

Общие сведения о метаморфизме

Метаморфизм

- 1. Это изменение минерального состава и структуры твердых горных пород в физико-химических условиях, господствующих в земной коре ниже приповерхностных зон выветривания и цементации и отличающихся от условий первоначального образования горных пород.
- 2. Метаморфические породы в процессе деформации и химических преобразований неизменно сохраняют твердое состояние.
- 3. Основной сутью метаморфизма является **кристаллобластез**.
- 4. Кристаллобластез – это перекристаллизация в твердом состоянии.
- 5. Многие химические и механические преобразования пород осуществляются с помощью воды или других летучих веществ, находящихся в порах пород, хотя количество таких поровых растворов составляет незначительную часть реагирующих масс.

Главные факторы метаморфизма

- 1. Метаморфические породы имеют вторичный генезис, и характерной их особенностью является полнокристаллическое строение.
- 2. Главными факторами, определяющими развитие метаморфизма, являются:
 - 1) температура (t),
 - 2) давление (p),
 - 3) концентрация циркулирующих растворов (c).

Связь метаморфизма и магматизма

- 1. Полевые наблюдения показывают отчетливую связь метаморфических и магматических пород.
- 2. Об этом же говорят и теоретические соображения.
- 3. В крупных магматических телах нередко присутствуют ксенолиты почти неметаморфизованных вмещающих пород.
- 4. Однако постоянная связь метаморфических и магматических пород проявляется в природе весьма отчетливо, а во многих случаях устанавливается непосредственная связь между метаморфическими и магматическими явлениями.
- 5. Это в первую очередь относится к породам, которые обычно считаются продуктами высокой степени метаморфизма.
- 6. Иногда метаморфические породы располагаются на большом расстоянии от ближайших выходов магматических пород.
- 7. Расплав, количественно преобладающий над кристаллической фазой, с течением времени становится подвижным и приобретает характер магмы.

Температура

- 1. Метаморфизм – результат высоких температур.
- 2. Нижний предел температур, при которых происходят метаморфические реакции в силикатных породах не известен, но обычное отсутствие признаков метаморфизма в насыщенных водой осадочных породах, залегающих в течение миллионов лет на глубинах, где преобладают температуры порядка 150 °С, позволяет предположить, что нижний температурный предел метаморфизма – 200 °С.
- 3. Верхним пределом температур метаморфизма пород можно считать начало появления фазы силикатного расплава.
- 4. Метаморфические и магматические явления сливаются воедино.
- 5. Диапазон переходных температур, зависящий от положения и характера пород, колеблется в пределах от 700 до 900 °С.

Источник тепла для метаморфизма

- 1. Магматические массы, формирующиеся на различной глубине.
- 2. Источники тепла, связанные с магматизмом:
 - а) магматические массы на глубине;
 - б) магматические массы на поверхности земли, вызывающие локальный метаморфизм в виде обжига рядом лежащих пород;
 - в) постмагматические растворы в жидкой и флюидной фазе.
- 3. Теплота недр, которая с глубиной увеличивается в среднем на $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ на каждые 100 м погружения (геотермический градиент).

Давление и концентрация растворов

- В земной коре наблюдаются два вида давления:
- а) гидростатическое (литостатическое) и
- б) боковое (стресс).
- Литостатическое давление – это давление нагрузки вышележащих толщ горных пород, оно увеличивается с глубиной и связано с ней прямой пропорциональной зависимостью.
- Боковое давление (стресс) связано со складкообразовательными движениями и поэтому присуще лишь верхним зонам земной коры.
- Концентрация отражает состав циркулирующих растворов.

Типы метаморфизма

- Различают два вида метаморфических процессов:
- а) метаморфизм без привноса вещества (изохимический);
- б) метаморфизм с привносом вещества (метасоматоз).
- Например, если метаморфизм идет без привноса, то известняк без изменения объема превращается в мрамор, если же метаморфизм известняка протекает с привносом и с полным выносом первичного вещества, то горизонт известняка превращается в горизонт кварцита.

- Изохимический метаморфизм – это метаморфизм с изменением содержания летучих компонентов (H_2O , CO_2 , O_2 и др.).
- Метасоматоз – это процесс преобразования горных пород, происходящий путем замещения одних минералов другими, который сопровождается изменением химического состава пород и совершается с сохранением твердого состояния горных пород в целом. Метасоматические процессы обязательно протекают при участии гидротермальных жидких или надкритических растворов, которые приносят одни компоненты и уносят другие.

Прогрессивный и регрессивный метаморфизм

- Большая часть метаморфических процессов земной коре имеет прогрессивный характер, то есть происходит при повышении температуры и давления. В
- Некоторые метаморфические процессы носят регрессивный характер (диафторез), то есть высоко метаморфизованные горные породы испытывают второй этап метаморфизма, проходящий при более низких температуре и давлении.
- Например, силлиманитовые гнейсы высокой степени метаморфизма при наложении низкотемпературного процесса могут испытать регрессивное преобразование в слюдяные сланцы.

Автометаморфизм

- Все метаморфические процессы делятся на две группы: автометаморфизм и аллометаморфизм.
- Автометаморфизм – это метаморфические процессы, которые происходят под влиянием собственных пневматолитово-гидротермальных растворов.
- К автометаморфизму относятся все вторичные или автогидротермальные процессы:
 - а) серицитизация кислых плагиоклазов и сосюритизация основных плагиоклазов,
 - б) каолинизация калиевых полевых шпатов,
 - в) уралитизация и хлоритизация моноклинных пироксенов,
 - г) хлоритизация роговой обманки и биотита,
 - д) серпентинизация оливина и ромбических пироксенов и образование талька по этим же минералам,
 - е) преобразование кайнотипных эффузивных пород в палеотипные.

Аллометаморфизм

- Аллометаморфизм – это такие метаморфические процессы, которые происходят в горных породах под влиянием внешних факторов.
- Большинство метаморфических процессов, происходящих в земной коре, относятся к аллометаморфизму.
- На основании ведущей роли того или иного фактора процессы аллометаморфизма подразделяются на следующие типы:
 - 1) региональный,
 - 2) инъекционный (ультраметаморфизм),
 - 3) контактовый,
 - 4) дислокационный (динамометаморфизм),
 - 5) постмагматический.

Региональный метаморфизм

- Охватывает огромные объемы земной коры.
- Его главными факторами являются:
 - 1) температура (t),
 - 2) давление (p),
 - 3) концентрация циркулирующих растворов (c).
- Этот тип метаморфизма широко распространен среди наиболее древних образований земной коры – докембрия, а также встречается в палеозойских комплексах.

Инъекционный метаморфизм

- Раньше рассматривался как результат инъекции гранитной магмы в метаморфические горные породы.
- В настоящее время к этому типу метаморфизма относят сложные преобразования горных пород, которые происходят под влияния щелочного метасоматоза.
- Это процессы мигматизации, палингенеза и гранитизации, которые объединяются под названием **ультраметаморфизм**.

Контактовый метаморфизм

- Связан с внедрением интрузивных магматических масс, и главным фактором его является температура.
- Этот тип метаморфизма наиболее хорошо изучен для гранитоидных интрузий, контактовые ореолы которых достигают наибольшей мощности и характеризуются интенсивными преобразованиями вмещающих пород.

Дислокационный (динамометаморфизм)

- Имеет в земной коре локальное распространение.
- Он приурочен к крупным разломам.
- Главным фактором этого метаморфизма является боковое давление (стресс).

Постмагматический метаморфизм

- Происходит под влиянием гидротермальных жидких и надкритических растворов.
- По сути дела сюда относятся все метасоматические процессы постмагматической стадии, имеющие огромное значение для формирования различных типов полезных ископаемых.

Классификация минералов метаморфических пород

- Минералы метаморфических пород подразделяются по количественному принципу на главные и второстепенные.
- К главным относятся те, количество которых превышает 5%.
- Все остальные минералы являются второстепенными.

Классификация минералов по генезису

- По генезису минералы подразделяются на:
- 1) равновесные;
- 2) реликтовые;
- 3) позднего диафтореза.

Равновесные минералы

- Это минералы, отвечающие определенным условиям метаморфизма, при котором сформировалась данная метаморфическая порода.

Реликтовые минералы

- Это такие минералы, которые либо уцелели при метаморфизме от первичного состава исходных пород, либо сохранились в метаморфической породе при изменении термодинамических условий метаморфизма (в этом случае они являются более высокотемпературными).
- Устойчивыми реликтовыми минералами в метаморфических породах обычно являются акцессорные: апатит, циркон, рутил, сфен, турмалин, рудные минералы.

Минералы позднего диафтореза

- Это такие минералы, которые замещают равновесные минералы метаморфических пород, но образуются значительно позже завершения метаморфического процесса (например, серицит, замещающий плагиоклаз; хлорит, образующийся по биотиту).

Типичные минералы метаморфизма

- 1. **Андалузит, дистен и силлиманит** - Al_2SiO_5 , но имеют различную упаковку ионов в кристаллической решетке. Появление одного из них в метаморфической породе указывает на термодинамические условия метаморфизма.
- 2. **Хлоритоид и ставролит** - богатые железом водные силикаты.
- 3. **Кордиерит** - алюмосиликат магния и железа.
- 4. **Группа граната.**
- 5. **Эпидот, цоизит, клиноцоизит (группа эпидота)** - водные известково-глиноземистые силикаты.
- 6. **Ромбические амфиболы.**
- 7. **Слюдopodobные минералы (тальк, пирофиллит, хлорит).**
- 8. **Волластонит, везувиан и др.**

Породообразующие минералы магматических пород в составе метаморфических пород

- 1. Из группы оливина – форстерит.
- 2. Из группы ромбических пироксенов – гиперстен.
- 3. Из группы моноклинных пироксенов – диопсид.
- 4. Из группы моноклинных амфиболов – роговая обманка.
- 5. Из группы слюд – биотит, мусковит и флогопит.
- 6. Из группы калиевых полевых шпатов – микроклин.
- 7. Из группы плагиоклазов – альбит (другие плагиоклазы постоянно встречаются в метаморфических породах).
- 8. Один из главных минералов метаморфических пород – кварц.

- Некоторые главные породообразующие минералы магматических пород не характерны для метаморфических пород:
 - 1) фельдшпатоиды (нефелин и лейцит),
 - 2) санидин,
 - 3) базальтическая роговая обманка,
 - 4) щелочные пироксены и амфиболы.

- Из минералов, характерных для осадочных пород, в метаморфических породах наблюдаются каолинит, диккит, монтмориллонит, карбонаты.

Текстура

- Текстура и структура метаморфических пород отражают условия их перекристаллизации.
- Поскольку метаморфизм часто происходит в условиях бокового давления (стресса), то наиболее распространенными текстурами метаморфических пород являются директивные (ориентированные). Среди них преобладает **сланцеватая текстура**, когда выделения всех минералов вытянуты в одном направлении.
- Очень часто метаморфические породы сланцеватой текстуры одновременно обладают также **полосчатой** или **линзовидно-полосчатой текстурой**.
- Полосчатость возникает благодаря метаморфической дифференциации вещества. *Так, при метаморфизме глины зерна кварца и листочки слюд сегрегируются в виде отдельных полос или линз.*
- При микроскладчатости в метаморфических породах образуются мелкие плейки и возникает **плейчатая текстура**.
- Очень распространена в метаморфических породах **гнейсовидная текстура**, которая характеризуется линейной ориентировкой всех выделений минералов при общем массивном сложении.
- При наличии в метаморфических породах крупных выделений отдельных минералов или групповых скоплений минералов возникает **очковая текстура**. Она наиболее типична для пород, возникших в результате процессов щелочного метасоматоза, но встречается и в породах регионального метаморфизма.
- Отдельные типы метаморфических пород обладают равномерным распределением всех составляющих их компонентов, то есть имеют **массивную текстуру**.
- Для пород, возникающих при контактовом метаморфизме, наиболее типичны **узловатая** (узловатые скопления ряда минералов) и **пятнистая** (наличие крупных порфириобластов отдельных минералов) **текстуры**.

Перекристаллизация

- Все минералы метаморфических пород растут одновременно в твердой среде при наличии растворов.
- Большую роль при процессе перекристаллизации пород играет **сила перекристаллизации**, которая различна не только для каждого минерала, но и для отдельных кристаллографических направлений в кристалле.
- **Кристаллобластический ряд Ф. Бекке.** Все минералы регионально-метаморфизованных пород по убывающей силе кристаллизации (энергии роста) расположены в следующем порядке: акцессорные минералы → гранат → ставролит → дистен → пироксены → роговая обманка → слюды → кварц → плагиоклазы и калиевый полевой шпат.
- Пироксены и амфиболы имеют значительно большую силу кристаллизации вдоль оси С, и поэтому у них всегда хорошо выражены грани призмы.
- Аналогичным свойством обладают кристаллы слюд, хлоритоида, андалузита и ставролита, которые тоже имеют резко выраженные кристаллические грани, параллельные удлинению или плоскости сплющивания.
- Наиболее часто перекристаллизация горных пород происходит в условиях стресса.
- Все минералы подразделяются на: стресс-минералы и антистресс-минералы.
- **Стресс-минералы** – такие минералы, устойчивость которых увеличивается в условиях стресса (хлоритоид, дистен, слюды, хлорит, тальк). Они обладают высокой плотностью упаковки ионов.
- **Антистресс-минералы** – такие минералы, устойчивость которых в условиях стресса уменьшается.

Особенности перекристаллизации

- Наблюдения за расположением и величиной включений в порфиробластах минералов позволяют восстановить историю формирования и условия перекристаллизации метаморфических пород.

- 1. Порфиробласты минералов, обладающих большей силой кристаллизации, содержат включения основной ткани сланца. А так как все минералы в метаморфических породах растут одновременно, то в центре крупных порфиробластов наблюдается большое количество мелких включений основной ткани. По мере роста порфиробласта количество включений уменьшается, поскольку сила его роста увеличивается и он «сбрасывает» ненужный для его образования материал. Одновременно растет размер зерен основной ткани и поэтому величина включений к периферии порфиробластов увеличивается. В краевых частях порфиробластов включения основной ткани вообще отсутствуют, что говорит о большой силе роста порфиробластов на конечных этапах перекристаллизации.

- 2. Сланцеватость нельзя всегда рассматривать как перекристаллизацию в условиях бокового сжатия. Стресс может предшествовать перекристаллизации и подготовить ткань пород к ориентированной перекристаллизации. В этом случае сланцеватость будет отраженной, что подтверждается неориентированным распределением порфиробластов минералов, обладающей большой способностью к кристаллизации при метаморфизме.

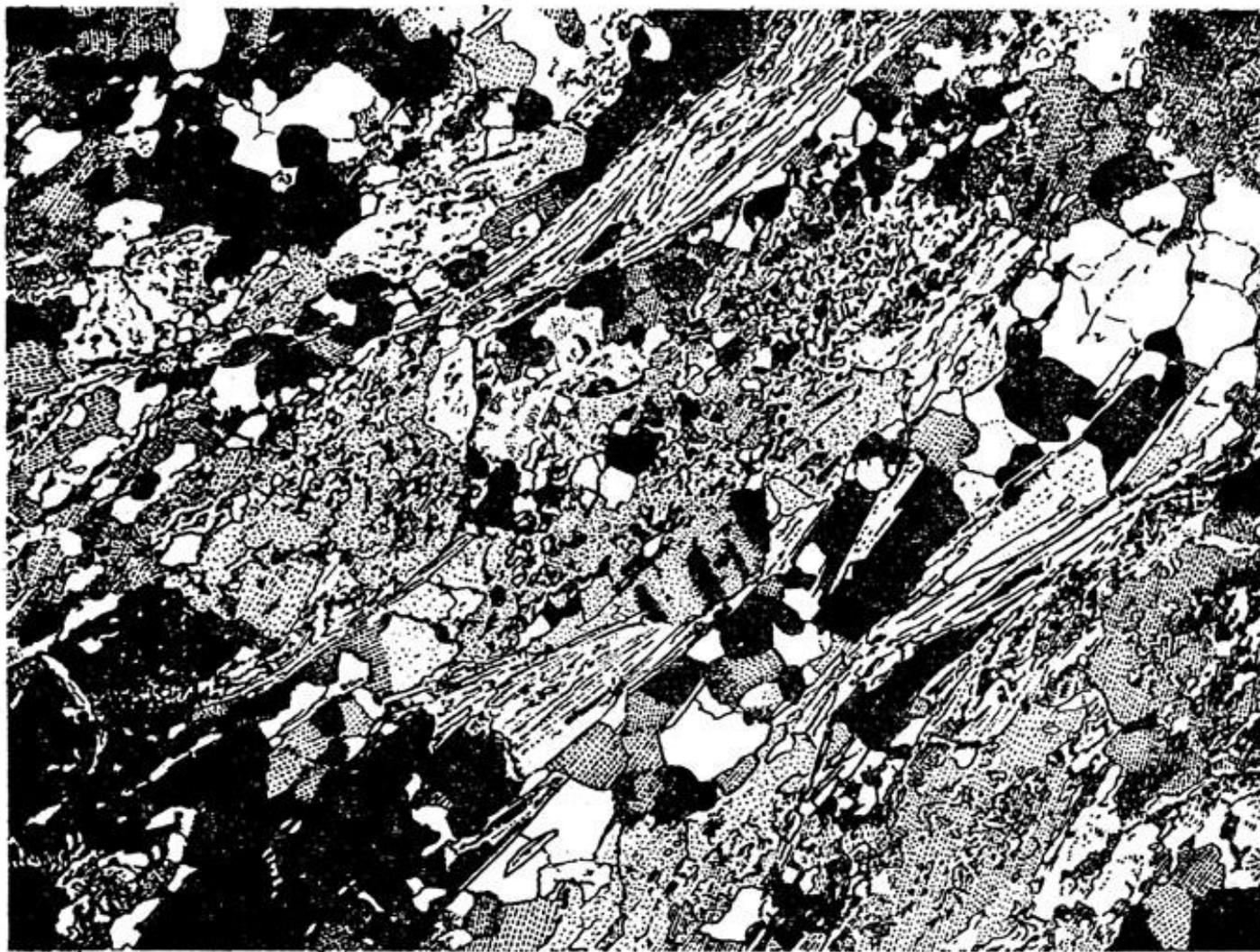
Особенности перекристаллизации

- 3. При росте в условиях бокового давления порфиробласты испытывают вращательные движения, которые часто фиксируются S-образной формой распределения в них включений основной ткани сланца. Такая структура роста порфиробластов получила название структуры «снежного кома». Иногда порфиробласты, испытывая резкие вращательные движения, одновременно изгибаются и образуют кристаллы коленчатой формы, развивающиеся в пльках сланцев.
- 4. В процессе роста порфиробласты как бы расталкивают основную ткань сланца, которая обтекает их. В результате образуется определенное сгущение полосок листоватых минералов. Одновременно вблизи порфиробластов создаются наиболее благоприятные условия для перекристаллизации основной ткани сланца и возникают дворики растяжения, состоящие из более крупных выделений тех же минералов. Дворики растяжения часто возникают между двумя порфиробластами в участках, где они наиболее сближены.

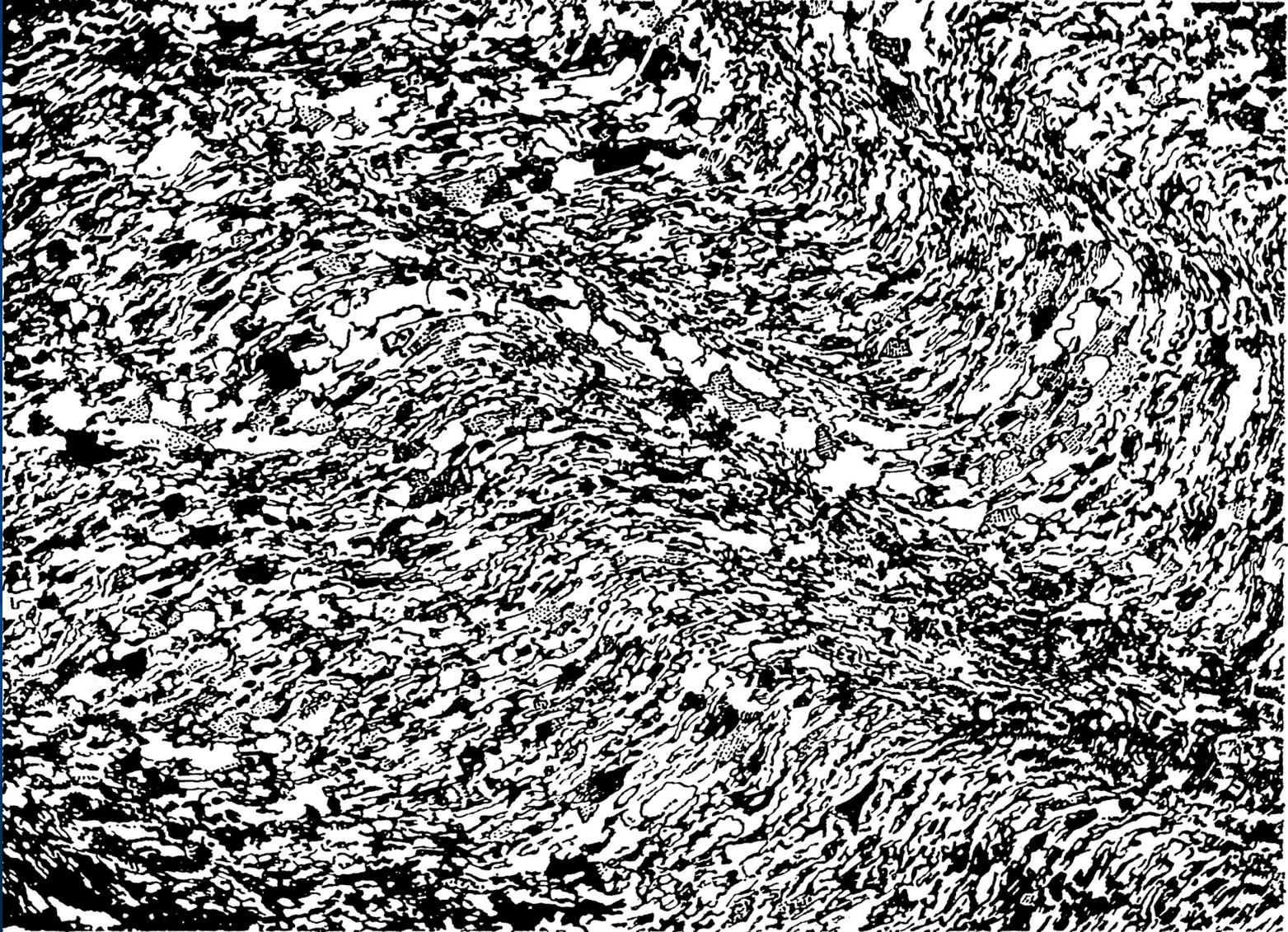
Метаморфическая дифференциация

- Во время метаморфизма пород с послойным распределением минеральных компонентов обмен растворенными веществами между соприкасающимися горизонтами разного состава осуществляется с помощью диффузии различных компонентов в флюидах и с помощью миграции последних через литологические границы.
- Это явление называется **метаморфической дифференциацией**.
- Перераспределение вещества идет всегда в сторону обогащения устойчивыми составляющими. *Например, при региональном метморфизме слоистого осадка, состоящего из прослоев глины и песчанистой глины, на месте глинистых прослоев возникнут горизонты, сложенные слюдами, а прослои песчанистой глины, потеряв материал, идущий на образование слюд, будут иметь мономинеральный кварцевый состав. В результате образовавшиеся слюдяные сланцы будут обладать полосчатой текстурой с чередованием слюдистых и мономинеральных кварцевых горизонтов.*

Сланцеватая текстура в слюдяном сланце



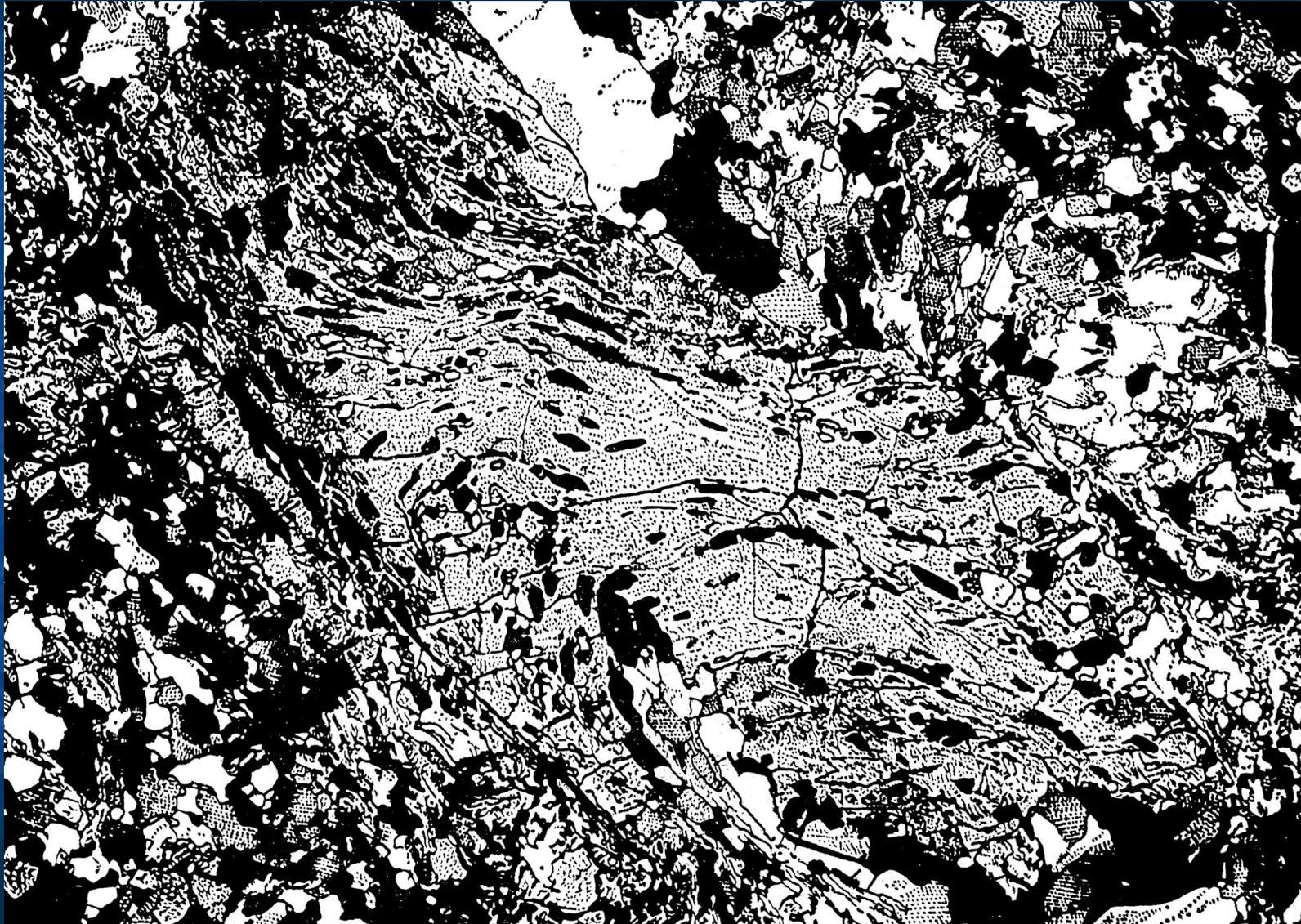
Площчатая текстура в серицит-хлорит-кварцевом сланце



Очковая текстура в слюдяном сланце



Структура «снежного кома» в порфиробласте ставролита в слюдяном сланце



«Дворик растяжения» между двумя порфиробластами хлоритоида в филлите

