

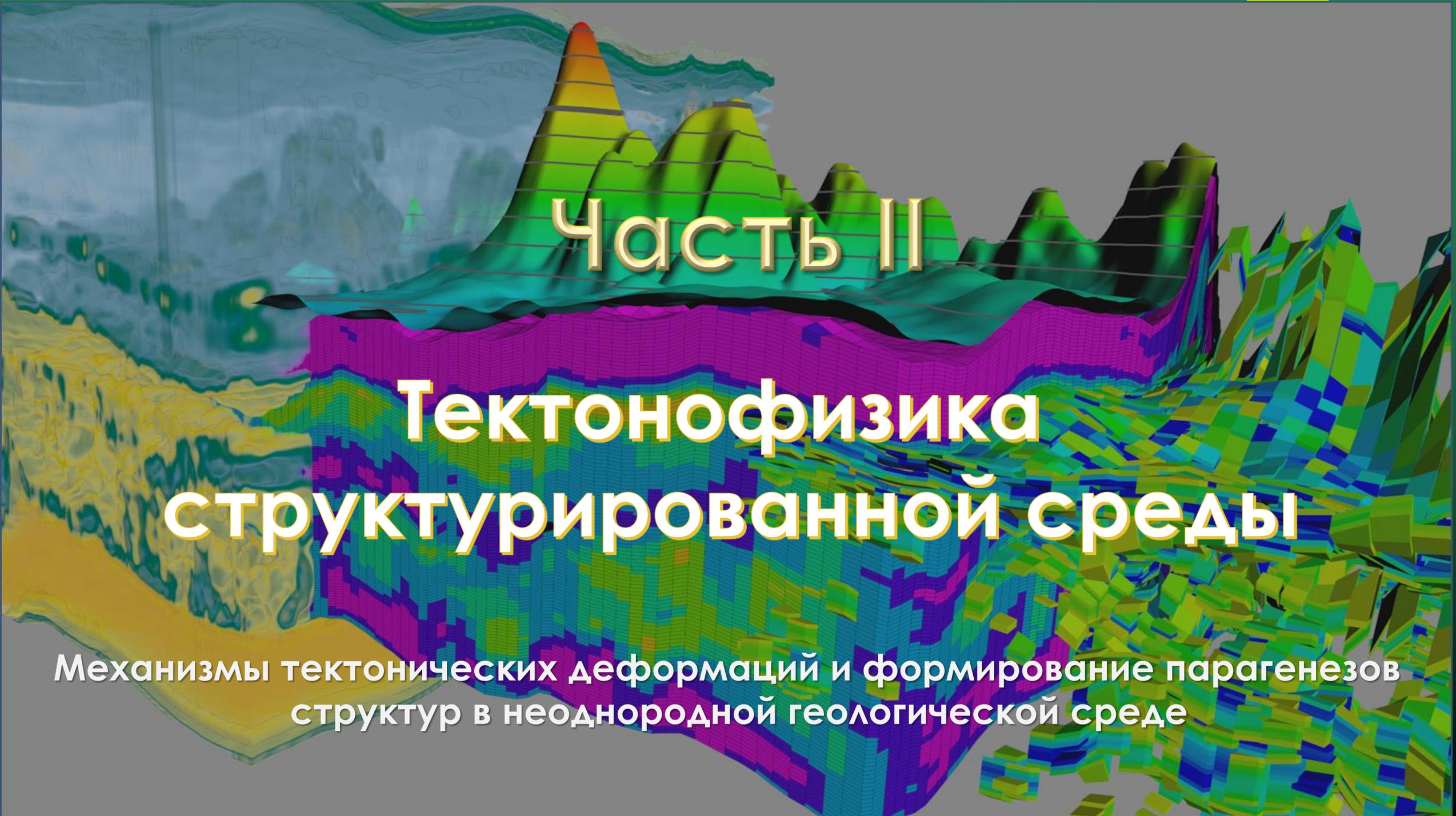


Геологический факультет МГУ  
Кафедра динамической геологии  
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 12

# Тектонофизика

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



# Часть II

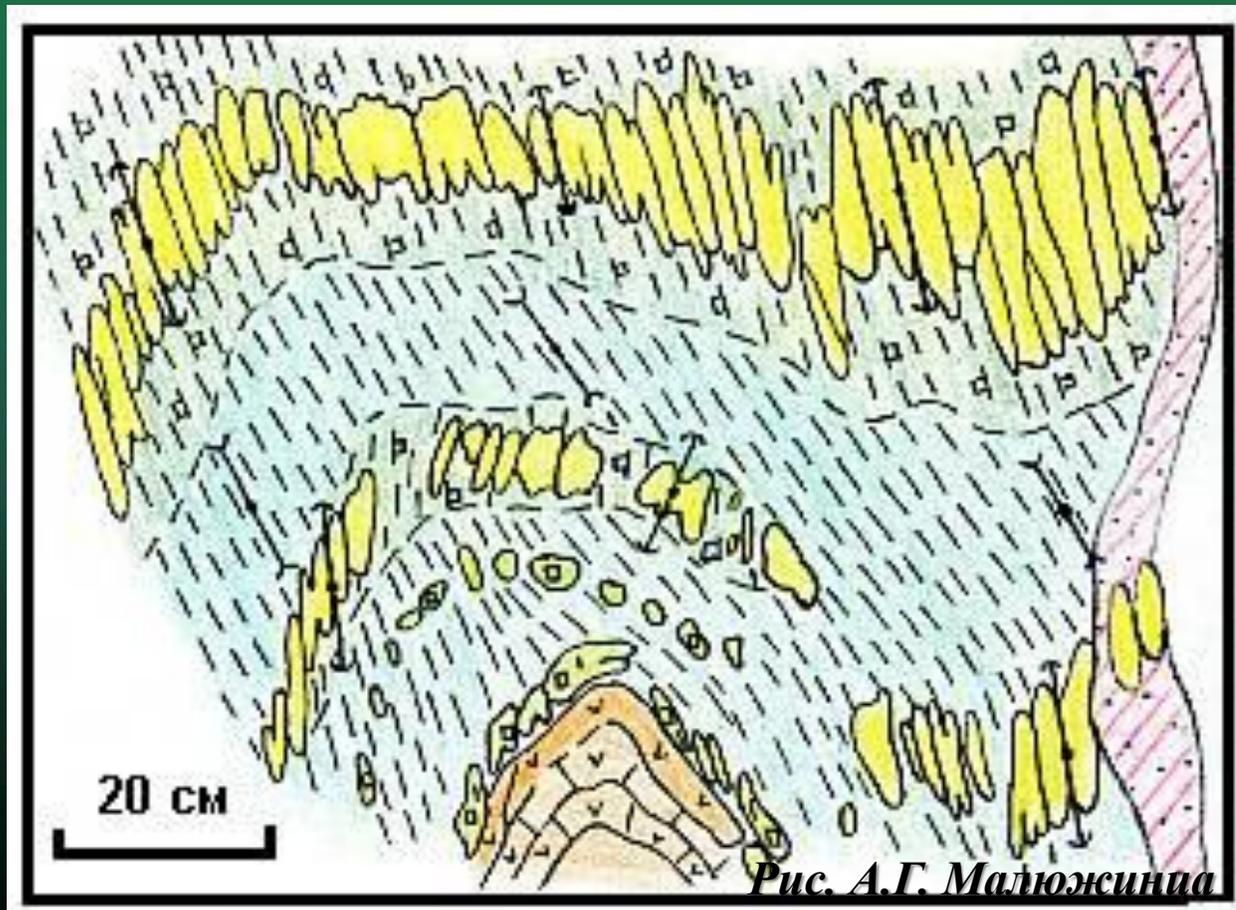
## Тектонофизика структурированной среды

Механизмы тектонических деформаций и формирование парагенезов структур в неоднородной геологической среде

# Лекция 12

**МУЛЛИОН-СТРУКТУРЫ  
МИНЕРАЛЬНЫЕ ЖИЛЫ  
БУДИНАЖ**

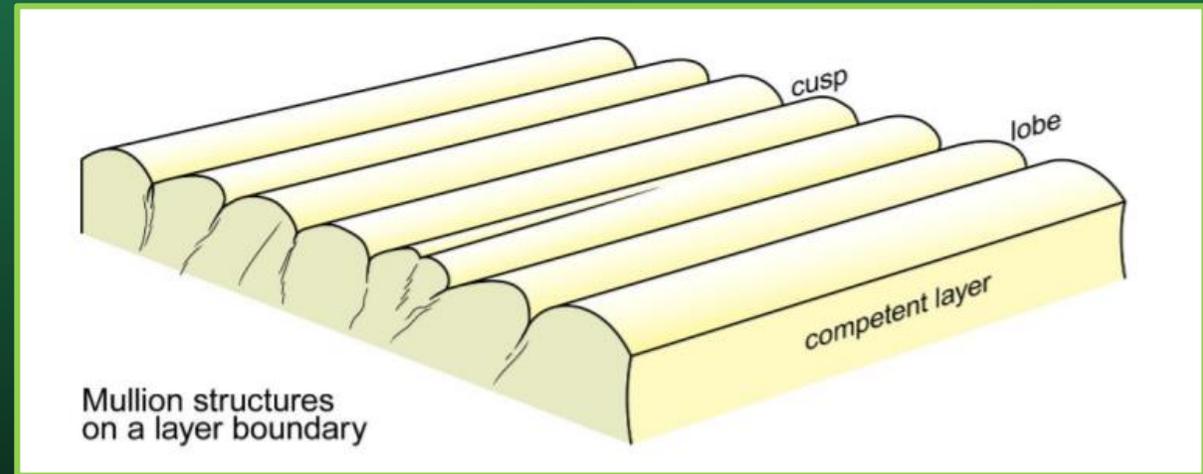
# Муллион- структуры



[https://commons.wikimedia.org/wiki/  
/File:Mullion\\_Rouette.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mullion_Rouette.jpg)

Муллион-структуры относили к линейным структурам и определяли как грубую гофрировку поверхности компетентных слоев на границах с некомпетентными. Термин происходит от старофранцузского "moine", обозначающего вертикальные колонны в высоких окнах готической архитектуры. Внешний вид - выпуклые ребристые поверхности, разделенные узкими острыми зонами, совпадающими с расщеплением слоев. «Рёбра» обычно параллельны шарнирам складок. Большинство авторов сходятся во мнении, что эти длинные правильные структуры образовались во время укорочения слоев параллельно слоистости,

Муллион-структуры описаны еще (Hull E., Kinahan G.H., Nolan N., 1891), а название им дал Холмс в 1928 г. Муллион-структуру называли также брусчатой структурой. Она описывалась и как rodging (стержневая) структура; прежде последние два термина считались синонимами.



<https://www.files.ethz.ch/structuralgeology/JPB/files/English/10lineation.pdf> 2020 год

*Муллион-структуры в слоях песчаников, чередующихся со сланцами. Руэтт, Бельгия (after Brühl, 1969 from Urai et al., 2002).*

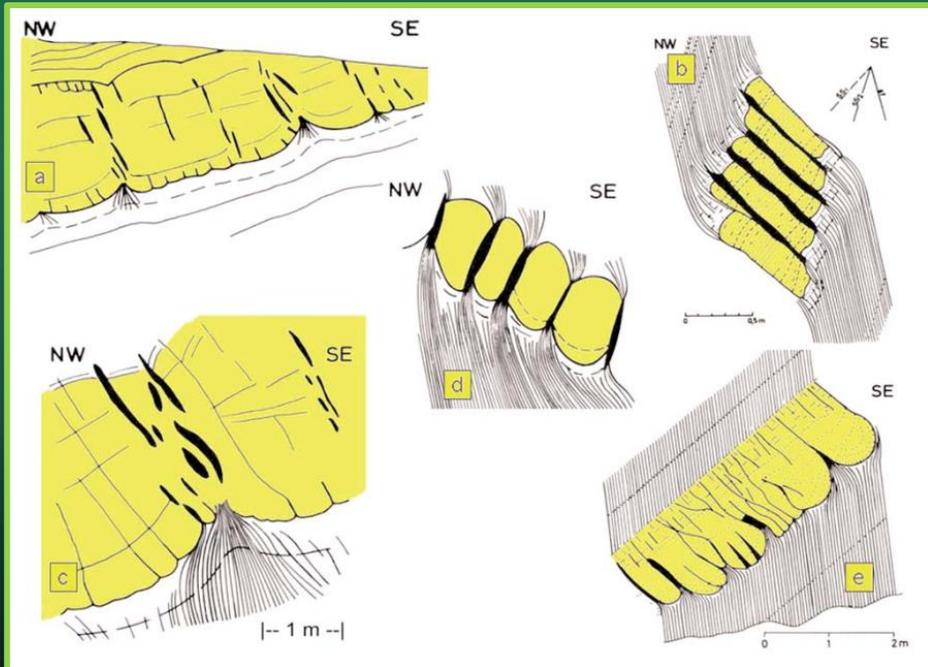
# Муллион-структуры близ г. Бастонь (Арденны), Бельгия

Черным на рисунке показаны кварцевые жилы, желтым - песчаники

Обратите внимание на размеры муллионов, наличие вытянутых кварцевых тел между муллионами на продолжении кливажных швов



(after Brühl, 1969 from Urai et al., 2002).



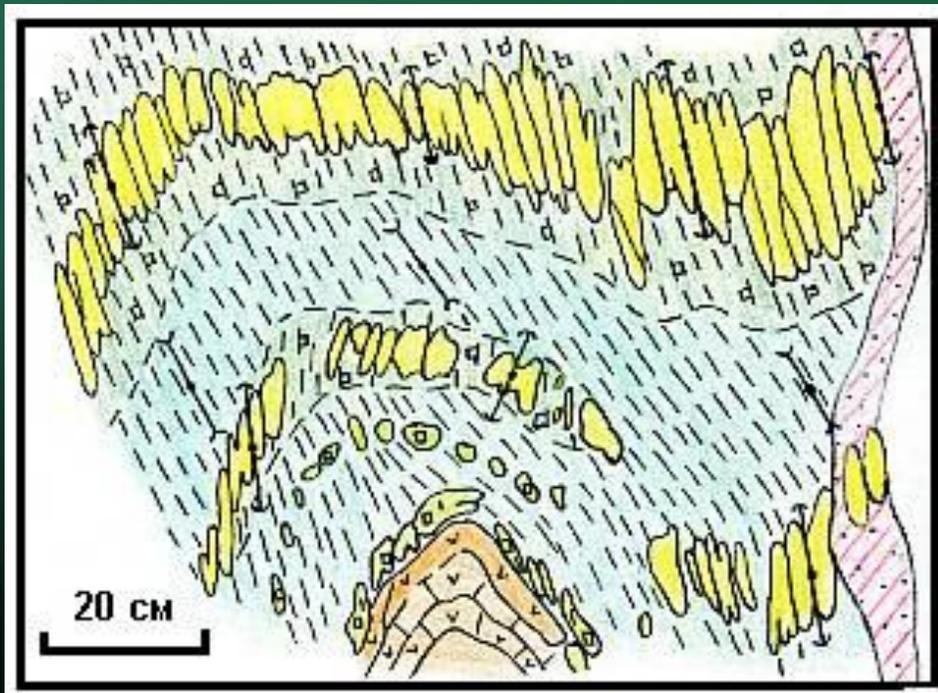
(after Brühl, 1969 from Urai et al., 2002).



Фомо М. Синтубин

[https://ees.kuleuven.be/drt2013/field\\_trip/](https://ees.kuleuven.be/drt2013/field_trip/)

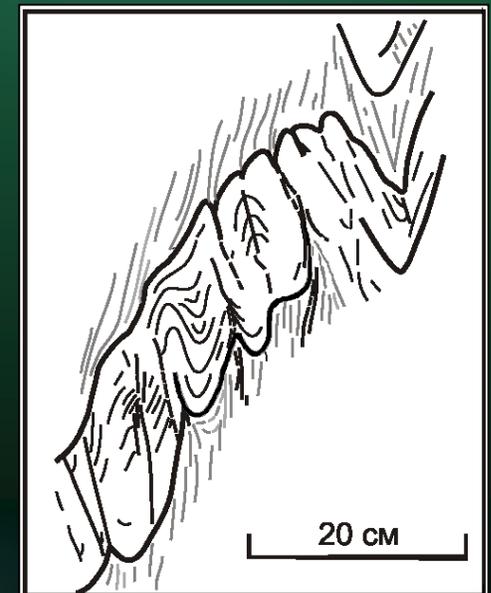
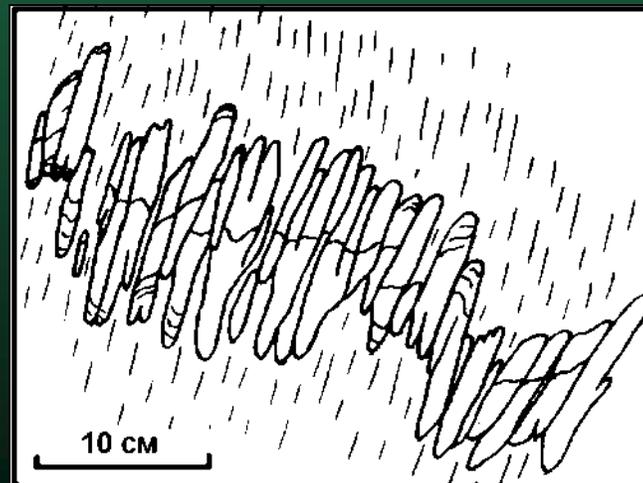
Итак, мулليون-структуры связаны с существованием более крупных неоднородностей, чем зерна. Для объяснения механизма их формирования нужно учитывать: развитие в компетентных слоях **песчаников**, содержащих обломочные зерна кварца (растворимый минерал!), параллельность кливажу и шарнирам складок, сгущение кливажа в сланцах в острых вогнутых частях между линзами муллионов, отложение кварца между линзами. Тем не менее, авторами работы (*Urai et al., 2002*) это учитывалось не в полной мере; они считают, что сначала образовалась региональная серия близкорасположенных параллельных жил, а затем при горизонтальном укорочении песчаник между жилами деформировался больше, чем сама (более компетентная) жила



Мулليون-структуры развиваются также в переслаиваниях **известняков** и сланцев и были изучены исследователями Лаборатории тектонфизики МГУ в Таласском хребте Северного Тянь-Шаня

**Мулليون-структуры – это поперечные линзы в слоях карбонатного или существенно кварцевого состава, разделенные темными швами.**

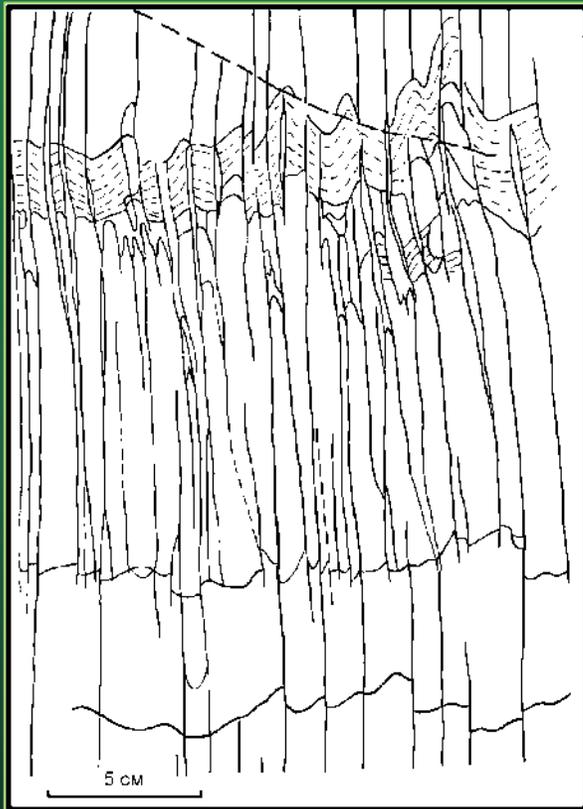
Муллион-структуры в переслаиваниях известняков и сланцев. Таласский хр., Северный Тянь-Шань



*Рис. и фото: А.Г. Малюжинец и Н.С. Фролова*

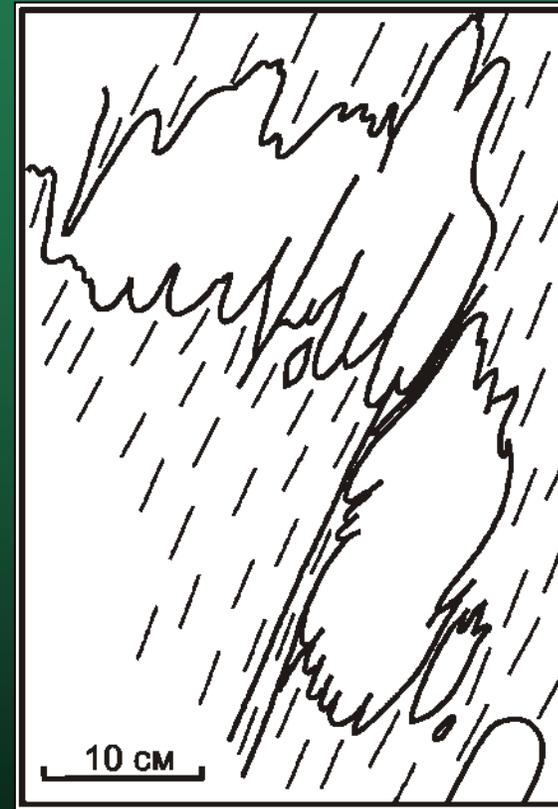
# Морфология мулليون-структур

Эти структуры могут иметь самую разную форму



## Правильные МС

Поперечные линзы имеют примерно одинаковые размеры и форму



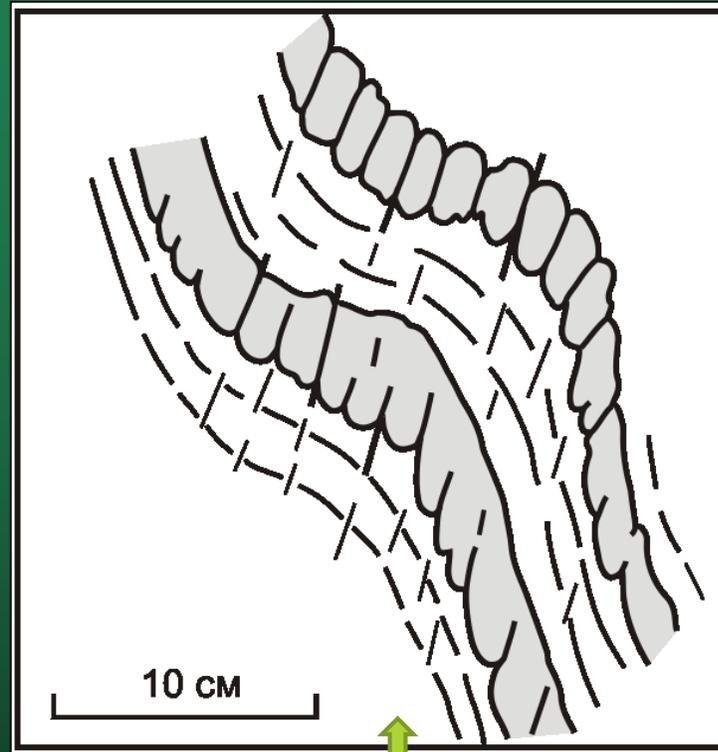
## Неправильные МС

Линзы имеют неправильную форму и различаются по размеру



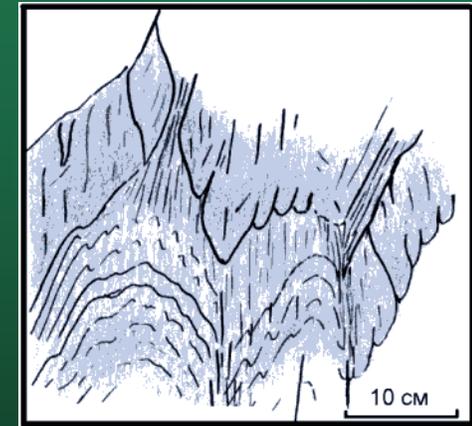
### Зрелые МС

Хорошо развитые муллион-структуры, в которых линзы разделены сквозными швами, а слой распадается на отдельные фрагменты. Известняки и сланцы. Таласский хр.



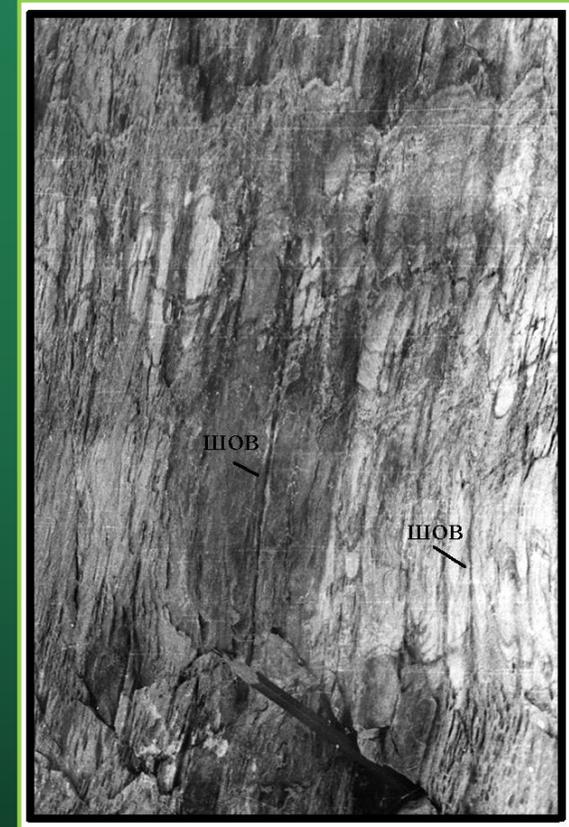
### Незрелые МС

В нижнем слое видна лишь фестончатость его границы.



Бластопесчаники и сланцы.  
Хр. Султан-Уиздаг.  
Рис. Н.С. Фроловой

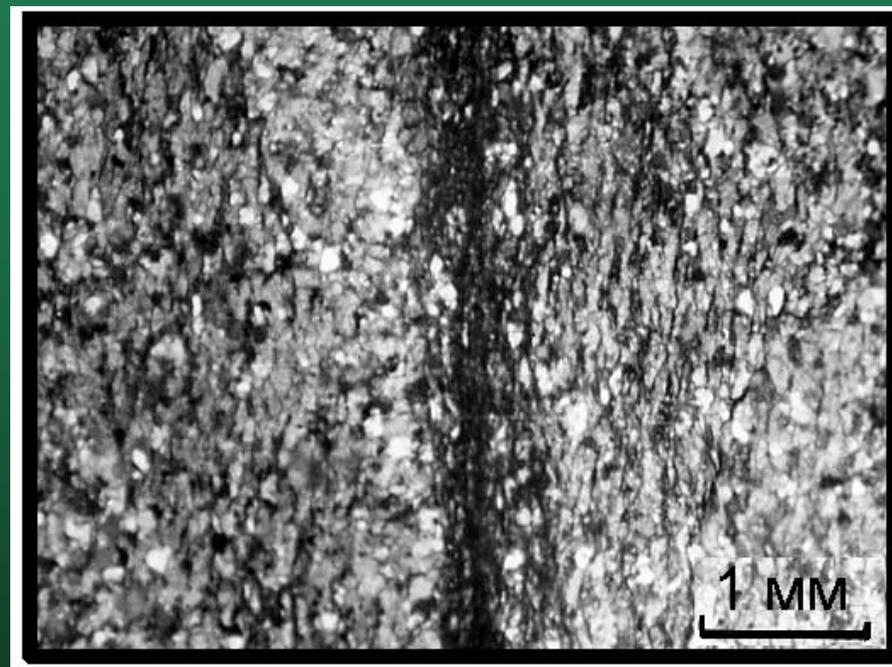
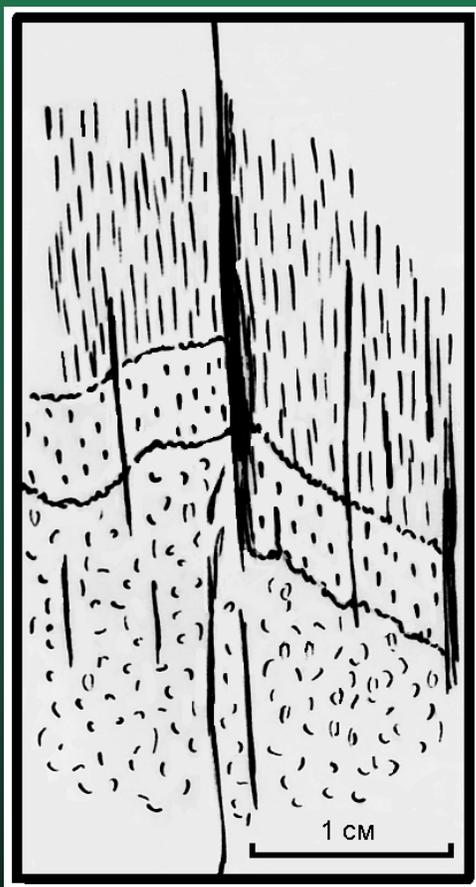
# Швы между линзами муллон-структур



Поперечные линзы разделяются швами, они напоминают кливажные швы, но гораздо крупнее. Швы не только разделяют вязкие слои на линзы, но и пронизывают вмещающие сланцы.

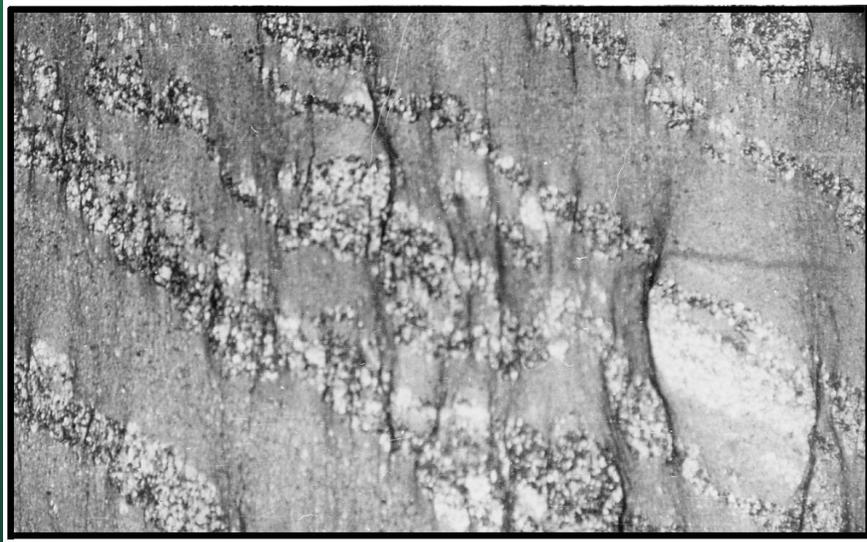
*Фото Н.С. Фроловой*

Швы сложены химически инертными компонентами исходного слоя



Швы имеют темный цвет, так как обогащены нерастворимыми компонентами, такими, как рудное, органическое вещество, слюды и т.п. Светлых растворимых минералов – кварца и кальцита – напротив, гораздо меньше, чем в окружающей породе

Швы муллион-структур приурочены обычно к границам вещественных неоднородностей

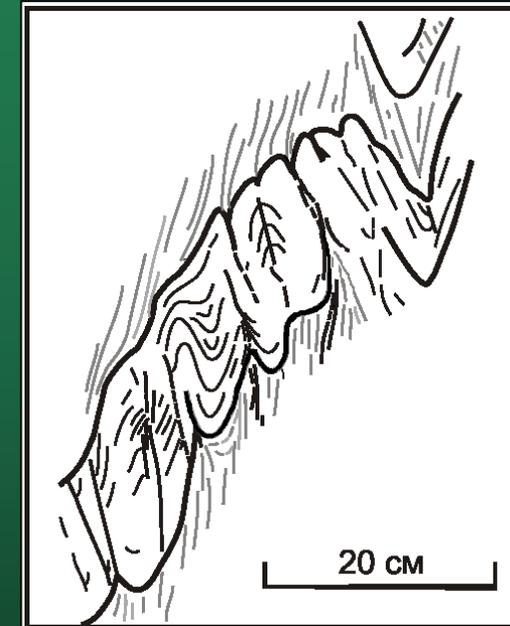


Швы развиваются на границах концентрации более вязких зерен



Швы используют сингенетические нарушения слоистости

# Реже миллионные швы связаны со структурными неоднородностями



Швы приурочены к замкам  
мелких складочек

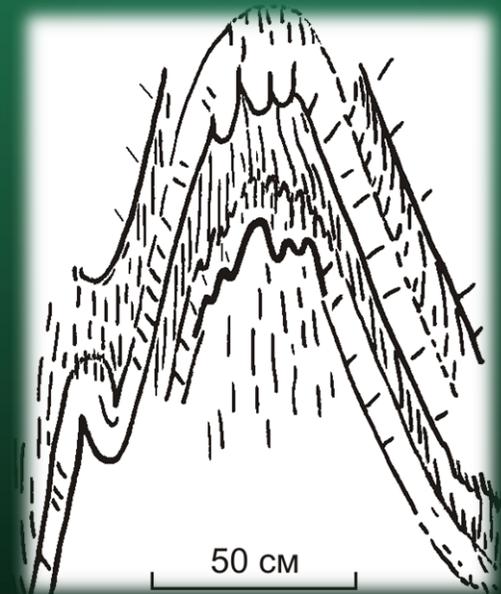
# Муллион-структуры в складках

Муллион-структуры расположены и ориентированы в складках так же, как кливаж

Поскольку МС развиты в вязких слоях, то они образуют прямой веер, а в сжатых складках субпараллельны их осевым поверхностям



МС развиты в замках и на крыльях складок (Таласский хр. Северный Тянь-Шань)



Незрелые МС развиты только в замке складки. Хр. Султан-Уиздаг

# Механизм образования муллион-структур

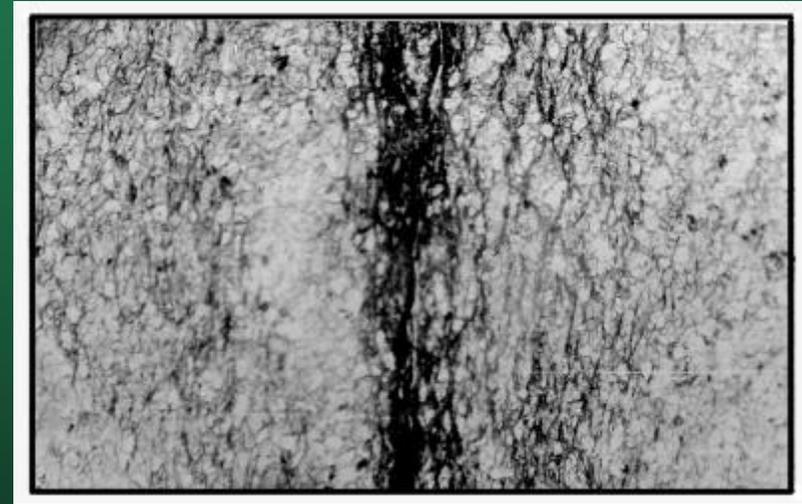
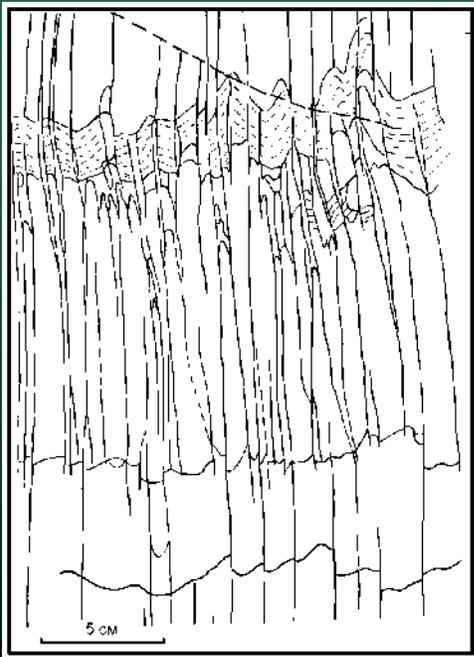
**Анализ фактического материала показывает, что**

- ▶ Образование муллион-структур связано с неоднородностью геологической среды на уровне отдельных слоев.
- ▶ На границах вещественных или структурных неоднородностей концентрируется деформация укорочения.
- ▶ Механизмом деформации, так же, как и в случае кливажа, является растворение под давлением

# Растворение

На участках концентрации деформации происходит растворение под давлением подвижных минералов и их вынос с помощью флюида.

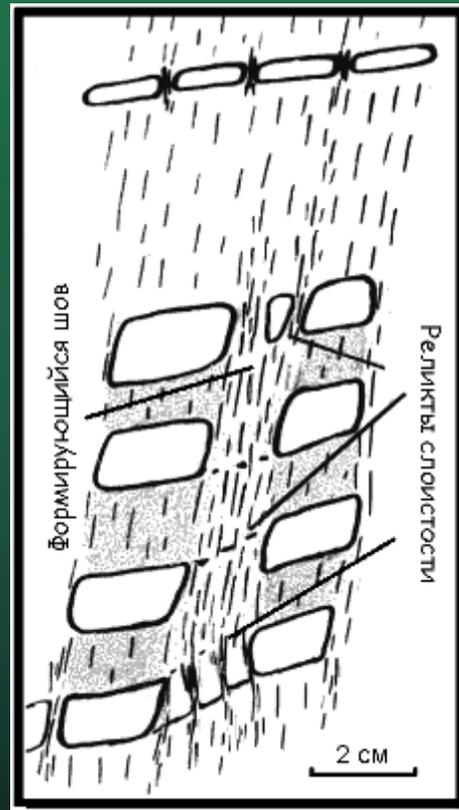
Процесс начинается с образования кливажа, а затем кливажные швы, сгущаясь и сливаясь, формируют муллионный шов



Швы постепенно разделяют вязкие слои на линзы, ориентированные поперек слоев

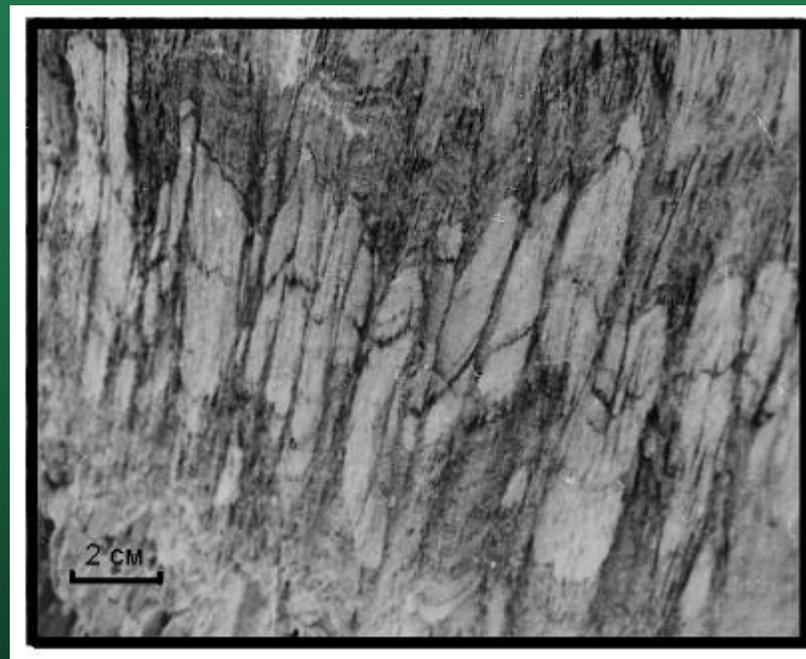
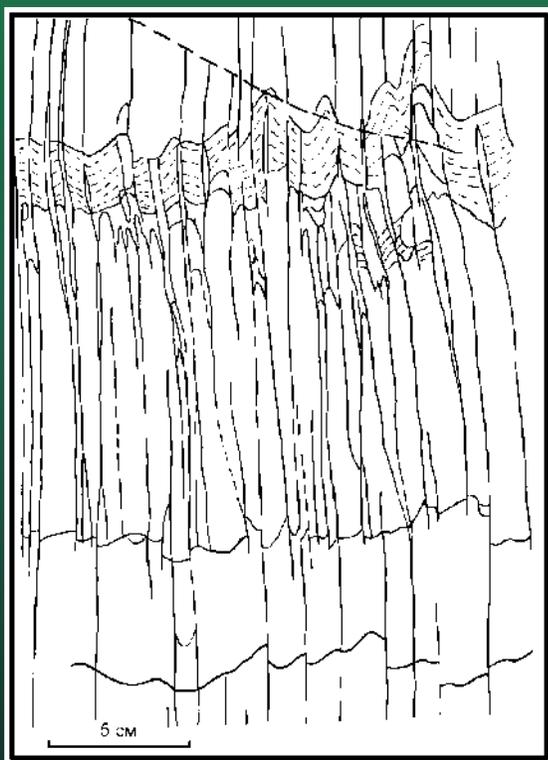
*Рис. и фото: А.Г. Малюжинец, Н.С. Фролова*

В начале процесса в швах сохраняются реликты слоистости, которые постепенно утрачиваются (доказательство предложенного механизма растворения под давлением!)



В швах концентрируется деформация укорочения

Это приводит к эффекту  
«ложных смещений» вдоль линз



На самом деле никаких смещений вдоль муллионных швов не происходит – сближаются лишь «стенки» швов

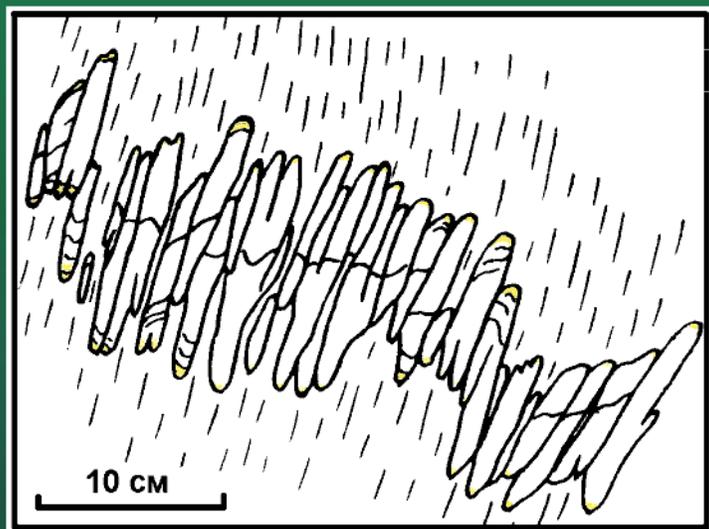
*Рис. и фото: А.Г. Малюжинец, Н.С. Фролова*

# Переотложение

Растворенный материал выносится из швов и кристаллизуется на участках с пониженным давлением



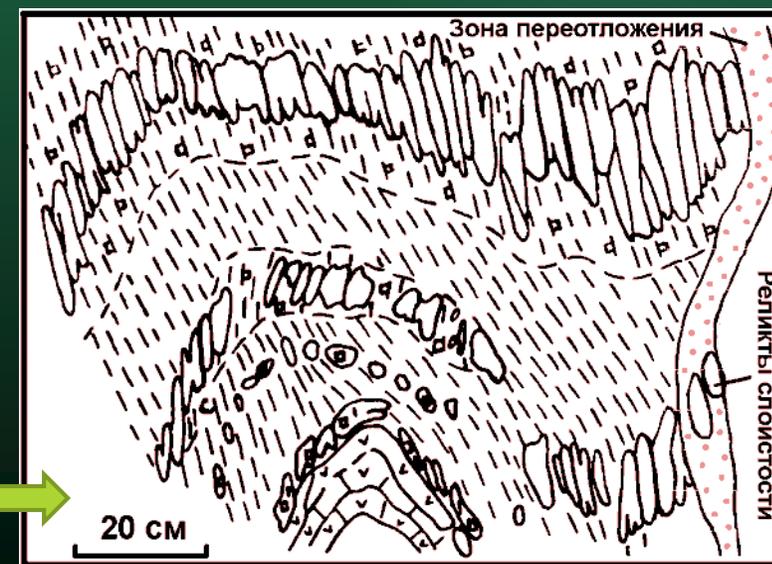
<https://www.wikiwand.com/de/Mullion>



**Ближний перенос:**  
кристаллизация в тенях  
давления – в торцах линз



**Дальний перенос:** образование  
жилок и новообразованных тел  
во вмещающих породах

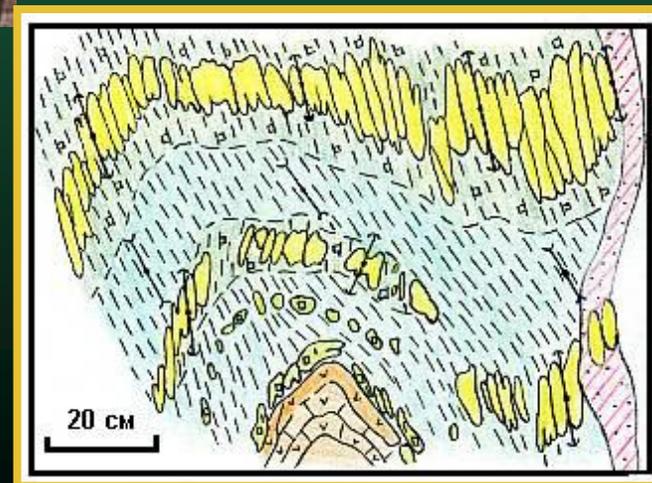


# ВЫВОДЫ

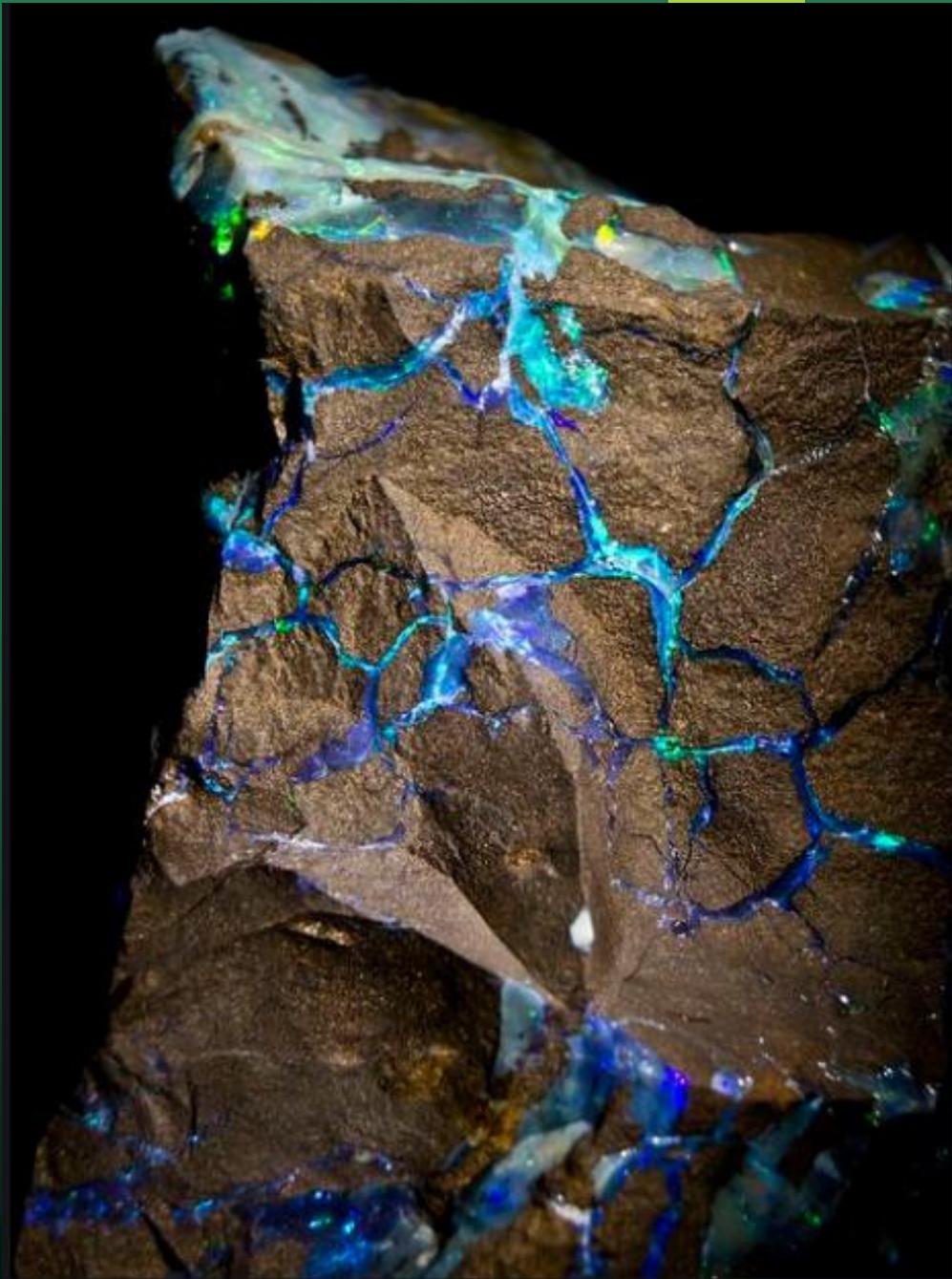
- ▶ Муллион-структуры формируются, в принципе, также, как кливаж зернистых пород, но это более крупные и сложные образования, связанные с наличием неоднородностей уровня отдельных слоев.
- ▶ На первом этапе складкообразования перпендикулярно оси максимального укорочения закладываются швы муллион-структур, приуроченные к границам неоднородностей. Здесь происходит концентрация деформации укорочения
- ▶ Механизмом деформации является растворение под давлением
- ▶ На следующем, собственно складчатом этапе, вдоль этих швов могут происходить смещения, аналогичные смещениям вдоль поверхностей кливажа.



Это тоже муллионы  
Похоже?



# Минеральные жилы





[http://www.photoline.ru/photo/1321909079?rzd=au\\_victorr](http://www.photoline.ru/photo/1321909079?rzd=au_victorr)



*Карелия. Фото Н. Тарасова*



*Интернет-ресурс*



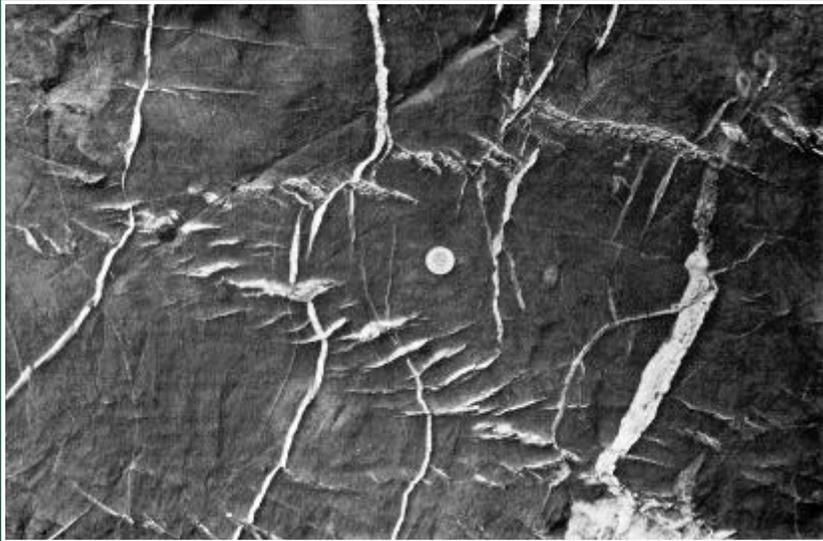
<https://juvelirum.ru/spravochnik-po-dragotsennym-metallam/zoloto/zoloto-v-prirode/>

**Минеральные жилы** - это заполненные минеральным веществом (отличным от окружающего) трещины в горных породах

Они чаще всего представляют собой зоны отложения вещества, растворенного в процессе компрессионной ползучести



Линзовидные жилы. Хр. Эспадан.  
*Фото Н.С. Фроловой*



*(no Ramsay, Huber)*

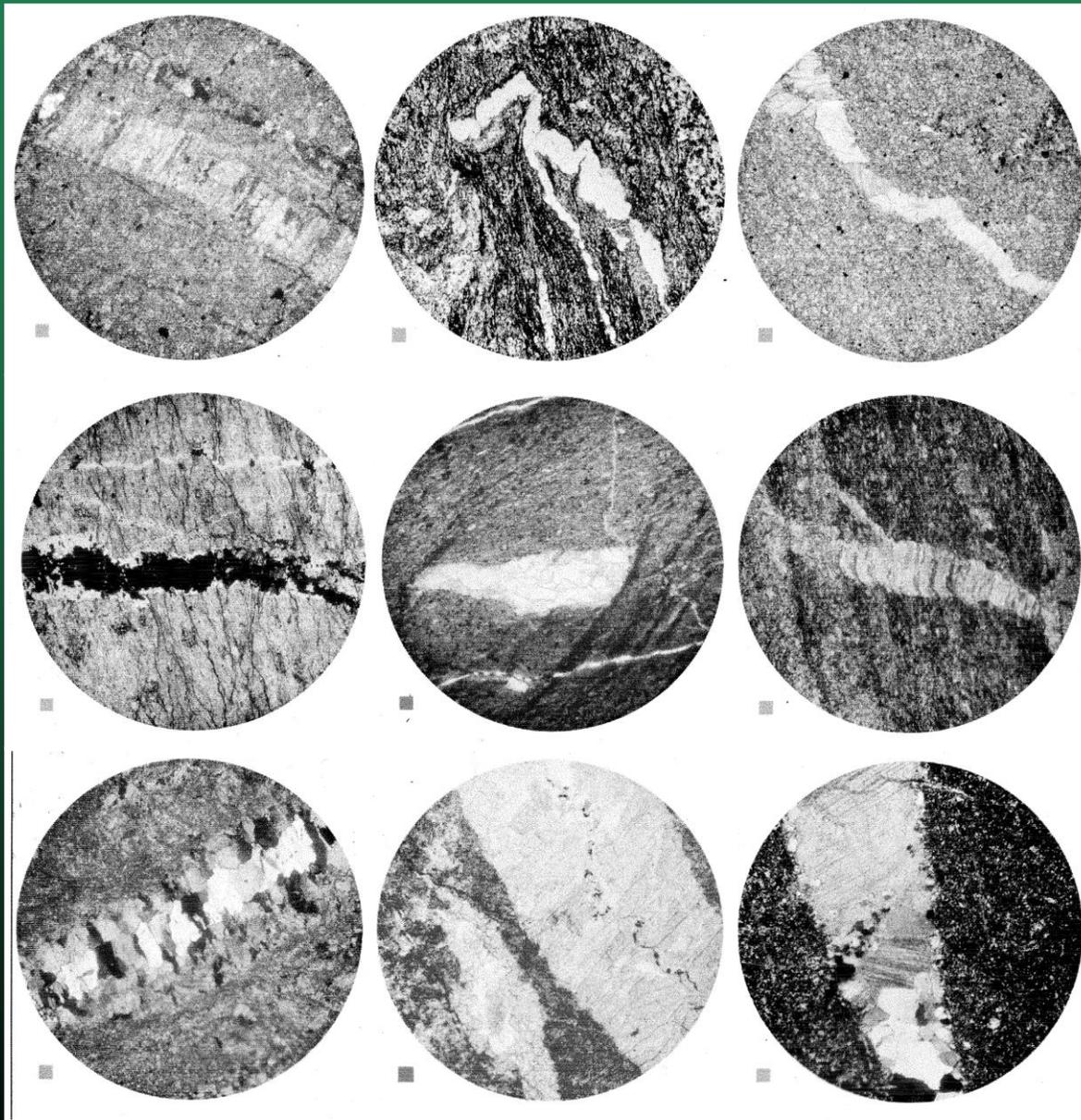


*(no Ramsay, Huber)*

# Классификация минеральных жил по внешней морфологии:



- Плоскостные (планарные и изогнутые)
- Неплоскостные
- Сквозные
- Несквозные
- С выдержанной мощностью
- С меняющейся мощностью

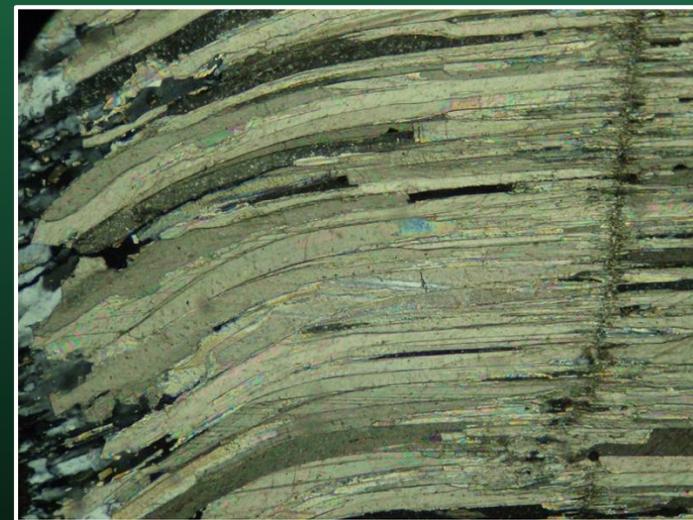
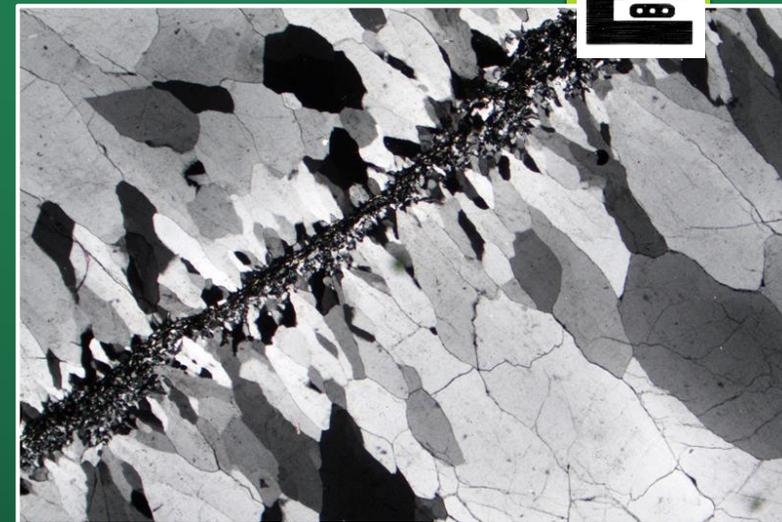
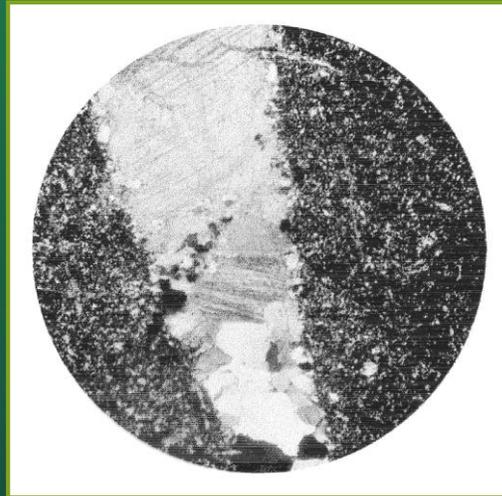
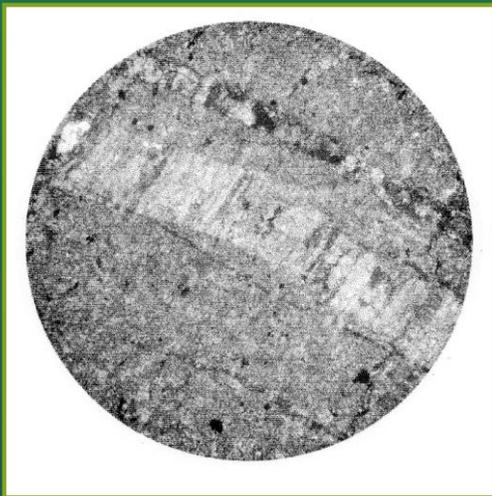


(по А.Б. Кирмасову)

# Различные типы жил по внутренней морфологии:



волокнистые (с прямыми или изогнутыми волокнами),  
неволокнистые, с сутурным швом и без него



**Минералы жил:** кварц, кальцит, хлорит, полево шпат, эпидот.  
Состав жил определяется геохимической специализацией флюида и минералы служат индикаторами рТ условий.

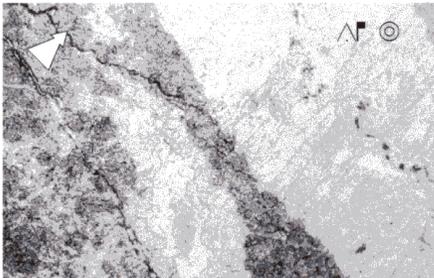
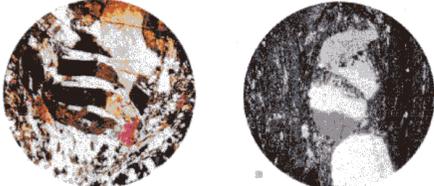
*Alex Strekeisen*

*(<https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/veins.php>)*

# Жилы зарождаются в зонах пониженных напряжений (зоны предразрушения и разрушения)

### ЗАРОЖДЕНИЕ ЖИЛЫ

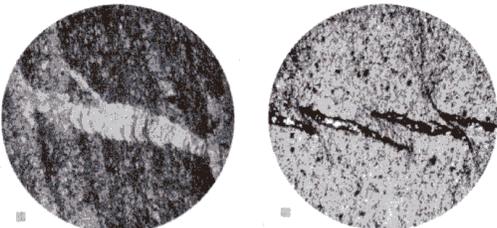
1. НА СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

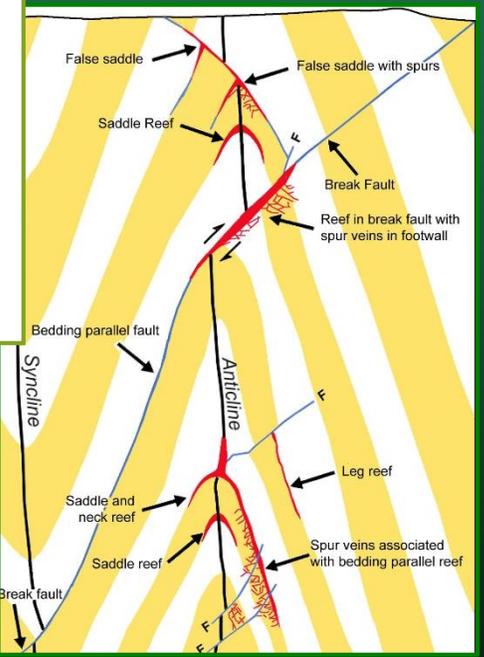
### СТАДИЯ РОСТА

модель Гриффитса

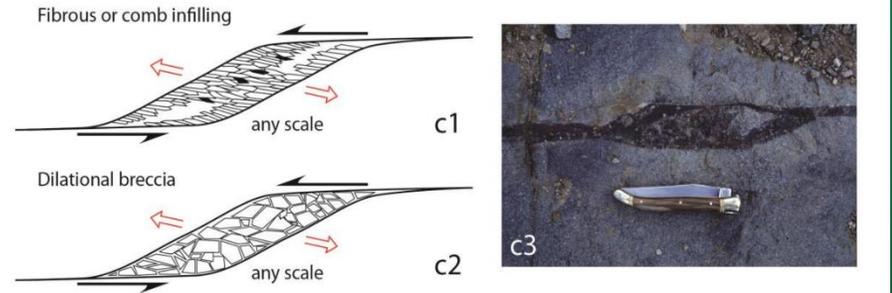
концентратор напряжений

2. В ОТСУТСТВИЕ ЯВНЫХ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ



По Dominy et al./ 2003



Chauvet, 2019  
<https://sciprofiles.com/profile/326734>

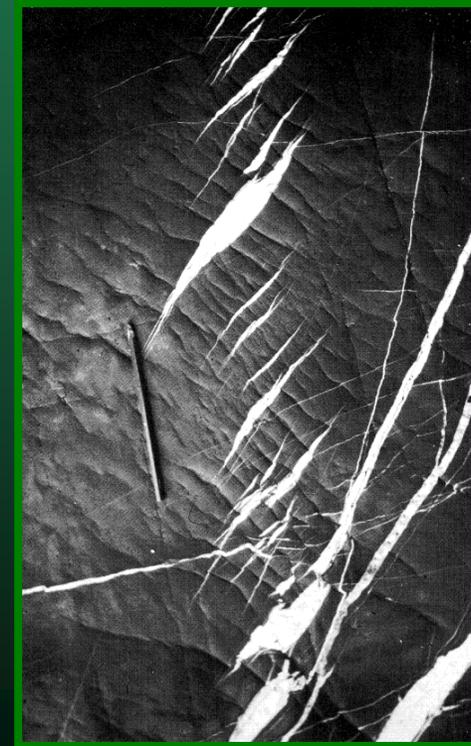
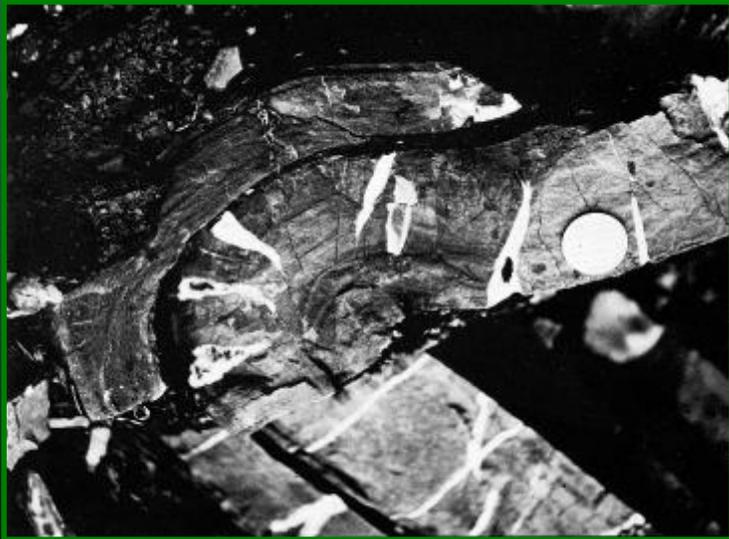
Зоны декомпрессии, связанные с развитием деформационного процесса в разных механических условиях

# Минеральные жилы (макромасштаб).

Растворенное вещество откладывается в потенциальных пустотах



Примеры: межслоевые полости в замках складок; трещины отрыва, образующиеся при изгибе и сдвиге



*(все фото по Ramsay, Huber)*

# ВОЛОКНИСТЫЕ ЖИЛЫ

- а) указывают на ориентировку удлинения
- б) могут расти от поверхности раздела волокон и флюида (антитаксиальные), либо на одной или более поверхностях трещин (синтаксиальные).
- в) в сколовых трещинах минералы ориентированы под очень острым углом к стенкам, образуя «зеркала скольжения»;
- г) жилы с вытянутыми зернами образуются за счет раздвигания стенок трещин и постепенного нарастания кристаллов;
- д) изогнутые волокнистые жилы указывают на сдвиговую составляющую деформации;
- е) при отжиге (для кварца это нагрев до 300-350°) происходит рекристаллизация и потеря информации.



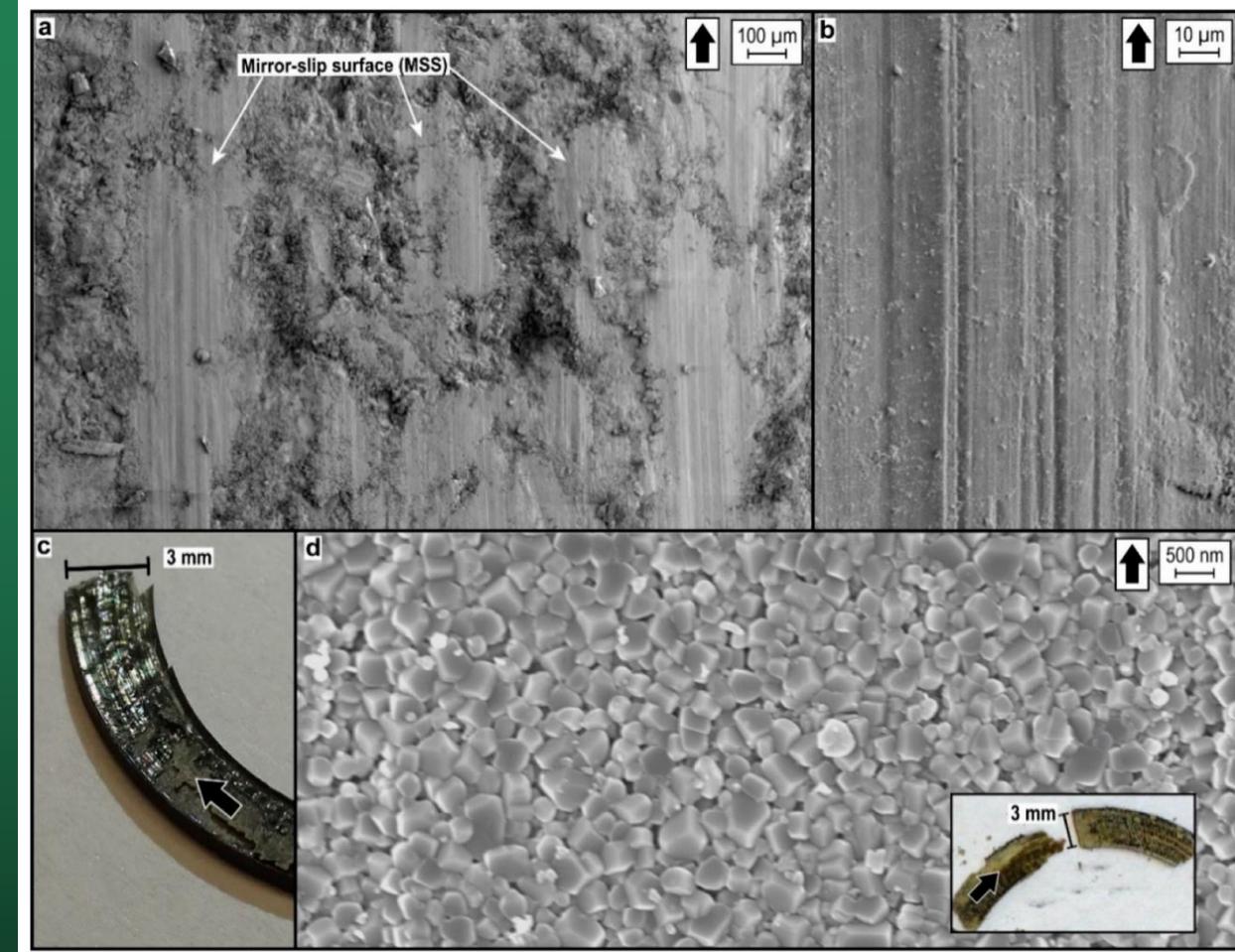
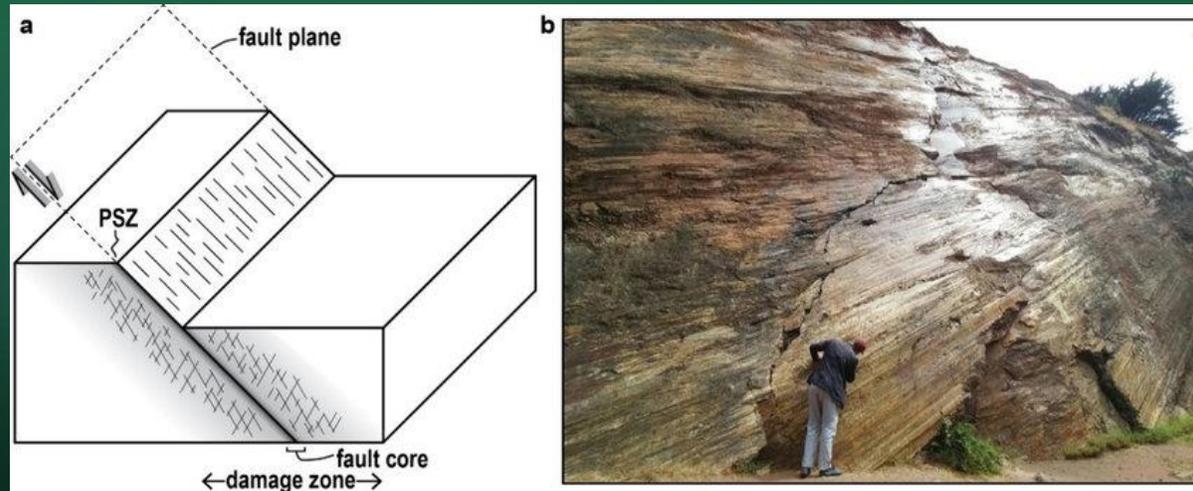
*Alex Strekeisen*

*(<https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/veins.php>)*



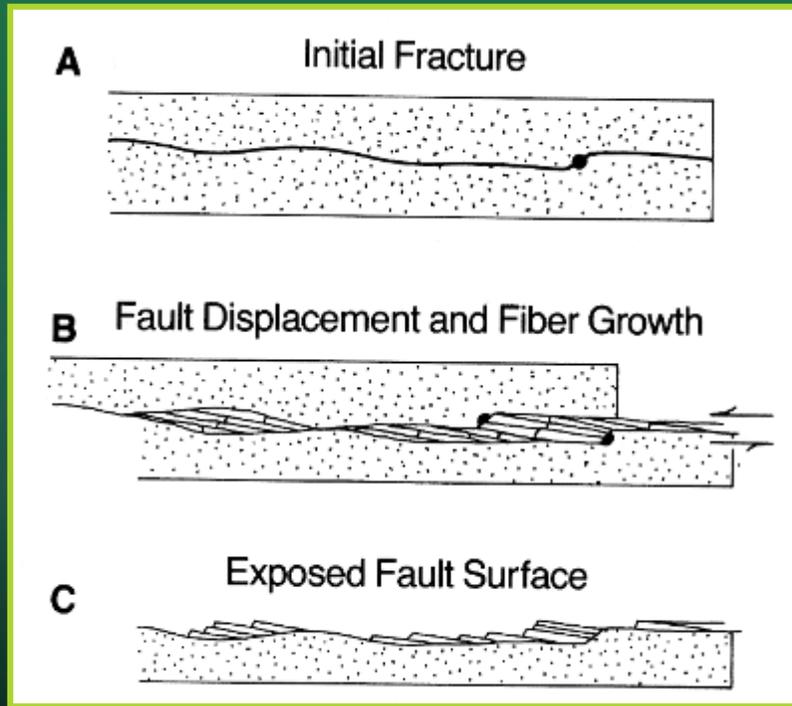
*(no Ramsay, Huber)*

# Волокнистые жилы в зеркалах скольжения



Зоны сдвига с зеркалами скольжения, сформировавшимися в искусственной кальцитовой трещине, сдвигаемой в условиях эксперимента

В сколовых трещинах минералы ориентированы под очень острым углом к стенкам, образуя «зеркала скольжения»; жилы с вытянутыми зернами образуются за счет раздвигания стенок трещин и постепенного нарастания кристаллов

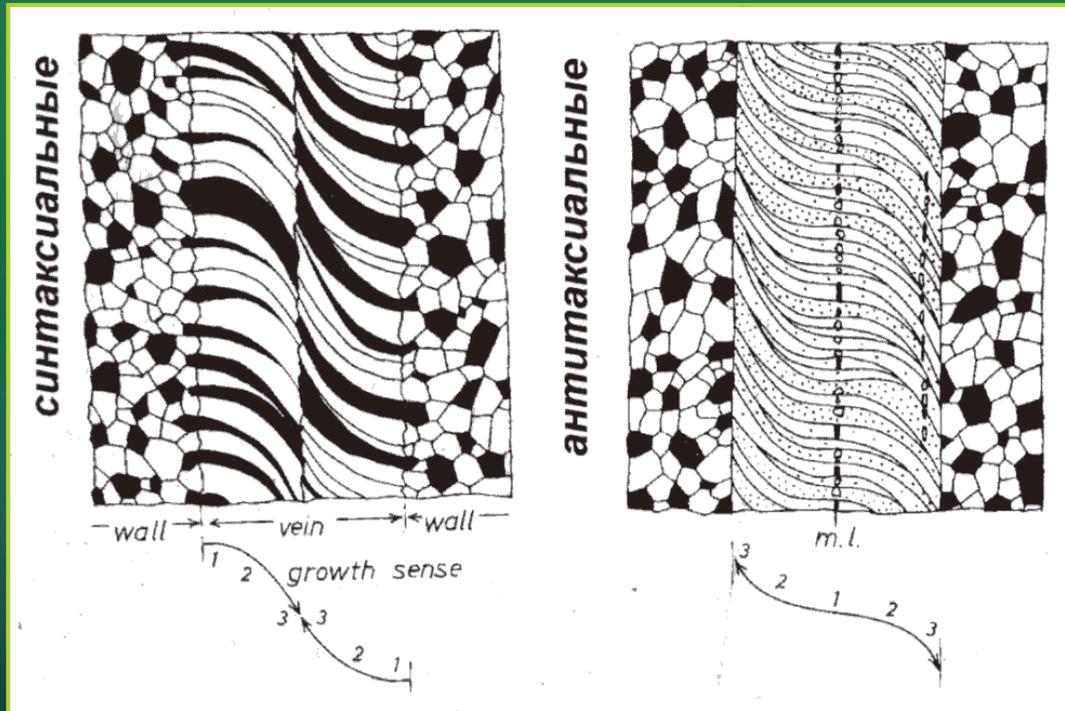


Формирование зеркал скольжения (по Дж. Дэвису)

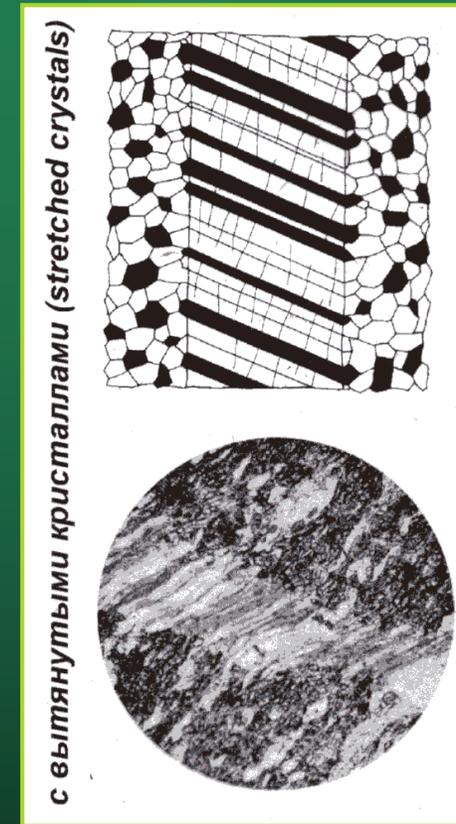


Крупное зеркало скольжения. Фото А.В. Муровской

# Волокнистые жилы в зонах сдвига



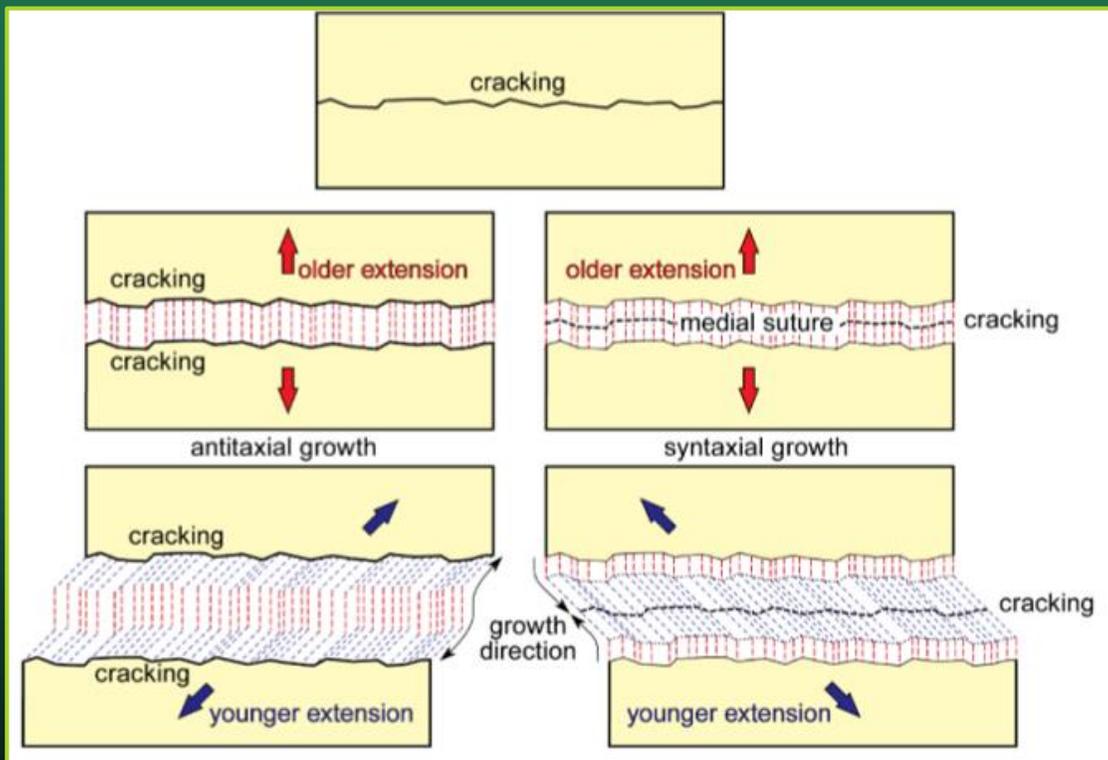
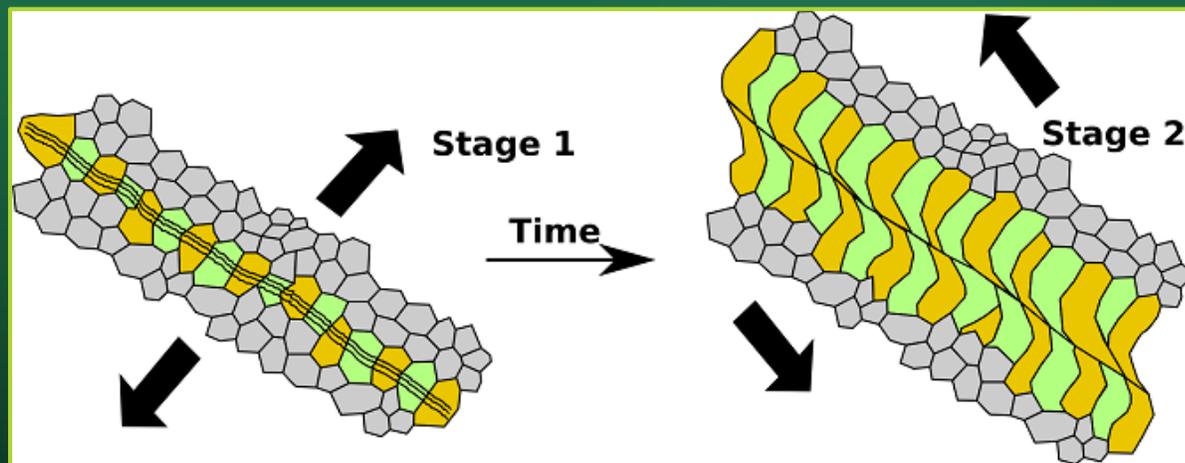
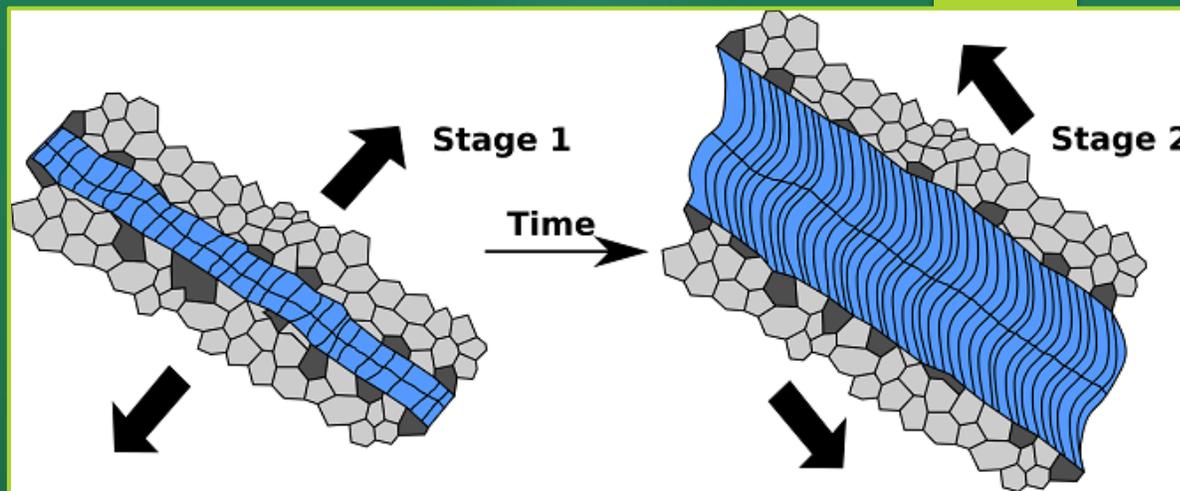
(no Ramsay, Huber)



Различные варианты роста волокон при раскрытии трещины

По волокнистым жилам можно восстановить локальную ориентировку оси растяжения и изменение ее положения в процессе деформации, величину деформации удлинения, а также смену геохимической специализации флюида

Еще схемы, показывающие антаксиальный и синтаксиальный рост волокнистых кристаллов в зоне сдвига

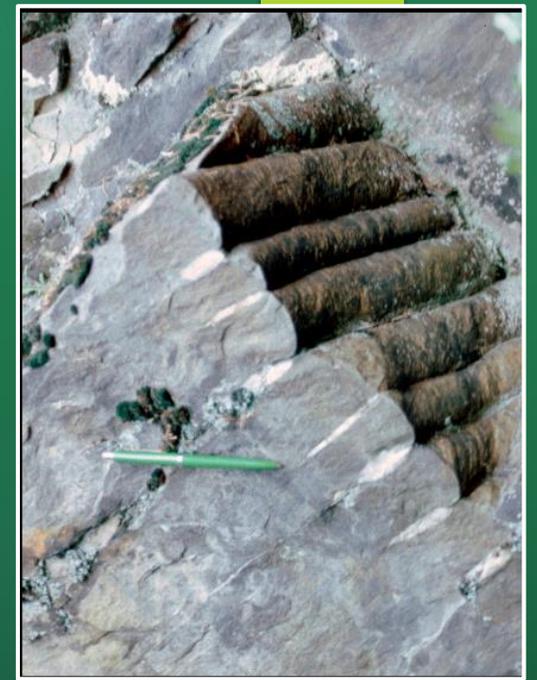


По Passchier (2005) из Alex Strekeisen  
(<https://www.alexstrekeisen.it/english/meta/veins.php>)

Жилы часто встречаются в парагенезе с кливажем, макрокливажными швами, муллион-структурами.



(по Ramsay, Huber)

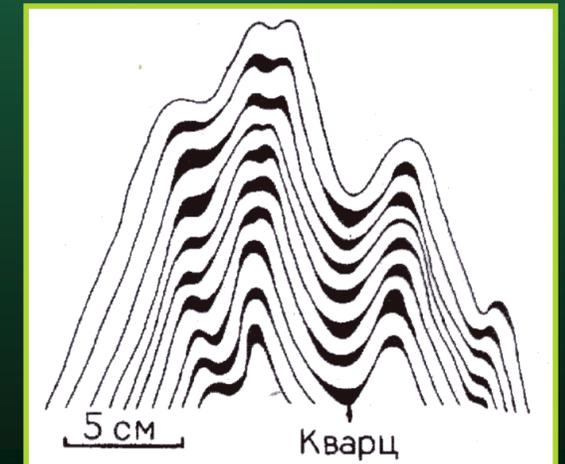
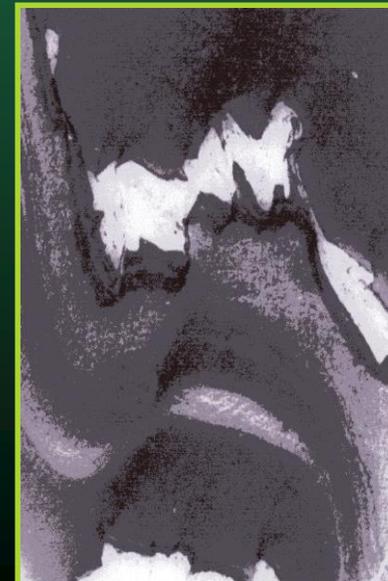


<https://www.wikiwand.com/de/Mullion>

В складках иногда формируется особый тип жил – седловидные жилы.



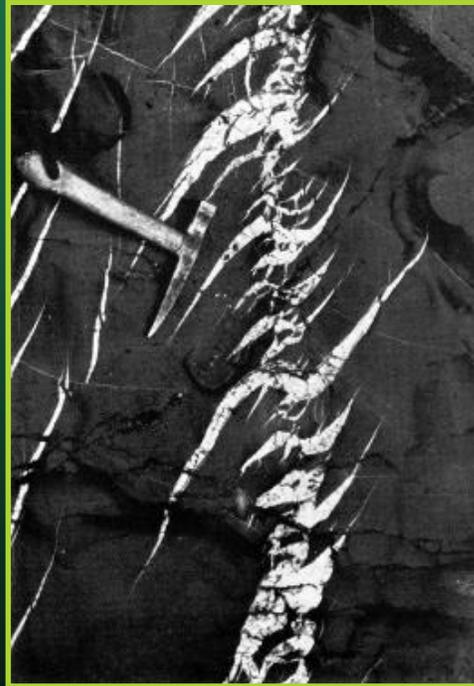
(по А.Б. Курмасову)



(по Arthaud, 1970 из Николая, 1992)

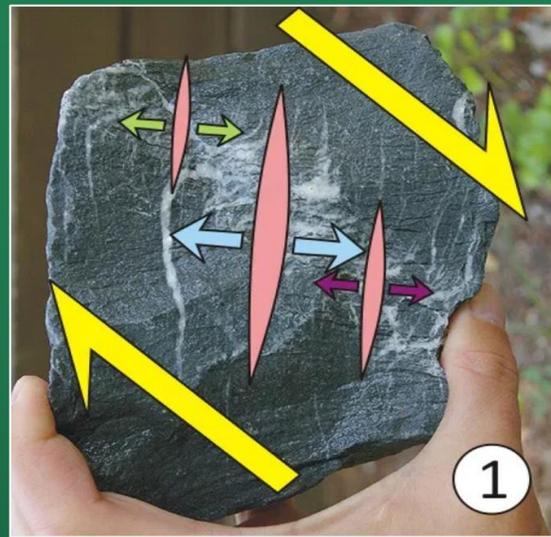
# Лестничные жилы в зонах сдвига

В зонах сдвига жилы располагаются кулисообразно. Это служит индикатором таких зон и позволяет установить направление смещения.



*(все фото по Ramsay, Huber)*

# Схема формирования S-образных жил в зоне сдвига



*Callan Bentley*

<https://mountainbeltway.wordpress.com/2010/08/24/tipping-your-tension-gash/>

# Задача

Дано: зона левого сдвига

Изобразить последовательный рост и изменение конфигурации S-образных кварцевых жил, формирующихся при раскрытии трещин отрыва



# Деформационно-химические парагенезы

- ▶ Структурные парагенезы можно выделять по механизмам деформации
- ▶ Одним из таких механизмов является растворение под давлением или компрессионная ползучесть (иногда ее также называют мокрой ползучестью)
- ▶ Этот механизм проявляется при весьма низких скоростях деформирования и наличии в породах флюида
- ▶ Действует не повсеместно, а выборочно, в зависимости от минерального состава пород, степени их структурной неоднородности, термодинамических условий и условий нагружения, pH среды, агрессивности флюида и т.п., т.е. в определенных породах и условиях.
- ▶ Комплексы парагенетически связанных структур растворения и структур переотложения растворенного вещества названы *деформационно-химическими парагенезами* (Гончаров, Талицкий Фролова, 2005)
- ▶ Структурами растворения являются кливажные, макрокливажные, миллионные швы. Парагенетически связанные с ними структуры переотложения растворенного вещества имеют значительное масштабное и морфологическое разнообразие.

К деформационно-химическим парагенезам относятся закономерные сочетания стилолитовых швов и минерализованных трещин растяжения (трещин отрыва), кливажных зон, кливажных и муллионных швов и т.п. (структуры растворения) с "бородами нарастания" в "тнях давления" жестких элементов пород, минерализованными трещинами растяжения, минеральными заполнениями межбудинных пространств, "седловидными жилами" в замках складок и т.п. (структуры переотложения растворенного вещества).



*(no Ramsay, Huber, 1987)*

Отложение растворенного вещества  
близ места его растворения

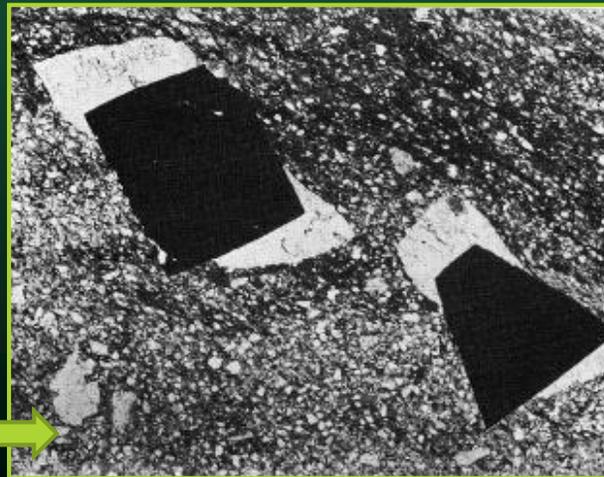
Структуры  
растворения



*(Фото В.Г. Талицкого)*

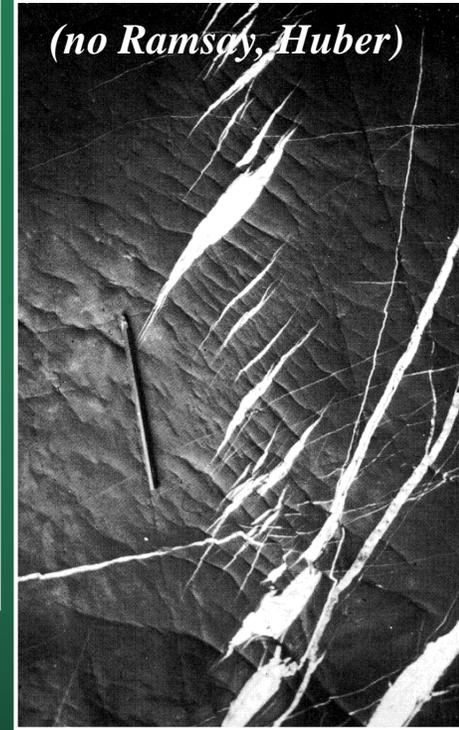
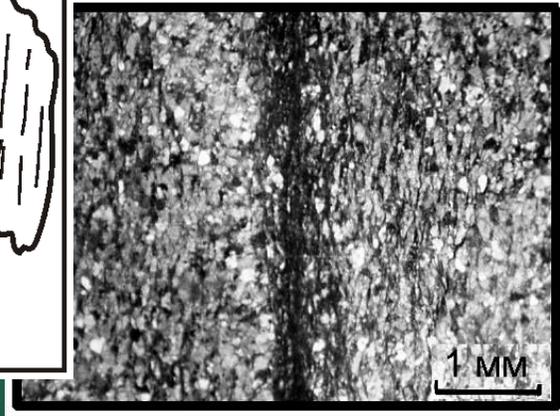
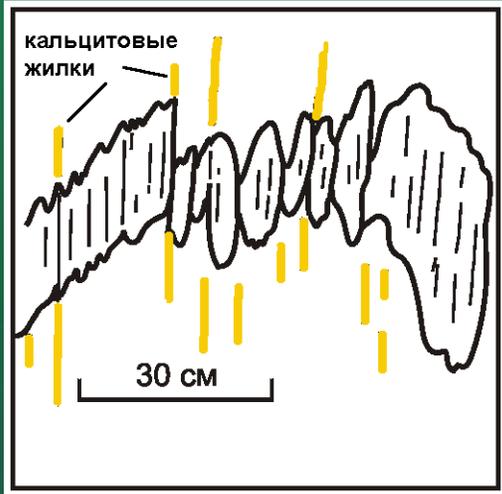


*Фото Н.С. Фроловой*

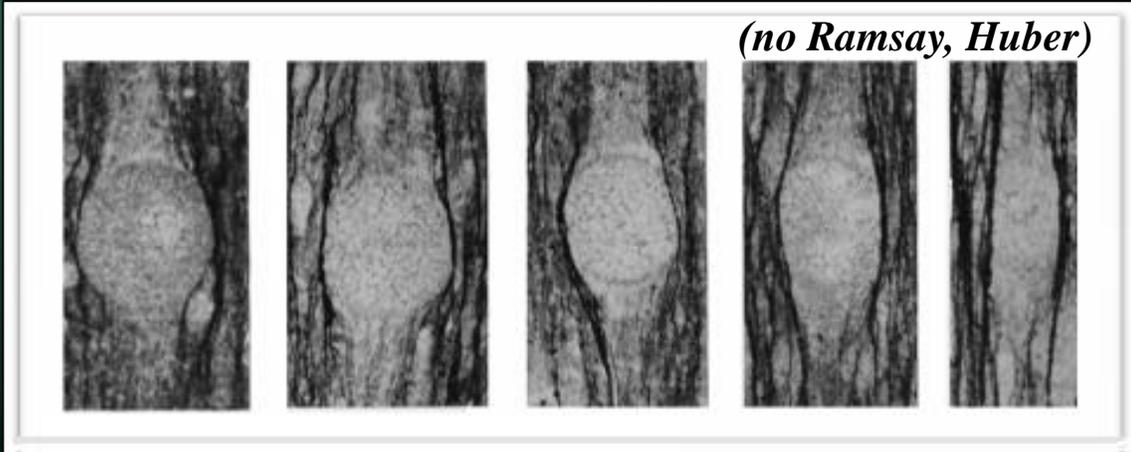


*(no Ramsay, Huber, 1987)*

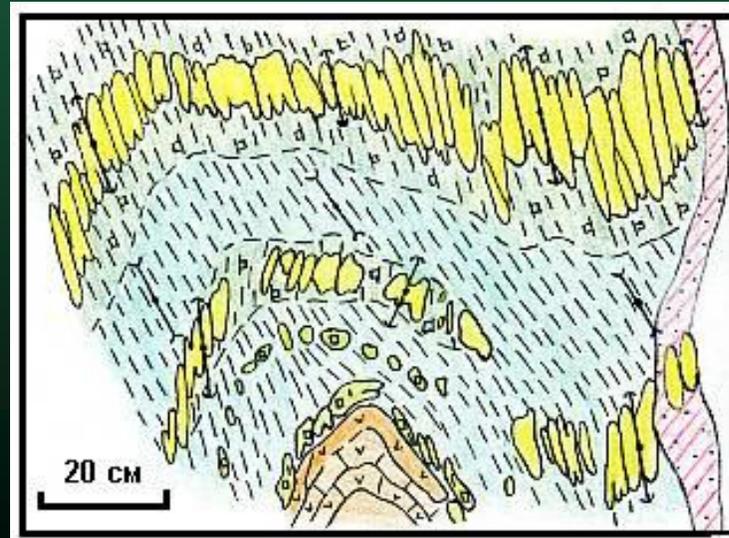
# Примеры зон растворения и переотложения



(no Ramsay, Huber)



Ближний перенос



Дальний перенос

Процессы растворения под давлением могут привести к изменению объема

# Будинаж и разлинзование



**Будинаж** - это деформационный процесс в механической обстановке растяжения, приводящий к разобщению плоских тел на фрагменты, длинная сторона которых параллельна простиранию тела.

Фрагментации подвергаются очень вязкие тела, находящиеся среди маловязких. Последние испытывают вязкое течение.

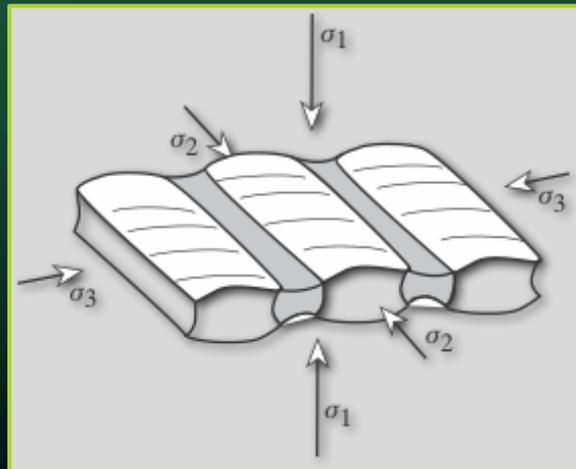
Сами тела называются будинами (от французского слова «колбаса»). Впервые этот термин был использован в 1908 году Максом Лоэстом.

Различные типы горных пород характеризуются различной вязкостью и прочностью при деформации, на которую существенно влияют температура, Давление, присутствие воды и давление флюида.

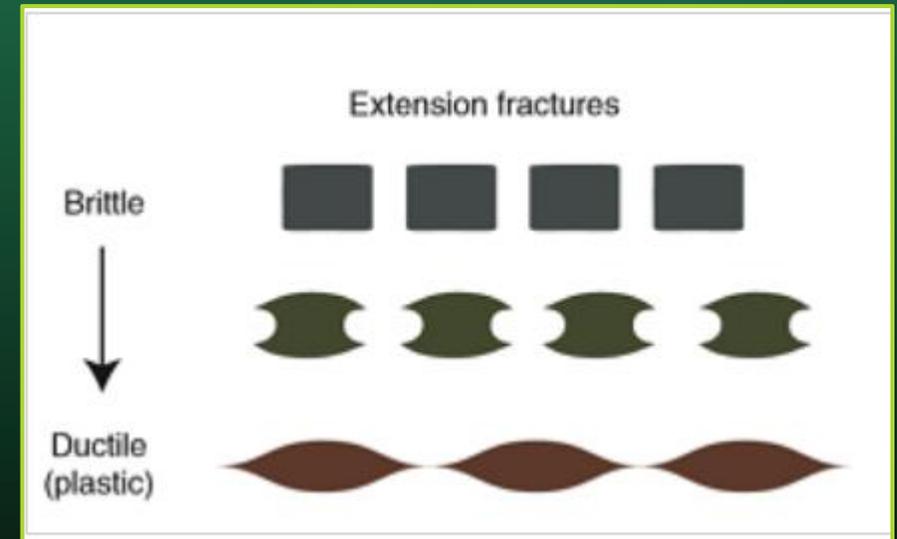
Стиль будинажа также может сильно различаться. Например, будины, показанные в нижней части рисунка, имеют форму линз и в отечественной литературе так и называются (для процесса их формирования употребляют термин разлинзование).

В англоязычной литературе они имеют наименование *Pinch-and-swell structures*

Ориентировка главных осей напряжений при будинаже



[http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Geos-2123/Boudins/Slb\\_02.html](http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Geos-2123/Boudins/Slb_02.html)

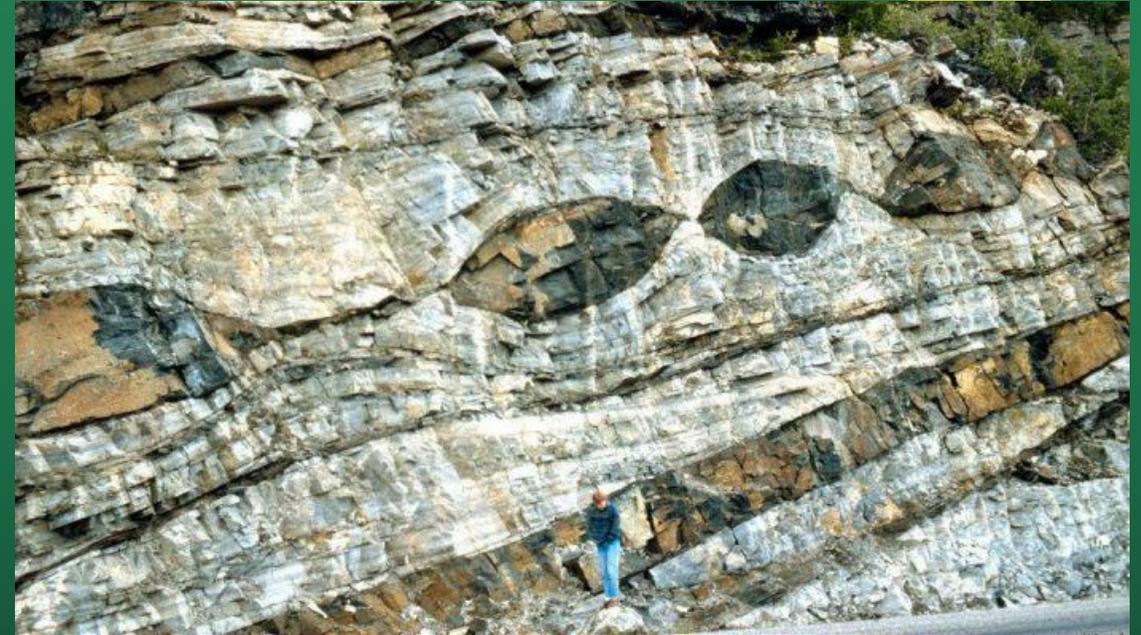


(no Fossen, 2010)

# Различная форма будин



*[uisite-boudinblogs.agu.org/mountainbeltway/  
2012/04/30/exqage-in-ontario/](http://uisite-boudinblogs.agu.org/mountainbeltway/2012/04/30/exqage-in-ontario/)*



*[Samuele Papeschi, 2019  
https://blogs.egu.eu/divisions/ts/2019/05/19/  
features-from-the-field-boudinage/](https://blogs.egu.eu/divisions/ts/2019/05/19/features-from-the-field-boudinage/)*



*<http://lisbonstructuralgeologist.blogspot.com/2010/>*

# Будинаж и муллион-структуры



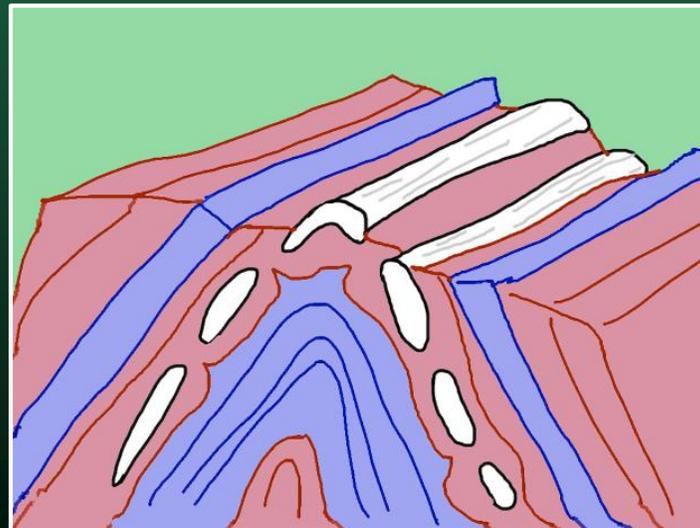
Муллион-структуры в турбидитах

*Bauer et al., 2020*

<https://blogs.agu.org/mountainbeltway/2011/10/19/bookshelved-mullions-from-norway/>



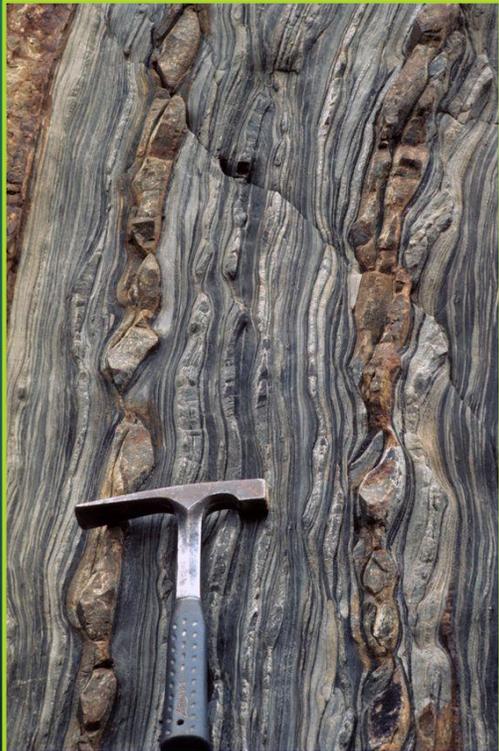
<http://lisbonstructuralgeologist.blogspot.com>



Будинаж и муллион-структуры не всегда различали

# Асимметричный будинаж

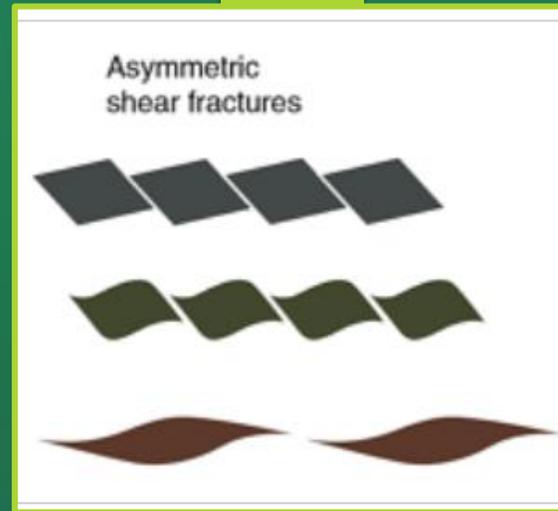
Будинаж может быть симметричными или асимметричными. В последнем случае будинаж может быть индикатором несоосной деформации



*Интернет-ресурс*

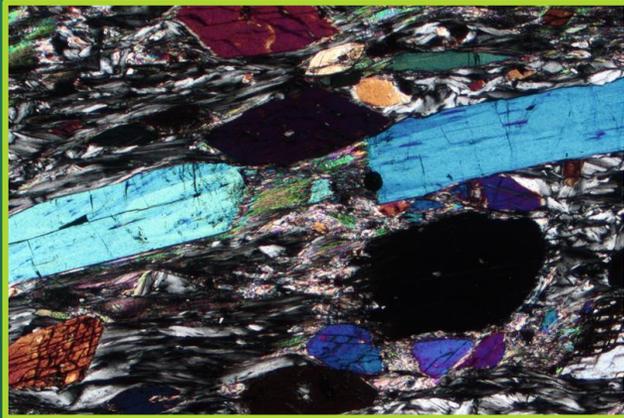


Асимметричный будинаж в амфиболитах.  
Фото *Samuele Papeschi*



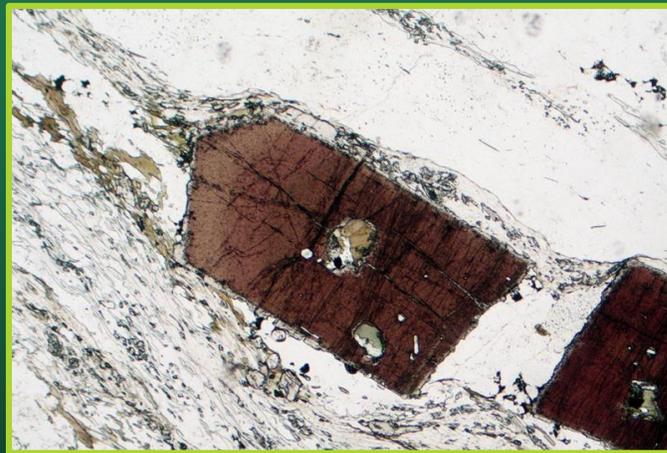
(Fossen, 2010)

# Будинаж на микроуровне



Будинированный кристалл амфиболита.  
Поле зрения 2 мм

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



Будинированный кристалл алланита.  
Поле зрения 7 мм



Будинированная кальцитовая жилка.  
Поле зрения 7 мм

Будинаж является очень важной структурой при изучении горных пород в полевых условиях. Она дает нам важную информацию о деформации, прочности и вязкости горных пород, условиях давления и температуры и наличия сдвиговой деформации.

