной подвижностью компонентов.

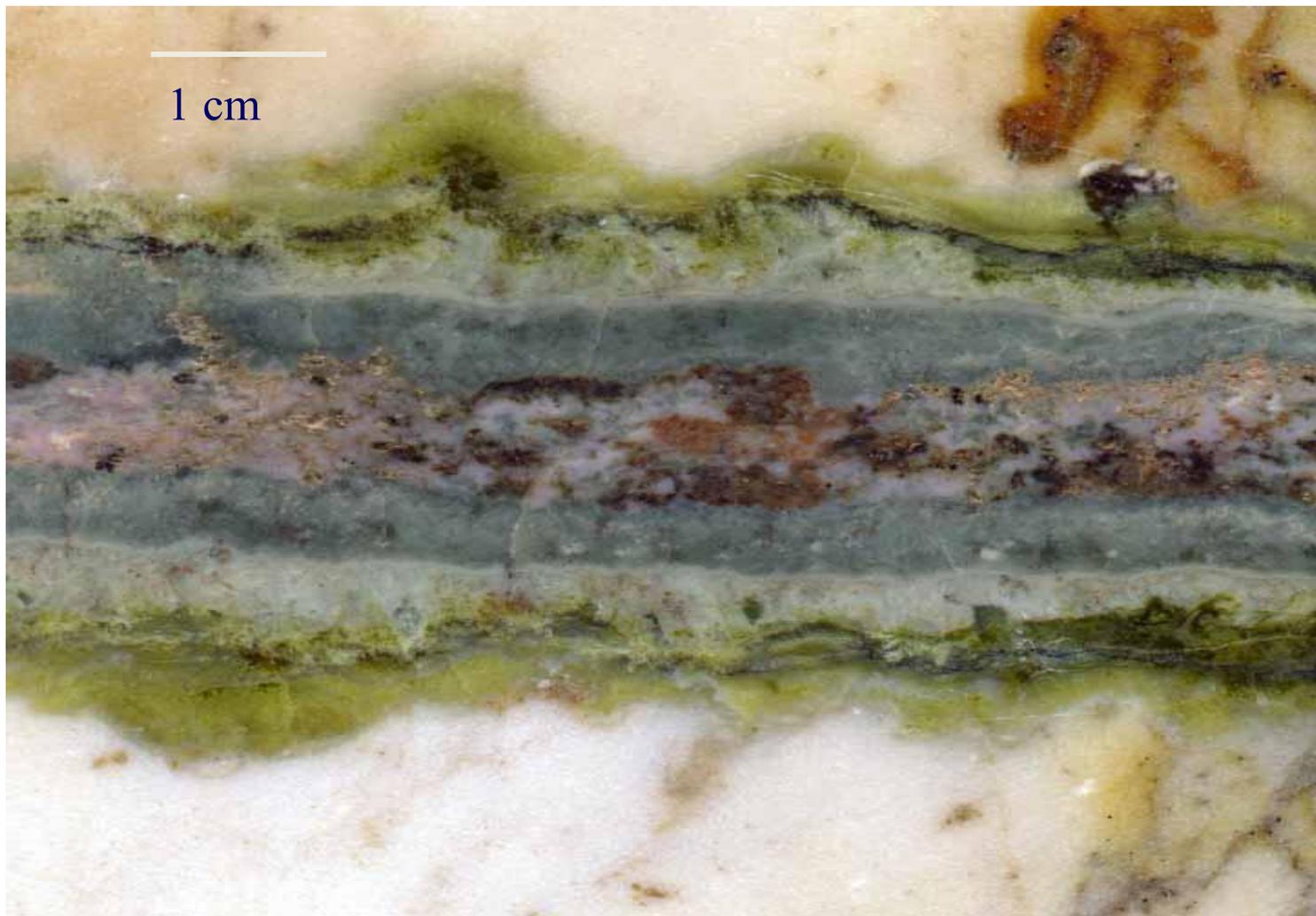
При метасоматозе **независимыми параметрами**, то есть факторами равновесия системы будут массы **нерастворимых компонентов** породы и концентрации растворимых компонентов в растворе, задаваемые извне, а также температура и давление флюида.

Остальные параметры, включая и массы **растворимых компонентов** в породе, будут зависеть от факторов равновесия.

Компоненты, массы которых в данном процессе являются факторами равновесия, называются **инертными**, а все остальные – **вполне подвижными**.



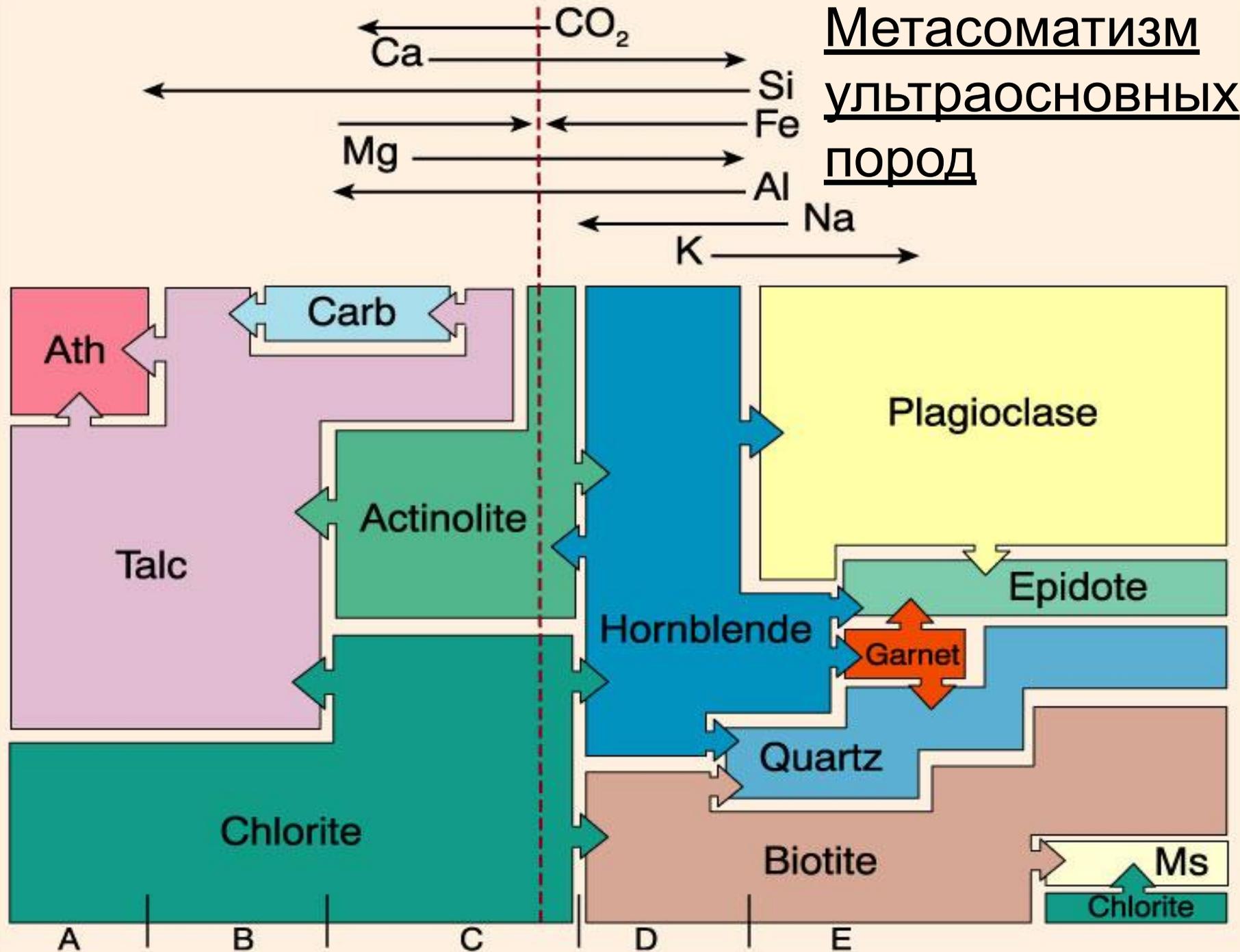
- МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ КОЛОНКА** - определенная последовательность метасоматических зон различного состава, образующаяся при воздействии растворов на горные породы в результате направленного продвижения растворов одновременно с процессами метасоматоза. Возникновение связано с тем, что при метасоматическом замещении породы изменяется не только состав самой породы, но и состав восходящих растворов.

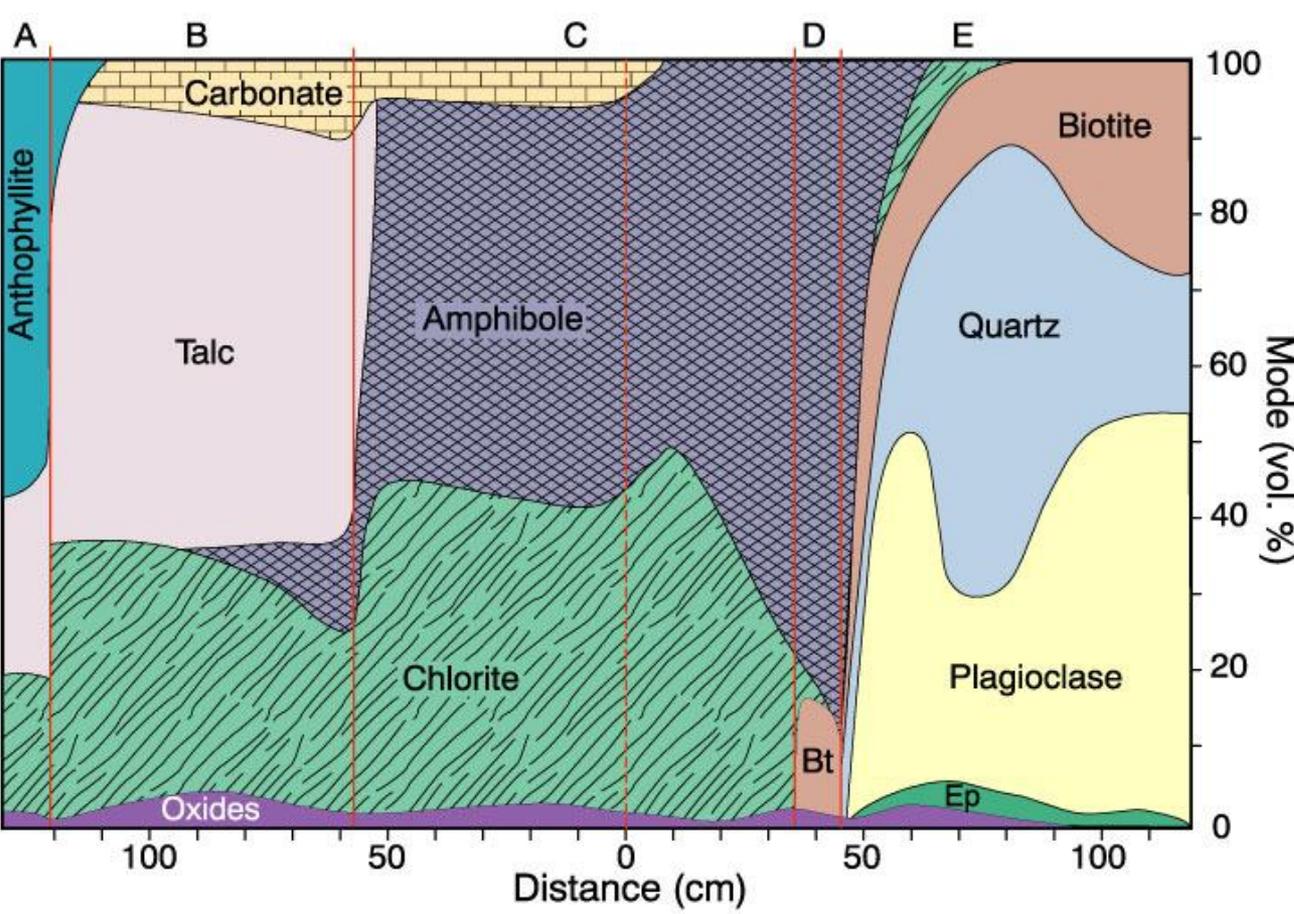
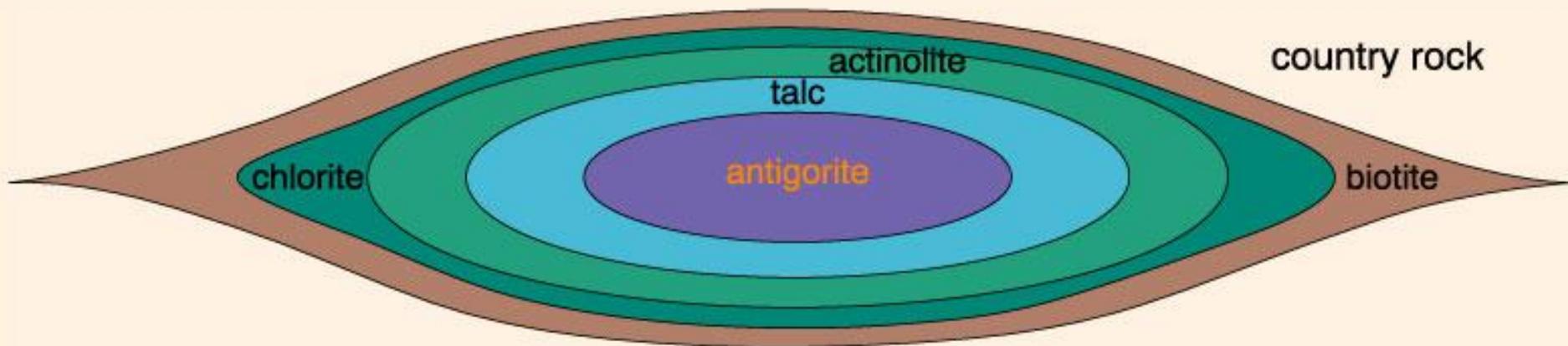


При интенсивном метасоматозе образуется ряд последовательных зон с тенденцией к образованию резких границ, с уменьшением числа сосуществующих минералов.

Метасоматизм

ультраосновных пород





В обычных случаях факторами равновесия при метасоматозе являются
температура,
давление порового раствора,
объем породы,
содержание в этом объеме инертных компонентов и
концентрации в растворе вполне подвижных компонентов.

В отличие от метаморфизма объем породы при метасоматозе не
меняется – *закон постоянства объема при метасоматозе В.
Линдгрена (1935).*

Формированию зональности способствует также существование **фильтрационного эффекта**:

Частицы вещества в поровых растворах (ионы, комплексные соединения) имеют разные размеры и могут двигаться с различной скоростью и по-разному проходить слабопроницаемые породы (геохимические барьеры).

Благодаря этому эффекту на геохимических барьерах отлагаются самые разнообразные руды.

Главной средой, через посредство которой происходят метасоматические замещения, является существенно **водный или водно-углекислотный флюид**. Его состав и состояние зависят от температуры и источника растворов.

Гидротермальные растворы, помимо воды и CO_2 , содержат галоиды щелочных и сульфаты щелочноземельных металлов, а также редкоэлементную и рудную нагрузку, зависящую от состава магматического источника.

По составу воздействующих на породу растворов (характер процесса) метасоматоз подразделяется на **кремнещелочной, щелочной, кислотный, известковый, магниальный, железистый** и т.д.

Образующиеся породы в целом называют метасоматитами с соответствующими определениями (щелочные, железистые метасоматиты), или **собственными именами** – грейзены, скарны, пропилиты, березиты и т.д.

Типы метасоматических пород (Жариков и др., 1998)

Характер процесса	Тип метасоматитов (примеры)	Характерные рудные элементы	
		Синхронные	Сопряженные и наложенные
Кислотное выщелачивание	Аргиллизиты		Pb, Zn, Cu, Mo, W, U, Hg, As, Au, Ag
	Березиты	Cu, Pb, Zn, Au, Ag	Pb, Zn, Cu, Co, Ni, U, Hg, As, Sb
	Пропилиты	Zn, Pb, Cu	Ag, Au, Hg, As, Sb
	Вторичн. кварциты	алунит, S	Al, Cu, Au, Ag, Mo, Hg, Sb, Pb, Zn
	Грейзены	Be, W	Sn, W, Mo, Be, Li, Cs, TR
Щелочной метасоматоз	Альбитизированные граниты	Nb, Ta, TR, Zr, Be,	
	Альбититы экзоконтакта нефелиновых сиенитов	Li, Sn, W Nb, Ta, TR, Zr, Th	
	Фениты		TR, Nb, Ta, Zr, Th, U
	Альбит-эгириновые		U
Mg, Ca метасоматоз	Слюдисто-карбонатные	Nb, Ta, TR, Zr	
	Амфибол-хлоритовые	Fe, Ti, V, Pt, Pd	P, Cu, Ni
	Магнезиальные скарны	Fe	B, Cu, Zn; Sn, Be, Mo, W
	Известковые скарны		Fe, Co, As, Cu, Mo, W, Sn, B

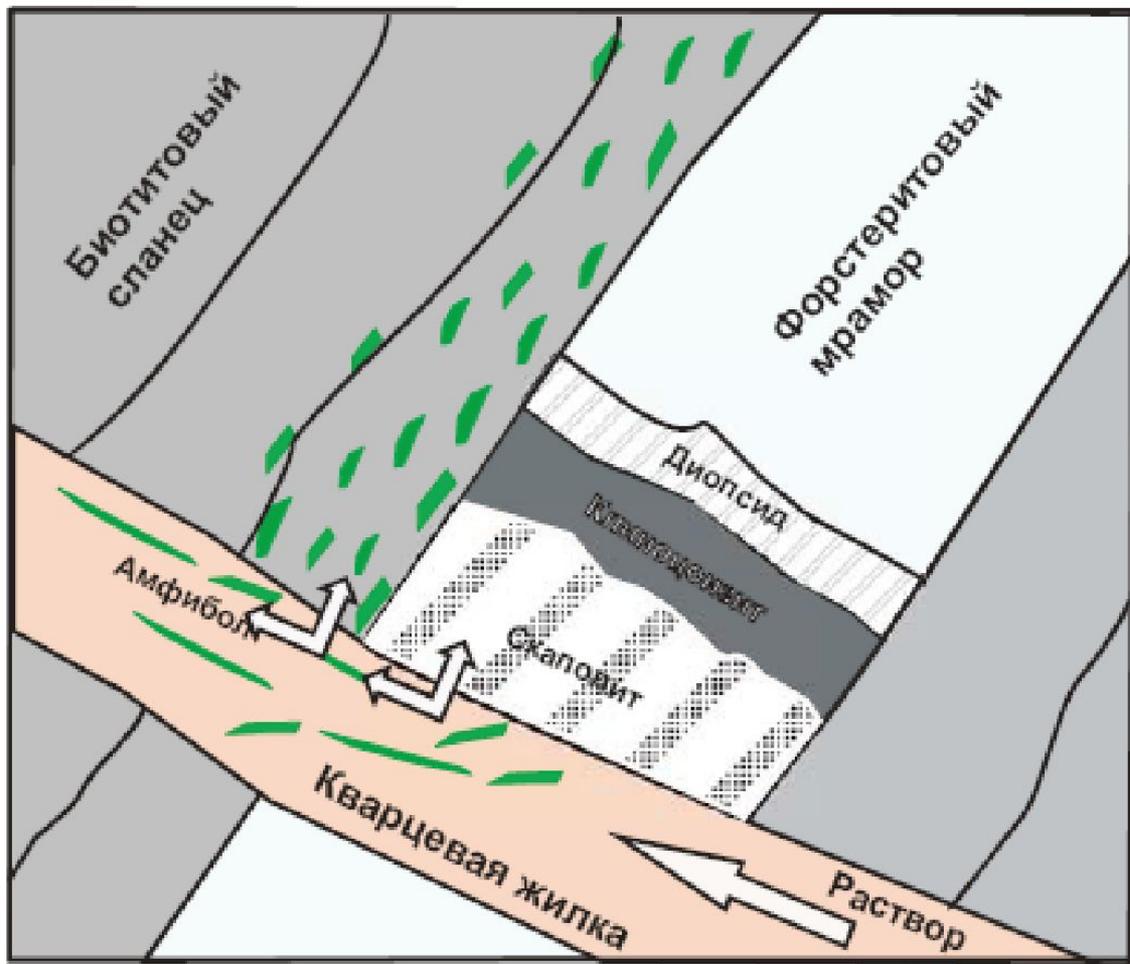
Типы метасоматической зональности

- Выделяется **инфильтрационный и диффузионный тип метасоматической зональности**, которые связаны с различиями механизма перемещения компонентов путем диффузии или инфильтрации ионов в растворе.
- В случае **диффузионной зональности** компоненты могут перемещаться через неподвижный раствор посредством диффузии в сторону более низкой концентрации (необходимое условие – наличие градиента концентрации).
- При **инфильтрационной зональности** компоненты переносятся вместе с раствором.

- **Главным признаком инфильтрационного метасоматизма является постоянный состав минералов во всем пространстве зоны.**
- **В случае диффузионного метасоматоза состав минералов меняется постепенно.**
- В чистом виде диффузионный и инфильтрационный метасоматоз проявляются редко, чаще бывают комбинации с подчиненной ролью диффузионного метасоматоза вследствие малой скорости диффузии.
- Особенностью инфильтрационных метасоматических колонок является резкие фронты замещения – границы зон колонки. На границе замещается весь минерал породы, в следующей зоне его уже нет.

Влияние разной
проницаемости пород:

рассеянная
амфиболизация в
проницаемом
биотитовом
сланце и резкие
фронты
замещения в
форстеритовом
мраморе с
образованием
узких четких зон.



- Инфильтрационная метасоматическая зональность в мраморе и биотитовом сланце в висячем экзоконтакте кварцевой жилки (мощность 10 см).

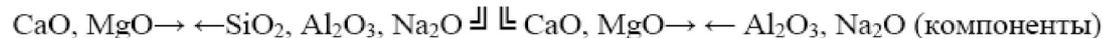
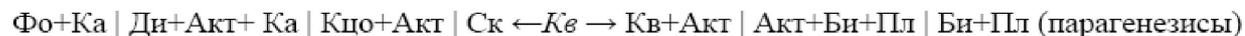
В приведенном примере кварцевая жилка является результатом инфильтрации богатого кремнекислотой раствора по трещине, секущей пачку переслаивания контрастных по составу пород – биотитовых сланцев и форстеритовых кальцифиров.

Раствор, взаимодействуя с породами, насыщается CaO, MgO и CO₂ из кальцифира, Al₂O₃, Na₂O и K₂O – из сланца. Раствор в данном случае является «транспортным средством», переносящим компоненты из одной породы в другую.

В кальцифире происходит растворение кальцита и форстерита с образованием внешней диопсид-актинолит-кальцитовой зоны, затем клиноцоизит-актинолитовой зоны и тыловой скаполитовой зоны. Из-за высокого давления CO₂ вместо плагиоклаза формируется CO₂-содержащий мейонит – основной скаполит. Вследствие слабой проницаемости и мрамора, и развивающихся метасоматических зон мощность последних достигает всего 5-8 см.

В биотитовом сланце вследствие привноса раствором CaO, MgO по биотиту развивается амфибол. Но повышенная проницаемость этой породы приводит к «рассеянному» метасоматозу - на расстоянии 40 см от жилки наблюдается пятнистое замещение биотита амфиболом. В результате обогащения раствора компонентами пород в самой жилке также растут кристаллы амфибола.

Смена зон с привносом – выносом компонентом выражается следующим образом:



кальцифир

H₂O+SiO₂

биотитовый сланец (породы)

Соотношение **инертных и подвижных компонентов** от зоны к зоне метасоматической колонки меняется.

Изучив минеральный состав в каждой зоне, можно расположить компоненты в ряд относительной подвижности компонентов.

Порядок элементов в этом ряду зависит от состава замещаемых пород, температуры и давления раствора.

Но некоторые компоненты почти всегда возглавляют этот ряд – такие как вода и углекислота, затем идут сера, хлор, щелочи.

Следующая группа – кислород, Са, Mg, Fe, кремнекислота, чья подвижность сильно зависит от P, T и состава замещаемых пород.

Подвижность FeO и CaO возрастает с понижением температуры, а Al_2O_3 - уменьшается. Почти всегда инертны Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 .

Ряд подвижности элементов

Подвижность зависит от $C_{\text{раствор}}/C_{\text{WR}}$, pH, C других компонентов.

Для известковых скарнов Турьинских медных рудников, как и для большинства высоко- и части среднетемпературных процессов **характерен такой ряд убывающей подвижности** (Коржинский, 1955):

H_2O , CO_2 , S, K_2O , Na_2O , O_2 , MgO, Fe, CaO, SiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , TiO_2

Ряды подвижности

для кислых растворов:

K, Na, Ca, Mg, Fe, Si, Al, Ti

для щелочных растворов:

K, Na, Si, Al, Ca, Mg, Fe, Ti

для ультращелочных растворов:

Si, Al, Ti, K, Na, Ca, Mg, Fe

Подвижность многих компонентов меняется в зависимости от анионного состава раствора.

Так, сера повышает инертность Fe, фтор – Ca, уголекислота – Ca, Mg, Fe в связи с отложением, соответственно, пирита, флюорита, карбонатов.

При высокой щелочности растет подвижность Si и Al по сравнению с Mg и Fe [Граменицкий и др., 2000].

Так что ряды подвижности варьируют с изменением состава и насыщенности растворов.

Диффузионная метасоматическая зональность образуется обычно в околорудных или околотрещинных ореолах.

Изменение боковых пород при фильтрации раствора по трещине происходит путем встречной диффузии компонентов. Ее отличие от инфильтрационной зональности заключается в **непрерывном изменении химических потенциалов компонентов, тогда как в первой изменение потенциалов происходит скачком на границе зон.**

Это приводит к постепенному изменению состава минералов переменного состава в диффузионной метасоматической колонке. Диффузионный метасоматоз хорошо воспроизводится в эксперименте, блестяще подтверждая теоретические построения Д.С. Коржинского.

Биметасоматоз

Процесс метасоматического взаимодействия двух химически неравновесных пород, находящихся в контакте друг с другом. Биметасоматоз может протекать только при участии постмагматических или поровых растворов, через которые компоненты двух взаимодействующих пород перемещаются в противоположных направлениях.

При биметасоматозе, преобразование пород происходит в твердом состоянии благодаря одновременному взаимному растворению одних и образованию других минералов.

Процессы биметасоматоза нередко сопровождаются интенсивными диффузионными и инфильтрационными явлениями, способствующими образованию высоких концентраций полезных ископаемых.

К биметасоматическим образованиям относят: скарны, некоторые месторождения корунда, месторождения флогопита и лазурита слюдянского типа, месторождения жадеитита, вермикулита и амфибол-асбеста, возникающие на контактах бесполевошпатовых ультраосновных пород с гранитоидами или пегматитами.

Волна кислотности-щелочности метасоматических процессов

- Эволюция постмагматических растворов с понижением температуры проявляется в виде **волны кислотно-щелочного взаимодействия** с формированием метасоматитов
- **щелочной стадии,**
- **стадии кислотного выщелачивания и**
- **позднещелочной стадии.**
- *Эти стадии проявляются при формировании многих контактовых ореолов, при развитии постмагматического метасоматоза в пегматитах и гранитных телах.*

Отделяющиеся от магматического источника растворы при высоких температурах (500-600°C) имеют **щелочную реакцию**, которая отражается в повышенной активности калия.

В пегматитах на этой стадии формируется зона блокового калишпата, развивающаяся по мелкозернистой аплитовой оторочке. В результате концентрация калия в растворе падает, **кислотность растёт** за счет растворяющегося кварца и снижения температуры.

Под воздействием кислых растворов по калишпату развивается кварц-мусковитовое замещение, и апогей кислотной стадии – кварцевое ядро пегматитовой жилы.

В раствор опять поступают щелочные компоненты

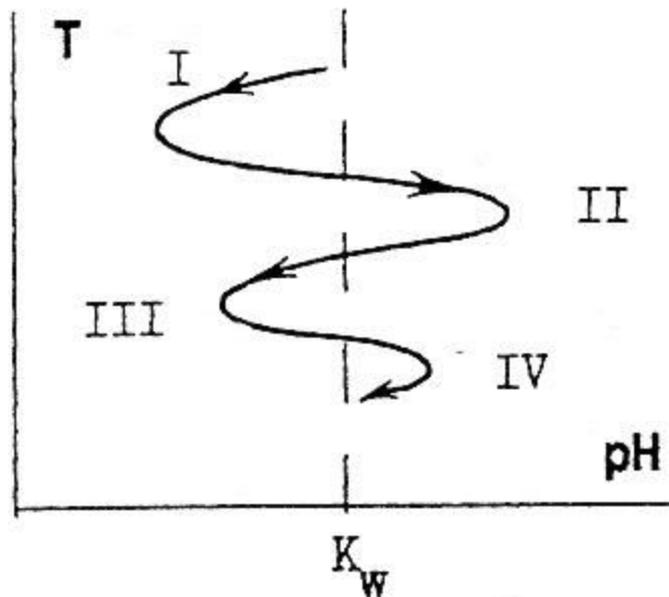


Рис.2. Схема температурно-кислотной эволюции условий метасоматоза в супракрустальных метаморфических комплексах Карельского геоблока. Пунктиром показано значение pH нейтральной точки воды. Гидротермальной цикл включает образования ранней кислотной (I), ранней основной (щелочной) (II), поздней кислотной (III) и поздней основной (щелочной) (IV) стадий метасоматоза, происходящих на фоне снижения температуры.

По температурам и уменьшению глубинности выделяются следующие типы (формации) метасоматитов:

1. **Скарны** – 500-600°C (ранняя щелочная стадия) – железорудные и полиметаллические месторождения;
2. **Грейзены** - 350-500°C (кислотная стадия) – редкометалльные и камнесамоцветные месторождения;
3. **Березиты** (листвениты) – 250-350°C (кислотная, поздняя щелочная стадия) – золото-серебряные, полиметаллические месторождения;
4. **Кварц-альбитовое** замещение – 200-300°C (поздняя щелочная стадия) – урановые месторождения;
5. **Пропилитизация, аргиллизация** – 100-200°C (кислотная, поздняя щелочная стадия) – полиметаллические месторождения. Пропилитизация и аргиллизация развиты в приповерхностных условиях в районах активного вулканизма

Геохимия регрессивного метаморфизма и гранитизации – региональный метасоматоз

После достижения пика метаморфизма – наиболее высоких температур и давлений, начинается снижение параметров. Происходит инверсия режима метаморфизма, переход от его изохимической стадии к аллохимической (метасоматической) с постепенным снижением параметров.

Главным фактором на этом этапе является снижение давления и увеличение проницаемости пород.

С привнесением глубинных кремне-щелочных флюидов начинается **массовая мигматизация пород**. Ее внешняя зона всегда представлена плагиомигматитами.

Плагиомигматиты от обычных гнейсов отличаются высоким содержанием кислого плагиоклаза – до 50-60 %. В валовом составе пород наблюдается **привнос Na и Si**. Затем следует зона калишпатовых мигматитов, где в светлых прослоях, называемых *лейкосомой*, все большую роль играет микроклин. В валовом составе пород на этом этапе фиксируется **привнос K и Si**. Общее количество **Mg, Fe, Ca в породе заметно убывает** вместе с объемом темных прослоев в мигматите (*палеосомы*).

Фазовый состав мигматитов определяется виртуальными инертными компонентами – CaO, FeO, Al₂O₃ и избыточным кремнеземом (всегда присутствует кварц).

В. И. ЛЕВИЦКИЙ

**ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ
МЕТАСОМАТОЗА
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ!**

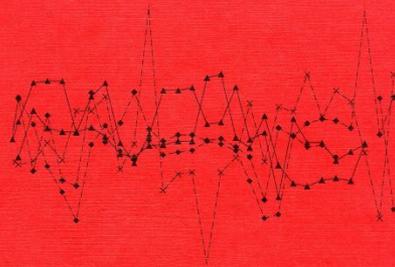


Таблица 1 Типизация метасоматитов по субстрату и последовательности проявления, В.И.Левицкий [2005], с упрощениями

Состав протолита

Процесс	Температурный интервал	Группы Подгруппы Классы	Апоалюмосиликатные породы					Алокарбонатные породы		Алокварциты
			Высокоглинозем. сланцы	Плагиогнейсы	Осн.сланцы, амфиболиты	Габбро	Гипербазиты	Доломит. мраморы	Кальцит. мраморы	Кварциты с карб.
			Плагио-мигматиты	Плагио-мигматиты	Плагио-мигматиты базификаты	Эклогитоподобные породы	Эклогитоподобные породы			
Метаморф. дифферен. + Гранитизация	650-700	1 выс-Т этап мигматиты	Плагио-мигматиты	Плагио-мигматиты	Плагио-мигматиты базификаты	Эклогитоподобные породы	Эклогитоподобные породы	Mg-скарны	Ca-скарны	Ди+Пл+Кв
	650-700 растворы сниж.Р	Привнос Вынос 2 выс-Т этап Кпш-мигматиты Привнос Вынос	Na ₂ O, SiO ₂ CaO, MgO, FeO Кпш-мигматиты K ₂ O, SiO ₂ CaO, MgO, FeO	Кпш-мигматиты	Кпш-мигматиты	Кпш-мигматиты	Плагио-мигматиты	Плагио-мигматиты		Ди+Кпш+Кв
Анатексис	650-700	Граниты - магм. этап	Граниты	Граниты	Граниты	Плагиоклазиты	Плагиоклазиты	Сиениты Ne-сиениты	Сиениты Святонос.	Аляскиты
Метасоматоз среднеТ	500-600	Постмигматитовый	Крд+Сил+Рут	Гр+Сил+Би+кпш	Скарноподоб. Гр+Амф	Скарноподоб. Гр+Амф	Скарноподоб. Гр+Амф	Скарны+Ск+Кпш+Шп	Ск+Ди+Во	
	450-500		Муск+Анд+Корунд Сапфирин	Мус+Ст+Анд+Крд	Крд+Гр+Жедрит	Жед+Ст Трем+Фл	Жед+Ст+Фл Сапфирин	Ск+Фл+Сод Лазурит	Ск+Гр+Во	Фл+Амф
	350-450		Сер+Кцо+Рубин	Эп+Хл+Сер Пренит	Эп+Акт+Хл Пир+Грф	Эп+Акт+Хл Пир+Грф	Эп+Прн+Пир+Грф	Изв.скарны Эп+Вез+Канкр+Шее	Трем+Эп+Вез+Грф	Гр+Эп+Во
Низкие Т	300-350		Хл+Гиббс. Диаспор	Аб+Хл+Ка сульфиды	Хл+Стп+Тальк	Хл+Стп+Тал+Барит	Хл+Стп+Тал+Барит	Хл+Та+Стп Сульф	Хл+Та+Стп Сульф	Хл+Барит
Полезные ископаем			Рубин, Спф Абразив	Муск., Дист Дистен	Корунд, Руб Гранат	Гро, Со, Ni, V	Pt, Au, Ni Фл, Fe, В, Офикальц	Волластонит	Волластонит	

Примечание: Аб – альбит, Акт – актинолит, Амф – амфибол, Анд – андалузит, Би – биотит, Вез – везувит, Вол – волластонит, Гиббс – гиббсит, Гр – гранат, грф – графит, Гро – гроссулар, Ди – диопсид, Дст – дистен, Жед – жедрит, Ка – кальцит, Канкр – канкринит, Кцц – клиноцоизит, Кпш – калиевый полевой шпат, Крд – кордиерит, Пир – пирит, Руб – рубин, Сер – серицит, Сил – силиманит, Ск – скаполит, ст – ставролит, Стп – стильпномелан, Та – тальк, Трем – тремолит, Фл – флюорит, Хл – хлорит, Шп – шпинель, Эп – эпидот.

- Сопряженно с мигматизацией образуется небольшое количество базификатов, которые по отношению к сланцу обогащены выносимыми компонентами – CaO, MgO, FeO. Наиболее инертно поведение Ti.
- Элементы-примеси в этом процессе следуют за своими геохимическими хозяевами.
- Вслед за калием привносятся Rb, Cs, Pb, в комплексах высокого давления – Ba. Вместе с выносом MgO и FeO снижаются концентрации элементов группы железа – Co, Ni, Cr, V. В связи с высоким содержанием темноцветных минералов в базификатах накапливаются летучие и многозарядные элементы, такие как F, Sn, Zn.
- На стадии калишпатовой мигматизации особенно заметно увеличиваются содержания LREE. HREE, напротив, выносятся из кислых продуктов гранитизации с накоплением в базификатах.
- Образующиеся в процессе гранитизации гранитогнейсы сохраняют геохимические особенности субстрата.

- О том, что гранитизация является метасоматическим процессом, свидетельствует возможность ее неоднократного проявления. Примером является полиметаморфический комплекс Чуйского поднятия.

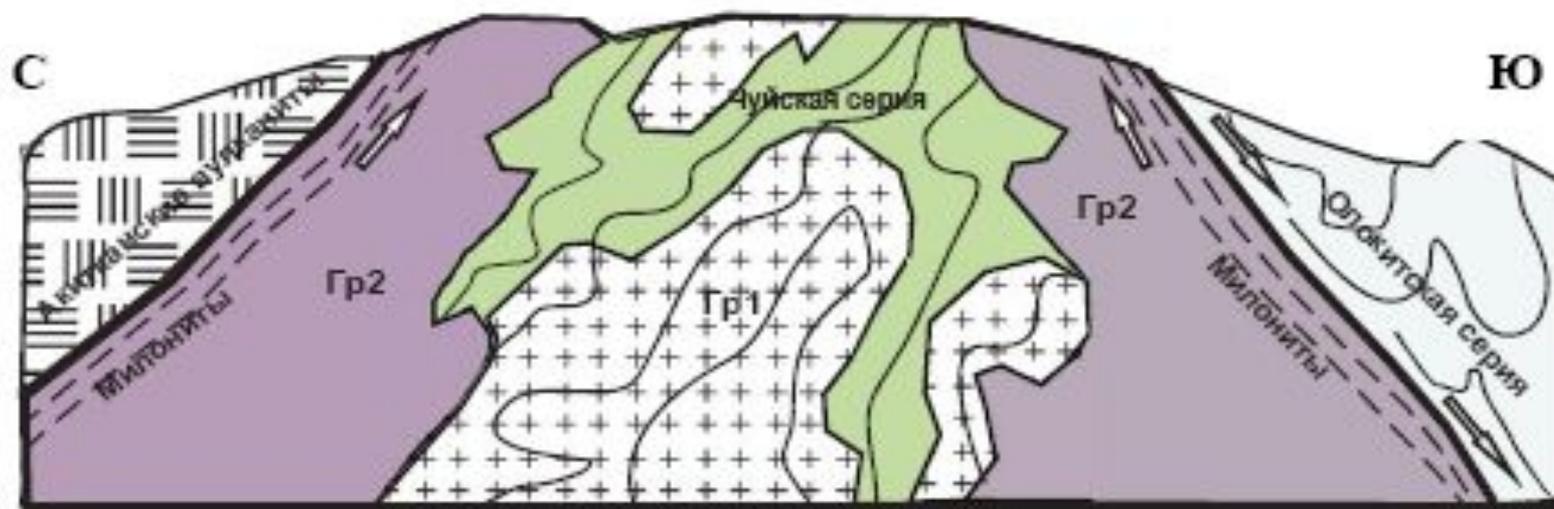


Рис.17.4 Чуйское поднятие Северного Прибайкалья – комплекс метаморфического ядра. Проявление двух этапов гранитизации: Гр1 – ранняя гранитизация безрудная; Гр2 – субщелочная гранитизация с редкометальными проявлениями.

Таблица 17.3 Средний состав амфиболитов, гнейсов и мигматитов стандартной (1) и субщелочной (2) гранитизации Чуйского поднятия

Компонент	Амфиболиты	Гнейсы	Гранитогнейсы1	Гранитогнейсы2
N	3	5	2	8
SiO ₂	49,69	59,58	74,7	70,31
TiO ₂	1,09	0,95	0,07	0,50
Al ₂ O ₃	14,29	14,69	13,50	13,27
Fe ₂ O ₃	2,92	1,40	0,40	2,49
FeO	8,64	6,11	0,72	1,96
MnO	0,16	0,08	0,03	0,08
MgO	7,24	3,16	0,17	0,48
CaO	10,57	7,41	1,3	1,42
Na ₂ O	2,98	2,97	4,1	3,58
K ₂ O	0,97	2,55	4,26	5,16
P ₂ O ₅	0,08	0,18	0,01	0,08
Li, ppm	12	6	13	12,5
Rb	37	52	342	280
Ba	193	1400	930	783
Sr	93	150	25	52
Be	0,95	2,3	7,2	5,4
Sn	4,8	5	4	8,7
Pb	18,7	23	63	35
Ni	110	72	8	9,5
Cr	175	91	6,9	12,8
V	297	140	2,5	9,6
La	12,2	32	5	131
Ce	27	80	25	210
Nd	20	37	8	99
Yb	3	3,6	2	13
Y	24	37	15	101
Zr	125	240	40	796
Nb	4,2	15,6	8,6	55
B	10,3	6,8	1,5	7,3

Геохимия контактово-реакционного метасоматоза

В отличие от регионального метасоматоза, который тесно сопряжен с метаморфизмом и проявляется на его регрессивном этапе, процесс контактово-реакционного метасоматоза является локальным, но иногда также имеет достаточные масштабы для формирования крупных месторождений.

Этот процесс развивается у контактов интрузивных тел на той стадии, когда в результате дифференциации расплава и кристаллизации основного объема интрузивного тела происходит отделение остаточных, или гидротермальных растворов.

Во многих случаях обычно известен состав интрузивного тела, которое является источником растворов и определяет возможный состав этих растворов.

Контактово-реакционный метасоматоз (биметасоматоз, контактово-инфильтрационный метасоматоз) охватывает интервал от 550-600 до 150°С и ниже.

Давления, в отличие от региональных метасоматических процессов, меняются в узких пределах и невысоки (0,5-1,5 кбар).

Большую роль играет состав и давление летучих компонентов.

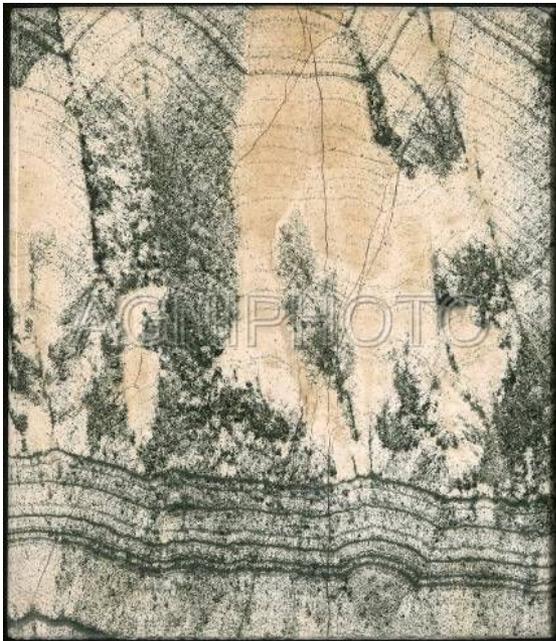
Резкое повышение парциального давления углекислоты или сероводорода может служить геохимическим барьером, способствующим осаждению рудного вещества.

Скарны

Контактовый реакционный метасоматоз при высоких температурах (550-600°C) формирует скарны, возникающие 1) в контактах известняков или доломитов с силикатными породами;

2) в контактах гипербазитов с силикатными породами.

В отличие от региональной гранитизации, где главную роль играют щелочные металлы, при образовании скарнов эта роль переходит к двухвалентным основаниям – MgO, CaO и FeO. Образуются породы основного состава.



Волластонит-геденбегритовый скарн
(Дальнегорск, Приморье)

Биметасоматические или диффузионные **скарны** имеют обычно небольшие масштабы и наблюдаются непосредственно в контакте гранита и карбонатной породы.

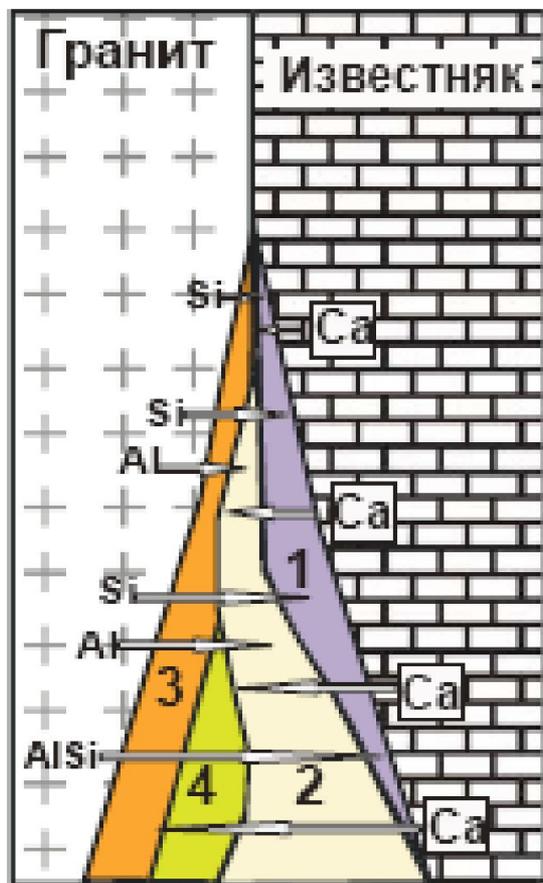


Рис. 18.2 Механизм образования диффузионного биметасоматического скарна: растворы движутся вверх вдоль контакта гранита и известняка. Экзоскарн: 1 – диопсидовый, 2 – гранатовый (андрадит-гроссуляровый); эндоскарн: 3 – ортоклаз-эпидотовая и 4 – эпидотовая зоны. Стрелки показывают встречную диффузию компонентов [Синьков, 1986].

Грейзены

К среднетемпературному этапу проявления контактово-реакционного метасоматоза (300-500°С) относится **грейзеновая формация**. Она проявляется на гребне *волны кислотности* метасоматических растворов, связанных с магматическими телами.

Грейзен – это существенно кварц-слюдяная метасоматическая порода, возникающая при постмагматическом замещении интрузивных или вулканических пород [Рундквист, 1970].

Наряду с кварцем и мусковитом (циннвальдитом, биотитом) в грейзенах бывают широко развиты топаз, флюорит, турмалин, новообразованные калишпат и альбит. Грейзены часто несут рудную нагрузку в виде берилла, касситерита, молибденита, вольфрамита, пирита или гематита.



Судя по составу минералов, процесс грейзенизации идет под воздействием существенно водных растворов с высокими содержаниями фтора, бора и рудных компонентов (Li, Be, Mo, W, Sn и др.).

Грейзены формируются как в эндоконтактах гранитов, так и в их экзоконтактах по алюмосиликатным породам.

Грейзенизации по времени предшествуют микроклинизация и альбитизация гранитов, а также образование пегматитов. Завершают ее низкотемпературные процессы серицитизации, окварцевания и пиритизации.

Мантийный метасоматизм

Изменение состава мантийных перидотитов инфильтрацией карбонатными и силикатными расплавами; **карбонатными и водными флюидами**.

Работы по геохимии мантии убедительно показали, что мантийный метасоматоз - один из важнейших процессов химической дифференциации мантии.

Наиболее ярко крупномасштабный метасоматоз в мантии проявлен на примере **щелочного магматизма**. Типичными обстановками проявления мантийного метасоматизма являются **внутриплитная и надсубдукционная обстановки**, где индикаторами модального метасоматизма являются **флогопит и паргасит (керсутит)**.

Также на мантийный метасоматизм указывает образование: **доломита, кальцита, ильменита, рутила**.

Происходит обогащение несовместимыми элементами: крупноионными литофилами LILE и высокозарядными элементами (K_d минерал/расплав $\ll 1$).



- Источниками гигантских щелочных массивов Кольского п-ова и связанных с ними крупнейших в мире апатитовых и редкометалльных месторождений является обедненная мантия, причем обедненная в течение многих млн. лет.

Возникает парадокс:

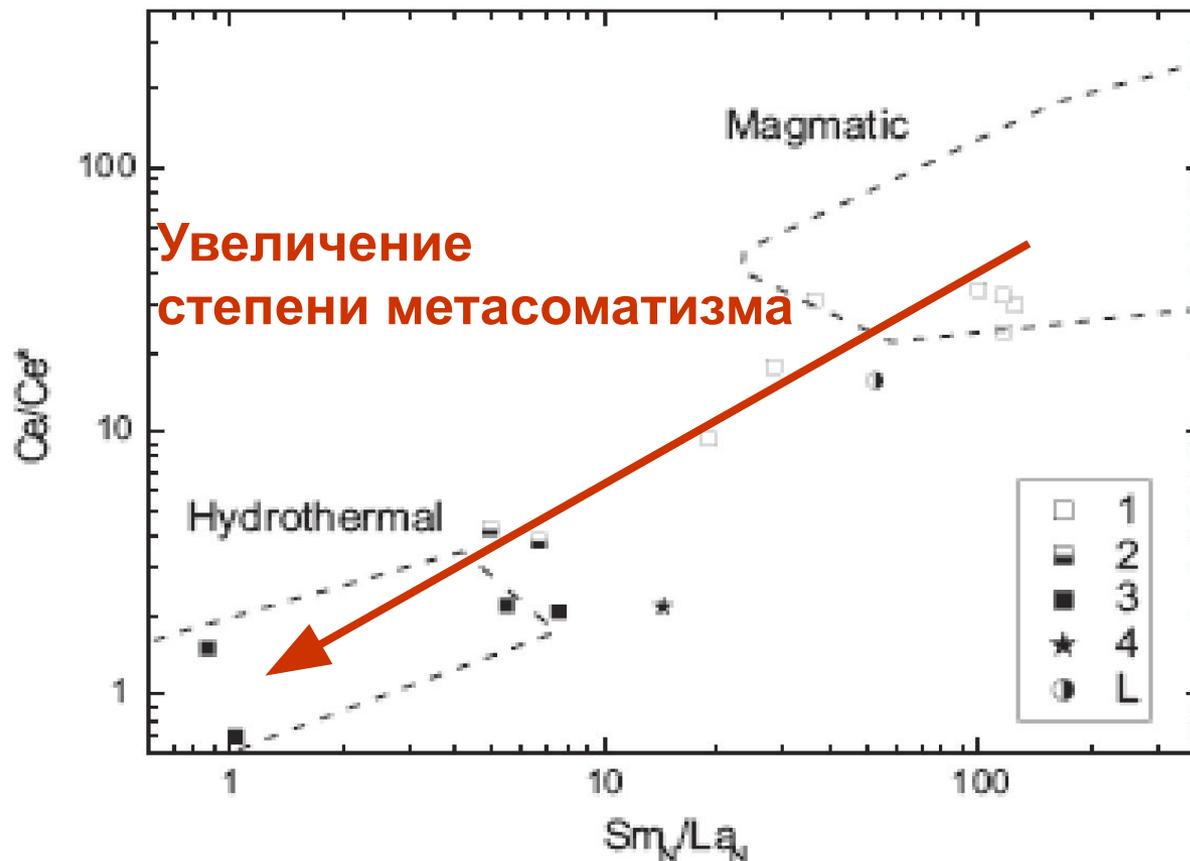
наиболее обогащенные редкими элементами магматические системы формировались из обедненной редкими элементами мантии.

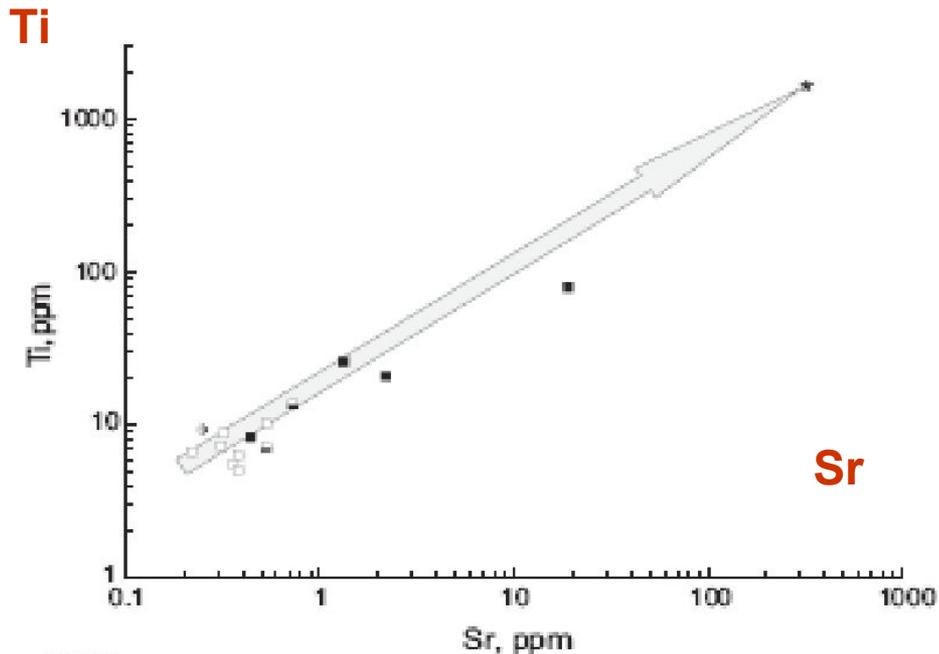
Колоссальное концентрирование ниобия, циркония, редких земель и фосфора в щелочных породах данного региона связано, по всей вероятности,

с крупномасштабными процессами мантийного метасоматоза, прошедшего в узком временном интервале (371 - 361 млн лет, поздний девон), иначе успели бы накопиться радиогенные изотопы и изотопные характеристики были бы другими.

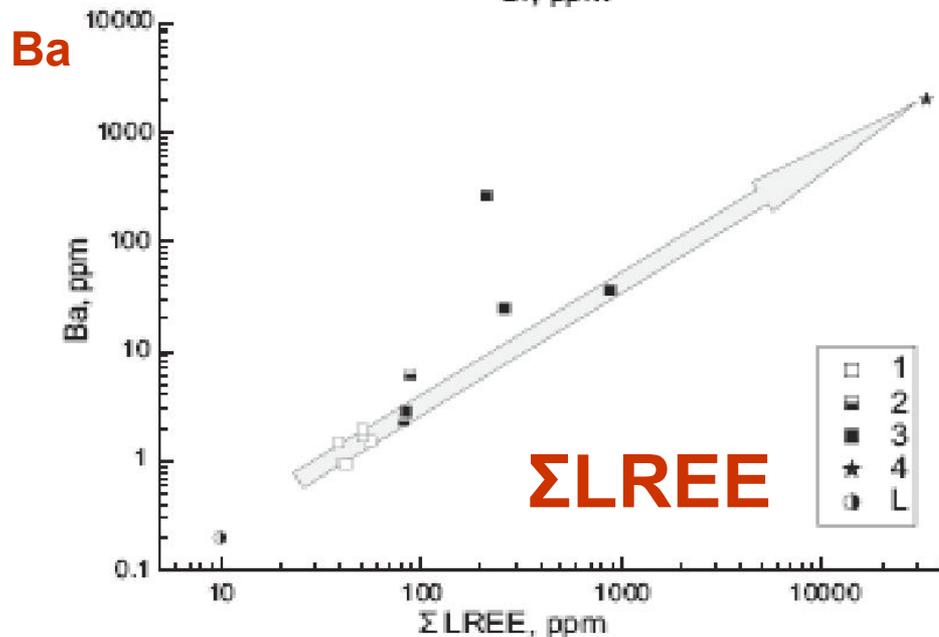
Геохимия цирконов - отражение мантийного метасоматизма

Соотношение степени дифференцированности **LREE** и величины **Ce**-аномалии в цирконах из лампроитов. 1-4 – цирконы с незначительной, средней, высокой и аномально высокой степенью метасоматического изменения. L – средний состав циркона из лампроитов (Belousova et al., 2002).





Аномальное увеличение содержания несовместимых для цирконов элементов – **Ti, Ba, Sr**, коррелирующее с ростом содержания **легких REE**.



Стрелка показывает эволюцию состава циркона под воздействием метасоматического флюида.

ВЫВОДЫ

1. Представлены все степени изменения цирконов из лампроитов, от средней до высокой, зафиксированные геохимическими особенностями состава (увеличение **LREE**, **Ca**, **Al**, **Fe**, **Ti**, **Sr**, **Ba**, **Th**; «плоский» профиль распределения **REE** и редуцированная **Ce**-аномалия) .
2. На завершающем этапе воздействия флюид привел к кристаллизации домена циркона с аномально высоким содержанием всего спектра **REE** (55000 ppm) и, особенно **LREE** (33500 ppm).
3. Для цирконов с высокой степенью метасоматического изменения и резко возросшим содержанием **Ti** использование **Ti**-термометра вряд ли возможно (до 1000 ppm **Ti** в цирконе).