



# Общая геохимия

## Лекция 17

### Геохимия метаморфических процессов

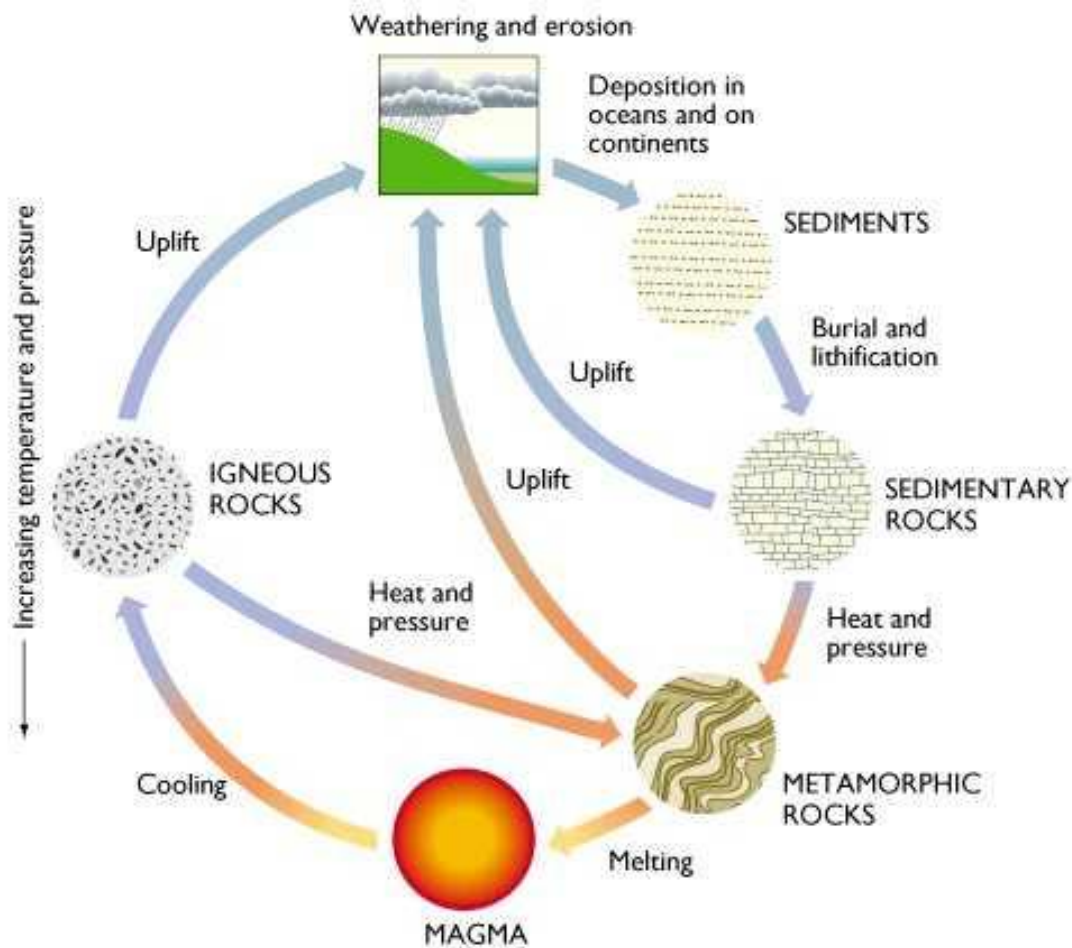
# Место метаморфизма в геохимическом

цикле

• **Метаморфизм** – изменения в породах с ростом

(не только!!!)  
флюида.

ВИЕМ





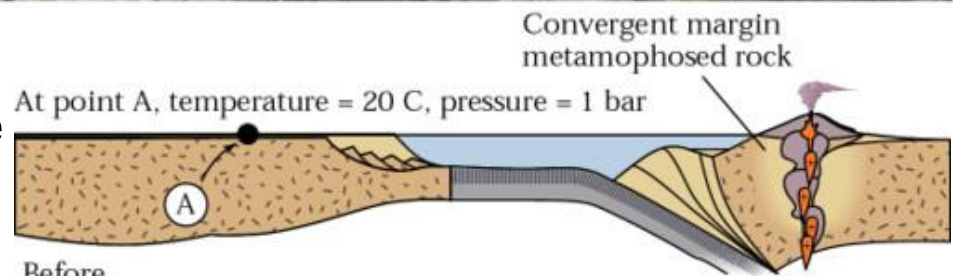
Горообразование



Рубин

Сапфир

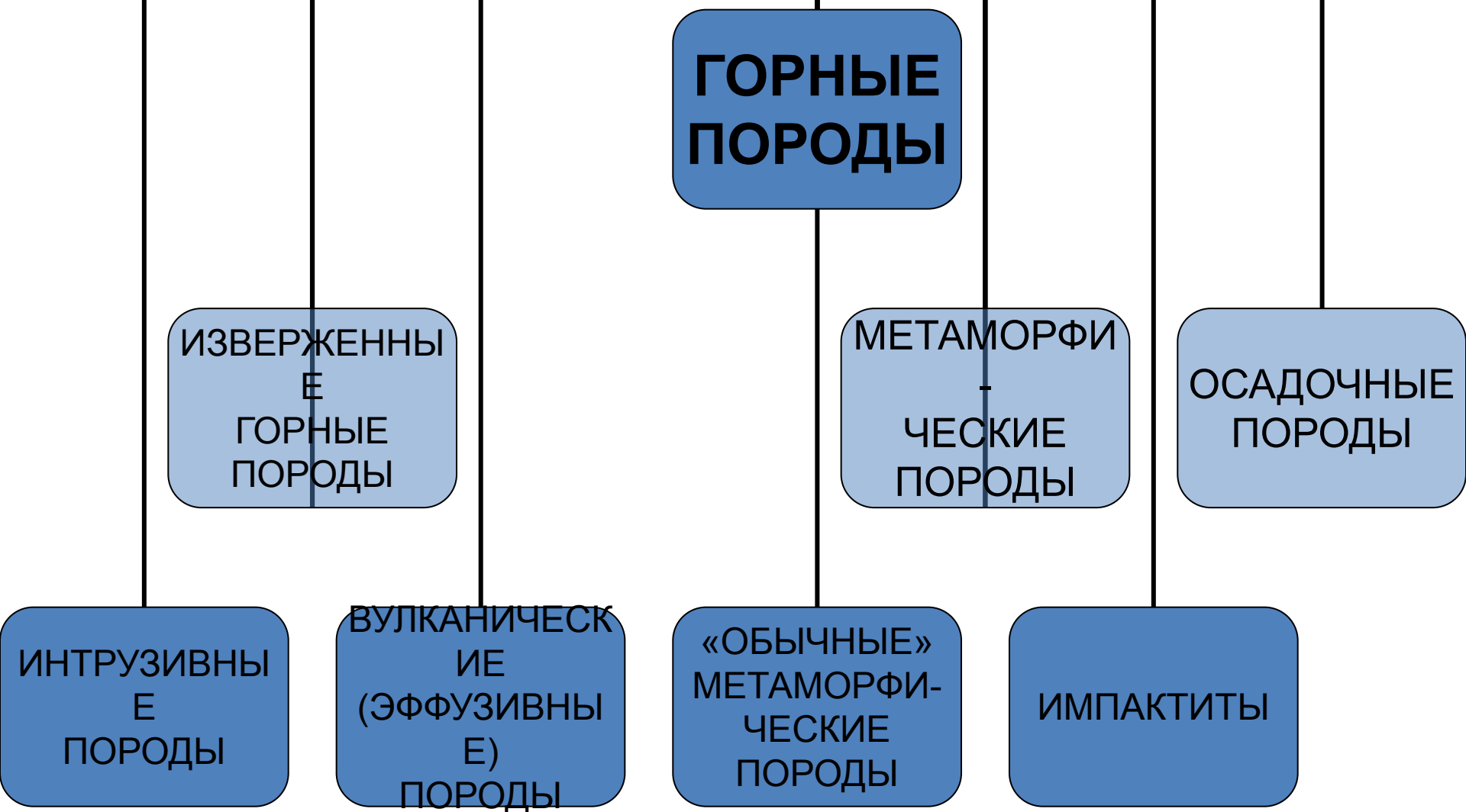
Минеральные ресурсы



История континентальной коры

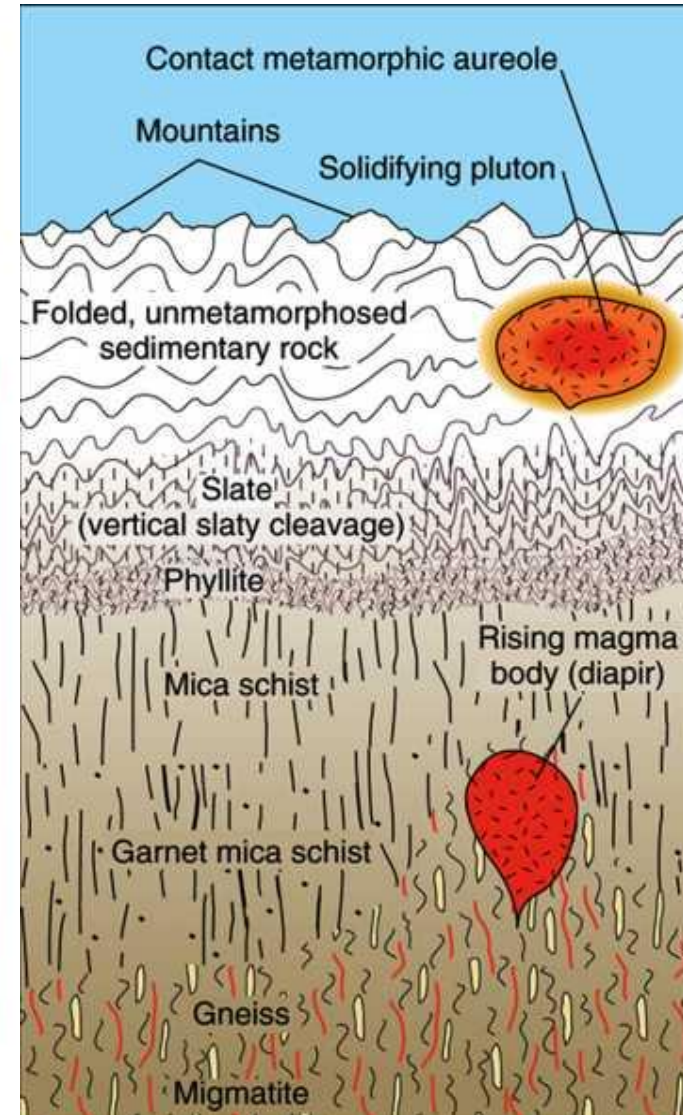
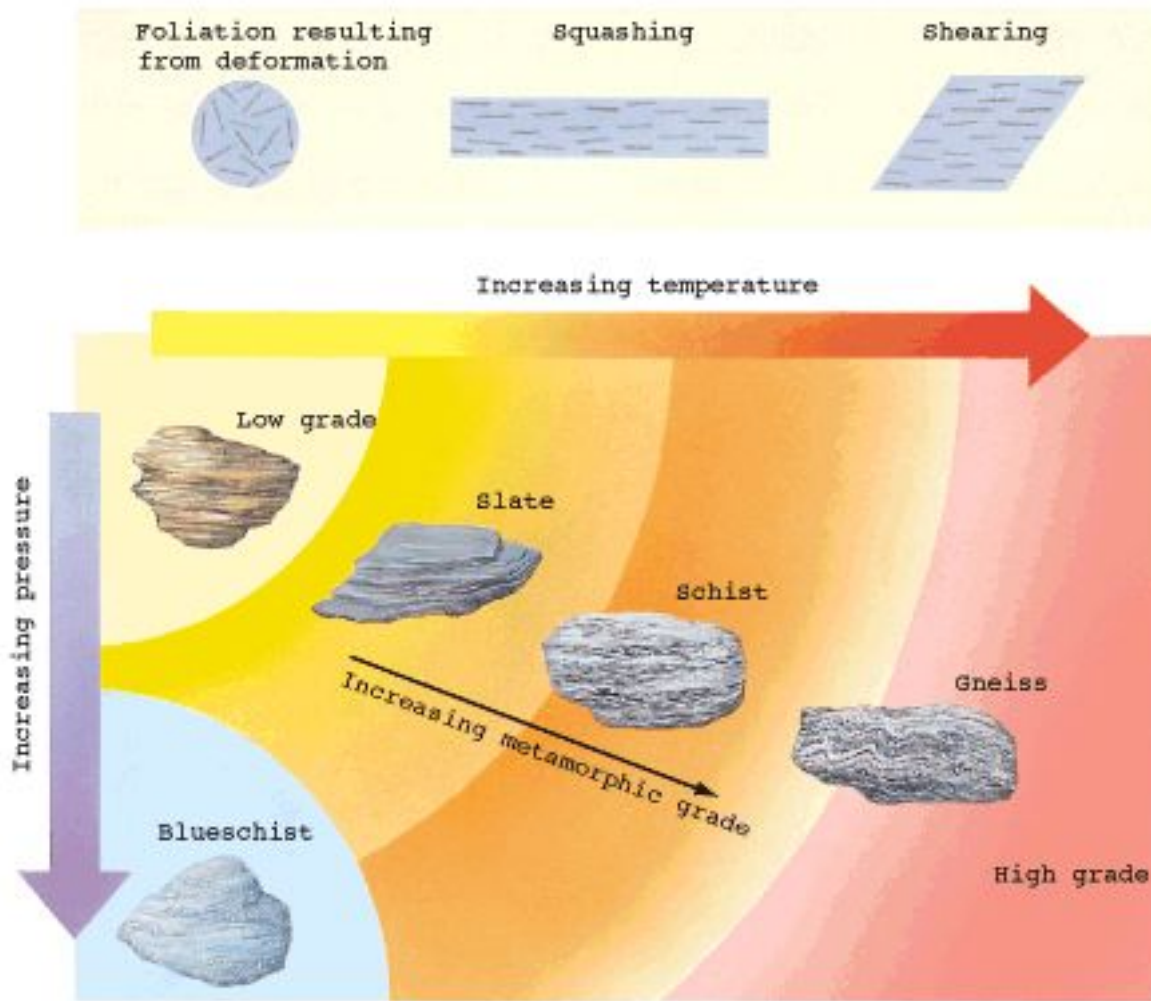
Courtesy The Natural History Museum, London.

# Систематика горных пород

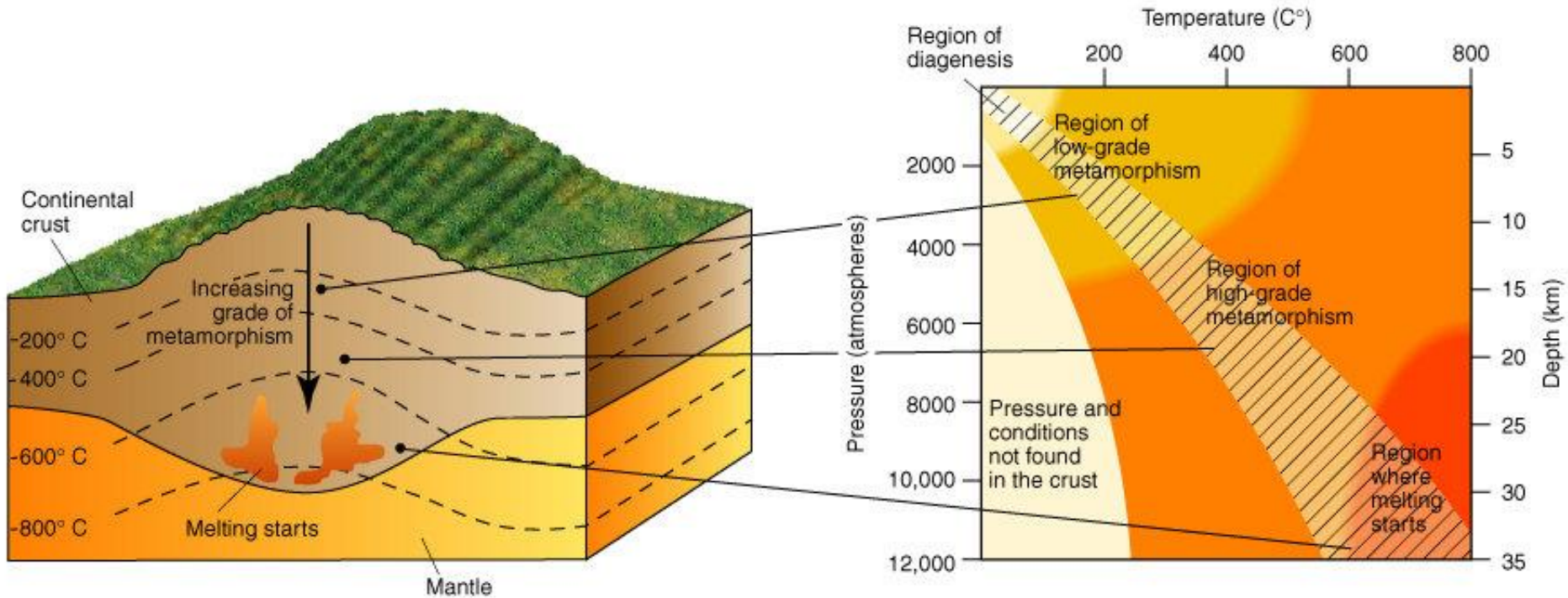


**МЕТАМОРФИЗМ** обычно приводит к изменениям в:

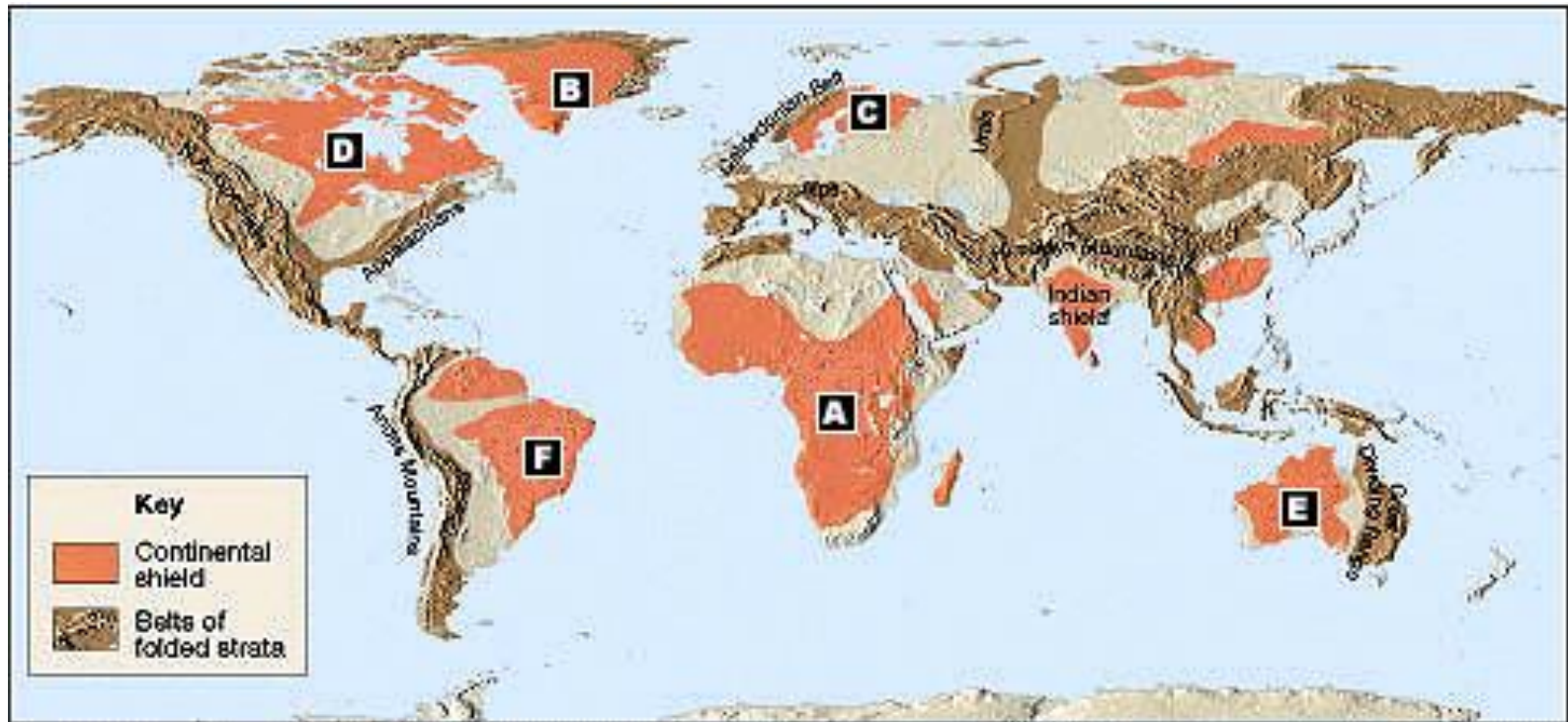
- **минералогии** ⇒ образование метаморфических минералов
- **текстуре** ⇒ образование метаморфической “ткани”



# Метаморфизм - перекристаллизация в твердом состоянии



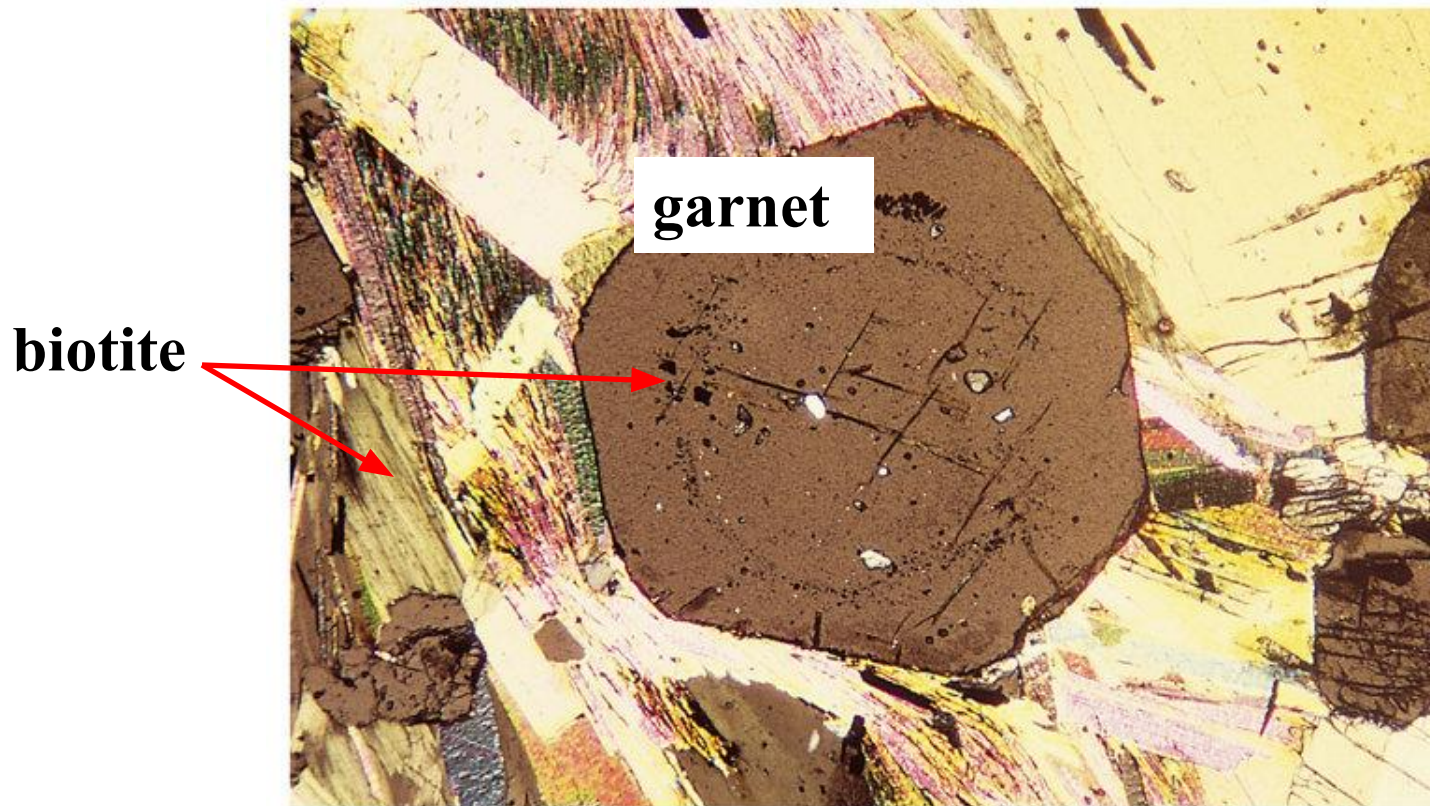
Значительная часть земной коры, более 70%,  
затронута процессами метаморфизма



Составы минералов по главным элементам  
лежат в основе реконструкции P-T-t трендов  
метаморфизма и термобарометрии

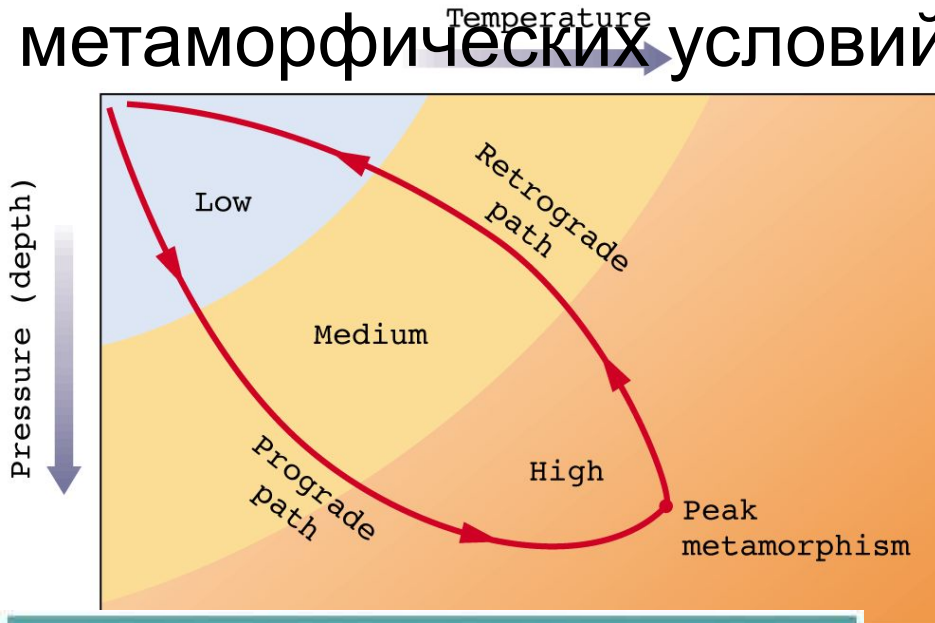
# Геотермобарометрия

В основе определения  $P$  и  $T$  по составам сосуществующих породообразующих минералов (определенных с помощью микроскопа) — биотит-гarnет-термометр

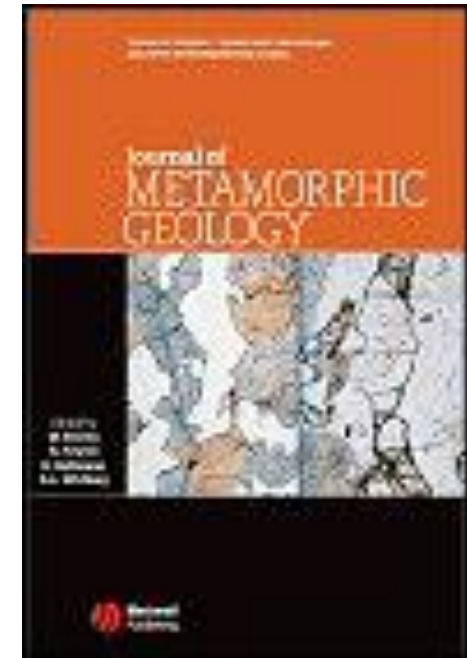




Метам. породы обычно  
отражают «пик»  
метаморфических условий



## Метаморфическая петрология

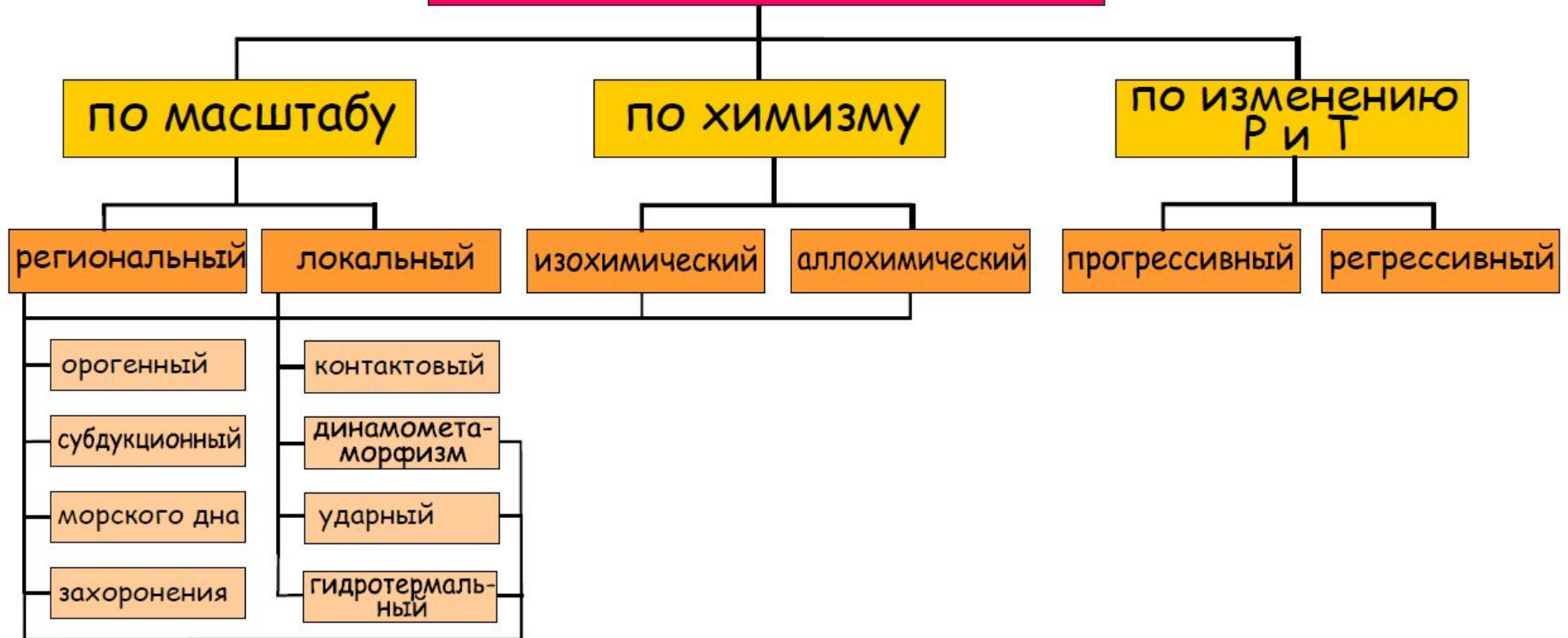


Специфичные минералы  
для определения P-T-  
параметров ⇒

“индекс-минералы”  
(например, гранат)

- **Метаморфизм** (греч. metamorphoómai - **подвергаюсь превращению, преобразуюсь**) - **процесс твердофазного минерального и структурного изменения горных пород под воздействием температуры и давления в присутствии флюида.**
- Выделяют *изохимический* метаморфизм — при котором химический состав породы **меняется несущественно;**
- *неизохимический метаморфизм* (метасоматизм) для которого характерно **заметное изменение химического состава породы, в результате переноса компонентов флюидом.**

# ТИПЫ МЕТАМОРФИЗМА



# Характерный масштаб химической неоднородности горных пород и определение понятий метаморфизм и метасоматоз

| Характерный масштаб химической неоднородности   |           |             |          |             |             |
|---|-----------|-------------|----------|-------------|-------------|
| 1 - 10 мм   | 1 - 10 см | 10 - 100 см | 1 - 10 м | 10 - 100 м  | >100 м      |
| Неоднородности случайным образом распределены в объеме пород                                    |           |             |          |             |             |
| МЕТАМОРФИЗМ   |           |             |          |             | МЕТАСОМАТОЗ |
| Неоднородности распределены в пространстве закономерно, являясь зонами метасоматической колонки |           |             |          |             |             |
| МЕТАМОРФИЗМ   |           |             |          | МЕТАСОМАТОЗ |             |

# Основные факторы метаморфизма

- Основными факторами метаморфизма являются температура, давление и флюид.
- С ростом **температуры** происходят метаморфические реакции с разложением водосодерж. фаз (хлориты, слюды, амфиболы). Нижняя T граница – диагенез (100-150°C).
- С ростом **давления** происходят реакции с уменьшением объема фаз. При температурах более 600°C начинается частичное плавление некоторых пород, образуются расплавы, которые уходят на верхние горизонты, оставляя тугоплавкий остаток – рестит.

# Давление [бар, Па]

10 кбар = 1 ГПа (гигапаскаль)

- ✚ **литостатическое ( $P_s$ )** - равностороннее давление, создается толщей вышележащих пород. Связано с глубиной выражением  $P_s = \rho g z$ ;

$P = 1$  кбар = 0.1 ГПа создается \*

в перидотите ( $\rho = 3300$  кг/м<sup>3</sup>) - 3.0 км толщей,  
в метаосадке ( $\rho = 2700$  кг/м<sup>3</sup>) - 3.7 км толщей

- ✚ **флюидное ( $P_f$ )** - давление внутреннего и или внешнего флюида; возможны разные соотношения между  $P_f$  и  $P_s$  :  
 $P_f < P_s$  ,  $P_f = P_s$  и  $P_f > P_s$ .

- ✚ **стрессовое** - направленное давление.

\* Н = кг м / с<sup>2</sup> ; Па = Н/ м<sup>2</sup>

- **Флюидом называются летучие компоненты метаморфических систем.**
- Это первую очередь вода и углекислый газ. Реже роль могут играть кислород, водород, углеводороды, соединения галогенов и некоторые другие.
- В присутствии флюида область устойчивости многих фаз (особенно содержащих эти летучие компоненты) изменяется.
- В присутствии флюида плавление горных пород начинается при значительно более низких температурах.

# ФЛЮИД

**Флюид** - субстанция, состоящая из летучих компонентов и растворенных веществ, находящаяся в **надкритическом состоянии**.

**Флюид** = летучие ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и др.)  $\pm$  растворенные (напр.,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  и т.д.) **КОМПОНЕНТЫ**.

- Флюид нельзя отождествлять с газом или с жидкостью! Между газом и жидкостью существует фазовая граница. Например, границу между водой и водным паром мы видим, подогревая воду в котелке.

При температуре более  $373^\circ\text{C}$  и давлении более 221 бар картина иная: сжатие пара не приводит к образованию жидкости и наоборот. **Фазовая граница между жидкостью и паром исчезает, т.е. нет уже ни жидкости, ни пара. Существует только особая субстанция называемая флюидом.**

Критическая точка для  $\text{CO}_2$  -  $T = 31^\circ\text{C}$  и  $P = 74$  бар.

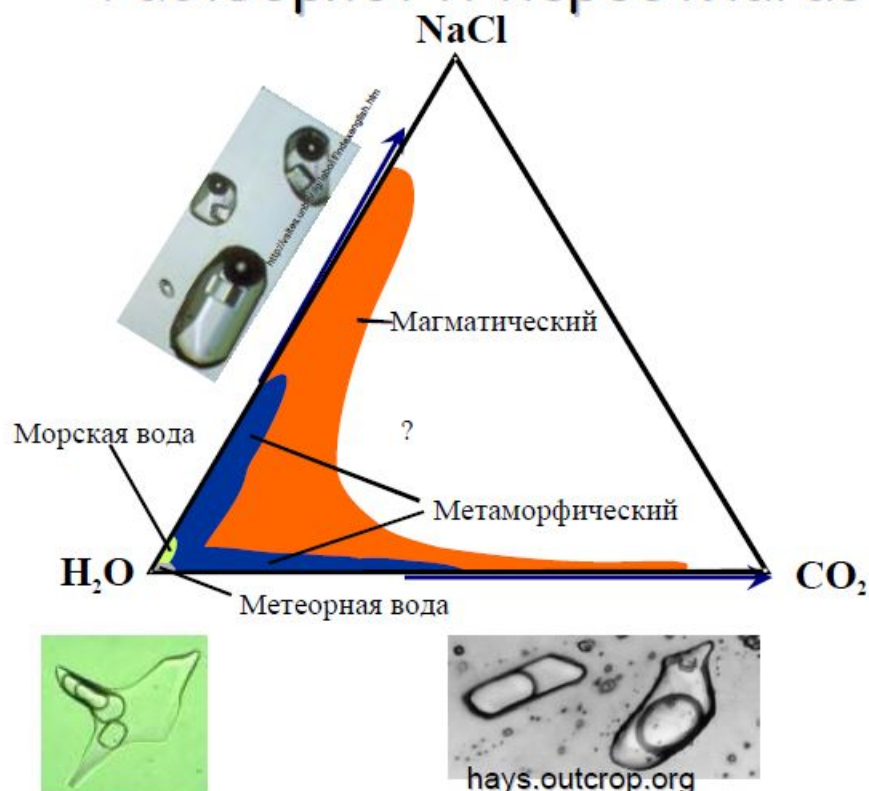


В казане флюида нет! Почему?



# Роль флюидов в метаморфических процессах

- Катализатор, а нередко и участник минеральных реакций.
- Снижает температуру солидуса → частичное плавление.
- Снижает прочность пород → деформации
- Растворяет и переотлагает компоненты пород.



## Источники информации о составе флюида

- Флюидные включения
- Минеральные парагенезисы
- Хим. состав пород
- Термодинамическое моделирование

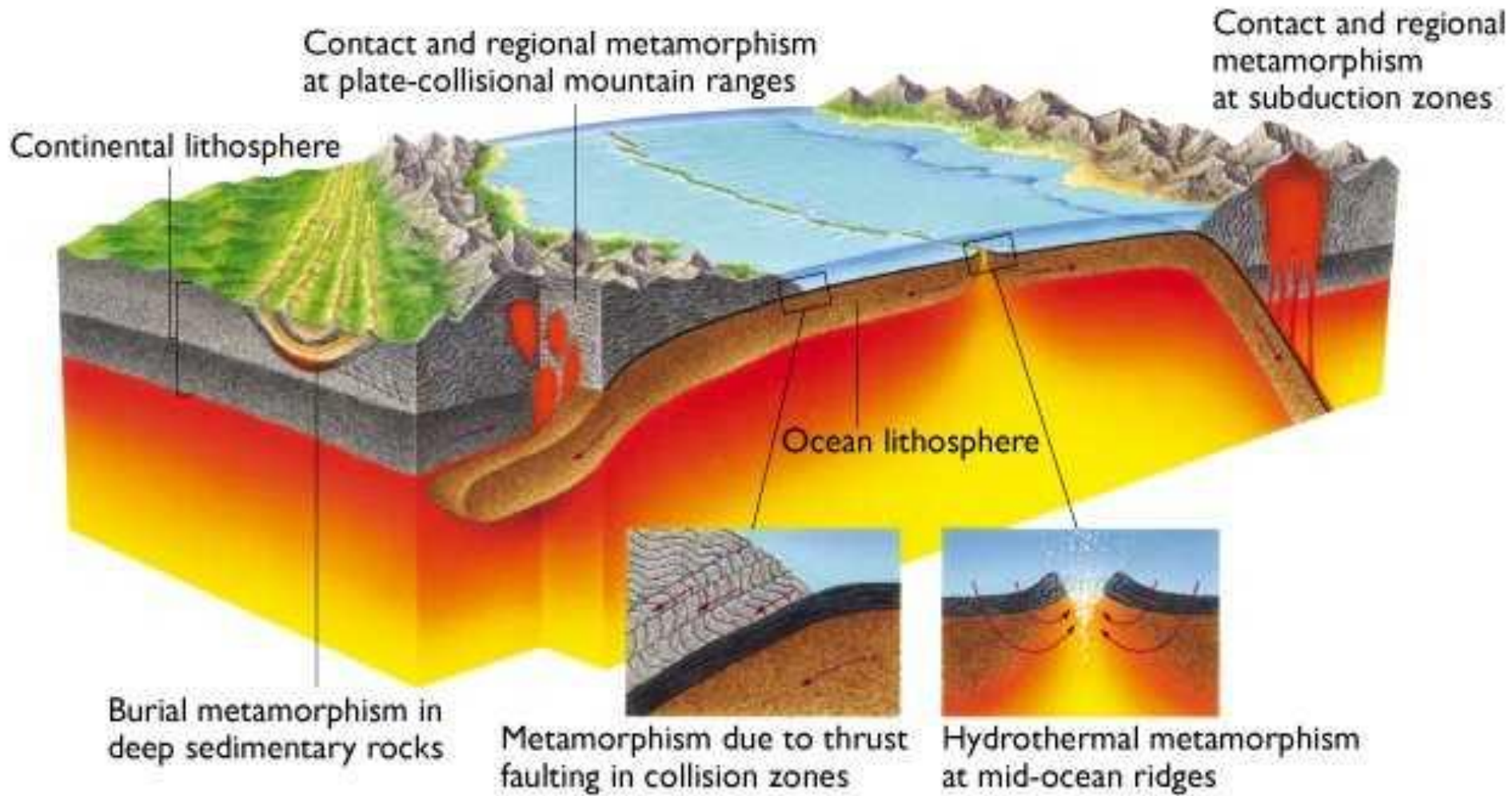
- По размеру ареалов распространения метаморфических пород, их структурному положению и причинам метаморфизма выделяются:
- **Региональный метаморфизм**, который затрагивает значительные объемы земной коры и распространен на больших площадях.
- **Контактовый метаморфизм** приурочен к магматическим интрузиям и происходит от тепла остывающей магмы.
- **Динамометаморфизм** происходит в зонах разломов, связан со значительной деформацией пород.
- **Импактный метаморфизм** происходит при резком ударе метеорита о поверхность планеты.

# КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАМОРФИЗМА

По месту проявления

- **Контактовый метаморфизм**
  - Пирометаморфизм
- **Региональный метаморфизм**
  - Орогенный метаморфизм
  - Метаморфизм погружения
  - Метаморфизм океанического дна
- *Гидротермальный метаморфизм (метасоматоз)*
- Метаморфизм складчатых зон
- **Impact or Shock Metamorphism**

# Типы метаморфизма

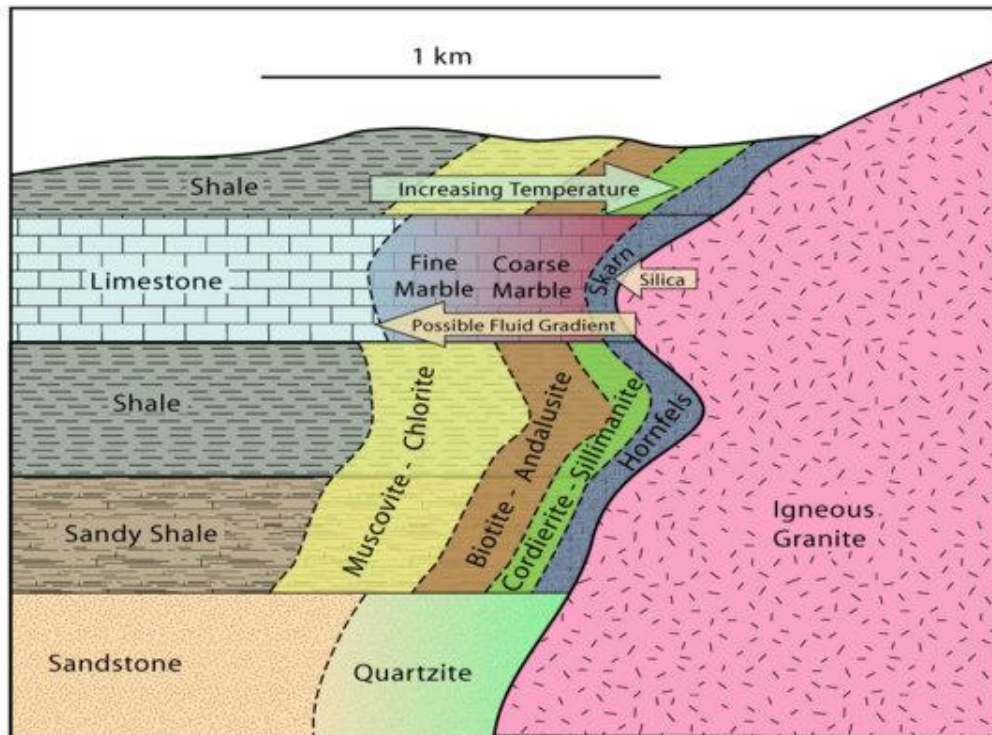


Два главных типа метам-ма в тектонически активных регионах:

(1) Контактный

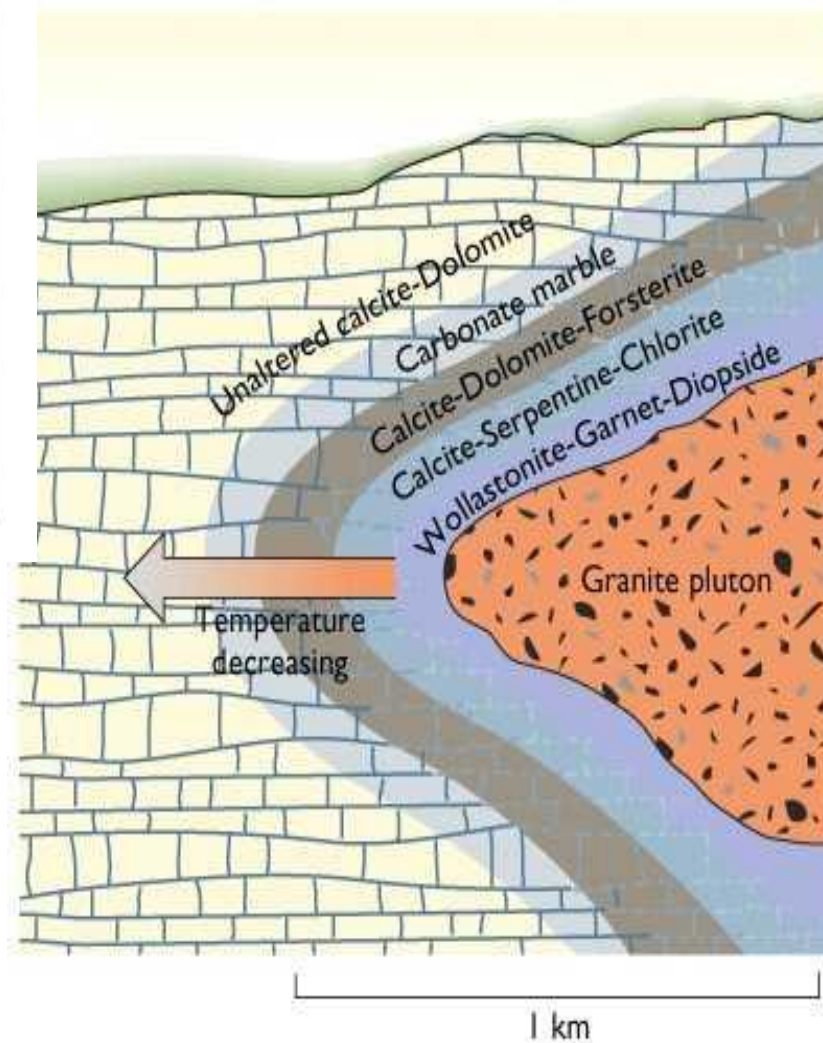
(2) Региональный метаморфизм

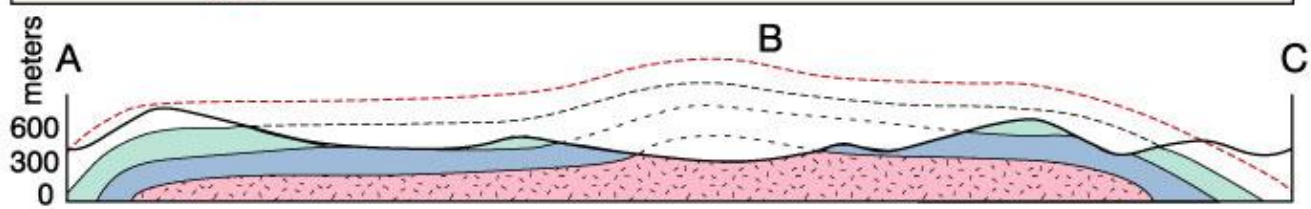
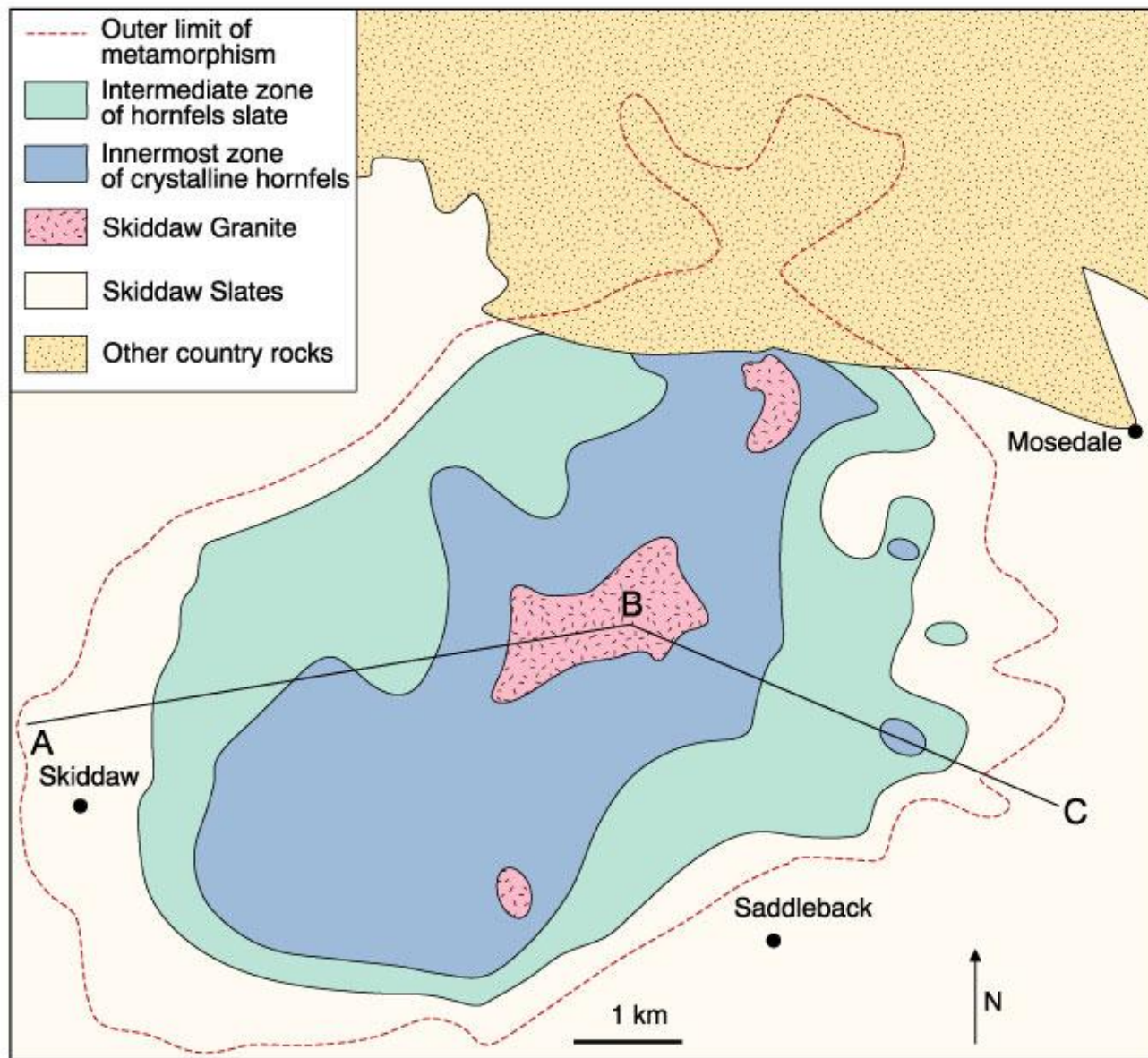
# Контактовый метаморфизм

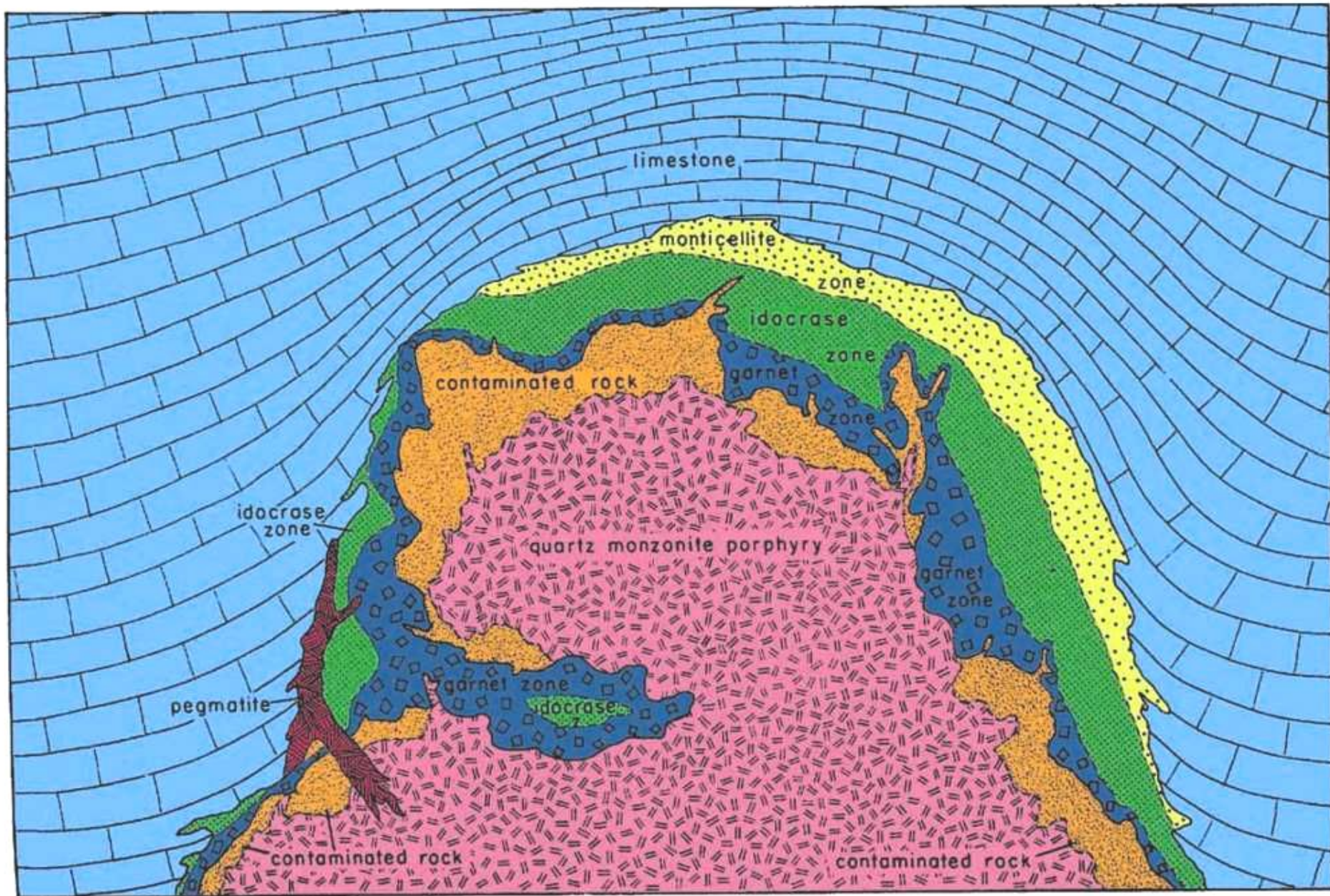


- термальный метаморфизм, источник тепла – интрузии
- узкие зоны (< 1 км)

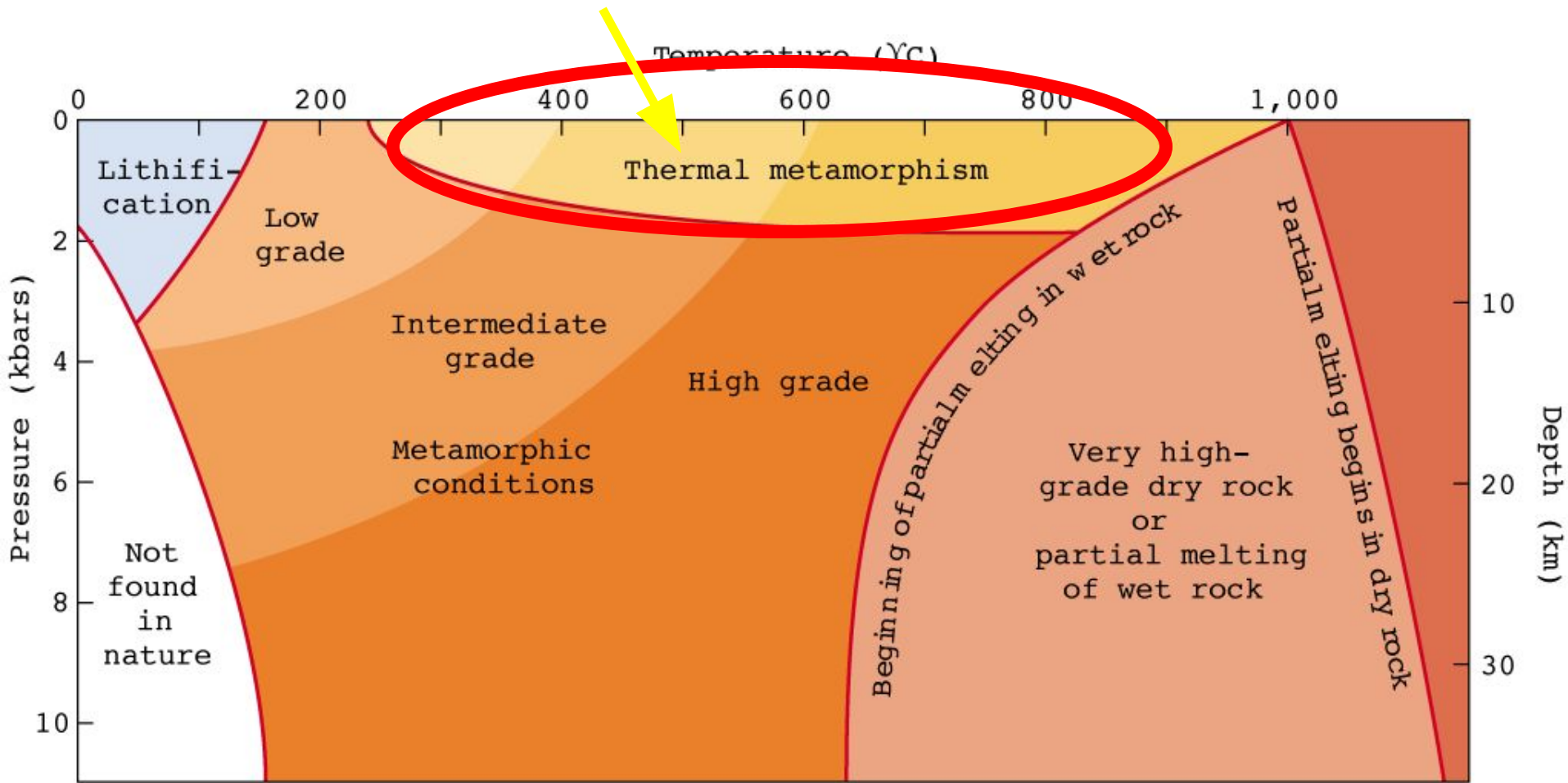
## Роговики







# Contact Metamorphism



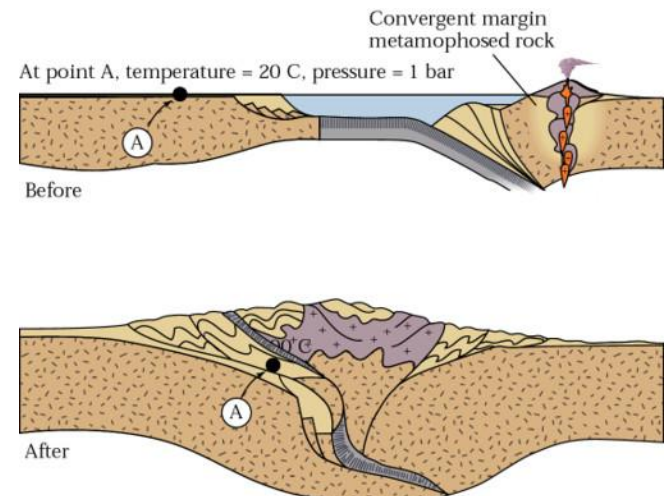
“thermal metamorphism” at high T – low P conditions



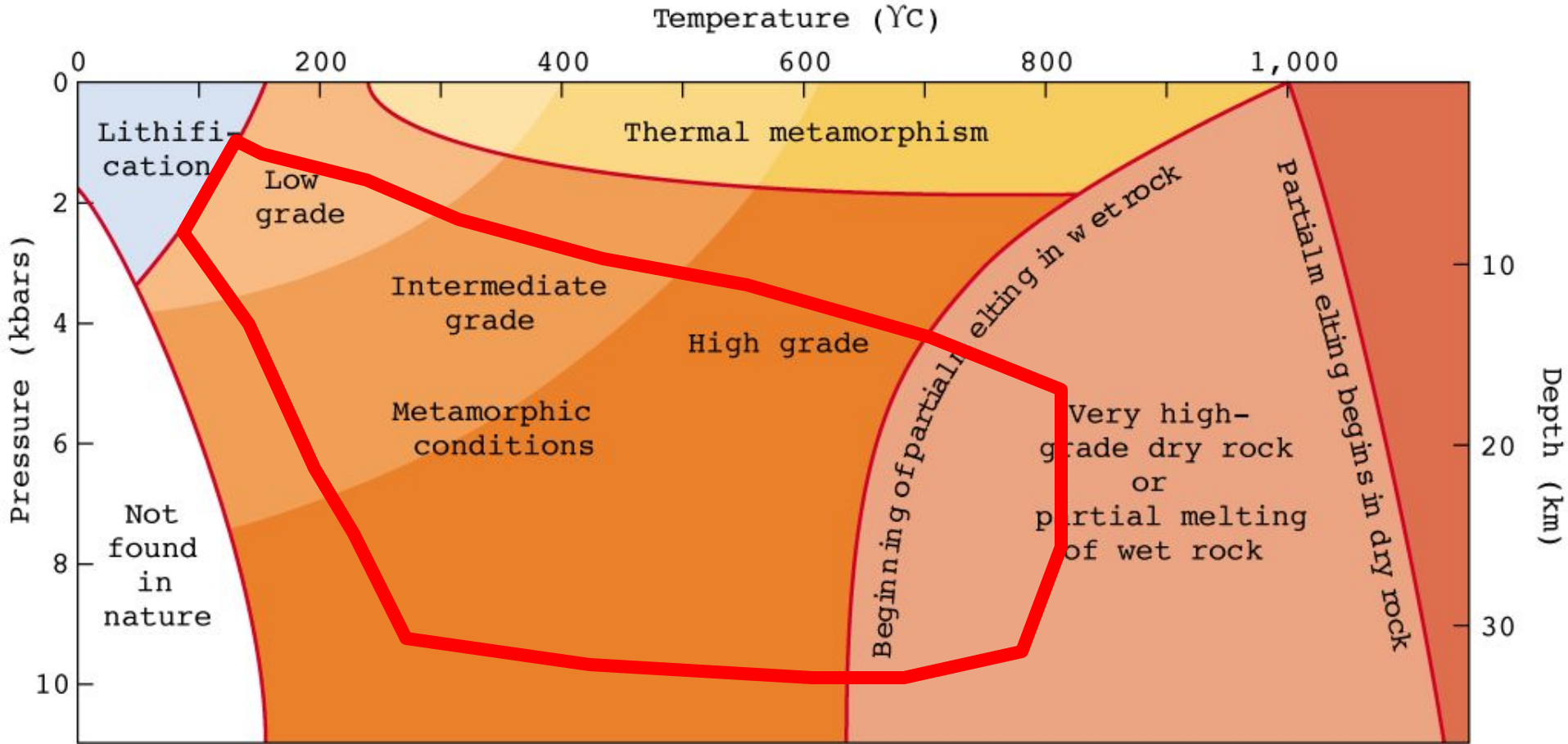
# Региональный метаморфизм

- Большие региональные масштабы проявления (тысячи кв. км); один или несколько эпизодов орогении с повышенными начениями геотермальных градиентов и деформаций
- Сопровождает с горообразованием на конвергентных границах плит (зоны субдукции, зоны коллизии) Примеры: Анды, Гималаи, Аппалачи
- Весь спектр РТ-условий; характерны деформации

П



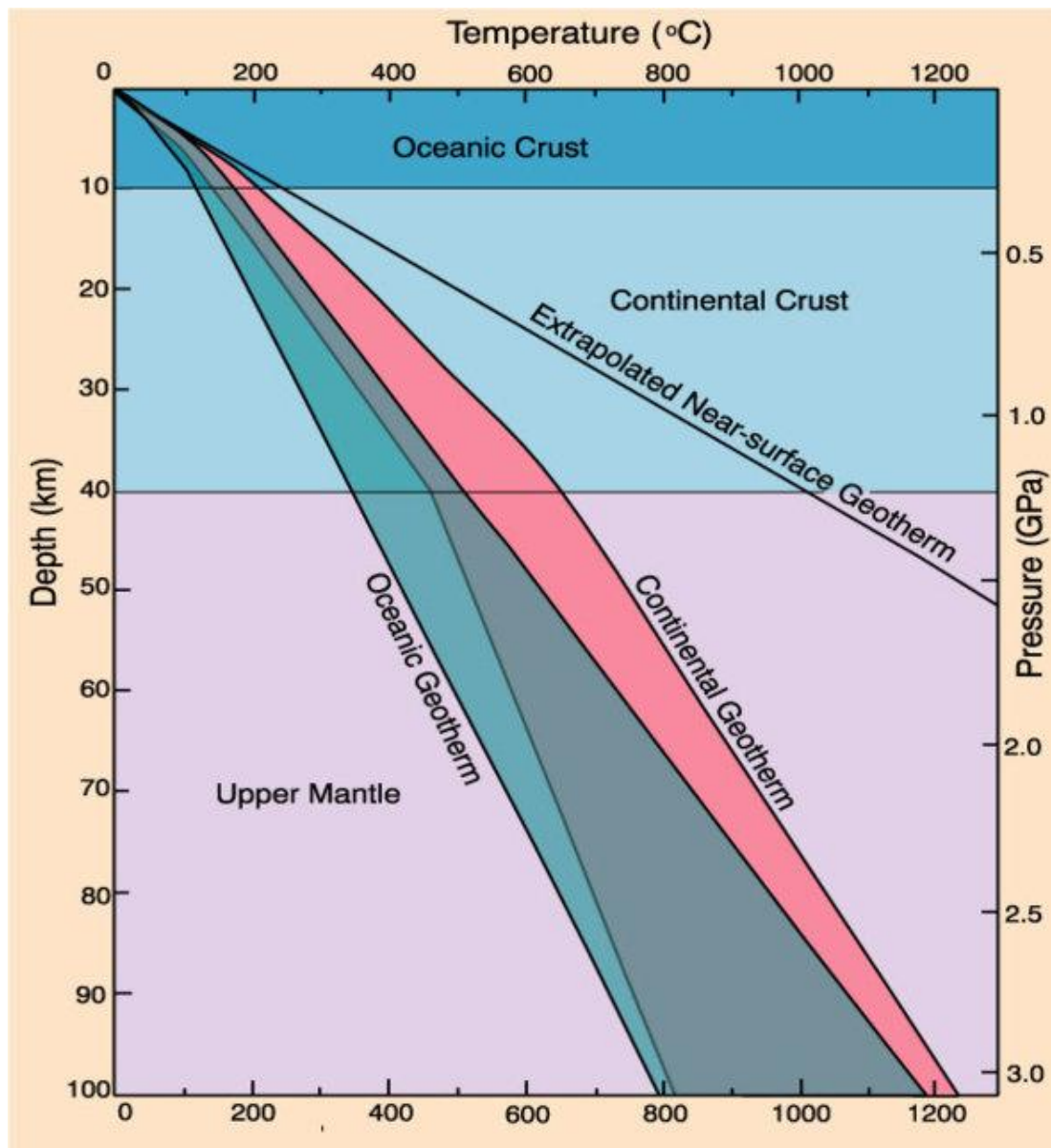
# Regional Metamorphism



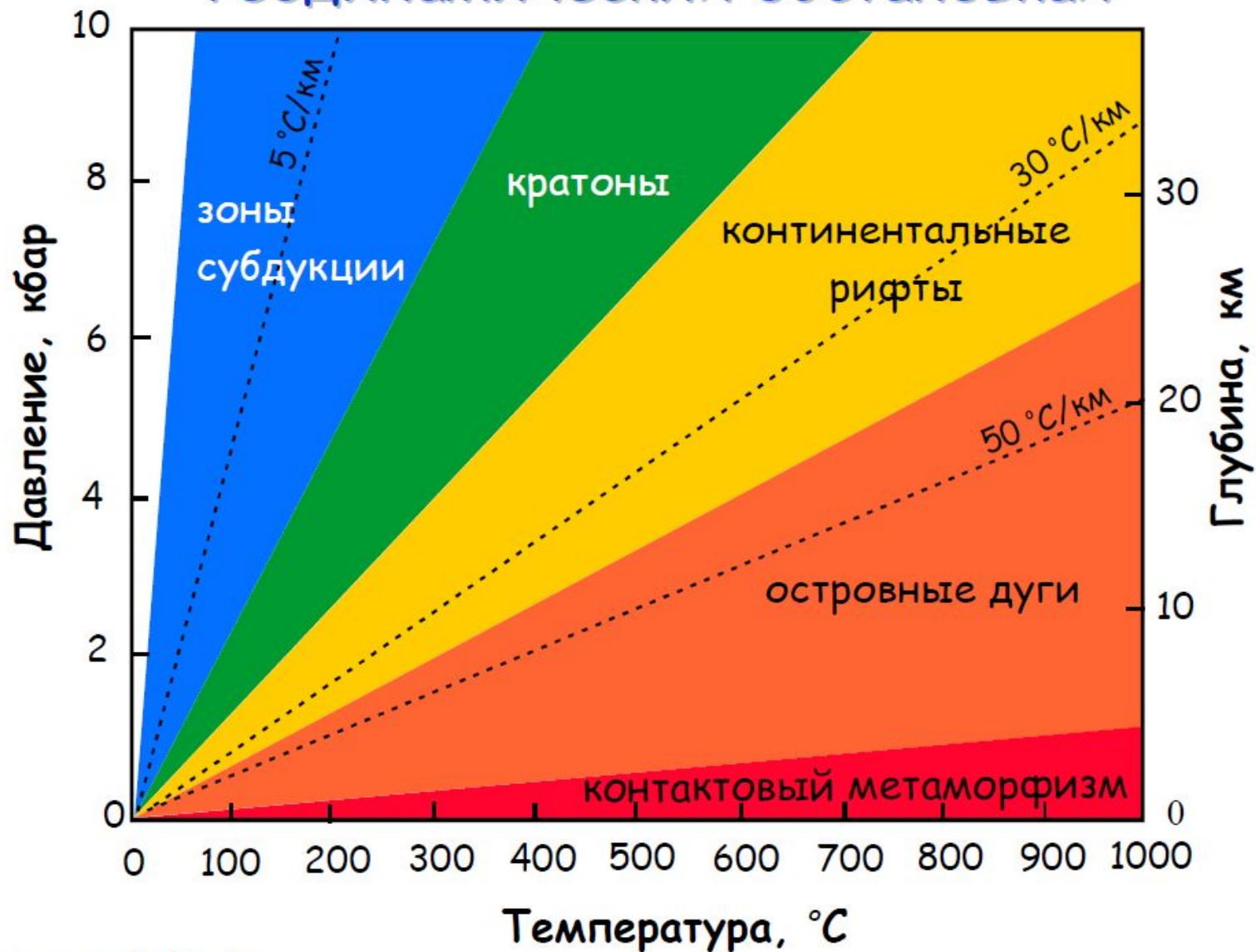
low to high P-T conditions

# Геотермы – кривые изменения температуры с увеличением глубины

- Изограды – линии одинаковой ступени (температуры) метаморфизма
- Температура – наиболее важный фактор метаморфизма



# Геотермические градиенты в разных геодинамических обстановках



данные В. Hacker

<http://www.geol.ucsb.edu/faculty/hacker/geo102C/lectures/part1.html>

# Высоко- и низкоградиентные режимы

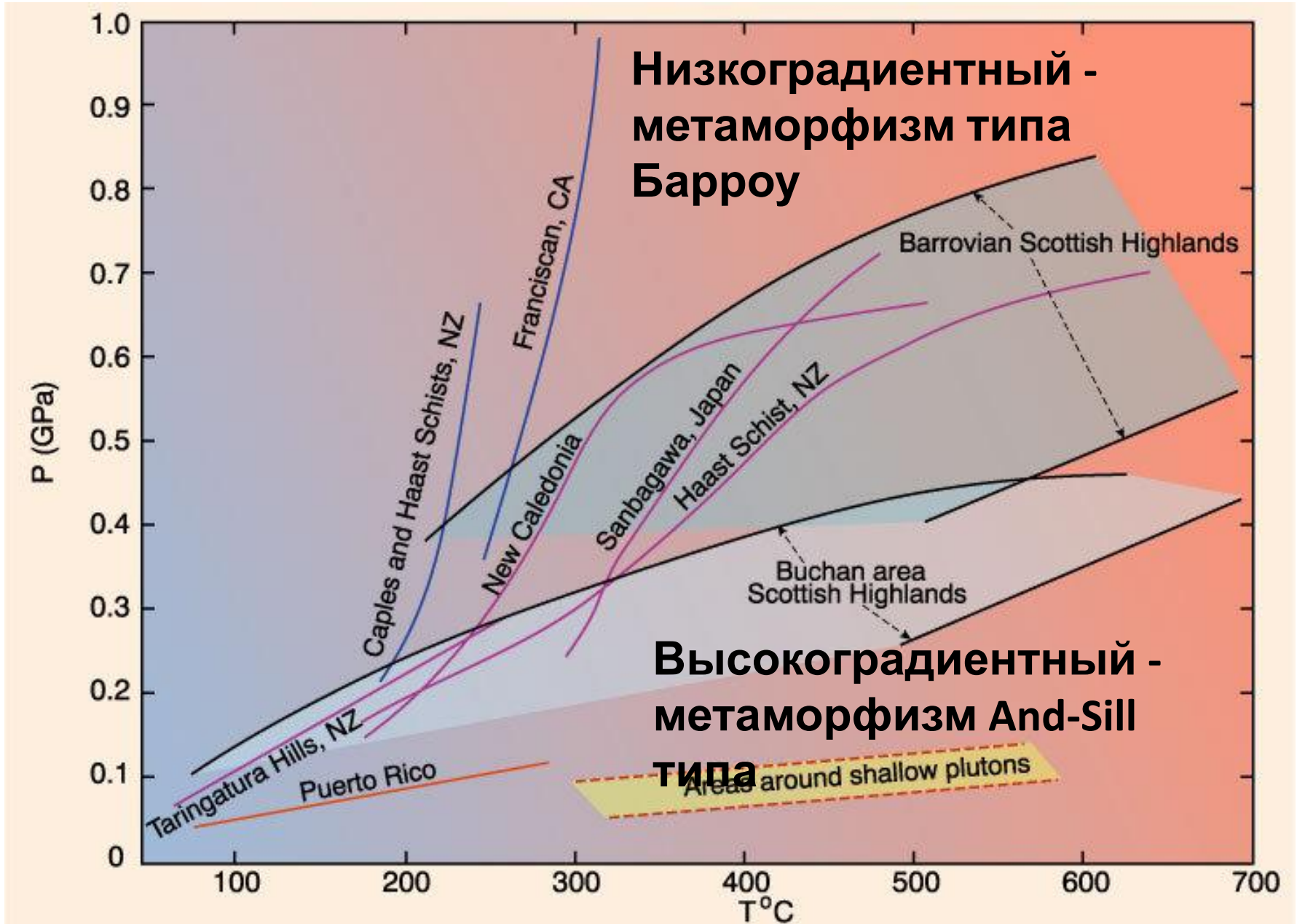


Table 7.1

## Classification and Naming of Metamorphic Rocks (Based Primarily on Texture)

## Nonfoliated

Name Based on Mineral Content of Rock

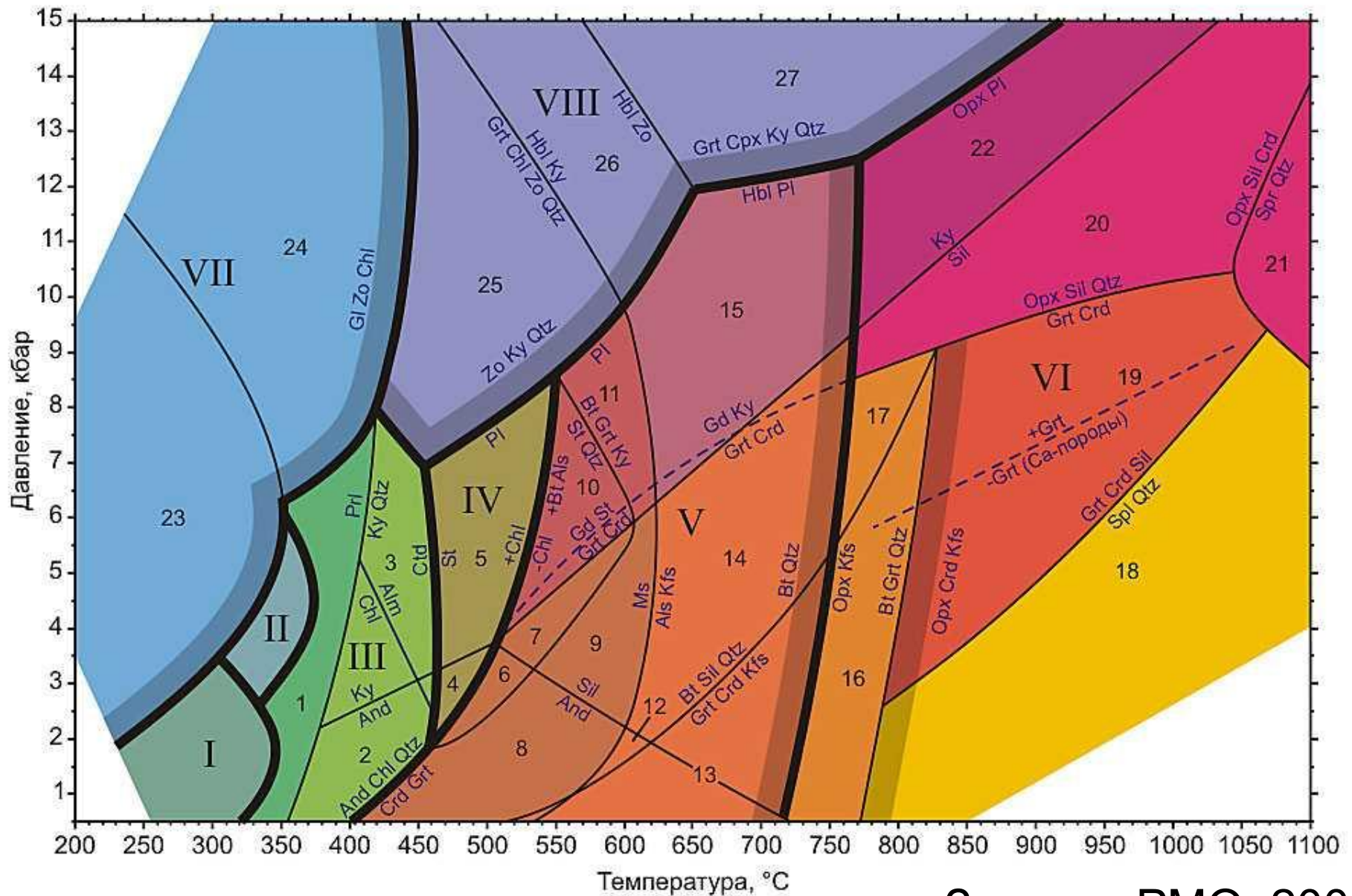
| Usual Parent Rock     | Rock Name                 | Predominant Minerals  | Identifying Characteristics   |
|-----------------------|---------------------------|---|---|
| Limestone<br>Dolomite | Marble<br>Dolomite marble | Calcite<br>Dolomite   | Coarse interlocking grains of calcite (or, less commonly, dolomite). Calcite (or dolomite) has rhombohedral cleavage; hardness intermediate between glass and fingernail. Calcite effervesces in weak acid. |
| Quartz sandstone      | Quartzite                 | Quartz  | Rock composed of interlocking small granules of quartz. Has a sugary appearance and vitreous luster; scratches glass.   |
| Shale<br>Basalt       | Hornfels<br>Hornfels      | Fine-grained micas<br>Fine-grained ferromagnesian minerals, plagioclase | A fine-grained, dark rock that generally will scratch glass. May have a few coarser minerals present.   |

## Foliated

Name Based Principally on Kind of Foliation Regardless of Parent Rock. Adjectives Describe the Composition (e.g., biotite-garnet schist)

| Texture                                  | Rock Name | Typical Characteristic Minerals  | Identifying Characteristics  |
|--|-----------|----------------------------------|--|
| Slaty                                    | Slate     | Clay and other sheet silicates   | A very fine-grained rock with an earthy luster. Splits easily into thin, flat sheets.  |
| Intermediate between slaty and schistose | Phyllite  | Muscovite mica                   | Fine-grained rock with a silky luster. Generally splits along wavy surfaces.   |
| Schistose                                | Schist    | Biotite and muscovite, amphibole | Composed of visible platy or elongated minerals that show planar alignment. A wide variety of minerals can be found in various types of schist (e.g., garnet mica schist, hornblende schist, etc.).  |
| Gneissic                                 | Gneiss    | Feldspar                         | Light and dark minerals are found in separate, parallel layers or lenses. Commonly, the dark layers include biotite and hornblende; the light-colored layers are composed of feldspars and quartz. The layers may be folded or appear contorted. |

# СХЕМА МИНЕРАЛЬНЫХ ФАЦИЙ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД



**I** цеолитовая или пумпеллиит-пренитовая

**II** пумпеллиит-актинолитовая

**III – зеленосланцевая**

**1** мусковит-стильпномелан-хлоритовая

**2** мусковит-хлорит-биотитовая ( $\pm$ андалузит)

**3** биотит-хлоритоид-гранатовая ( $\pm$ кианит)

**IV – эпидот-амфиболитовая**

**4** ставролит-хлорит-андалузитовая

**5** ставролит-хлорит-кианитовая

**V – амфиболитовая**

**6** ставролит-андалузит-биотит-мусковитовая

**7** ставролит-силлиманит-биотит-мусковитовая

**8** биотит-андалузит-кордиерит-мусковитовая

**9** биотит-силлиманит-гранат-мусковитовая

**10** ставролит-кианит-биотит-мусковитовая

**11** биотит-кианит-гранат-мусковитовая

**12** биотит-андалузит-кордиерит-калишпатовая

**13** биотит-кордиерит-гранат-калишпатовая

**14** биотит-силлиманит-гранат-калишпатовая

**15** биотит-кианит-гранат-калишпатовая

**VI – гранулитовая**

**16** биотит-гиперстен-гранат-калишпатовая

**17** биотит-силлиманит-кордиерит-калишпатовая

**18** шпинель-кварцевая

**19** гиперстен-кордиерит-гранат-калишпатовая

**20** гиперстен-силлиманит-кварцевая

**21** сапфирин-кварцевая

**22** гиперстен-кианит-кварцевая

**VII – глаукофансланцевая**

**23** глаукофан-цоизитовая


**24** глаукофан-лавсонитовая

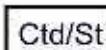
**VIII – эклогитовая**

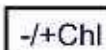
**25** парагонит-цоизит-кианит-кварцевая

**26** каринтин-кианит-цоизит-кварцевая

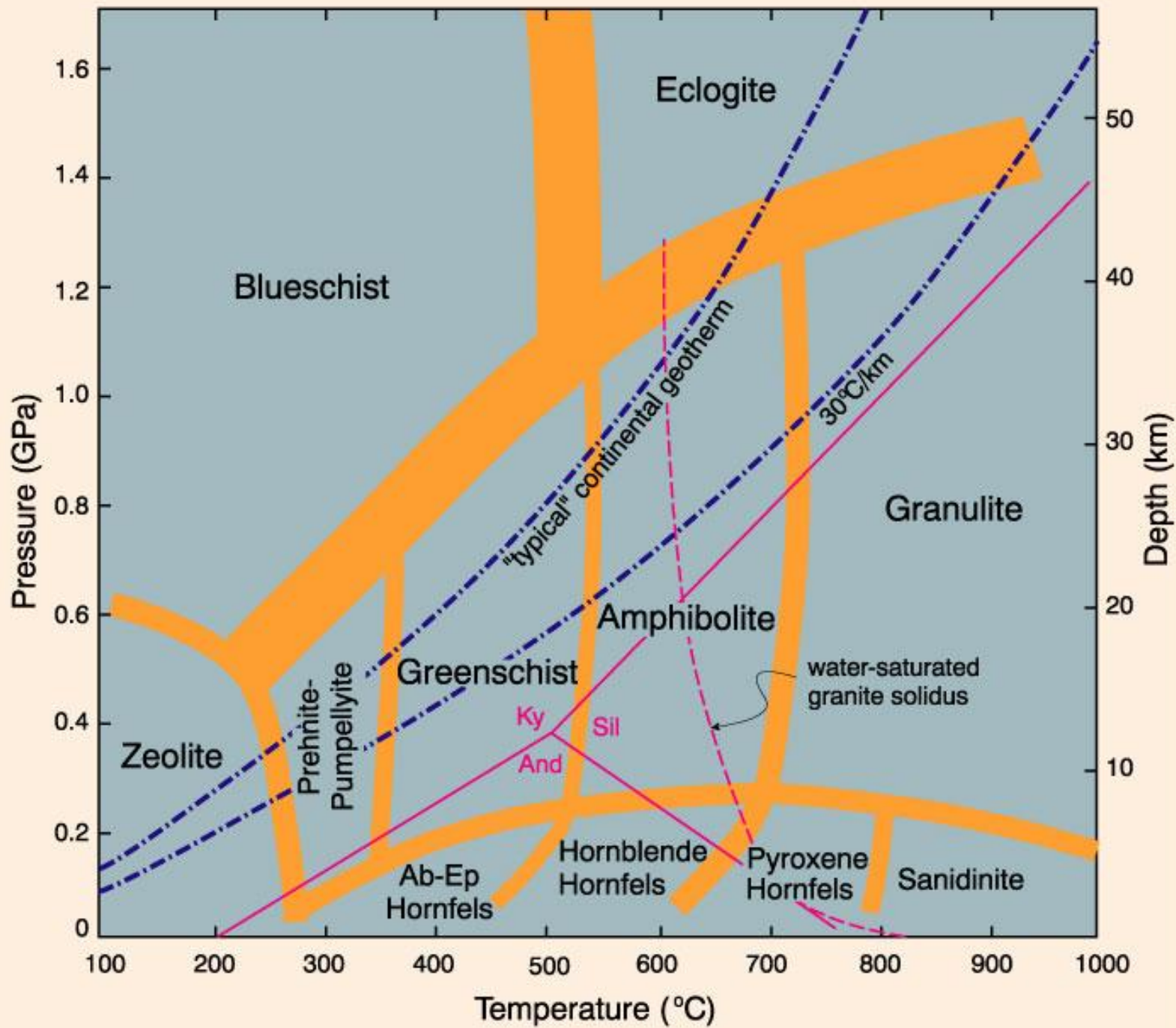
**27** омфацит-кианит-гранат-кварцевая

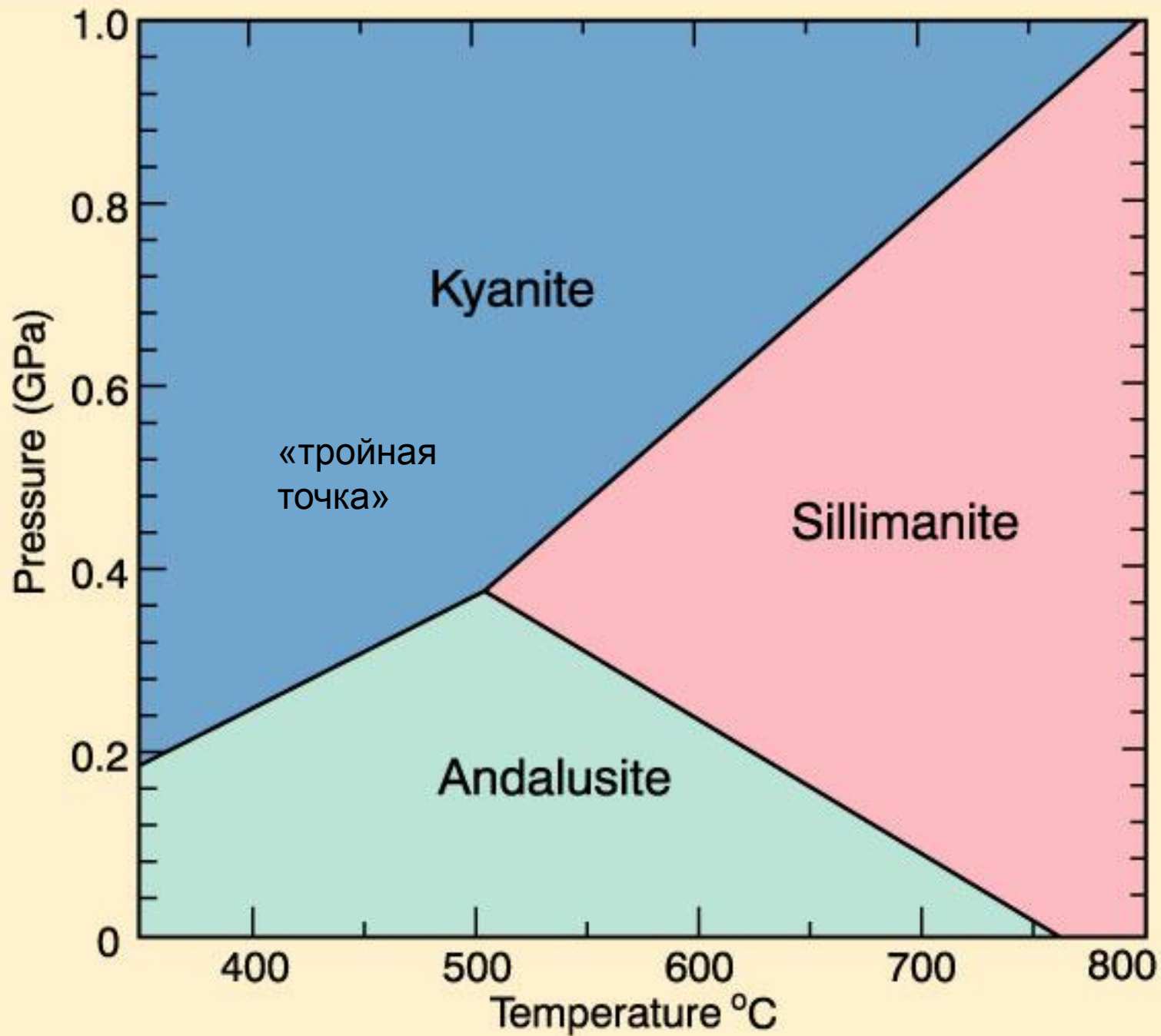
 условия раннего метаморфизма

 Ctd/St исчезновение хлоритоида / появление ставролита:  
серия сближенных линий минеральных реакций

 -/+Chl исчезновение / появление хлорита:  
серия сближенных линий минеральных реакций







## Не слоистые



(a) Quartzite



(b) Marble

## Слоистые



(a) Slate



(c) Gneiss

# Распространенные структуры

Слоистый  
кливаж



(a) Slate

Сланцеватость



Полосчатость



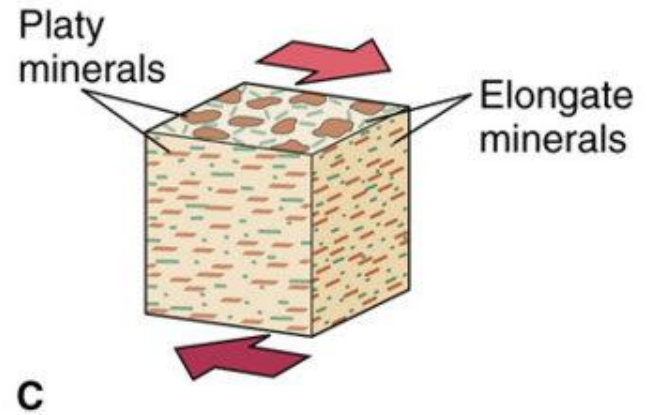
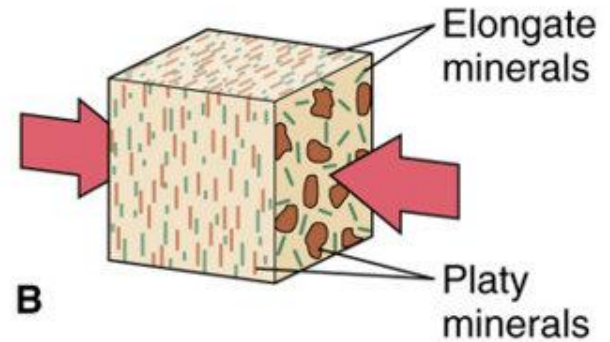
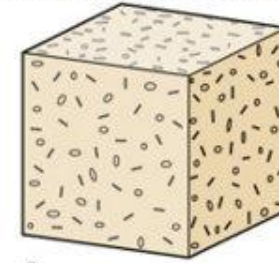
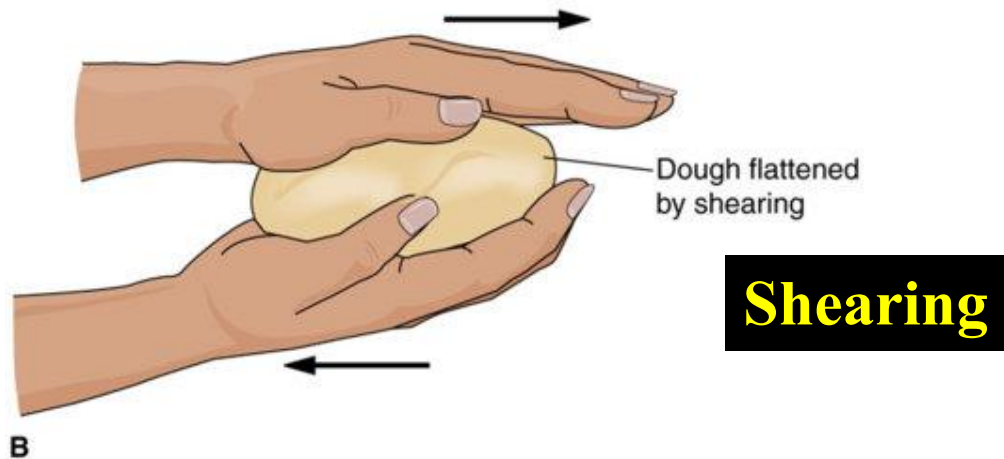
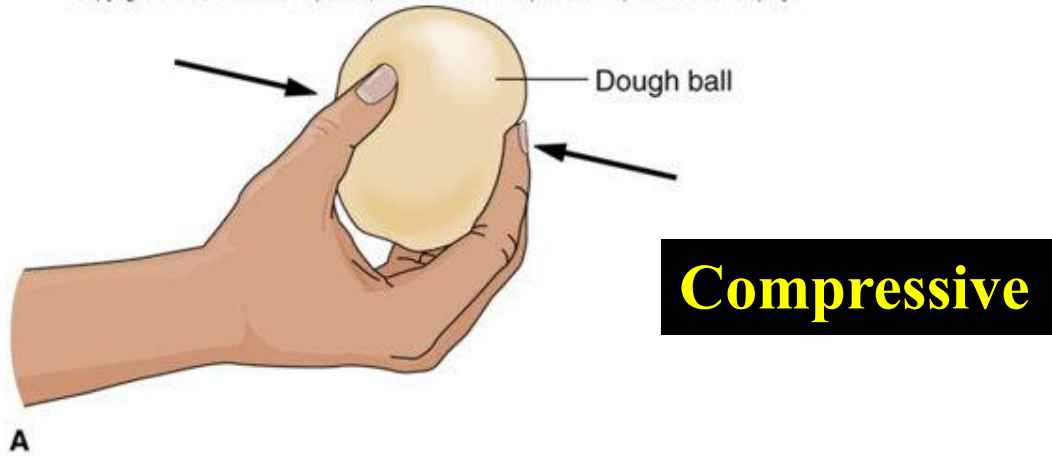
(c) Gneiss

# Origin of Metamorphic Foliation

## Produced by differential “stress”

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



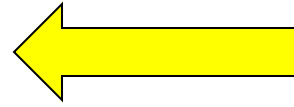
Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



McGeary



**Compression**

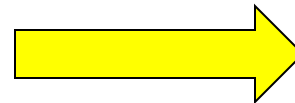


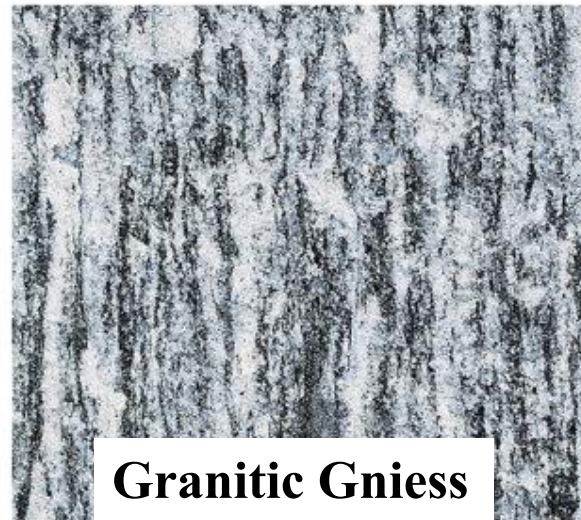
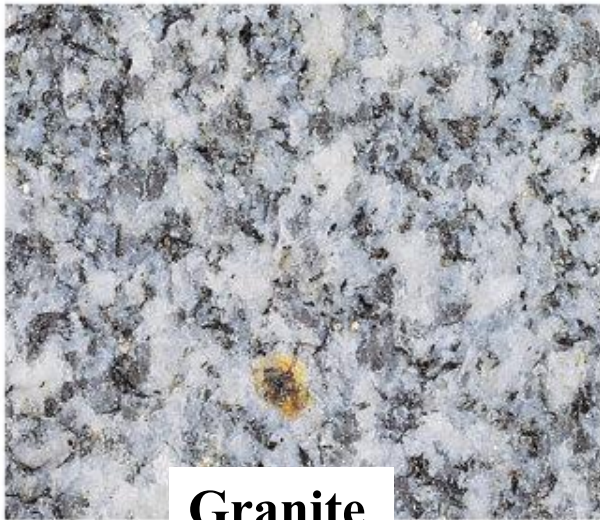
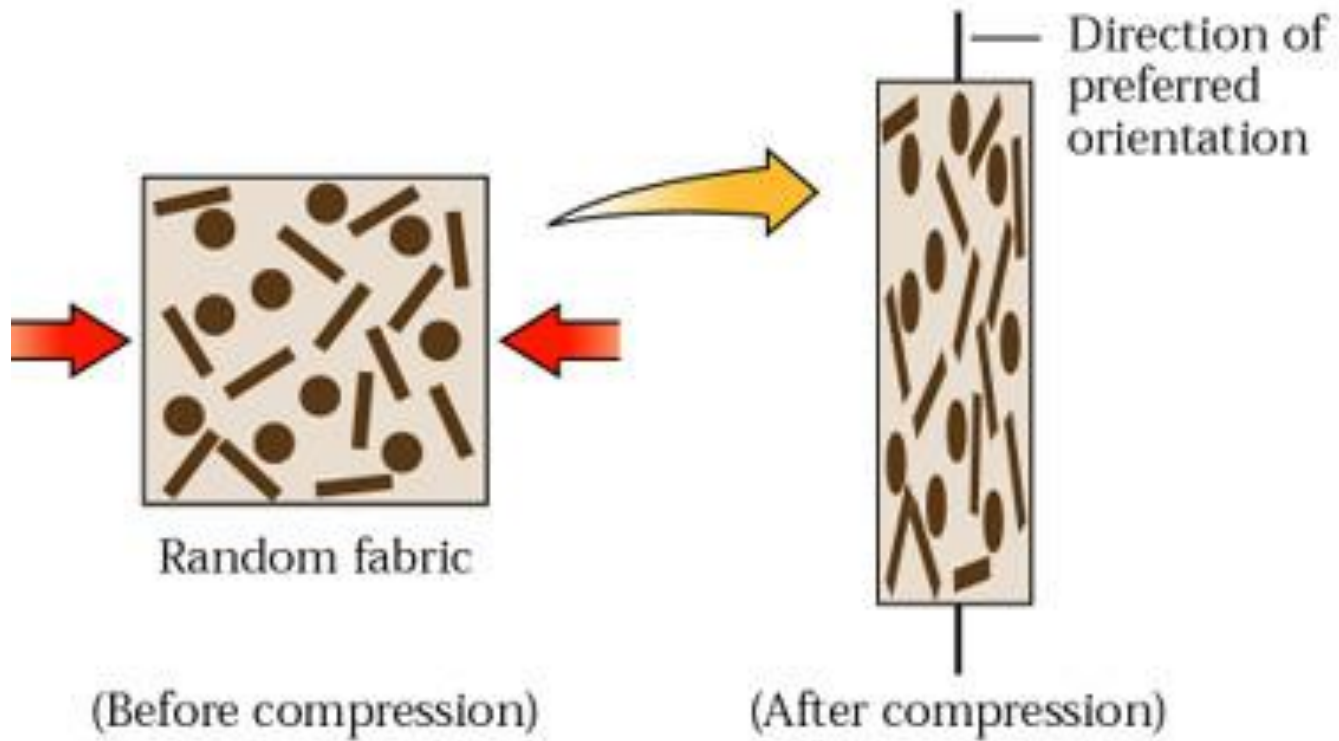
**Shearing**

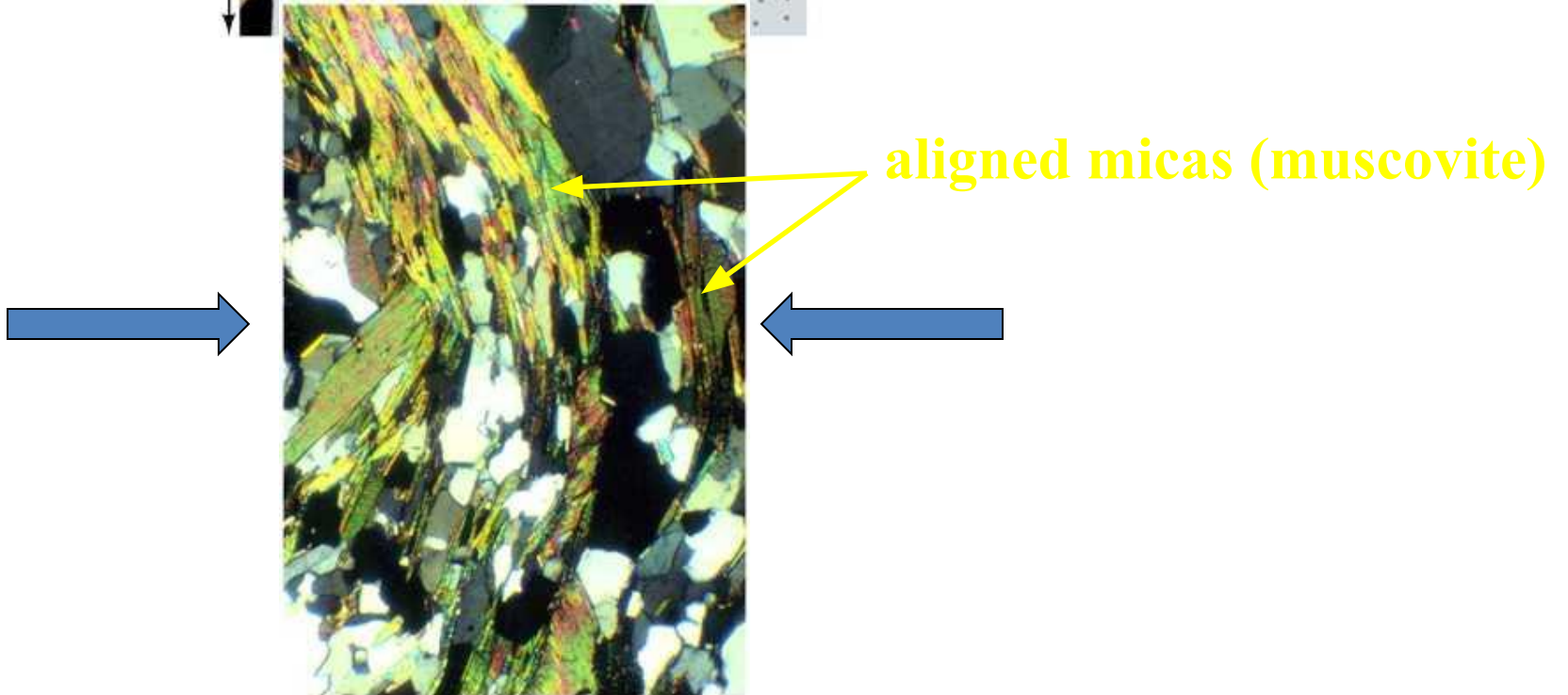
Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Photo by C. C. Plummer









# Минералогия и текстуры наследуются от протолита

Copyright © McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Table 7.2

## Regional Metamorphic Rocks that Form under Approximately Similar Pressure and Temperature Conditions

| Parent Rock           | Rock Name                      | Predominant Minerals               |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Basalt                | Amphibole schist (amphibolite) | Hornblende, plagioclase, garnet    |
| Shale                 | Mica schist                    | Biotite, muscovite, quartz, garnet |
| Quartz sandstone      | Quartzite                      | Quartz                             |
| Limestone or dolomite | Marble                         | Calcite or dolomite                |

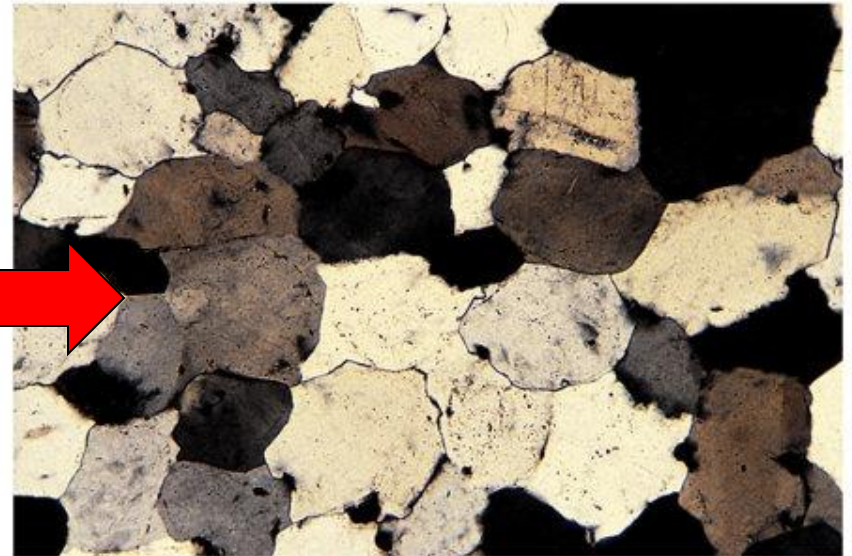
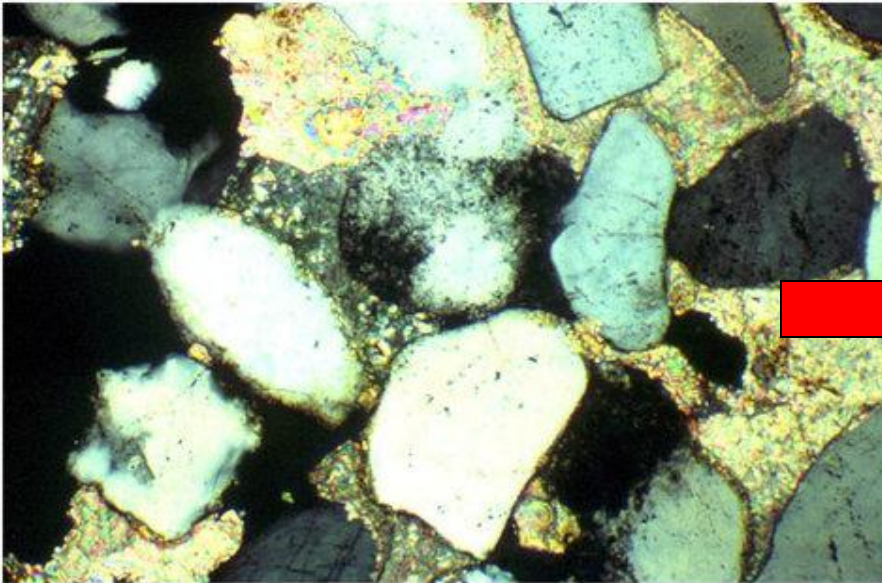
Протолит = тип породы до метаморфизма



(b) Quartz Sandstone



(a) Quartzite



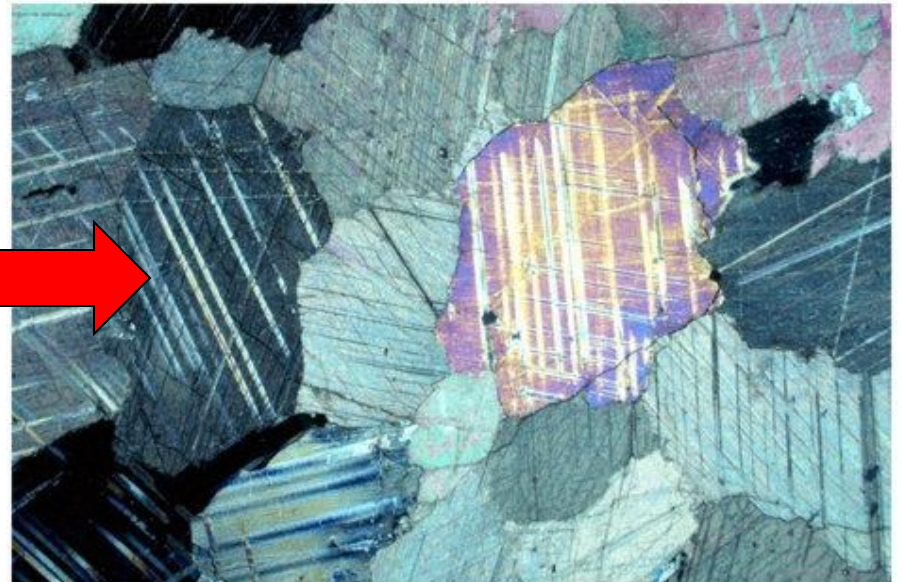
Craig Johnson.



(a) Limestone (fossiliferous)



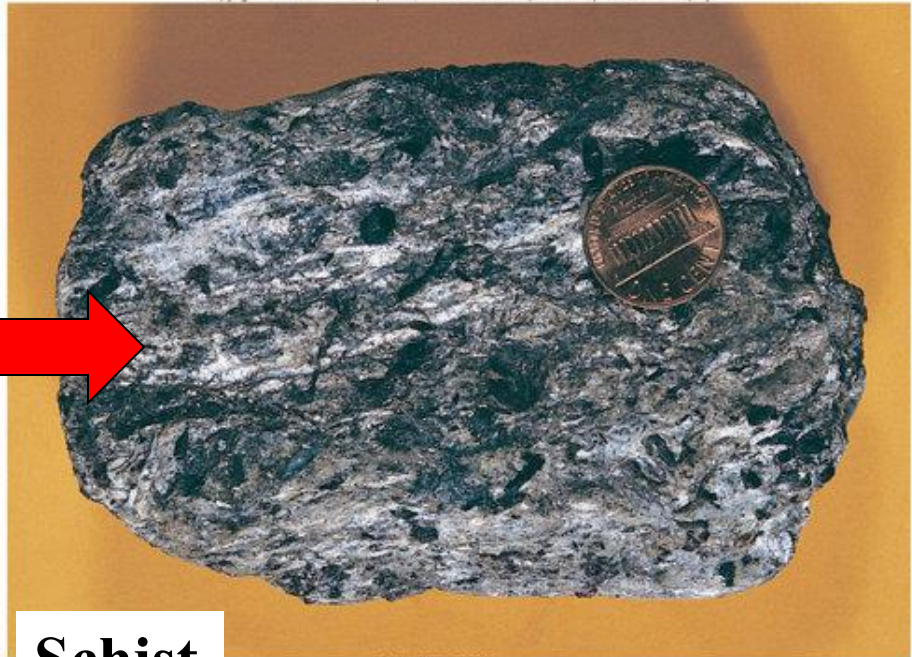
(b) Marble





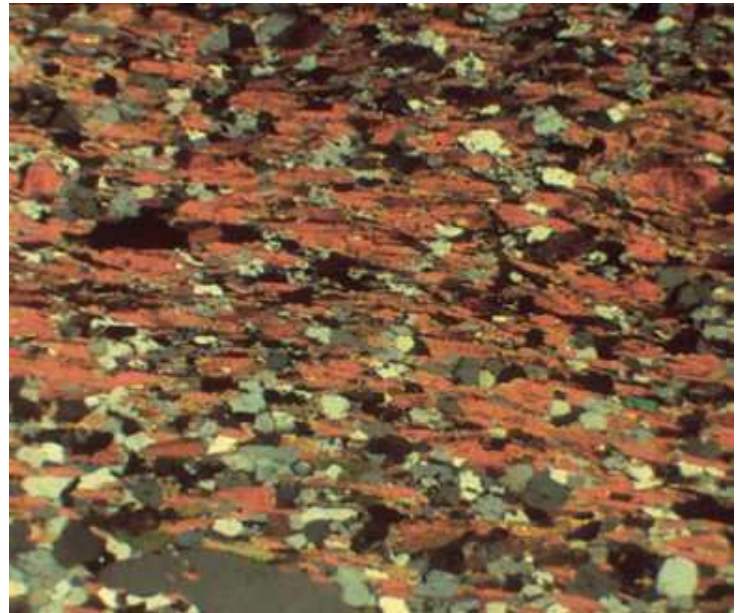
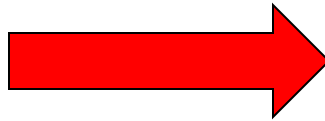
**Shale**

Photo by David McGeary



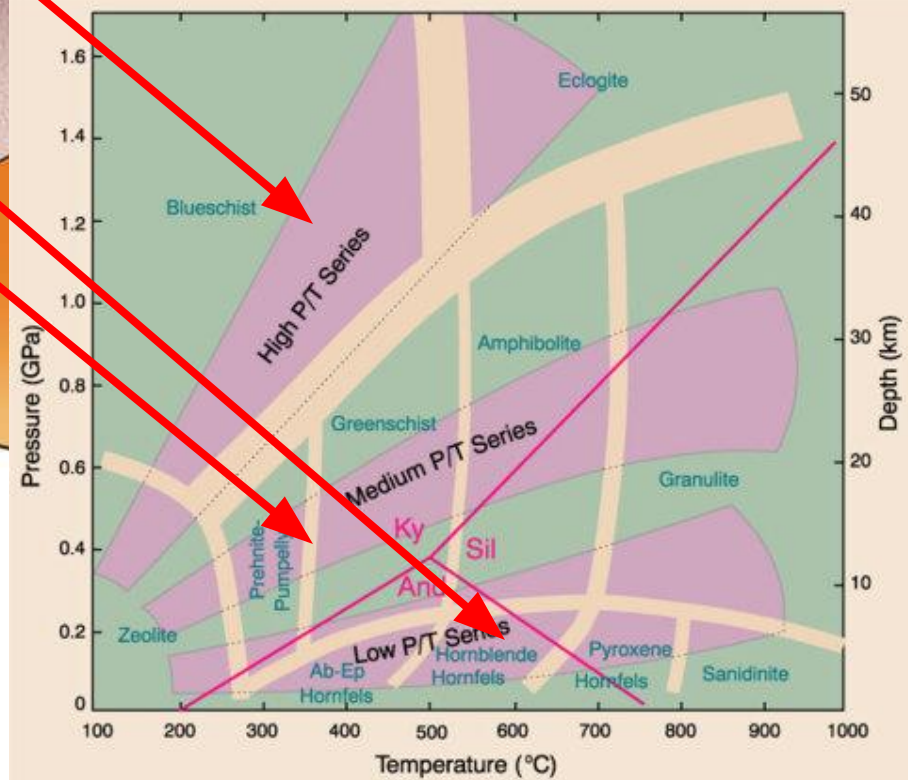
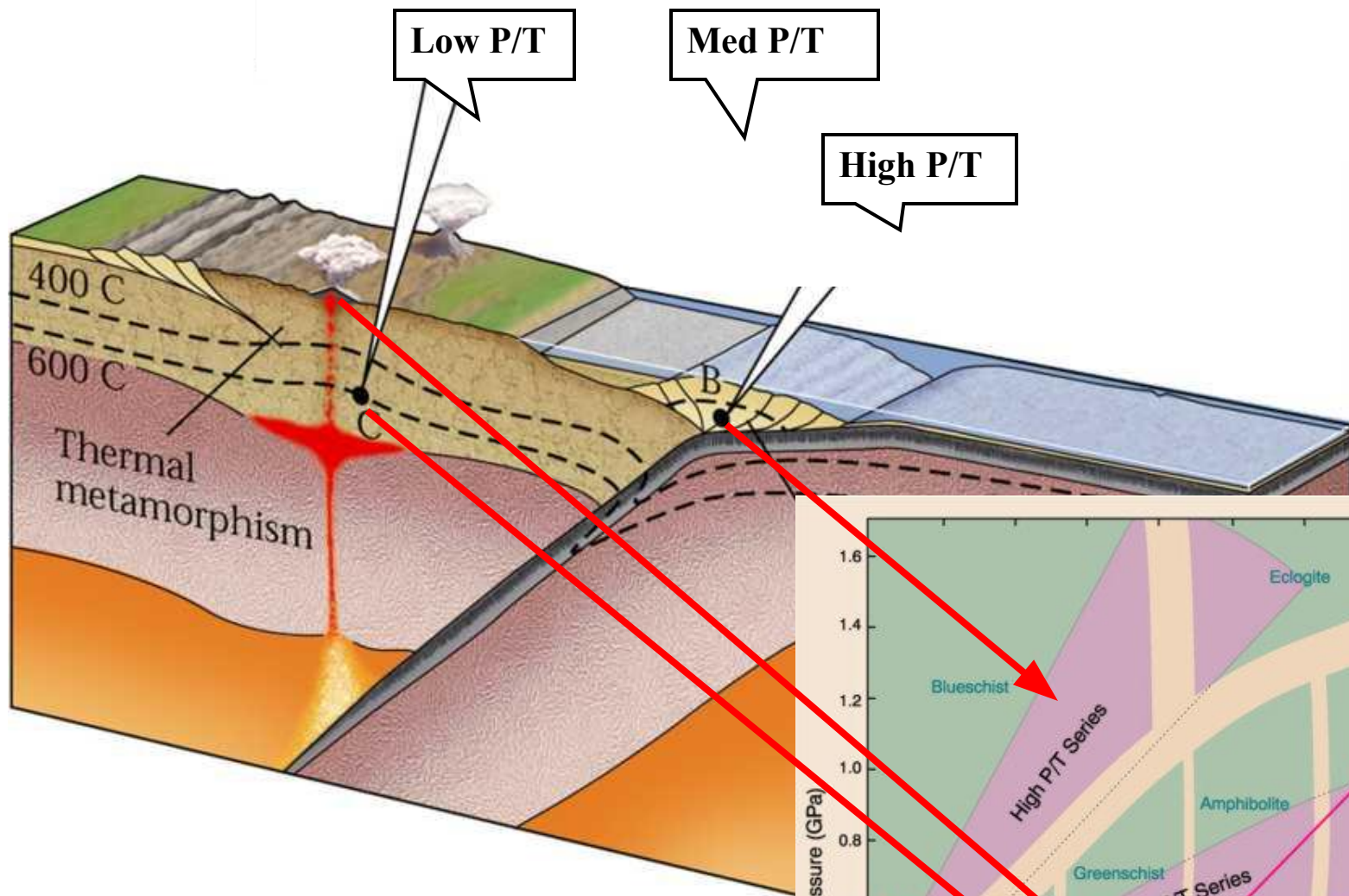
**Schist**

Photo by C. C. Plummer



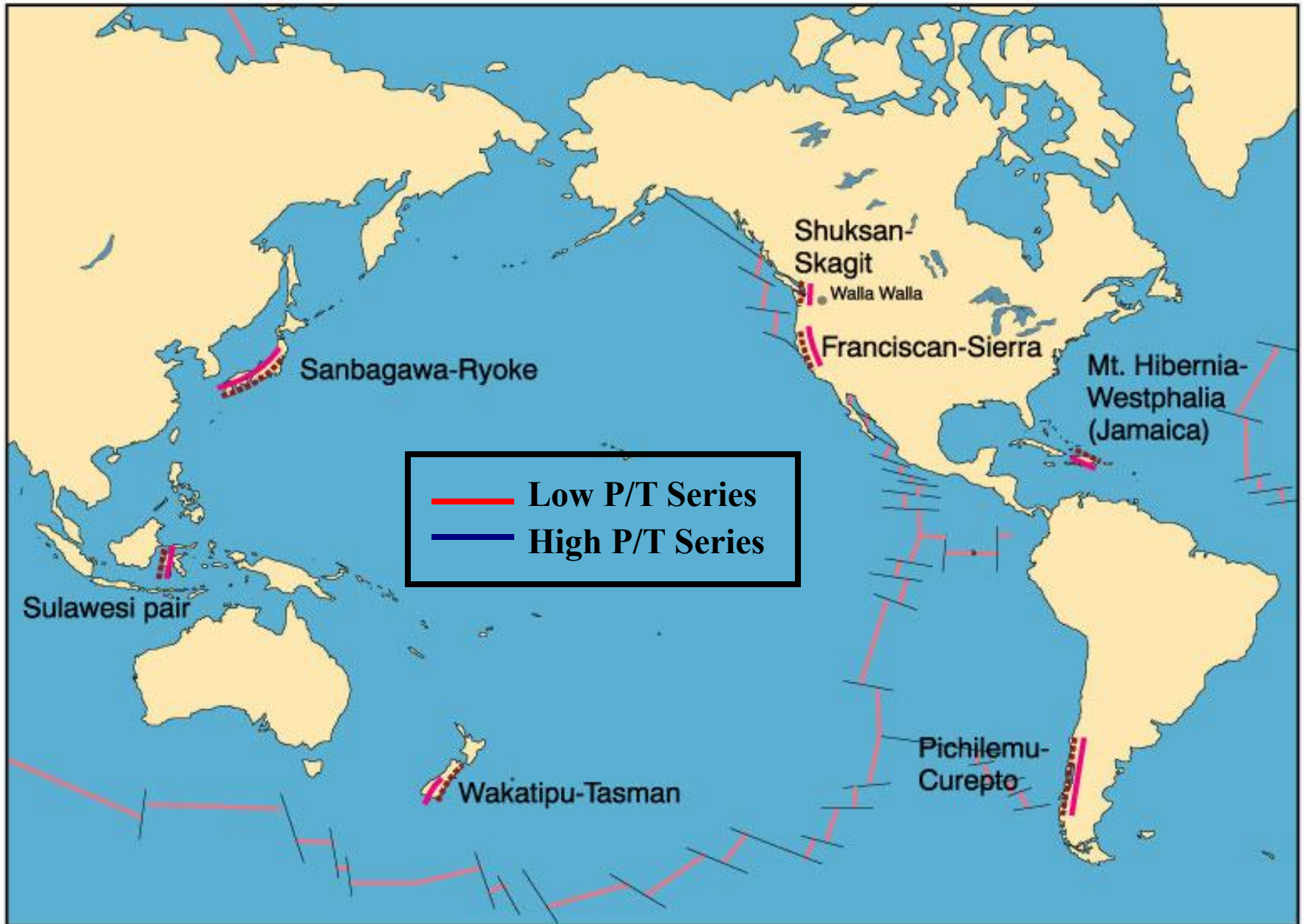
# Три основные группы метаморфических пород по составу (зависят от РТ-условий и состава


1. **Метапелиты (протолит – протопелита)**  
высокоглиноземистые мелкозернистые осадочные породы) Аспидные сланцы, филлиты, сланцы, гнейсы.
2. **Метакарбонатные породы (протолит – известняки, доломиты).** Мраморы, кальций-силикатные породы.
3. **Метабазиты (основные и ультраосновные изверженные породы).** Зеленые сланцы,




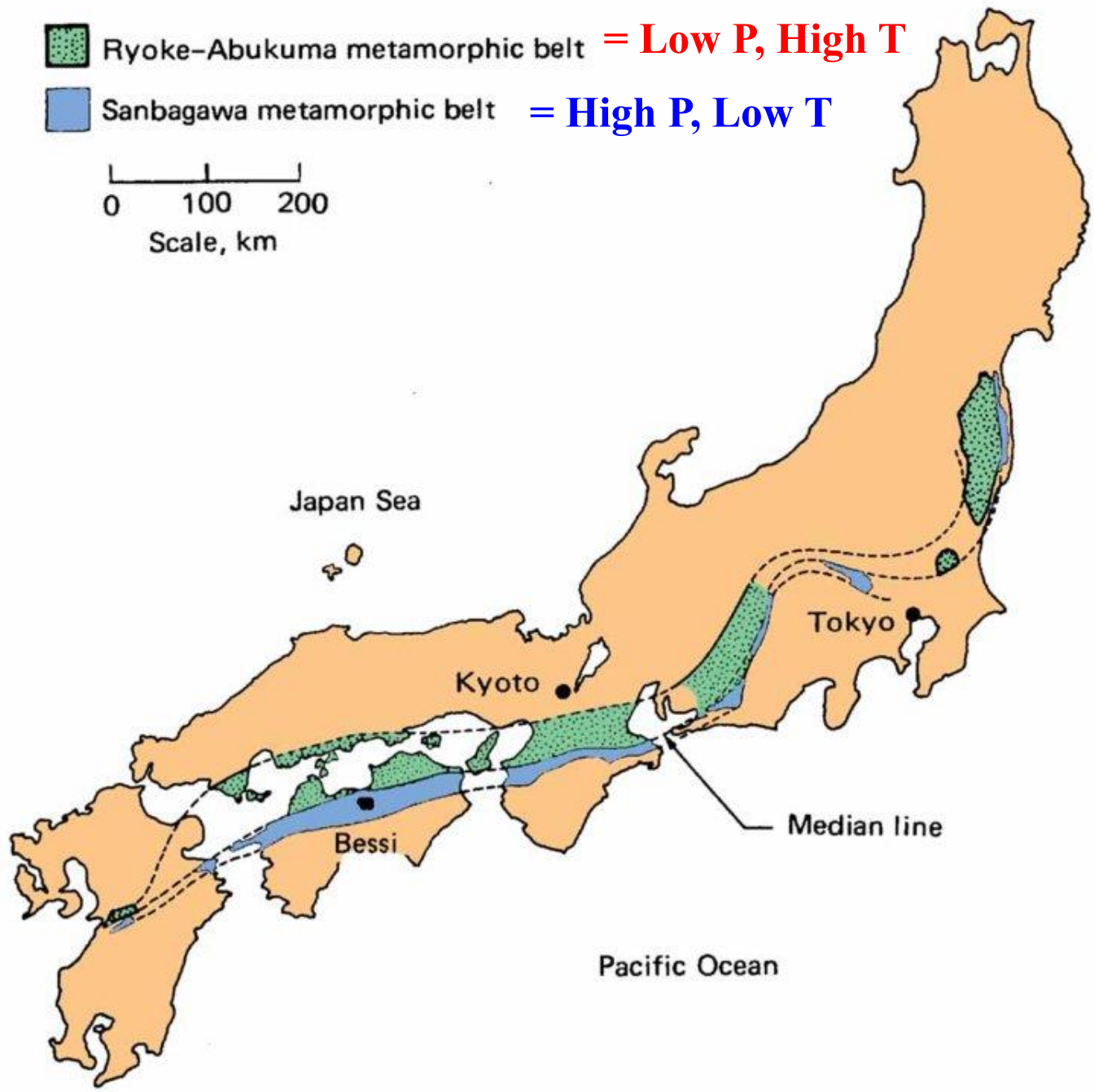
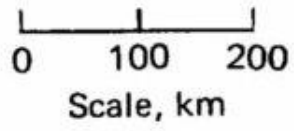
# Тектоника плит и метаморфизм

# «Парные» метаморфические пояса

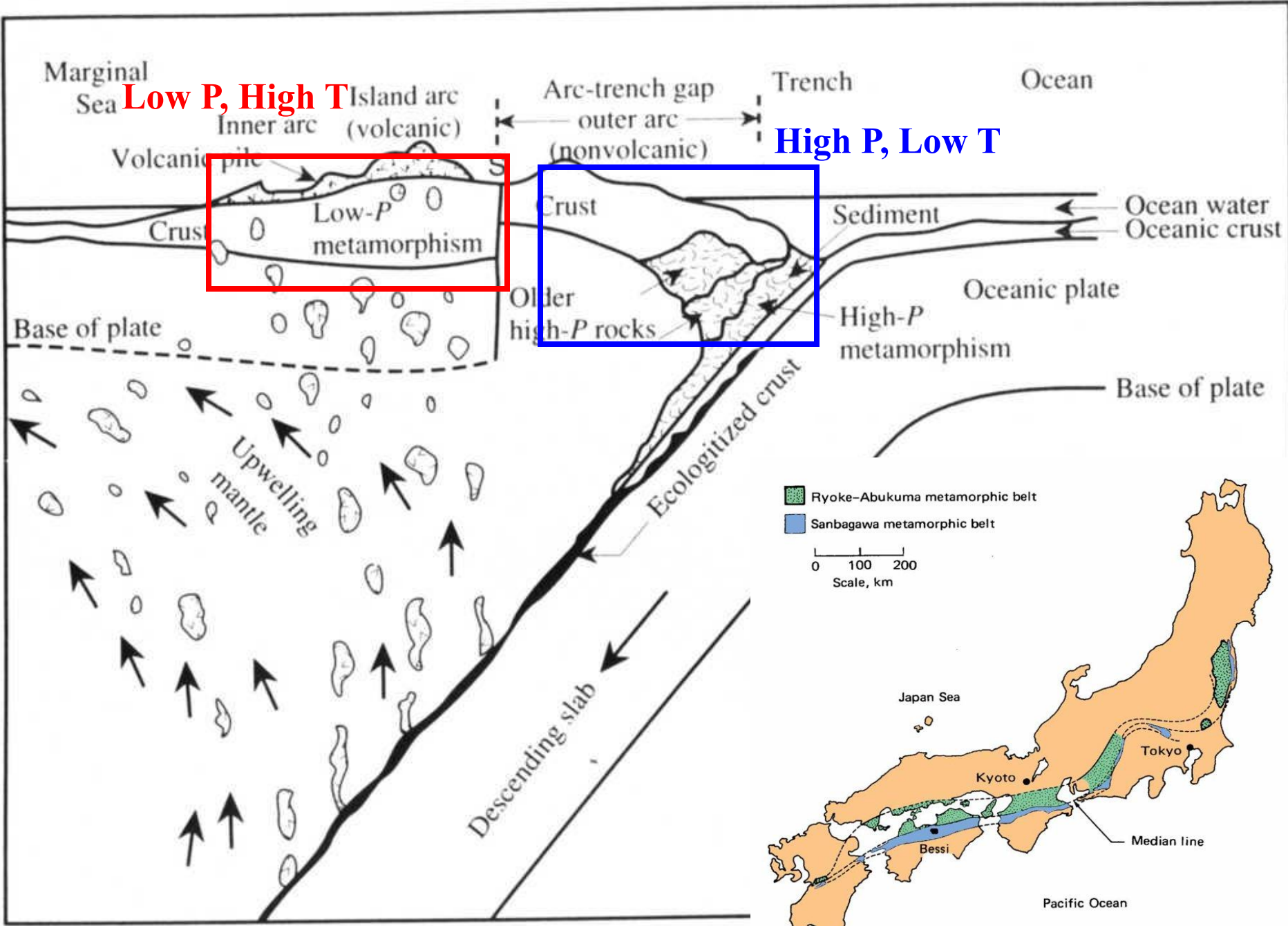


 Ryoke–Abukuma metamorphic belt = **Low P, High T**

 Sanbagawa metamorphic belt = **High P, Low T**







This map shows the outline of Japan. The **Japan Sea** is to the north and the **Pacific Ocean** is to the south. The **Median line** is shown as a dashed line. The **Ryoke-Abukuma metamorphic belt** is shown in green, and the **Sanbagawa metamorphic belt** is shown in blue. Major cities **Tokyo**, **Kyoto**, and **Bessie** are marked. The **Descending slab** is indicated by a dashed line.

# Геохимия метаморфизма

- Метаморфические преобразования в наибольшей степени соответствуют самопроизвольному движению системы к состоянию равновесия в новых термодинамических условиях.
- Метаморфическая система условно может быть признана закрытой. К ней можно применять аппарат равновесной термодинамики, руководствуясь принципом мозаичного равновесия.

- Таким образом, в P-T области ниже солидуса в минералах горных пород могут происходить:
  - 1) структурные фазовые превращения без изменения стехиометрии;
  - 2) твердофазные реакции с образованием новых минералов, но без выноса вещества за пределы системы;
  - 3) разложение ставших неустойчивыми минералов с выделением летучих компонентов – появляется реакционноспособная газовая или жидкая фаза (начало гидротермального процесса).

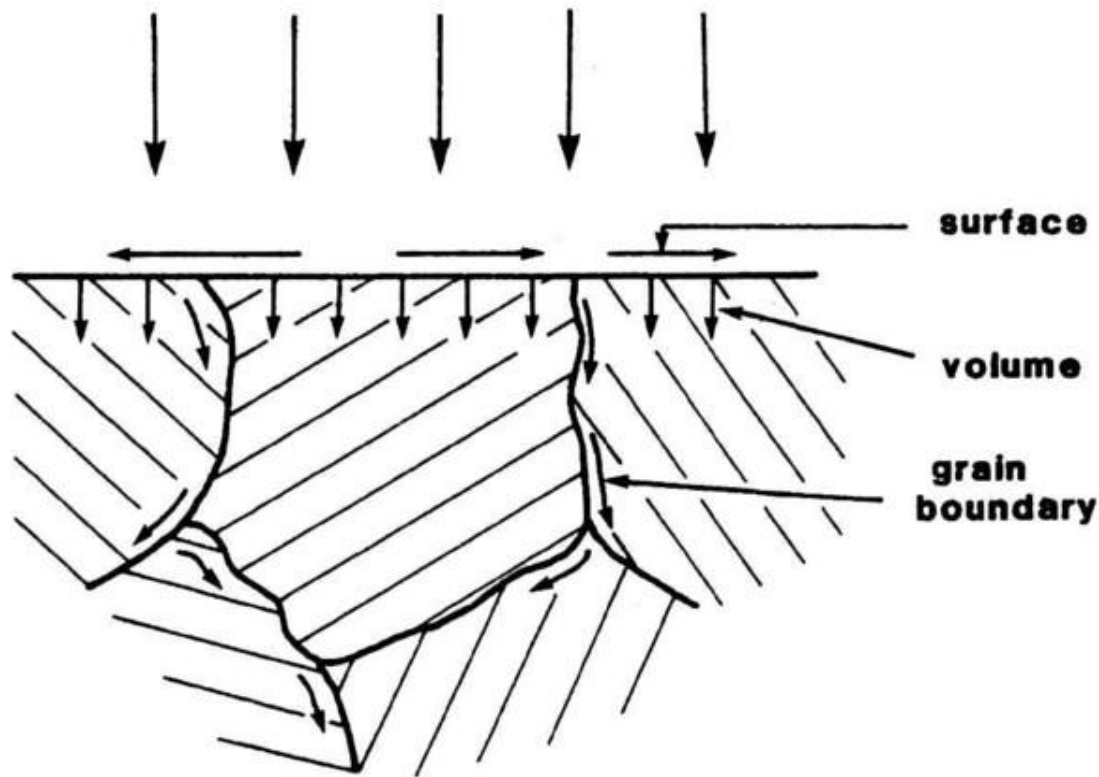
# Анализ данных по геохимии метаморфических пород

- 1) Большинство пород низких и средних ступеней метаморфизма, а также часть высоких ступеней, по составу близки к их протолитам.
- 2) Для других пород высоких ступеней (гнейсов, мигматитов – ультраметаморфитов) высокое значение имеет мобильность ряда элементов.
- 3) Транспорт элементов при метаморфизме – диффузия и с помощью флюида.

**Диффузия** - процесс перемещения атомов, молекул и ионов из одной позиции в другую с растворяющей фазой под воздействием движущей силы (градиента).

Градиент концентраций - из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией. Температурный градиент.

- **Объемная диффузия (твердофазная)** – транспорт материи через кристаллическую решетку. Требуются дефекты в решетке.



**Figure M11** Surface, solid (volume) and grain boundary diffusion paths in crystalline material (after Manning, 1974).

Диффузия по границам зерен и поверхностная диффузия требуют участие флюида и поверхностные дефекты. Глубина проникновения – первые см за 1 млн. лет при  $T$  метаморфизма.

- При высоких температурах основной механизм химического транспорта – твердотельная диффузия
- В мелкозернистых поликристаллических породах в присутствии флюида и/или при низких температурах преобладает диффузия по границам зерен и поверхностная диффузия
- Коэффициент диффузии зависит от температуры.

- Уравнение Аррениуса:

$$D = D_0 \times \exp(-Q/RT)$$

Q – энергия активации

$$x^2 = Dt \text{ (x-расстояние, t-время)}$$

- Скорость диффузии повышается с увеличением фугитивности кислорода и активности воды.
- При процессах метаморфизма флюид активно взаимодействует с породой.
- Природный флюид - это существенно гидротермальная фаза низкой плотности и вязкости, сложенная в разных пропорциях летучими компонентами ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и др. углеводороды), которая способна влиять на процессы природного минералообразования, либо непосредственно в них участвовать.



- При инфильтрации флюида через породу ее состав может изменяться. Равновесие породы с флюидом нарушается. Фактор фракционирования  $D = C_{\text{флюид}} / C_{\text{порода}}$  зависит от изменения  $T$ ,  $P$ , состава минералов и их пропорций.
- Также изменение состава зависит от содержания элемента во флюиде и породе и соотношения флюид/порода.
- При оценке мобильности элементов требуется, помимо изменения состава, учитывать изменение объема породы.

- Тектонические деформации увеличивают количество нарушений в решетке минералов и увеличивают скорость твердотельной диффузии и инфильтрации флюида.
- При температурах выше 650°C (гранулитовая и высокоТ амфиб. фации) возможно появление расплавов в кислых пелитовых породах.
- Образование жильных гнейсов и мигматитов приводит к сегрегации и перемещению вещества на дистанцию в метры и более.
- Понижается содержание водосодержащих минералов – слюд и амфиболов.

- В гранулитах усиливается взаимодействие флюид-порода (минерал) и повышается мобильность наиболее растворимых химических соединений. Усиливается миграция **(вынос) воды; щелочных металлов Rb, Cs; также Th, U, Pb.**
- В породах средних температурных фаций возможно проявление метаморфической дифференциации, усиливающей первичную неоднородность состава протолита. Масштаб такой химической неоднородности мал по сравнению с масштабом проявления регионального метаморфизма.

- В условиях зеленосланцевой фации ( $T < 450^{\circ}\text{C}$ ) отношение флюид/порода может достигать 1000 (*но нет геол. признаков?!*). Перемещение вещества, как правило, на незначительные расстояния посредством флюида – первые см.
- Воздействие флюида может значительно влиять на изотопные системы (например, Rb-Sr). Sm-Nd система более устойчивая.
- REE наиболее мобильны при гидротермальных и метасоматических процессах, менее мобильны при низко- и умеренно температурном метаморфизме, и условно инертны при высокотемпературном метаморфизме.

- 1) Практическая закрытость системы метаморфизма по отношению к породообразующим элементам и низкая их растворимость во флюиде свидетельствует о невысоком отношении массы флюида к массе горных пород в ходе обычного метаморфизма.
- 2) Появление условий, способствующих движению флюида в локальной обстановке, ведет к смене процесса метаморфизма метасоматическим процессом.
- 3) Геологическим ограничением метаморфизма при высоких  $T$  является начало плавления пород, которое приводит к формированию гранитных систем. Такой процесс требует существенного массообмена между реститом и возникающими расплавами (мигматизация) и создает условия для перераспределения в пространстве гранитоидов.

- 4) Такое перераспределение имеет глобальное значение, - об этом свидетельствует геологическая структура земной коры в областях широкого распространения гранитоидов и значительно более кислый по сравнению со средним составом коры химический состав верхней части континентальной коры, в строении которой гранитоиды занимают принципиальную позицию, являясь типоморфным ее веществом.

- **МЕТАМОРФОГЕННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ** - залежи полезных ископаемых, образованные при метаморфизме. Среди метаморфогенных месторождений - месторождения руд железа, марганца, золота, урана, меди, свинца, цинка, огнеупоров.

- Существующая метаморфическая модель рудообразования учитывает мобилизацию и миграцию рудного вещества при региональном метаморфизме в огромных количествах. В некоторых метаморфических породах металлы находятся в виде изоморфных примесей в породообразующих минералах в количествах, превышающих кларковые в 3-15 и более раз, что составляет более 10 млн. т рассеянных металлов в  $1 \text{ км}^3$  породы.
- Известно, что при метаморфизме уровня амфиболитовой фации породы теряют около 4 % воды, следовательно,  $1 \text{ км}^3$  осадков высвобождает около 100 млн. т воды.



- Условия регионального метаморфизма весьма благоприятны не только для мобилизации рудного вещества в раствор, но и образования его скоплений.
- Очевидно, что при любой задержке миграции метаморфогенных гидротерм, возникает принципиальная возможность накопления рудного вещества. Однако главным для рудоотложения является наличие благоприятных структурно- тектонических условий, обеспечивающих не рассеяние, а транспорт и концентрацию выносимых рудных компонентов. Таковыми являются зоны сближенной трещиноватости, а также скрытые или субвязкие разломы.

- **Метаморфогенные месторождения формируются путем преобразования (метаморфизма) магматических или осадочных рудных месторождений.**
- При метаморфизме изменяются как первоначальный минеральный состав (вследствие новообразований, растворения и собирательной перекристаллизации), так и структурно-текстурные особенности руд. Такое происхождение имеют, например, железорудные залежи на Украине

# M-ние граната (Fe-Mg метасоматоз)



# Типы метаморфизма

**Ударный (импактный) метаморфизм** — особая генетическая категория метаморфических процессов, вызванная соударениями космических тел с Землей и между собой.

Столкновение крупных метеоритов и астероидов с поверхностью Земли

- длительность: наносекунды
- давление: 100-300 ГПа
- температура в точке удара: 10000-15000 °C
- продукты метаморфизма: импактиты

**Крупнейший метеоритный кратер - Вредефорд** ( $\varnothing > 300$  км), ЮАР образовался в результате падения астероида  $\varnothing \sim 5-10$  км. Возраст:  $\sim 2$  млрд. лет назад ( $PR_2$ ).

⚡ **Импактные события планетарного масштаба** - столкновения гигантских космических тел - планетезималей (протопланет) и астероидов, происходившие на ранних стадиях формирования планет.



# Молнии тоже порождают ударно-метаморфический процесс

Материалы V-ой Международной Школы по Наукам о Земле ISES-2009

## Молния



**Частота** – до 100 ударов в сек

**Температура** – 20000 – 40000К

**Давление в шнуре** 0.2 – 0.3 Кб

**Скорость** – 30 – 150 км/сек

**Длительность удара** 0.1 – 1 сек

**Энергия** – первые миллиарды Дж

**Старт космического корабля:**  
900 000 000 000 Дж

**Взмах крыла пчелы**  
0.0009 Дж

Materials of the V-th International School on the Earth's Sci

Лекция В.И. Фельмана на ISES-5

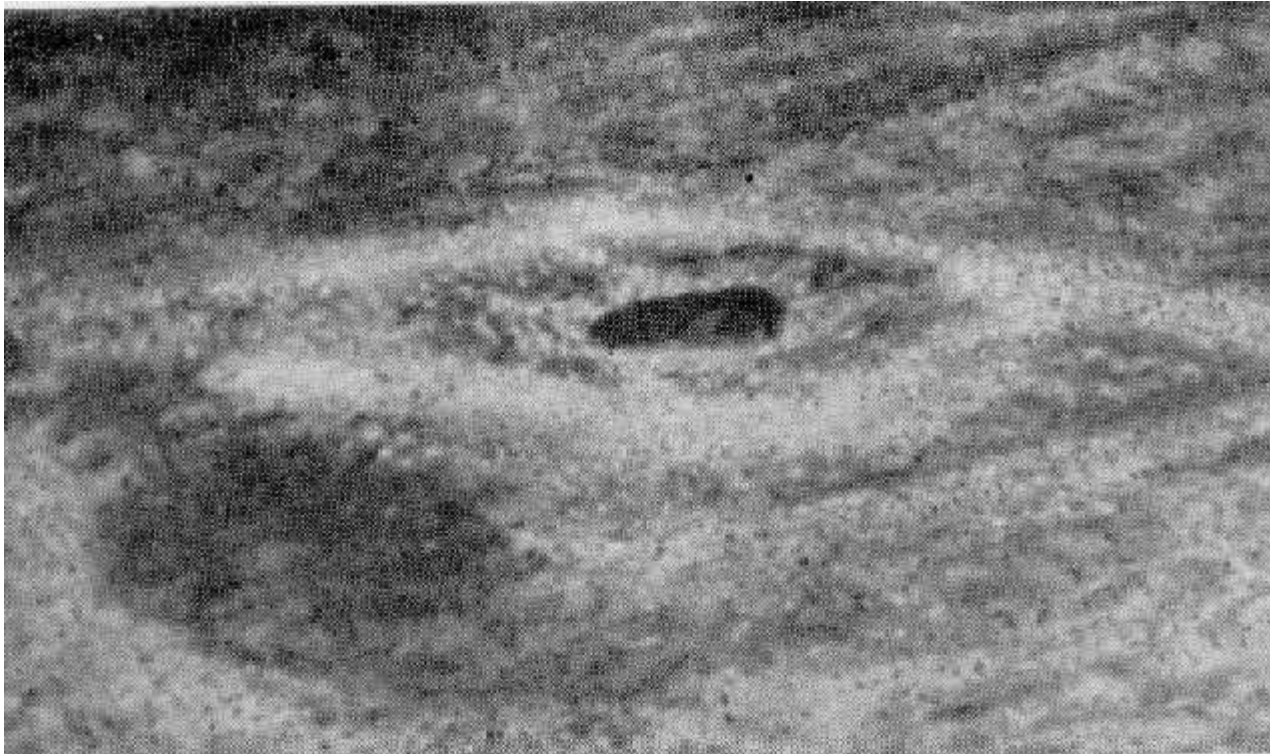
# Фульгуриты - породы, образованные при ударе молнии



**Результат столкновения космических  
тел с Землей: астроблемы и  
слагающие их горные породы –  
импактиты**

Сазонова Л.В.

Астроблемы (метеоритные кратеры, импактные кратеры) – кольцевые структуры, возникающие при соударении космических тел с поверхностью Земли.

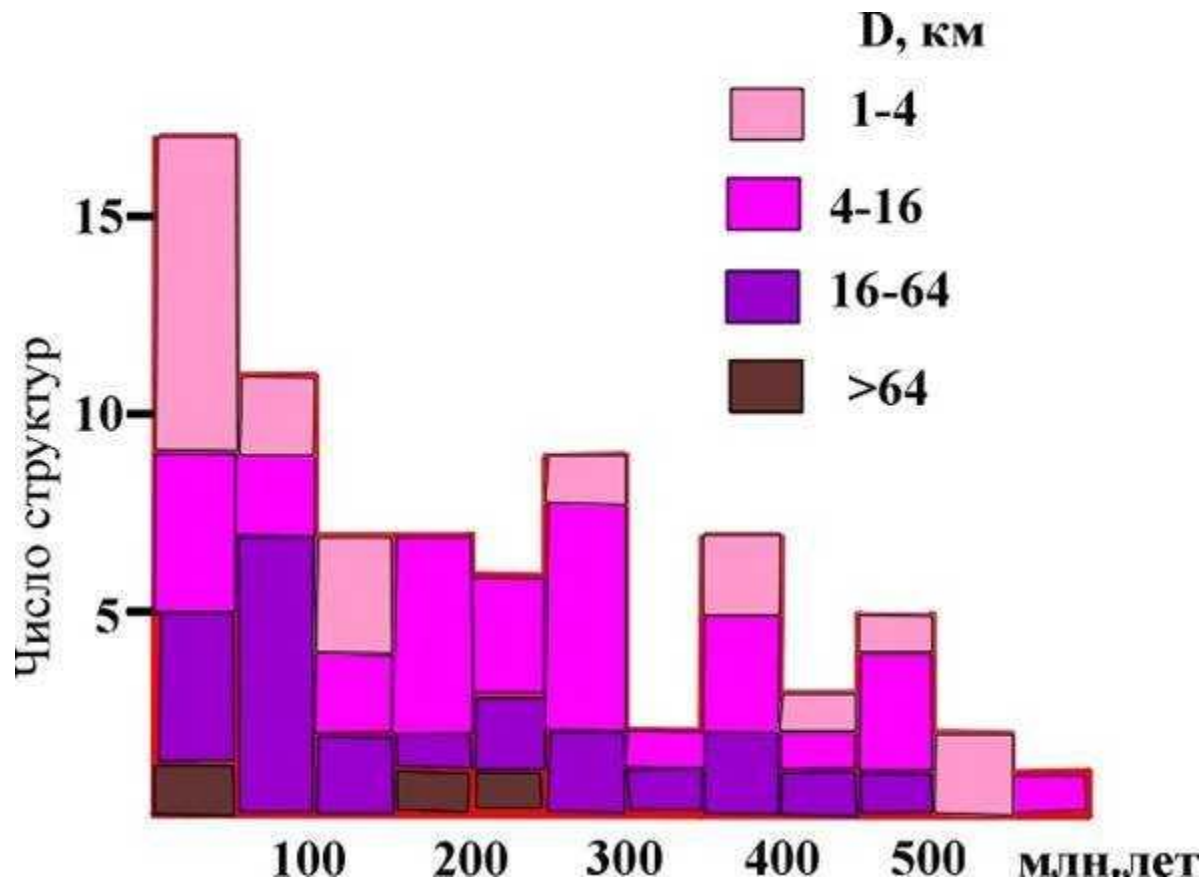


Кратер Одесса, США. Диаметр кратера, измеренный по его валу, составляет, примерно, 168 м (Кинг, 1979).



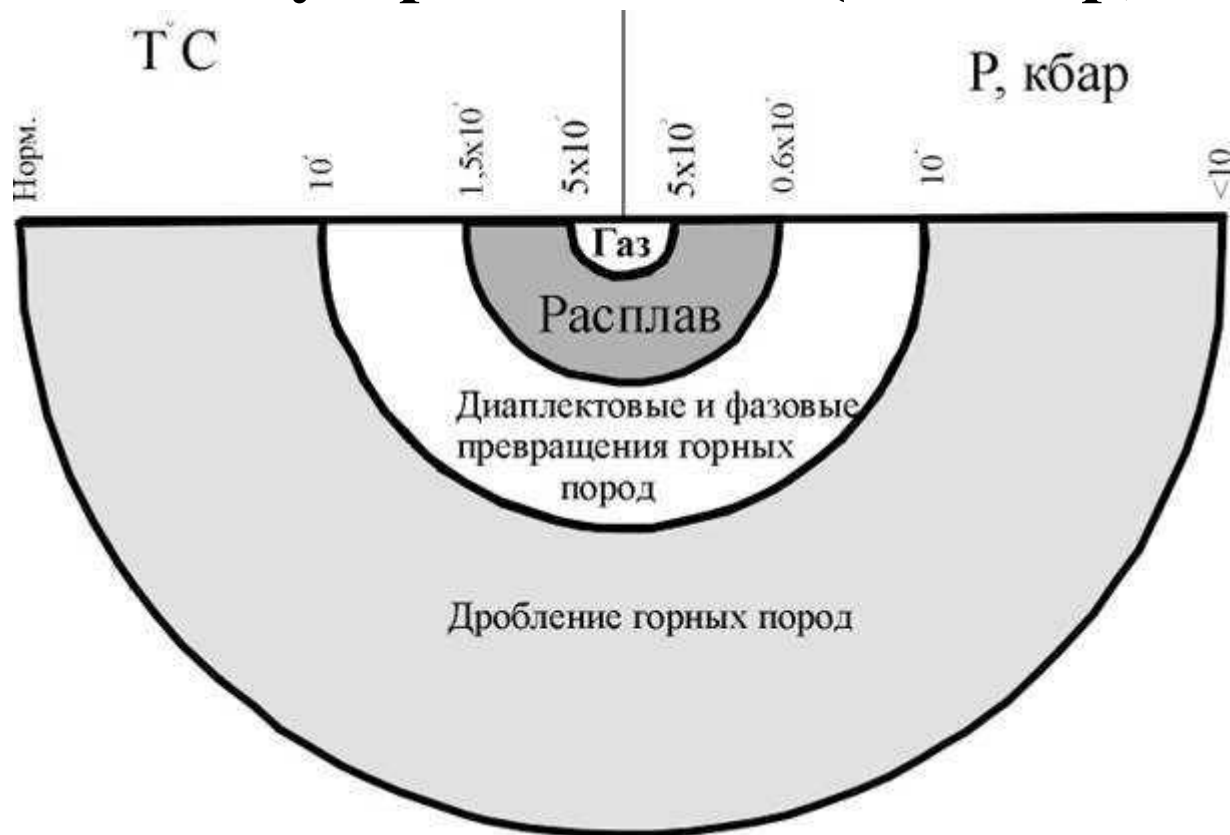


**Рис. 1.** Размещение астроблем на поверхности Земли. Видно, что наибольшее их количество выявлено в лучше изученных районах

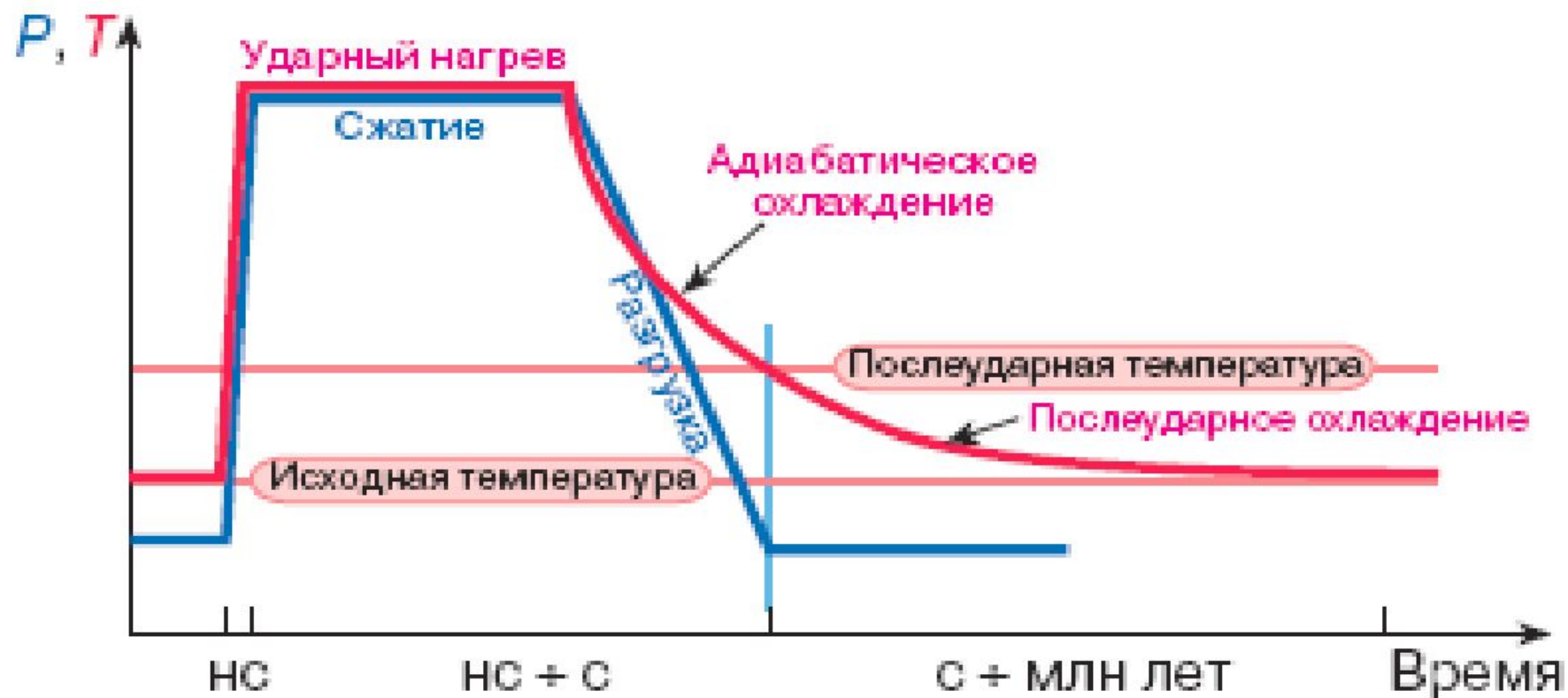


Распределение фанерозойских импактных кратеров мира, в которых установлены ударнометаморфизованные породы (Геология..., 1980).

# Схема расположения зон превращения вещества под действием ударной волны (Вальтер, 1977).

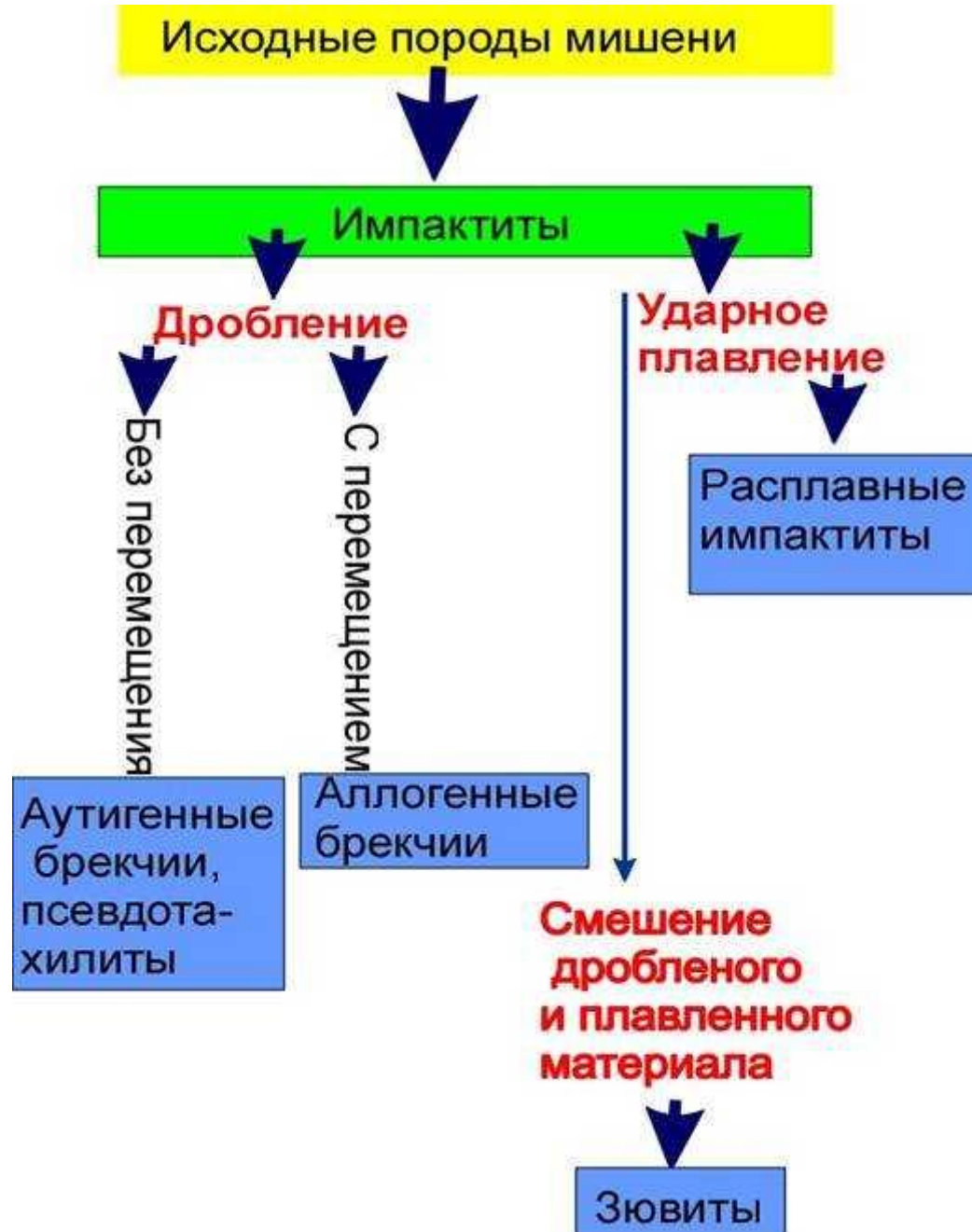


Порождаемая высокоскоростным ударом и взрывом ударная волна распространяется в целом радиально от точки соударения и, постепенно затухая, производит работу по нагреву, деформации, разрушению горных пород и экскавации самой впадины кратера

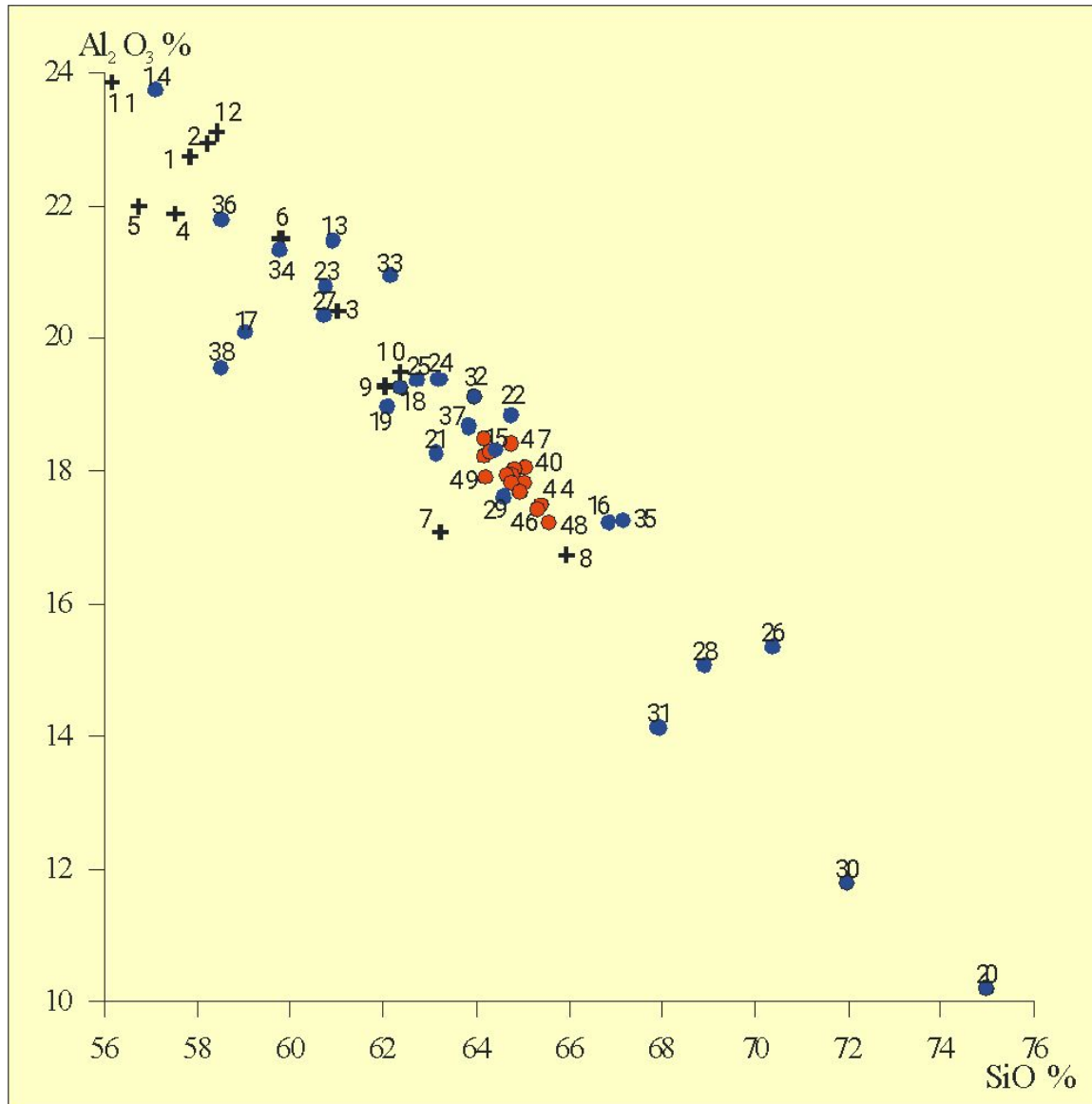


**Рис. 3.** Изменение ударного давления ( $P$ ) и температуры ( $T$ ) во время импактного события

# ИМПАКТИТЫ – ПОРОДЫ АСТРОБЛЕМ



# Состав расплавных импактитов отвечает усредненному составу пород мишени

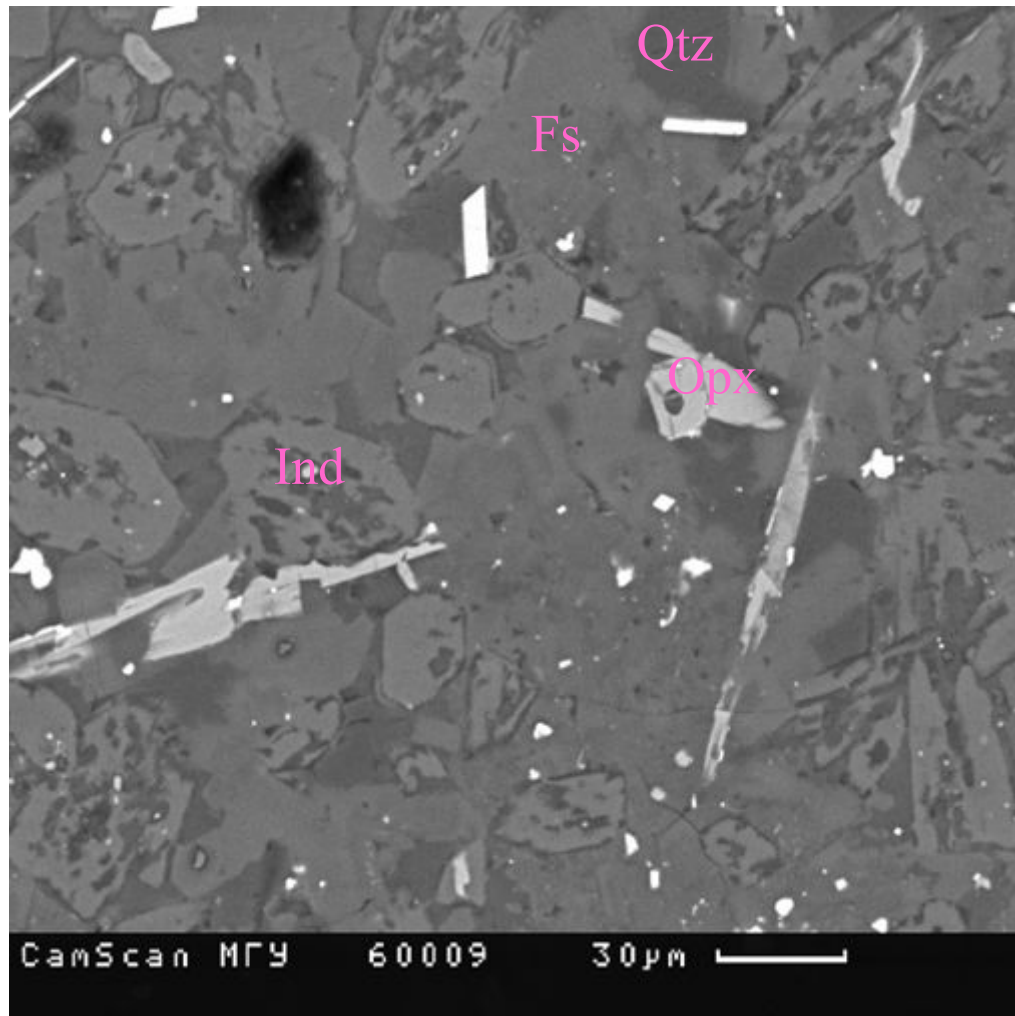


красным  
обозначены  
составы тагамитов,  
все остальное –  
составы пород  
мишени

# Одинаковый характер распределения элементов-примесей в породах мишени и импактных расплавах



# Необычная ассоциация минералов расплавных импактитов астроблемы Янисъярви



Такое большое количество высокотемпературной модификации кордиерита - индиалита до 40% не характерно ни для каких вулканических пород эндогенного происхождения, так как в системе  $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  он кристаллизуется при  $T > 1400^\circ\text{C}$  [Бережной, 1970]



# Фазы высокого давления в астроблемах.



**коэсит** (моноклинный)

**стишовит** (тетрагональный)

**C**

**алмаз** (кубический)

**лонсдейлит** (гексагональный)



**меджорит** (кубический)  $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$



**рингвудит** (кубический)  $\text{Si}^{\text{VI}}(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{O}_4$

# Механизмы формирования высокоплотных фаз в астроблемах

## **Кристаллизация из импактного расплава**

Коэсит, стишовит, алмаз, меджорит, рингвудит

Твердофазная стадия ударного метаморфизма

## **Мартенситный фазовый переход**

Стишовит, лонсдейлит, алмаз

## **Перекристаллизация с миграцией вещества**

Коэсит, алмаз (тогорит)

## СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ ИМПАКТИТОВ

Химический состав импактитов определяется составом пород мишени и поэтому колеблется в широких пределах. Например, содержание  $\text{SiO}_2$  может быть любым – от почти нулевого (при образовании астроблемы в известняках) до близкого к 100% (если мишень сложена кварцитами или кварцевыми песками). Сильно меняются от кратера к кратеру количества и других компонентов. В составе расплавных импактитов отражаются еще два важных процесса: селективное испарение некоторых элементов (прежде всего щелочей и железа) и примесь метеоритного вещества [4].

Следствием переработки метеорита-ударника (астероида, кометы) в ходе ударного события является заметное повышение в импактном расплаве содержания химических элементов, которых много в космических телах, но мало в земной коре. Количество Ni, Cr, Co, Ir, Os (и других платиноидов) увеличивается в расплавных импактитах в 2–10 раз по сравнению с породами мишени (но при этом распределяются они в расплавных импактитах неравномерно). Помимо увеличения содержания элементов-индикаторов важную информацию о космогенной природе астроблем несут изотопные характеристики некоторых элементов. Так, отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в

- Особенность геохимии импактитов – такие элементы, как Sn, F, В, Р при импактном процессе не испаряются по причине высокой фугитивности кислорода (даже выше, чем в атмосфере).
- При импактном метаморфизме на геохимию пород значительное влияние оказывают процессы испарения.