

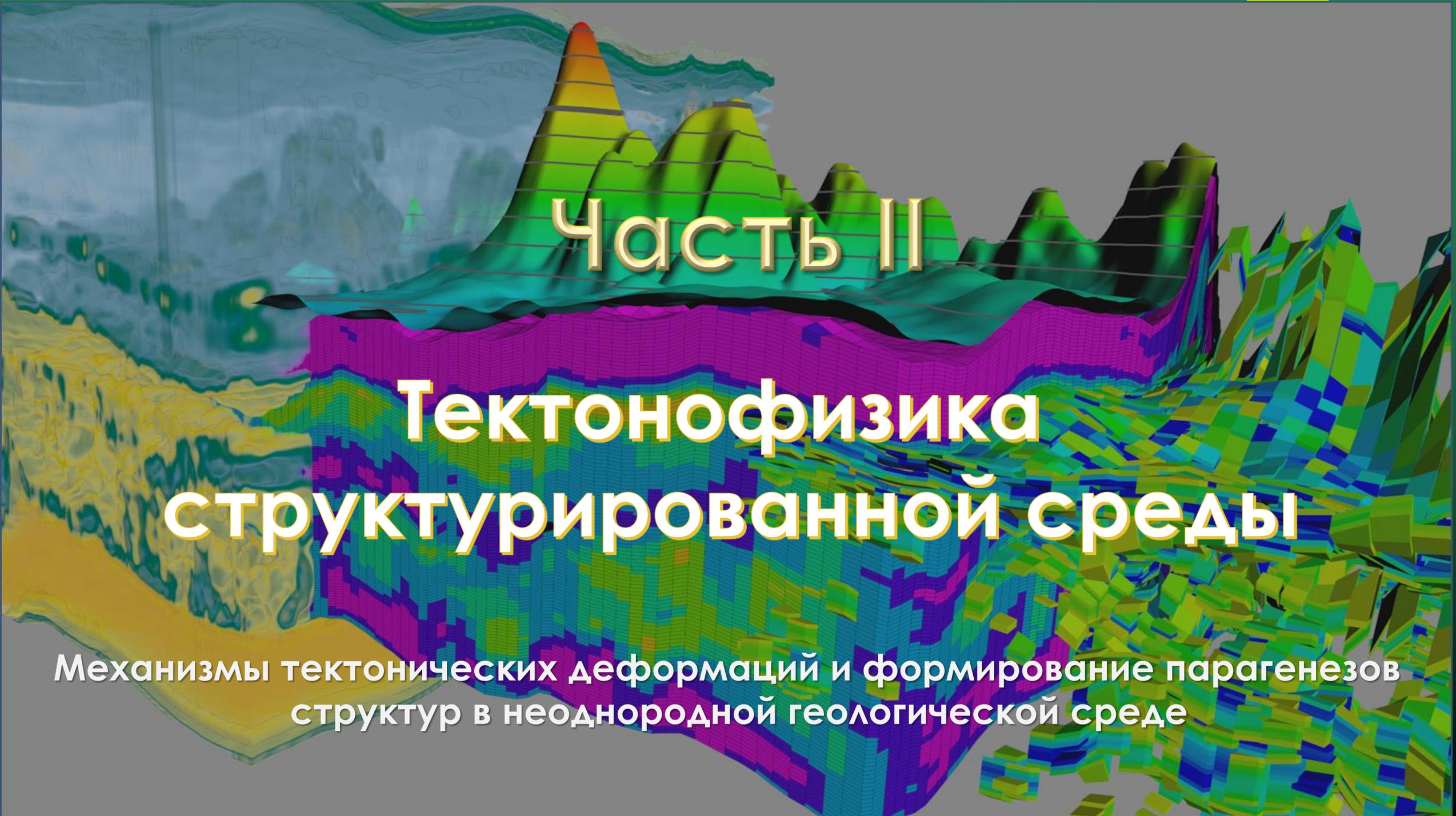


Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 9
Лекция 11

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 11

СТРУКТУРЫ И ТЕКСТУРЫ ВНУТРИСЛОЕВОГО УРОВНЯ:

КЛИВАЖ ПЛОЙЧАТОСТИ

СТИЛОЛИТЫ

ПОЛОСЧАТОСТЬ

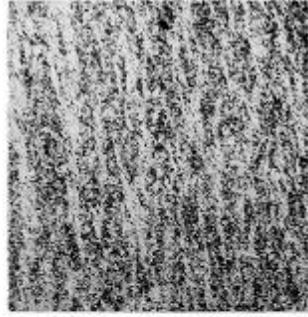
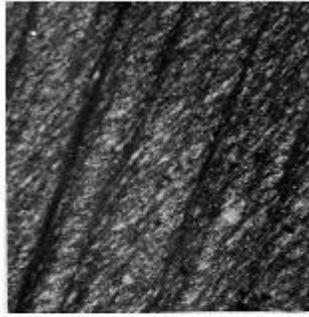
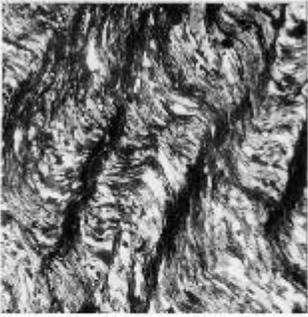
ЛИНЕЙНОСТЬ

СТРУКТУРЫ ТЫЛЬНЫХ ЧАСТЕЙ ЗЕРЕН И ВКЛЮЧЕНИЙ

МАКРОКЛИВАЖ



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.



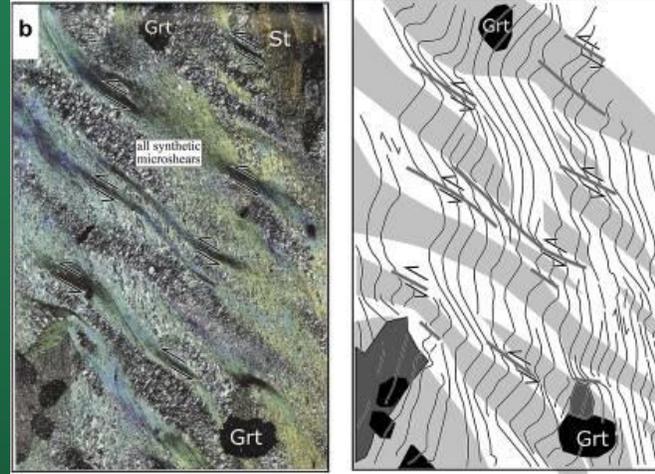
Кливажная зона кливажа плейчатости. Слюдяной сланец. Увеличение 40. Николи +.
Чешуйки слюды, слагающие кливажную зону, ориентированы под острым углом к ориентировке зоны.

Все фото В.Г. Талицкого

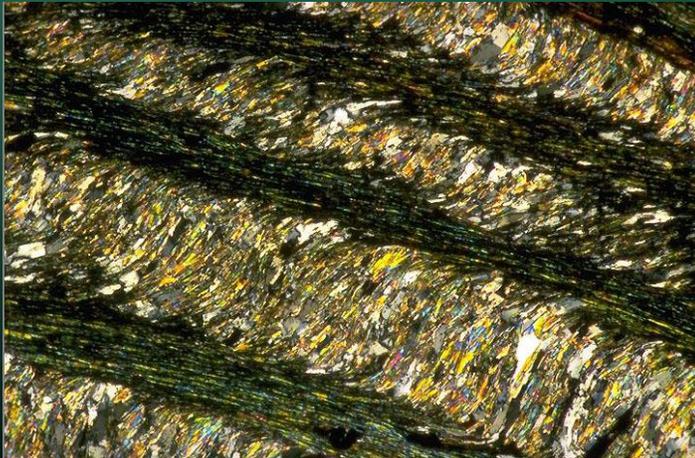
Кливаж плейчатости – плоскостная микротекстура, выраженная плоскопараллельным расположением в породе зон, сформированных крыльями микроскладок или смыкающимися крыльями микрофлексур, в которые смята ранняя плоскостная микротекстура.

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



Фото Alex Strekeisen

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

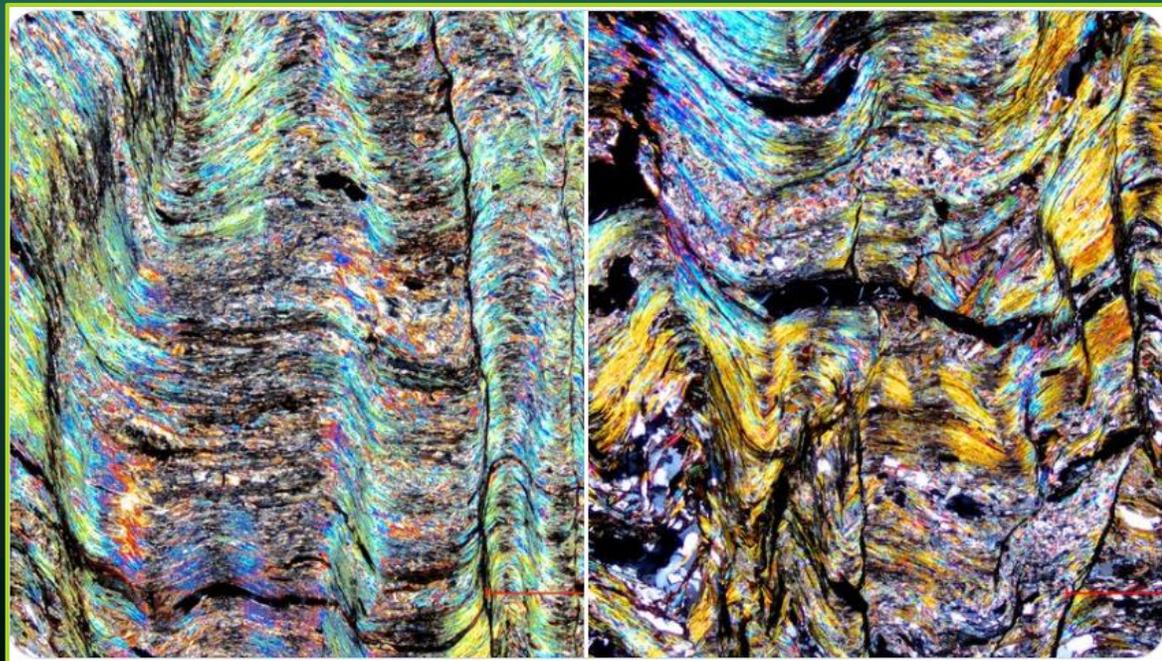
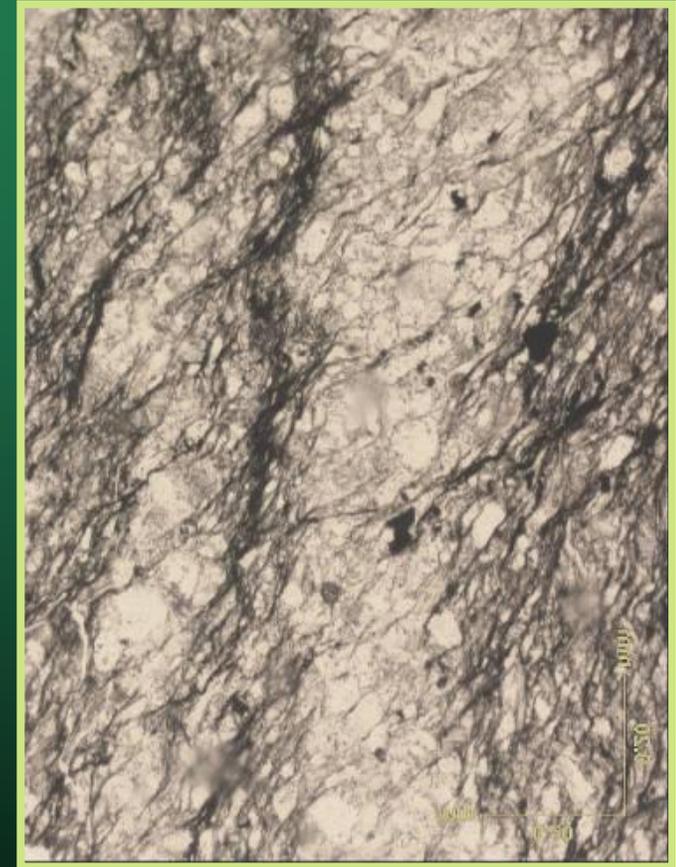
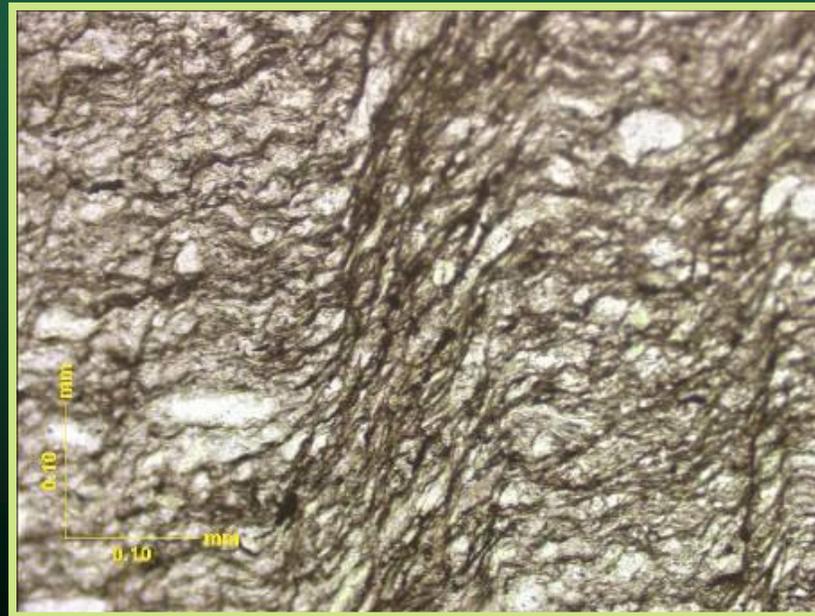
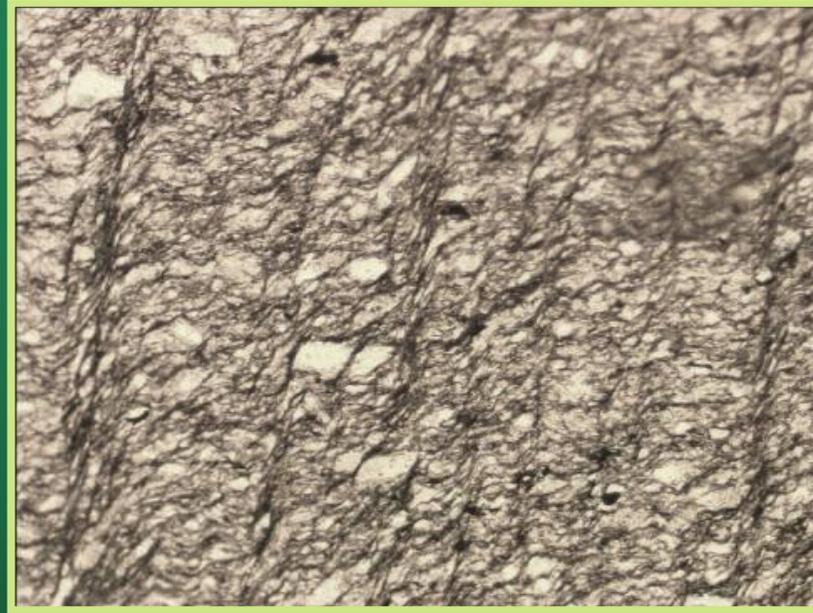


Фото Johannes Jakob

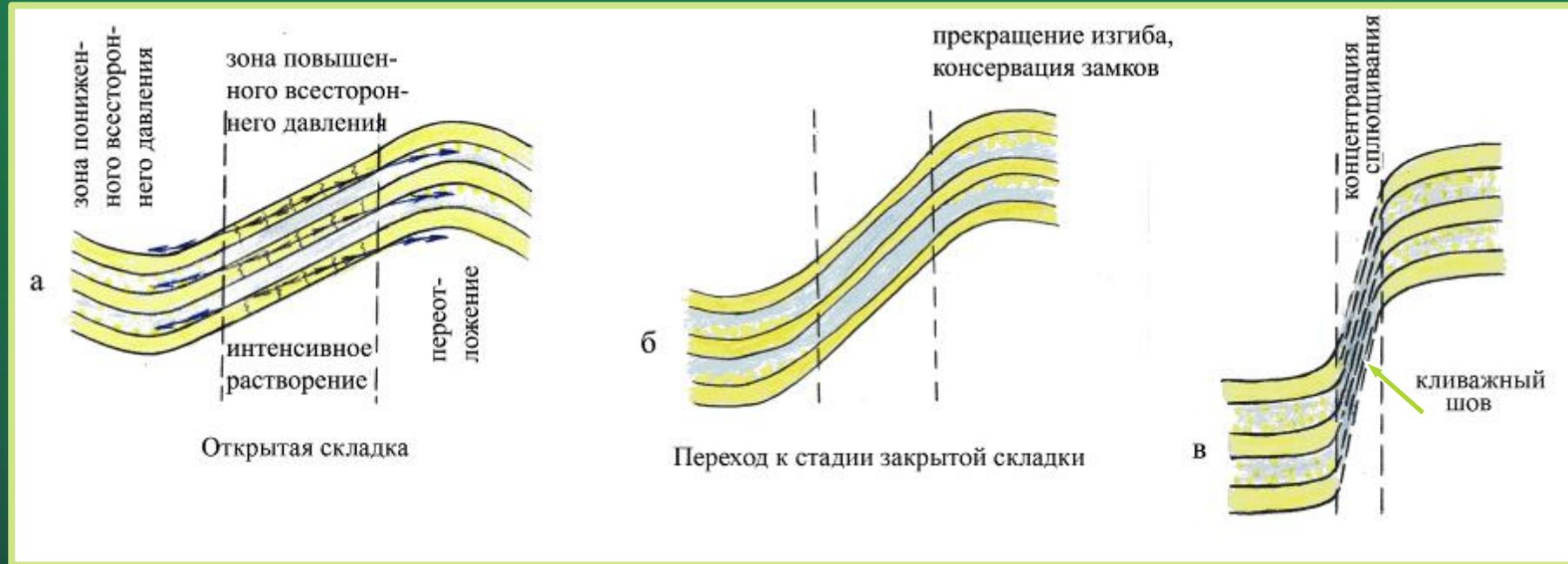
<https://twitter.com/jojakgeo/status/784015088487428096>

Кливаж плейчатости,
образовавшийся по
межзерновому кливажу



Большой Кавказ. *Фото В. Быстровой*

Механизм образования кливажа плейчатости



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

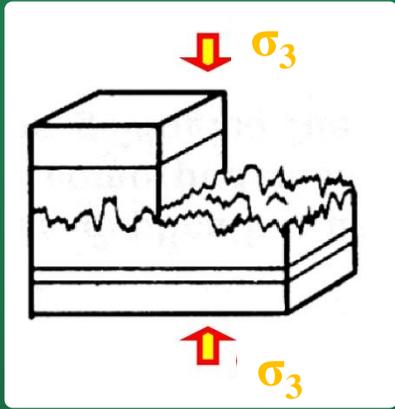
Кливаж плейчатости важен для понимания истории развития деформации

СТИЛОЛИТЫ



СТИЛОЛИТЫ – это сильно извилистые, часто зазубренные зоны, выполненные глинисто-углистым, реже рудным веществом. Они имеют вид криволинейных темных полос и их часто называют стилолитовыми швами. Эти швы, так же, как кливажные, формируются в результате растворения под давлением

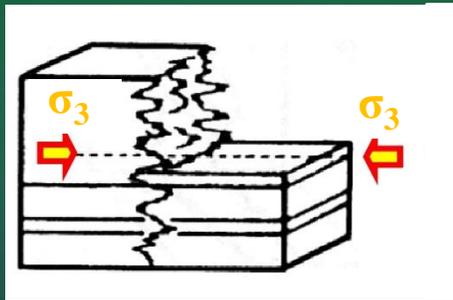
а



Стилолиты формируются при постдиагенетическом уплотнении пород (а) или при тектонических деформациях (б). Стилолитовые швы перпендикулярны оси максимального укорочения

Породы - тоннокристаллические карбонатные
Мощность швов - $n * 0,1$ мм

б



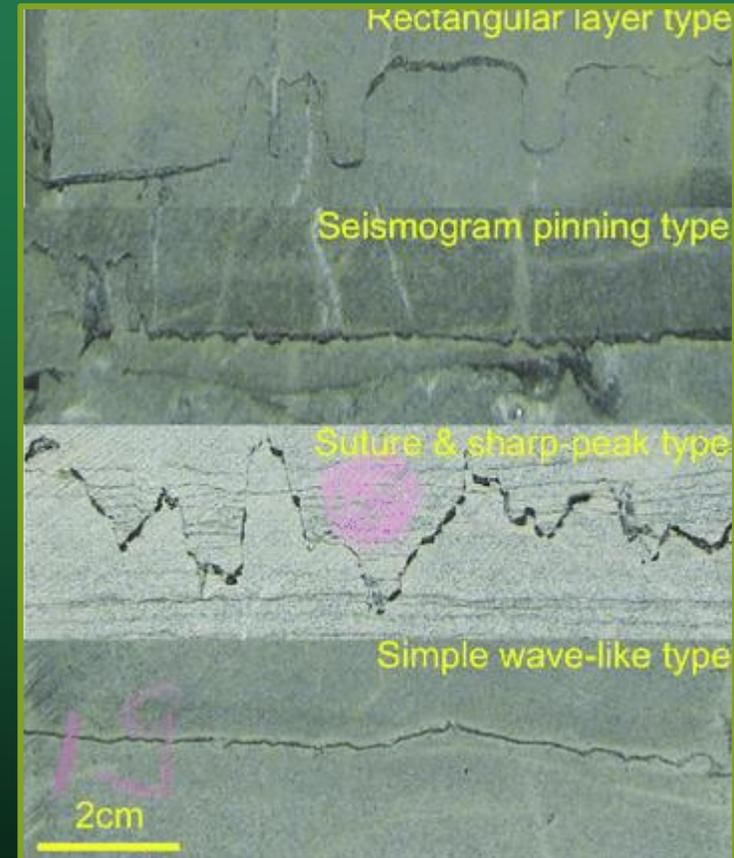
Тектонические стилолиты в известняках. Шов имеет коробчато-волнообразную форму



Тектонические стилолиты в зоне сдвига перпендикулярны оси максимального Сжатия (по Ramsay, Huber)

<http://homepage.ufp.pt/biblioteca/Sequential%20Stratigraphy/Pages/PageS2.html>

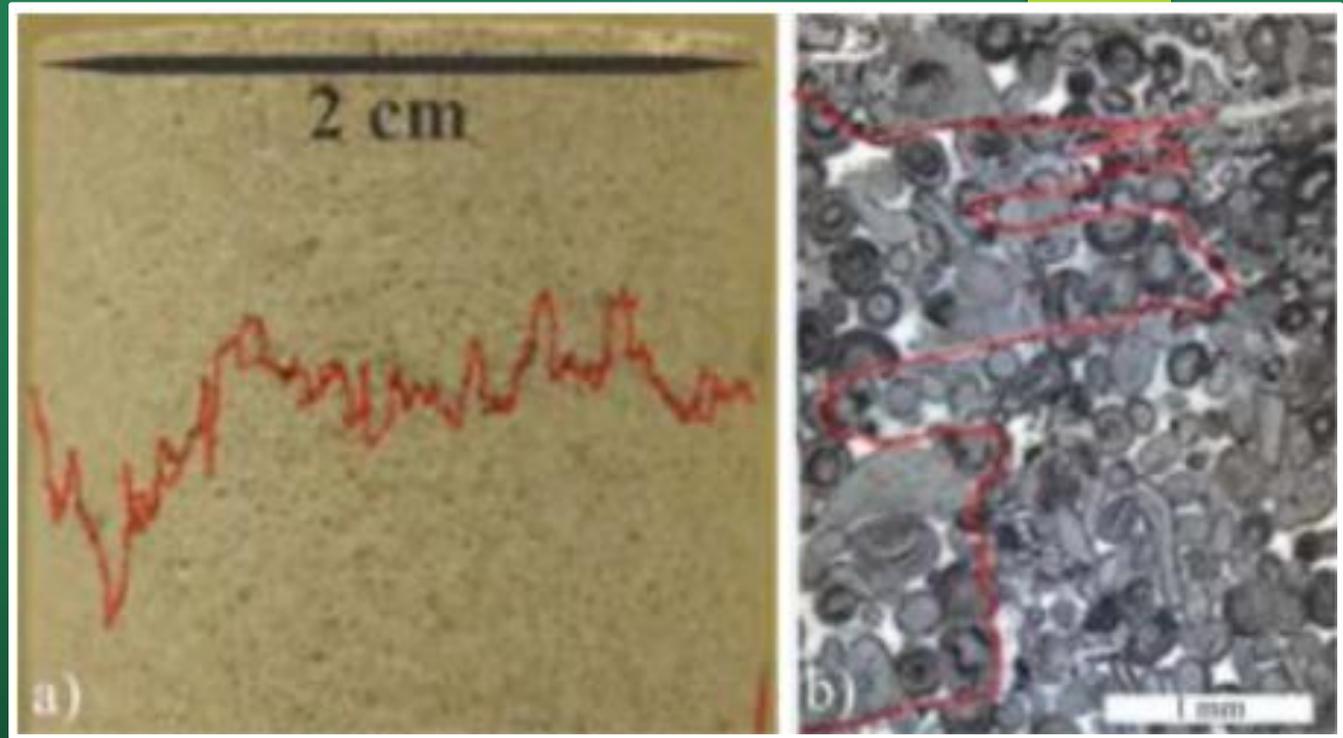
Морфологические ТИПЫ СТИЛОЛИТОВ



(Humphrey et al, 2019)

СТИЛОЛИТЫ ПОД МИКРОСКОПОМ

Стилолит в оолитовом известняке, по Роллану (2013). Красная линия подчеркивает стилолиты. а) Стилолиты в образце. б) Оптическое микроскопическое наблюдение. Стилолит удалил часть оолитов путем растворения. Остальная часть оолитов срезается зубьями стилолита.



Сканирующая электронная микроскопия. Зрелые тектонические стилолиты в мелкозернистых юрских известняках. Значительное изменение толщины остаточного слоя глины (*no Ebner et al., 2010*)

Формирование стилолитов

Зарождение стилолитов происходит на границах неоднородностей:

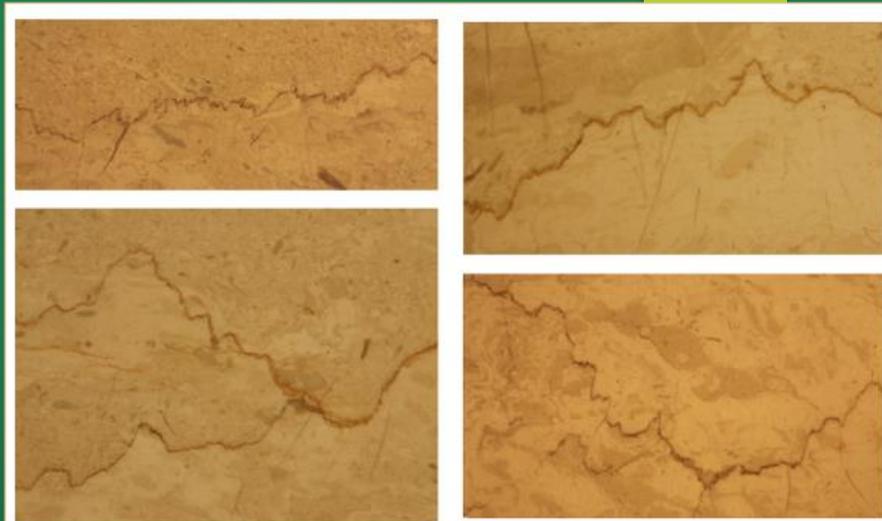
- Зернового уровня
- Ранние трещинки
- Границы слойков
- Уровня агрегатов зерен
(сингенетичные карбонатные брекчии)

Состав швов, ориентировка перпендикулярно оси максимального укорочения и приуроченность к границам неоднородностей (места концентрации напряжений) свидетельствуют о том, что стилолиты являются структурой растворения под давлением

Стилолиты – непроникающая текстура

Растворение под давлением на границах оолитов

Стилолиты указывают на ориентировку локальной оси укорочения в данном микрообъеме породы.

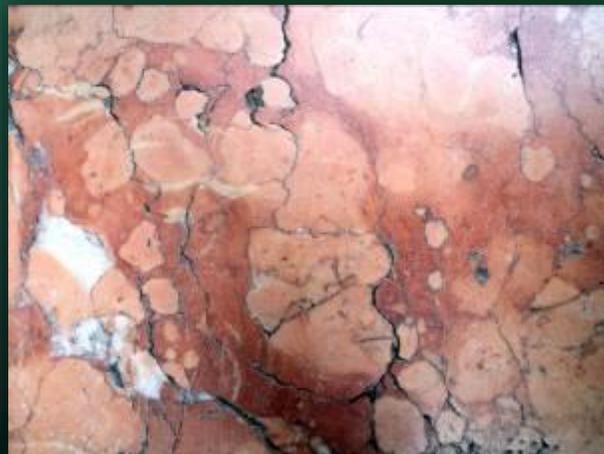


Темные извилистые стилолитовые швы в мраморовидных известняках. Хорошо видно, что швы приурочены к границам неоднородностей разного размера



<https://www.geological-digressions.com/tag/stylonites-stylonitization/>

Пример развития стилолитовых швов в мраморовидных брекчиевидных известняках

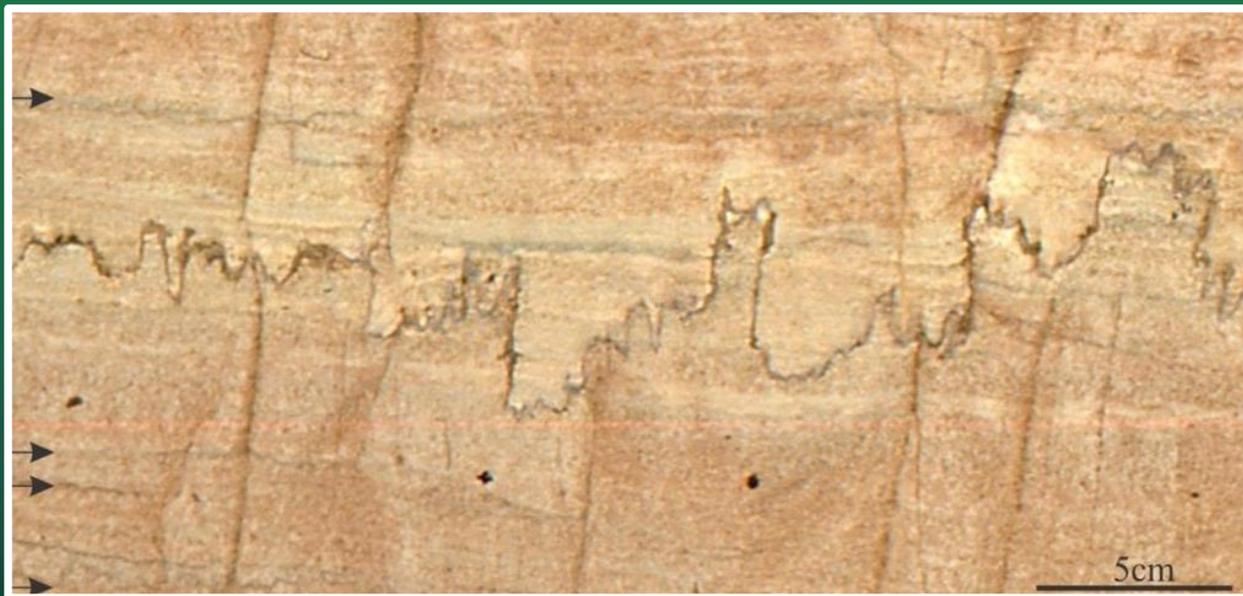


Стилолитовые швы в разных ракурсах в карбонатных породах (Испания, Пиренеи)



Фото Н.С. Фроловой

Примеры стилолитов



Стилолитовые швы в тонкозернистых доломитовых породах.
Палеопротерозой.
<https://www.geological-digressions.com/tag/stylolites-stylolitization/>

Стилолиты в обнажении палеогеновых известняков
и в образцах. Карачаево-Черкесская Республика,
[Скалистый хребет](#).
Фото [barsik](#). <https://ammonit.ru/text/283.htm>



Полосчатость

Фото Д.С. Зыкова



Фото Д.С. Зыкова

Полосчатость – это еще один тип плоскостных текстур. Она представляет собой чередование полос, обогащенных светлыми и темными минералами. Полосчатость часто сочетается со сланцеватостью (они параллельны друг другу). В общем случае полосчатость не параллельна слоистости. Полосчатость развита обычно в метаморфических породах средней, а чаще высокой степени метаморфизма (например, в гнейсах).

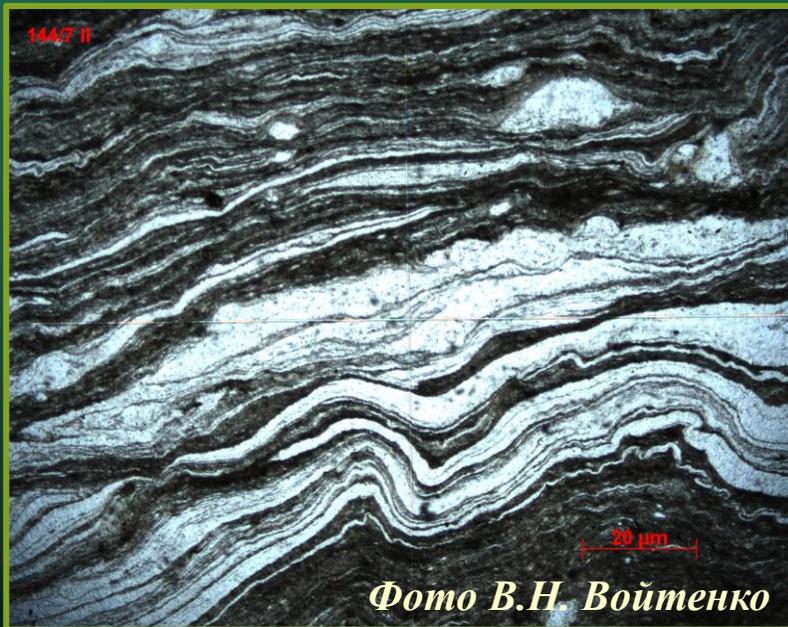


Фото В.Н. Войтенко

Микрополосчатость. Фото В. Н. Войтенко



*Фото В.А. Зайцева
Интернет-ресурс*

Полосчатость в гнейсах. Белое море

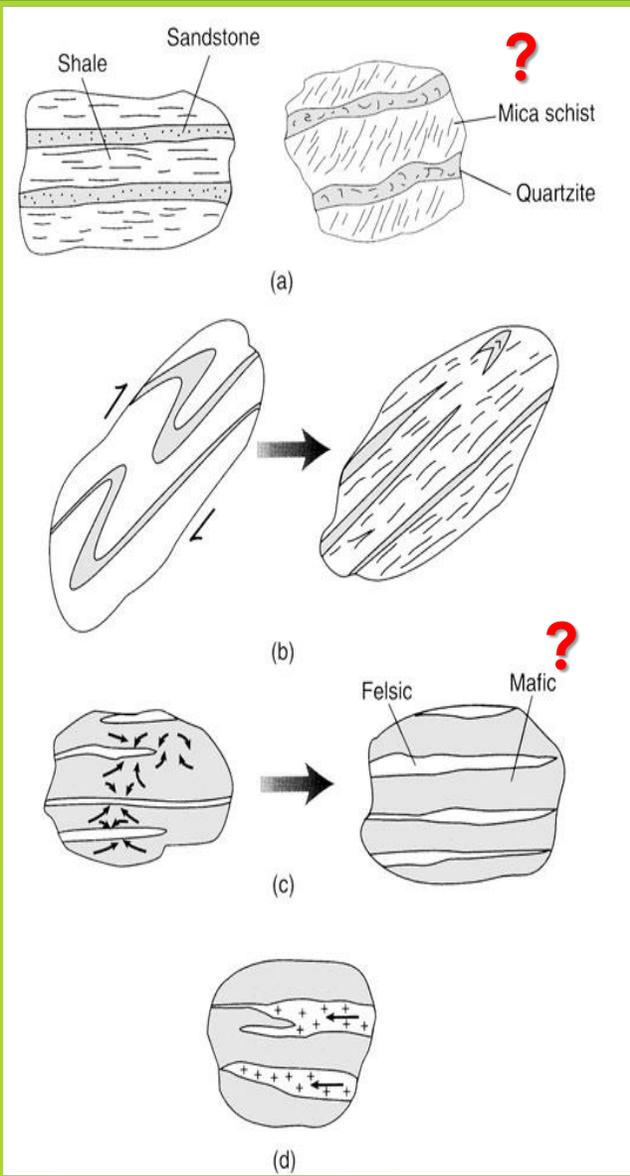


Фото И. Подгорного



Фото М.А. Романовской

Как может образоваться ПОЛОСЧАТОСТЬ



van der Pluijm, Marshak, 2004

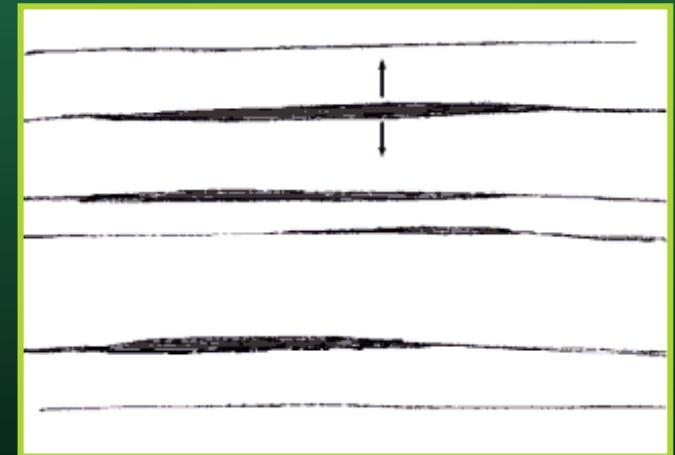
Механизмы формирования гнейсовидной ПОЛОСЧАТОСТИ:

- (a) наследование первичной слоистости;
- (b) складчатые и сдвиговые деформации большой величины;
- (c) метаморфическая дифференциация (?);
- (d) внедрение расплавленного материала;

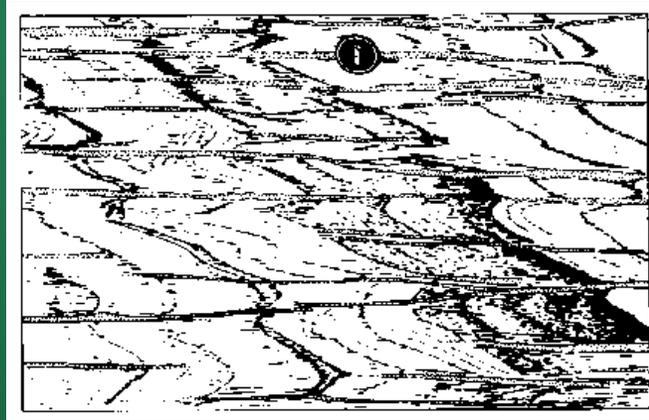
Итак, полосчатость формируется в результате деформации
Или наследует ранее образованную плоскостную текстуру.

Деформационная полосчатость (дополнение):

- ▶ Образуется при раздавливании крупных зерен или агрегатов зерен. Образуются тонкие вытянутые линзы
- ▶ В результате значительной деформации маловязких включений.
- ▶ В результате дифференциации или привноса материала в области пониженных давлений, параллельных ранним плоскостным текстурам (слоистости или сланцеватости). Это происходит, когда направление наибольшего укорочения образует с ранними плоскостными текстурами угол меньше 45°



Деформационная полосчатость
может формироваться
в результате привноса материала
в области пониженных давлений,
образованных в результате
деформации.



(по Николя)



www.earth.ox.ac.uk

Унаследованная полосчатость:

Наследование слоистости.

Наследование кливажа плейчатости



(по Николя)



Полосчатость в мраморах, Карелия

<http://s1.fotokto.ru/photo/full/574/5740964.jpg>



Полосчатость в гнейсах

Francesca Bell, 2019

<https://storymaps.arcgis.com/stories/086309c033cf4bd9a1632aa931162edc>

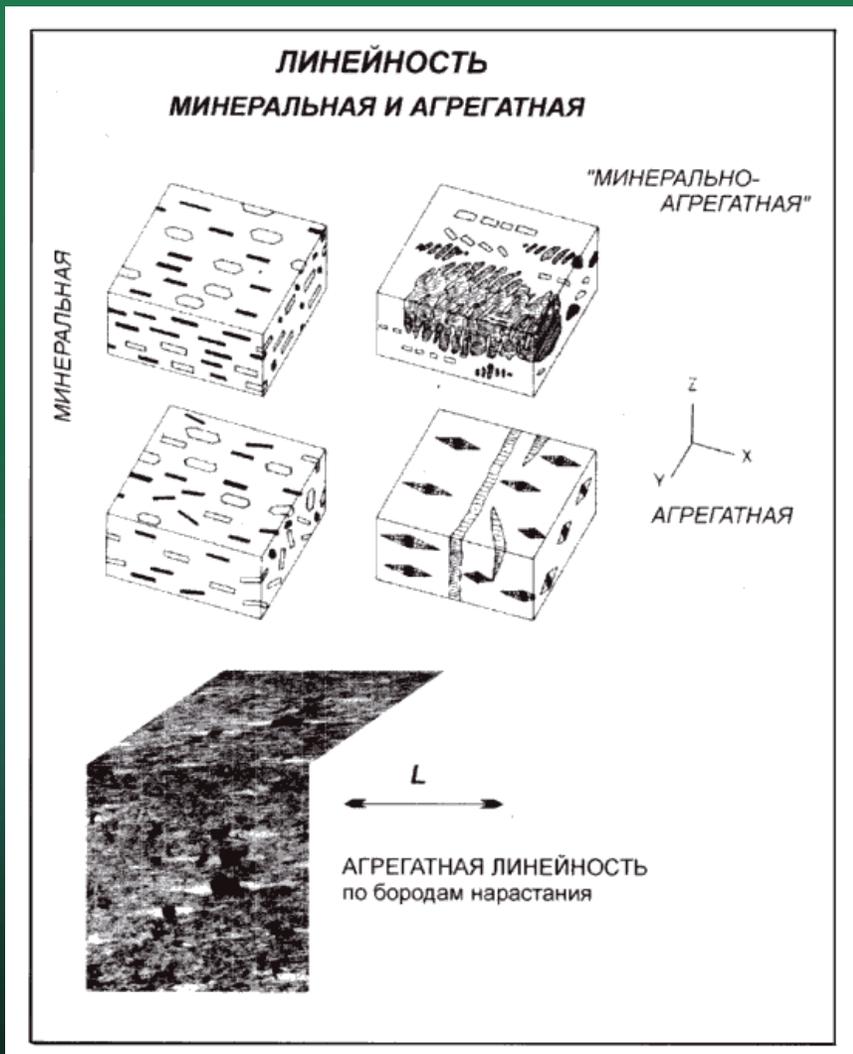
Пример формирования
деформационной полосчатости в
диамиктитах (венд, Шпицберген)



Фото Н.Б. Кузнецова

Минеральная линейность

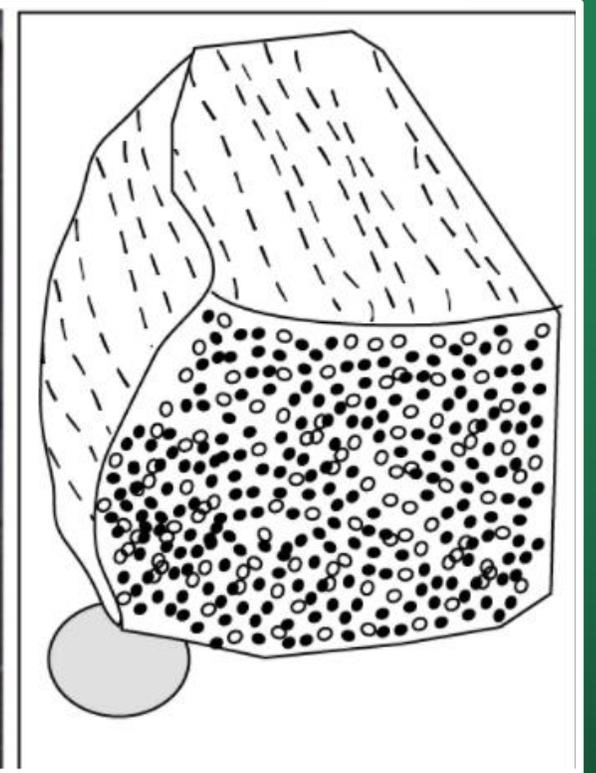




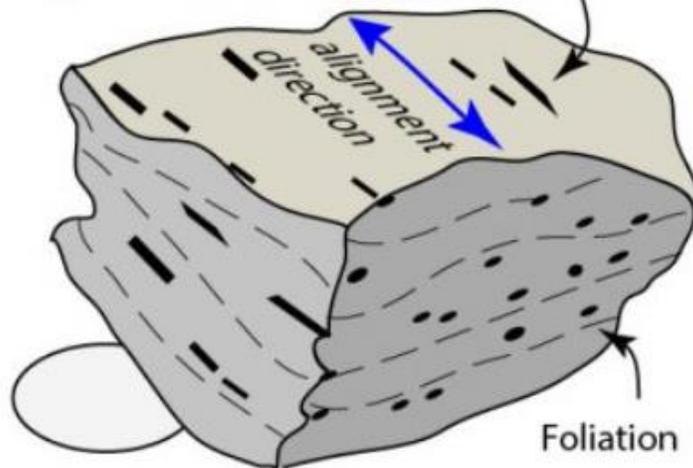
(по А.Николя
с добавлением А.Б. Кирмасова)

- ✘ **Минеральная линейность** представляет собой предпочтительную ориентировку вытянутых, обычно столбчатых, шестоватых минералов (например, таких, как роговая обманка). Иногда это минералы, удлинённые в процессе деформации, или же вытянутые агрегаты минералов. В случае если линейность обусловлена шестоватыми **минералами**, то механизм ее образования такой же, как у сланцеватости – эти минералы растут длинной осью по направлению оси растяжения. Такая линейность обычно характерна для метаморфических пород, в которых устойчивы эти минералы (чаще всего они ориентированы вдоль шарниров складок).
- ✘ Вытянутая форма **агрегатов** может быть обусловлена наличием борозд нарастания на торцах жестких зерен (в «тенях давления»). Эти агрегаты оказываются также вытянутыми вдоль оси растяжения.
- ✘ Минеральная линейность обычно используется как динамический индикатор (для определения ориентировки оси растяжения).

Примеры минеральной линейности



Aligned tourmaline crystals on foliation



(по Peter Davis; [Open Geology](#)).

Примеры минеральной линейности



Минеральная линейность, обусловленная вытянутыми кристаллами роговой обманки



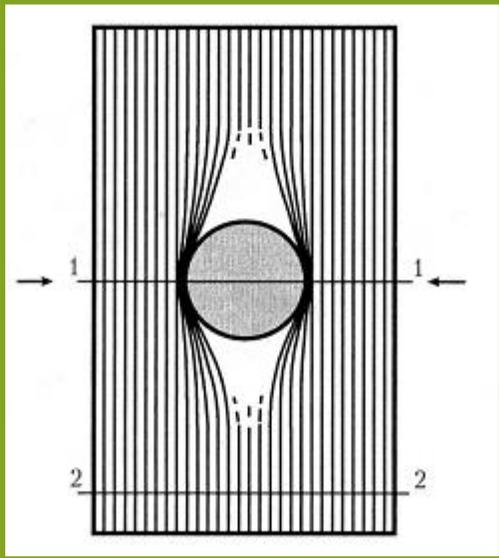
<http://myweb.facstaff.wvu.edu/~talbot/cdgeol/Structure/Lineation/Lineation.html>



Линейность плюс пересечение клиажа со слоистостью

Структуры тыльных частей зерен и включений

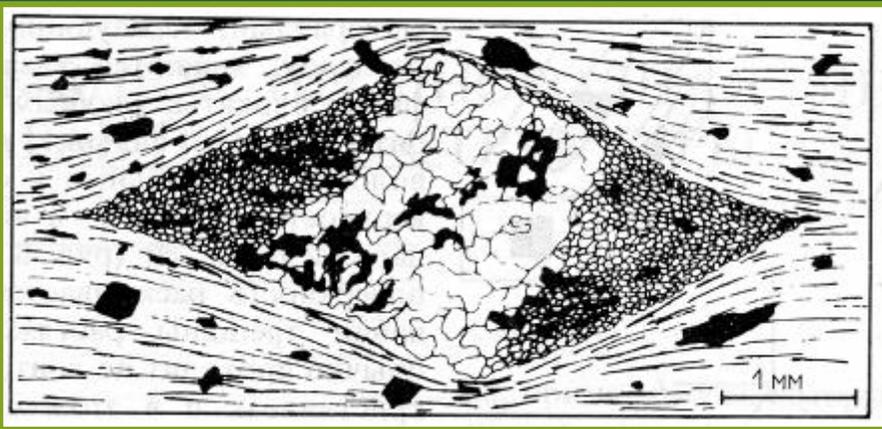




Причина формирования таких структур – наличие более вязких включений в менее вязком матриксе. При укорочении объема в тыльных частях включений возникают «тени деформации»

Выделяют три типа структур:

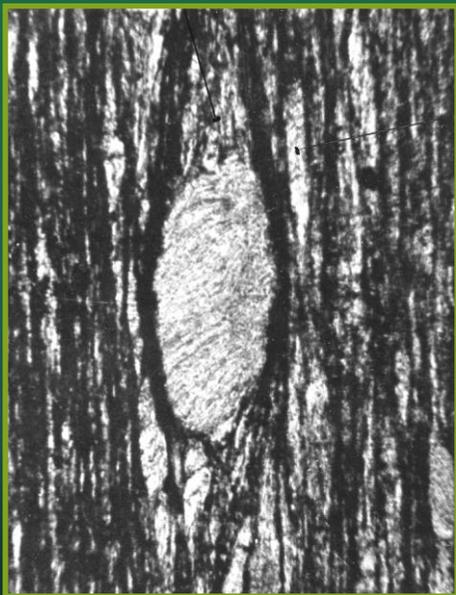
1. **Тени деформации** (тени давления)
2. **Бороды нарастания** (каймы давления)
3. **Псевдобороды нарастания** (бороды нарастания фрагментации). Морфологически сходные с бородами нарастания структуры. Образуются за счет грануляции, дробления минеральных зерен и перемещения обломков в тыльные части



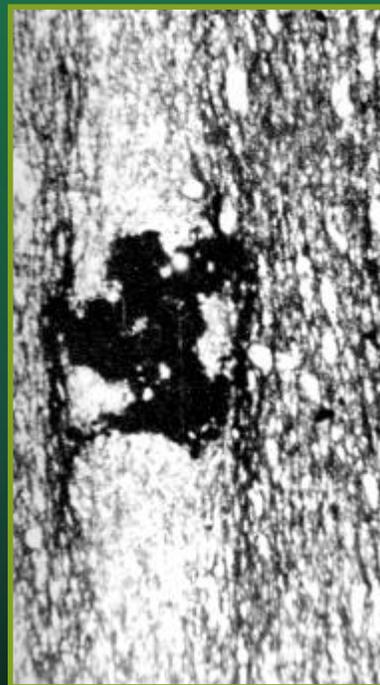
Перекристаллизация в тенях давления порфирокласта полевого шпата в очковом гнейсе. Сформировались псевдобороды нарастания (*по Николая*)

Тени деформации (тени давления)

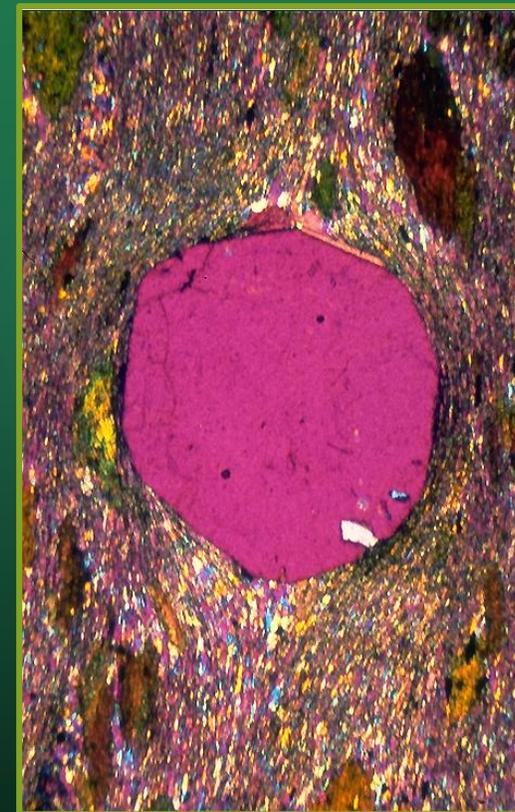
Образуются в тыльных частях зерен и включений за счет сохранности в них недеформированных участков матрикса (в остальном объеме развивается какая-либо плоскостная текстура, например, кливаж).



Тени деформации вокруг хлорит-мусковитового порфиробласта



Симметричная и асимметричная тени деформации в тыльных частях жестких зерен пирита
(фото В.А. Галкина)



Тени давления в слюдяном сланце в тыльных частях зерна граната
(Passchier, Trouw, 1998)

Бороды нарастания

(каймы давления)

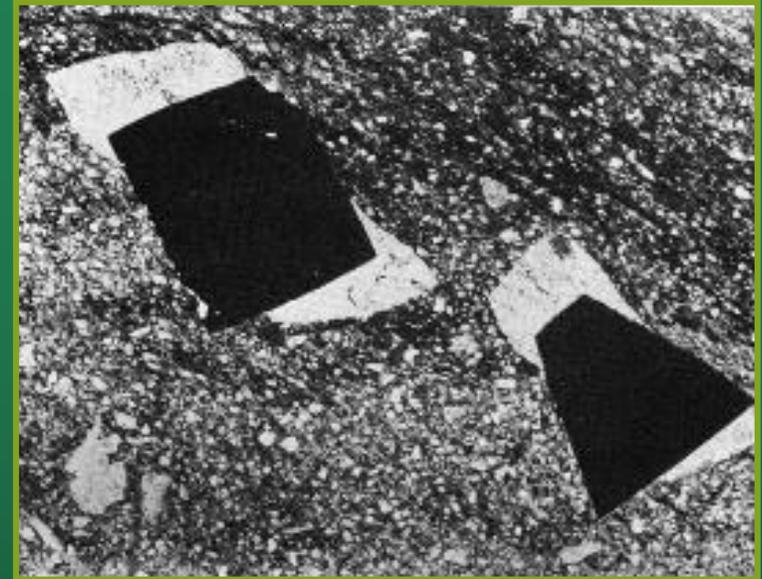
Бороды нарастания – это структуры, морфологически выраженные новообразованиями на противоположных тыльных сторонах жестких включений.

Морфологические типы бород нарастания:

- По внутреннему строению : с невыраженным волокнистым габитусом, с выраженным волокнистым габитусом
- По морфологии волокон: с прямыми волокнами, с изогнутыми волокнами
- По геометрическому соответствию с формой включения: с геометрическим соответствием, без геометрического соответствия
- По минеральному составу: мономинеральные и полиминеральные

Минералы, образующиеся в каймах давления:

кварц, кальцит и хлорит

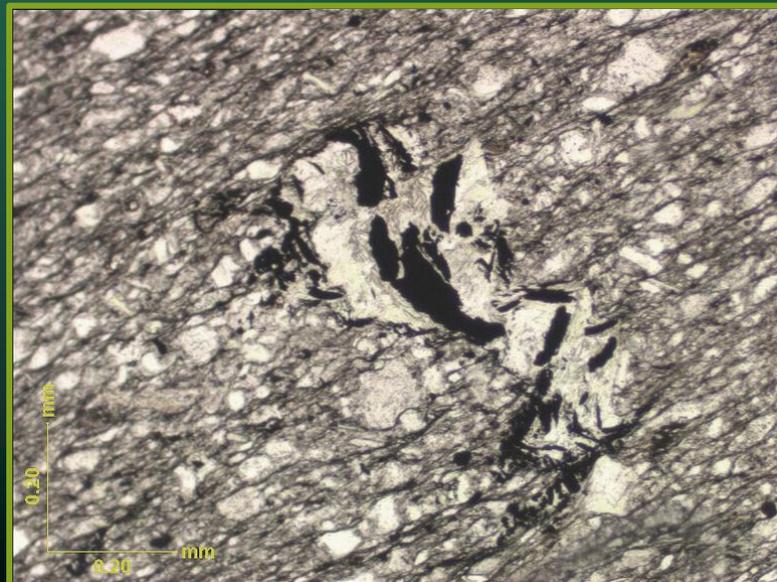
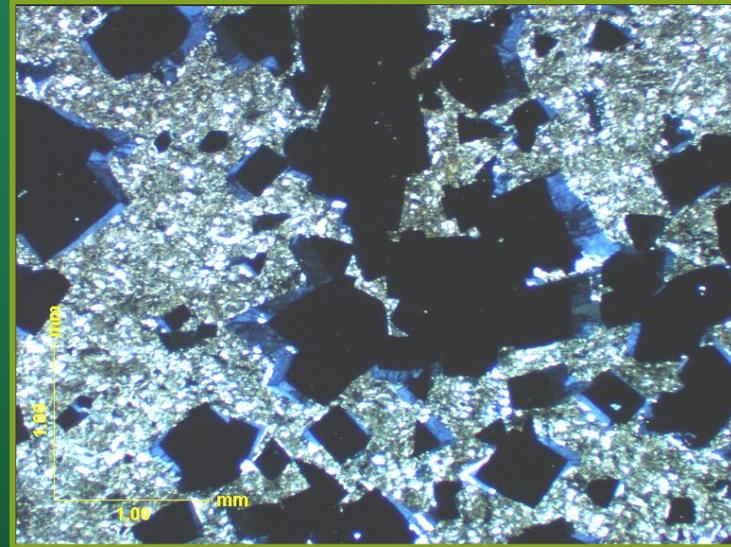
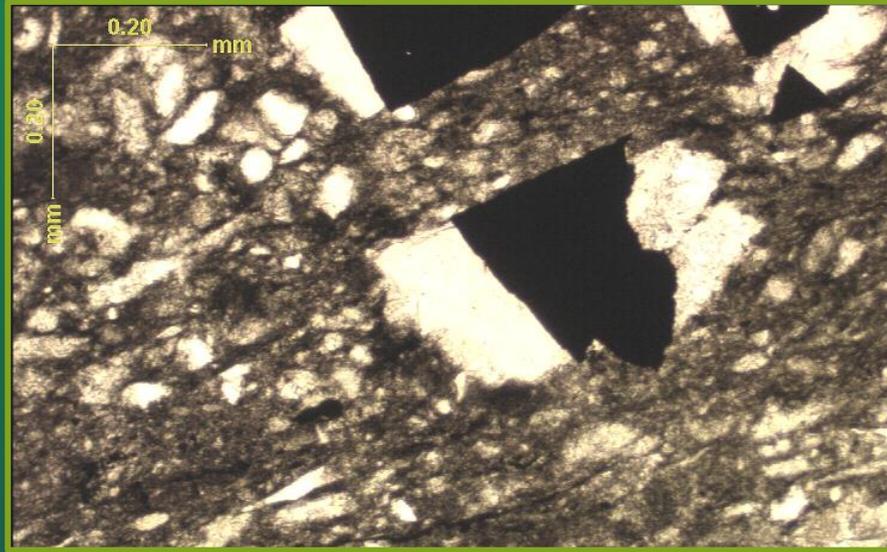


(no Ramsay, Huber)



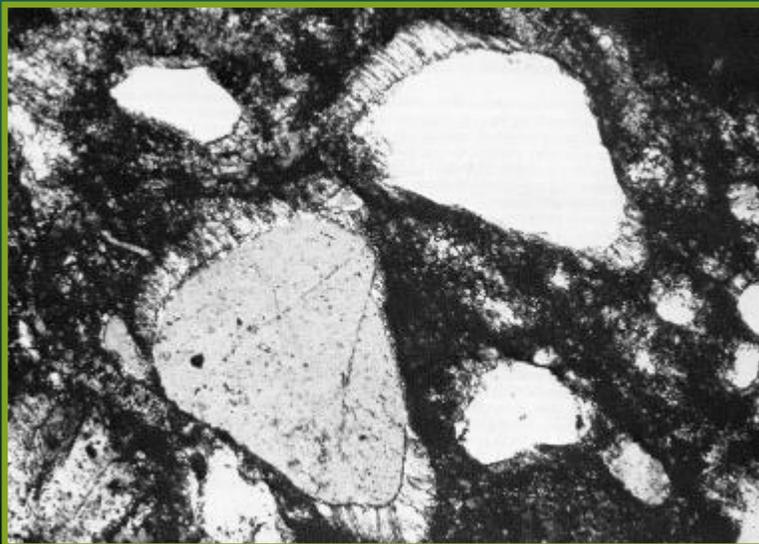
(no Ramsay, Huber)

Бороды нарастания в нижнеюрских кливажированных песчаниках Большого Кавказа. *Фото В. Быстровой*

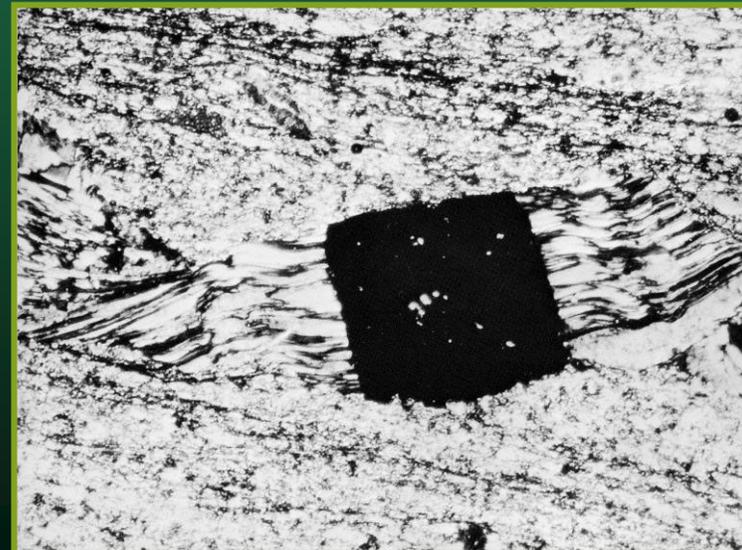


Механизм образования бород нарастания

- ▶ Растворение под давлением
- ▶ Перемещение во флюиде (может осуществляться ближний и дальний перенос)
- ▶ Отложение в местах пониженного давления: раскрытие свободной поверхности по контакту с жестким кристаллом (синтаксиальный рост) либо раскрытие происходит у внешней границы каймы (антитаксиальный рост)



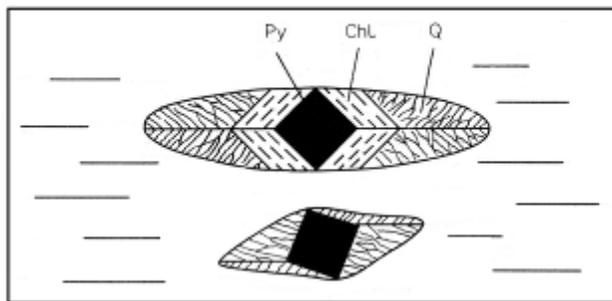
(no Ramsay, Huber)



(no Ramsay, Huber)

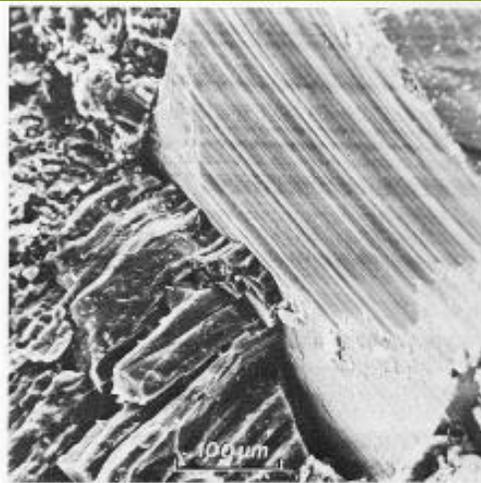
Бороды нарастания как индикатор условий деформации

Соосная деформация

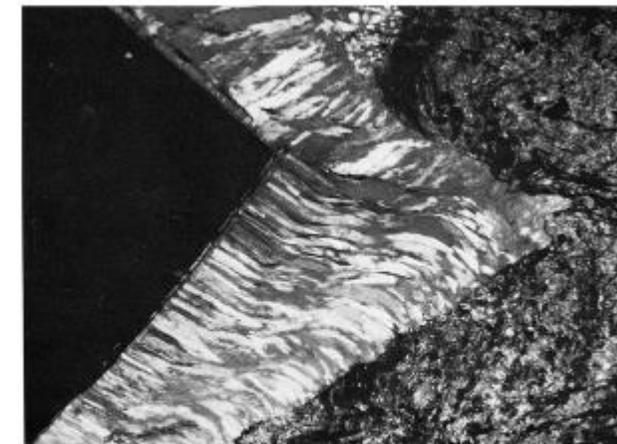


Каймы давления заполнены волокнистым кварцем с волокнами, перпендикулярными граням пирита, и хлоритом с листочками, параллельным им; трещина проходит на контакте с пиритом. Волокна в процессе роста остаются параллельными, что говорит о соосности деформации

(по Николая)



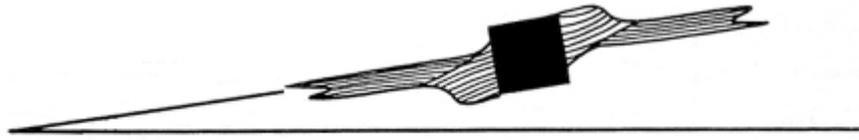
Прямые кварц-хлоритовые волокна, растущие вокруг пиритового включения (SEM-изображение)



Борода нарастания: волокна кварца на кристалле пирита. Видно геометрическое подобие включению и сутурный шов

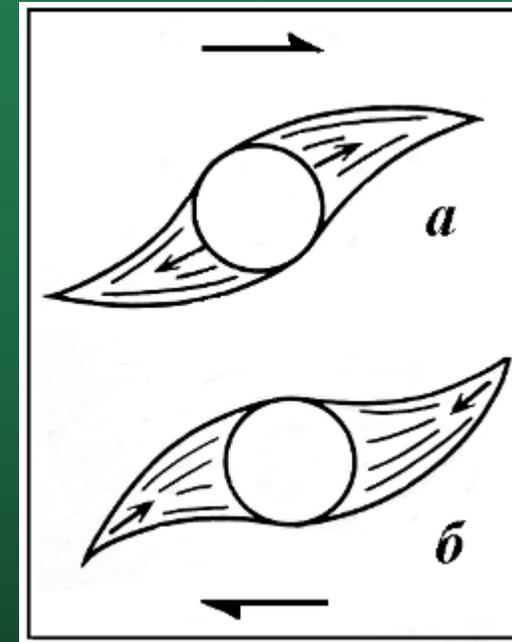
(no Ramsay, Huber)

Несоосная деформация



Вращение пирита и рост кайм давления (бород нарастания) на нем в зоне правостороннего простого сдвига

(по Николя)



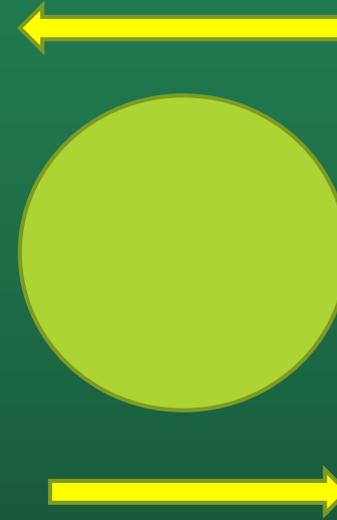
(по Николя)

По морфологии каймы давления можно определить наличие и направление вращения, а иногда и его величину. Природа кристаллизующихся при этом минералов может оказаться характерной для метаморфизма определенного типа. Следовательно, мы можем определить условия, в которых протекала деформация.

Асимметрия и искривление кайм давления при вращении в ходе прогрессивной деформации сдвига. В каждый данный момент времени новые кристаллы в защищенной зоне растут под углом 45° к направлению сдвига. *a* – рост кристаллов от поверхности жесткого объекта; *b* – рост кристаллов от концевых точек кайм давления.

Задача

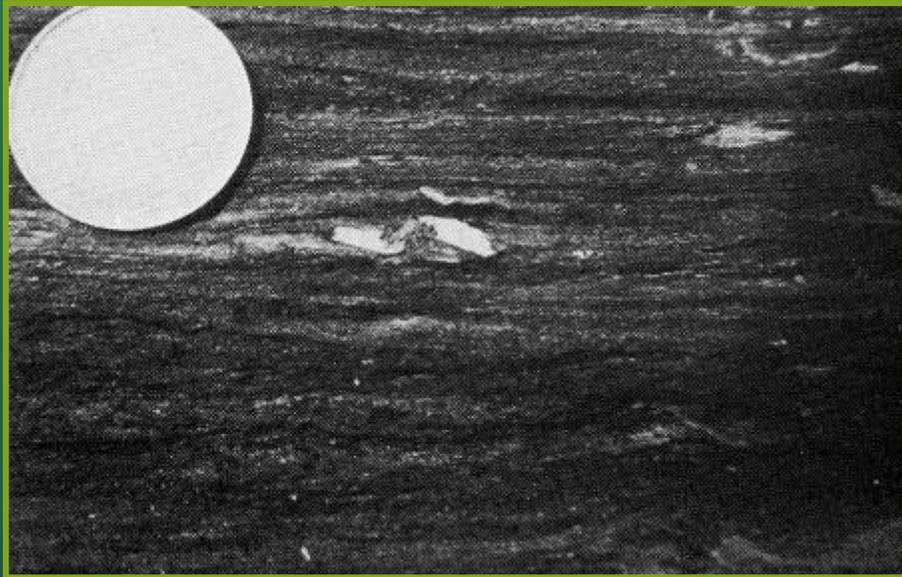
Дано: жесткое включение
в зоне левого сдвига



А) Изобразите последовательный рост бород нарастания (рост синтаксиальный)

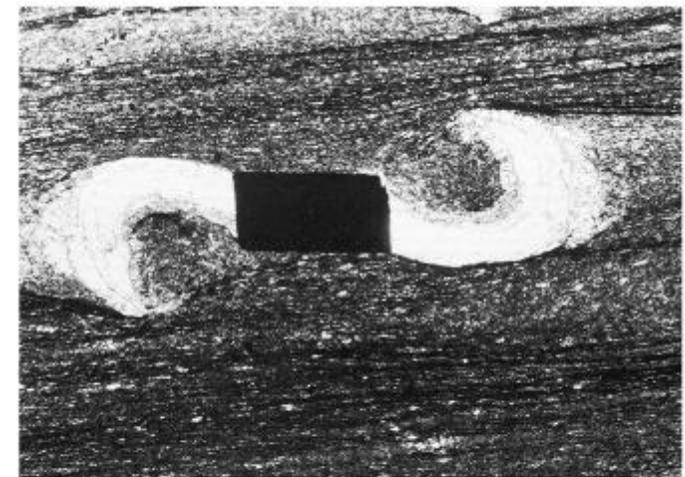
Б) Изобразите последовательный рост бород нарастания (рост антитаксиальный)

S –образное искривление бород нарастания кварца на жестких зернах пирита в зонах сдвига



(no Ramsay, Huber)

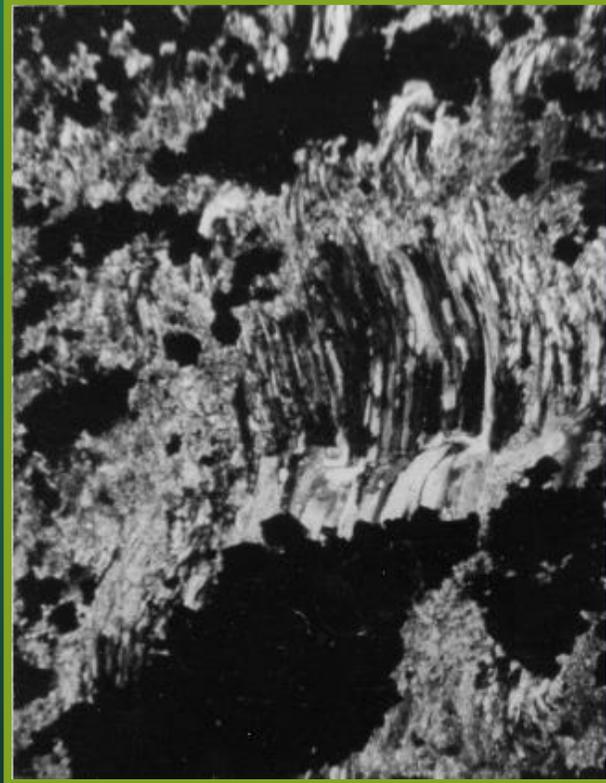
Данная структура свидетельствует о значительном повороте



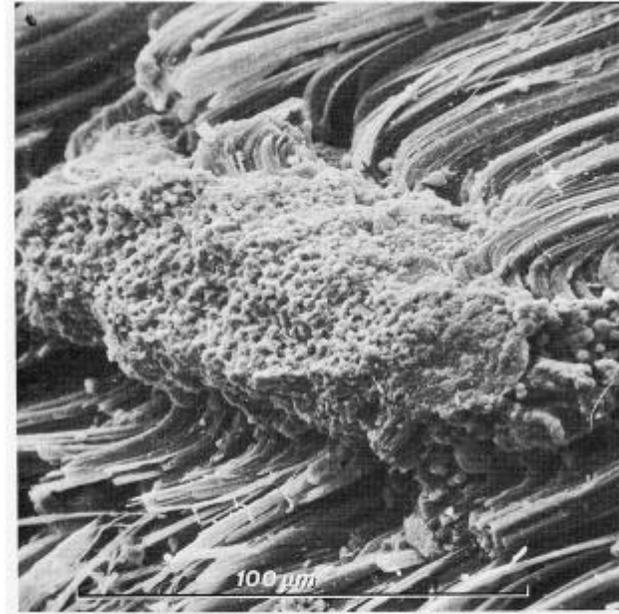
Симметрично изогнутые бороды нарастания кварца на пирите

Жесткие включения пирита вращаются вместе с образовавшейся «бородой». При этом новые волокна всегда растут в одном и том же направлении. Все это приводит к искривлению бород нарастания. Поворот может быть как незначительным, так и сильным.

Фотографии изогнутых волокон в каймах давления
(свидетельство вращения жестких тел во время
деформации сдвига и синхронного роста волокон)



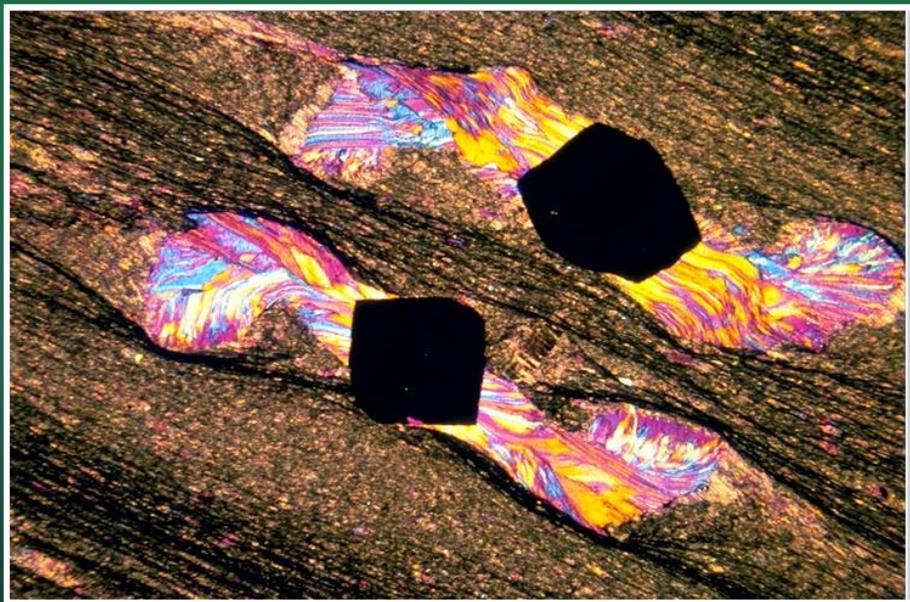
На зернах пирита (черные)
образовались бороды нарастания
с изогнутыми волокнами кварца



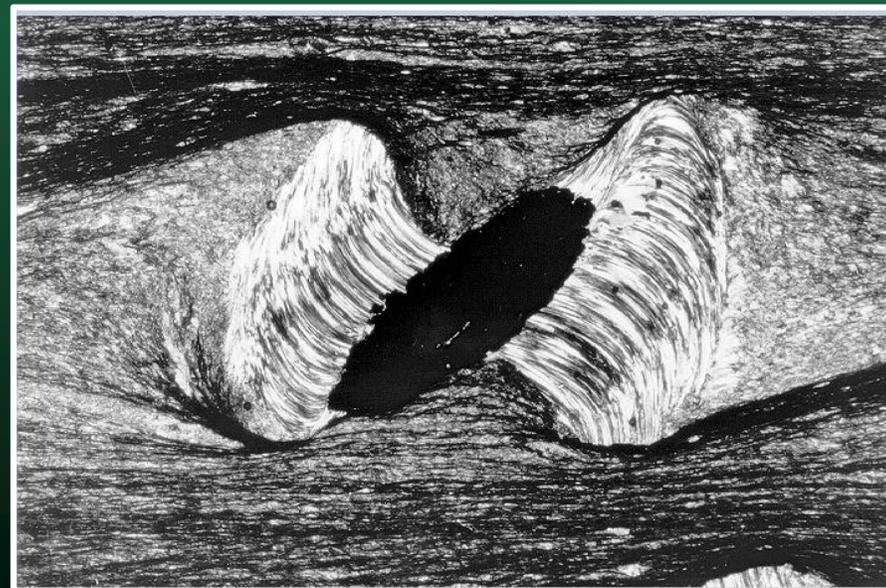
Сигмоидально изогнутые кварцевые
волокна, растущие вокруг пирита
(SEM-изображение)

(no Ramsay, Huber)

Примеры изогнутых бород нарастания
(кайм давления) на жестких зернах
пирита – свидетельство сдвиговой
деформации



Кварцевые и кальцитовые волокна в кайме
давления вокруг зерен пирита.
Известковистые сланцы. Поле зрения 20 мм.



(Passchier, Trouw, 1998)

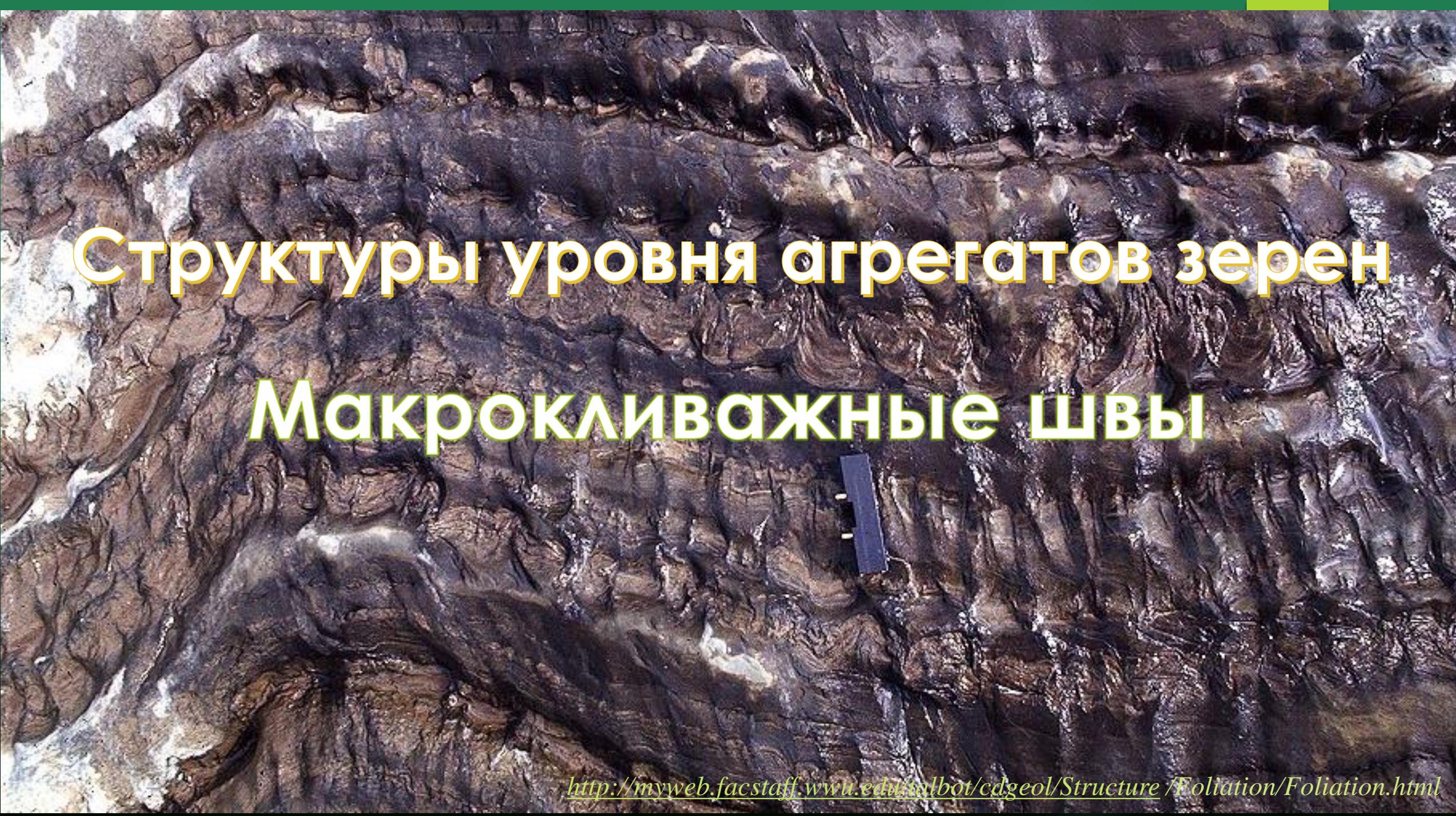
Структурный парагенез: кливаж и бороды нарастания

- ▶ Находятся в одном и том же объеме
- ▶ Формируются одновременно
- ▶ Совместимы друг с другом
- ▶ Одни и те же условия деформации
- ▶ Один и тот же механизм (растворение под давлением)

Это структурный парагенез уровня зерен, механической обстановки сжатия, низкотемпературный, деформационно-химический.

При этом один из членов этого парагенеза (бороды нарастания) формируется в обстановке локального растяжения.

Растворение под давлением осуществляется и в более крупных масштабах



Структуры уровня агрегатов зерен

Макрокливажные швы

Примеры макрокливажных швов



Испания:
Пиренеи
и хр. Эспадан

Фото Н.С. Фроловой

Макрокливажные швы под микроскопом



Фото В.Г. Талицкого

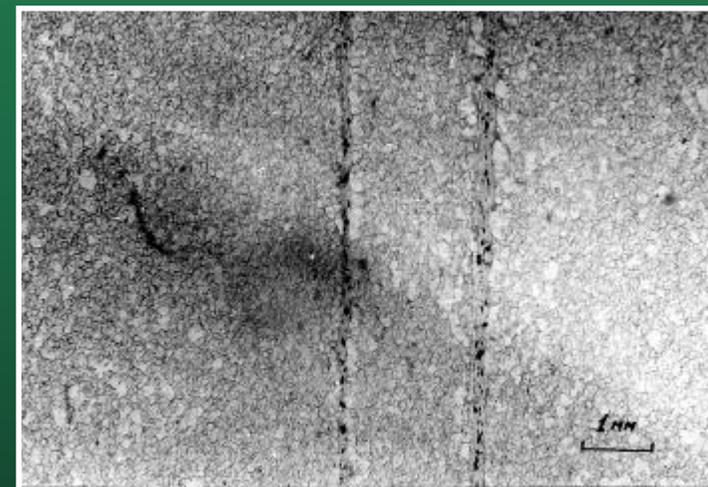
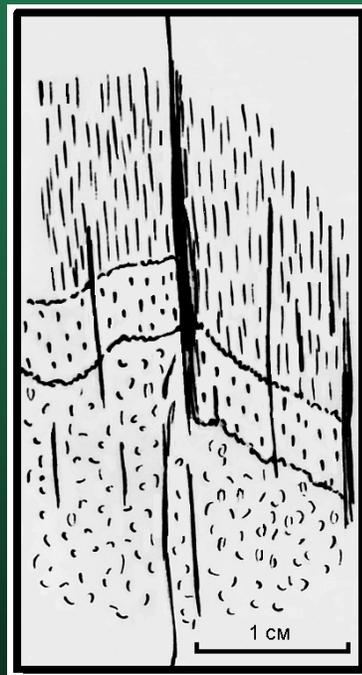
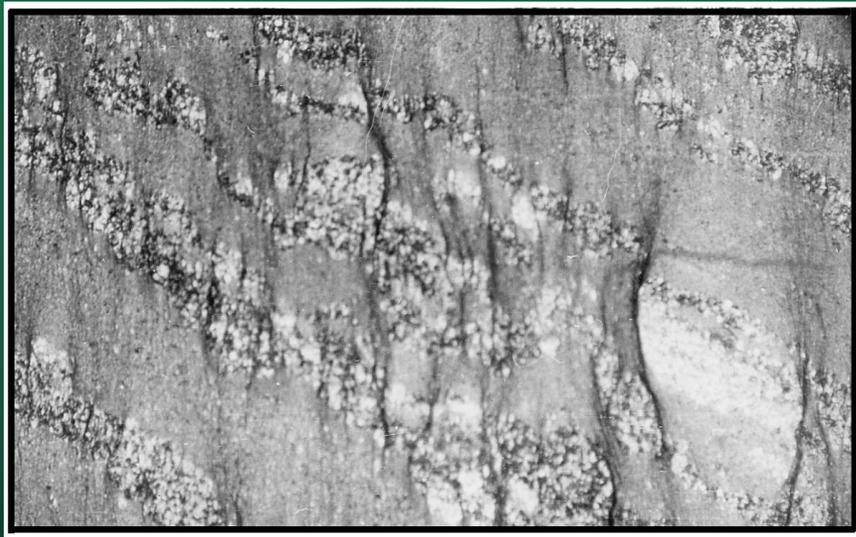


Фото Н.С. Фроловой

Макрокливажные швы развиваются по неоднородностям уровня агрегатов зерен

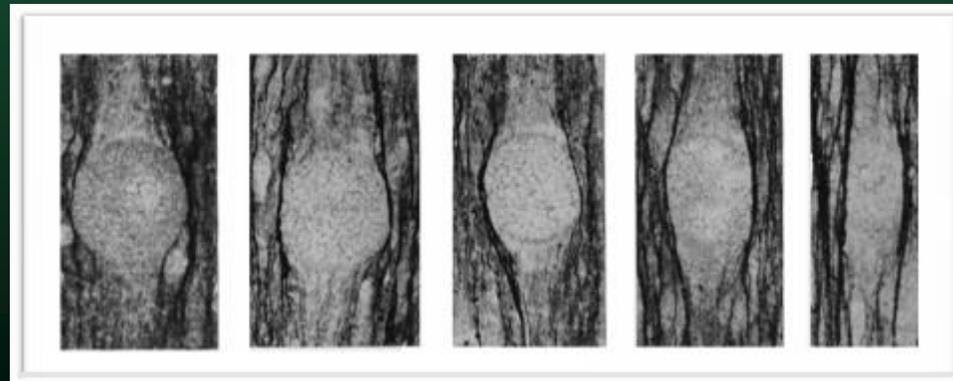
1. Они приурочены к границам агрегатов более вязких зерен



Шлиф. Фото Н.С. Фроловой



(no Ramsay, Huber)



(no Ramsay, Huber)

Примеры макрокливажа



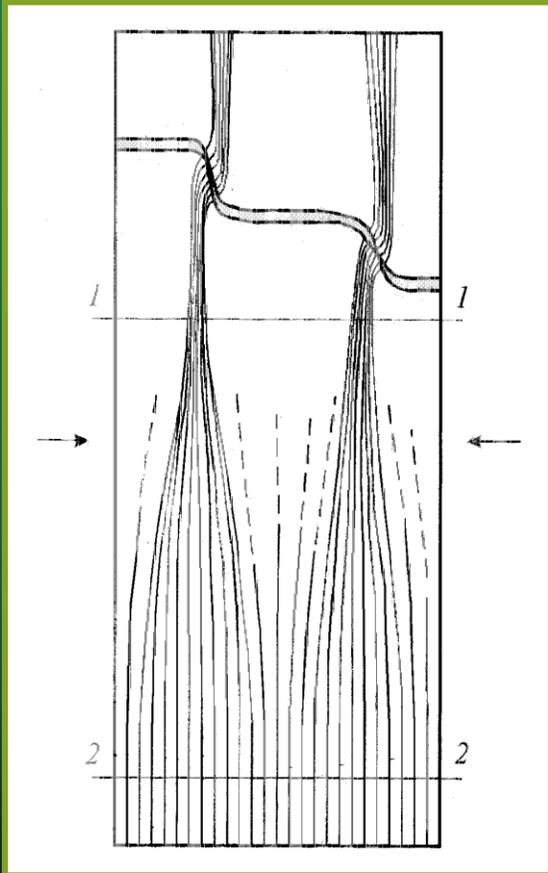
Макрокливажные швы на границах доломитовых конкреций. Видны также тени давления.

<http://myweb.facstaff.wvu.edu/talbot/cdgeol/Structure/Foliation/Foliation.html>



Макрокливажные швы приурочены к структурным неоднородностям. Песчаники и глинистые сланцы.
<http://myweb.facstaff.wvu.edu/talbot/cdgeol/Structure/Foliation/Foliation.html>

2. Швы бывают приурочены также к мелким структурным неоднородностям



(по В.Г. Талицкому)

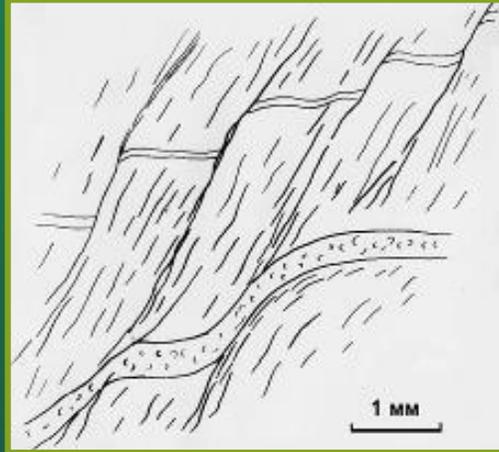


Фото Alex Strekeisen <https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/slate.php>



(по Ramsay, Huber)

(по Ramsay, Huber)

Макрокливажные швы представляют собой сгущение более мелких кливажных швов

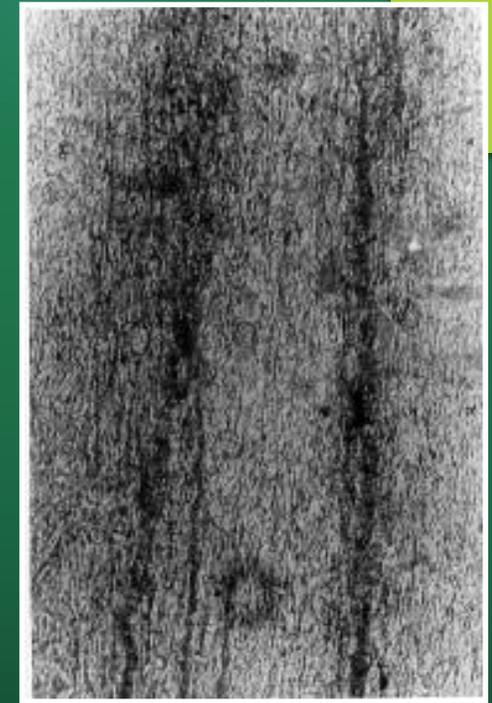
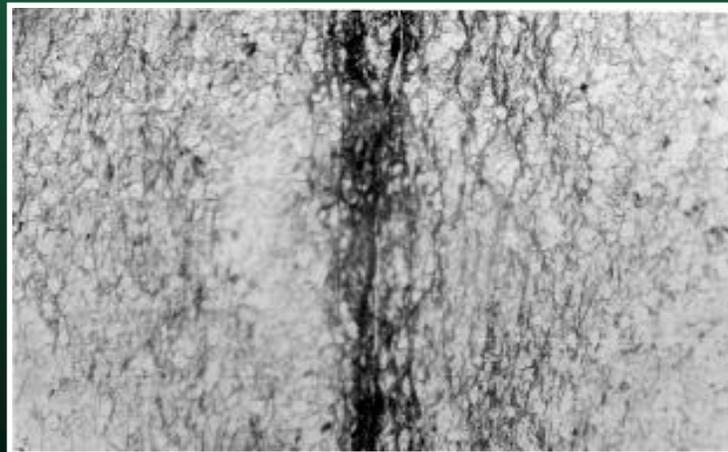
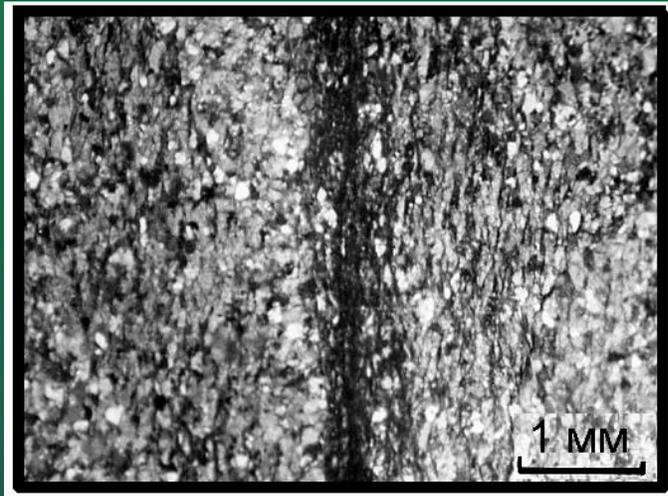
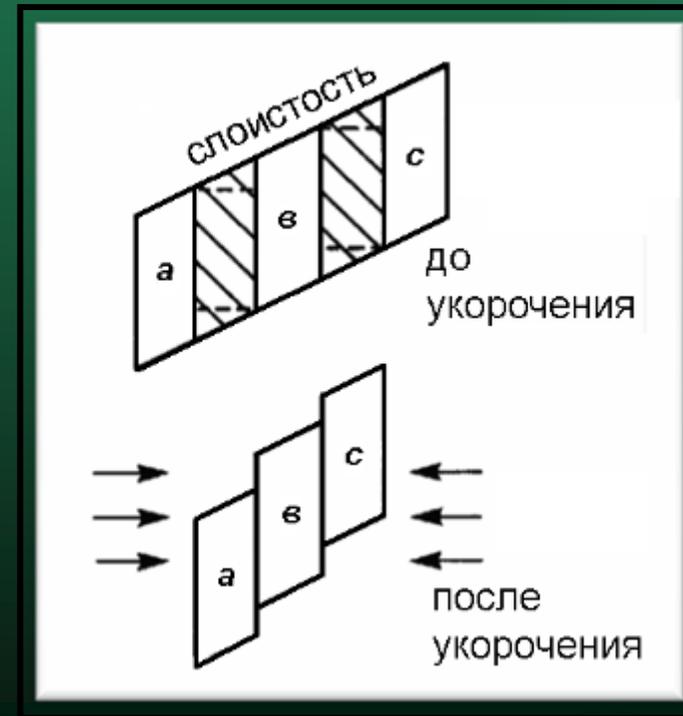
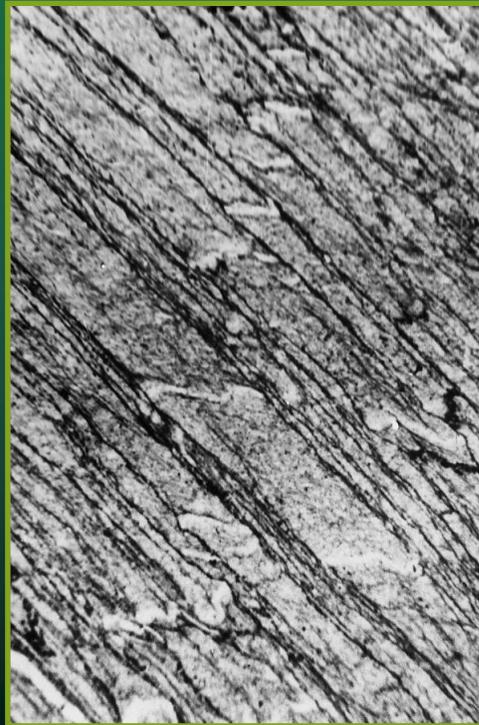


Фото Н.С. Фроловой

Механизм формирования макрокливажа такой же, как у кливажа (растворение под давлением), только эта структура связана с более крупными концентраторами напряжений

Макрокливажные швы являются зонами концентрации деформации, поэтому их развитие может создавать эффект ложных смещений, фиксируемых по разобцению жилок или тонкой слоистости. Этот механизм мы уже рассматривали на предыдущей лекции



Макрокливаж с эффектом ложных смещений в обнажении



Испания. Пиренеи. *Фото Н.С. Фроловой*

