



Общая геохимия

Лекция 18

Геохимия метасоматических процессов

В.И. ЛЕВИЦКИЙ

2005

ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ МЕТАСОМАТОЗА

ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ КОРЫ

В. В. ЖДАНОВ

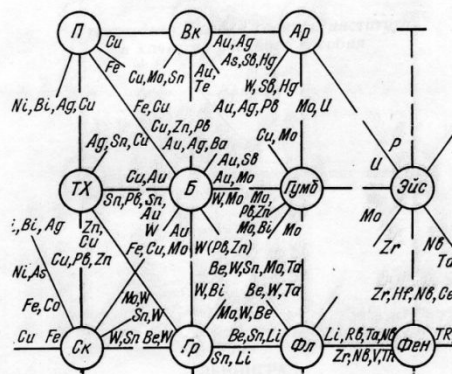
МЕТАСОМАТИТЫ, ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ И КАРТИРОВАНИЯ

Санкт-Петербург • 1999

1999

Ю. Б. МАРИН

МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ И ИХ РУДОНОСНОСТЬ



ЛЕНИНГРАД
1989

1989

МЕТАСОМАТИЗМ И МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ



Si

Ca

Al

НАУЧНЫЙ МИР

1998

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

Линдгрэн (1925 г.) 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.

Степень концентрирования важнейших металлов в крупных месторождениях (Соловов, 1990)

Металл	Распространенность в верхней части континентальной коры, %	Среднее содержание в рудах крупных месторождений, %	Степень концентрирования в рудах
Hg	$5.6 \cdot 10^{-6}$	0.2	36000
W	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.4	2900
Sn	$2.5 \cdot 10^{-4}$	0.5	2000
Pb	$1.7 \cdot 10^{-3}$	3	1800
Mo	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.2	1400
Au	$4.3 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-4}$	930
Cu	$1.43 \cdot 10^{-3}$	0.8	560
Ni	$1.86 \cdot 10^{-3}$	1	540
Zn	$5.2 \cdot 10^{-3}$	2	380
Co	$1.16 \cdot 10^{-3}$	0.3	260
Fe	4.08	45	11

E.S. Zubkov

- 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.

Геохимические запасы важнейших металлов в верхней части континентальной коры (Квятковский, 1990)

Металл	Масса в верхней части континентальной коры, т	Масса в рудных месторождениях, т	Относительная масса в рудных месторождениях, %
Cu	$9.72 \cdot 10^{13}$	$1.82 \cdot 10^{10}$	$1.87 \cdot 10^{-2}$
Au	$2.92 \cdot 10^{10}$	$3.15 \cdot 10^6$	$1.08 \cdot 10^{-2}$
Hg	$3.81 \cdot 10^{11}$	$3.70 \cdot 10^7$	$9.31 \cdot 10^{-3}$
Pb	$1.26 \cdot 10^{14}$	$1.02 \cdot 10^{10}$	$8.39 \cdot 10^{-3}$
Zn	$3.54 \cdot 10^{14}$	$1.16 \cdot 10^{10}$	$3.28 \cdot 10^{-3}$
Sn	$1.70 \cdot 10^{13}$	$5.00 \cdot 10^8$	$2.94 \cdot 10^{-3}$
Fe	$2.77 \cdot 10^{17}$	$4.30 \cdot 10^{12}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$
Mo	$9.52 \cdot 10^{12}$	$1.00 \cdot 10^8$	$1.05 \cdot 10^{-3}$
W	$9.52 \cdot 10^{12}$	$1.00 \cdot 10^8$	$1.05 \cdot 10^{-3}$
Ni	$1.26 \cdot 10^{14}$	$6.00 \cdot 10^8$	$4.76 \cdot 10^{-4}$
Co	$7.09 \cdot 10^{13}$	$5.25 \cdot 10^7$	$6.65 \cdot 10^{-5}$

- 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

Б.С. Залыкин

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, берtrandит
Sc	Тортвейтит, баццит, джервисит, каскандит
Y	Иттрокразит, ксенотим, черновит
Re	Ренит
Co	Шмальтин, скуттерудит
Cd	Гриноцит, 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

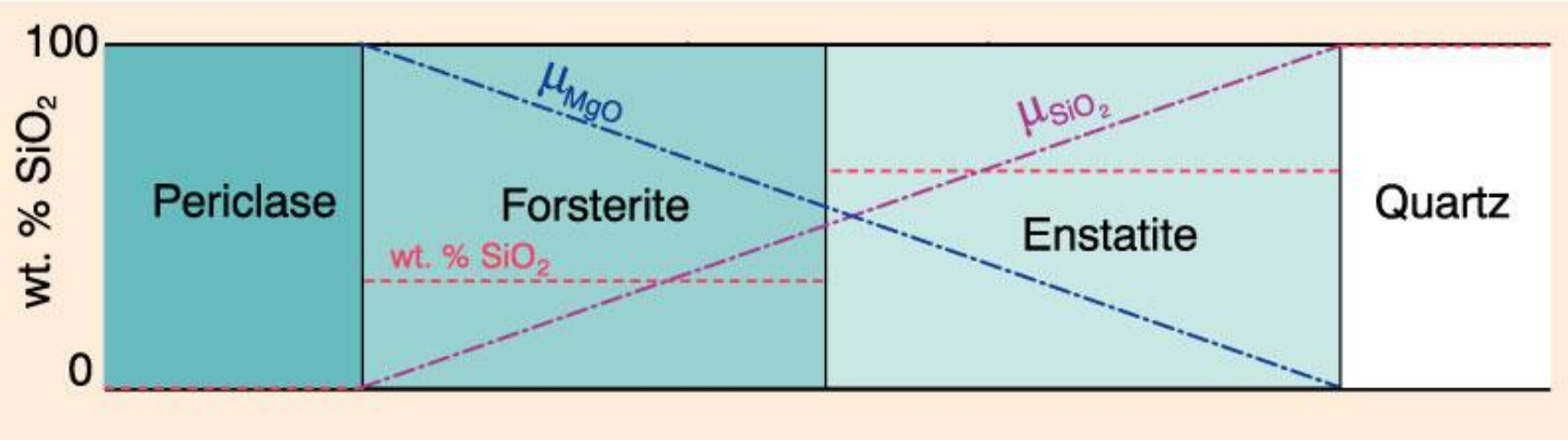


Фенакит

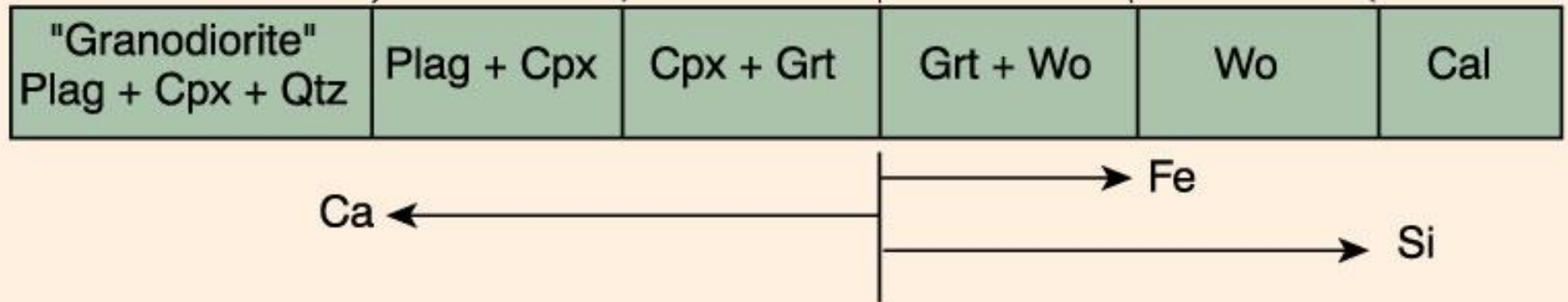
- Исследование метасоматических образований обнаруживает много черт, указывающих на значительную роль химического равновесия при метасоматозе. В то же время метасоматические системы являются открытыми, поскольку обмениваются веществом с внешней средой.
- Академик Д.С. Коржинский разработал принцип **локально-мозаичного 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.

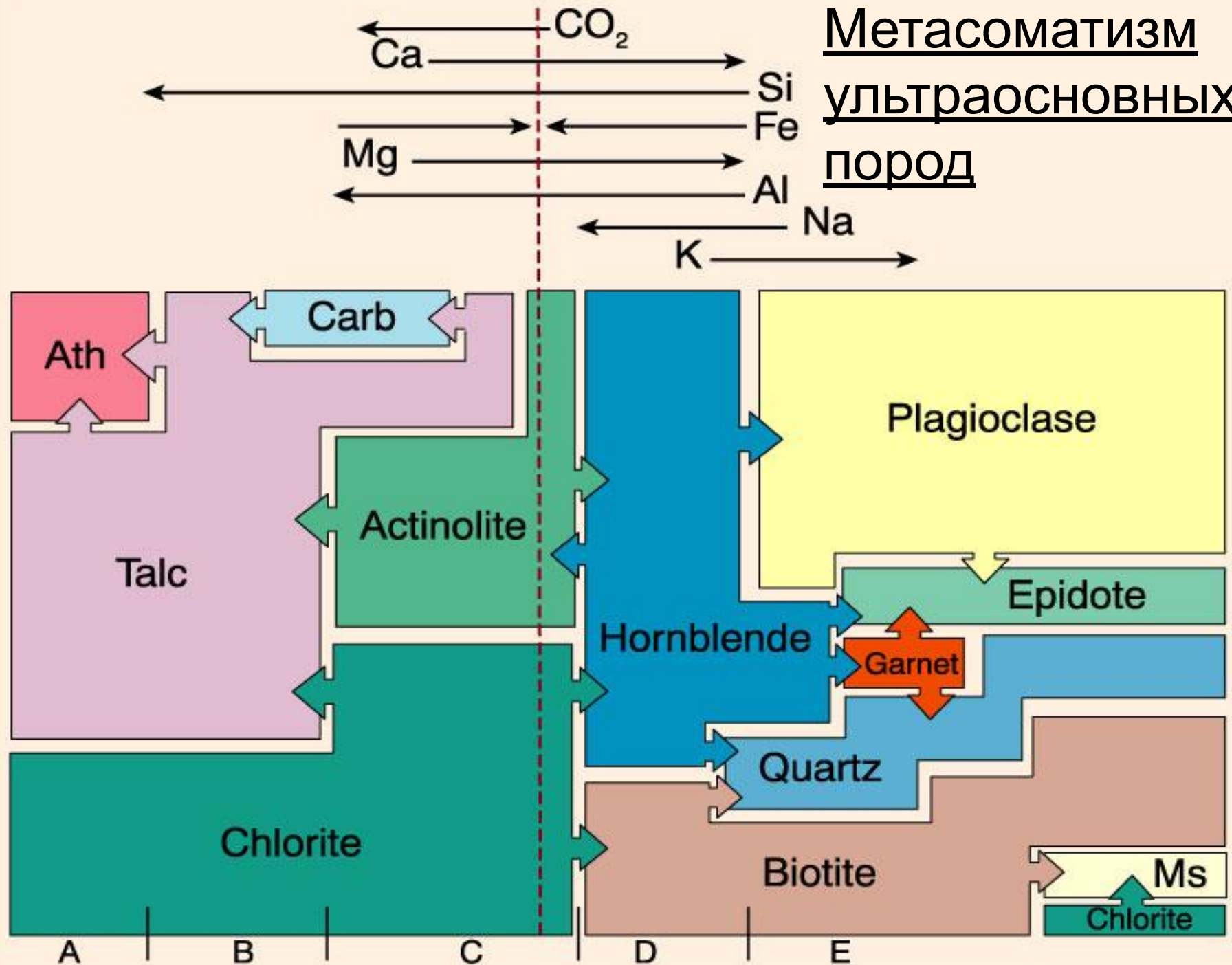


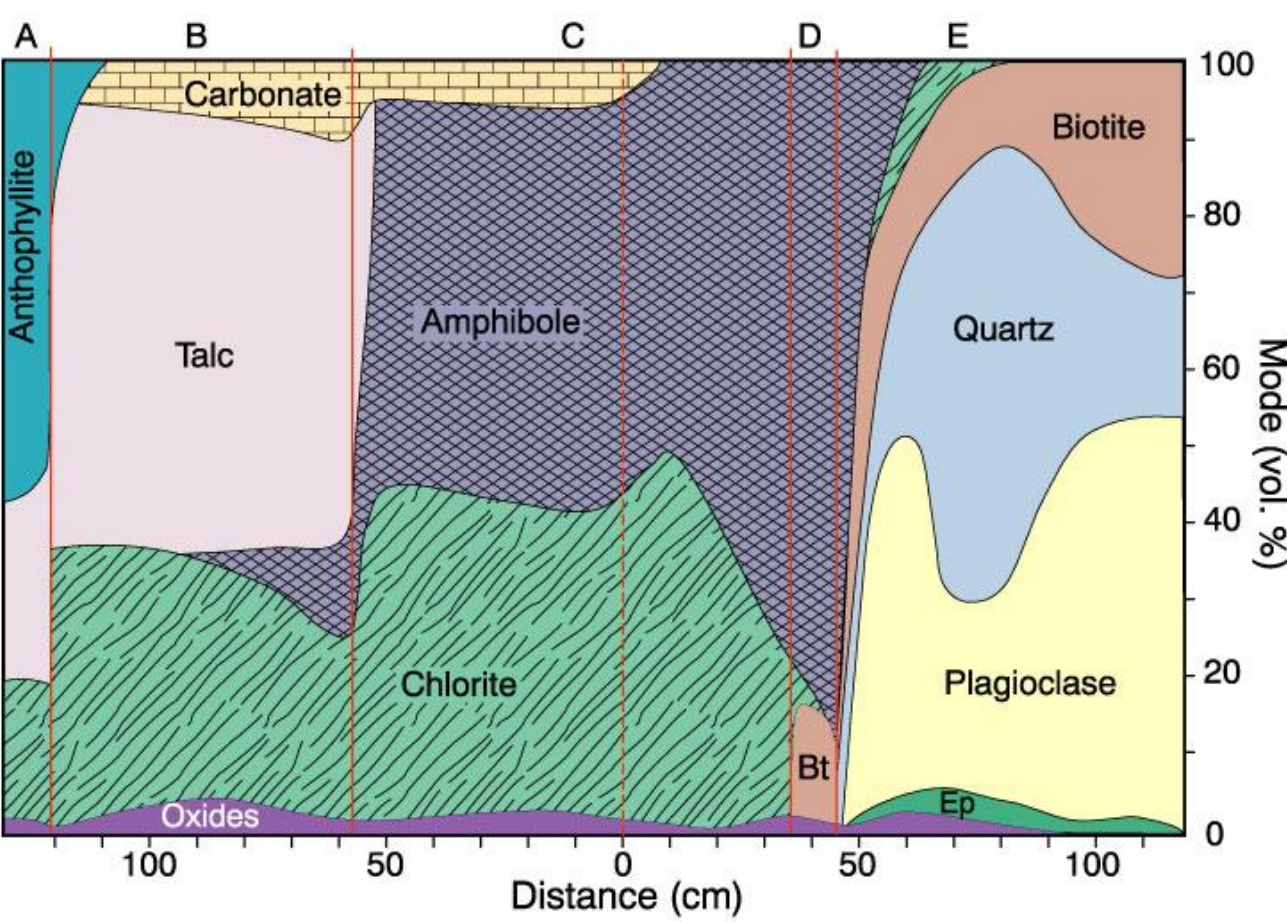
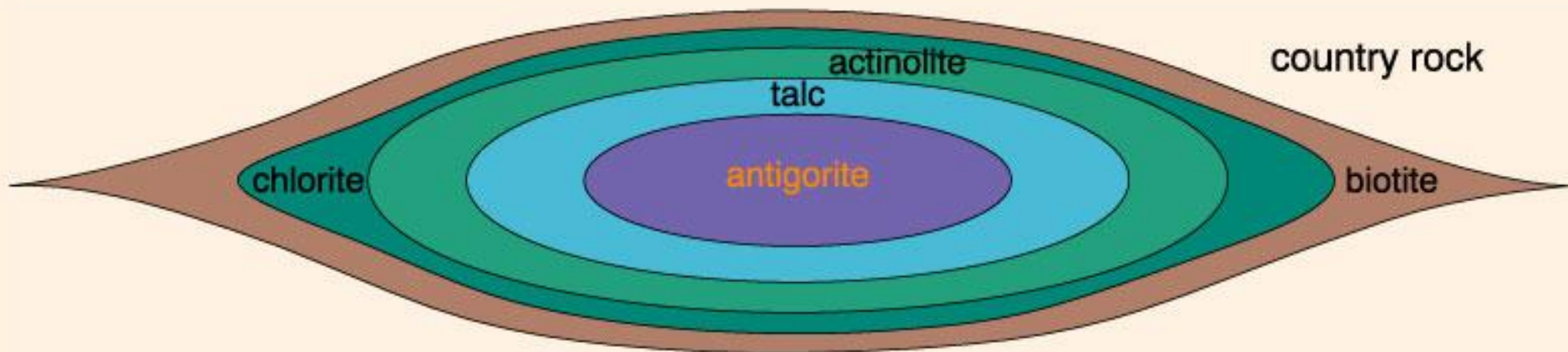
- Экспериментальная скарновая метасоматическая колонка между известняком и гранодиоритом.



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).*

- **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, магнезиальный, 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 выщелачи- вание	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

Состав гидротермальных растворов

Примеры химического состава гидротермальных растворов (мг / кг H₂O)

Компонент	Борисов (2000) Равновесие	Гричук (2000)		
		Равновесие с базальтом (модель) 300 °	Восточно-Тихоокеанское подняtie 273 °	Морская вода
Cl	39540	19630	20800	19620
C	6000	-	68.7	279
S	692	55.5	212	905
Na	20200	11060	11700	10760
K	7780	414	1010	387
Mg	0.46	-	-	1340
Ca	394	749	834	413
Si	626	306	548	2.1
Al	1.13	-	-	0.001
Fe	4.50	197	48.6	0.005
Cu	0.81	1.25	0.32	0.00025
Zn	11.8	1.2	2.6	0.001
Pb	3.48	0.062	0.38	0.00003

Борисов (2000)

Примеры комплексов некоторых рудных металлов и серы в гидротермальных растворах

Металл	Комплексы
S	$H_2S^0, HS^-, SO_4^{2-}, HSO_4^-, NaSO_4^-, CaSO_4^0, MgSO_4^0$
Fe	$FeCl^+, FeCl_2^0, FeOHCl_2^-, FeOH^+, FeOHCl^0$
Cu	$CuCl, CuCl_2^-, CuCl_3^{2-}$
Zn	$ZnCl^+, ZnCl_2^0, ZnCl_4^{2-}, ZnOH^+$
Pb	$PbCl^+, PbCl_2^0, PbCl_3^-, PbCl_4^{2-}, PbOH^+, PbCO_3^0, Pb(CO_3)_2^{2-}$
Ag	$AgCl_2^-$
Au	$AuCl_2^-, Au(HS)_2^-, Au(HS)^0$
Hg	$HgCl^+, HgCl_2^0, HgCl_3^-, HgCl_4^{2-}, HgOHCl^0, HgS_2^{2-}, Hg(HS)_2^0, HgS(HS)^-$
U	$UO_2OH^+, UO_2(OH)_2^0, (UO_2)_2(OH)_2^{2+}, UO_2SO_4^0, UO_2(SO_4)_2^{2-}, UO_2CO_3^0, UO_2(CO_3)_2^{2-}, UO_2(CO_3)_3^{4-}$
Sn	$SnF_6^{2-}, Sn(OH)_6^{2-}, Sn(CO_3)_3^{2-}, Sn(F,OH,CO_3)_{6-x}^{2-}$

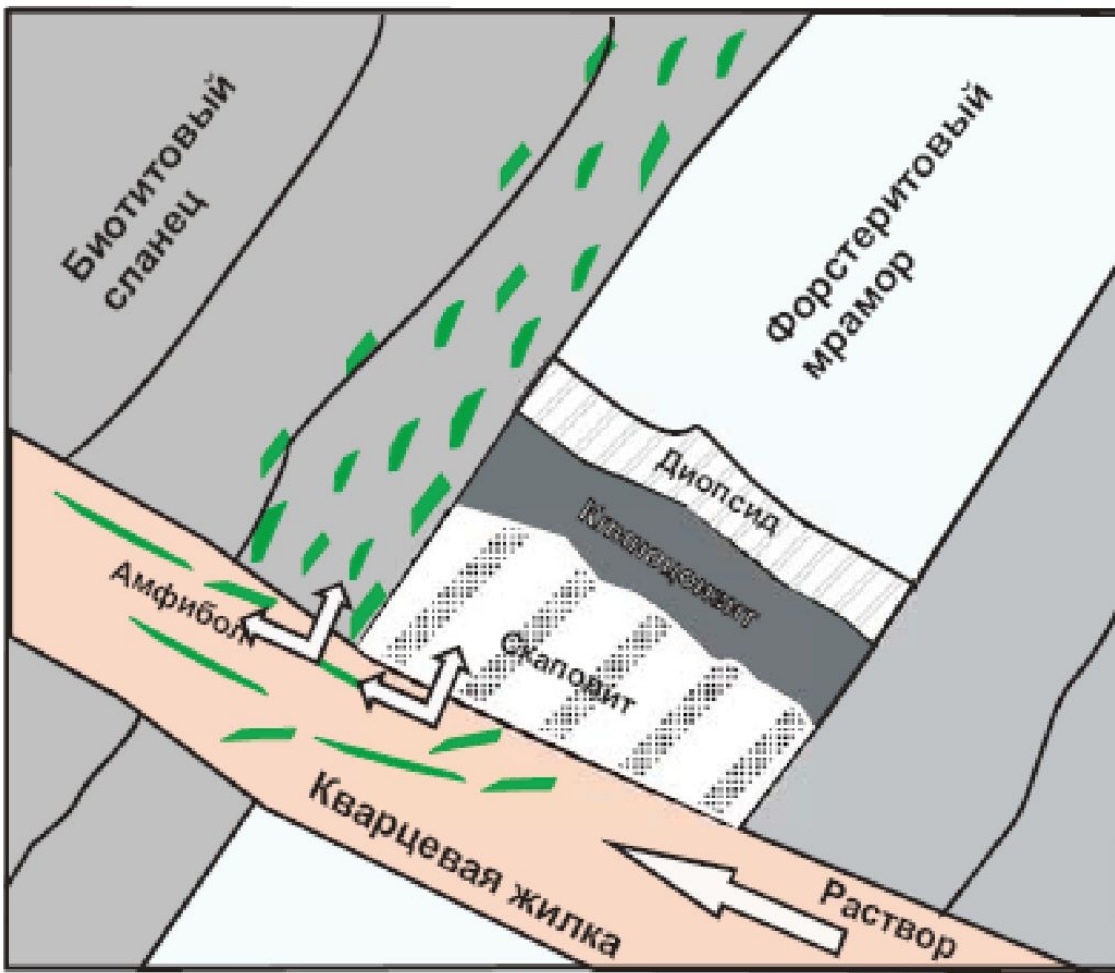
Типы метасоматической зональности

- 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 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 CO_2 из кальцифира, Al_2O_3 , Na_2O и K_2O – 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-кальцитово-актинолитовой зоны, затем клиноцоизит-актинолитовой зоны и тыловой скаполитовой зоны. Из-за высокого давления CO_2 вместо плагиоклаза формируется CO_2 -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:

$\text{Фо} + \text{Ка} \mid \text{Ди} + \text{Акт} + \text{Ка} \mid \text{Кцо} + \text{Акт} \mid \text{Ск} \leftarrow \text{Кв} \rightarrow \text{Кв} + \text{Акт} \mid \text{Акт} + \text{Би} + \text{Пл} \mid \text{Би} + \text{Пл}$ (парагенезисы)

$\text{CaO}, \text{MgO} \rightarrow \leftarrow \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O} \rhd \ll \text{CaO}, \text{MgO} \rightarrow \leftarrow \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O}$ (компоненты)

кальцифир

$\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$

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.

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):

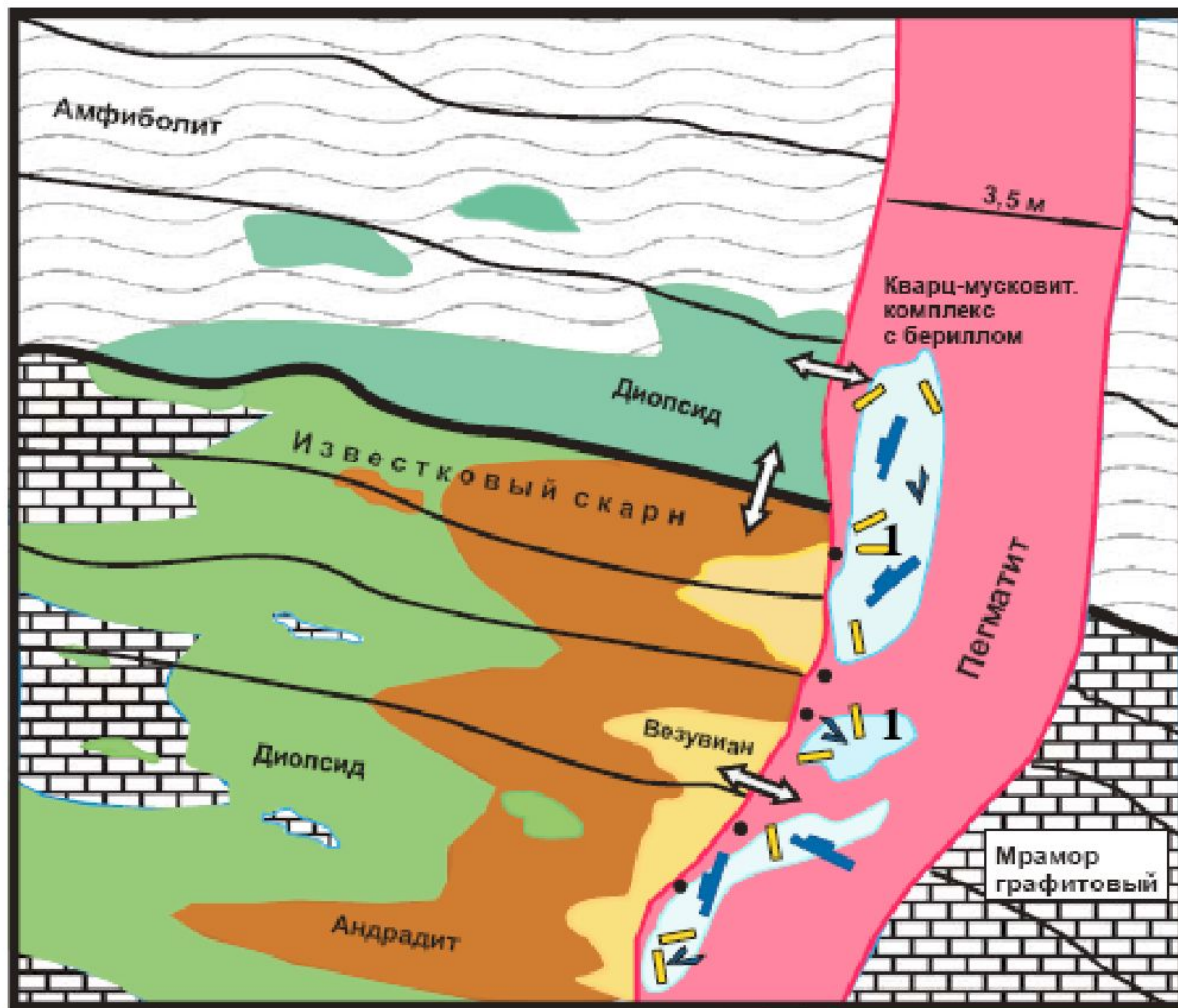
H_2O , CO_2 , S, K_2O , Na_2O , O_2 , MgO , Fe, CaO, SiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , TiO_2

- 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

Биметасоматоз

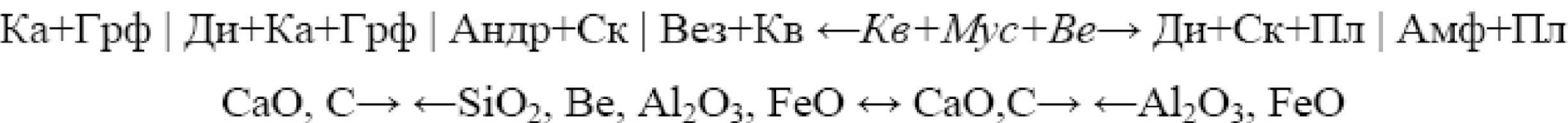
- Процесс метасоматического взаимодействия двух химически неравновесных пород, находящихся в контакте друг с другом.
- Биметасоматоз может протекать только при участии постмагматических или поровых растворов, через которые компоненты двух взаимодействующих пород перемещаются в противоположных направлениях.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



Постмагматический метасоматоз кислотной
стадии в пегматите –
развитие берилл-мусковит-кварцевого

- Экзоконтактовый метасоматоз под воздействием этих же растворов в пластах амфиболитов – графитовых мраморов с образованием известкового скарна по мраморам и зоны диопсида со скаполитом в амфиболите.
- Между пластами пород происходит биметасоматоз.
- Схема метасоматической колонки:



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 растет 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.

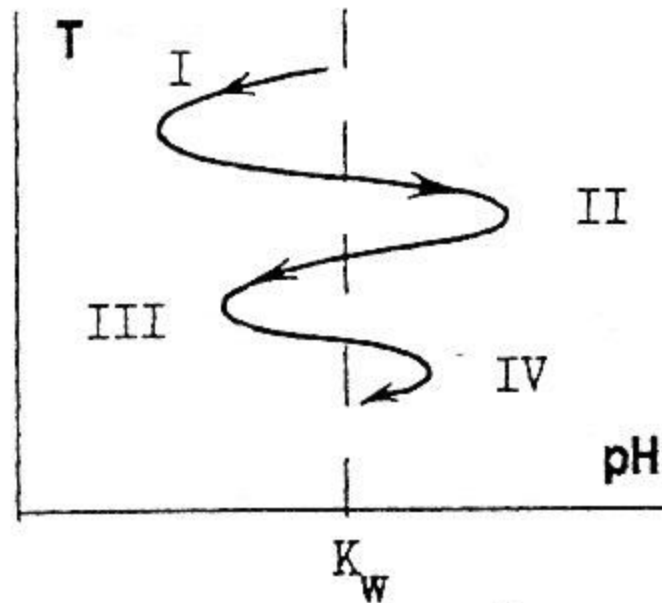


Рис.2. Схема температурно-кислотной эволюции условий метасоматоза в супракристалльных метаморфических комплексах Карельского геоблока. Пунктиром показано значение pH нейтральной точки воды. Гидротермальный цикл включает образования ранней кислотной (I), ранней основной (щелочной) (II), поздней кислотной (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°С (поздняя щелочная стадия) – урановые месторождения;
- 5. **Пропилитизация, аргиллизация** – 100-200°С (кислотная, поздняя щелочная стадия) – полиметаллические месторождения. Пропилитизация и аргиллизация развиты в приповерхностных условиях в районах активного вулканизма.

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

Состав протолита

Процесс	Температурный интервал	Группы	Алоалюмосиликатные породы					Алокарбонатные породы		Алокварциты
		Подгруппы	Высокоглинозем.	Плагийнейсы	Осн.сланцы, амфиболиты	Габбро	Гипербазиты	Доломит. мраморы	Кальцит. мраморы	Кварциты с карб.
		Классы	сланцы							
Метаморф. дифферен. + Гранитизация	650-700	1 выс-Т этап мигматиты	Плагий-мигматиты	Плагий-мигматиты	Плагий-мигматиты базификаты	Эклогитоподобные породы	Эклогитоподобные породы	Mg-скарны	Са-скарны	Ди+Пл+Кв
	650-700 растворы сниж.Р	Привнос 2 выс-Т этап Кпш-мигматиты Привнос Вынос	Na ₂ O, SiO ₂ CaO, MgO, FeO			MgO, FeO				Ди+Кпш+Кв
Анатексис	650-700	Граниты - магм.этап	Граниты	Граниты	Граниты	Плагий-клазиты	Плагий-клазиты	Сиениты Не-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 – везувин, 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.

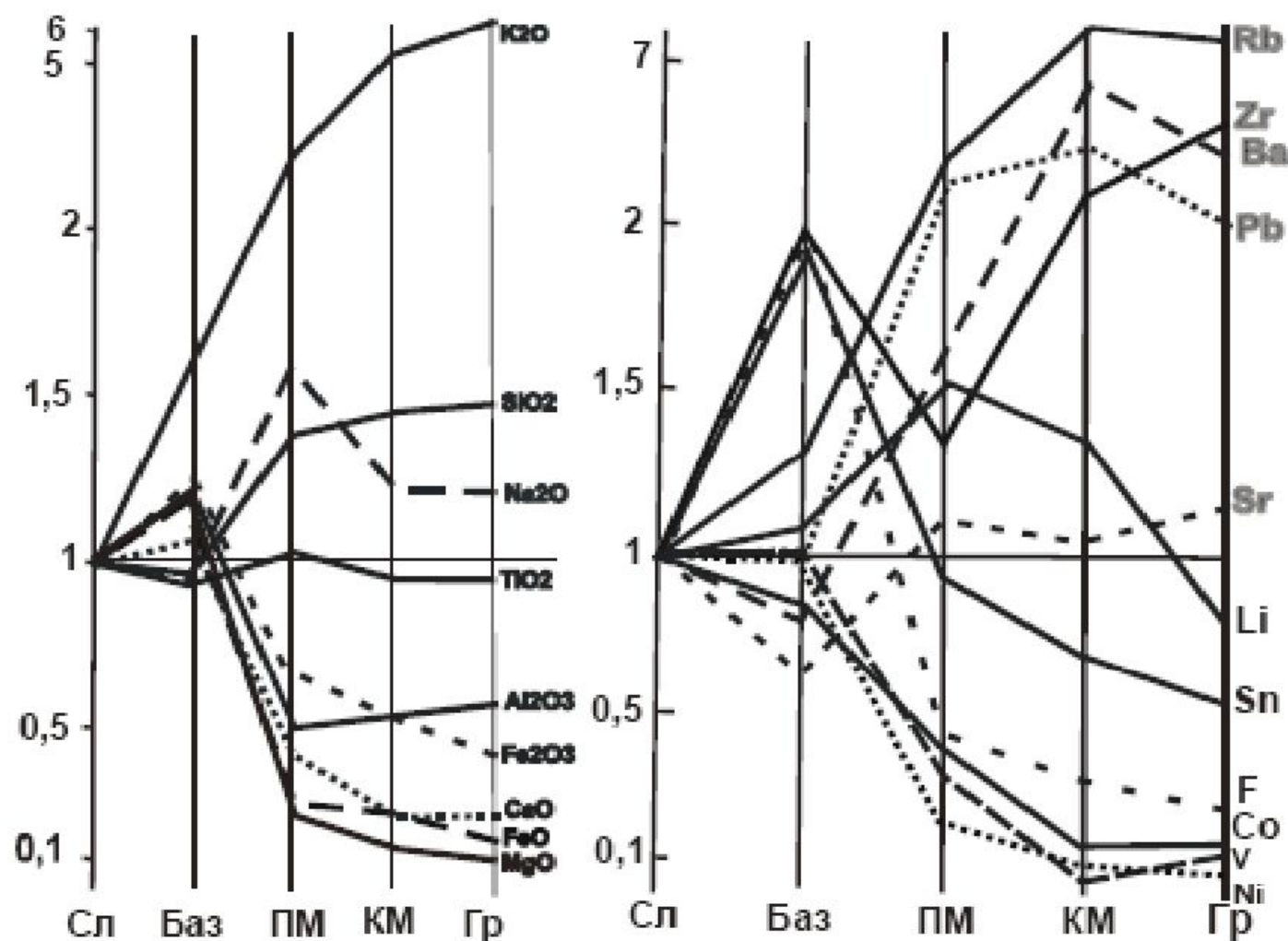


Рис. 17.3 Изменение состава двупироксенового сланца (Сл) шарьжалгайской серии при метасоматическом образовании плагиомигматитов (ПМ), калищатовых мигматитов (КМ) и базификатов (Баз). ГР – гранитогнейс Состав исходного сланца принят за единицу [Петрова, Левицкий, 1984].

Скарны

- Контактный 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-геденбергитовый **скарн**
(Дальнегорск, Приморье)

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

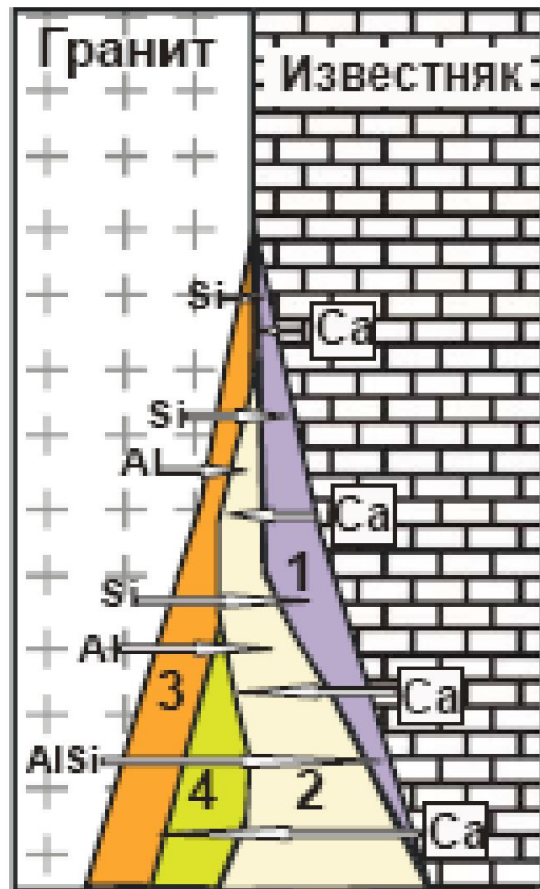


Рис. 18.2 Механизм образования диффузионного биметасоматического скарна: растворы движутся вверх вдоль контакта гранита и известняка. Экзоскарн: 1 – диопсидовый, 2 – гранатовый (андрадит-гроссуляровый); эндоскарн: 3 – ортоклаз-эпидотовая и 4 – эпидотовая зоны. Стрелки показывают встречную диффузию компонентов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

Грейзены

- К среднетемпературному этапу проявления контактово-реакционного метасоматоза (300-500°C) 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.

Гидротермальные поля океанского дна

- Новейшие исследования магматизма срединно-океанических хребтов привели к открытию приуроченных к ним гидротермальных полей черных курильщиков.
- Это массовые излияния гидротерм на дно океана типа гейзеров с образованием современных, буквально живых сульфидных построек до 60 м высотой.
- Механизм их формирования состоит в «засасывании» морских вод по трещинам в базальтах и листрическим разломам на значительную глубину, с разогревом вод и выщелачиванием из основных магматитов рудного вещества.

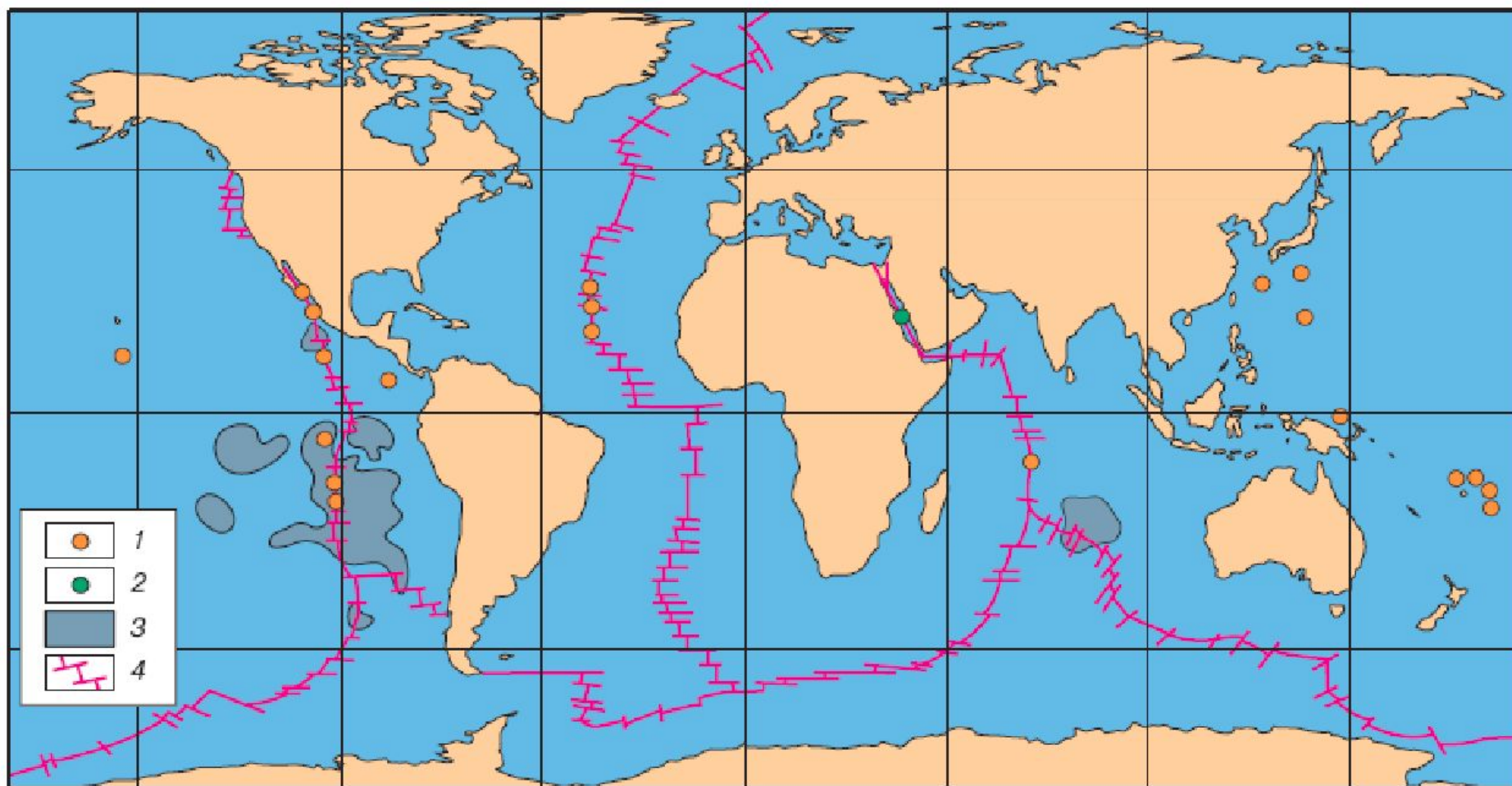
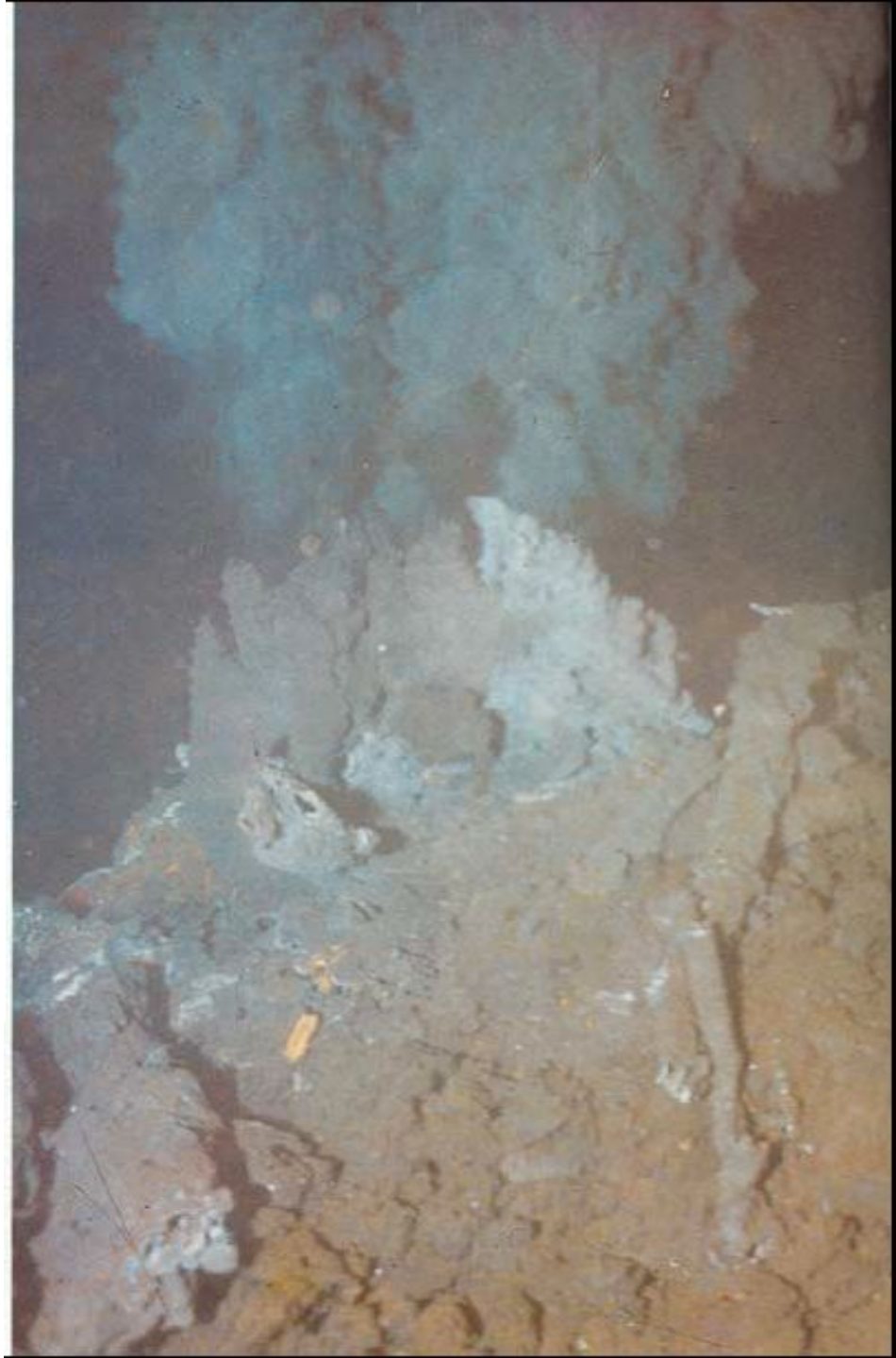


Рис. 1. Распространение современных гидротермальных построек и металлоносных осадков в океанах: 1 – гидротермальные постройки и сульфидные руды, 2 – илы с сульфидами (стратиформные залежи), 3 – металлоносные осадки (по данным Дж.П. Кеннета и С.Г. Краснова), 4 – рифтовые зоны



Рис. 2. Схема строения "черного курильщика"

Черный курильщик в Калифорнийском заливе.
 $T = 350^{\circ}\text{C}$. Извергает раствор, пересыщенный сульфидами Pb, Zn, Cu, Fe.



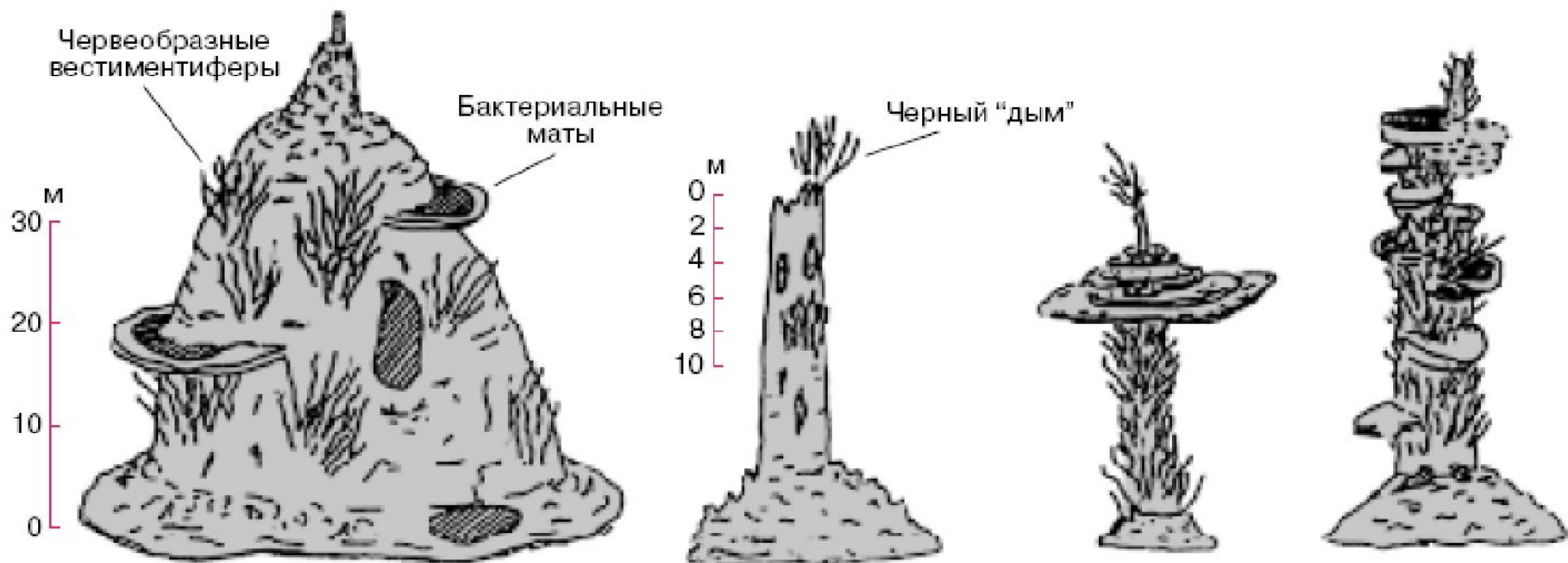


Рис. 1. Морфология высокотемпературных гидротермальных сульфидных построек [2]

Выходящие на поверхность дна гидротермальные источники имеют температуру до 250–350°C. Скорость выхода растворов на поверхность достигает 0,5–2 м/с. Непосредственно у выхода образуются крупные (высотой до нескольких десятков метров) гидротермальные постройки, имеющие форму башен, конусов, труб или столбов (рис. 1). Многие из действующих в настоящее время источников называются “черными курильщиками”, так как у выхода гидротермальных растворов из постройки образуется густая черная взвесь, состоящая из тонкодисперсных частиц рудных минералов. Постройки часто сложены массивными скоплениями сульфидов, среди которых преобладают пирит (FeS_2), пирротин (Fe_{1-x}S), сфалерит (ZnS), халькопирит (CuFeS_2). Нередко отмечаются высокие содержания Ag, Au, Tl, Cd. Концентрации рудных элементов часто достигают промышленных количеств: содержание Zn колеблется от 0,2 до 50%, Cu – от 0,2 до 20% и более. Размеры гидротермальных полей с сульфидными постройками достигают нескольких квадратных километров, а сконцентрированные в них запасы металлов оцениваются миллионами тонн.

Таблица 1. Химический состав воды “курильщиков”

	Морская вода	Восточно-Тихо-океанское поднятие		Хребет Хуан-де-Фука		
		21° с.ш.	11° с.ш.	45° с.ш.	осевая гора	
	Температура, °C					
	2	273	354	262	299	
	pH (при 25°C)					
	7,8	3,8	3,1	2,8	4,4	
	Содержание, г/кг					
	Cl	19,18	20,53	25,24	44,1	6,24
	Na	10,67	11,72	12,67	16	3,4
	SO ₄	2,68	—	—	—	—
	Mg	1,293	—	—	—	—
	Ca	0,409	0,834	2,152	4,369	0,409
	K	0,383	1,009	1,075	2,295	0,273
	SiO ₂	0,0096	1,172	1,166	1,442	0,811
	CO ₂	0,101	0,252	—	—	12,543
	Содержание, мг/кг					
	H ₂ S	—	225	279	63,8	613
	Fe	—	48,6	579	916	0,67
	Mn	—	55	161	233	7,8
	Zn	—	2,6	0,33	34	0,144
	Cu	—	0,0013	—	0,089	0,025
	Pb	—	0,038	0,0056	0,203	0,021

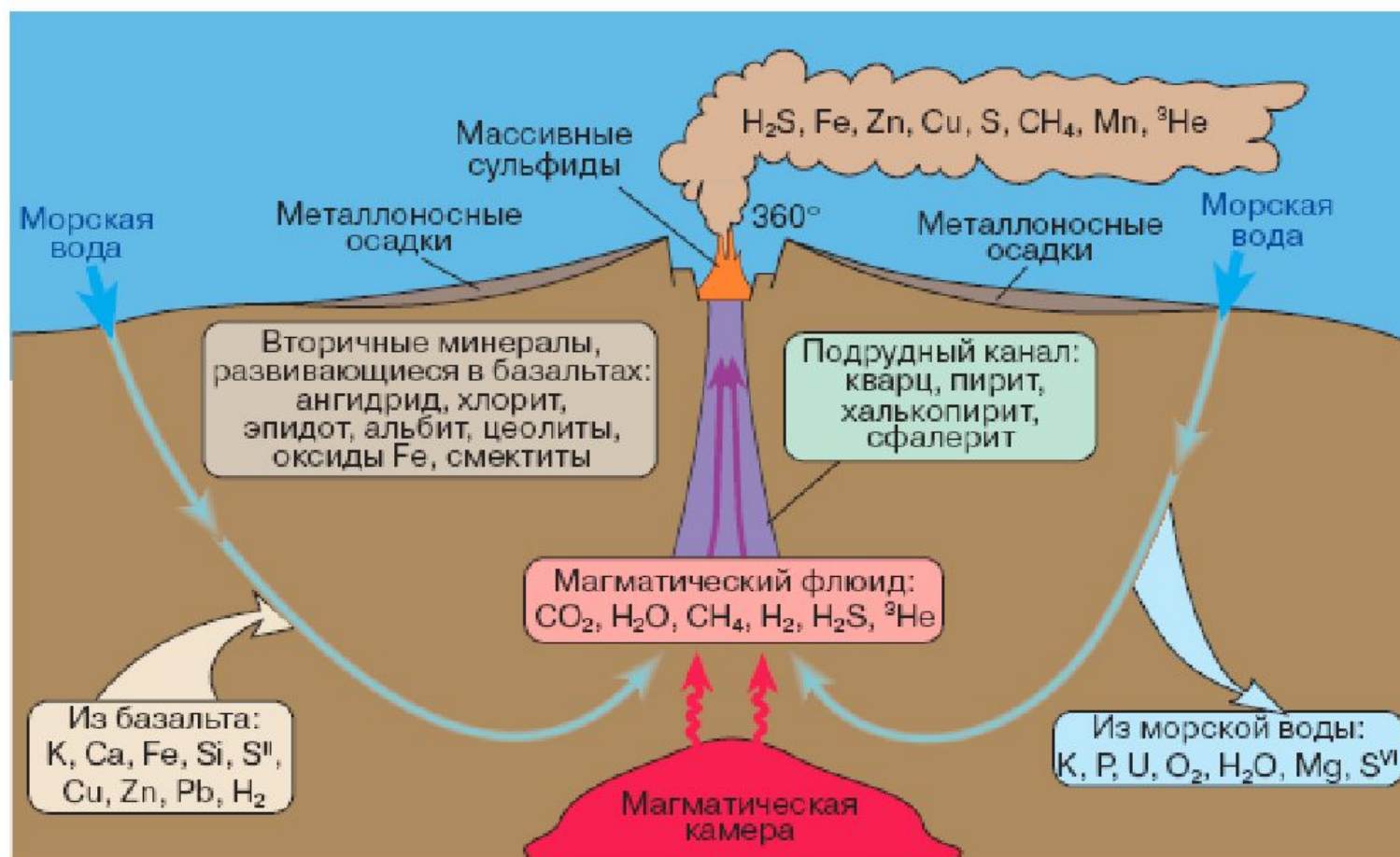


Рис. 4. Схема геохимических процессов в гидротермальной системе срединно-океанического хребта (по данным Д.В. Гричука). Показаны соединения, которые извлекаются из базальтов фильтрующей морской водой, а также флюиды, поступающие в гидротермальную систему из магматической камеры, находящейся под рифтом срединно-океанического хребта

МЕТАЛЛОНОСНЫЕ ОСАДКИ

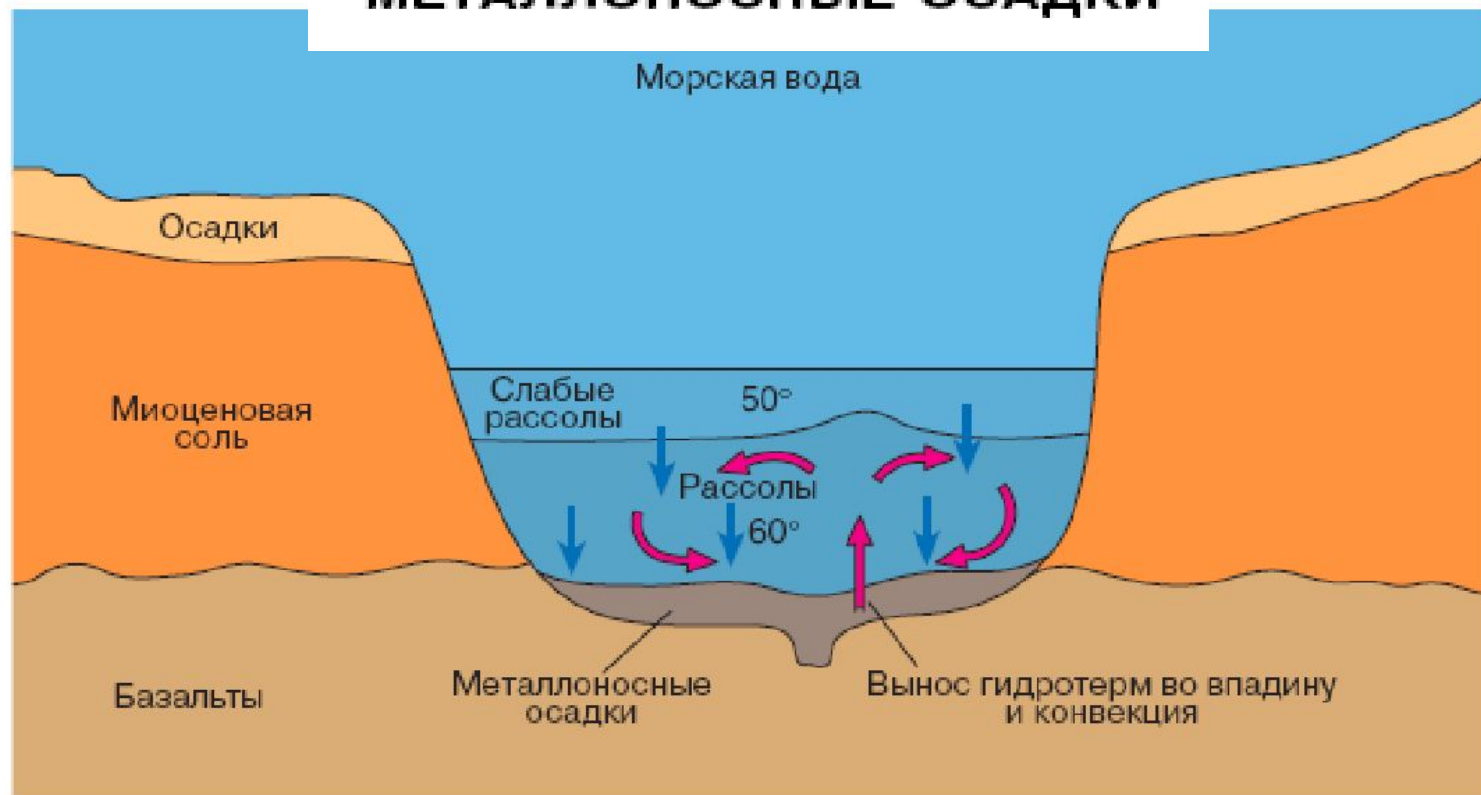


Рис. 5. Формирование металлоносных осадков во впадине Атлантик II Красного моря (по данным С.Г. Краснова)

По данным новейших исследований, за последние 3600 лет во впадине Атлантик II накапливалось железа 1780 т/год, марганца 742, цинка 110, меди 23 т/год. Нетрудно представить, какой огромный объем руд мог сформироваться только в одной этой впадине, протягивающейся вдоль простирания оси спрединга Красного моря всего лишь на 14 км при ширине 5 км.

ЖЕЛЕЗО-МАРГАНЦЕВЫЕ КОНКРЕЦИИ



Рис. 2. Морфология сложно построенной железо-марганцевой конкреции из Тихого океана. 1/10 натуральной величины. Фото В.А. Акимцева

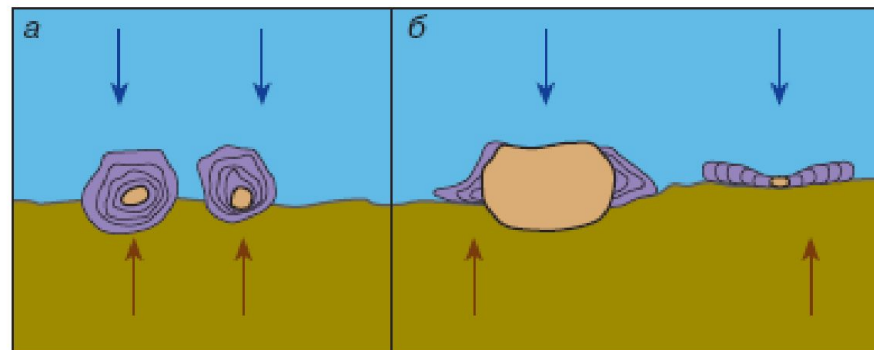


Рис. 3. Морфология железо-марганцевых конкреций в зависимости от характера привноса металлов [1]: а – доминирует привнос из морской воды, б – преобладает привнос из иловых вод

Основными металлами в конкрециях являются Mn (среднее содержание – 27,5%), Ni (1,26%), Cu (1,03%) и Co (0,25%), имеются также Mo, Zn, Pb, редкоземельные элементы. Потенциальные запасы металлов на некоторых площадях распространения конкреций в экваториальной зоне Тихого океана оцениваются в 6000 млн т Mn, Ni – 300 млн, Cu – 250 млн, Co – 100 млн т [1]. Если только 10% конкреций, залегающих на дне Мирового океана, оказались бы экономически выгодными для разработки, то запасов металлов в них хватило бы на сотни лет при современном уровне потребления.

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 ($K_d \text{ минерал/расплав} \ll 1$).



- 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.