

Основные минералообразующие процессы

Эндогенные (*гипогенные*) – процессы, протекающие в недрах Земли (эндо – внутри, гипо – низко, глубоко) при высоких и повышенных температурах и давлениях

Экзогенные (*гипергенные*) – процессы, протекающие на поверхности или вблизи поверхности Земли (экзо – снаружи, гипер – над, сверху) под влиянием свободного O_2 , CO_2 атмосферы, воды, ветра, солнечной энергии. Для них характерны низкие T и P .

Эндогенные процессы

- **Магматогенные**, связанные с кристаллизацией магм и постмагматическими процессами
- **Метаморфические**, связанные с преобразованием пород разного генезиса под воздействием повышенных T , P и участии флюидов
- **Гидротермальные**, связанные с деятельностью нагретых вод

Магматогенные процессы

- Магматическая кристаллизация
- Вулканические возгоны
- Пегматитовый процесс
- Контактво-метасоматический процесс

Магматическая кристаллизация

Магма – это природный, чаще всего флюидно-силикатный расплав

Состав магмы

~ 90% компонентов магматического расплава составляют:

SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO ,
 CaO , Na_2O , K_2O

Летучие компоненты:

H_2O , CO_2 , B , P_2O_5 , F , Cl и др.

Их присутствие снижает температуру кристаллизации магмы



Силикаты и
алюмосиликаты Fe, Mg,
Ca, Na, K

По содержанию в расплаве кремнезема магматические породы делят на:

- кислые (>64%)
- средние (53-64%)
- основные (44-53%)
- ультраосновные (<44%)

По содержанию щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) выделяют ряд щелочных пород

Основные минералы:

- шпинелиды
- оливин
- пироксены
- амфиболы
- биотит
- К-На полевые шпаты
- плагиоклазы, кварц.

Формы выделения минералов:

полиминеральные зернистые агрегаты; вкрапленники.

Интрузивная кристаллизация

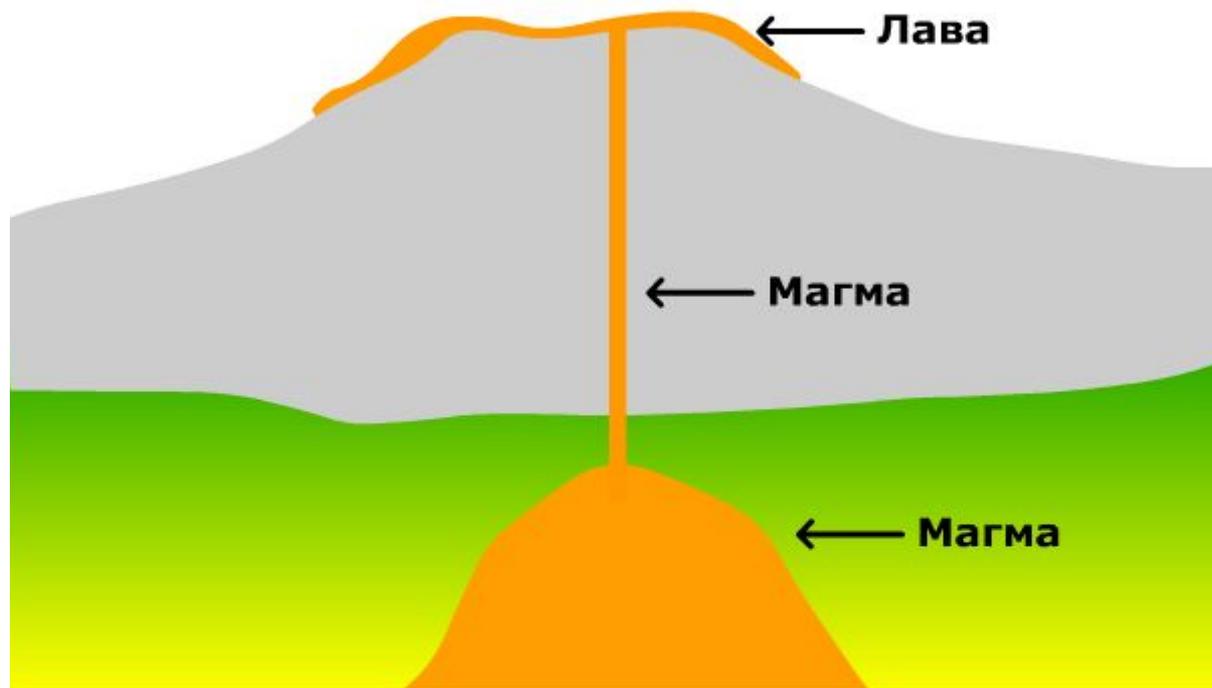
происходит при остывании расплава в недрах Земли в присутствии летучих компонентов, удерживаемых в расплаве за счет давления

$T = 600 - 1350^{\circ} \text{C}$

Эффузивная кристаллизация

Происходит при излиянии расплава на поверхность, что приводит к потере летучих компонентов и повышению температуры

$T = 1000 - 1600^{\circ} \text{C}$



Скорость охлаждения и размер зерен





Гранит

интрузивная порода



Риолит

эффузивная порода

Вулканические возгоны

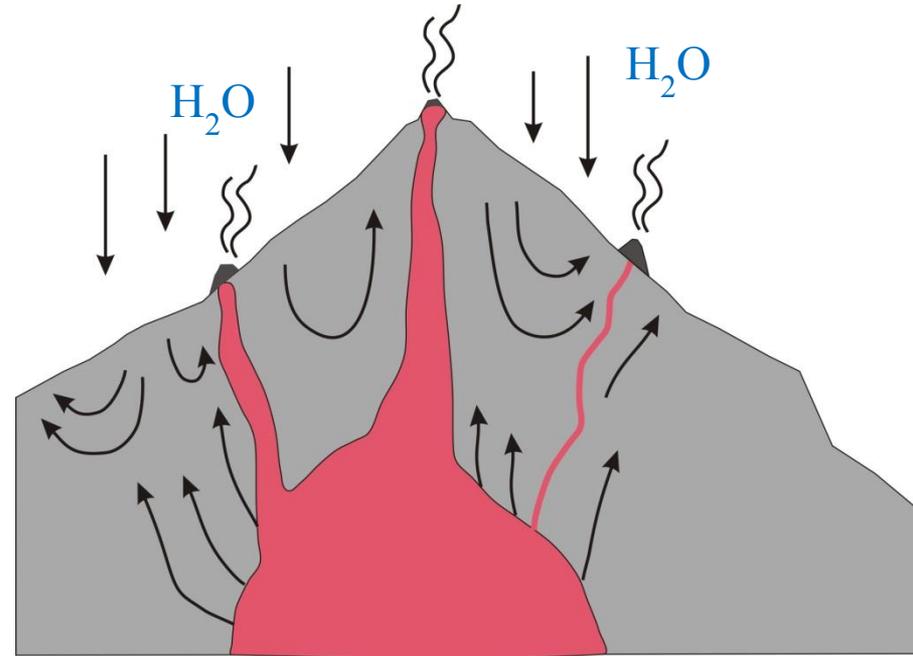
Летучие компоненты

(H_2O , CO_2 , P_2O_5 , HCl , NH_4Cl , H_2S)
отделяются от магмы и по системе трещин поднимаются в область разгрузки (на земную поверхность)

Кристаллизация происходит

- при остывании газов
- в результате реакций газов со встречными парообразными продуктами вымывания из пород поверхностными водами
- при взаимодействии газов между собой.

$T=100-500^\circ\text{C}$



Характерные минералы:

- сера, галит, сильвин,
- нашатырь, гематит, гипс,
- сульфиды – пирит, киноварь, реальгар, аурипигмент и др.



Формы выделения минералов:

- корочки, налеты,
- натечные агрегаты, мелкокристаллические друзы и агрегаты,
- землистые массы

Пегматитовый процесс

Магматическая гипотеза

- При остывании магмы в недрах земли (**интрузивная кристаллизация**), летучие компоненты не имеют возможности покинуть расплав, и в ходе остывания постепенно отжимаются в еще не закристаллизовавшуюся его часть.
- Образуется **остаточный силикатный расплав, обогащенный летучими компонентами** H_2O , CO_2 , P_2O_5 , HCl , NH_4Cl , H_2S и др. (а также редкометальными и редкоземельными элементами, не вошедшими в состав породообразующих минералов при магматической кристаллизации).
- Под давлением летучих веществ остаточный расплав проникает по трещинам в краевые части материнской интрузии или во вмещающие породы, где и происходит его кристаллизация.



Пегматитовые жилы



Разновозрастные пегматитовые жилы в амфиболитах

Летучие компоненты изменяют характеристики расплава:

- Понижают температуру кристаллизации, в результате чего расплав становится эвтектическим.
- **Эвтектика** – совместная одновременная кристаллизация двух минералов. Это приводит к образованию **графических сростаний** этих минералов (при кислом составе расплава это полевой шпат и кварц)
- Понижают вязкость, делают его легкоподвижным, вследствие чего возможно образование крупных



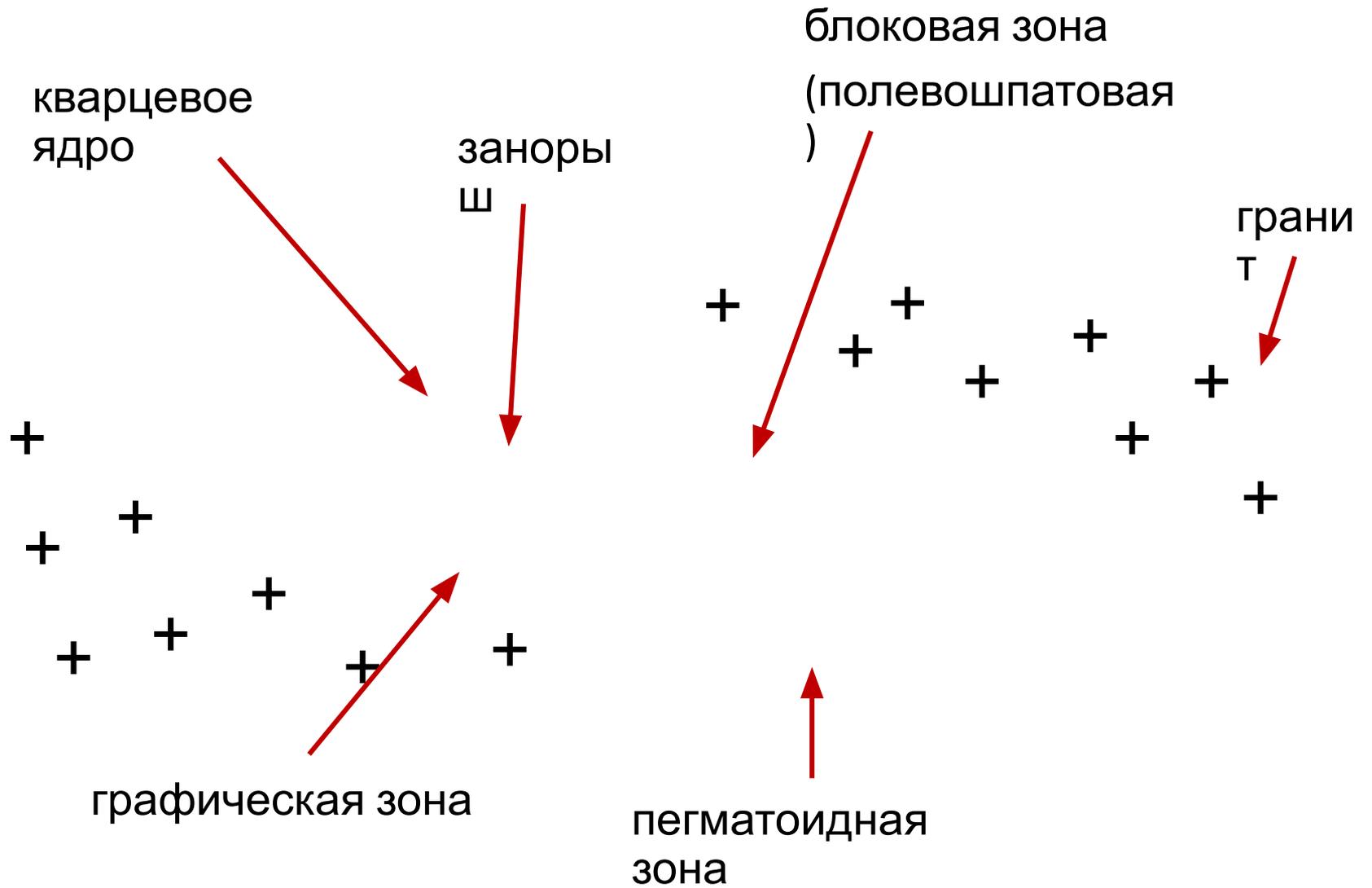


Схема строения пегматитовой жилы

- Глубина формирования пегматитов от 1,5-2 до 16-20 км
- Температура кристаллизации минералов от 800-500°C
- Процесс формирования пегматитов начинается с отделения остаточного магматического расплава, обогащенного летучими компонентами

Характерные минералы

для гранитных пегматитов:

- К-На полевые шпаты
- плагиоклазы
- кварц
- биотит
- мусковит

в небольшом
количестве

- топаз
- турмалин
- берилл
- флюорит
- апатит

Формы выделения минералов:

- графические срастания
- мелкозернистые
- крупнозернистые агрегаты
- гигантозернистые агрегаты
- друзы кристаллов

Контактово-метасоматические процессы

Скарнообразование

Процесс минералообразования происходит на контакте двух сред:

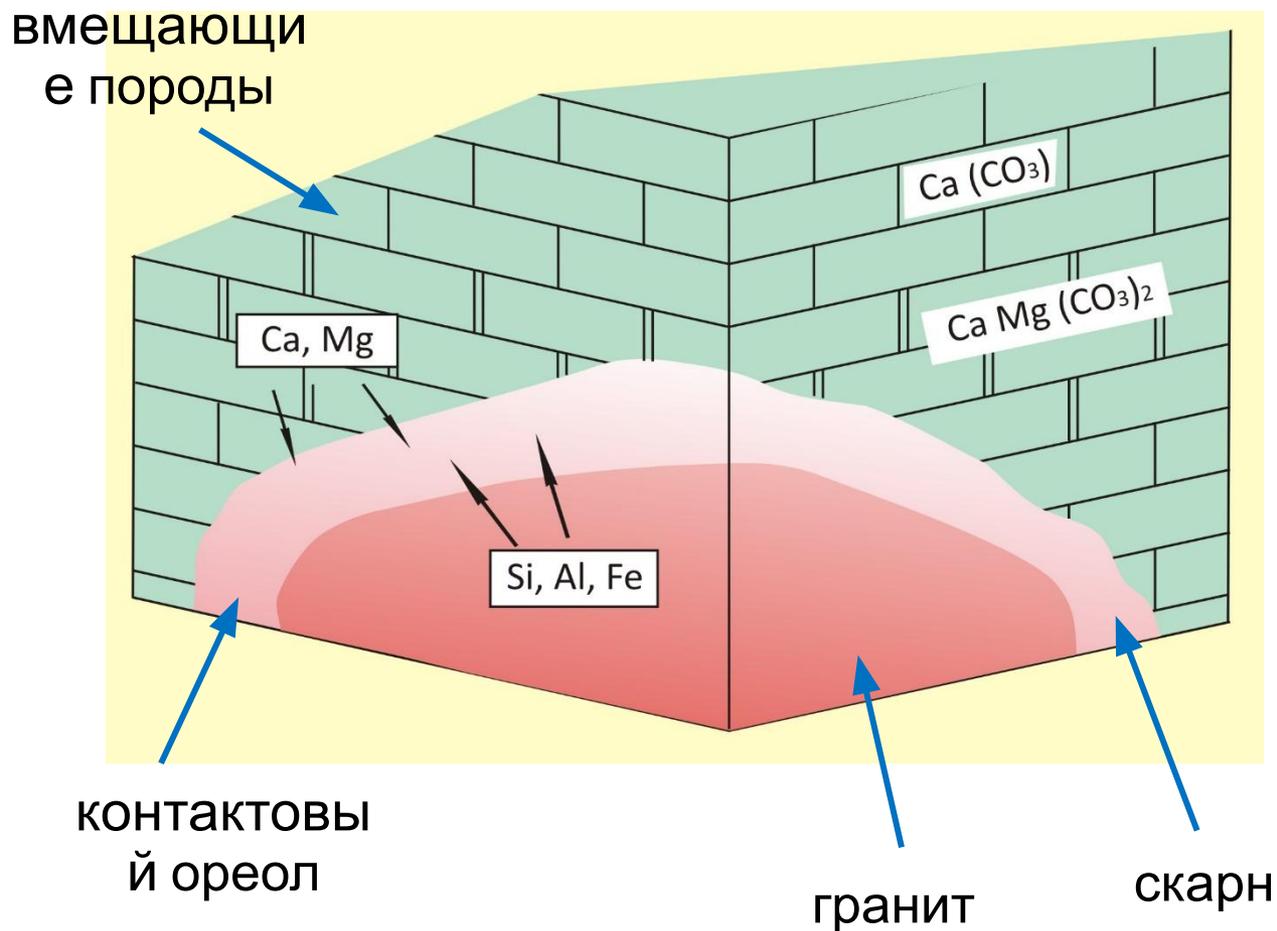
кристаллизующегося **силикатного расплава** и **отличных** от него **по химическому составу** вмещающих пород

В зоне контакта происходит

- Прогрев вмещающей толщи
- Обмен компонентами между двумя средами путем **метасоматоза**

Метасоматоз - процесс растворения первичных минералов и осаждение новых, причем во время преобразования породы находятся в твердом состоянии.

Образование скарна на контакте гранита и карбонатных пород



В приконтактовой части происходит активный обмен компонентами:

со стороны гранитного массива привносятся **Al, Si, Fe**

со стороны карбонатных пород - **Ca, Mg**

В зависимости от состава вмещающих карбонатных пород образуются скарны двух типов:

- **известковые** – образуются на контакте с известняками, мраморами (Ca CO_3), среди вновь образованных минералов преобладают силикаты кальция
- **магнезиальные** – образуются на контакте с доломитами, доломитовыми мраморами ($\text{Ca Mg} [\text{CO}_3]_2$), среди вновь образованных минералов преобладают силикаты магния, или Ca и Mg.

Основные образующиеся минералы:

для известковых скарнов

- гранаты андрадит-гроссулярового ряда
- пироксены (диопсид-геденбергит)
- эпидот
- магнетит
- амфиболы (тремолит) и др.

Формы выделения минералов:

- сплошные массы
- зернистые агрегаты
- друзы кристаллов





Железорудный скарн

Друза кристаллов кварца с
эпидотом



Mibladen ... Дар ... ский Д И 2010

Железорудный скарн

Друза кристаллов андрадита и магнетита с
эпидотом

Метаморфические процессы

Метаморфизм (греч. metamorphoómai – подвергаюсь превращению, преображаюсь) – это процесс твердофазного минерального и структурного преобразования горных пород под воздействием температуры и давления, в присутствии флюидов.

В зависимости от способа изменения P и T выделяется несколько основных видов метаморфизма:

- Ударный (космогенный, импактный)
- Региональный
- Контактный
- Дислокационный (динамометаморфизм)

Ударный метаморфизм

Это процесс преобразования горных пород и минералов, происходящий в момент падения на Землю крупных метеоритов

Основные факторы:

- высокое пиковое давление до 1,5 мбар
- высокие температуры
- мгновенность проявления

При ударном метаморфизме происходит дробление минералов, разрушение их кристаллических решеток, плавление минералов и пород

Характерные минералы

- Алмаз
- Высокобарические фазы SiO_2 коэсит
СТИШОВИТ и пр.



Ударный кратер Чиксулуб в Мексике.
Диаметр 170 км. Возраст 65 млн. лет.



Импактная брекчия. Состоит из обломков осадочных и кристаллических пород и почти не содержит стекла

Региональный метаморфизм

Происходит при погружении пород любого генезиса (осадочного, магматического и пр.) на глубину, в область повышенных температур и давлений.

Процесс затрагивает значительные объемы земной коры и распространен на больших площадях.

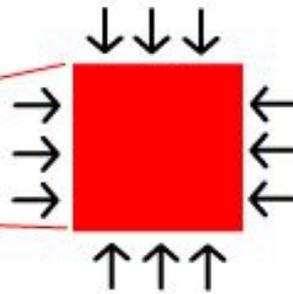
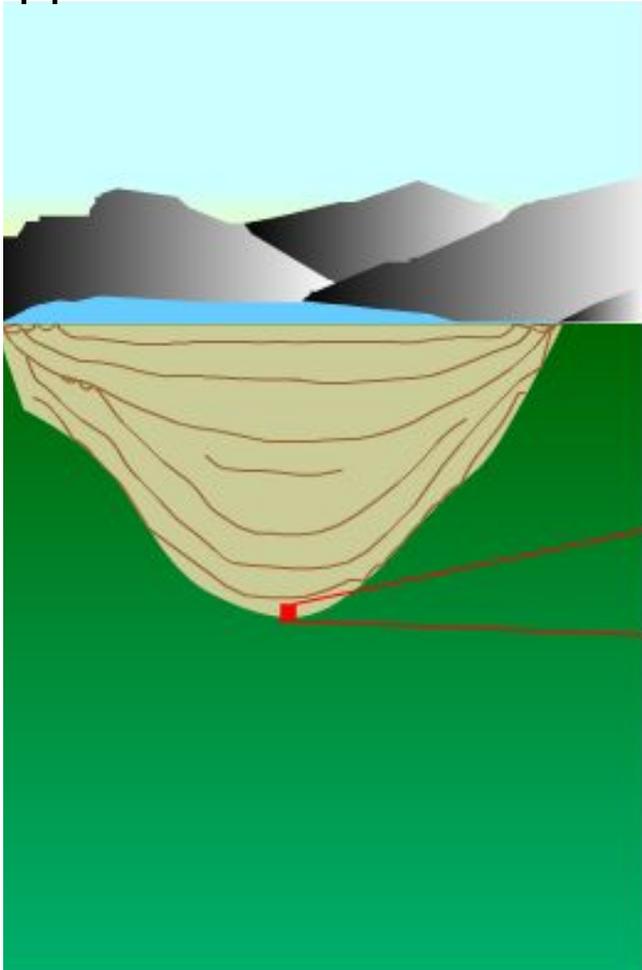
Основные факторы преобразований

- Температура
- Давление (литостатическое)
- Флюидный режим
(CO_2 , H_2O)

Ограничен температурой плавления пород ($\sim 1000^\circ\text{C}$)

которая зависит от их химического состава и степени насыщенности водой

Литостатическое давление – всестороннее давление



Наиболее ранние
слои осадков
погребены под
многокилометровой
толщей более
поздних осадков

Давление
увеличивается с
глубиной
захоронения

Это приводит к
сжатию осадков

Для определения степени метаморфизма выделяют P-T области устойчивости главнейших минеральных ассоциаций – **фа́ции метаморфизма**

Общая направленность изменений

С ростом T и P возникают минералы с **более плотной структурой** и последовательно меньшим содержанием воды в их структуре

Упрощенно выделяют фа́ции

- низких
- средних
- высоких степеней метаморфизма

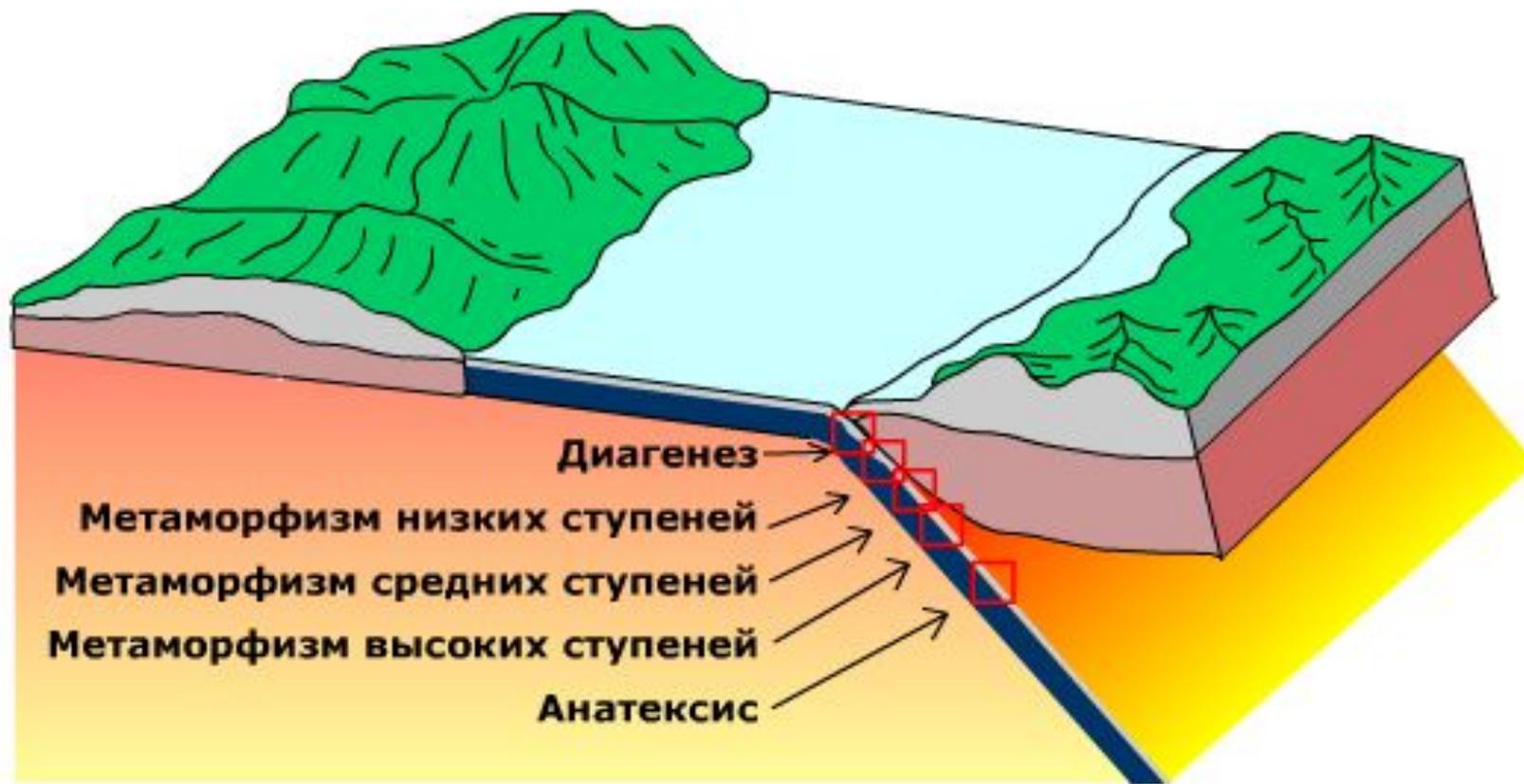
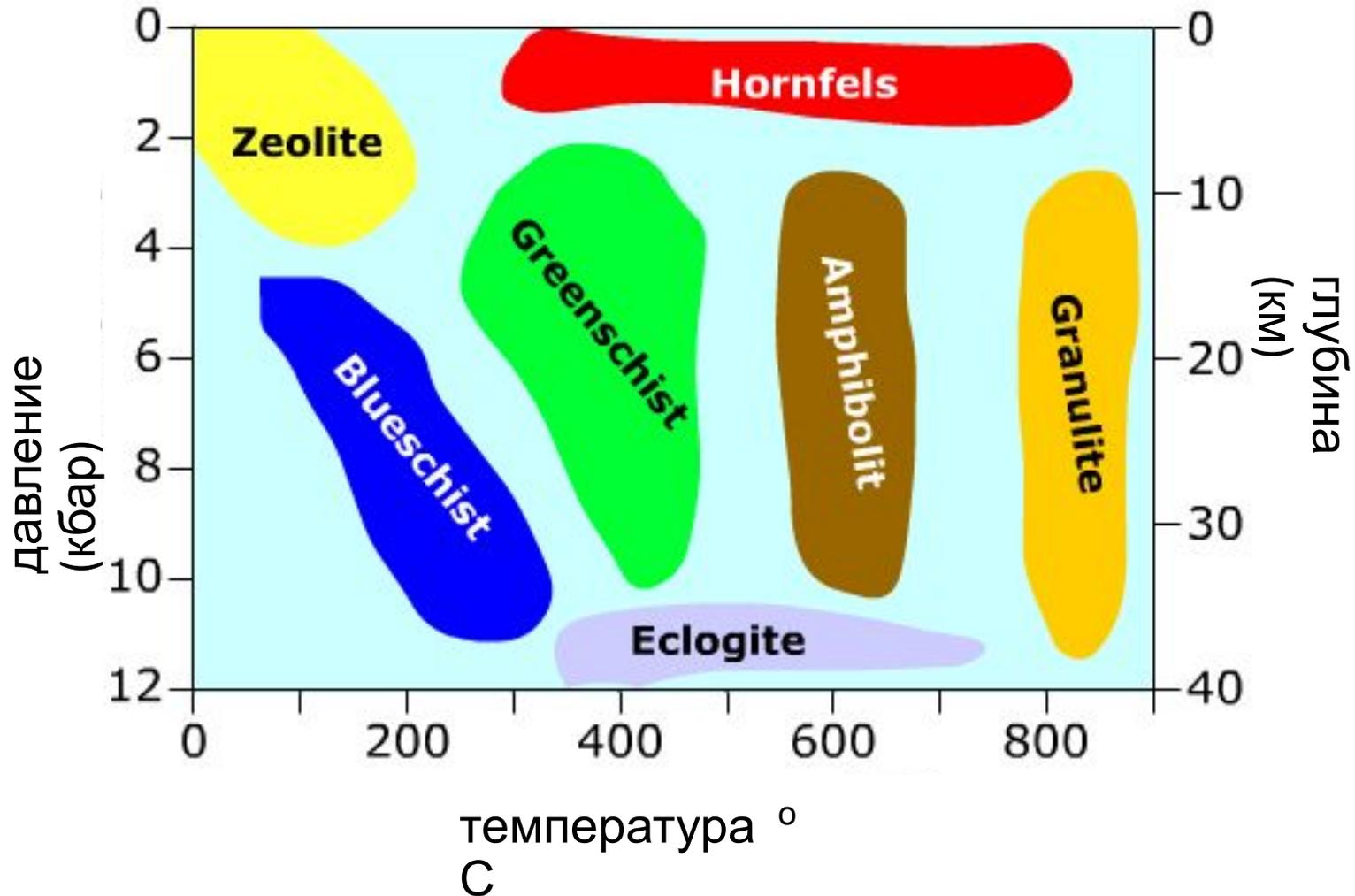
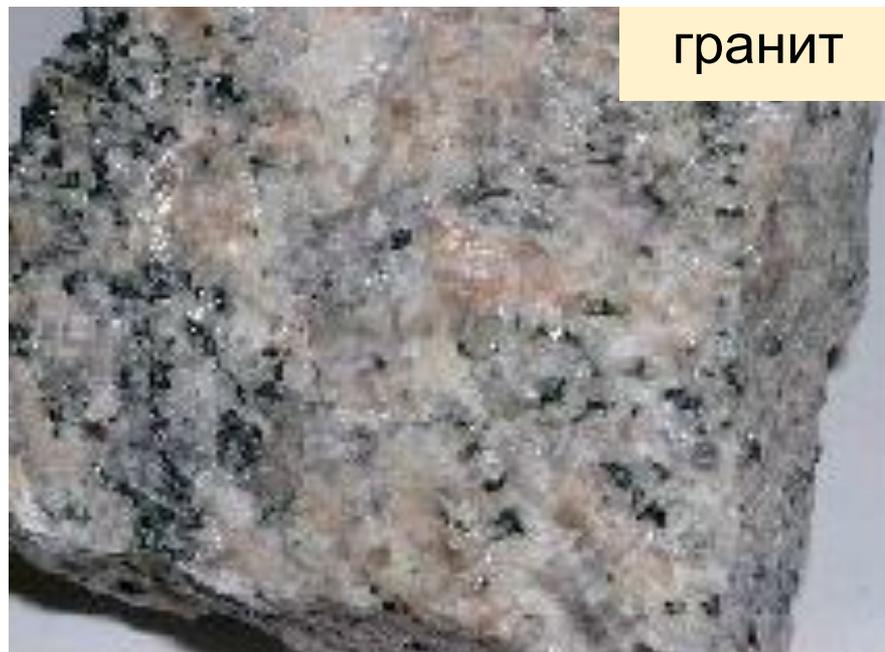


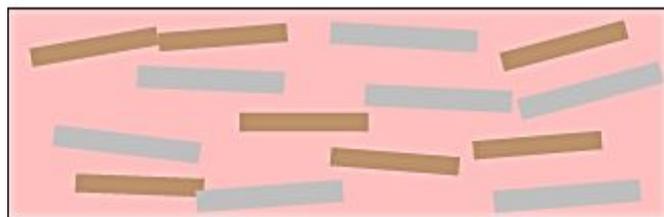
Схема фаций метаморфизма



гранит



Однородная
текстура



Гнейсовидная
текстура



Гранито-
гнейс

Динамометаморфизм

Проявляется в сравнительно узких зонах крупных разломов при тектонических подвижках



Основной фактор преобразований

- Давление, в частности **стресс** – напряжение сжатия, ориентированное в одном направлении
- Температура играет второстепенную роль

Преобразование пород

- раздробление, истирание (брекчии, катаклазиты, милониты, ультрамилониты)
- аморфизация (гиаломилониты)
- зеркала скольжения





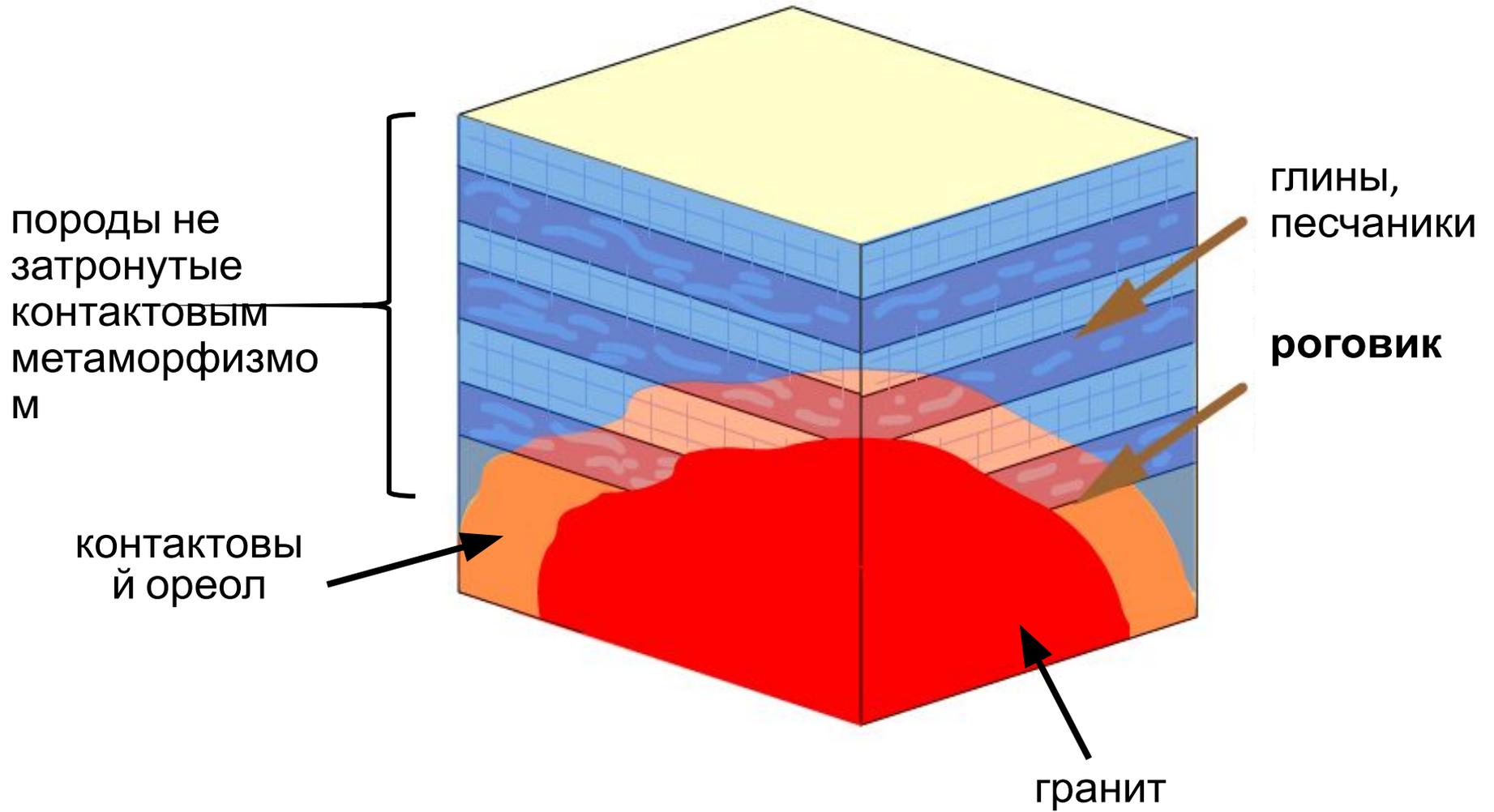
Контактовый метаморфизм

Проявляется при внедрении **силикатного магматического расплава** в породы, **мало отличающиеся от него по химическому составу** (песчаники, глинистые сланцы и др.)
В зоне контакта

- происходит прогрев вмещающих пород
- из-за близости хим. состава двух контактирующих сред не происходит обмена компонентами (метасоматоза)

Основной фактор преобразований – температура

(450-800 °C)



Гидротермальные процессы

Гидротермальные процессы — эндогенные геологические процессы образования и преобразования минералов и руд, происходящие в земной коре на средних и малых глубинах с участием горячих водных растворов при высоких давлениях.

В результате гидротермальных процессов происходит формирование рудных жил и рудных месторождений

$$T = 30-450^{\circ} \\ C$$

Источники гидротермальных растворов

- **Магматогенные воды** – гидротермальные растворы обособляются по мере остывания кристаллизующейся магмы на последних этапах образования магматических пород
- **Метаморфогенные воды** – высвобождение воды из осадочных и прочих пород в ходе метаморфизма, при погружении их на глубину
- **Метеорные воды** – поверхностные воды, просочившиеся на глубину и нагретые за счет тепла магматических тел

Состав гидротермальных растворов

- Первоначальный химический состав зависит от источника воды
- Циркулируя в земной коре по трещинам и пустотам, они могут изменять его, взаимодействуя с встречающимися породами

Гидротермальными растворами хорошо переносятся:

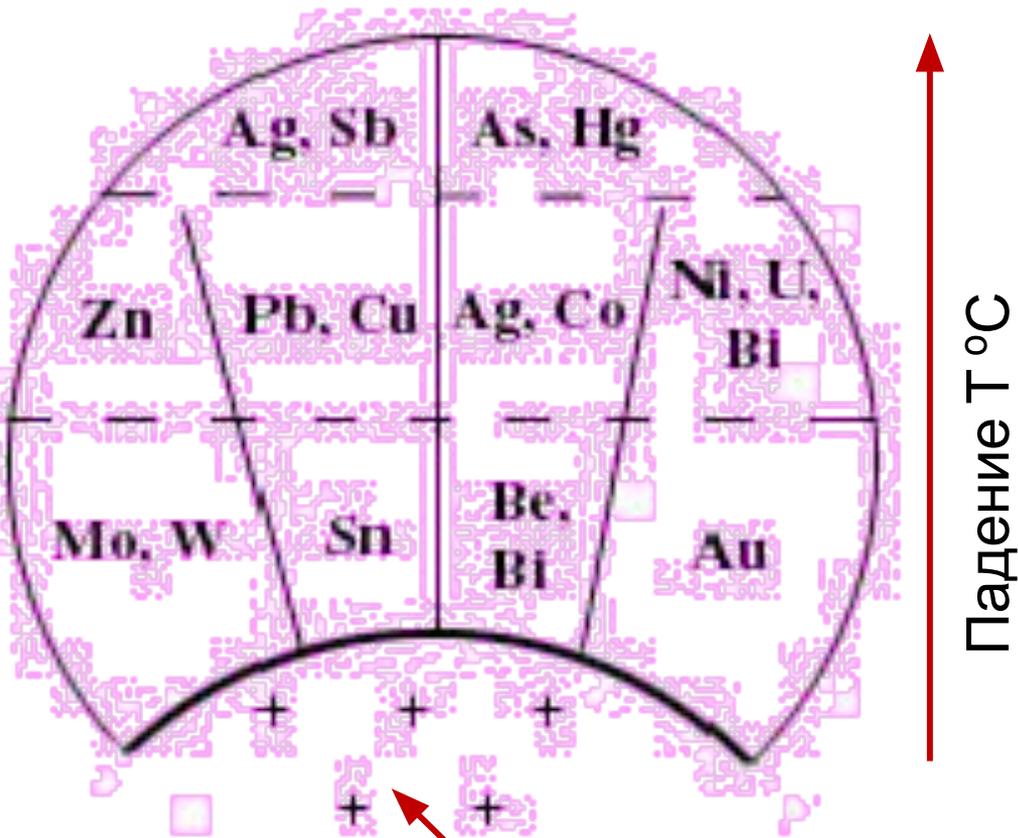
Si, Cu, Pb, Zn, Hg, Fe, Au, As, Mo, Ca, K, Na, Mg и пр.

- плохо переносится глинозем

Минералы отлагаются из раствора:

- при его остывании
- при падении давления
- при изменении Eh и Ph среды

Схема минерализации жил по мере их удаления от источника растворов и снижения их Т

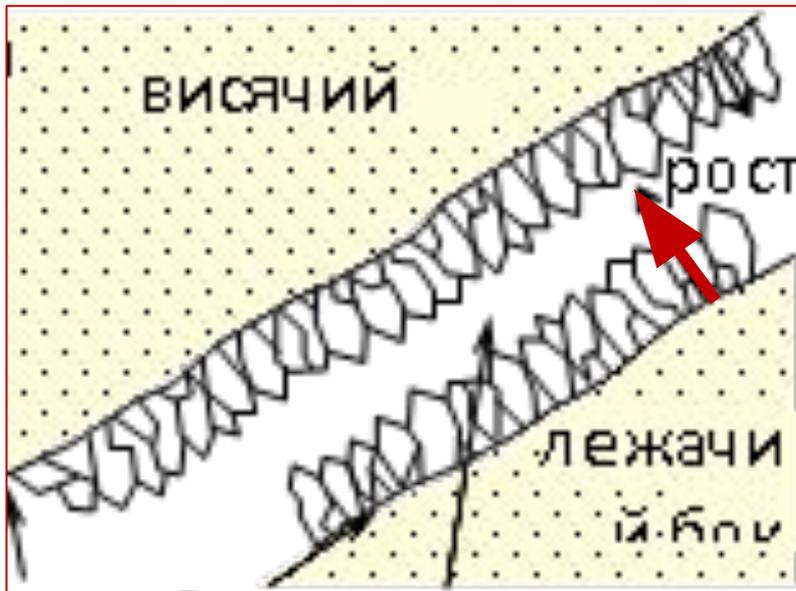


Гранитная интрузия

Выделяют жилы

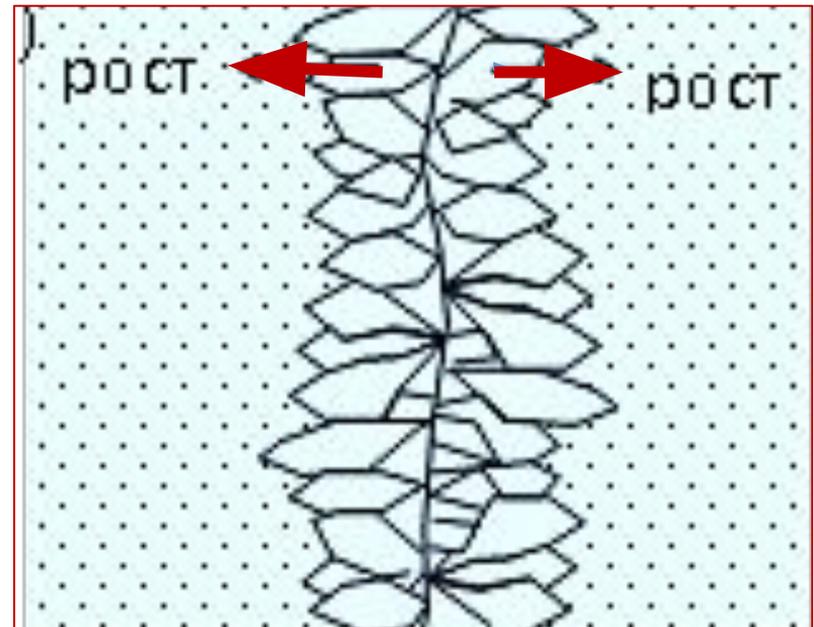
- Высокотемпературные 300–450 °С
- Среднетемпературные 150–350 °С
- Низкотемпературные ниже 200 °С

Схемы строения гидротермальных жил



осевая
часть

жила выполнения
открытой трещины



закрытой трещины
(метасоматическая)



Гидротермальная жила со
сфалеритом, галенитом и
кальцитом



Жила кварца в
базальте

Основные минералы:

- **жильные** – кварц, кальцит, барит, флюорит
- **рудные** – галенит, сфалерит, арсенопирит, пирит, халькопирит, киноварь и пр.

Формы выделения минералов:

- друзы
- щетки
- сплошные массы
- вкрапленники



Экзогенные процессы

Экзогенные (гипергенные) – процессы, протекающие на поверхности или вблизи поверхности Земли (**экзо** – снаружи, **гипер** – над, **сверху**) под влиянием свободного O_2 , CO_2 атмосферы, воды, ветра, солнечной энергии. Для них характерны низкие T и P .

- Процессы окисления и выветривания
- Процессы осадконакопления

Процессы выветривания и окисления

В зависимости от типа пород, подвергающихся экзогенному преобразованию, возникают разные продукты выветривания:

- по рудным минералам (например, сульфидам) образуются **зоны окисления**
- по силикатным и алюмосиликатным породам – **коры выветривания**

Коры выветривания

Выветривание – процессы разрушения и химического разложения горных пород и минералов под воздействием атмосферы, гидросферы и биосферы.



Физическое выветривание

- механическая дезинтеграция пород
- для арктических и пустынных областей характерен только этот тип выветривания

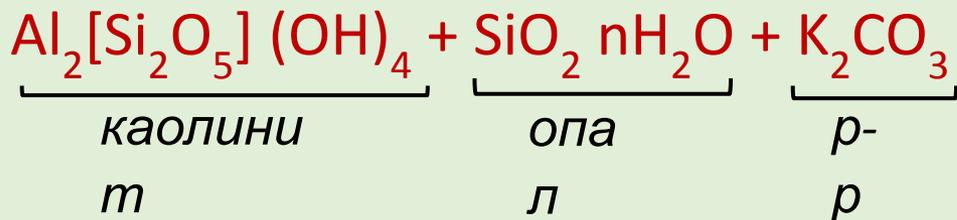
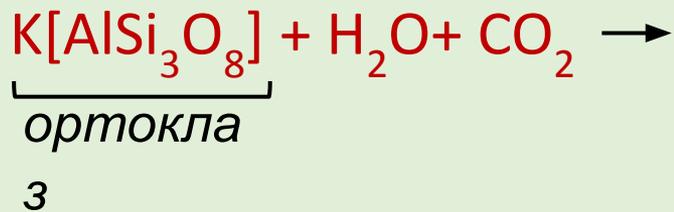
Химическое выветривание

- многостадийный гидролиз в условиях жаркого и влажного климата
- разложение пород с постепенным выносом кремнезема, щелочных, щелочноземельных элементов
- образование оксидов и гидроксидов Al, Fe и Mn
- формирование латеритных кор выветривания – скопления гидроксидов Al, Fe и Mn с примесью каолинита
- в областях с умеренным климатом кремнезем остается на месте, не образуются оксиды и гидроксиды

зона гидролиза

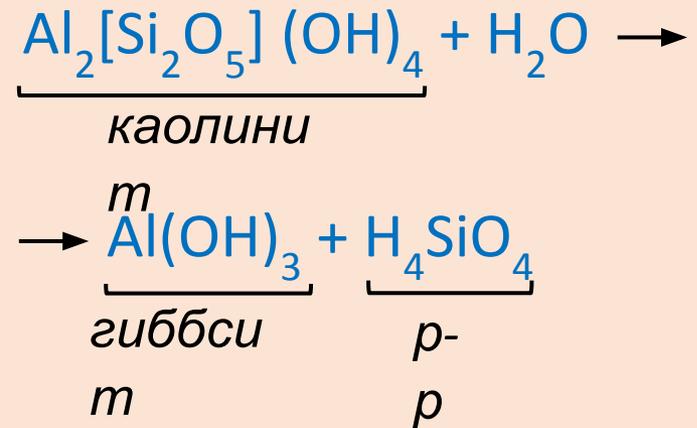
глинисто-каолиновая

Разложение полевых шпатов, амфиболов, пироксенов, оливина;
Вынос карбонатов и бикарбонатов K, Na, Ca
Накопление каолинита и др. глинистых минералов, опала (халцедона)

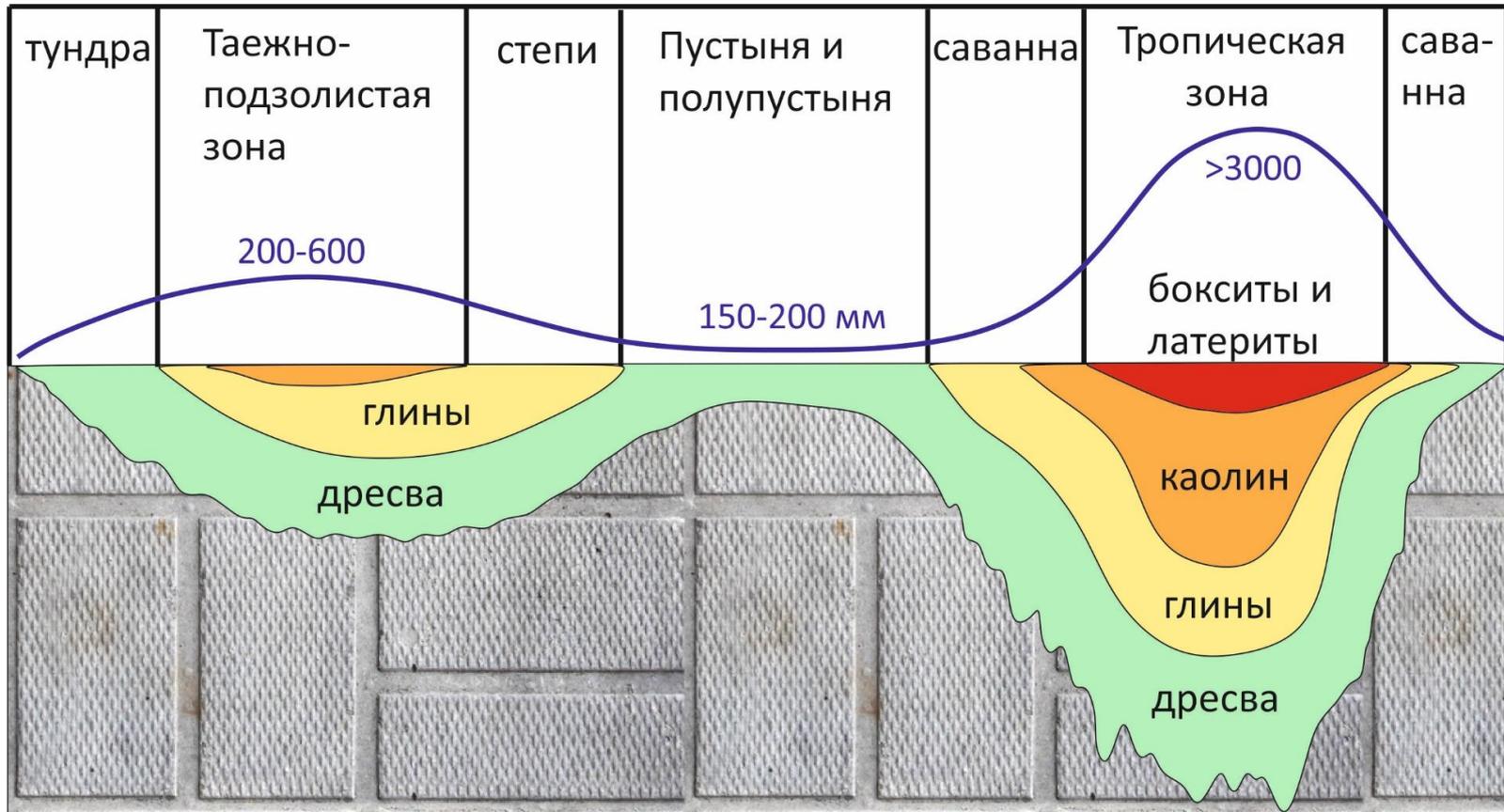


бокситов и латеритов

Накопление оксидов, гидроксидов Fe и Al
Вынос кремнезема



Строение коры выветривания в разных климатических зонах



Минеральный состав кор выветривания зависит также от состава исходных пород





Боксит – смесь гидроксидов Al

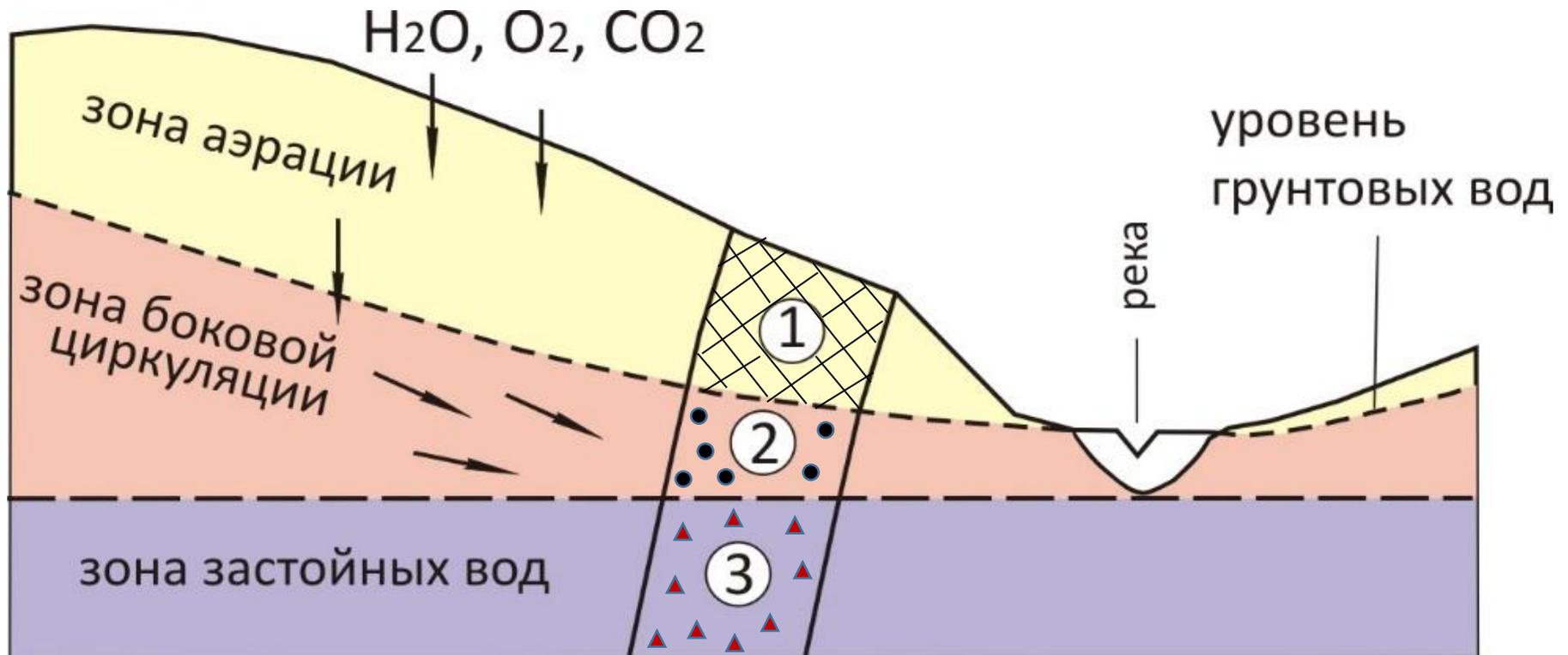
Зоны окисления

Формируются при химическом разложении рудных минералов под воздействием поверхностных и грунтовых вод, кислорода и углекислого газа атмосферы

Наиболее интенсивно в этих условиях изменяются **сульфиды**, за счет которых образуются

- **сульфаты**
- **карбонаты**
- **оксиды и гидроксиды** этих же металлов

Схема строения зоны окисления сульфидных руд



1 – зона окисления

2 – зона вторичного сульфидного обогащения

3 – зона неизмененных первичных руд

В процессе окисления

- часть минерального вещества растворяется грунтовыми водами
- просачивается ниже их уровня
- где в восстановительных условиях образует зону вторичного сульфидного обогащения
- в зоне застойных вод находятся неизмененные первичные руды

Основные образующиеся минералы:

- лимонит, гематит, куприт
- малахит, азурит, сера, гипс
- сульфаты и карбонаты Zn, Pb и др.

Формы выделения минералов:

- землистые массы
- корки, налеты
- натечные агрегаты
- конкреции



Конкреция
азурита



Малахит $\text{Cu}_2[\text{CO}_3]_2\text{OH}_2$
с азуритом $\text{Cu}_3[\text{CO}_3]_2\text{OH}_2$



Гётит
 $\text{FeO}(\text{OH})$

Процессы осадконакопления



Химические осадки

- Образование минералов при коагуляции коллоидов в морском бассейне
- Образование минералов из пресыщенных растворов
- Образование минералов при взаимодействии растворов с газами, выделяющимися в водосемязу



Биогенные осадки

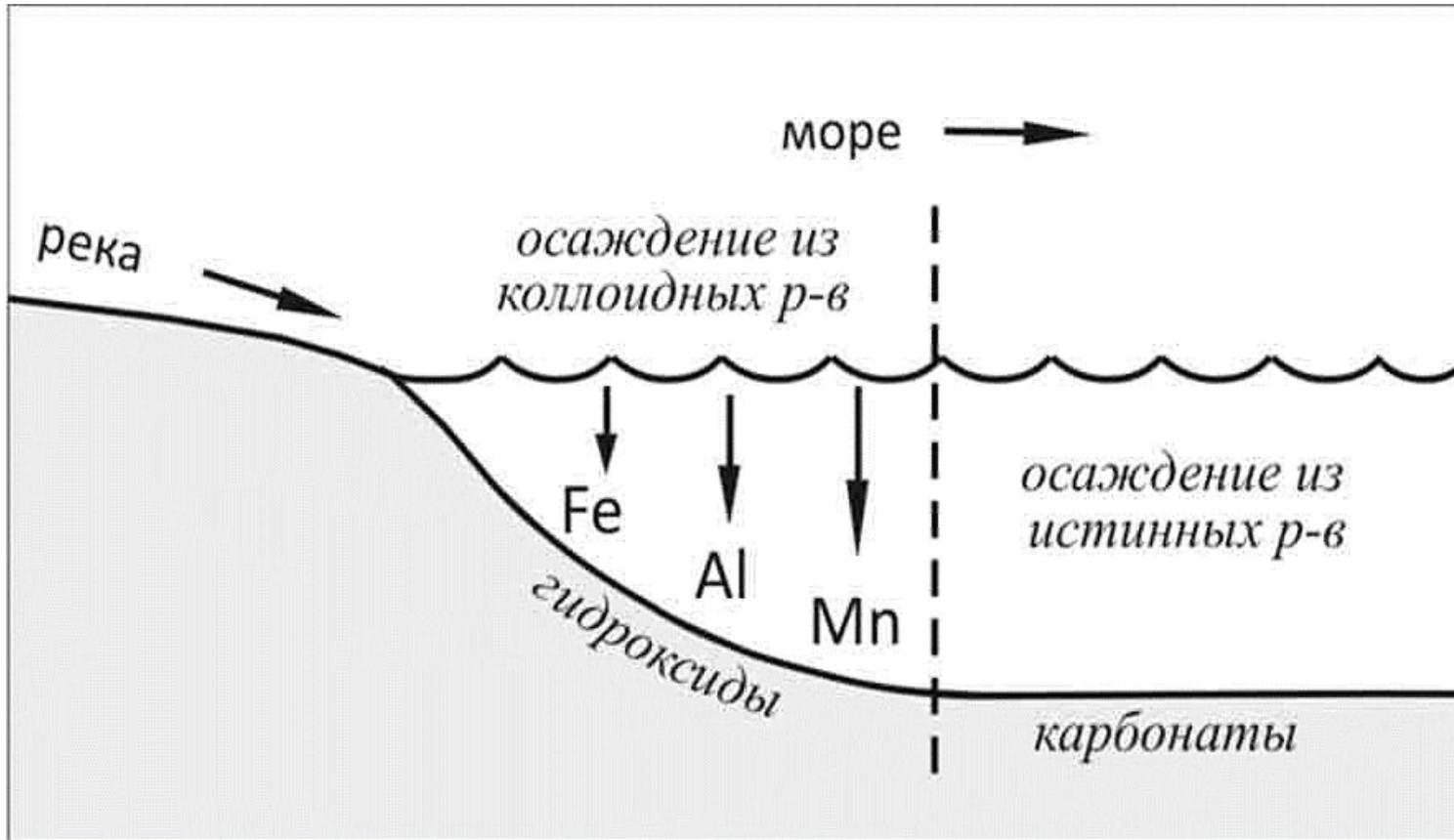
- Образование скелетных элементов организмов, за счет растворенных в морской воде химических соединений
- Образование минералов за счет микроорганизмов

Химические осадки

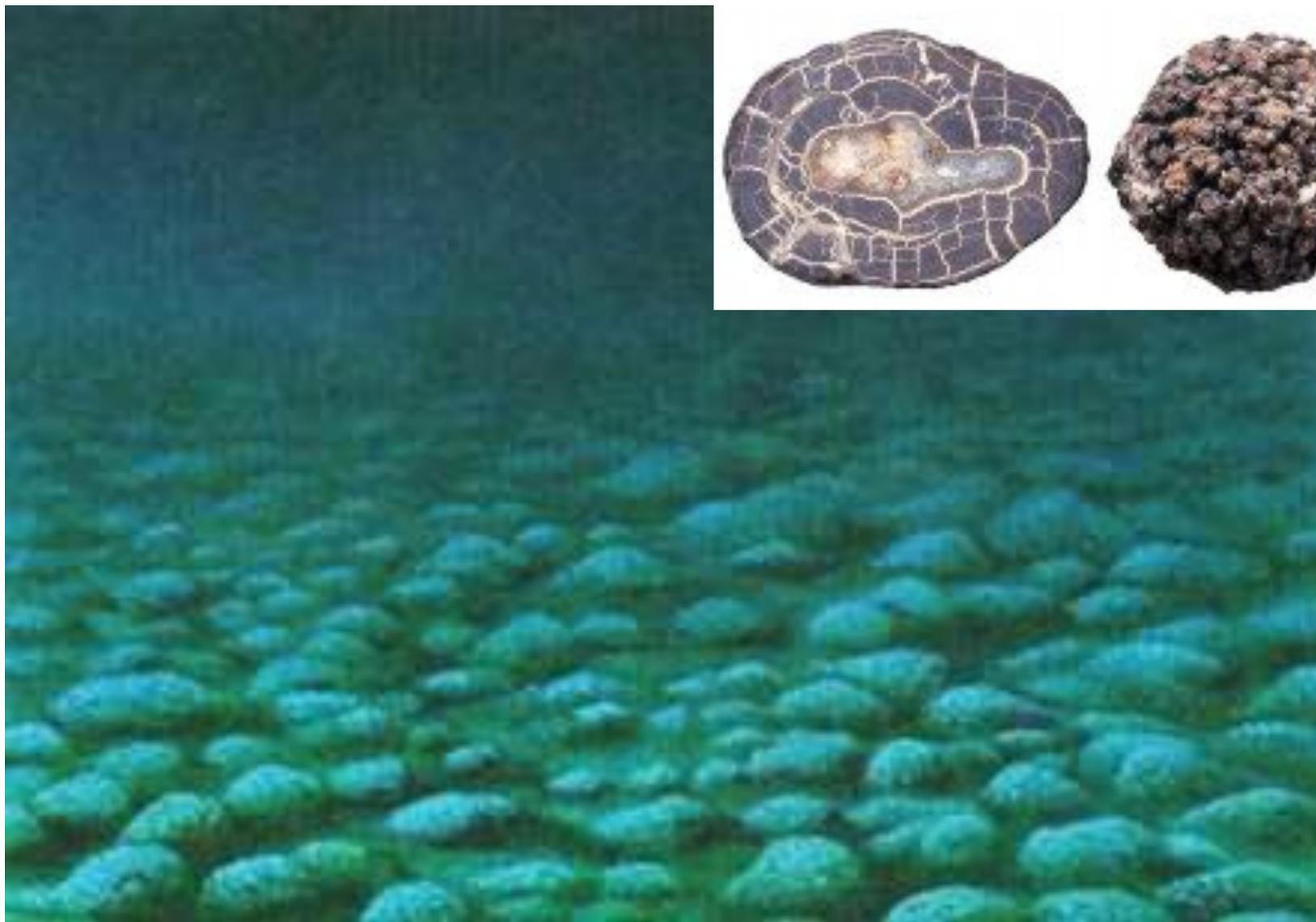
Образование минералов при коагуляции коллоидов в морском бассейне

- Воды рек приносят в бассейны седиментации огромное количество веществ в виде истинных и коллоидных растворов
- Попадая в морскую воду (электролит), коллоидные растворы переходят из золей в гели и выпадают в виде студенистого придонного осадка
- Вблизи береговой линии выпадают гели гидроксидов **Fe** и **кремнезема**, далее от берега гидроксидов **Al**, а затем **Mn**

Схема дифференциации вещества по мере удаления от береговой линии



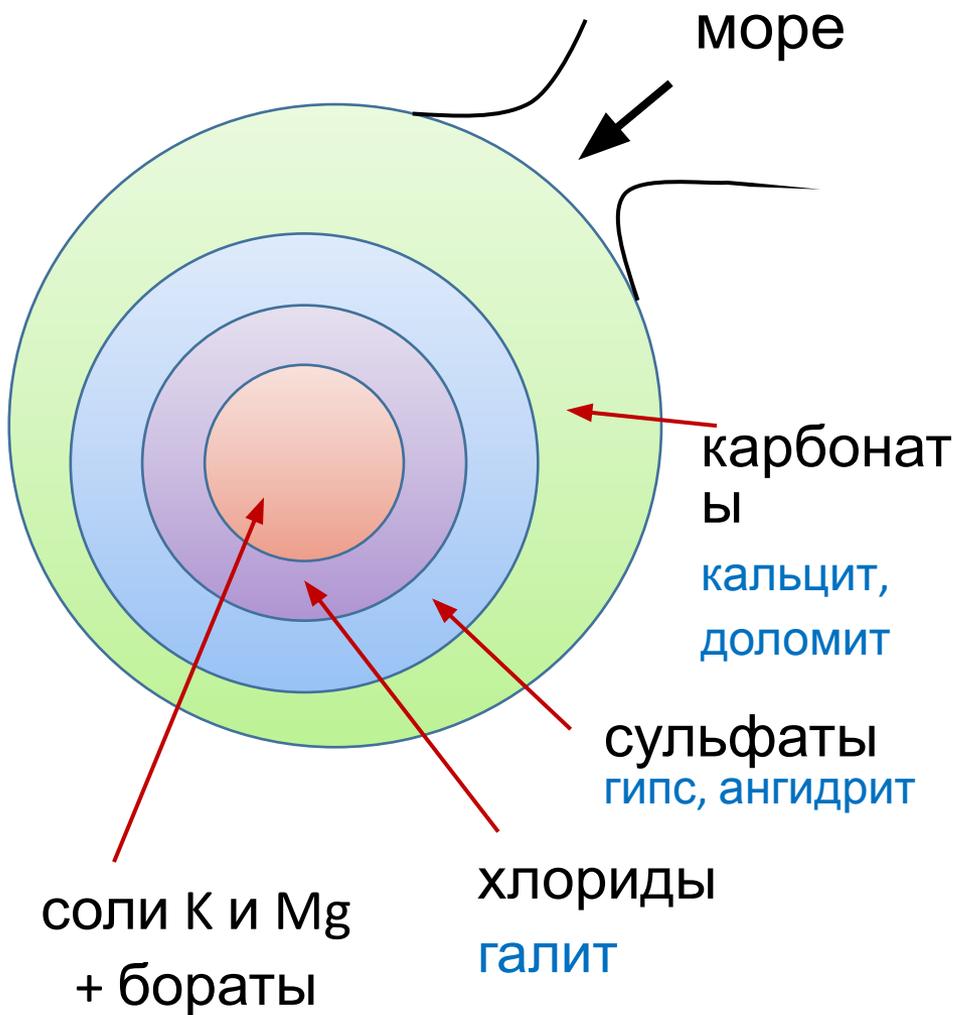
Железо-марганцевые конкреции на дне океана



Железо-марганцевая конкреция в разрезе



Образование минералов из пресыщенных растворов



Происходит в условиях сухого и жаркого климата в бассейнах повышенной и высокой солености (озерах, мелководных лагунах) в результате испарения воды.

При достижении определенной концентрации электролитов, из рассола происходит последовательная кристаллизация карбонатов, сульфатов, хлоридов, боратов



Галит NaCl
Сильвин KCl



Галит







Образование минералов при взаимодействии растворов с газами, выделяющимися в водоемах

Например, образование пирита FeS_2 при сероводородном заражении придонной части бассейна из-за разложения органического вещества



Биогенные осадки



- Образование минералов за счет анаэробных микроорганизмов: например, восстановление самородной серы из гипса $\text{Ca} [\text{SO}_4] 2\text{H}_2\text{O}$

«проедая» каверны в гипсе, они выделяют при своей жизнедеятельности тепло, которого хватает для возгонки и переотложения серы в виде друз кристаллов в пустотах осадочных пород



- Образование раковин, костей и других скелетных элементов организмов, за счет растворенных в морской воде химических соединений (Ca , P , SiO_2 , CO_2 и пр.)

Отмирая, они образуют толщи органогенных известняков (кальцит), диатомитов и трепелов (опал)

Косвенное участие организмов:

При избирательной адсорбции некоторых веществ органика действует как восстановитель.

Например, именно за счет органики происходит восстановление U^{+6} до U^{+4} в битуминозных ураноносных сланцах

Разложение органики является косвенным участием организмов в сероводородном заражении бассейнов (Черное море)

Это может привести к осаждению **сульфидов** или образованию болотных руд