

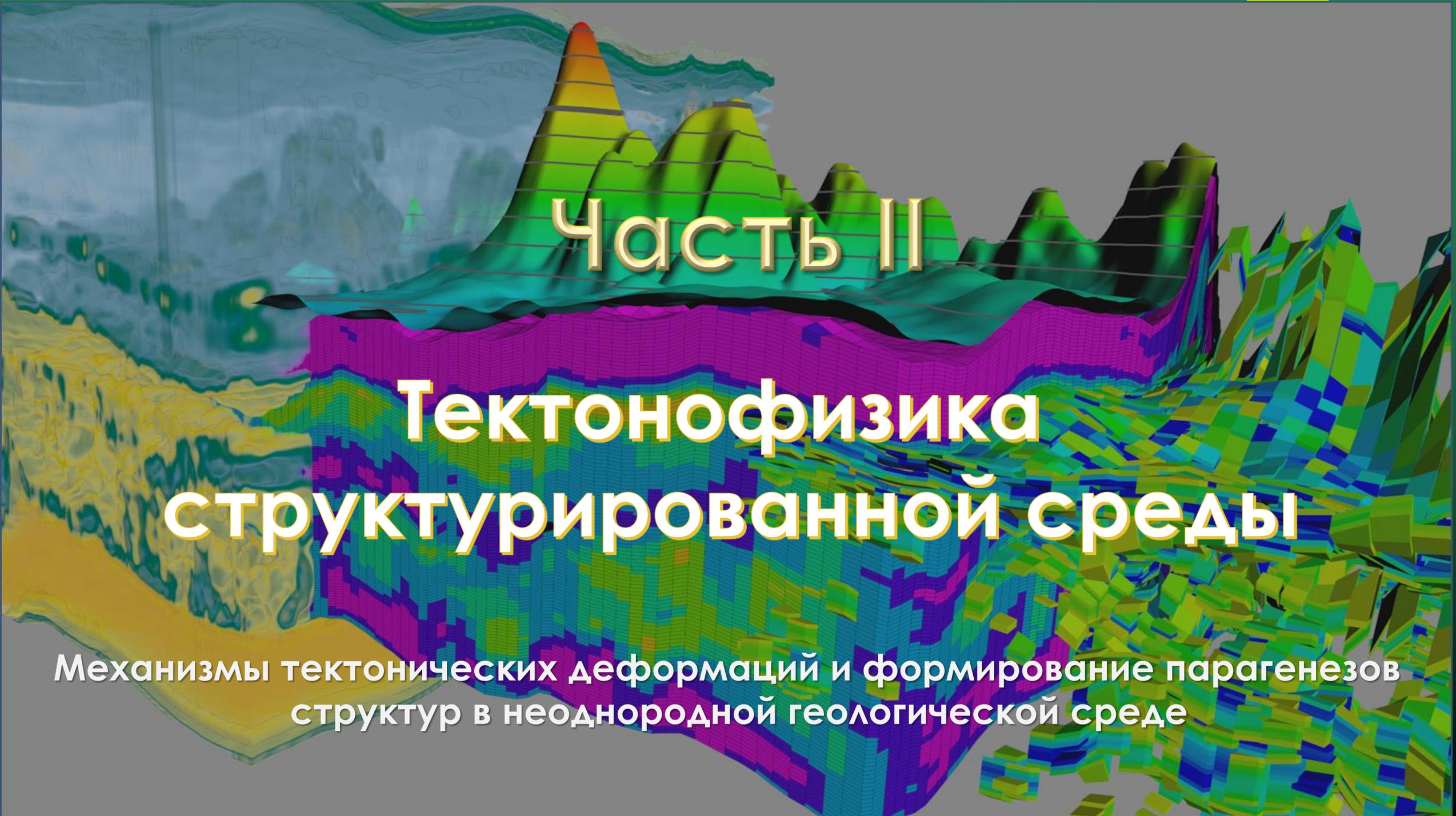


Геологический факультет МГУ  
Кафедра динамической геологии  
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 10

# Тектонофизика

Курс лекций вед. научн. сотр., канд. геол.-минер. наук  
Н.С. Фроловой



# Часть II

# Тектонофизика структурированной среды

Механизмы тектонических деформаций и формирование парагенезов структур в неоднородной геологической среде

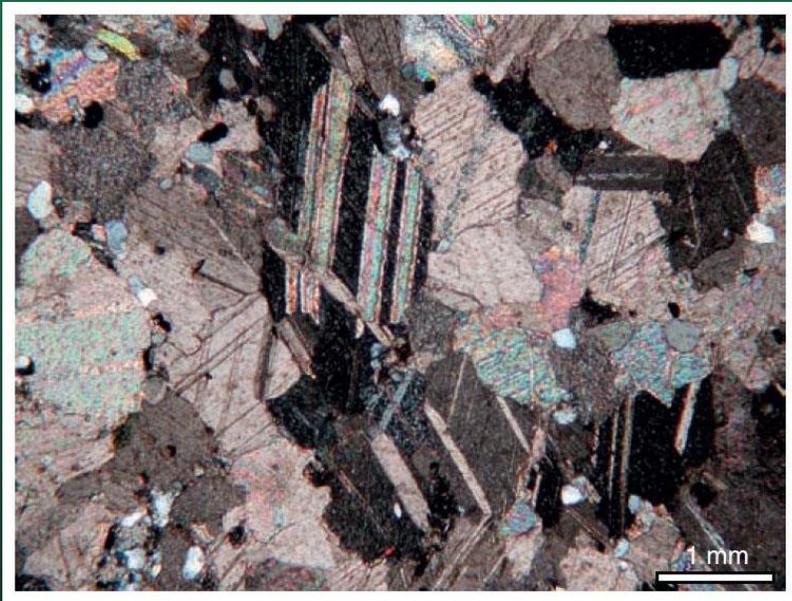
# Лекция 10

**ДЕФОРМАЦИЯ КРИСТАЛЛОВ И ИХ АГРЕГАТОВ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)**

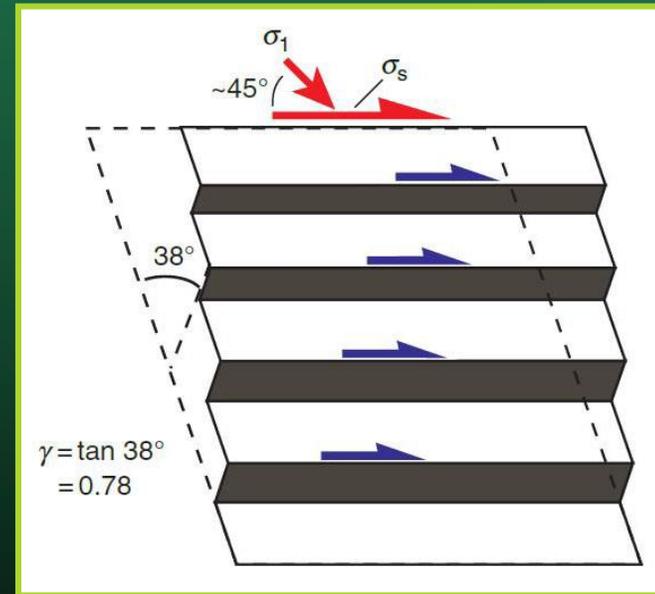
**СТРУКТУРЫ И ТЕКСТУРЫ ВНУТРИСЛОЕВОГО УРОВНЯ**

# Двойникование

- ▶ Деформационное двойникование образуется при локальной перегруппировке атомов за счет сдвига кристаллической решетки на расстояние, обеспечивающее точное зеркальное отображение исходного кристалла. При этом угол поворота фиксирован и определяется свойствами кристаллической решетки. По сравнению с дислокационным скольжением процесс двойникования протекает очень быстро и требует более высоких напряжений.



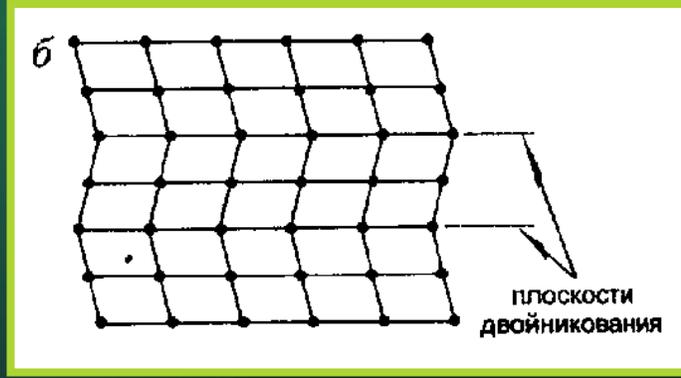
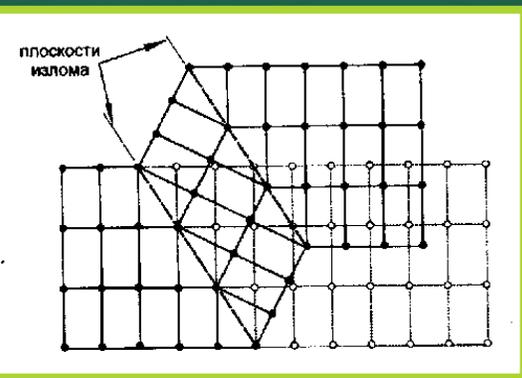
Деформационные двойники в агрегате кальцитовых кристаллов (Fossen, 2011)



Деформационные двойники в кристалле кальцита. Темные полосы были сдвинуты

# ПОЛОСЫ ИЗЛОМА (кинкбанды)

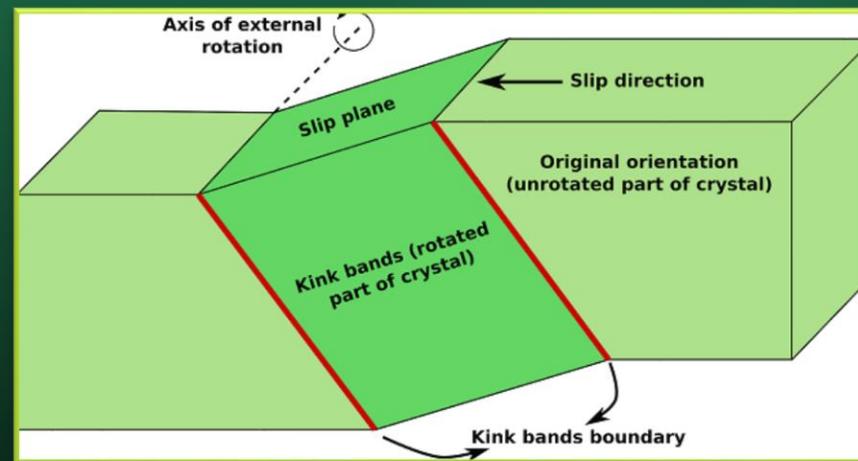
- ▶ Этот механизм выражается в существенном изгибе решетки с обеих сторон от плоскости излома, в которой лежит ось вращения.
- ▶ Существует морфологическое сходство между полосами излома и границами субзерен, образованных скоплениями дислокаций. Границы субзерен сложнее по внутреннему строению и отличаются поворотом кристаллических решеток на небольшой угол, тогда как для кинкбандов характерны повороты структуры на угол в десятки градусов.
- ▶ Угол поворотов в кинкбандах сильно варьирует в отличие от деформационных двойников, для которых это значение строго определяется законами двойникования.



Образование полос излома  
(Кирмасов, 2011)

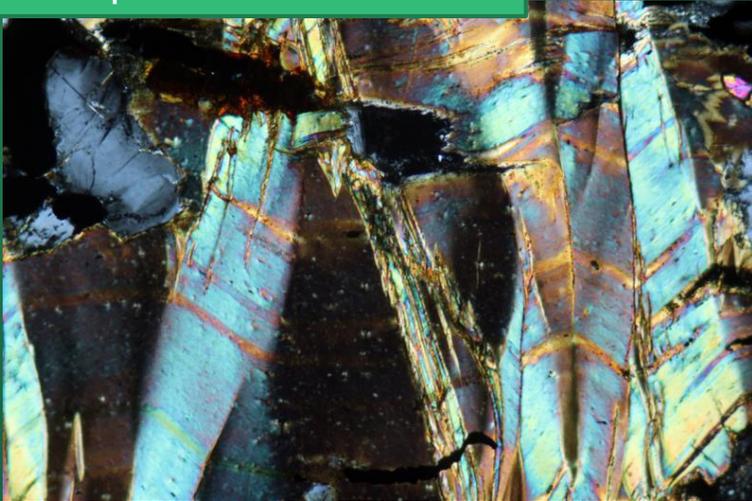
Для сравнения:  
двойникование

Этот механизм является второстепенным способом деформации



Механизм формирования полос излома в минеральном зерне по *Vernon, 2004* с изменениями Alex Strekeisen (<https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/kinkbands.php>)

# Кинк-банды (полосы излома) в биотите

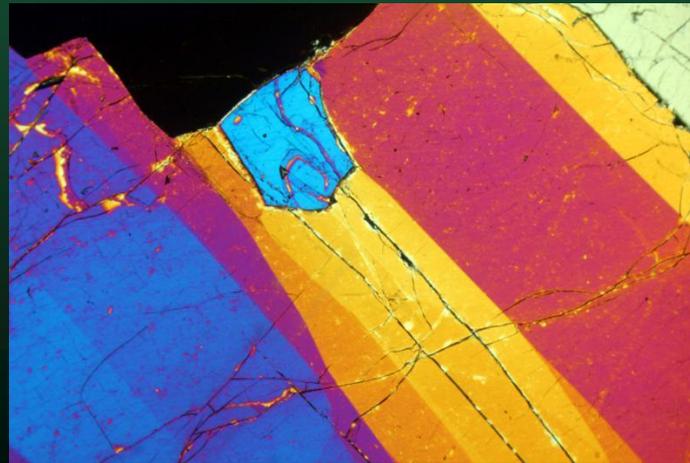
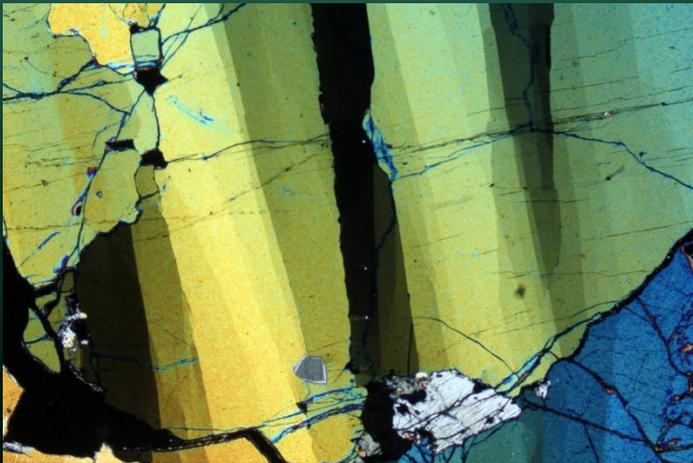


Тоналиты массива Адамелло, Италия. Поле зрения 7 мм



Гранулиты. Долиа Осоло, Итальянские Альпы  
Поле зрения 1 мм

# Кинк-банды (полосы излома) в оливине



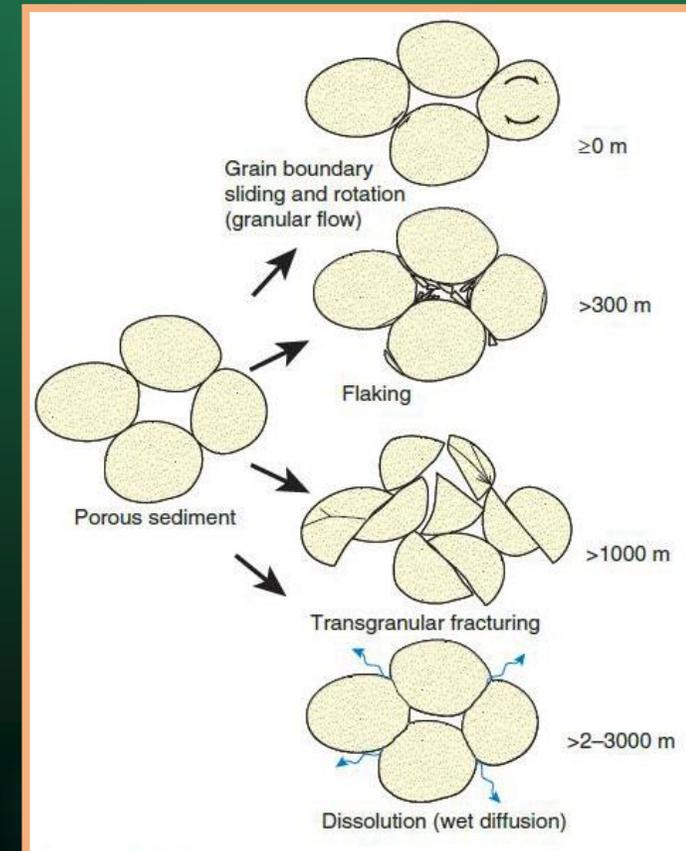
Ксенолиты из вулкана Этна.  
Поле зрения 7 мм.

# Границы зерен

- ▶ Пластическая деформация кристаллического вещества может происходить и путем смещений зерен по границам. В определенных условиях прочность границ на сдвиг может ослабляться, и смежные кристаллы в кристаллическом материале будут перемещаться вдоль разделяющих их границ. Такой механизм приводит к макроскопическому деформированию поликристаллов с малой деформацией самих зерен. Плоскостные дефекты типа границ зерен являются носителями пластической деформации, протекающей посредством межзерновых (зернограничных) механизмов.
- ▶ Но может происходить и разрушение зерен, фрагменты которых перемещаются друг относительно друга. Это катакластическое течение, включающее и некоторую пластическую деформацию.

На рисунке показаны деформационные механизмы, осуществляющиеся в зернистых осадочных породах при деформации в условиях низких температур и давлений

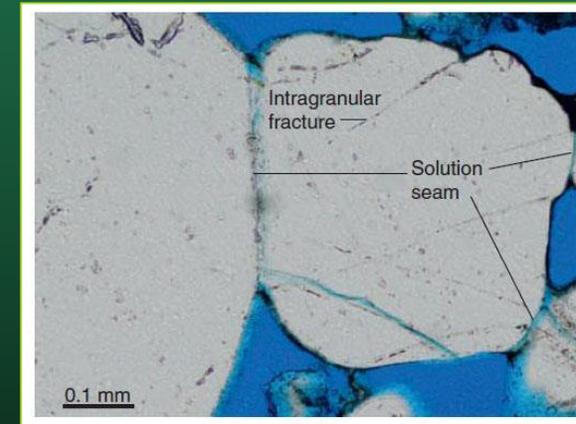
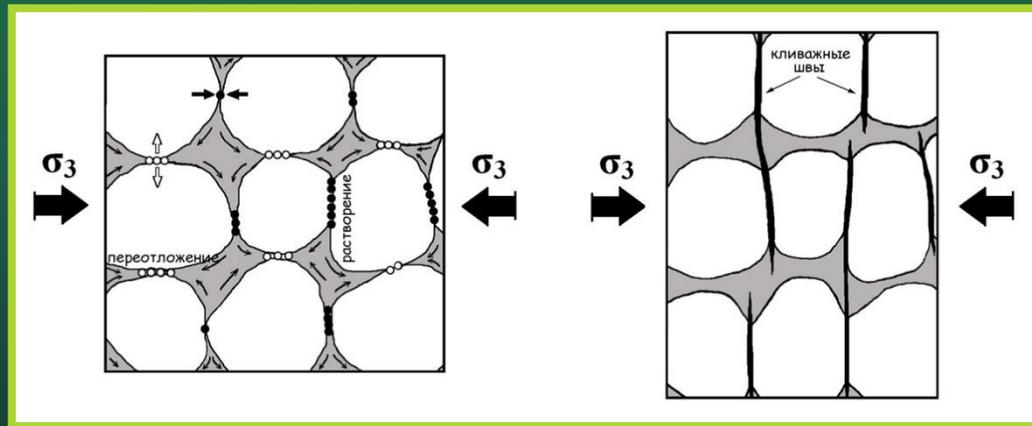
При определенных обстоятельствах (низкое поровое давления и малые площади контактов зерен) микротрещины могут формироваться близко к поверхности, обычно путем отщепления маленьких чешуек зерен. Этот тип микротрещин называется выкрашиванием или шелушением (*flaking*).



# Деформация на границах зерен с участием флюида

- ▶ Присутствие флюида, смачивающего внутри- и межзерновые границы, значительно увеличивает интенсивность поверхностной диффузии. Под действием приложенных напряжений данный кристалл изменяет свою форму в результате диффузии быстрее, чем за счет движения дислокаций.
- ▶ Флюиды также способствуют трещинообразованию.

## Растворение под давлением

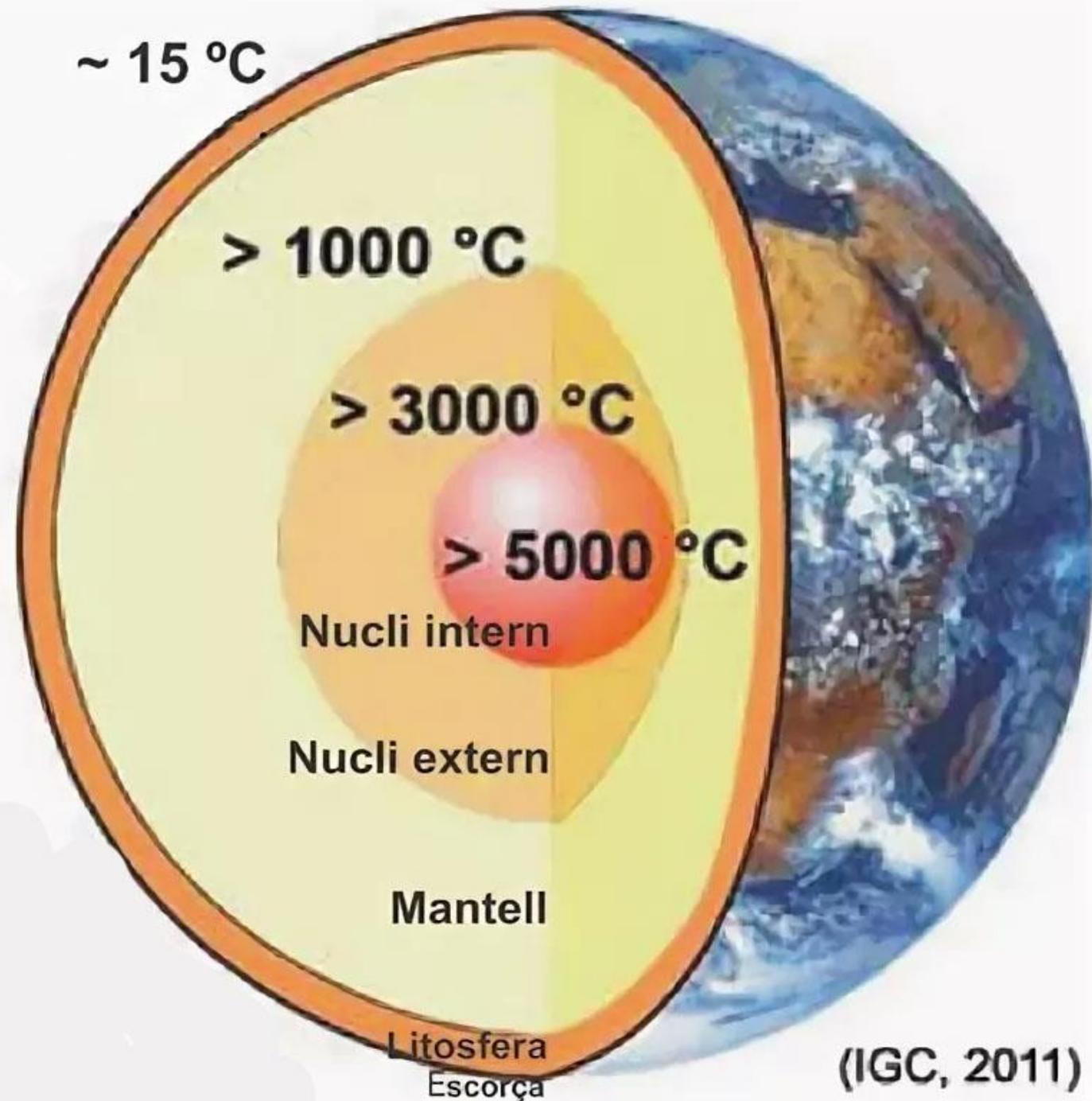


(Fossen, 2011)

Кристаллы находятся во флюидной среде под напряжением. На площадках, перпендикулярных осям  $\sigma_3$ , разная концентрация вакансий создает градиент химического потенциала. На гранях с черными стрелками этот градиент больше, чем на гранях с белыми стрелками, следовательно, на первых кристалл растворяется, а диффундирующие во флюидную фазу атомы выделяются на противоположных гранях.

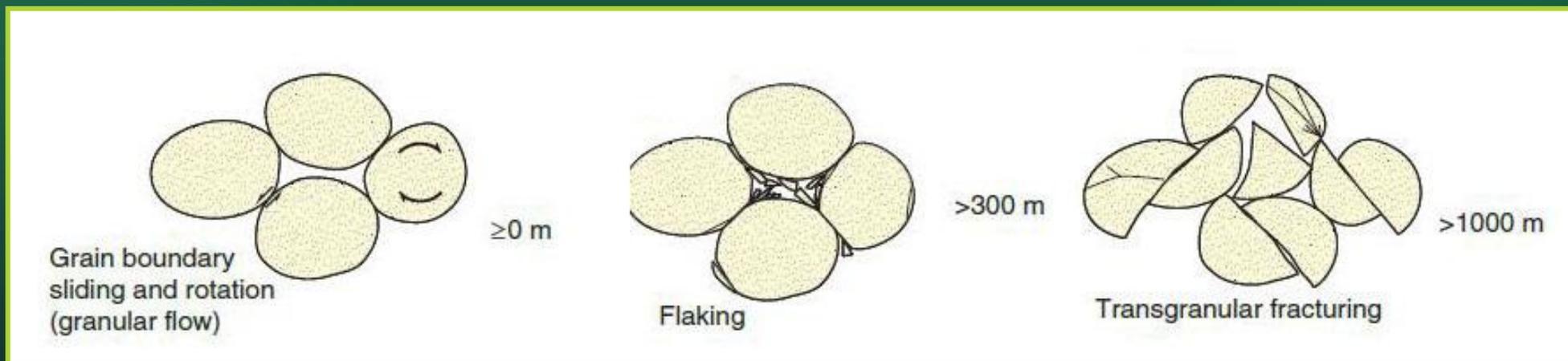
Другие названия: Компрессионная ползучесть. «Мокрая диффузия»

Влияние внешних  
условий  
деформирования  
на механизм  
деформации  
(уровень зерен)



# Деформационные механизмы при очень низких температуре и давлении

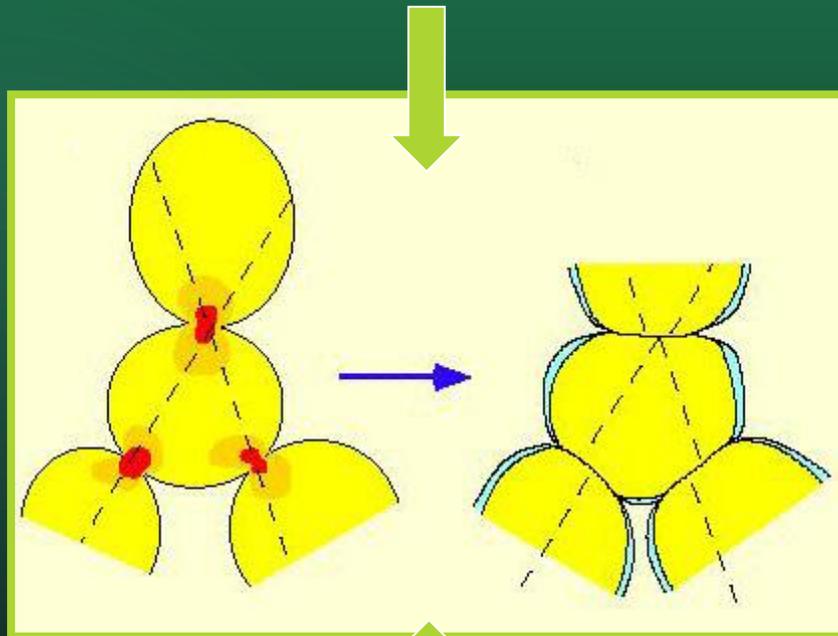
- ▶ В этой ситуации имеют место хрупкие деформации, такие, как межзерновое растрескивание, внутризерновое растрескивание, скольжение с трением на границах трещин и зерен, поворот зерен.
- ▶ Комбинация этих механизмов называется катакластическим течением



(Fossen, 2011)

# Деформационные механизмы при более высокой температуре и в присутствии флюида

Это компрессионная ползучесть, «мокрая» диффузия или растворение под давлением (разные названия одного и того же)



*(Passchier, Trouw, 1998)*

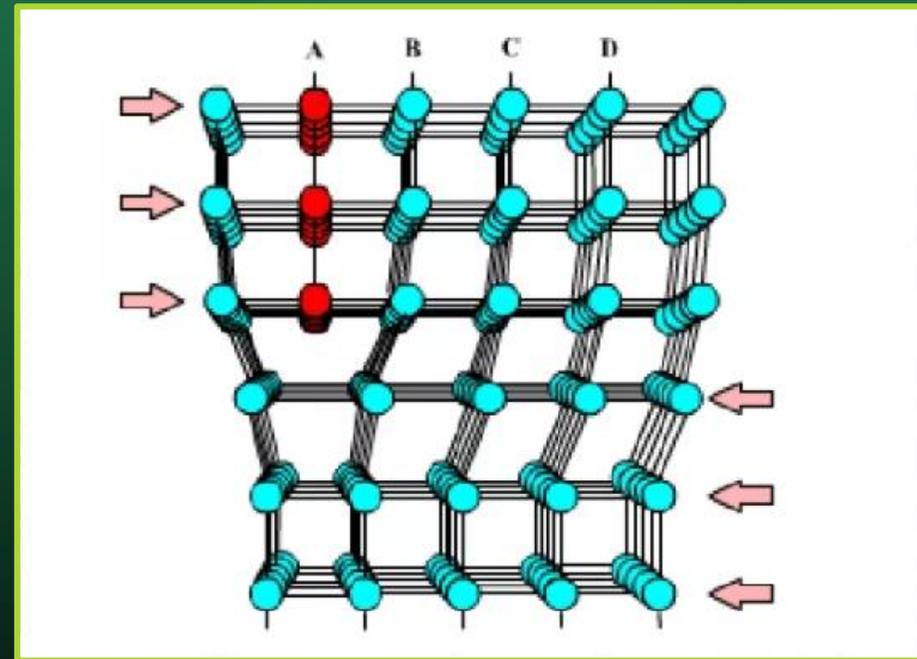
Этот механизм включает три стадии:

- Ориентированное растворение.
- Перенос во флюиде.
- Отложение растворенного вещества на различных расстояниях.

Условия, в которых осуществляется растворение под давлением

# Механизмы пластичности отдельных кристаллов при разной температуре

- ▶ Приведенные в предыдущей лекции некоторые механизмы пластичности кристаллов были рассмотрены безотносительно к внешним условиям деформирования. Однако на механические свойства кристаллических материалов существенное влияние оказывает температура. С ростом температуры увеличивается подвижность дефектов разных типов, следовательно, активизируются процессы их взаимодействия, в результате этого повышается пластичность кристаллов.

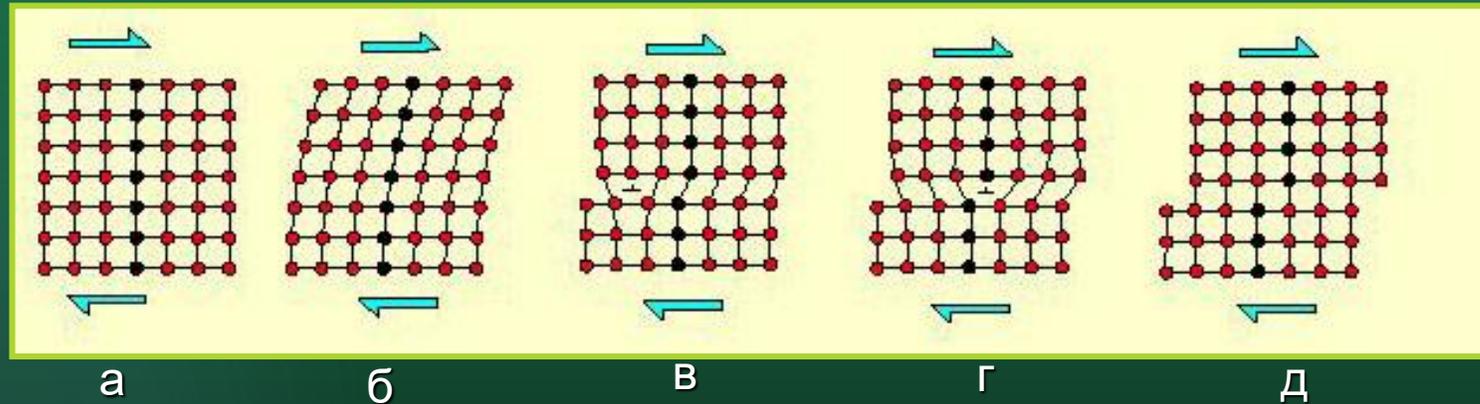


# Низкая температура

(ниже  $0,5 T$  плавления)

(Температура плавления от  $-38,9^{\circ}\text{C}$  для ртути и до  $2050^{\circ}\text{C}$  для корунда)

Основной вклад в пластичность материалов вносят трансляционные механизмы, связанные со **скольжением дислокаций**.



(Passchier, Trouw, 1998)

Пример: деформация в кристалле осуществляется посредством скольжения краевой дислокации

Упругая деформация (б) приводит к внедрению дислокации (в), затем происходит миграция дислокации (г) и таким образом форма кристалла меняется (д)

Деформационный механизм на микроуровне: *дислокационное скольжение*

Кроме того происходят процессы двойникования и образования полос излома

# Температура плавления некоторых минералов

- ▶ Кварц 1883 (1710)
- ▶ Магнетит 1540
- ▶ Анортит 1550
- ▶ Диопсид 1390
- ▶ Кальцит 1340
- ▶ Ортоклаз 1170-1200
- ▶ Альмандин 1140
- ▶ Слюды 1130-1230

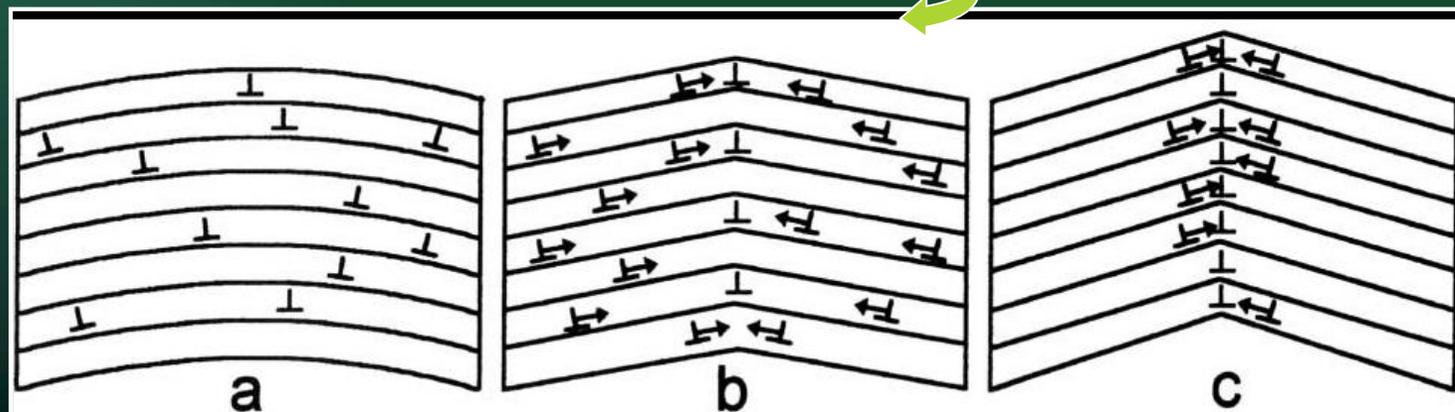
# Высокая температура

(выше  $0,5 T$  плавления)

При температурах, превышающих  $0,5 T$  плавления, значительно повышается подвижность дефектов всех типов и кристаллические материалы приобретают свойства ползучести. По преобладающим механизмам различают дислокационные и диффузионные типы ползучести.

## Ползучесть дислокационных типов:

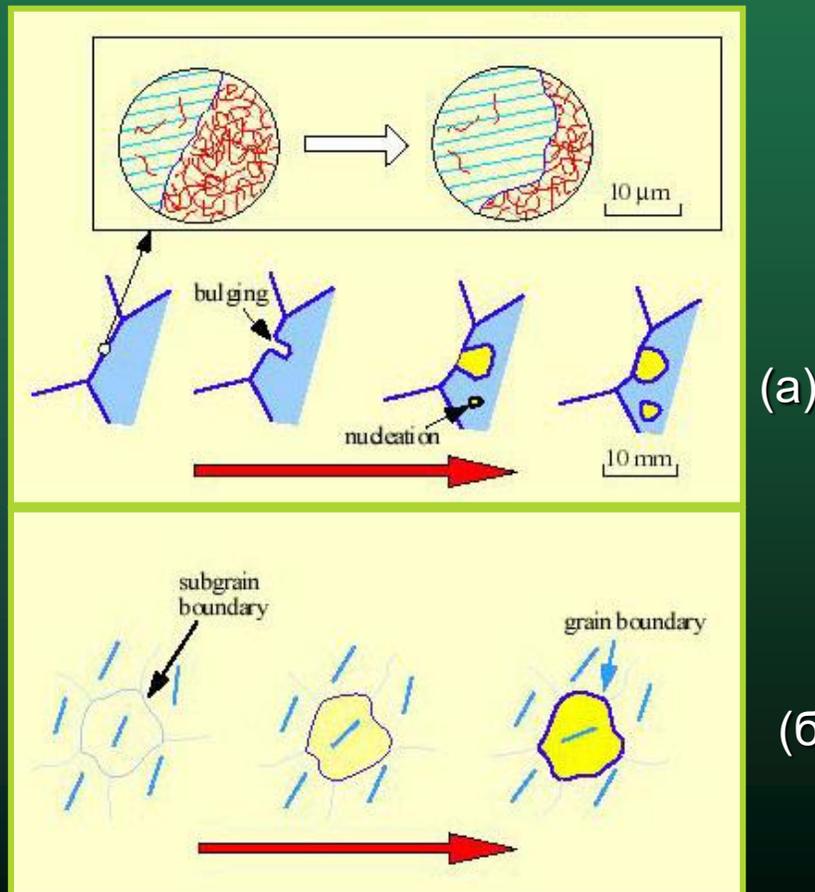
1. Механизм переползания дислокаций
2. Механизм регенерации (полигонизации)



(Blenkinsop, 2002)

# Температура еще выше

При дальнейшем увеличении деформации, а также при увеличении температуры и приложенного напряжения, процессы регенерации (полигонизации) могут сменяться процессами **динамической рекристаллизации**



(a)

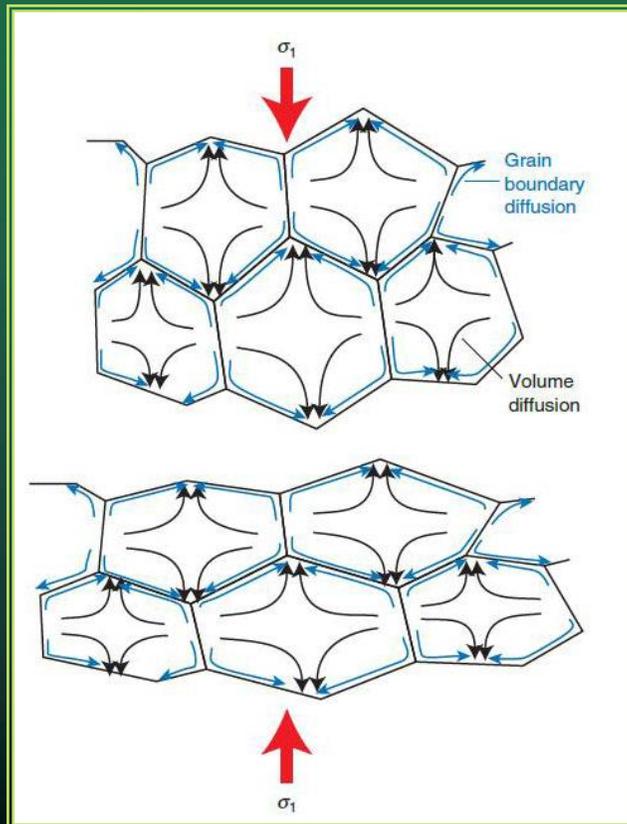
(б)

Два механизма динамической рекристаллизации:

- миграция границ зерен (а);
- поворот субзерен (б)

# Температура приближается к $T$ плавления

Дислокационные типы ползучести сменяются *диффузионными*.  
Это связано с экспоненциальной зависимостью диффузии от температуры

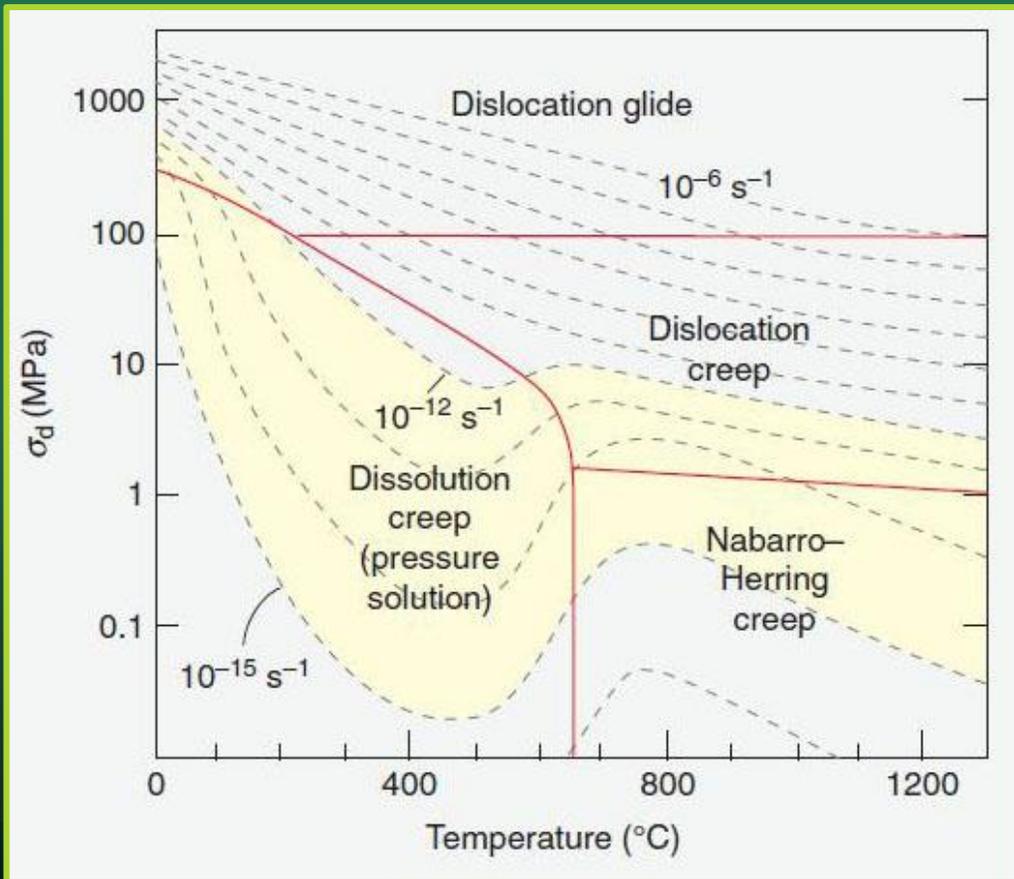


Диффузия вакансий через кристалл (внутри зерна) – это объемная диффузия или **ползучесть (крип) Набарро-Херринга**.

Если массоперенос осуществляется за счет диффузии по границам зерен (зернограничная диффузия), то это **ползучесть (крип) Кобле**.

Деформационный механизм на микроуровне: *диффузионная ползучесть*

# Карты деформационных механизмов



Карта (диаграмма) построена в координатах девиаторное напряжение – температура. В основу положены экспериментальные данные с экстраполяцией в реальные геологические условия

*Примечание: под дислокационным крипом здесь понимаются процессы регенерации и рекристаллизации*

# Структуры и текстуры внутрислоевого уровня



# Внутрислоевой уровень

(уровень зерен и агрегатов зерен, по В.Г. Талицкому)

1. Плоскостные текстуры:

- сланцеватость
- межзерновой кливаж
- кливаж плойчатости
- полосчатость

2. Минеральная и агрегатная линейность

3. Порфиробласты

4. Структуры тыльных частей зерен и минеральных включений  
(тени и каймы давления, бороды нарастания)

5. Макрокливажные швы

6. Муллион-структуры

7. Минеральные жилы

8. Микробудинаж

9. Кинк-зоны

10. Микроразрывы

Образование перечисленных структур сильно влияет на ход дальнейшего деформационного процесса, а их изучения позволяет реконструировать условия деформации

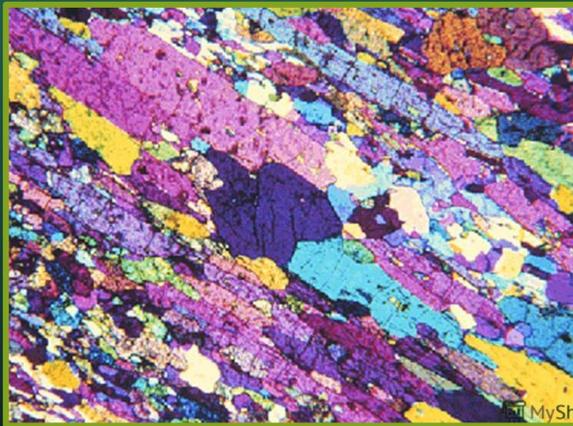
# Типы плоскостных текстур

Определение текстуры: особенности строения горных пород, обусловленные ориентировкой и пространственным расположением их составных частей (зёрен).

Существуют первичные и вторичные текстуры.

Значение вторичных плоскостных текстур: их развитие влияет на механизмы деформации содержащего их объема горных пород; эти текстуры можно использовать для реконструкции деформационной обстановки

Основные типы плоскостных текстур:



Сланцеватость



Кливаж

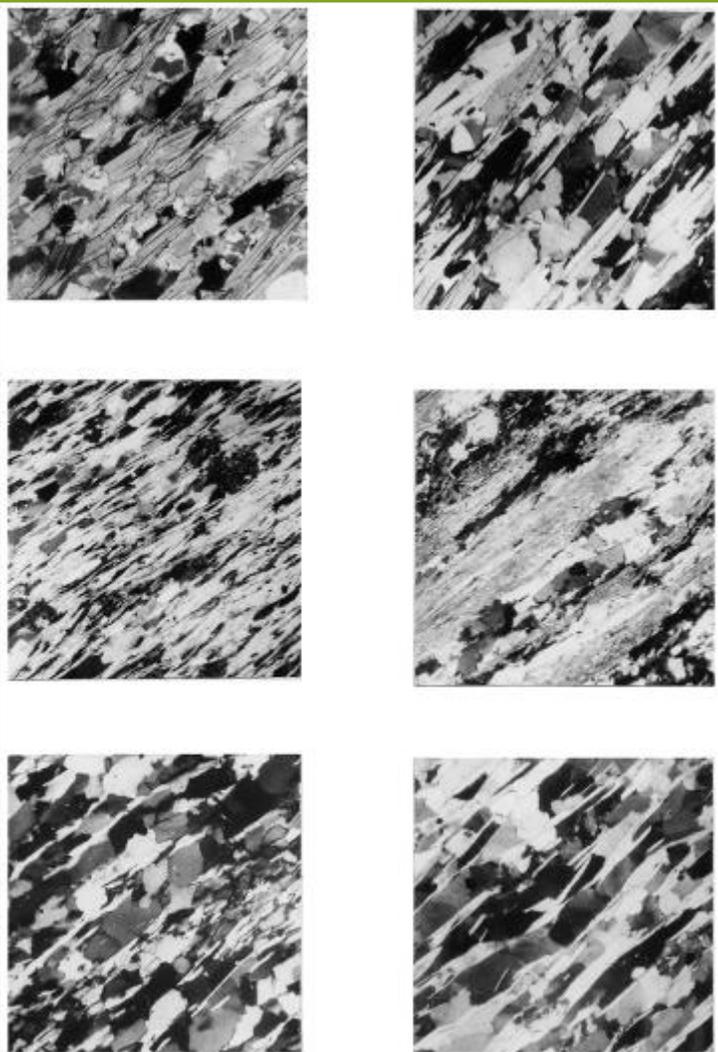


Полосчатость



# Сланцеватость

# Определение



Сланцеватость. Кристаллические сланцы из различных складчатых областей. Увеличение 20, николи+. (Фото В.Г.Талицкого)

## Классическое определение сланцеватости:

*Сланцеватостью называется текстура, обусловленная предпочтительной ориентировкой пластинчатых, чешуйчатых, листоватых минералов в породе*

Определение сланцеватости ввел в литературу Р. Бэйквелл в 1813 г.

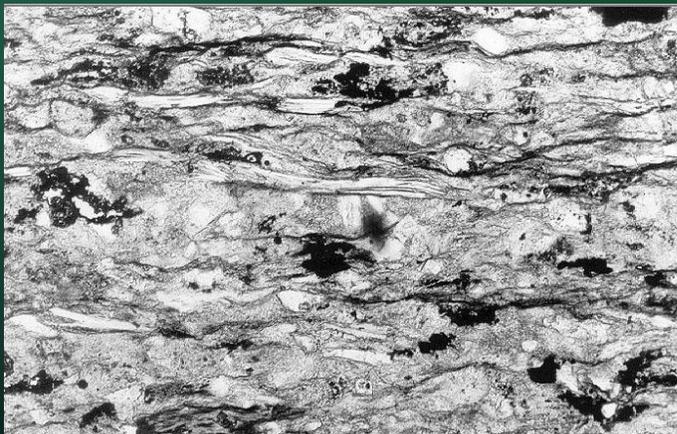
Это определение в настоящее время относится к породам любой степени метаморфизма

**Ориентировка сланцеватости** по отношению к осям напряжений: сланцеватость перпендикулярна оси максимального сжатия

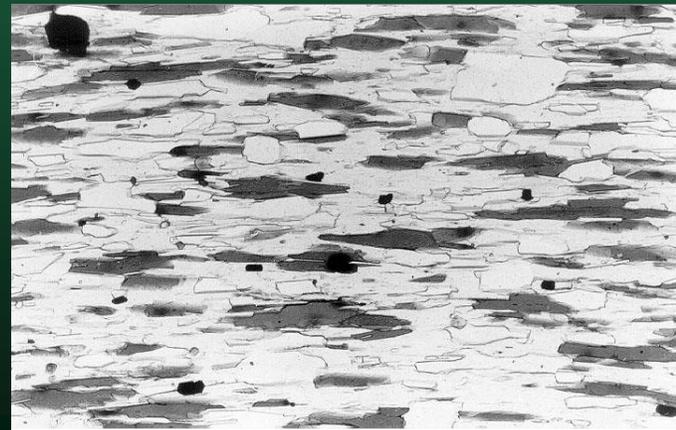
## ■ Происхождение сланцеватости:

- Первичная сланцеватость
- Вращение, обусловленное формой зерен (существуют факты, противоречащие этому предположению)
- Вращение, обусловленное внутризерновым скольжением
- Рост зерен с ориентировкой пластинок, перпендикулярной оси максимального сжатия
- Рост зерен с ориентировкой пластинок, параллельной ранее существовавшей структуре

## ■ Ориентировка сланцеватости по отношению к первичной слоистости, полосчатости и складчатой структуре

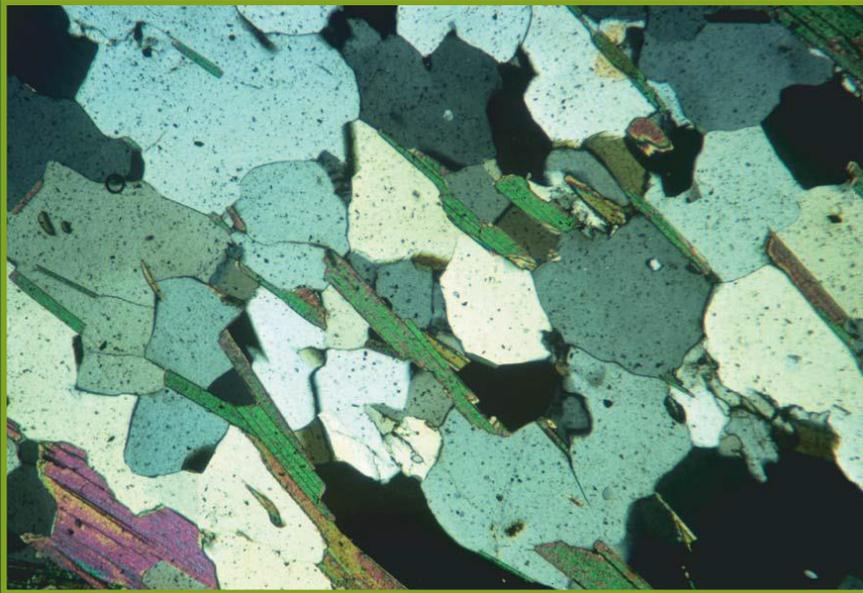


*(Passchier, Trouw , 1998)*

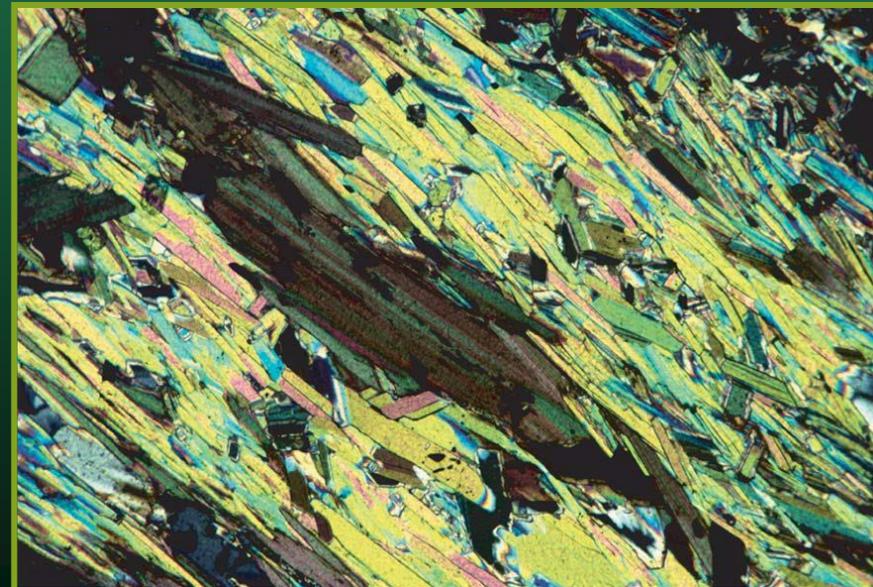
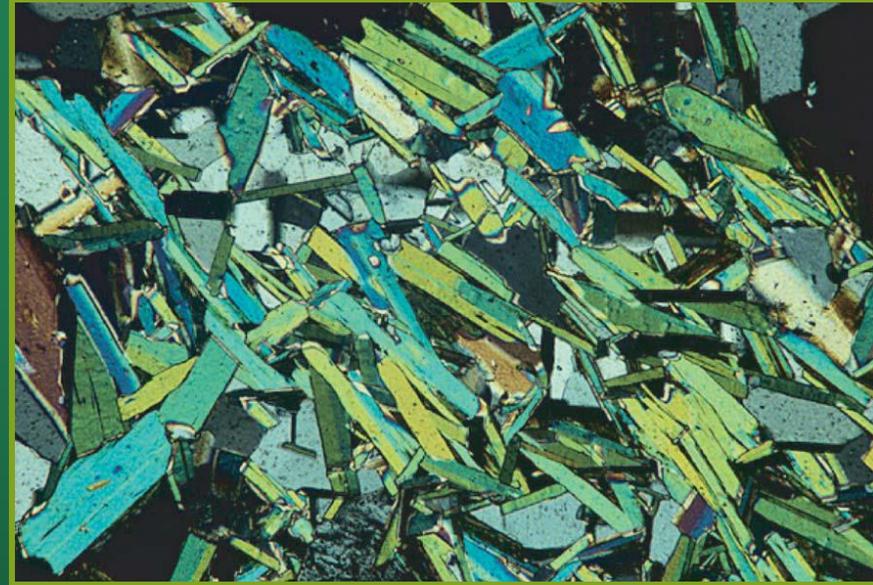


*Носителем такого свойства, как сланцеватость, является собственно зерно*

# Примеры сланцеватости

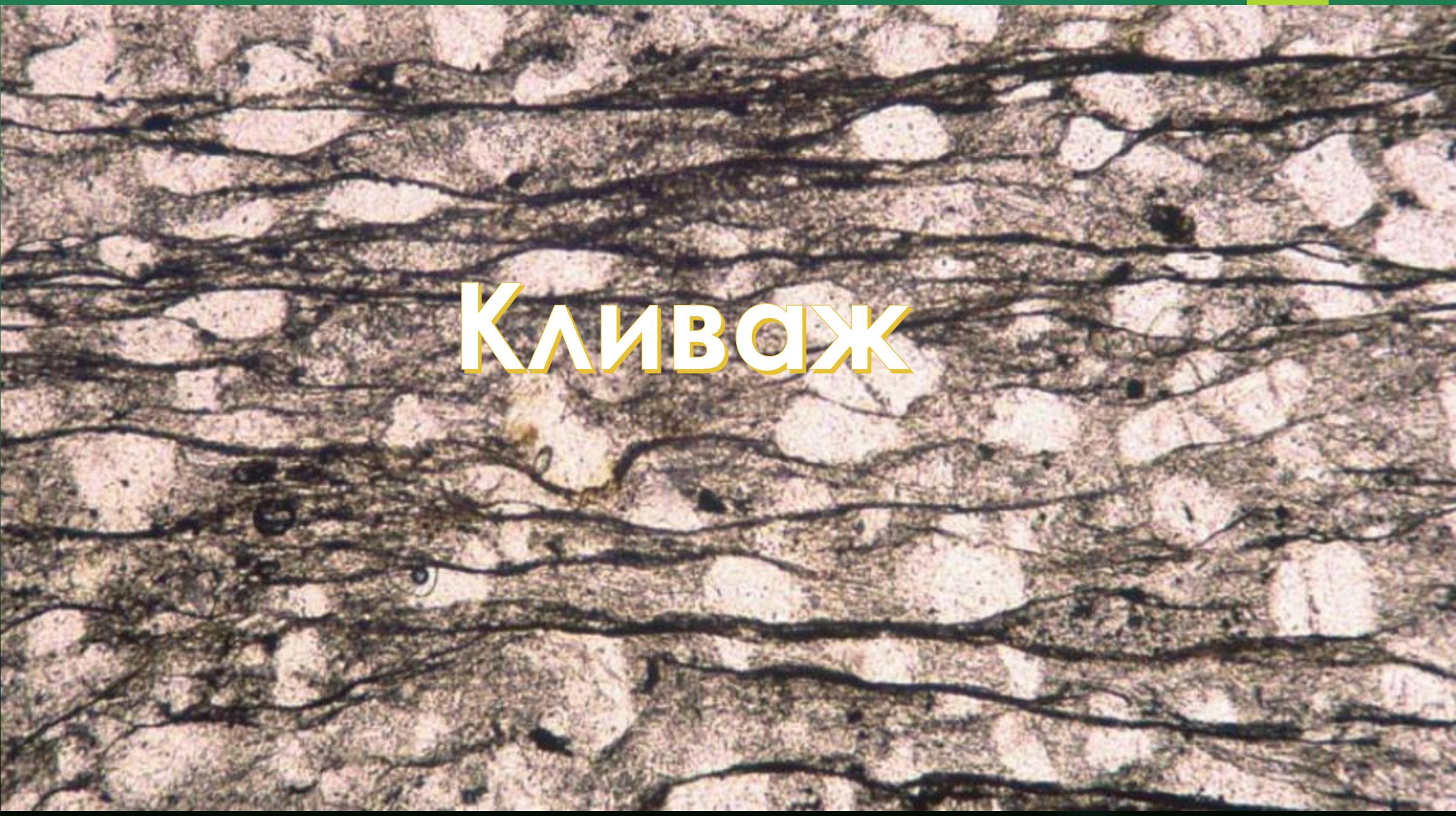


*(Vernon, 2004)*



Породы, в которых имеет место сланцеватость, называются сланцами

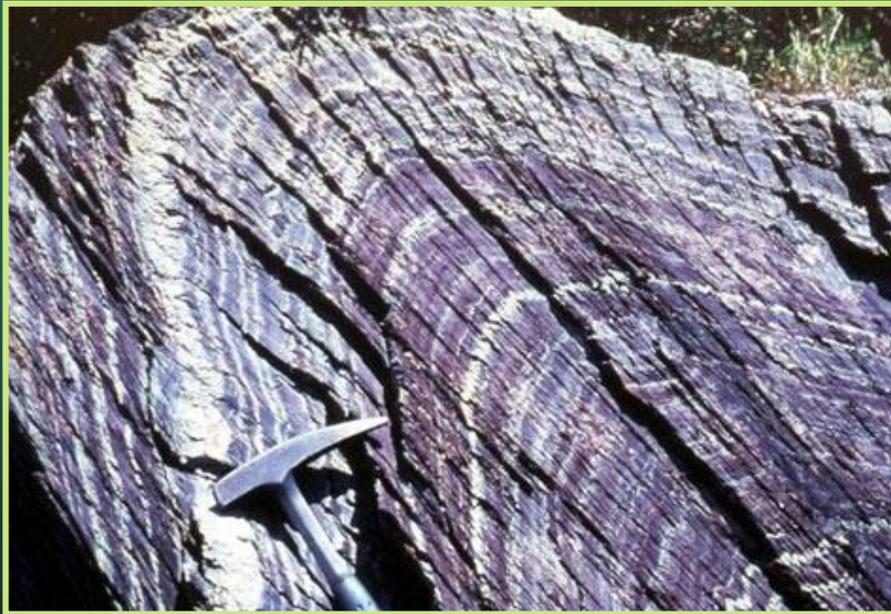


A close-up photograph of a tree trunk, showing a dense network of dark, branching lenticels (small pores) and light-colored, textured bark. The lenticels are arranged in a somewhat regular, grid-like pattern, with some larger, more prominent ones. The overall appearance is that of a well-developed, mature tree trunk.

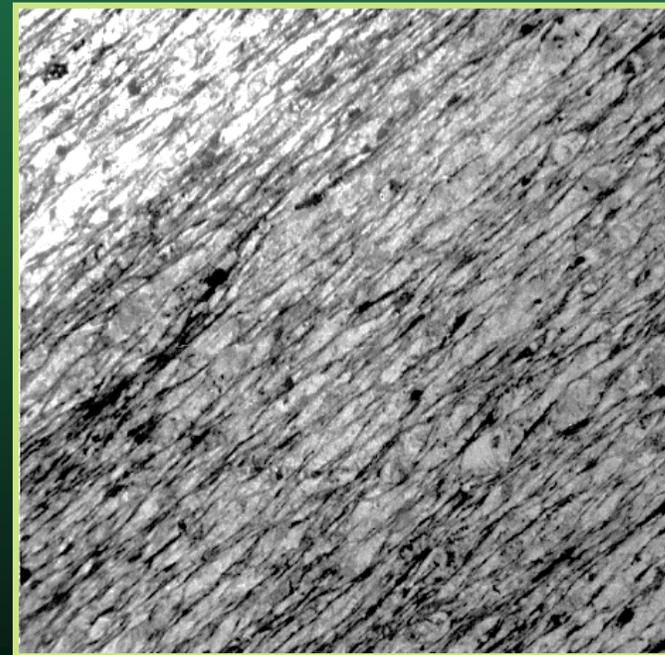
# Кливаж

# Что такое кливаж?

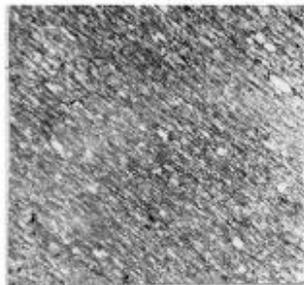
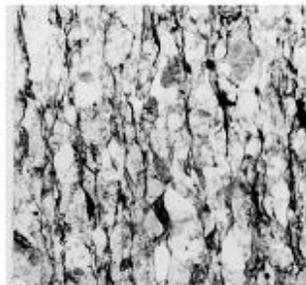
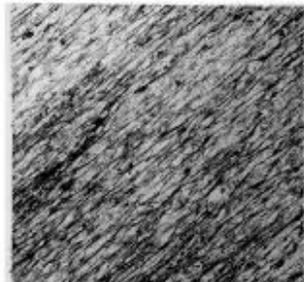
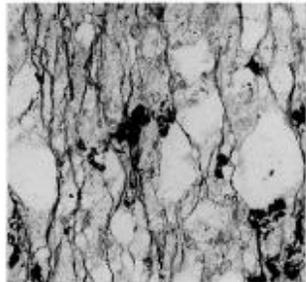
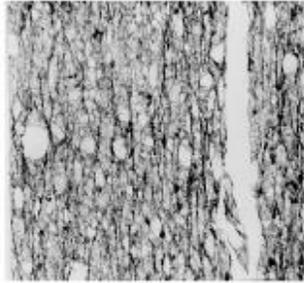
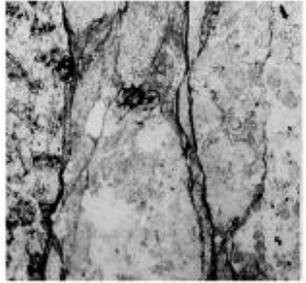
- ▶ Сэджвик, 1835: расщепление горных пород на тонкие пластинки
- ▶ Пенроузская конференция, 1976: кливаж – микроструктура. Это система тонких субпараллельных нитевидных зон



*(no Ramsay, Huber)*



# Межзерновой кливаж



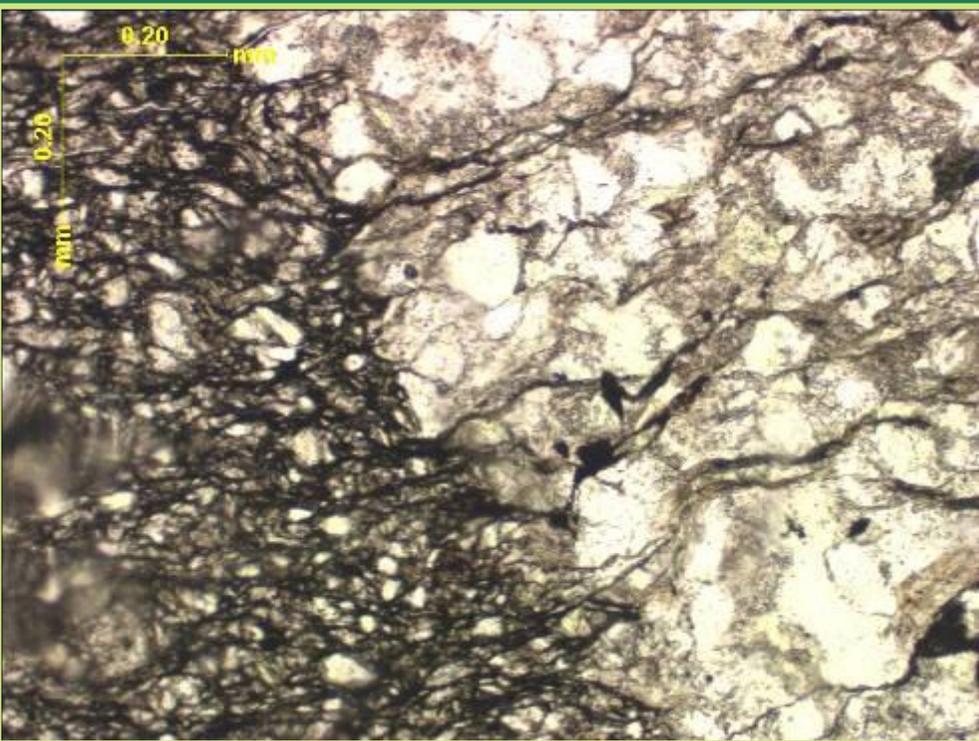
Это системы тонких субпараллельных нитевидных зон в зернистых породах

Такие зоны являются ослабленными поверхностями, по которым и раскалывается порода.

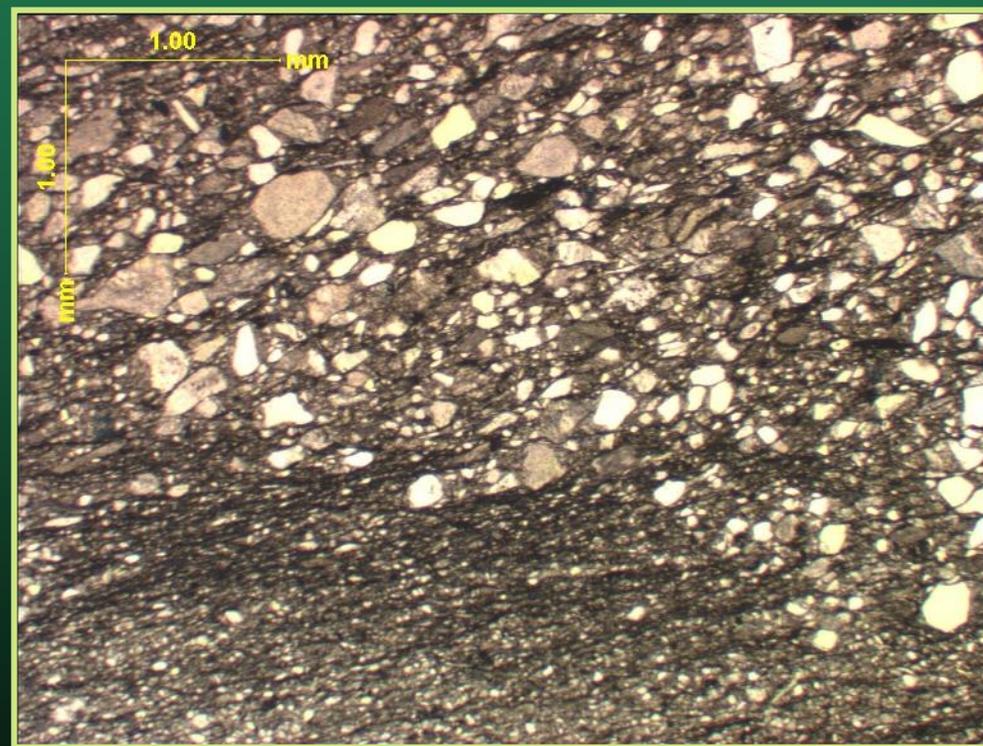
Межзерновой кливаж. Гравелиты, песчаники, алевролиты из различных складчатых областей. Увеличение 20, николи II. (Фото В.Г.Талицкого). Субпараллельно расположенные тонкие нитевидные зоны огибают обломочные зерна. Чем мельче слагающие породу зерна, тем чаще расположены зоны кливажа и тем совершеннее выглядит текстура.

*Фото В.Г. Талицкого*

*Кливаж изучается более 150 лет, его определение и происхождение все это время вызывало споры*



Еще примеры межзернового кливажа



*Фото В. Быстровой, Кавказ*

# Как кливаж выглядит в обнажениях

## Масштаб слоев



Кливаж может развиваться в отдельных слоях или пронизывать все слои, преломляясь на их границах

# Кливаж в слоях (продолжение)



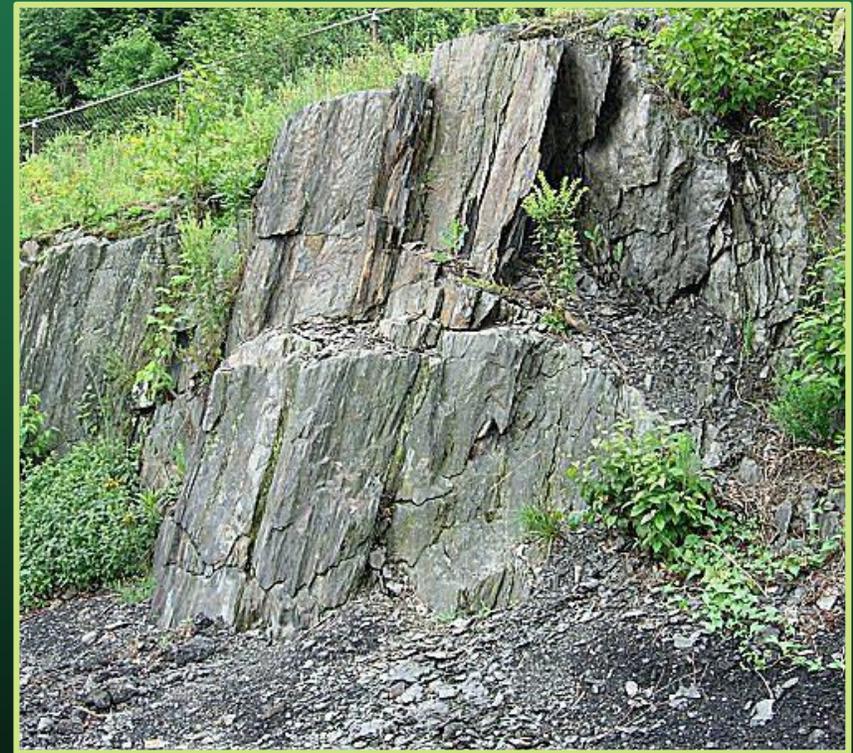
Терригенные породы (песчаники, алевроитовые и глинистые сланцы)  
Корякско-Чукотская складчатая область. *Фото И.А. Войцика*

# Кливаж в слоях (продолжение)



*Callan Bentley*

<https://blogs.agu.org/mountainbeltway/2012/11/21/rock-cycle-1/>



Проблема: в глинистых сланцах и филлитах-кливаж или сланцеватость?

<https://www.thoughtco.com/what-is-phyllite-4123064>

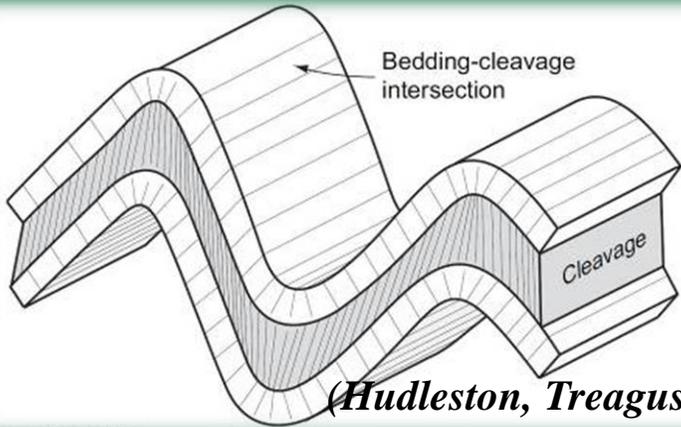
# Как кливаж выглядит в обнажениях

## Масштаб складок



*Фото Н.С.Фроловой*

# КЛИВАЖ В СКЛАДКАХ



*(Hudleston, Treagus, 2010)*

Хадлстон, Трейгус, 2010

Кливаж образует прямой (в вязких слоях) или обратный (в маловязких слоях) веер

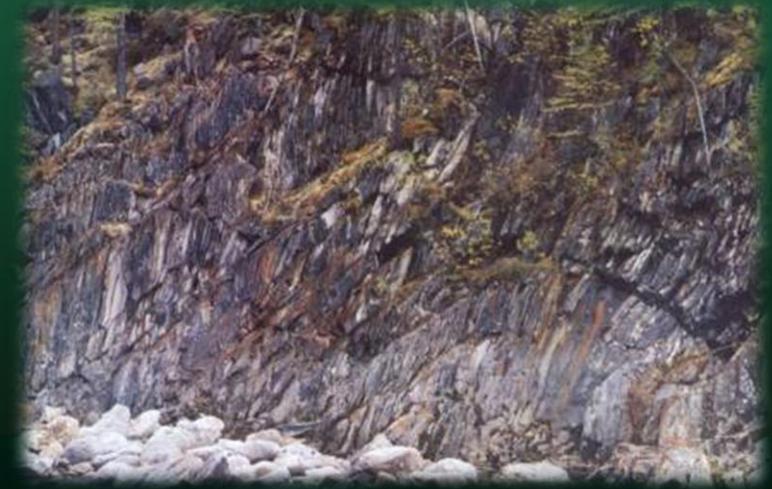


*(no Ramsay, Huber)*



*(no Паталахе и др., 1973)*

Преломление кливажа в слоях разной вязкости происходит таким образом, что хорда кливажа параллельна осевой поверхности складки (т. наз. «правило Паталахи»)



*(Фото А.Б. Курмасова)*

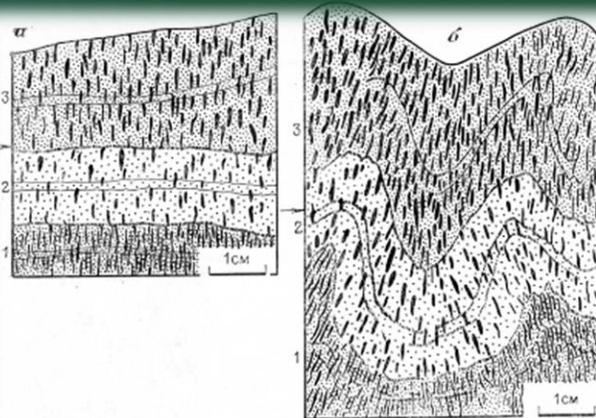
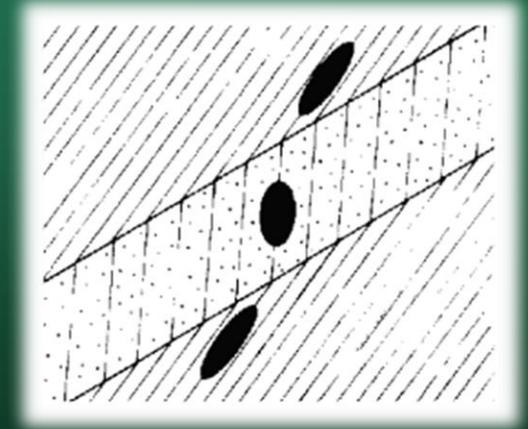
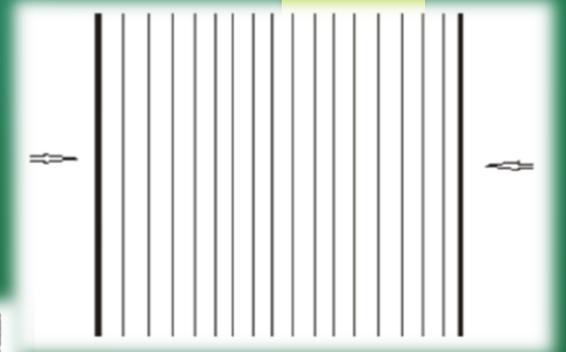
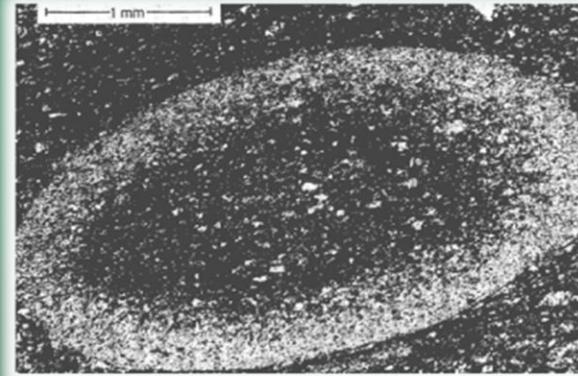
# Ориентировка кливажа

- Поверхности кливажа всегда перпендикулярны оси максимального сжатия (Харкер, 1857)



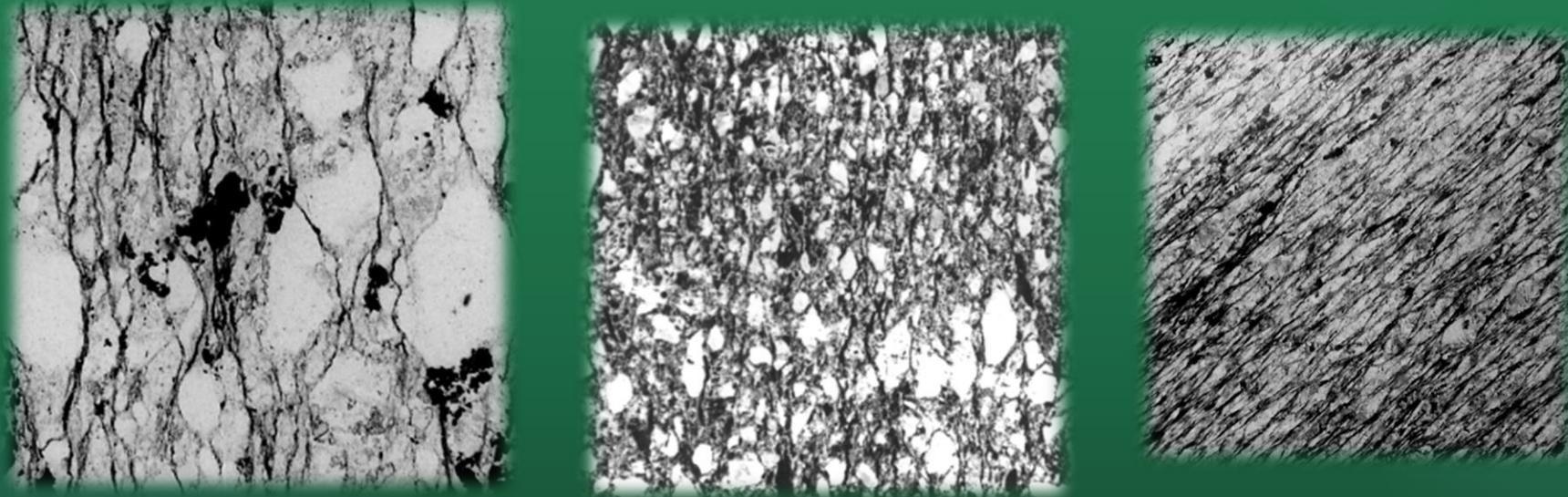
(no E. Cloos, 1947)

Это наиболее очевидно при наличии в породе включений, имевших первоначально круглую форму

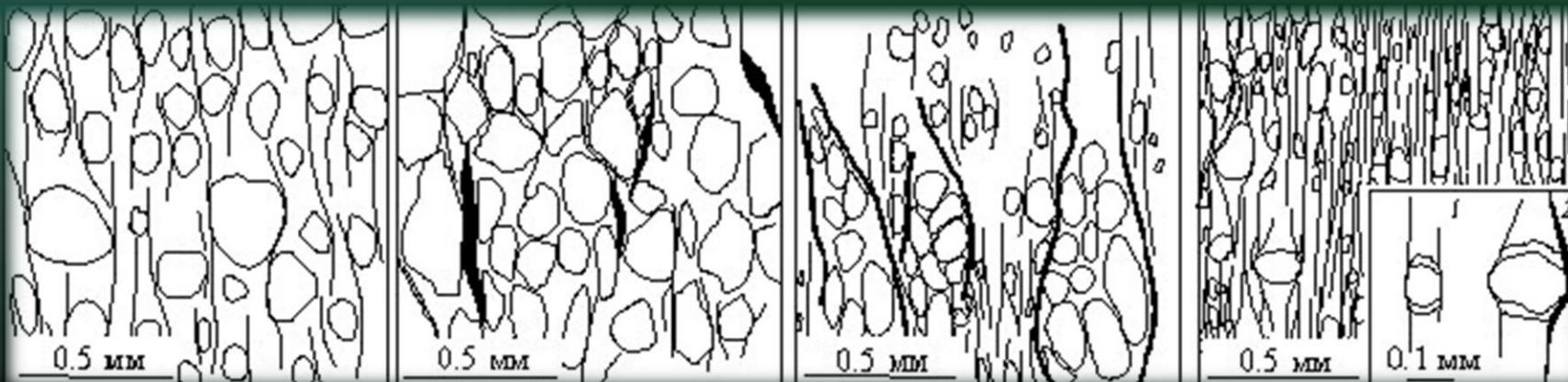


Кливаж закладывается на первой стадии складкообразования, когда слои лежат еще горизонтально. На второй стадии, при изгибе слоев, он разворачивается в веер – прямой в вязких слоях и обратный в маловязких слоях. Таким образом кливаж в разных слоях преломляется

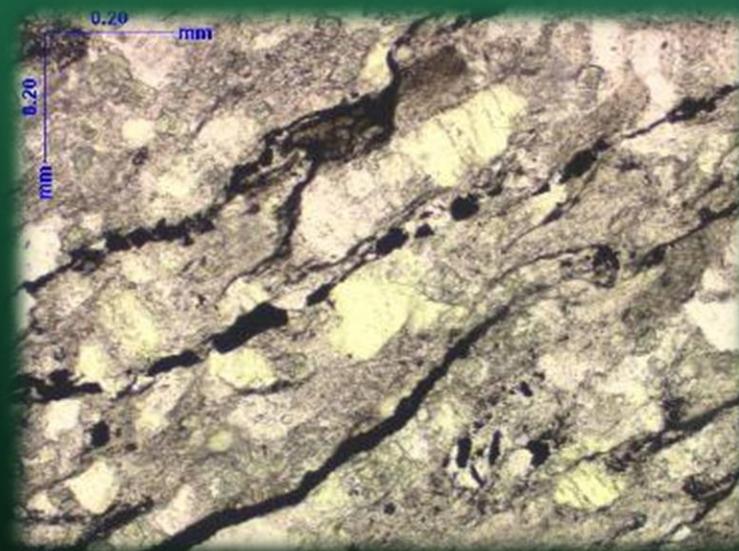
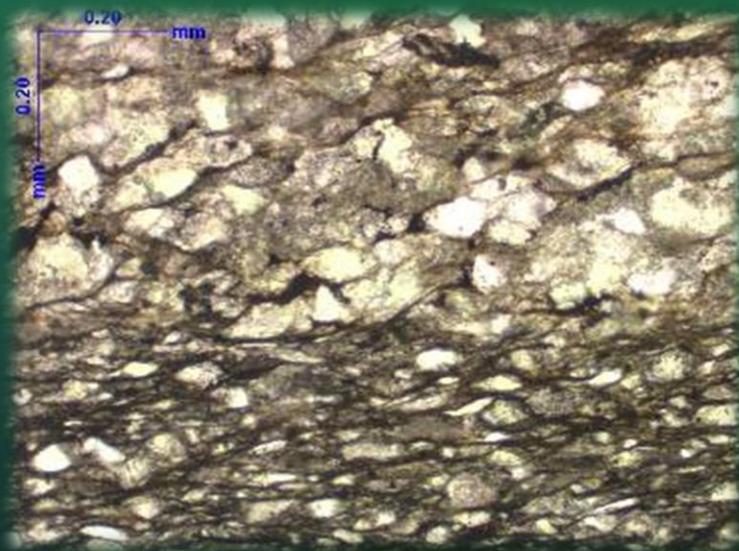
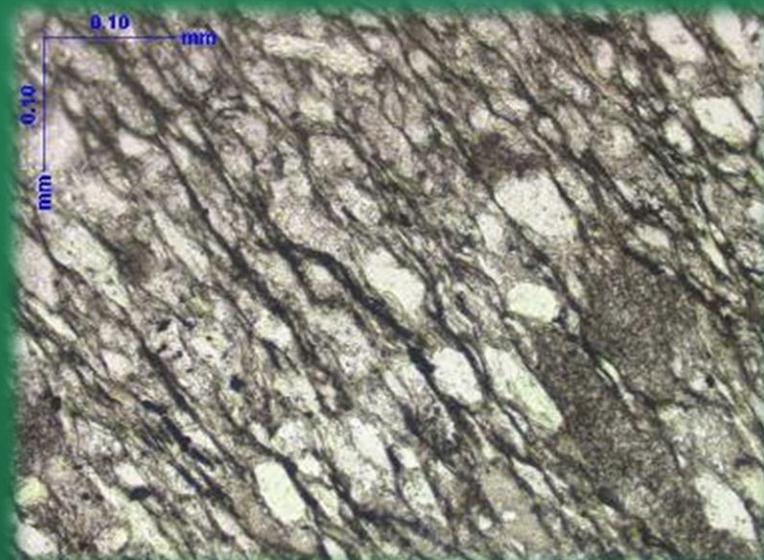
# Кливаж под микроскопом



Микроскопически кливаж – это тонкие нитевидные зоны, обогащенные мельчайшими листочками чешуйчатых минералов, органическим и рудным веществом, придающим этим зонам, называемым швами, темный цвет

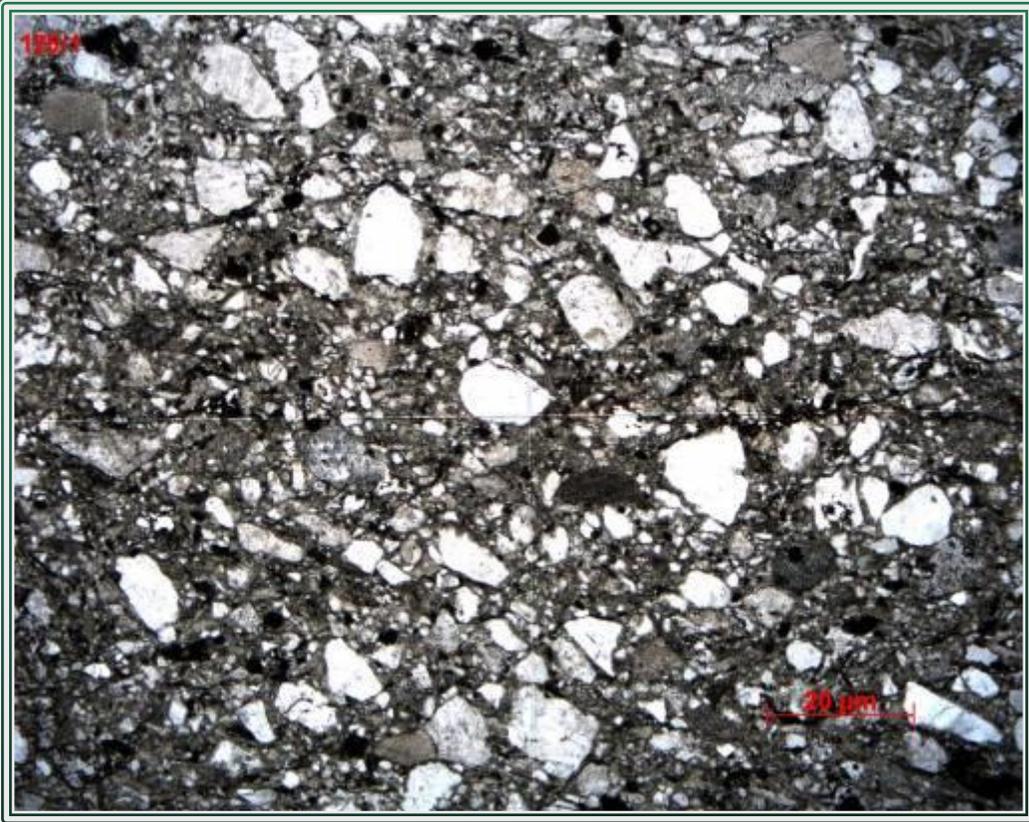


*(Рис. и фото В.Г. Талицкого)*



Примеры кливажа в обломочных породах Большого Кавказа. *Фото В. Быстровой*

# Кливаж зернистых пород развивается только в неоднородной среде



Это изотропная среда с первичными случайными неоднородностями микроскопического уровня – уровня зерен

Песчаник - состоит из обломочных зерен (преимущественно кварцевых) и тонкозернистого матрикса.

# Механизм образования межзернового кливажа

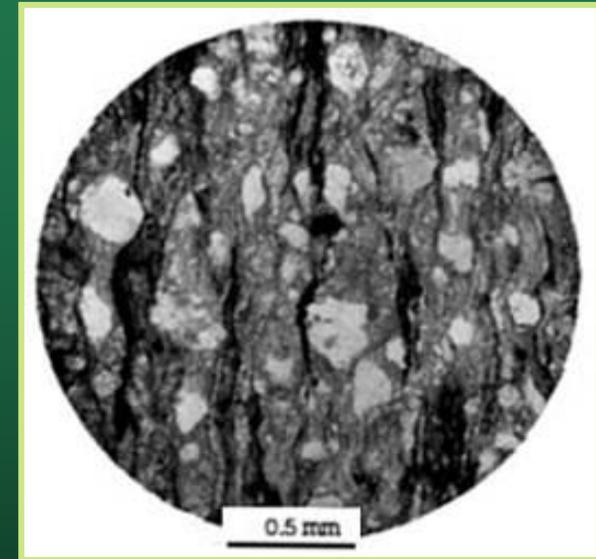
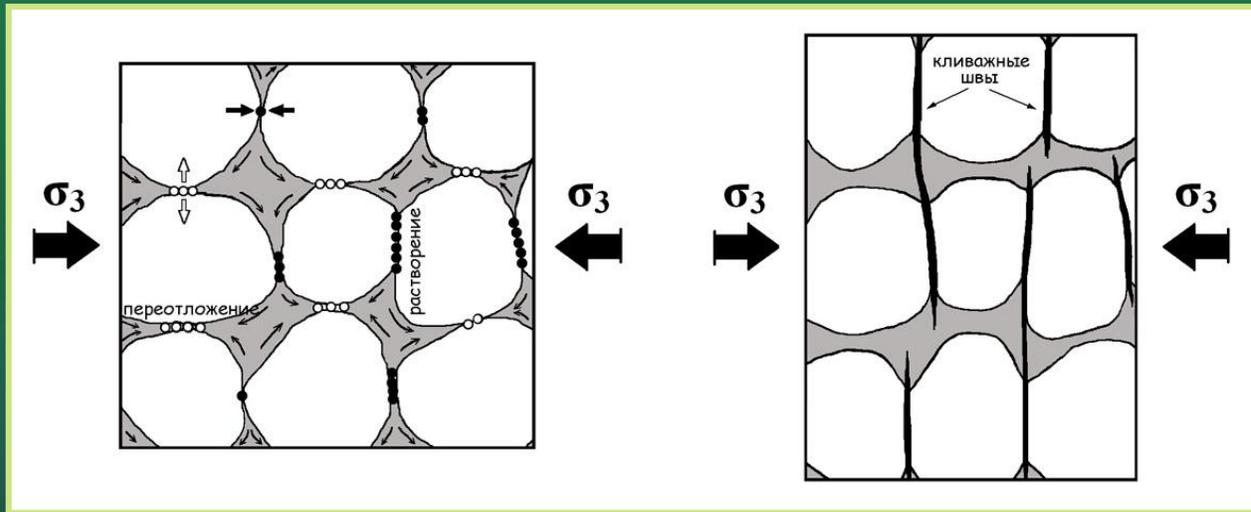
**Необходимо учесть следующие обстоятельства:**

- ▶ Кливаж формируется в резко неоднородной среде
- ▶ Кливажные швы приурочены к границам неоднородностей
- ▶ Поверхности кливажа перпендикулярны оси максимального укорочения
- ▶ Кливажные швы обеднены легкорастворимыми минералами (кварц и кальцит) и обогащены нерастворимыми
- ▶ Во время деформации породы насыщены флюидной фазой

Из этого следует

## Механизм формирования кливажа

При деформации неоднородной среды, состоящей из частиц с разными свойствами, происходит избирательное растворение минералов на участках максимальной концентрации сжатия (механизм компрессионной ползучести).

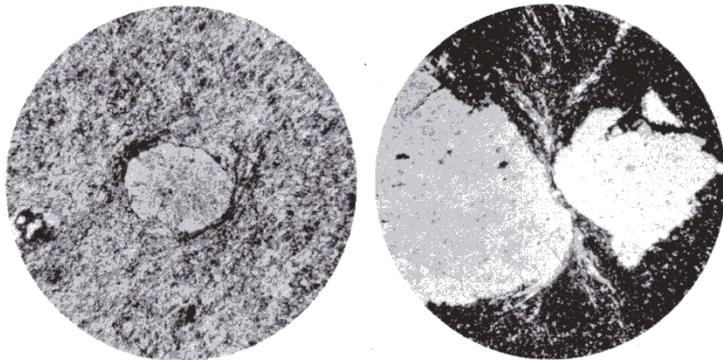


Одновременно осуществляется вынос растворенного вещества и его переотложение.

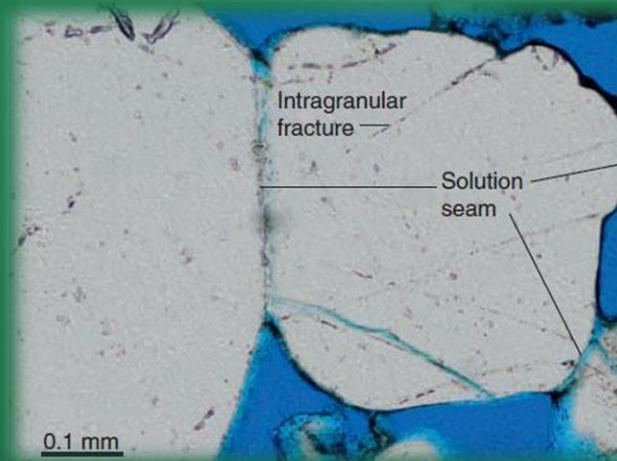
Формируются кливажные швы – ослабленные зоны, ориентированные по нормали к оси максимального сжатия и обогащенные нерастворимыми частицами.

Механизм  
формирования  
кливажа

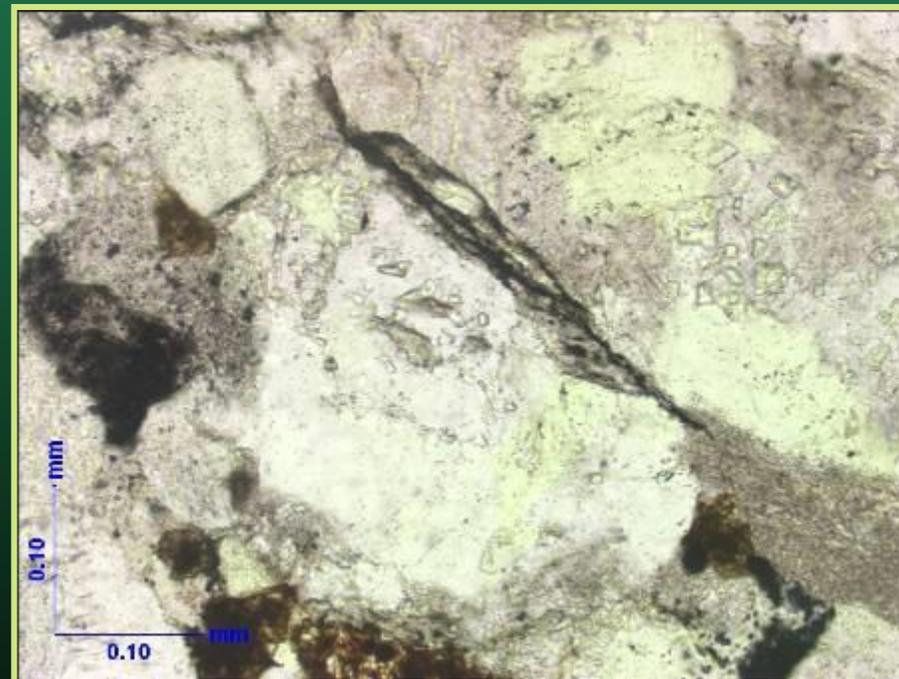
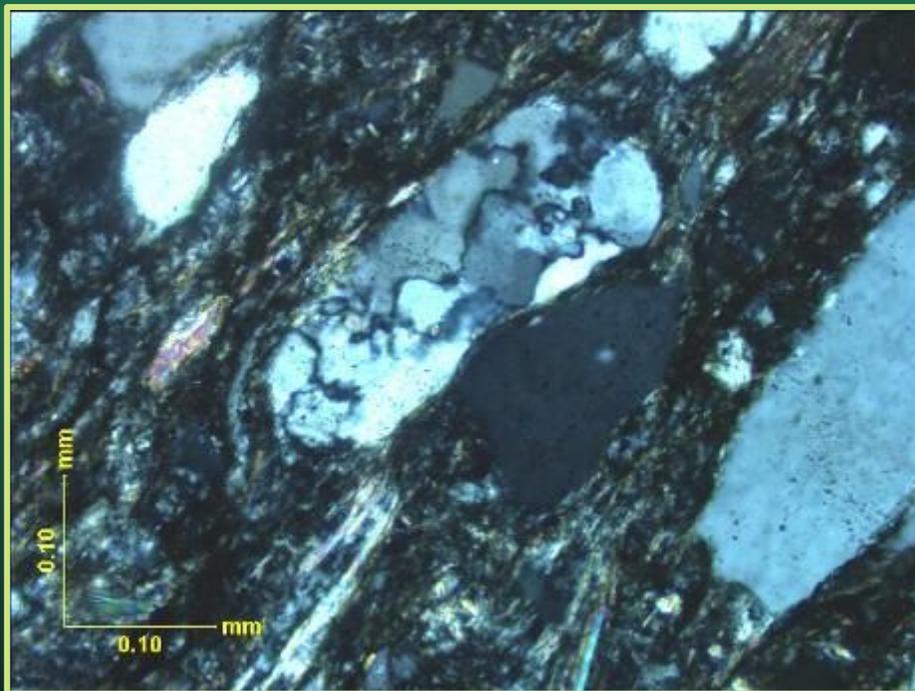
ЗАРОЖДЕНИЕ КЛИВАЖНЫХ ЗОН



*(По А.Б. Курмасову)*

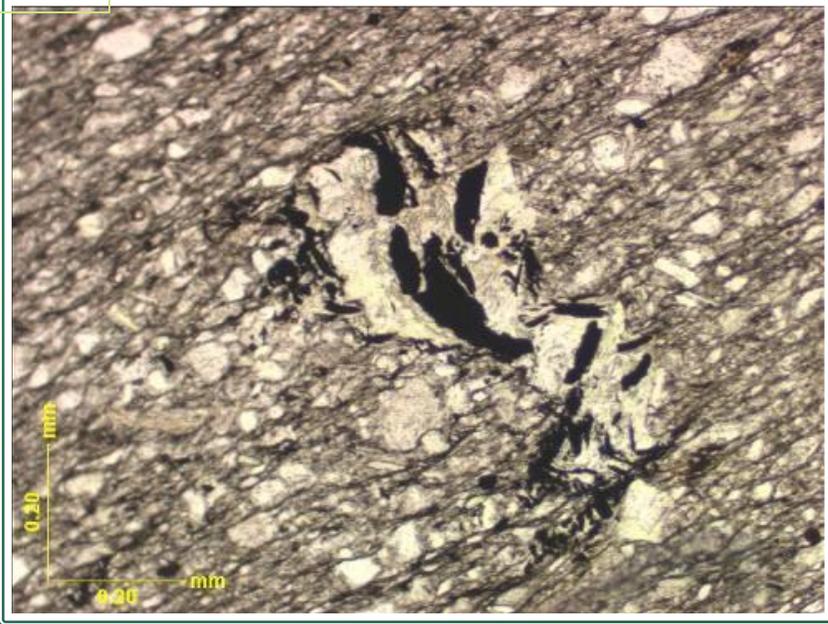


*(Fossen, 2011)*



Большой Кавказ, *Фото В. Быстровой*

Механизм  
формирования  
кливажа

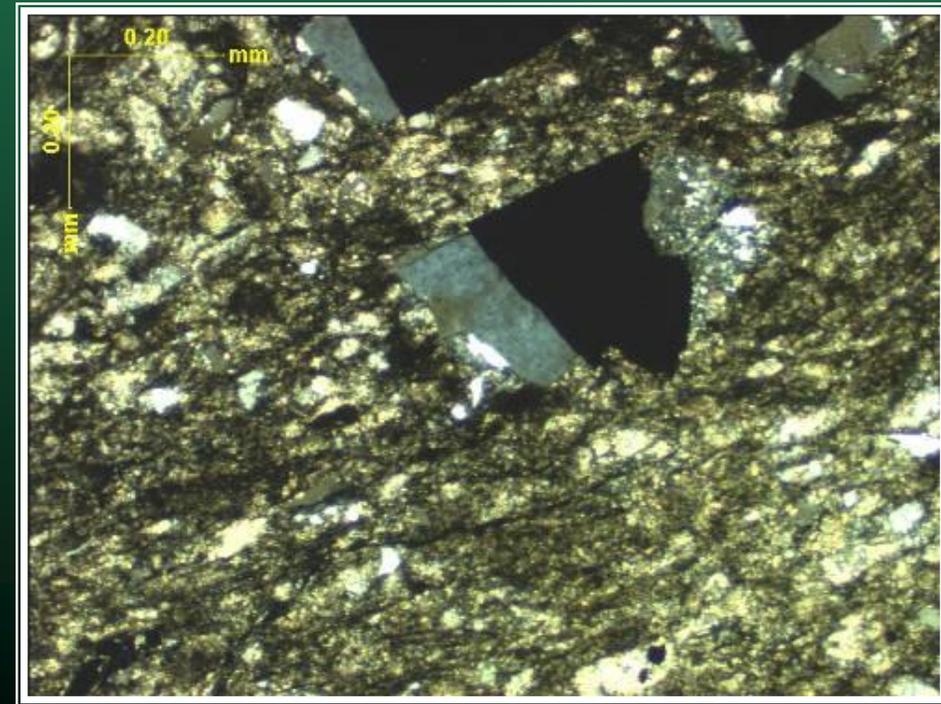


Куда девается вещество,  
вынесенное из швов?



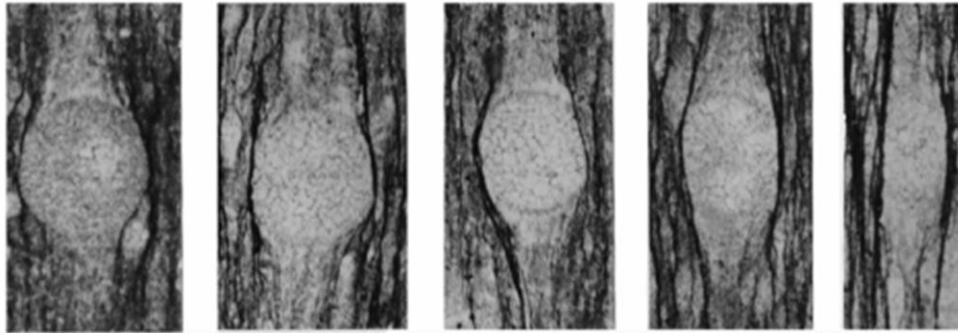
Растворенное вещество переотлагается  
в тыльных частях растворяющихся зерен  
и включений или выносится флюидом  
на более далекое расстояние

В данном случае кварц откладывается  
в тенях давления жестких зерен пирита  
Большой Кавказ. *Фото В. Быстровой*



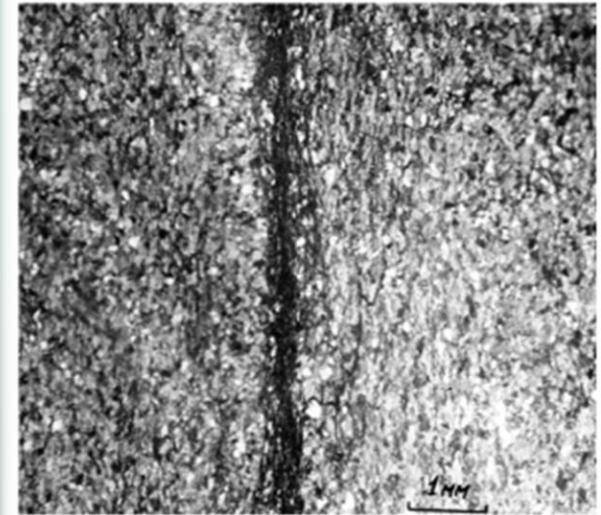
**Механизм  
формирования  
кливажа**

► Особенно хорошо растворение под давлением видно, если в породе присутствуют растворимые включения, такие как оолиты или остатки фауны

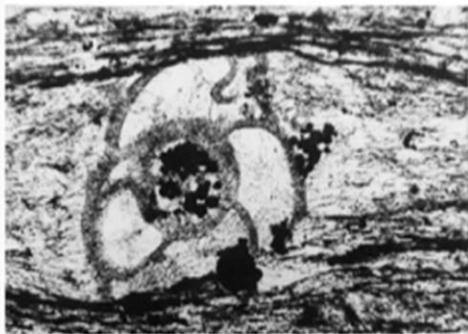


*(no Ramsay,  
Huber)*

Различные стадии растворения оолитов при формировании кливажа в известняках. Кальцит переотлагается в тыльных частях оолитов



Результат растворения под давлением: крупный кливажный шов. Из него вынесены светлые минералы, а остались нерастворимые темные



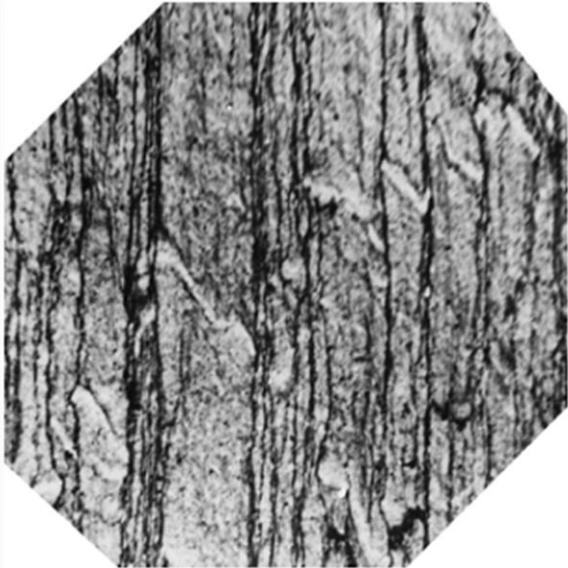
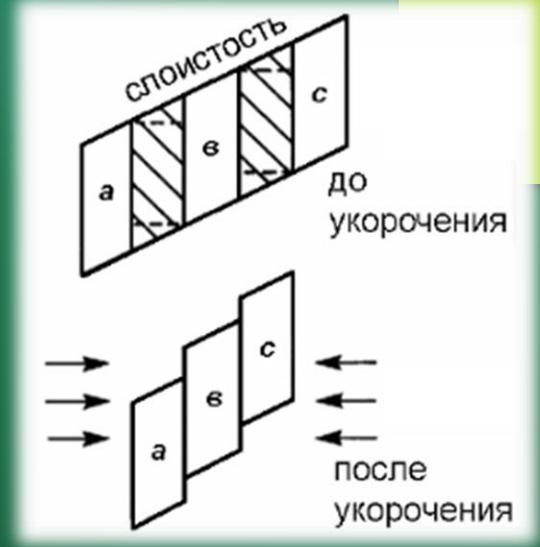
*(no Ramsay,  
Huber)*

Частичное растворение органического остатка

# Эффект ложных смещений

- ▶ При формировании кливажа происходит укорочение деформируемого тела в направлении максимального сжатия.

Это может создавать эффект ложных смещений

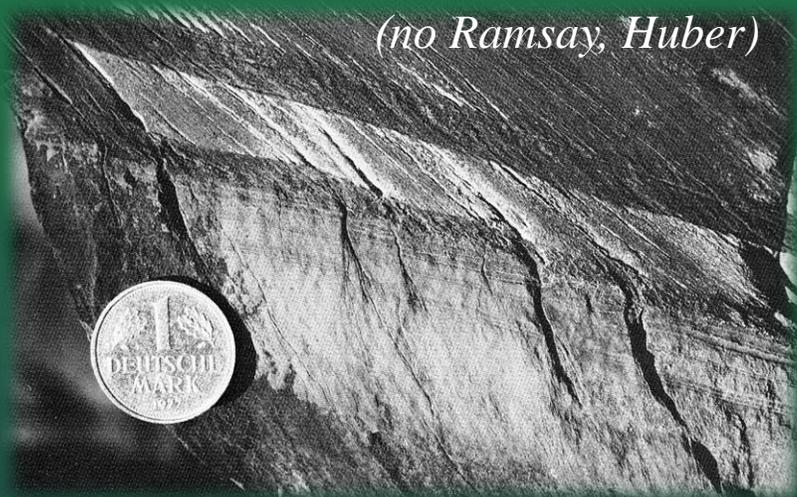


Отсюда возникло представление о складках скальвания

Складок скальвания существовать не может

# Условия и время образования кливажа

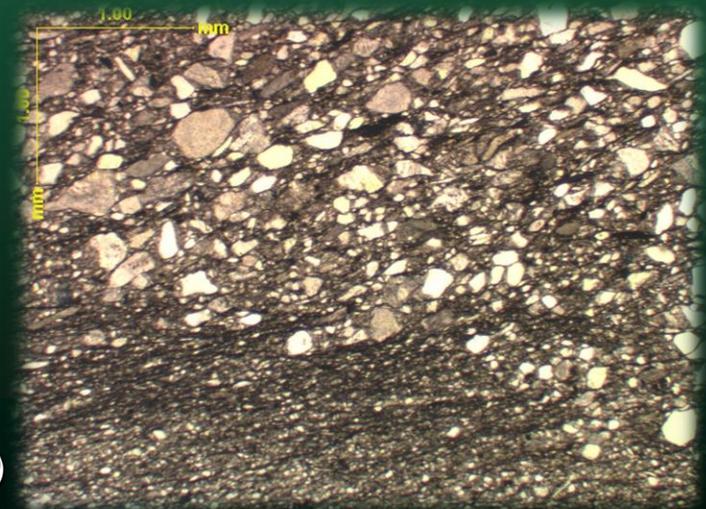
- ▶ Избирательное проявление кливажа в слоях



При увеличении степени преобразования пород (катагенез, метагенез, начальный метаморфизм) кливаж развивается во все новых и новых разностях пород:

- глинистые породы
- алевритовые породы
- мелкозернистые песчаники
- крупнозернистые песчаники
- известняки

Причина – кливаж появляется только при достижении определенной деформации укорочения внутри слоя.



*(фото В. Быстровой)*

Если кливаж развит во всех  
слоях, то он преломляется  
на границах слоев  
разного состава



Терригенные породы. Чукотка. Фото И.А. Войцика

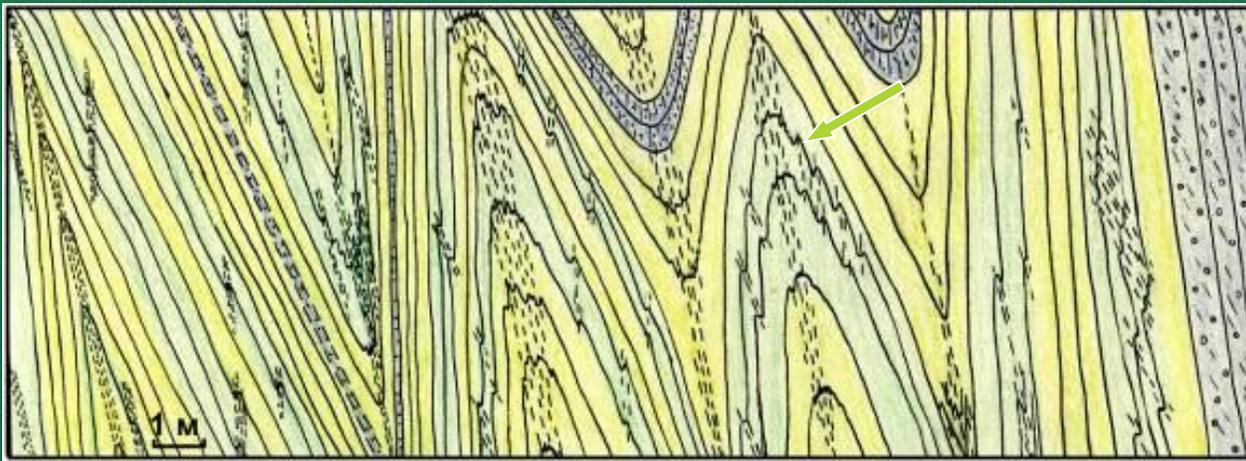
Кливаж в складках может быть развит повсеместно  
или локально – лишь в их замках

## «Сплошной» кливаж



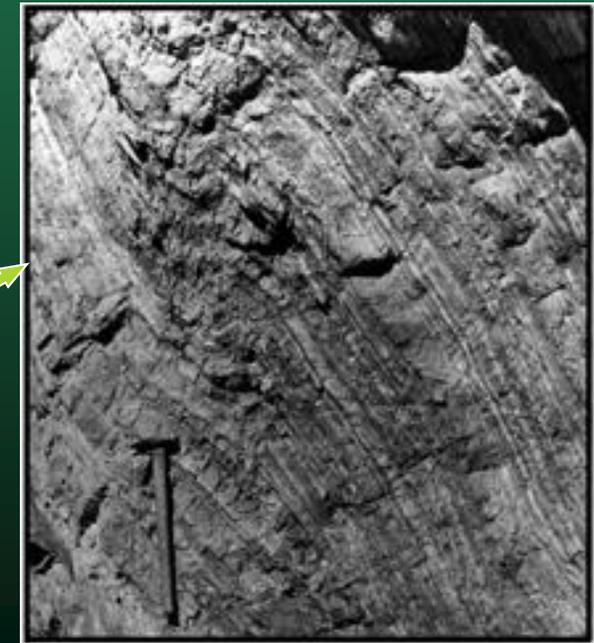
Кливаж развит в замках и на крыльях складок

# Избирательное проявление кливажа в складчатой структуре



Развитие кливажа вдоль осевых поверхностей складок

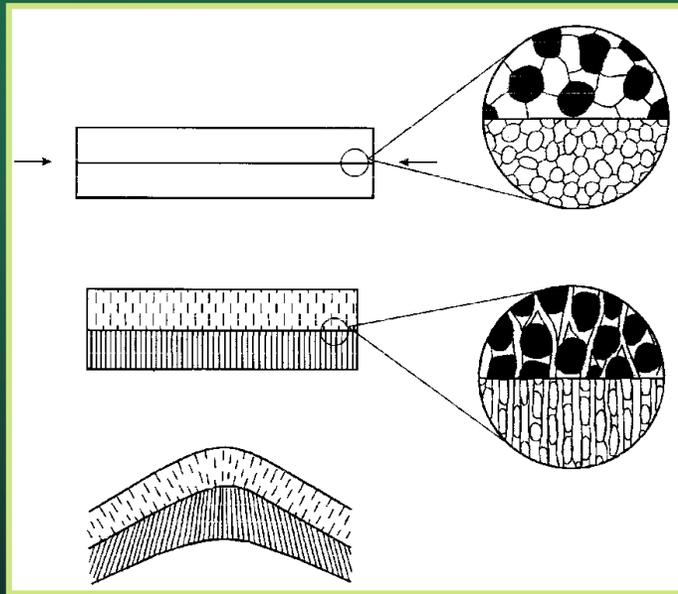
Развитие кливажа в зонах утолщенных крыльев набегающих складок



Избирательное проявление кливажа связано с тем, что он начинает развиваться лишь при достижении определенной величины укорочения в слоях

## Формирование кливажа – способ укорочения слоистой толщи на первой стадии складкообразования, когда слои лежат еще горизонтально

- Среда, содержащая первичные случайные неоднородности зернового уровня, в результате деформации преобразуется в среду со вторичными структурно-вещественными неоднородностями, носящими уже регулярный характер.
- При продолжении деформации слоистая толща теряет устойчивость и вязкие слои начинают изгибаться в складки



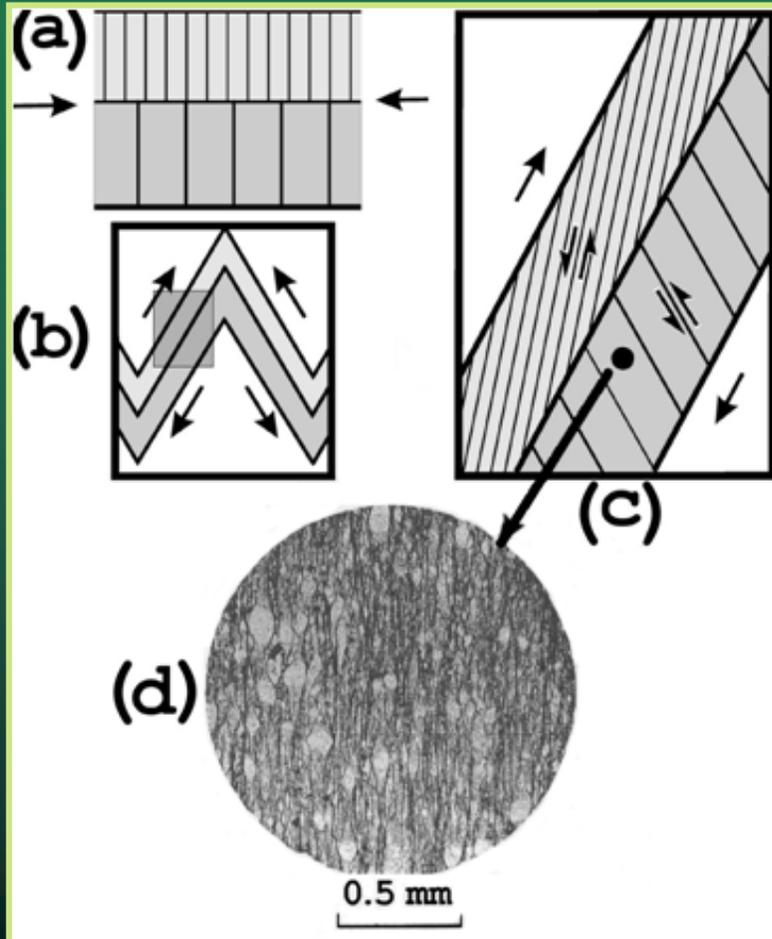
← Слоистая неоднородная среда до деформации

← В слоях возникает система ослабленных поверхностей, что и определяет характер дальнейшей деформации на стадии изгиба

← Изгиб кливажированных слоев в складку

При изгибе слоев кливаж разворачивается в веер – прямой в вязких слоях и обратный в маловязких слоях. Таким образом кливаж в разных слоях преломляется

На второй стадии складкообразования, при изгибании слоев в складки, могут происходить уже реальные, а не кажущиеся, смещения вдоль поверхностей кливажа



(а) Первая стадия складкообразования. Слои лежат горизонтально. Происходит укорочение, сосредоточенное в формирующихся кливажных швах

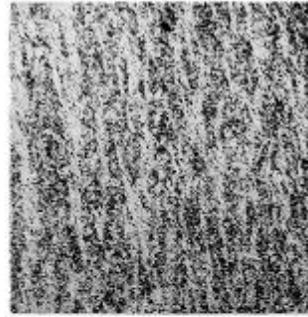
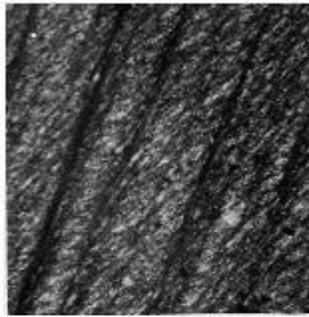
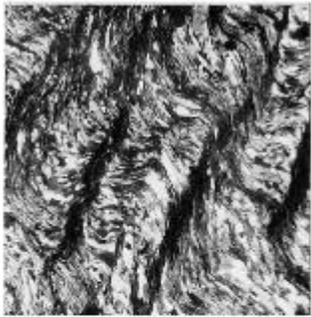
(б) На второй стадии складкообразования (стадии изгиба) на крыльях складок возникает механическая обстановка простого сдвига

(с) Одновременно микролитоны, разделенные ослабленными зонами – кливажными швами – также скользят друг относительно друга.

# Выводы

- ▶ Кливажные швы – зоны резкой концентрации деформации укорочения. Они ориентированы перпендикулярно максимальной оси этой деформации
- ▶ Формирование таких зон обусловлено грубой неоднородностью геологической среды на микроскопическом уровне – уровне зерен
- ▶ Механизмом деформации служит компрессионная ползучесть, или растворение под давлением, или мокрая ползучесть
- ▶ При укорочении формируются ослабленные зоны (кливажные швы) и происходит сближение их стенок
- ▶ Только при относительном изменении ориентировки оси максимального укорочения могут происходить смещения вдоль ослабленных зон ( кливажных швов)

# Кливаж плойчатости



Кливаж плейчатости. Сланцы из разных складчатых областей. Николи II.  
а - кливаж связан с плейчатостью; б - кливаж развивается по смыкающим крыльям микрофлексур;  
в - кливаж образует микроскопические кинк-зоны. Во всех случаях кливаж плейчатости развивается по ранним микротекстурам, реликты которых отчетливо видны в микролитонах.



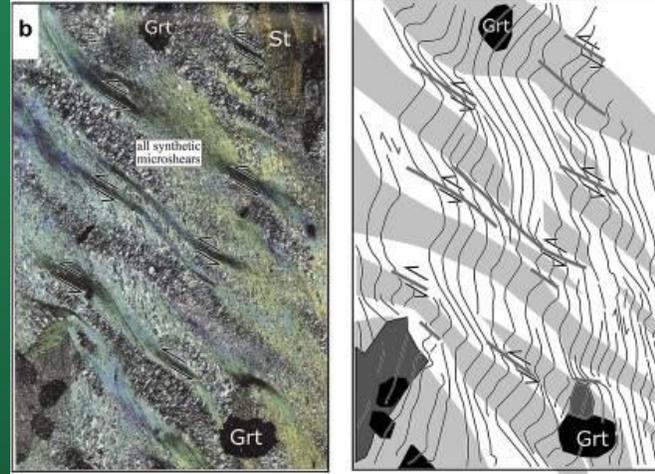
Кливажная зона кливажа плейчатости. Слюдяной сланец. Увеличение 40. Николи +.  
Чешуйки слюды, слагающие кливажную зону, ориентированы под острым углом к ориентировке зоны.

Все фото В.Г. Талицкого

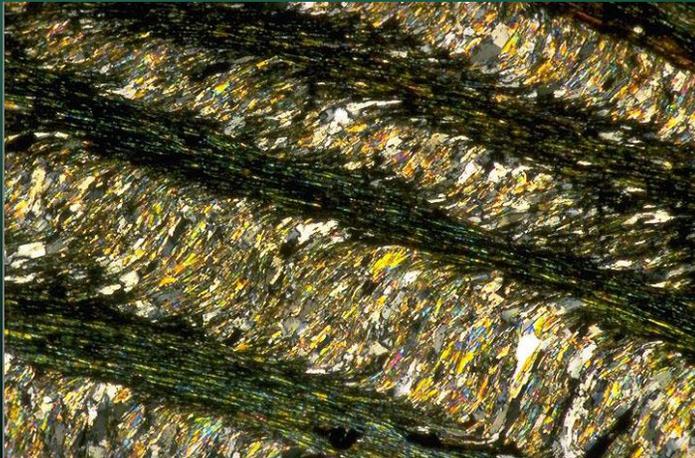
**Кливаж плейчатости** – плоскостная микротекстура, выраженная плоскопараллельным расположением в породе зон, сформированных крыльями микроскладок или смыкающими крыльями микрофлексур, в которые смята ранняя плоскостная микротекстура.

Основные (базовые) элементы – микролитоны, разделенные нитевидными кливажными зонами

# Кливаж плейчатости в различных сланцах



Сланцы, Нью Мехико (*Vernon, 2004*)



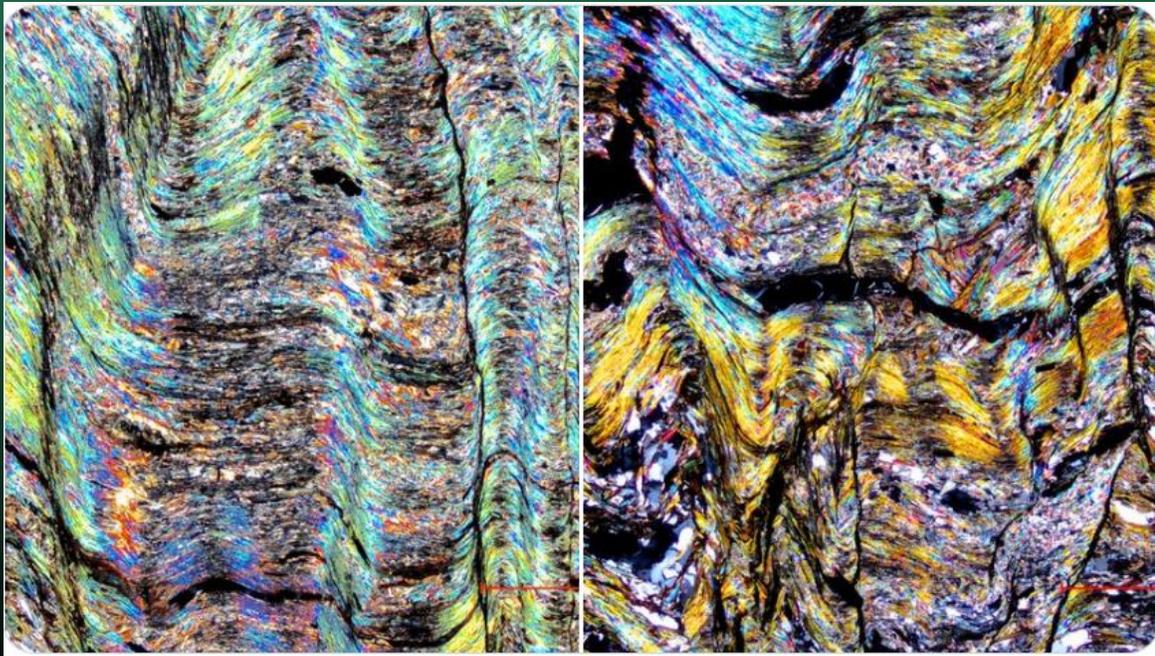
(*Passchier, Trouw, 1998*)

Еще примеры кливажа  
плойчатости в сланцах



*Фотом Alex Strekeisen*

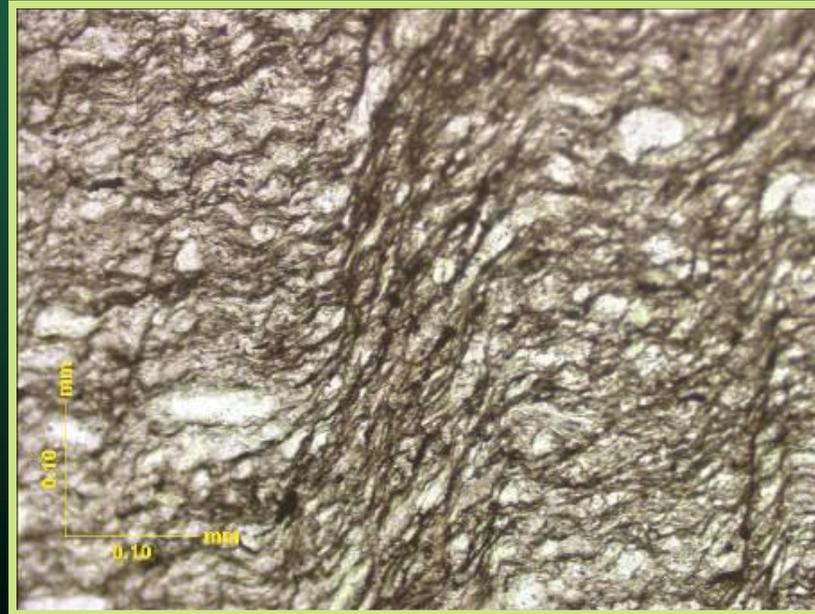
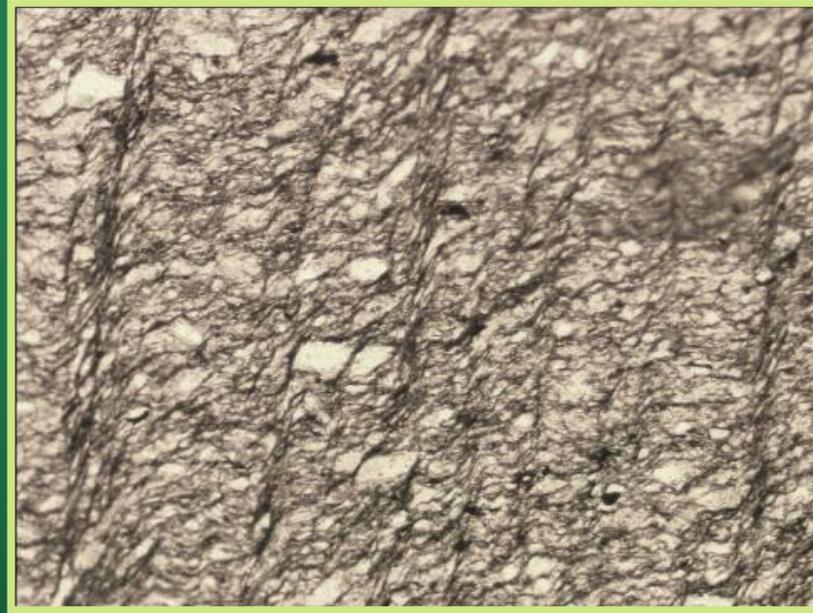
<https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/slate.php>



*Фотом Johannes Jakob*

<https://twitter.com/jojakgeo/status/784015088487428096>

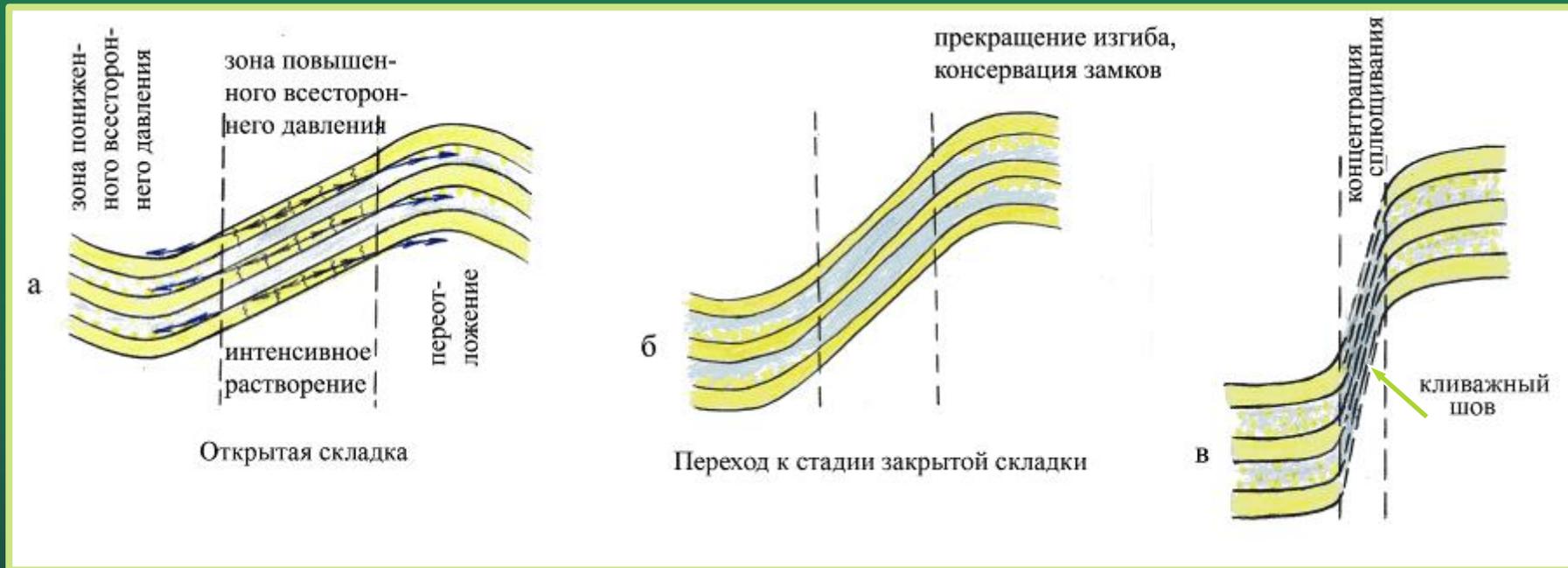
Кливаж плейчатоности,  
образовавшийся по  
межзерновому кливажу



Большой Кавказ. *Фото В. Быстровой*



# Механизм образования кливажа плойчатости



При формировании кливажа плойчатости главную роль играют микронеоднородности среды, но не первичные, как в случае межзернового кливажа, а вторичные, созданные на предшествующем этапе деформации.

**Кливаж плойчатости важен для понимания истории развития деформационного процесса.**

