

**6 Лекция - Метаморфизм.  
Метаморфические горные породы.  
Полезные ископаемые**

# План лекции

## 1. Метаморфизм

### Факторы метаморфизма

- Региональный метаморфизм
- Контактный метаморфизм
- Динамометаморфизм
- Метасоматоз
- Ультраметаморфизм
- Ударный метаморфизм

## 2. Метаморфические горные породы и полезные ископаемые

# 1. Метаморфический процесс

**Метаморфический процесс** (от греч. «метаморфозис» - превращение) - процесс перекристаллизации горных пород в твёрдом состоянии, протекающий в недрах Земли под действием повышенных температур и давлений

**Основной причиной** перекристаллизации при изменении термодинамических параметров среды является различная устойчивость минералов в тех или иных условиях

# Метаморфизм

**Метаморфизм** – преобразование горных пород под действием эндогенных процессов. Преобразованию могут подвергаться любые горные породы: осадочные, магматические и ранее образовавшиеся метаморфические.

## **Факторы метаморфизма:**

**Температура** (300–1000°C) вызывает дегидратацию, декарбонатизацию и приводит к плавлению более крупнозернистых структур. Источники температуры: геотермика, магматический очаг и тектонические трения.

**Давление** (от 1–2 тыс. до 10–15 тыс. атм). Различают геостатическое (всестороннее) и направленное (стресс) давление.

**Химически активные вещества (флюиды).**

Существенную роль играют  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $F$ ,  $S$ ,  $B$ ,  $P$ ,  $K$ ,  $Na$  также соединения  $N$ ,  $Cl$ ,  $F$ ,  $B$ ,  $S$  и др. элементов.

# Фации метаморфизма. История

- Ван-Хайз. Была выделена верхняя зона *катаморфизма*, в которой происходят приповерхностные процессы (под воздействием подземных вод и воздуха), и более глубинная зона *анаморфизма*, в которой образуются сланцы и гнейсы. Метаморфизм, по Ван-Хайзу, непосредственно связан с поверхностными процессами изменения осадков и изменением температуры и давления вследствие простого перемещения пород из одной зоны в другую. По Ван-Хайзу, с глубиной изменяется и характер деформации горных пород. В верхней зоне преобладает *катаклаз*, в нижней "зоне истечения" реализуются пластические деформации и формируются гнейсы и кристаллические сланцы. По характеру деформаций выделялась также промежуточная зона.
- У. Грубенман. Намечаются три зоны глубинности - **эпизона, мезозона и катазона**. К малоглубинной *эпизоне* относятся низкотемпературные породы — альбитовые гнейсы, кианитовые сланцы, филлиты, хлоритовые и тальковые сланцы и др. К промежуточной *мезозоне* принадлежат среднетемпературные образования (мусковитовые, роговообманковые, кианитовые, ставролитовые и другие гнейсы и сланцы). Образование высокотемпературных пород (силлиманитовых, кордиеритовых, гранатовых гнейсов, пироксеновых сланцев, эклогитов и др.) ограничивалось в основном наиболее глубинной областью — *катазоной*.

# Фации метаморфизма

**В основу концепции глубинных зон положено представление о возрастании с глубиной давления и температуры в соответствии с геотермическим градиентом Земли, который обуславливает повышение фоновой температуры по мере увеличения глубинности.** Различается на континентах и в подвижных зонах, где он значительно выше. При среднем геотермическом градиенте, равном  $30^{\circ}$  на 1 км, крайние его значения равны  $150^{\circ}$  для геотектонических подвижных зон и  $6^{\circ}$  на платформах. Давление рассматривалось в прямой зависимости от температуры. Отражало повышение степени метаморфизма с глубиной (в вертикальном направлении). Противоречия: 1. Ф. Бекке - объемные соотношения метаморфических реакций (Т не зависит от Р), диафторез (изменение направленности). Барроу - горизонтальная зональность метаморфизма. Гольдшмидт - зональные роговиковые ореолы в районе Осло, с помощью физико-химического анализа парагенезисов минералов показано, что они отвечают Т до  $1200^{\circ}$  и Р ниже 1000 бар. Зоны выделены по Т, а не по глубинности. В работе было положено начало концепции минеральных фаций, которая получила развитие в трудах П. Эскола. В минеральную фацию согласно П. Эскола объединяются горные породы, образовавшиеся в сходных условиях температуры и давления, т. е. отвечающие определенным полям диаграммы Р-Т. Не учтены: 1. Цеолитовые сланцы. Не учтен режим летучих компонентов. М/б совмещены с зелеными сланцами по условиям метаморфизма. Должно быть учтено флюидное давление. 2. нет точных границ между полями из-за нехватки термодинамических данных. 3. не учтена роль флюидного давления. 4. Не учтены минералы перменного состава.



**Метапелиты** - метаморфические породы, образующиеся на месте ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИИ (пелитов), суглинков, кварцевых песчаников с примесью глинистого материала.

## МИНЕРАЛЬНЫЕ ФАЦИИ

### 1. Глинистые сланцы

Состоят из Chl, Ser, каолинита (и др. характерные для глинистых отл. минералы), обладают сланцеватостью.

### 2. Филлиты

Это слюдяные микросланцы, состоят из Ser, Chl, Qtz (на плоскостях сланцеватости Ser укрупняется и переходит в Mu). В железистых разновидностях - Chd, St. В известковых разновидностях - Cal. В марганцевых разновидностях - Alm-Sps

### 3. Слюдяные сланцы

Отличаются от филлитов большим размером зерен. Chl вытесняется Bt, возрастает роль полевых шпатов (Ab, Or)

### 4. Двуслюдяные сланцы и гнейсы

Состав: Fsp, Qtz, Mu, Bt. В богатых глинозёмом разновидностях - And, Sil, Ky (определяют фации глубинности). В магнезиальных разновидностях - Cord (андалузитовая зона). В железистых разновидностях - St, Sps (кианитовая зона).

Переход к гнейсам за счёт смены сланцеватости на гнейсовидность, преобладание слюд сменяется преобладанием полевых шпатов.

### 5. Метапелитовые гнейсы

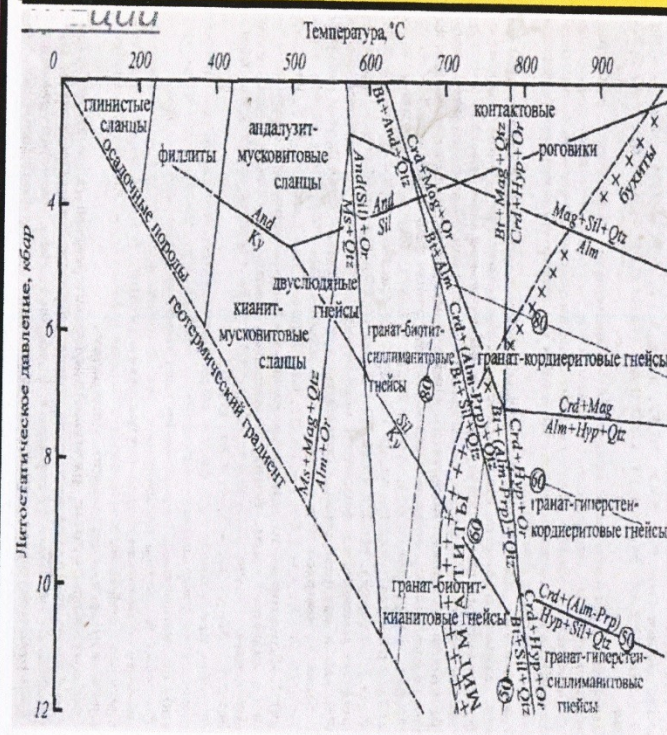
В составе преобладают Kfs, Qtz

### 6. Контактные роговики

And-Bt (к-т с гранитами) Mag-Cord (к-т с диоритами) Hyp-Cord (к-т с габбро)

### ОСНОВНЫЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЫ МЕТАПЕЛИТОВ

Chl, Ser, St, Cld, Cord, Bt, Gr, Hyp, Spr, Qtz, Pl, Kfs





**Метабазиты** - образуются при метаморфизме вулканитов базальтового, андезито-базальтового составов, габбро, диоритов, туффитов, туфогенных песчаников и осадочных пород аналогичного состава (глинисто-карбонатные и нек. глинистые)

## Фации метабазитов

### 1.Порфиритоиды

Метаморфизованные рассланцованные базальты, но сохранившие реликты первичных структур и текстур (бластопарфировая структура, сохраняются только вкрапленники). Состав: Ab, Chl, Cal, Qtz, иногда Ser, Ep.

### 2.Зелёные сланцы

Образуются при нарастании интенсивности метаморфизма, когда порфиритоиды утрачивают реликты первичной порфировой структуры.

### 3.Амфиболиты

Состоят в основном из Pl и Hbl, в ассоциацию могут входить Gr, Ep, Px и др. Структуры: порфиробластовая (Ep, Gr), гранонематобластовая, лепидонематобластовая (Chl, Bt). Текстуры: массивная, сланцеватая, гнейсовидная, полосчатая, пятнистая. (Ep, Opx, Gr, Cpx-Gr – амфиболиты)

### 4.Двупироксен-плагинклавовые сланцы(гранулиты)

Состоят из Pl, Hup, Di, могут присутствовать Gr, зел. Hbl. Стр-ра гранобластовая. Тек-ра полосчатая.

### 5.Эклогиты

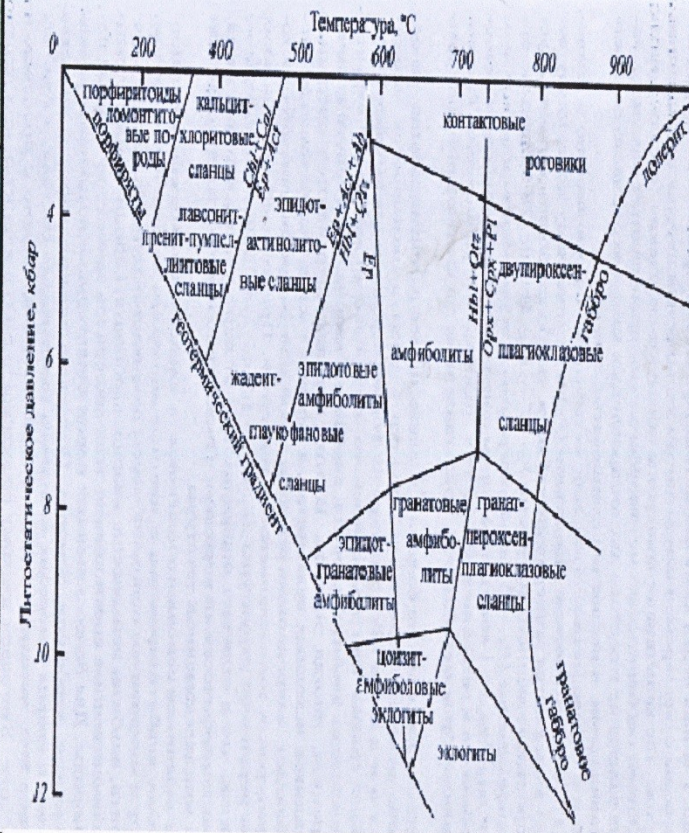
Состоит из Gr, Px, нередко содержат Hup, бурую Hbl.

### 6.Контактовые роговики

Двупироксен – плагинклавовые, пироксен-амфибол-плагинклавовые (Di, Hup), амфибол-плагинклавовые (Hbl). Стр-ра роговиковая.

## ОСНОВНЫЕ МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЫ МЕТАБАЗИТОВ:

Chl, Cal, Ser, Ep, Pl, Qtz, Act, Hbl, Px





# Условия проявления метаморфических процессов

1. В зависимости от того, в каком направлении при этом меняется **температура**, метаморфизм подразделяется на :

• **Прогрессивный метаморфизм** протекает при повышении температуры. Ассоциации минералов, устойчивых в условиях относительно низких температур, замещаются другими, более высокотемпературными.

• **Регрессивным метаморфизм** протекает при понижении температуры.

2. В зависимости от того, что происходит **привнос или вынос химических элементов** метаморфизм подразделяется на:

• **Изохимический метаморфизм**  
происходит без изменения исходного химического состава горной породы.

• **Аллохимический (метасоматоз)** –  
химический состав горной породы претерпевает разнообразные изменения.

## Классификация процессов

В зависимости от условий проявления, масштабов распространения процесса и роли того или иного фактора выделяются следующие типы метаморфизма:

- **Региональный метаморфизм**
- **Контактовый метаморфизм**
- **Динамический метаморфизм (динамометаморфизм)**
- **Ультраметаморфизм**



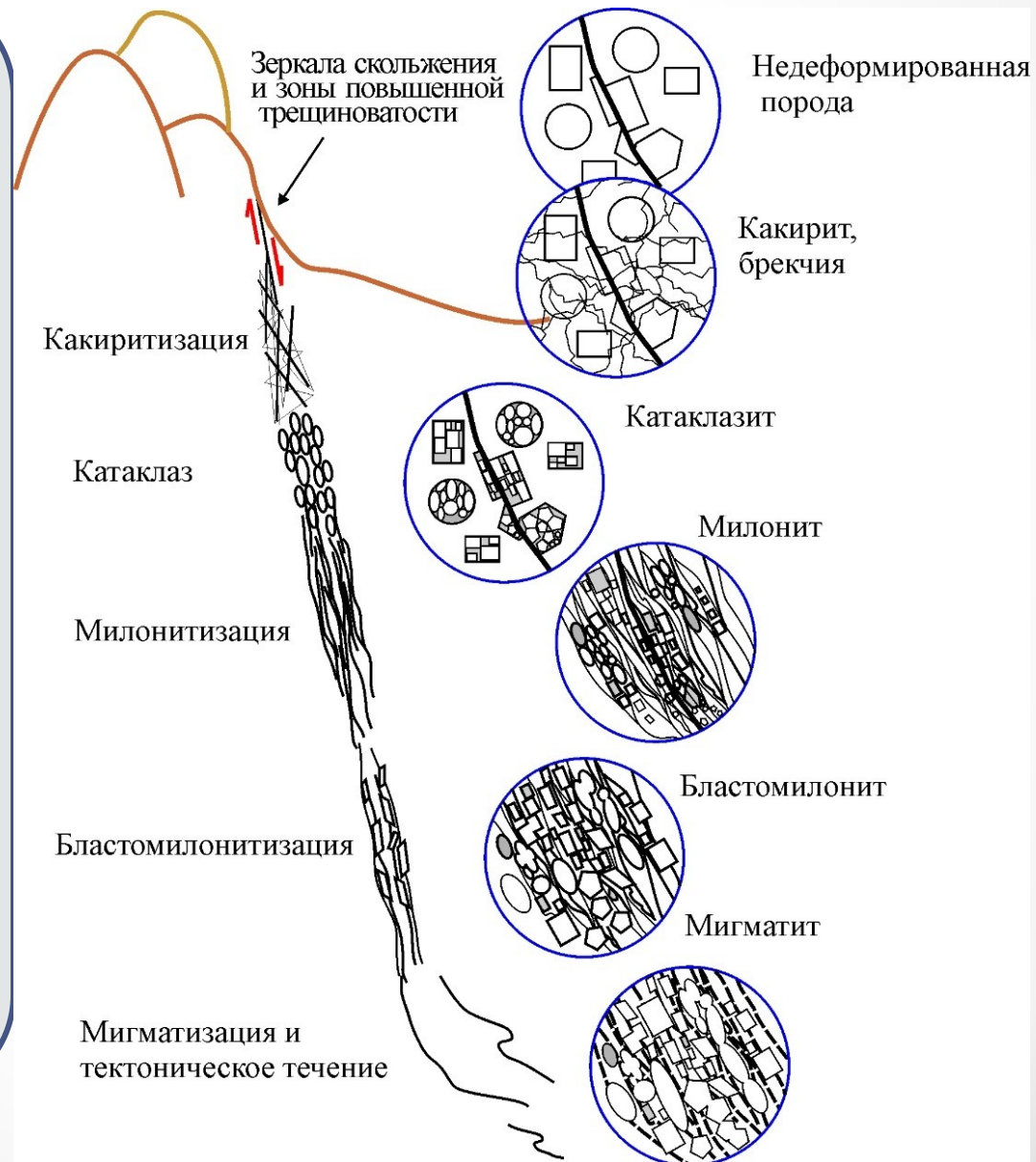
- **Динамический метаморфизм**  
(**динамометаморфизм** - **катакластический**) связан с подвижками вдоль разрывных нарушений, его проявления приурочены к узким приразломным зонам.  
**Факторы** – давление

# Горные породы (катаклазиты, брекчии и милониты)

## динамометаморфизма

### Какирит

[Какир озеро, Финляндия] – рыхлая сильно катаклазированная брекчиевидная горная порода, обломки исходных пород неподвижны, множество беспорядочных трещин.



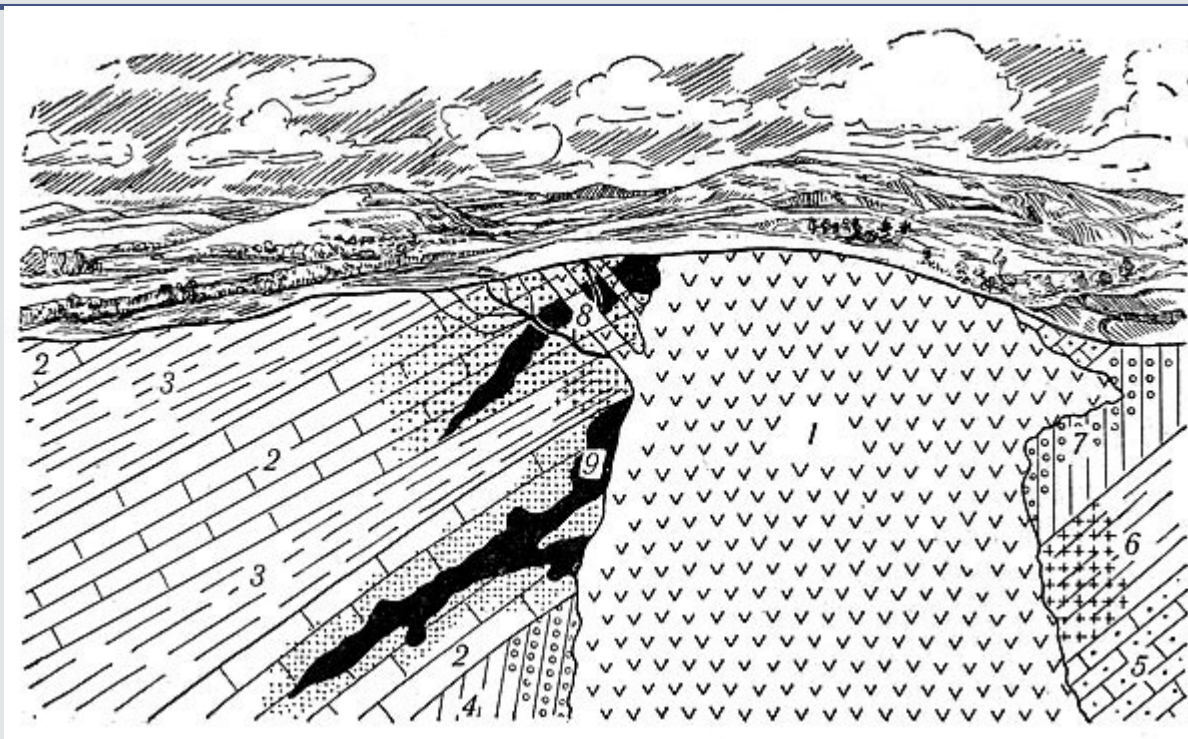
- **Контактовый метаморфизм** проявляется в связи с внедрением в относительно холодные горные породы горячих масс магматических расплавов.

**Факторы** - температура



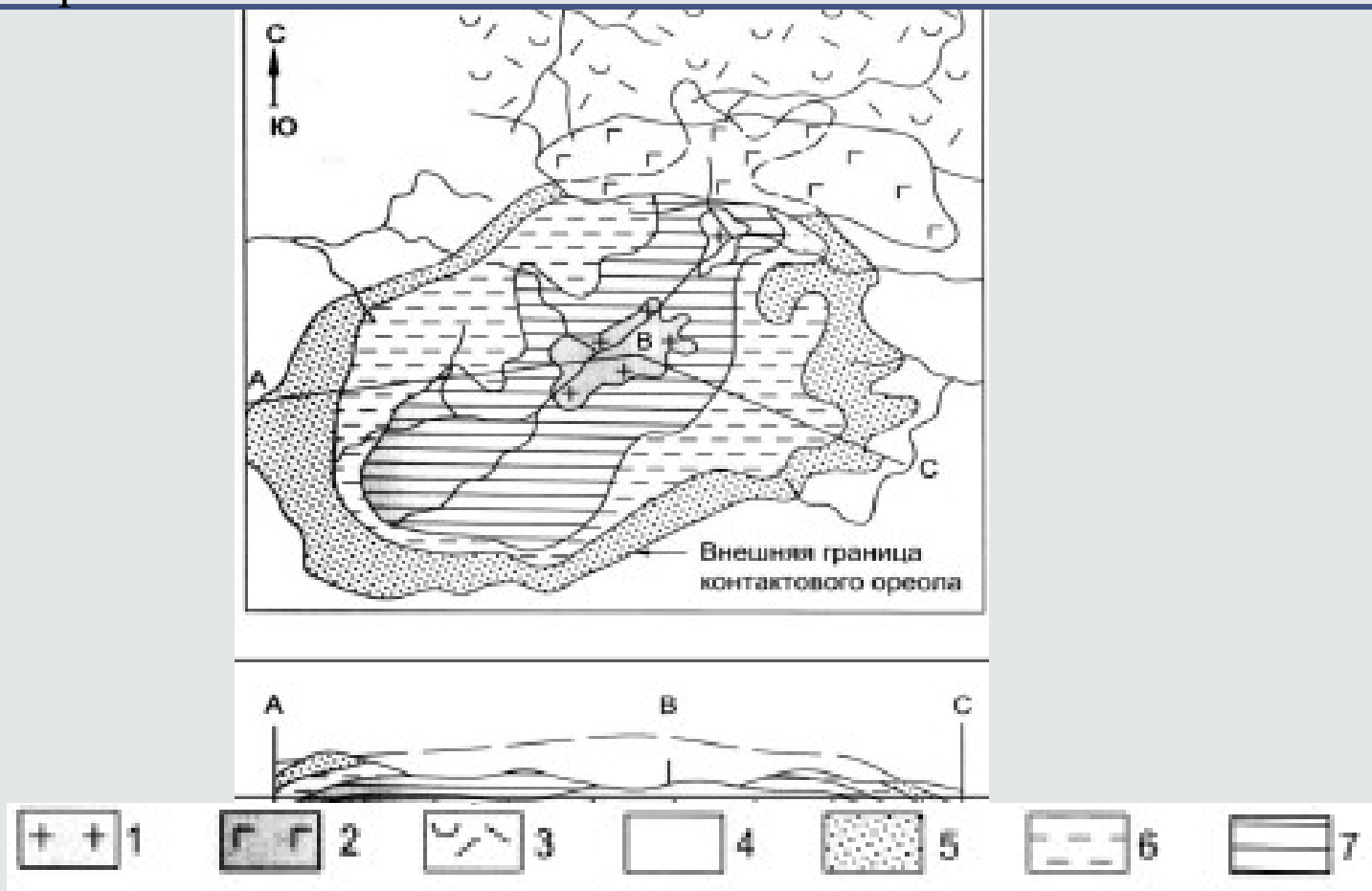
Роговики, кварциты и мрамора горные породы сформированные при контактово-термальном метаморфическом процессе.

Образованные минералы: андалузит, хиастолит, силлиманит, кордиерит, ставролит, гранат.



1 — андезиты; 2 — известняки; 3 — глинистые сланцы; 4 — песчаники и кварциты; 5 — известняки преобразованные в мрамора; 6 — глинистые сланцы преобразованные в роговики; 7 — зона роговиков

Образованные за счет преобразования исходных глинистых пород типичные образования контактово-термального метаморфизма – андалузитовые и кордиеритовые роговики.



Контактные ореолы вокруг интрузии гранита: 1 – гранит, 2- габбро, 3-вулканиты, 4 – глинистые сланцы, 5-7 метаморфизованные зоны в сланцеватых толщах, 6 – узловатые андалузитовые сланцевые зоны; 7 – зоны роговиков

**Образованные горные породы:** роговики, мрамора, кварциты.



Мрамор



Кианитовый кварцит



- **Региональный метаморфизм** проявляется на обширных площадях в связи с крупными тектоническими событиями в развитии регионов.  
**Факторы** – температура, стрессовое и петростатическое давление

Континентальная кора состоит из крупных литосферных тектонических плит и окружающих их складчатых поясов (рисунок).

Складчатые пояса могут возникнуть при столкновении континентальных, континентальных и океанических плит. Метаморфические горные породы очень широко распространены ими сложены фундаменты платформ и обнажения щитов.

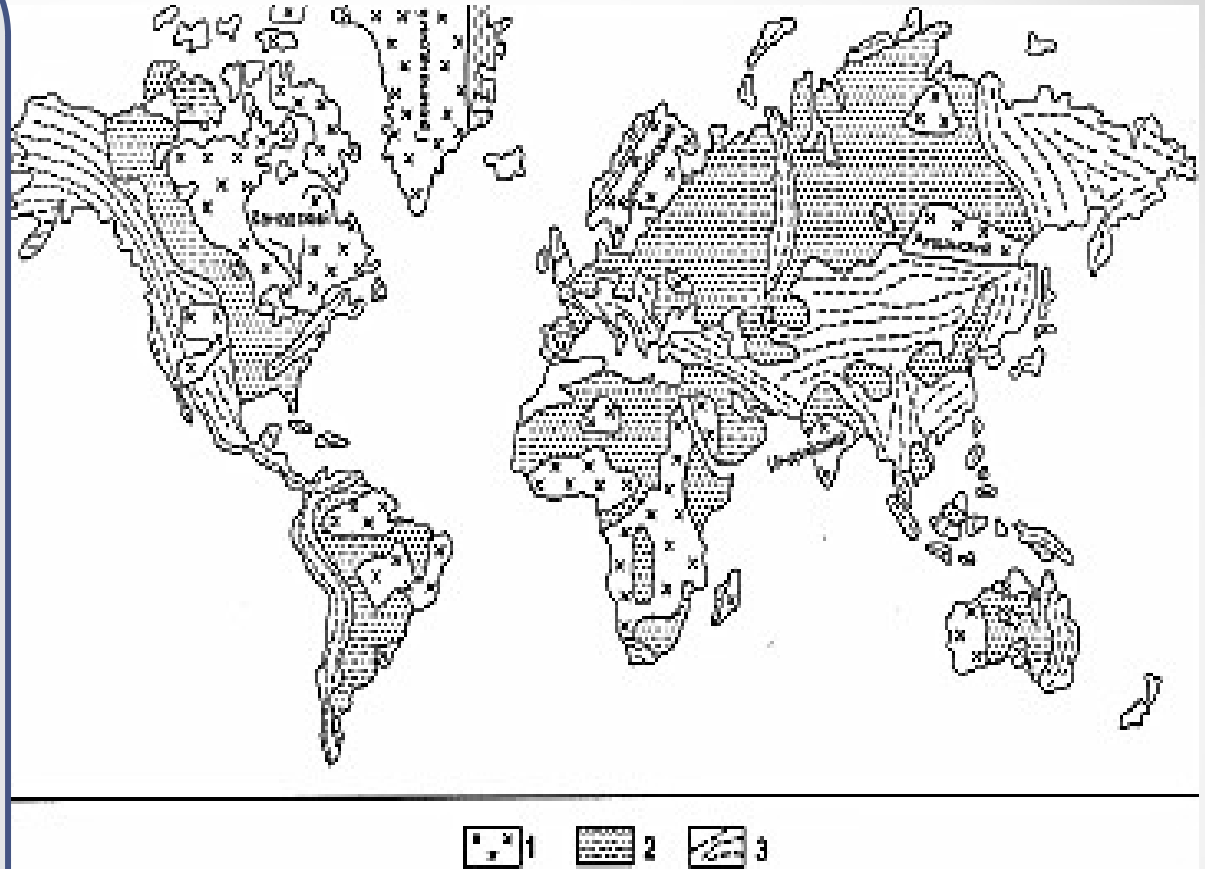


Рисунок – Континентальные и структурные элементы: 1 – докембрийские щиты; 2 – платформенные чехлы; 3 – фанерозойские складчатые горные пояса (по К. Гиллену, 1984)

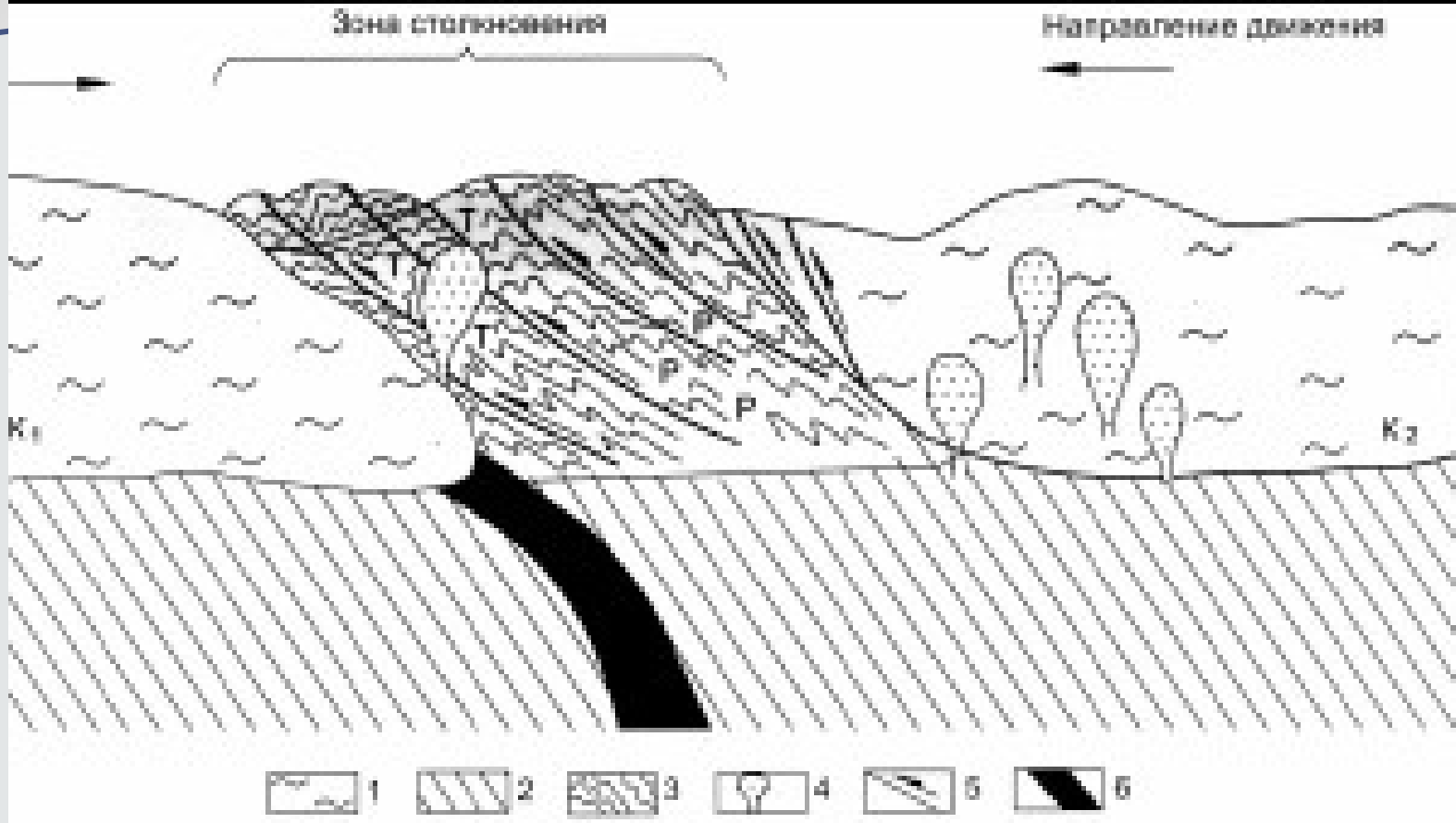


Рисунок – Зона столкновения континентальных плит:  $K_1$  и  $K_2$  – континентальные плиты, Т – высокотемпературный метаморфизм: Р – метаморфизм высоких давлений; 1 – континентальная кора; 2 – горные породы верхней мантии; 3 – осадочные и метаморфические породы; 4 – магматические интрузии; 5 – надвиги (стрелки показывают направление движения горных пород плит); 6 – океаническая плита (по К. Гиллену 1984)

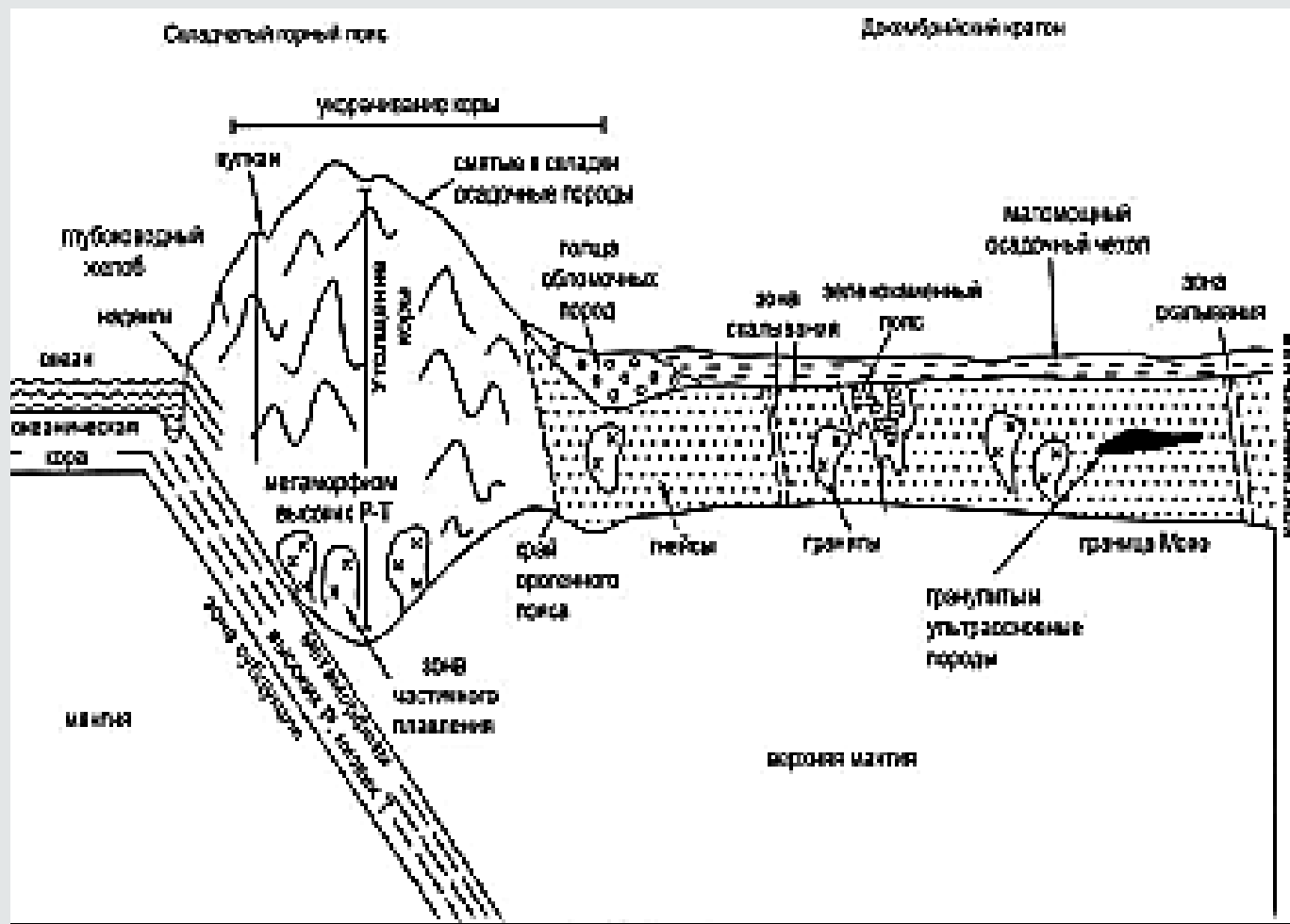


Рисунок – Разрез по зоне субдукции, размещение метаморфических поясов под островными дугами (по К. Гиллену, 1984)



- **Метасоматоз** – аллохимическое замещения минералов в твердом состоянии за счет флюидов, растворяющих и выносящих одни химические элементы и привносящих и отлагающих другие .

**Факторы** – химически активные вещества, привнос и вынос веществ

- **Ультраметаморфизм** - высшая ступень регионального метаморфизма. Характеризуется началом частичного плавления горных пород.

**Факторы** – температура, давление, химическая активность воды, привнос и вынос веществ

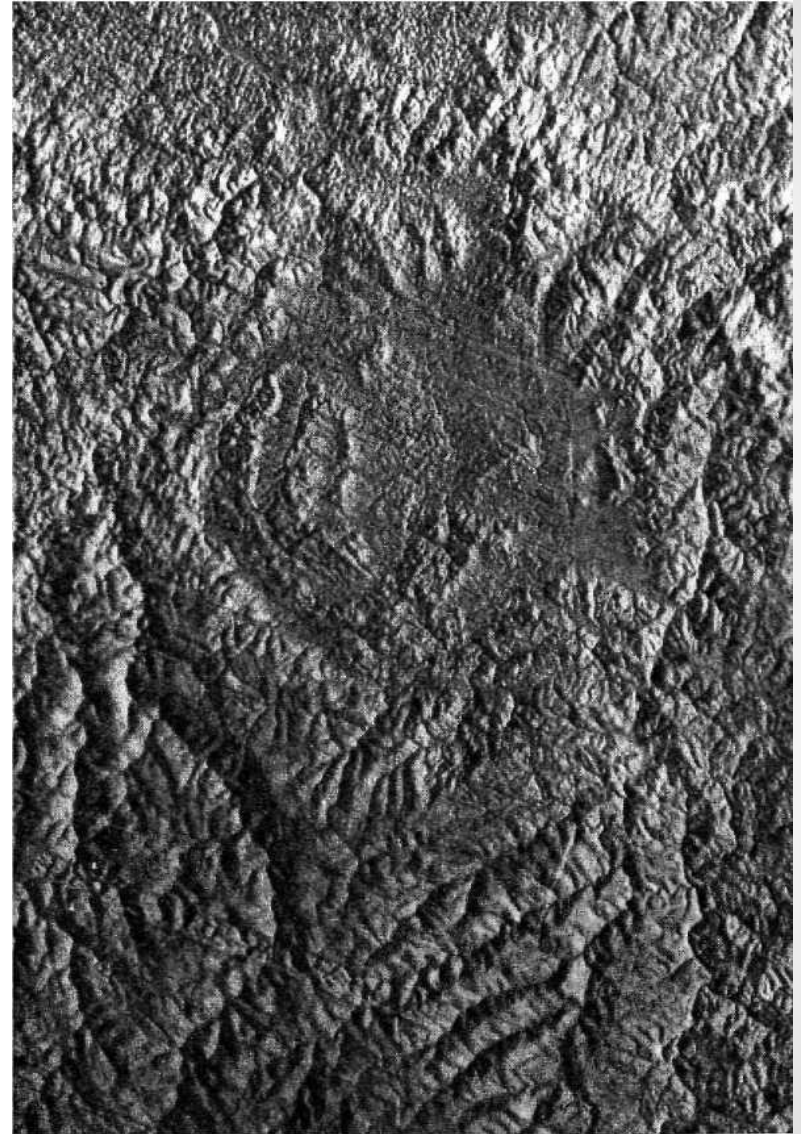
## Ударный метаморфизм

**Ударный метаморфизм** (импактный, коптогенный) проявляется в образовании различных пород и новых минералов при столкновении с Землей метеоритов

**Факторы** - давление (момент удара достигает 600-900 кбар), температура (до 2500-3000°C)

## **Попигайская астроблема**

на севере Восточной  
Сибири. Диаметр  
около 90 км, время  
образования - 35 млн.  
лет назад





### 3. ПРОЦЕССЫ УЛЬТРАМЕТАМОРФИЗМА

*Анатексис* — частичное, избирательное выплавление минералов кварц-полевошпатного состава из исходных пород (за исключением карбонатов, эвапоритов и некоторых других).

*Палингенез* — процесс химического и минерального изменения пород любого состава с превращением их в граниты.

*Гранитизация* — процесс химического и минерального изменения пород любого состава с превращением их в граниты.

**Круговорот в природе (И.Д.Лукашев):**

**магма → магматические породы → осадочные породы → метаморфические породы → магма**



Стадии образования горных пород (по К. Гиллену, 1987)

# 4. Метаморфические горные породы

Земная кора по интенсивности регионального метаморфизма разделяется на зоны (У.Грубенманн, С.Вен-Хайз):

- эпизона ( $t = 300\text{--}500^\circ\text{C}$ ,  $P = 1\text{--}8$  тыс. атм) – филлиты и зеленые сланцы;
- мезозона ( $t = 400\text{--}700^\circ\text{C}$ ,  $P = 2\text{--}10$  тыс. атм) – слюдяные сланцы, амфиболиты, кварциты, мраморы;
- катазона ( $t = 700\text{--}1000^\circ\text{C}$ ,  $P = 4\text{--}15$  тыс. атм) – гнейсы, кварциты, мраморы, эклогиты;
- зона ультраметаморфизма – мигматиты.

## **Контактовый метаморфизм:**

- термальный – роговики, кварциты, мраморы;
- метасоматоз – грейзены, скарны, вторичные кварциты.

**Динамометаморфизм (катакластический)** – тектонические брекчии, катаклазиты, милониты.

Таблица - Характеристика метаморфических и метасоматических пород

Тип метаморфизма	Название пород	Цвет	Главные минералы	Структура	Текстура	Условия метаморфизма
Контактово-термальный	Мрамор	Белый, розовый, серый	Кальцит	Кристаллическозернистая	массивная	На контакте карбонатных пород с интрузией
	Кварцит	Серый	Кварц			На контакте кремнистых пород с интрузией
Региональный	Сланцы (хлоритовые, слюдяные, и др.)	От светлого до темного	Хлорит, серицит, альбит, кварц, мусковит, биотит и др.		Сланцеватая, массивная	Слабая и средняя ступень метаморфизма различных горных пород
	Гнейс	Серый, желтовато-серый	Полевые шпаты, кварц, мусковит, биотит, роговая обманка, пироксен и др.			Высокая ступень метаморфизма кислых и средних магматических горных пород и их туфов, глин и песчаников
	Амфиболит	Темно-зеленый	Роговая обманка, плагиоклаз			Высокая степень метаморфизма основных магматических горных пород и их туфов
Метасоматоз	Скарн	Темно-зеленый, коричневый	Гранат, пироксен, кальцит и рудные минералы		массивная, пятнистая	На контакте карбонатных пород с интрузией под действием растворов, газов и температуры
	Серпентинит	Зеленый	Серпентин			Изменение ультраосновных пород под действием растворов и газов из магмы
	Грейзен	Светлый, сероватый,	Кварц, мусковит, рудные			В апикальных частях гранитных массивов при



# Метаморфические горные породы

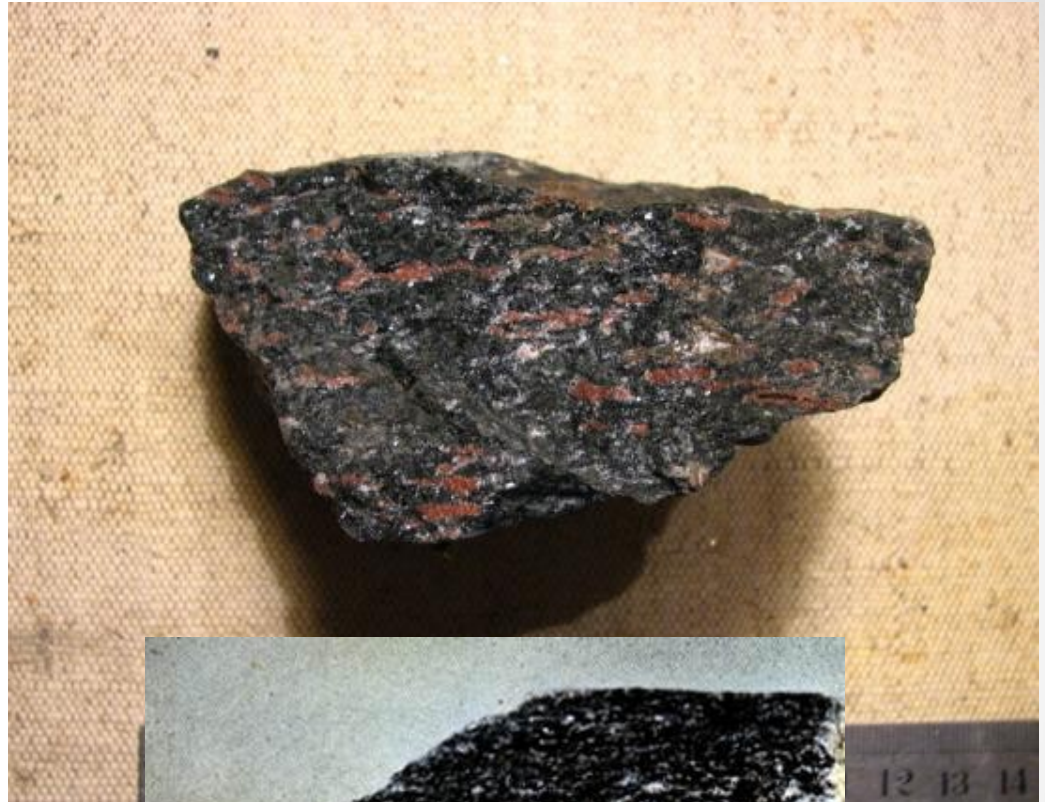
Сланцы

Амфиболиты

Кварциты

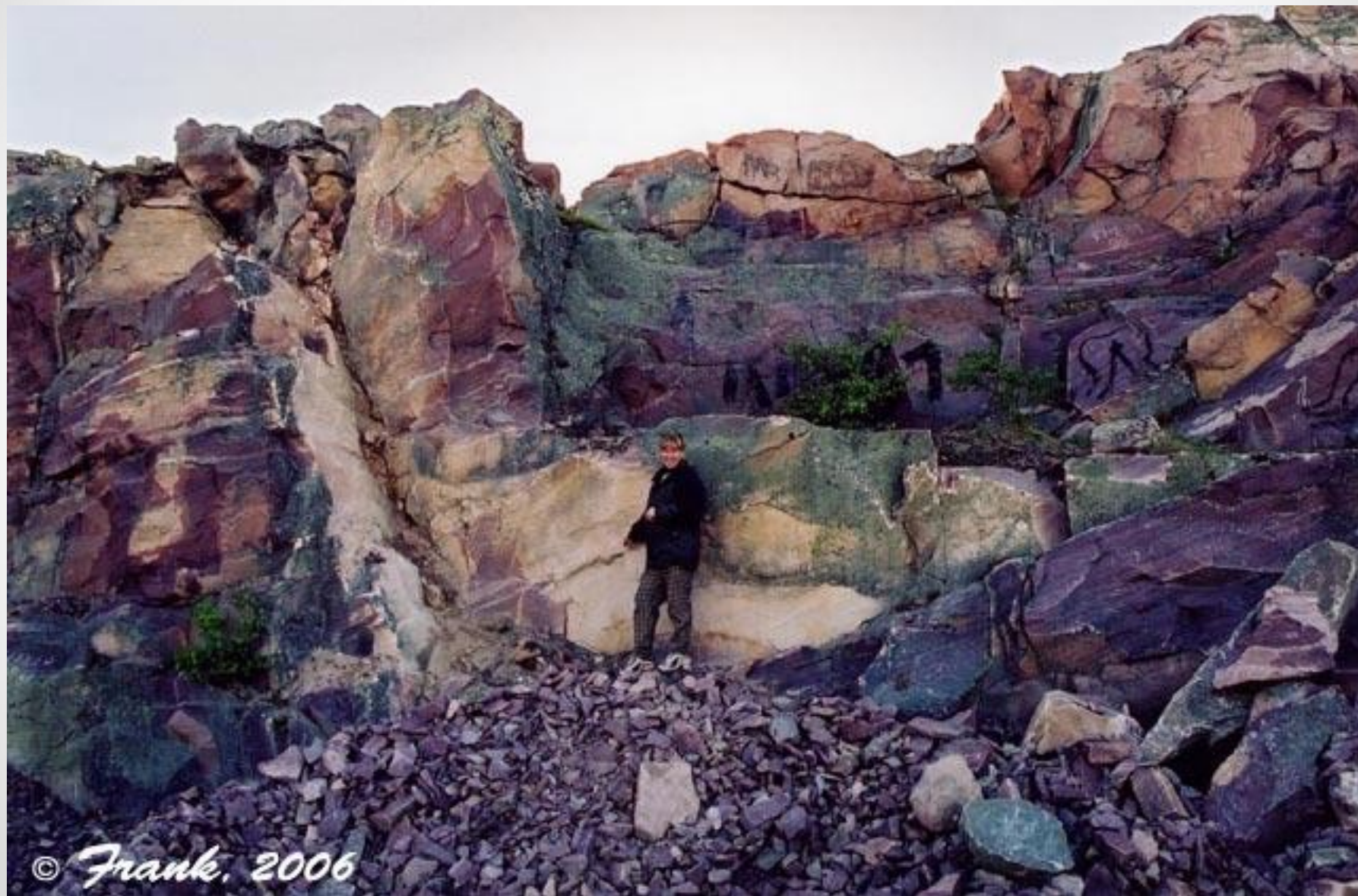
Гнейсы

Мрамора





# Кварциты



© Frank. 2006

## Кварцит



**Структура:** кристаллическизернистая, мелкокристаллическизернистая.

**Текстура:** полосчатая.

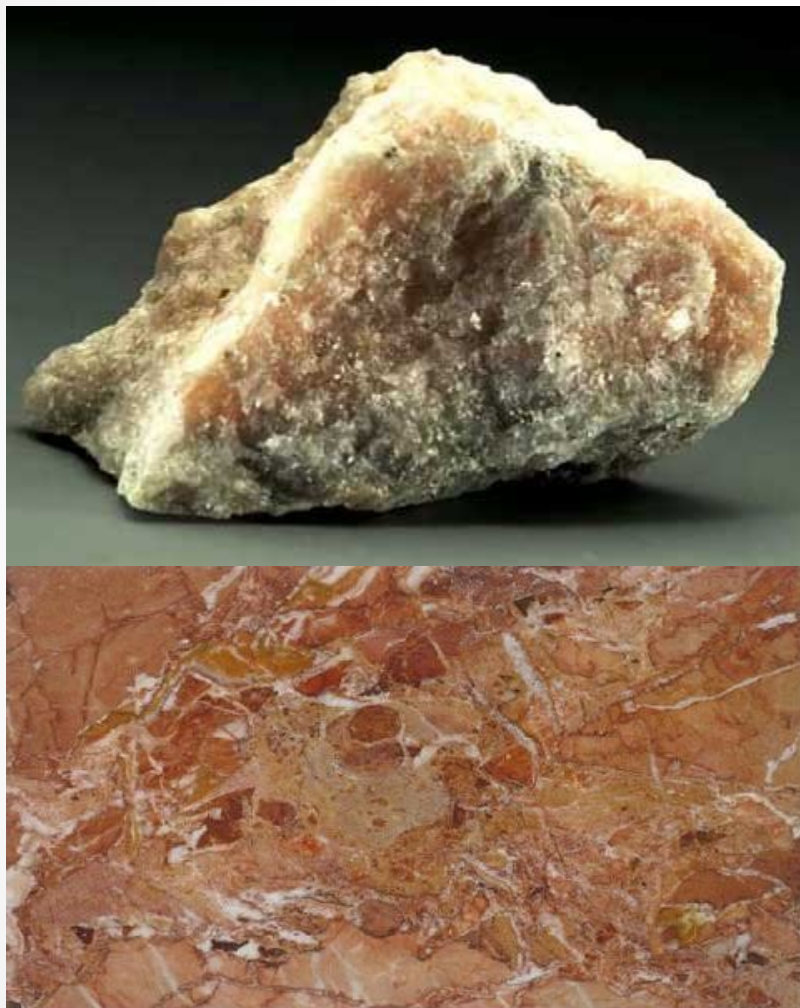
Минеральный состав: кварц, вторичные минералы — мелкочешуйчатый мусковит, биотит или магнетит, графит, гранат иногда полевые шпаты, редко — дистен или силлиманит. Присутствие этих минералов в заметном количестве Кварциты без минералов-примесей устойчивые к высоким температурам. Температура плавления 1750-1760°C.

Широко распространены слюдяные, полевошпатовые, графитовые и разновидности горнблендовых кварцитов.

**Генезис.** На контакте интрузии с кремниевыми горными породами.



# МРАМОР



**Структура:** кристаллическизернистая, гранобластовая, иногда порфиробластовая. Размеры зерен — от миллиметра (мелкозернистая) до 1 см, редко 3-5 см (средне- и крупнозернистая).

**Текстура:** массивная, полосчатая, брекчиевая, пятнистая.

Минеральный состав: кальцит или доломит.

Образованы в результате метаморфических преобразований карбонатных горных пород (известняков, доломитовых известняков).

**Практическое применение.** Как облицовочный материал, таблички, ступеньки, памятники. Для производства соляной кислоты и в изготовлении скульптур.



## АМФИБОЛИТ



**Структура:** полнокристаллическая, гранобластовая, размеры зерен 1-3 мм и ниже.

**Текстуры:** полосчатая и сланцеватая или массивная, пятнистая.

**Минеральный состав:** горнбленд, плагиоклаз. **Второстепенные минералы:** кварц, кальцит, диопсид, гранат, биотит и т.д.

**Генезис:** Метаморфизм высокой ступени основных горных пород и их туфов, мергелей.

**Практическое применение:** С амфиболитами связаны месторождения титана, ильменита и рутила.

# Кристаллические сланцы



**Структура:** полнокристаллическая, зернисто-чешуйчатая (гранолепидобластовая и лепидобластовая), нередко порфиробластовая.

**Текстура:** параллельно-полосчатая или сланцеватая.

**Минеральный состав:** в большом количестве слюды и кварц в меньшем количестве полевые шпаты. Второстепенные минералы - андалузит, дистен, sillimanит, кордиерит, ставролит, гранат, горнбленд, кальцит, графит и т.д.

**Известны следующие разновидности:** биотитовый, мусковитовый, двуслюдяной (мусковит-биотитовый), гранат-биотитовый и т.д.

**Практическое применение.** Сланцы с sillimanитом и дистеном бывают высокоглиноземистыми, горные породы с рутилом — являются титановым сырьем; сланцы с графитом и гранаами — источники графита и граната.

## Гнейс



**Структура:** полнокристаллическая, мелко-, средне- или крупнозернистые (гранобластовая) или чешуйчатозернистые (лепидогранобластовая).

**Текстура:** сланцеватая, параллелчатая, гнейсовая.

**Минеральный состав:** полевые шпаты (в большинстве плагиоклаз) и кварц. Второстепенные минералдар (5-20%) — биотит, горнбленд, пироксен, гранат, дистен, силлиманит, графит и т.д.

**Разновидности:** биотитовые гнейсы, гранат-биотитовые; дистен-гранат-биотитовые и т.д.

**Практическое применение.** Тротуарные плитки, таблички, связаны месторождения графитов.

# КОНТАКТОВО-МЕТАСОМАТИТОВЫЕ ГОРНЫЕ ПОРОДЫ

## Известковый скран



**Структура:** полнокристаллическая, крупно- и гигантозернистая, часто афанитовая.

**Текстура:** массивная, или полосчатая.

**Минеральный состав** — пироксены диопсид-геденбергитового ряда, гранатыgrossуляр-андрадитового ряда.

**Второстепенные минералы:** везувиан, родонит, волластонит, магнетит, кейде шеелит, молибденит, галенит, сфалерит, халькопирит, касситерит и т.д.

**Генезис:** в результате метасоматоза на контакте карбонатных горных пород с гранитами и гранодиоритами.

**Практическое применение.** С известковыми скарнами связаны руды железа, вольфрама, молибдена, свинца и цинка, меди, бора, олова, бериллия и т.д.



# Магнезиальный скарн



**Структура и текстура** — похожи на известковые скарны.

**Главные минералы:** — форстерит, диопсид, флогопит, апатит, горнбленд, магнетит, или турмалин; иногда флогопит — оливин и биотит.

**Генезис.** Зоны и залежи, линзы на контакте гранитоидов и пегматитов с доломититами или доломитовыми известняками.

**Практическое применение.**

С магнезиальными скарнами связаны флогопитовые и магнетитовые крупные месторождения.

# Гидротермально-измененные метасоматические горные породы

## Вторичные кварциты



**Структура:** мелко- или среднезернистая, иногда остаточная (реликтовая) порфировая.

**Текстура:** массивная, часто пористая.

**Минеральный состав:** кварц, редко серицит или мусковит, каолинит, диаспор, корунд, андалузит, топаз, пиррофиллит, алунит; часто пирит, включения халькопирита и т.д.

**Генезис:** граниты, гранит-порфиры, кварцевые порфиры кроме того образовались из гидротермально-измененных и размещенных на кровле магматических горных пород песчаников и туфов.

**Практическое применение:** со вторичными кварцитами связаны крупные месторождения медно-порфирового типа, сернистые колчеданы, алунит и т.д.



# Грейзен



**Структура:** крупно-, средне-, мелкозернистые.

**Текстура:** полосчатая редко массивная.

**Минеральный состав:** кварц, мусковит немесе литиевые слюды (циннвальдит и лепидолит), часто топаз, турмалин и флюорит; **нередко рудные минералы:** касситерит, вольфрамит, молибденит, берилл, колумбит-танталит, микролит и т.д.; обычные примеси — пирит, арсенопирит, сфалерит, магнетит, гематит, иногда висмутин и т.д.

**Грейзены** — продукты метасоматического изменения кислых магматических, осадочных алюмосиликатных и метаморфических горных пород под воздействием высокотемпературных магматических гидротермальных растворов.

**Практическое применение.** Грейзенизация спутник месторождений вольфрама, бериллия, молибдена (грейзены с мусковитом, топазом и в большом количестве флюоритом), олова, тантала (литиевые слюды и топазовые грейзены). Грейзены являются поисковым признаком месторождений редких металлов.

# Березит



**Структура:** мелкозернистая

**Текстура:** массивная.

**Минеральный состав:** кварц и серицит, дополнительно анкерит или доломит, вместе с ним пирит. Иногда полевые шпаты — альбит или ортоклаз.

**Генезис:** при гидротермальном измененном горных пород гранитного состава (гранитов, гранит-порфиров) возле кварцевых жил.

**Практическое применение.** Поисковый признак на золото, полиметаллы. Нередко березит золотоносный.

Среди *регионально-метаморфизованных месторождений* наибольшее значение имеют следующие типы: гематит-магнетитовый (железистых кварцитов) и браунит-гаусманитовый (марганцеворудный). К регионально-метаморфизованным относятся также месторождения *урансодержащих золотоносных конгломератов*, играющих важную роль для зарубежных стран – ЮАР (*Витватерсранд*), Австралии, Канады (*Блайнд-Ривер*), Бразилии.

К метаморфическим принадлежат почти исключительно месторождения неметаллических полезных ископаемых, образовавшиеся в основном в условиях регионального метаморфизма. Главными типами метаморфических месторождений являются дистен-силлиманитовые, графитовые, мраморов, кварцитов и кровельных сланцев.