

Структурная геология и геологическое картирование

Лекция № 12

«Мезомасштабные (малые) структурные формы»

Линейность

Линейностью в горных породах называют любое множество проникающих протяженных текстур, имеющих выраженную преимущественную ориентировку. Нет **никаких ограничений** этих текстур по размеру, строению и составу. Главное состоит в том, что такая текстура должна быть характерной чертой строения породы.

Большая часть рассмотренных далее мезомасштабных структурных форм в той или иной степени обладает линейностью или объясняется через линейность.

Типы линейности

Линейность обособленных объектов – образуется параллельным расположением удлинённых объектов, которые отличаются от вмещающей их породы по составу: кристаллов минералов, их агрегатов, ксенолитов, деформированных галек, окаменелостей и пр.

Линейность пересечения – образуется при пересечении двух систем параллельных поверхностей, например, слоистости и кливажа (линии на поверхности кливажных пластин).

Линейность мелких пликативных структур – образуется шарнирами мелких складок, гофрировок и т.д.

Линейность мелких дизъюнктивных структур – образуется штриховкой на зеркалах скольжения, будинажем, муллион-структурами и т.д.

Модель линейности



Примеры линейности

Линейность может быть связана с деформациями и смещениями, а может быть и не связана. Наиболее очевидна связь с деформациями у линейности мелких пликативных и дизъюнктивных структур, а также линейности, выраженной собственно деформированными объектами. Хотя и в этих случаях использовать ее для интерпретации полей напряжения следует с осторожностью.

Линейность, выраженная расположением удлиненных обломков раздробленных кварцитов в биотит-плагиоклаз-кварцевом сланце. Ю. Урал



Линейность, выраженная расположением удлиненных агрегатов темноцветных минералов в биотит-плагиоклаз-кварцевом сланце. Ю. Урал

Линейность, выраженная расположением раздавленных галек в конгломератах. Ю. Урал



NB!
Элементы залегания линейности – это элементы залегания именно линий, а не плоскостей в которых они находятся!



Линейность, выраженная расположением фенокристаллов калишпата в гранитах. Ю. Урал

Линейность, выраженная штриховкой на поверхности зеркала скольжения Ю. Урал



Типы мезоструктурных элементов

- 1. Трещиноватость** – система разноориентированных поверхностей, разделяющих монолитные горные породы на отдельные блоки;
- 2. Кливаж** – система параллельных поверхностей, разделяющих массивы горных пород на отдельные параллельные пластины;
- 3. Сланцеватость** – плоскостная текстура горных пород, образованная планпараллельным расположением пластинчатых или листоватых минералов;
- 4. Структура будинажа** – ритмически сегментированный слой или жила, залегающие среди других пород;
- 5. Муллион-структуры** – линзы более компетентного материала, “плавающие” в глинистой массе и пересекающие слой;
- 6. Кинк-зоны** – полосы, пластины в тонколистоватых породах, секущие листоватость и ограниченные параллельными поверхностями излома;
- 7. Складки волочения** – приразломные складки, слои в которых подвернуты в сторону движения противоположного крыла;
- 8. Птигматитовые складки** – нерегулярные складки, в которые сминаются гидротермальные и другие жилы;

Трещиноватость – система разноориентированных поверхностей, разделяющих монолитные горные породы на отдельные блоки.

Трещины это более или менее регулярные группы разрывов различных морфологических типов:

- параллельные;
- радиальные;
- концентрические;
- веерообразные;
- столбчатой отдельности.

Системы трещин – комбинации двух или более пересекающихся групп трещин. Наряду с регулярными трещинами встречаются такие, которые контролируются особенностями самой породы (послойные трещины, шаровая отдельность и пр.) или формой геологического тела (послойные, контракционные и пр.)

Происхождение трещиноватости

Трещины могут образовываться в самых разных условиях.

1. Группа гипергенных трещин:

- трещины усыхания;
- десквамационные трещины;
- трещины, образующиеся при литификации осадков

2а. Группа эндогенных нетектонических (прототектонических) трещин:

- контракционные

2б. Группа эндогенных тектонических трещин



Десквамация



Система "концентрических" десквамационных трещин в габбро. Ю. Урал

Десквамационные трещины развиваются из ортогональной трещиноватости путем постепенного "сглаживания углов" при смыкании ортогональных трещин («шаровая» или «псевдошаровая отдельность»).

Десквамационные
трещины в габбро.
Ю. Урал

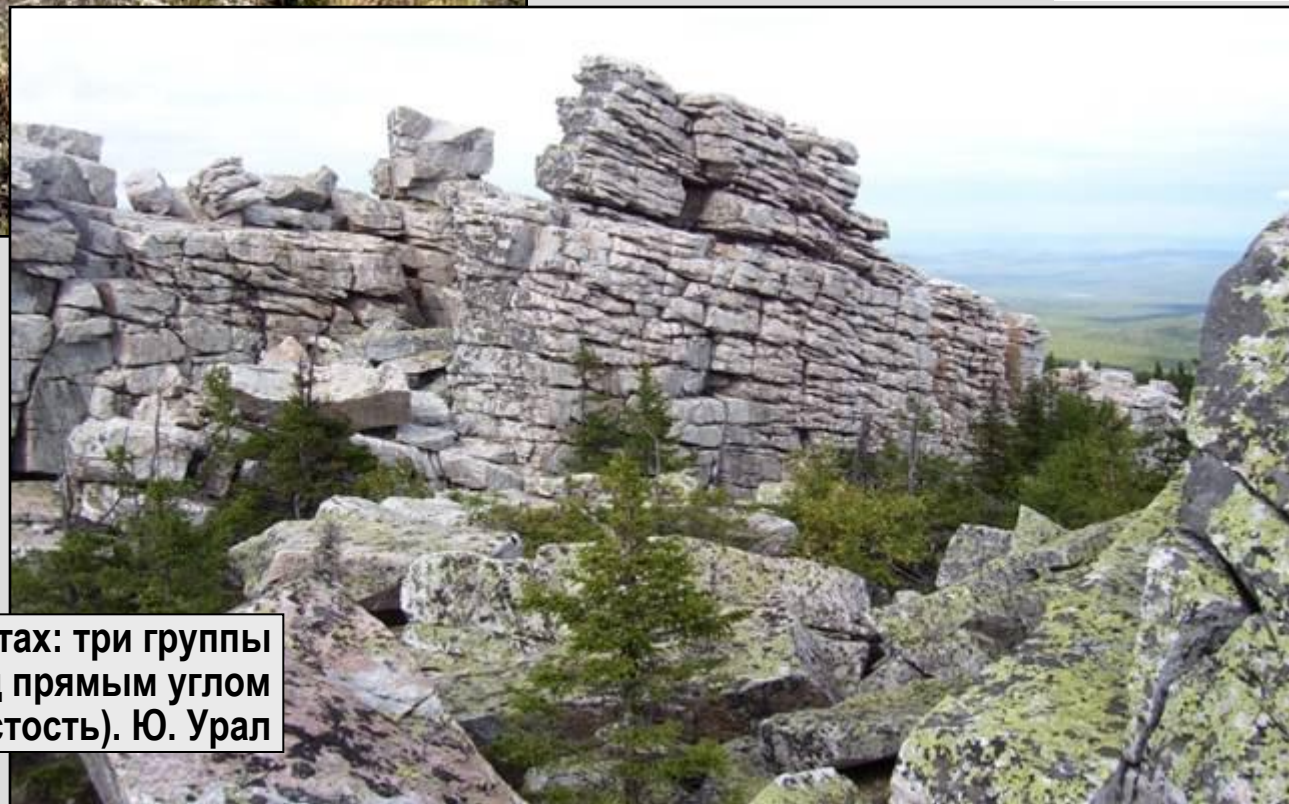
План

Разрез

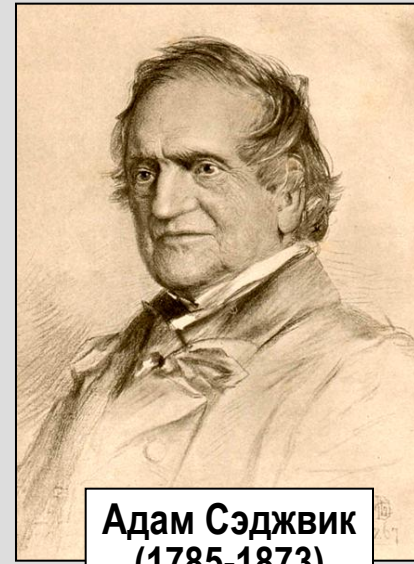
Хорошо видна первичная система трех
почти ортогональных групп трещин –
две крутых, одна пологая

Контракционные трещины

Система трещин в гранит-порфирах:
три группы трещин, пересекающихся
под прямым углом. Ю. Урал



Система трещин в кварцитах: три группы
трещин, пересекающихся под прямым углом
(одна из них – по слоистость). Ю. Урал



Адам Сэдзвик
(1785-1873)

Кливаж – *процесс* образования сети трещин в горных породах вдоль линий их естественного разлома. Он вызывается сжатием при изгибании и метаморфизации пород. В результате порода приобретает свойство легко раскалываться в направлении, параллельном кливажу. Линия кливажа следует линии расположения минералов в породе [Научно-технический энциклопедический словарь]

Кливаж – *способность* пород раскалываться на пластинки и призмы по густо развитой системе параллельных поверхностей, секущих слоистость или согласных с ней. Возникает за счет параллельной ориентировки удлиненных минералов... [Геологическая энциклопедия]

Кливаж – "... *множество* близко расположенных параллельных вторичных плоскопараллельных текстурных элементов, которые придают породе механическое свойство анизотропии, не нарушая ее целостности" [Джон Г. Деннис, Калифорнийский университет]

Кливаж (*clivage* [фр.] – расслаивание, расщепление) – **расщепление** горных пород на тонкие пластины, наблюдаемое в местах распространения линейных складок слоев земной коры, которые возникают вследствие тектонических движений [В. В. Белоусов. Большая советская энциклопедия]

Кливаж

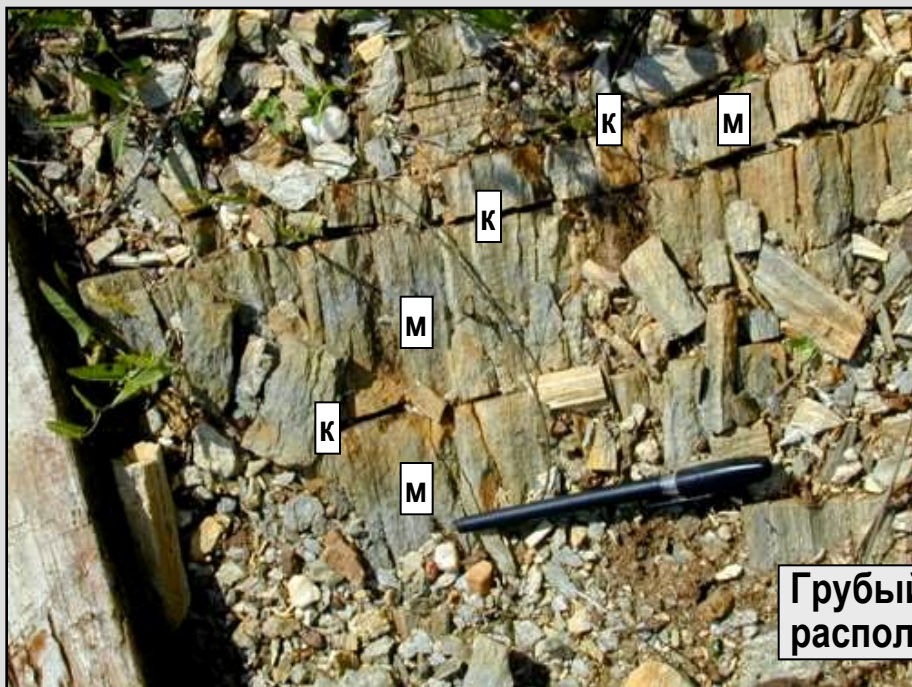
Тонкий кливаж в известняках. Ю. Урал



Основные элементы кливажа:

микролитоны (м) – пластины горной породы, в которых сохраняется первичная структура;

кливажные зоны (к) – тонкие планпараллельные участки с вторично ориентированной текстурой, разделяющие микролитоны.



При **сплошном кливаже** все пластинчатые зерна ориентированы параллельно одной поверхности.

При **прерывистом кливаже** отдельные домены плитчатого строения разделены тонкими участками (*ламелями*) с более ранней, иначе ориентированной структурой.

Грубый кливаж в алевролитах. Микролитоны расположены поперек слоистости. Ю. Урал

Осевой кливаж

Как правило, кливаж бывает параллелен **осевым поверхностям складок**, в этом случае его называют – **главным**, или **осевом кливажем**. Поэтому по залеганию кливажа в большинстве случаев можно отличить прямые складки (кливаж вертикальный) от наклонных и опрокинутых (кливаж наклонный). У горизонтальных складок кливаж, естественно – горизонтальный.



Кливаж осевой поверхности в сланцах. Фото А.Б. Кирмасова

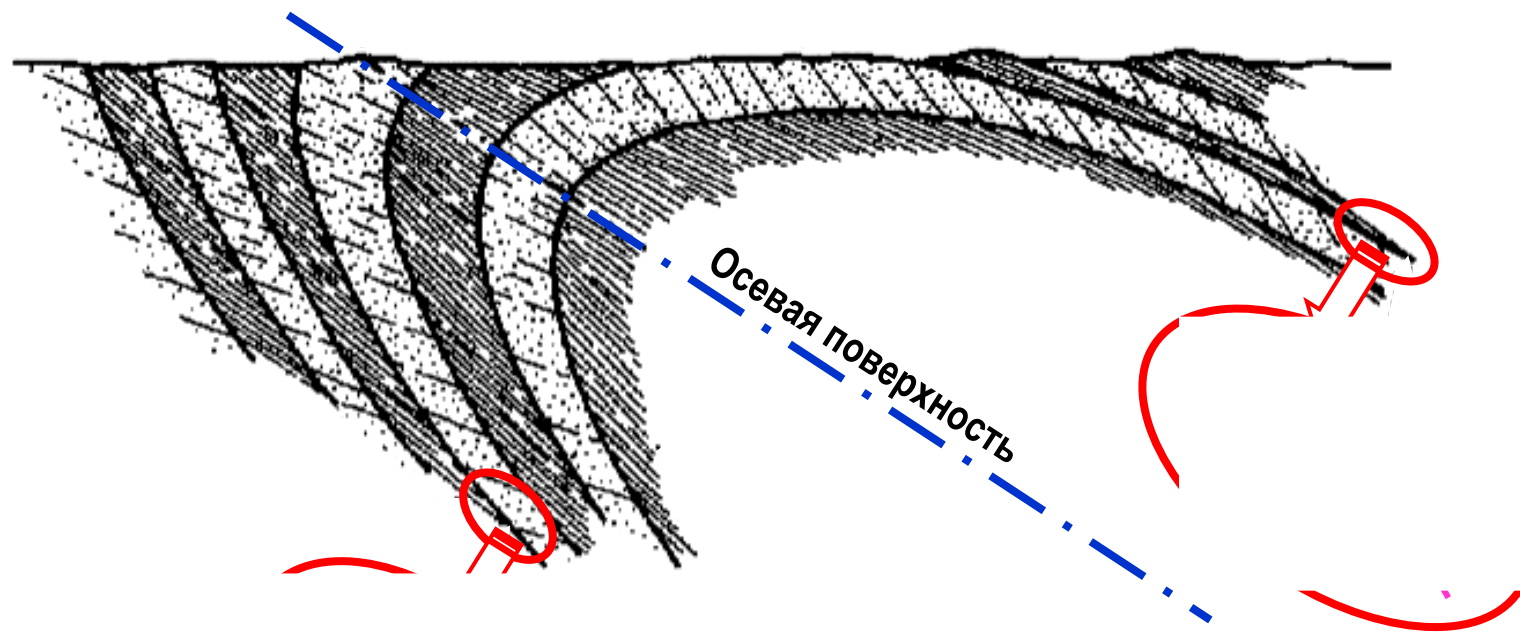


Кливаж осевой поверхности.
www.rci.rutgers.edu/.../st...olds.gif

NB!
Видимых смещений по кливажным зонам нет, однако они безусловно существуют на микроуровне.

Правило кливажа

Отличить наклонные складки от опрокинутых (т.е. определить характер залегания слоев) можно только по соотношению залеганий слоистости и осевого кливажа.



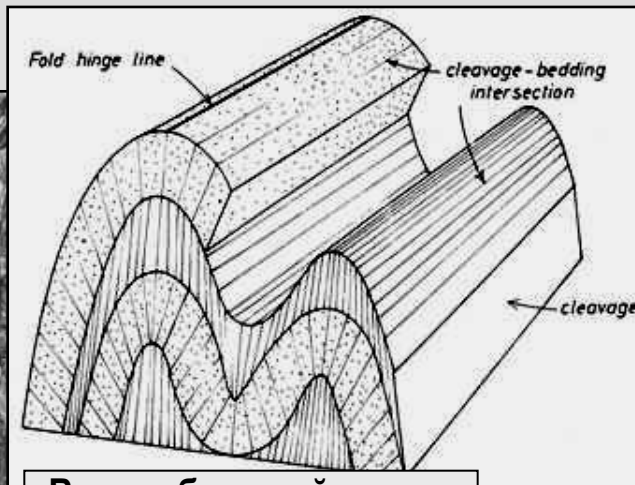
Соотношение слоистости и кливажа осевой поверхности (по Ramsay, Huber, 1983)

ВВ! Если кливаж осевой поверхности залегает круче слоистости – слой залегает нормально

ВВ! Если кливаж осевой поверхности залегает положе слоистости – слой перевернут

Веерообразный кливаж

Если толща сложена породами разной реологии, то на границе компетентных и некомпетентных слоев обычно наблюдается излом, преломление кливажа и он становится **веерообразным**.

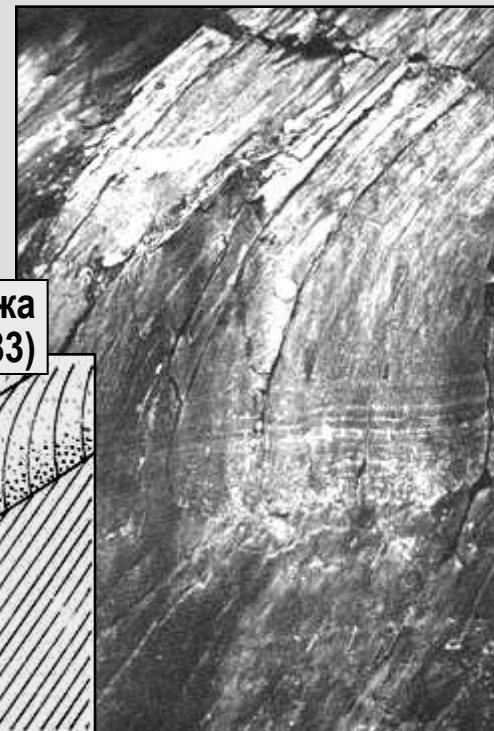
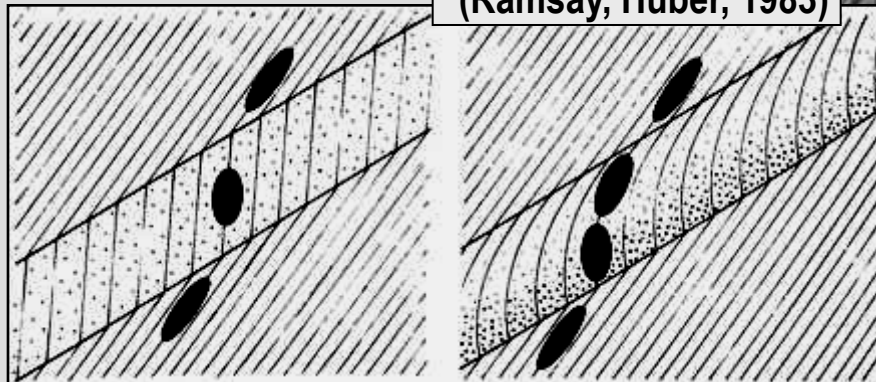


Веерообразный кливаж
(Ramsay, Huber, 1983)

ВВ! В компетентных слоях кливаж образует расходящиеся веера (прямой кливаж), а в некомпетентных – сходящиеся (обратный кливаж)!

Преломление кливажа на границе слоев называется **рефракцией кливажа**. При резкой смене состава пород кливаж тоже преломляется резко, а при постепенной – плавно.

Рефракция кливажа
(Ramsay, Huber, 1983)

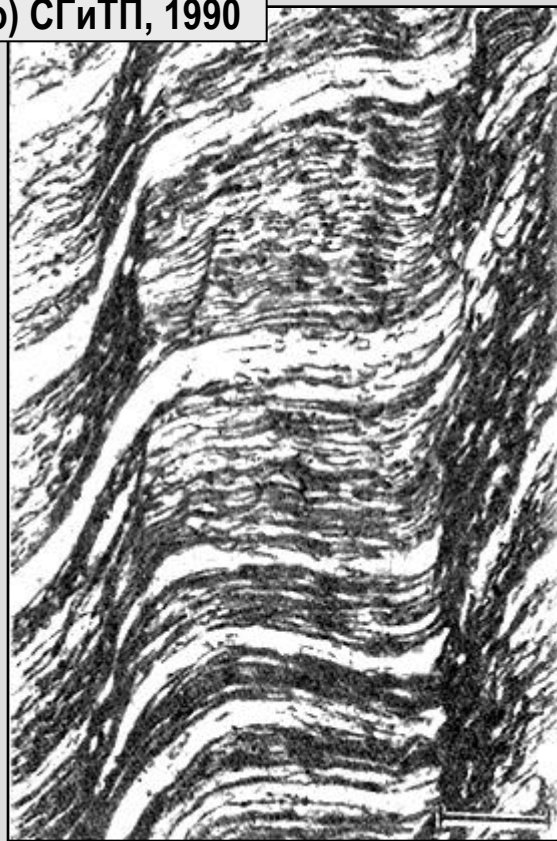
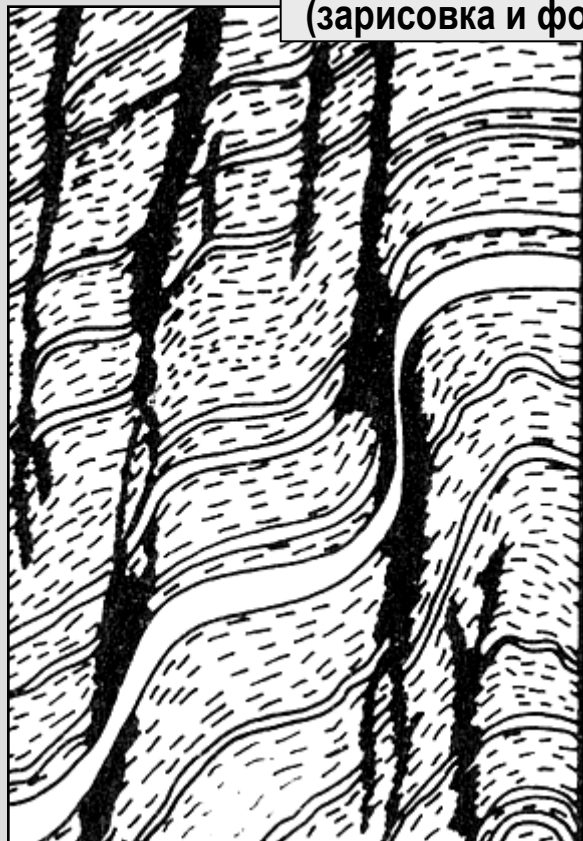


Волнистый кливаж



Особый вид кливажа – "**волнистый кливаж**", или **кливаж скольжения** выражен зонами дифференциации минералов, совпадающими с крыльями асимметричных микроскладок в пloyчатых структурах, поэтому микролитоны по определению смещены друг относительно друга

Волнистый кливаж
(зарисовка и фото) СГиТП, 1990



Волнистый кливаж
Е. Fitz (Испания)

ВВ!
Микролитоны в
волнистом кливаже
переходят в
кливажные зоны
постепенно!

Примеры кливажа



Крутой кливаж в известняках. Нижний карбон. Ю. Урал



Наклонный кливаж в терригенных породах. Девон. Ю. Урал

Кирпичи – не кливаж!

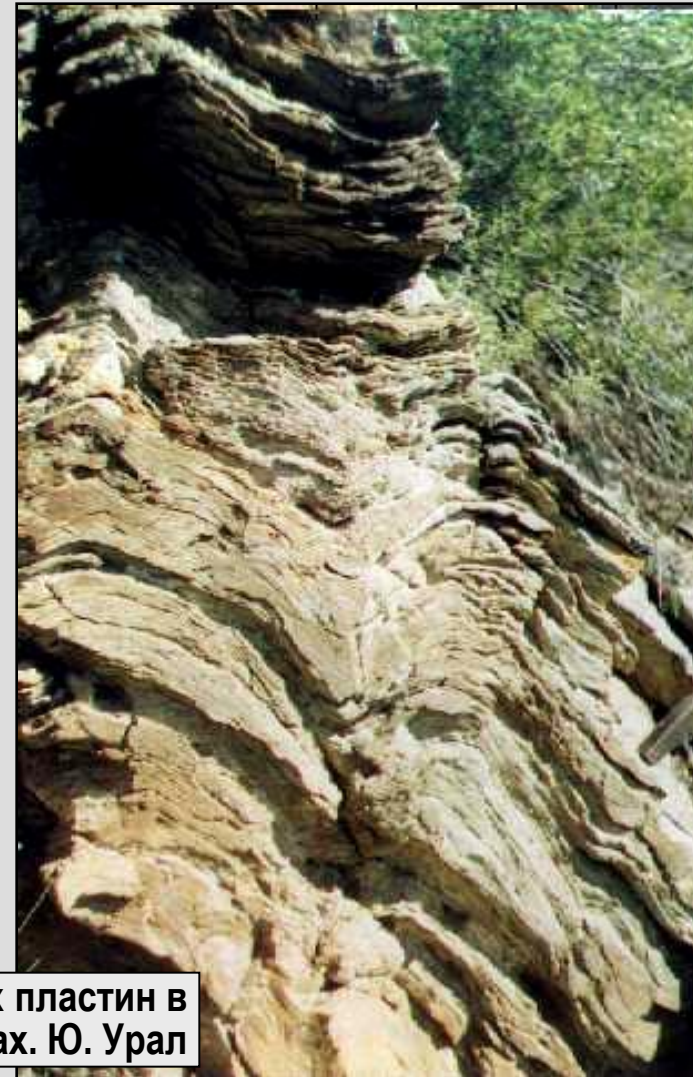


Две системы кливажа в известняках: ранняя (тонкий кливаж) и поздняя (грубый кливаж). Нижний карбон. Ю. Урал

Кливаж возникает не только в слоистых толщах. В условиях простого сдвига он проявляется и в массивных породах, в том числе – в интрузивных. Наличие кливажа в массивных породах делает их квазислоистыми. При этом микролитоны подобно слоям способны сминаться в складки, флексуры и т.п., поскольку в них легко возникает "межпластовое" скольжение по кливажным зонам.



Складки кливажных пластин
в девонских гранитах. Ю. Урал



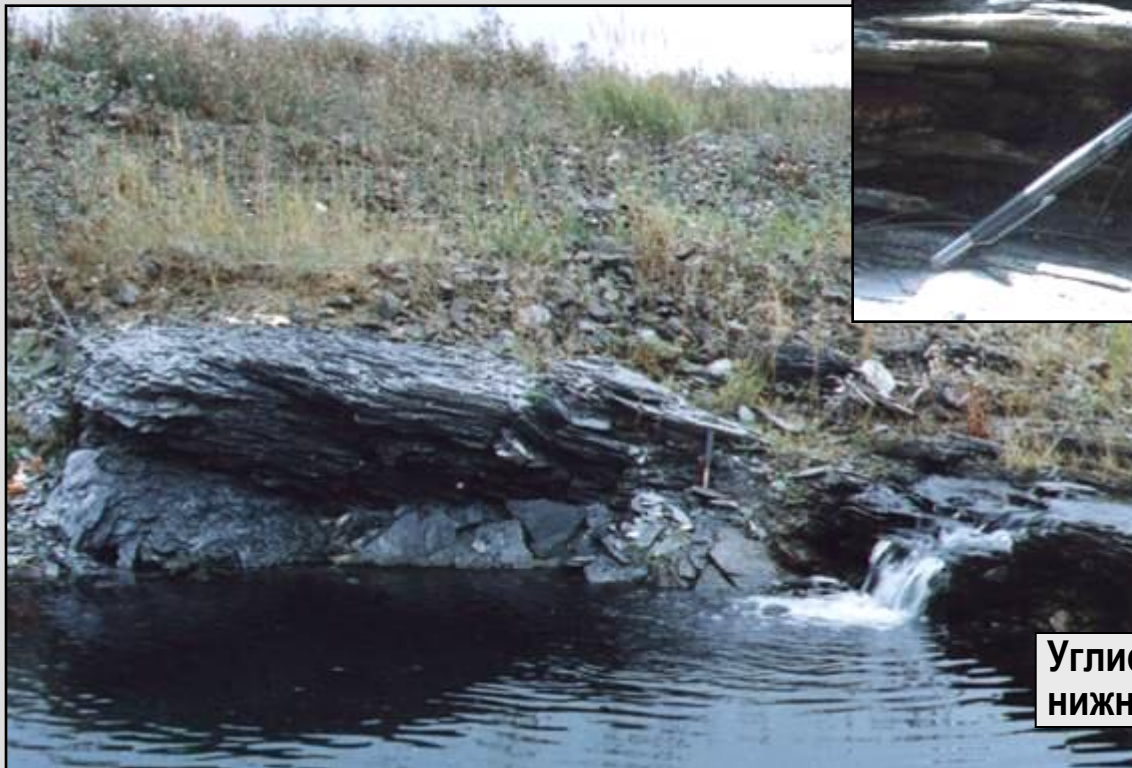
Складки кливажных пластин в
каменноугольных гранитах. Ю. Урал

Сланцеватость – плоскостная текстура горных пород, образованная планпараллельным расположением пластинчатых или листоватых минералов. Сланцеватость возникает под воздействием касательных напряжений, как правило, параллельно генеральному сдвигу Риделя.

ВВ! Сланцеватость отличается от кливажа тем, что порода перекристаллизована по всему объему, а не только в кливажных зонах!



Апотерригенные сланцы нижнего карбона. На переднем плане – обдавленная галька гранитов



Углистые сланцы нижнего карбона

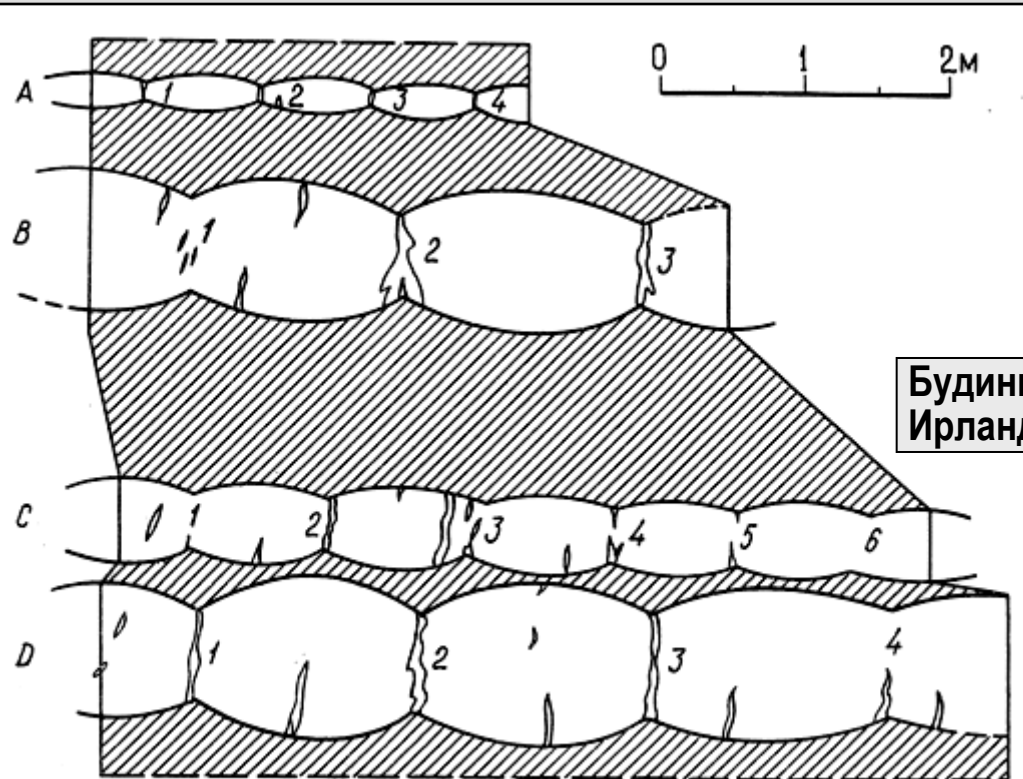
Будинаж

Структура будинажа – от французского *boudin* (колбаса) – ритмически пережатый, или сегментированный слой (или жила), залегающий среди других пород.

Будинаж (разлинзование) – процесс формирования соответствующей структуры.

Механизм будинажа – растяжение, параллельное слою. При растяжении пустота, возникающая между будинами, либо заполняется материалом матрикса (если он способен перетекать), либо остается пустой и впоследствии минерализуется двумя способами:

- 1 – сегрегационная минерализация – заполнение в процессе раскрытия;
- 2 – минерализация замещения – метасоматические изменения в участках шеек



Будинированный песчаник,
Ирландия. По СГиТП, 1990

ВВ!
Будинируется
компетентный пласт,
залегающий между
некомпетентными!

Элементы строения будин

Ось будины – линия, параллельная длинной стороне будины.

Перемещая ее параллельно самой себе можно получить форму будины (бытовой аналог – шампур с люля-кебабами)

Длина – размер будины вдоль ее оси.

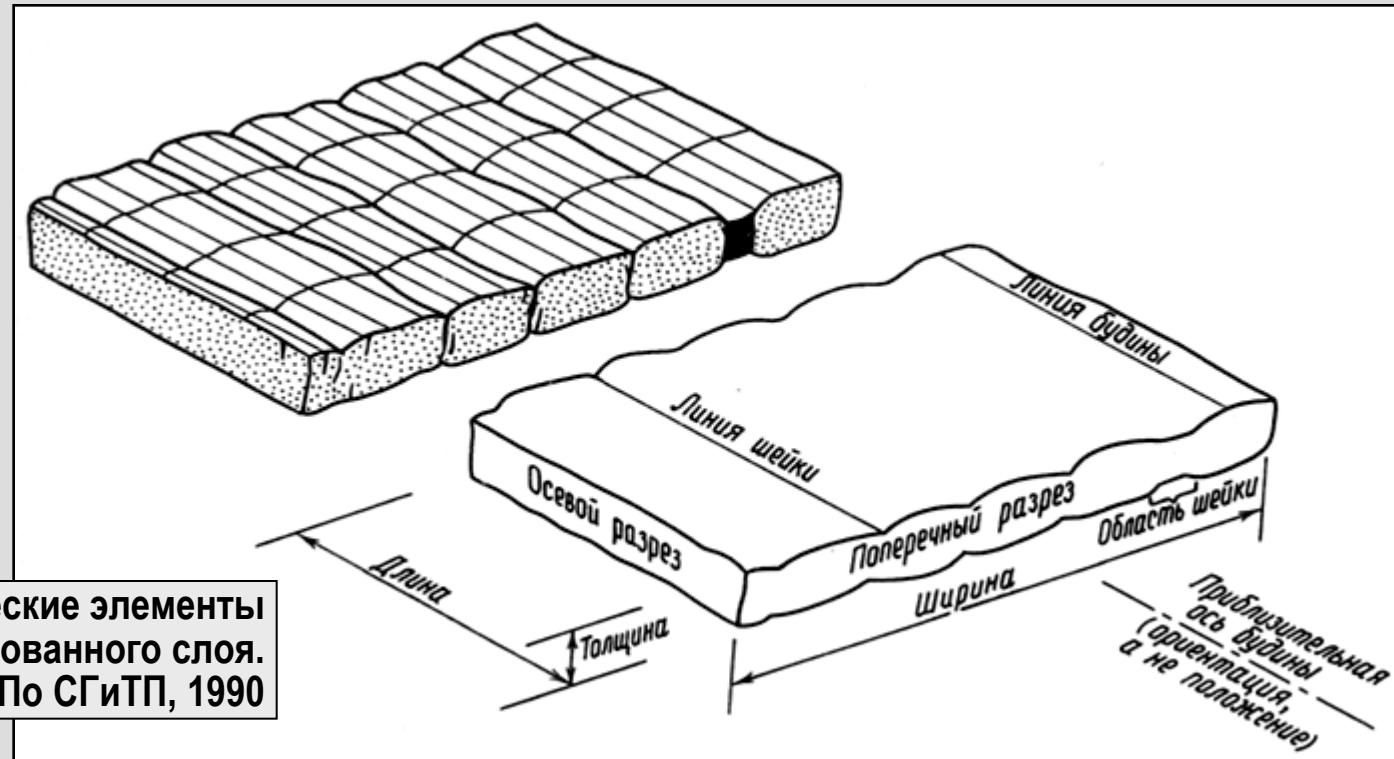
Ширина – размер будины поперек ее оси по поверхности слоя

Толщина – размеры будины поперек ее оси между подошвой и кровлей слоя.

Шейка (перезжим) – окончание будины и участок, разделяющий соседние будины: *рубец* – зона раздела; *перемычка* – минерализованная зона.

Линия шейки – линия, соединяющая точки максимального пережима слоя,

Линия будины – линия соединяющая точки максимальной толщины будины.



Геометрические элементы
будинированного слоя.
По СГиТП, 1990

Механизм формирования будинажа

Будинаж, как *структура растяжения вдоль слоя*, формируется в результате интенсивного *сжатия поперек слоя*, при котором происходит расплющивание толщи. Характер будинажа зависит от контраста вязкостей компетентных и некомпетентных слоев.

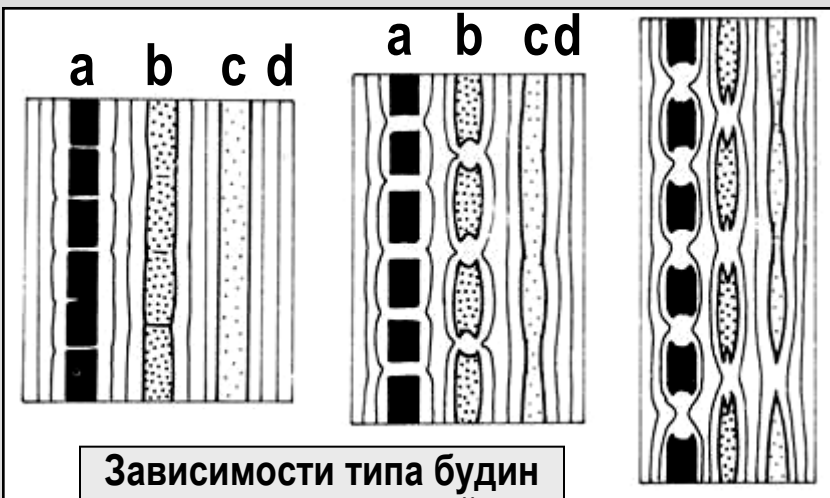
Будины образуются:

a – при резком контрасте – по отрывам;

b – при меньшем – по сколам;

c – при слабом – по участкам пластического течения;

d – при незначительном – не образуются вовсе.



Зависимости типа будин
от относительной
вязкости слоев
[Ramsay, Huber, 1983]



Схема формирования будинажа
По В.Г. Талицкому



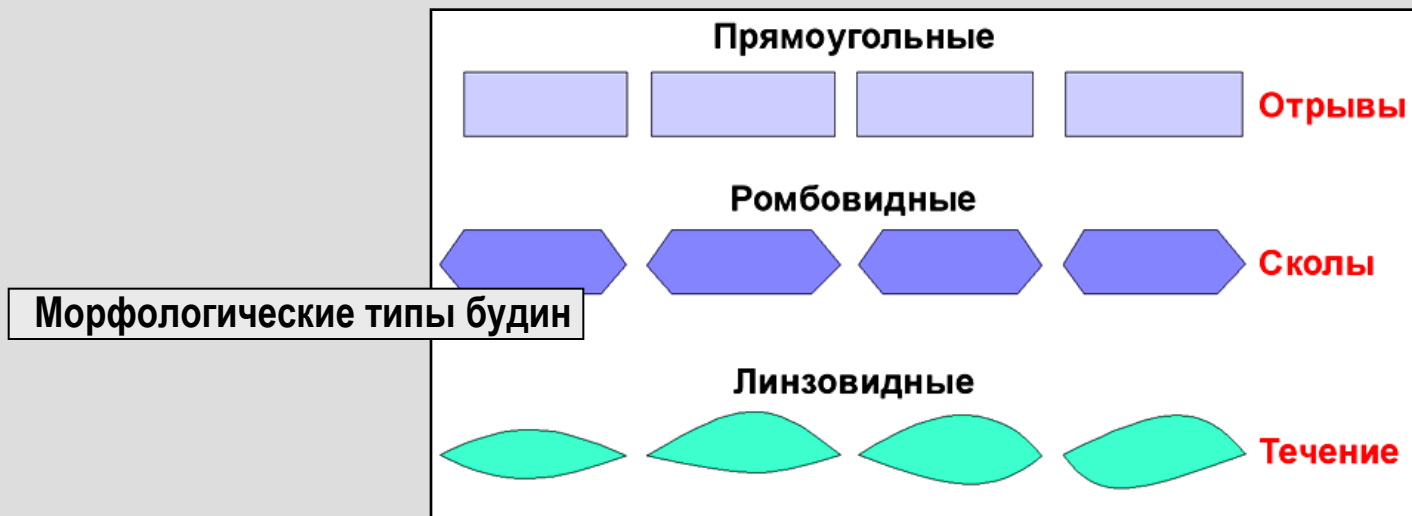
Линзовидные
будины кварца
в биотитовых
сланцах



Форма будин зависит от контраста реологических свойств (вязкостей) будинированного слоя и матрикса, а также от мощности слоя.

Морфологические типы будин в разрезе:

- **прямоугольные** – разделены *трещинами отрыва*, вязкость будинированного слоя **существенно выше**, чем вязкость матрикса;
- **ромбовидные** – разделены *трещинами скола*, вязкость будинированного слоя **выше**, чем вязкость матрикса;
- **линзовидные** – разделены участками вязкого течения, вязкость будинированного слоя **немного выше**, чем вязкость матрикса



Относительные размеры будин зависят от мощности и реологии будинированного слоя, а иногда от первичной трещиноватости пород. При заполнении матриксом шеек будин часто возникают мелкие складки.

Примеры будинажа



Будины гранито-гнейсов в кристаллических сланцах рифея. Ю. Урал. Фото С.А. Белякова



Будины жильного кварца в кристаллических сланцах нижнего протерозоя. Ю. Урал



Будины известняков в рассланцованных глинистых известняках. Ю. Урал. Фото Н.В. Правиковой



Линзовидные будины гранитов
в гранито-гнейсах. Ю. Урал

NB!
Будинаж всегда связан
со сжатием
поперек слоя!



NB!
Будинаж всегда связан
с растяжением
вдоль слоя!



Линзовидные будины кварца в
кристаллических сланцах нижнего
протерозоя. Ю. Урал

Начальник,
ответственный
за будинаж



Муллион-структуры



Муллионы – линзы более компетентного материала, “плавающие” в глинистой массе и пересекающие слой, отличающиеся от структуры будинажа, вызванного растяжением слоя, тем, что “они пересекают слой, а не вытягиваются параллельно ему” [Белоусов, 1985].

Муллионы – грубая линейность, развивающаяся в сильно деформированных породах и имеющая форму “длинных цилиндрических образований” [Уилсон, 1985].

Типы муллионов:

- **кливажные** (призмы, ограниченные поверхностями кливажа)
- **складчатые** (замки мелких складок, “отжатые” от основного тела складки)
- **неправильные** (длинные цилиндрические тела с очень неправильным поперечным сечением)

Муллион-структуры в мраморах.
Фото В.Г. Талицкого



Кливажные муллиионы

Муллиионы в доломитах, разделенные кливажными трещинами, по которым происходит растворение кварцевой жилы.
Фото А.Б. Кирмасова



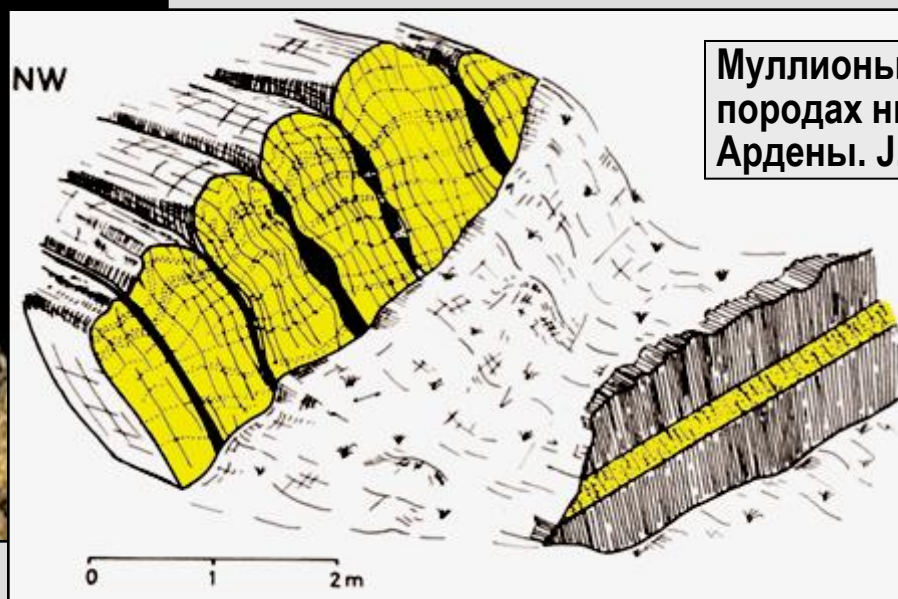
Складчатые муллиионы

Муллиионы в апотерригенных сланцах.
Отжатые замки мелких складок выполнены цилиндрическими телами жильного кварца

Цилиндрические муллиионы



Муллиионы мраморах.
Прибайкалье. Фото
Арк.В. Тевелева



Муллиионы в терригенных
породах нижнего девона.
Ардены. J. L. Urai et al., 2002

Механизмы формирования муллионов

Доминирующий механизм формирования муллионов – растворение под давлением. Аналогично структурам зернового уровня, происходит перераспределение растворенного материала, и муллионы приобретают характерную бочонковидную форму.

Схема формирования муллионов.
По А. Николя, 1992



ВВ! В отличие от будин муллионы формируются при продольном сжатии!

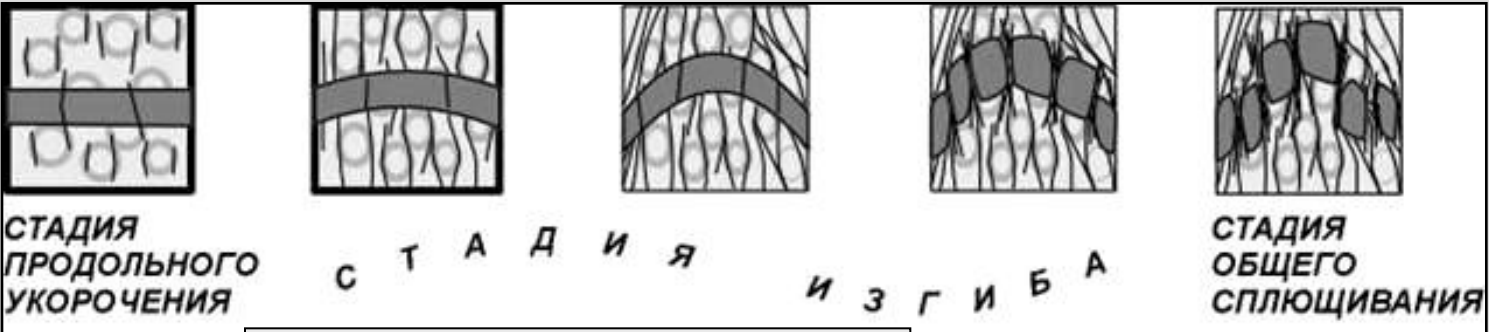


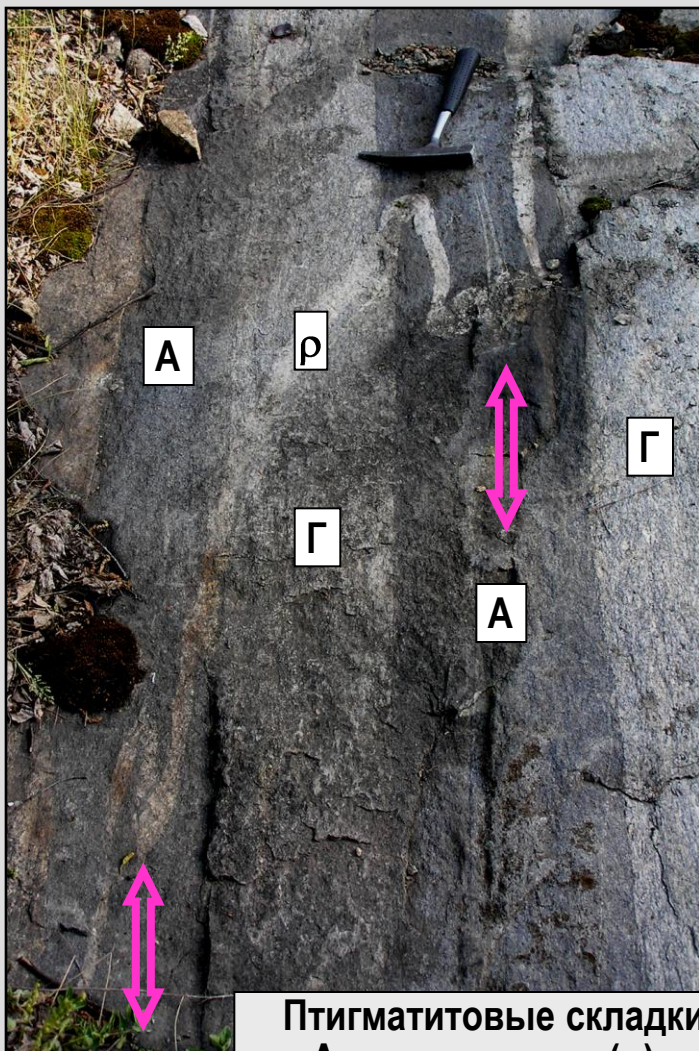
Схема формирования муллионов.
По А.Б. Кирмасову, В.Г. Талицкому

Птигматитовые складки

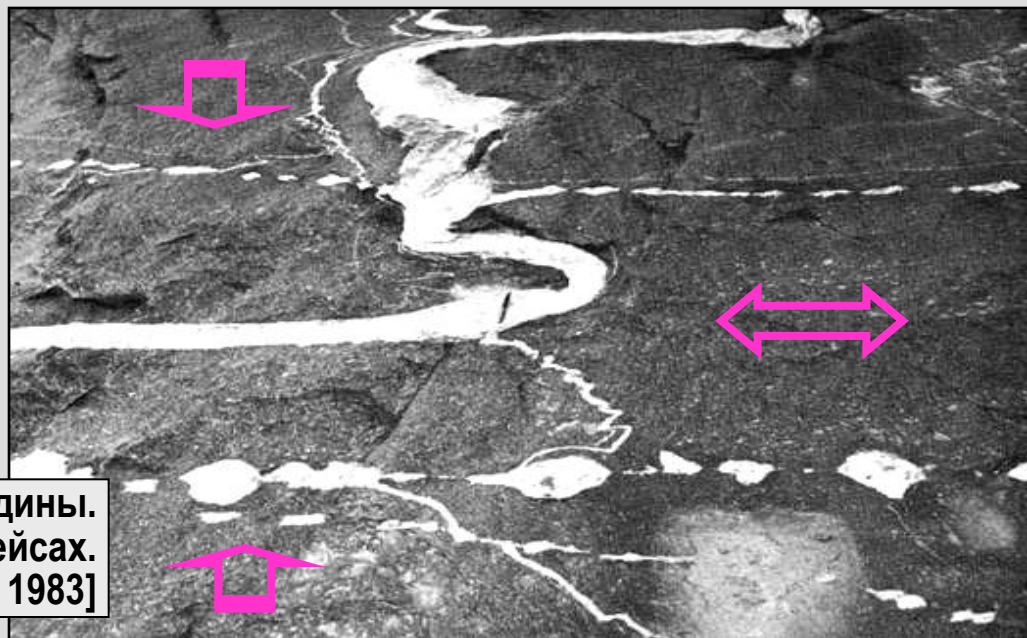
Птигматитовые складки

(от "птигма" – "складка" [гр.]) – нерегулярные складки, в которые сминаются гидротермальные и другие жилы вследствие вязкого течения вмещающих пород. Чтобы избежать тавтологии "складчатые складки", лучше применять термин "птигматитовые жилы".

Птигматитовые жилы могут находиться в комбинации с будинами, которые тоже образуются в результате вязкого течения и растаскивания более компетентных пород



Птигматитовые складки.
Аплитовая жила (ρ) в
амфиболитах (А) и гранито-
гнейсах (Г). Ю. Урал



Птигматитовые складки и будины.
Аплитовая жила в гранито-гнейсах.
Ц. Сахара [Ramsay, Huber, 1983]

**ВВ! Сначала
возникают мелкие
складки, а потом
они сминаются в
крупные!**



**Птигматитовые кварцевые
жилы в амфиболитах нижнего
протерозоя. Ю. Урал**



**Птигматитовая кварцевая жила и
будина в кристаллических сланцах
нижнего протерозоя. Ю. Урал**



**Примеры
птигматитовых
складок**

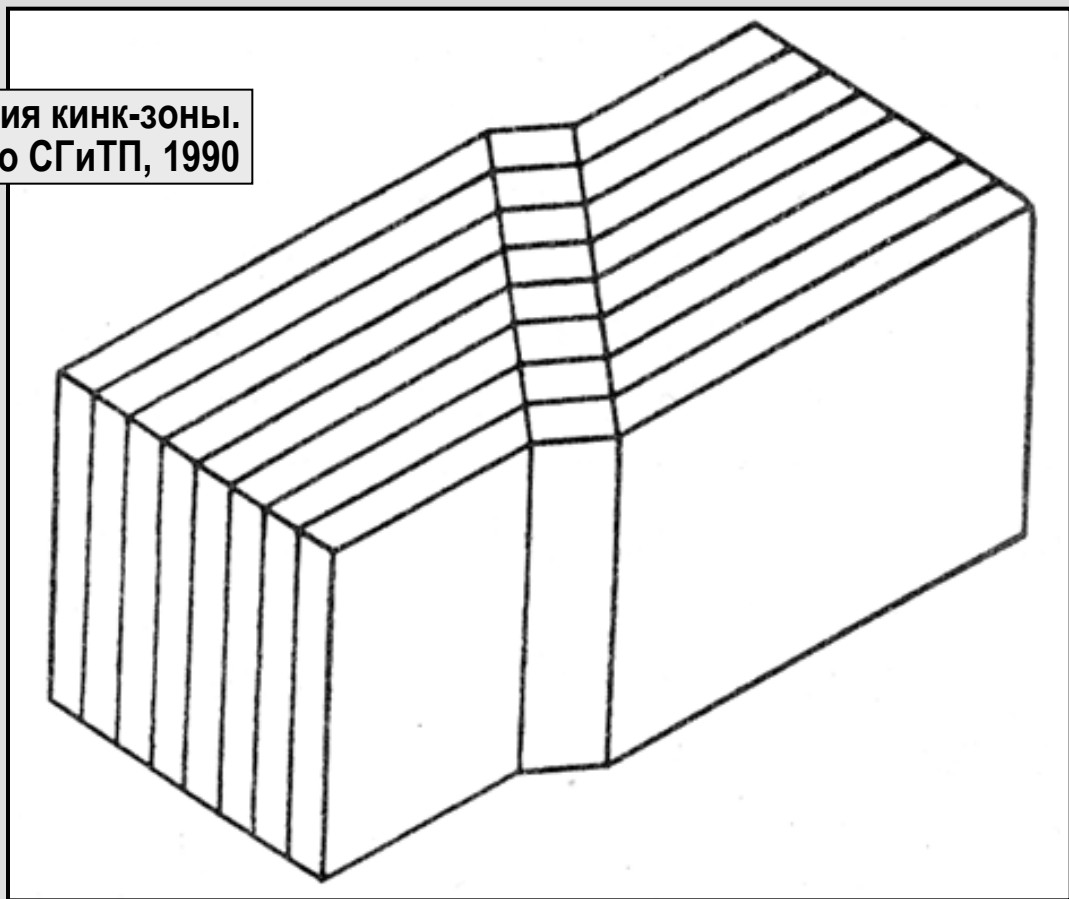
Кинк-зоны



Кинк-зоны – полосы, пластины в тонколистоватых породах, секущие листоватость и ограниченные параллельными поверхностями излома.

Кинк-зоны (кинкбанды, полосы излома, *kinkbands*) в кристалле определяются как "тонкие пластины смещенного в результате сдвига вещества, ориентированные под углом к плоскости сдвига и ограниченные **наклонными стенками дислокаций**" [Frank, Stroh, 1952].

Схема строения кинк-зоны.
По СГиТП, 1990



В сланцеватых породах

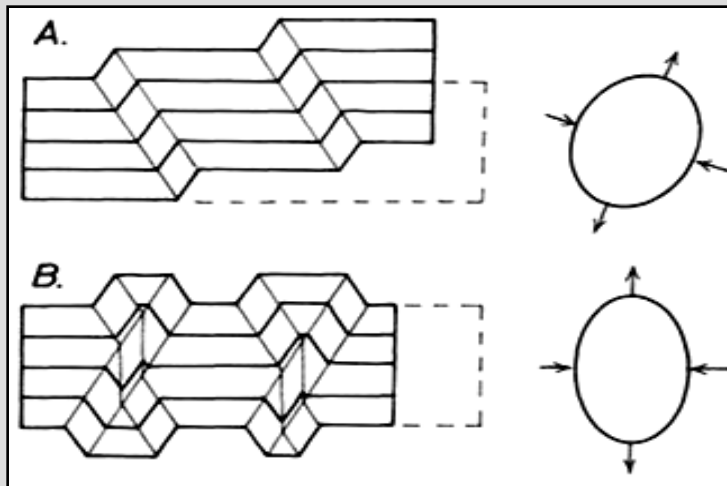
кинк-зона представляет собой тонкую полосу, секущую текстуру и ограниченную параллельными или субпараллельными осевыми поверхностями двух аккордеонных складок противоположного знака [Андерсон, 1991].

Экспериментальные данные показывают, что кинк-зоны образуются под действием сжимающих напряжений, **параллельных** или почти параллельных расслоенности (текстуре):

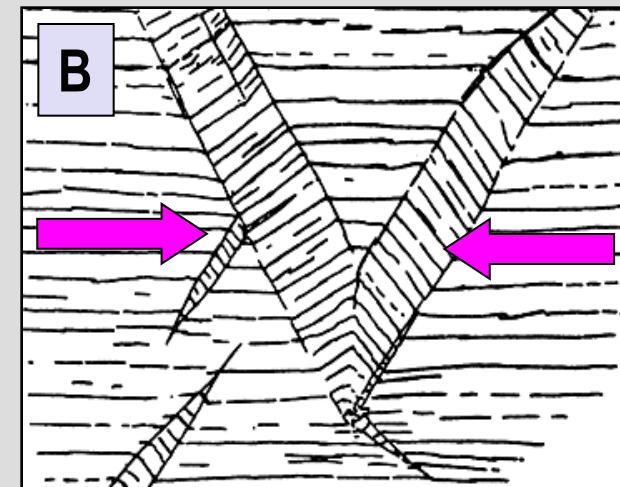


– при сжатии **под углом 25°** к расслоенности преобладает система параллельных кинк-зон

ВВ! При углах между текстурой и направлением сжатия больше 25° кинк-зоны не образуются вовсе!
[Paterson, Weiss, 1966]



– при сжатии **параллельно** текстуре возникают сопряженные системы левосторонних и правосторонних кинк-зон;



Модели формирования кинк-зон

Существует **две модели** образования кинк-зон. Обе объясняют их возникновение деформацией и смещением, **параллельным** расслоению, т.е. **продольным укорочением** тонкослоистого (листоватого) пакета.

1. При скольжении, параллельном расслоению, происходит образование узкого кинкбанда с поворотом плоскостей расслоения; дальнейшее укорочение может происходить за счет боковой миграции зоны излома без изменения угла между плоскостями скольжения внутри и снаружи кинкбанда [*Paterson, Weiss, 1961*].

Эта модель работает при относительно высоких давлениях.

2. Смещение по плоскостям расслоения приводит к нарушению стабильности и, следовательно, к образованию изломов. При дальнейшей деформации продолжается поворот плоскостей расслоения вплоть до некоторой предельной величины, и на этой стадии дополнительный поворот становится уже невозможным – образуется вторая зона излома, либо развиваются разрывные нарушения вдоль границ кинкбанд [*Donath, 1968*].

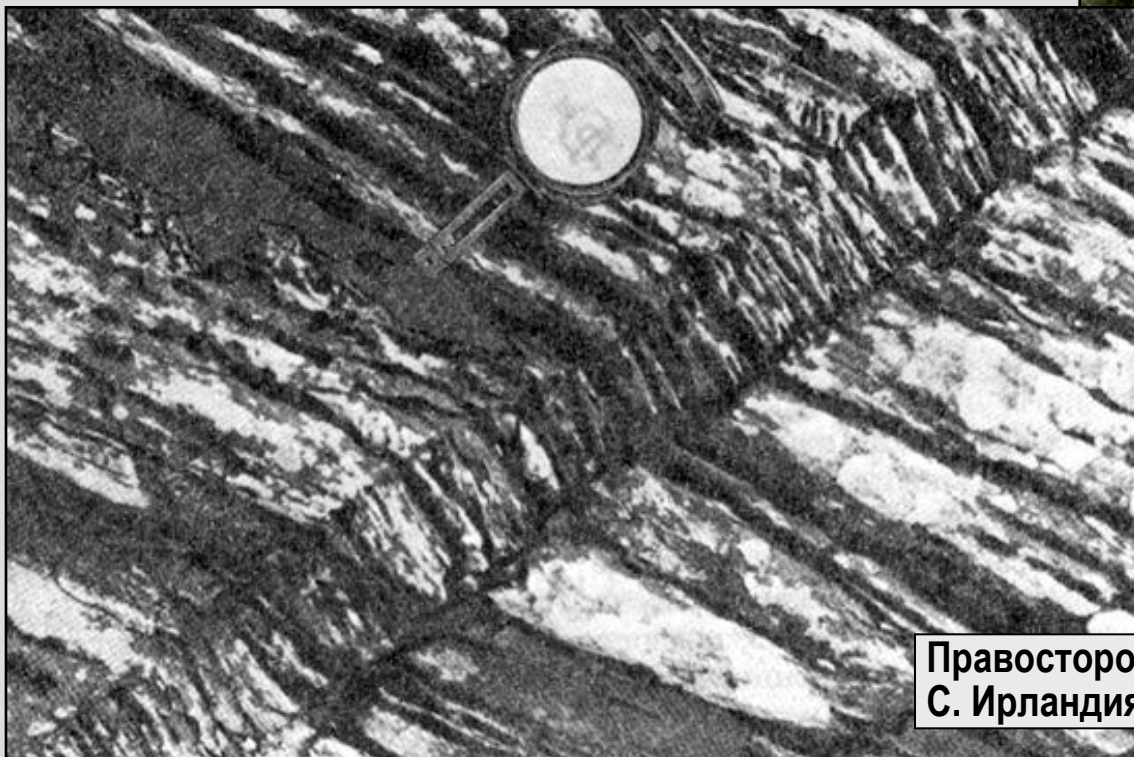
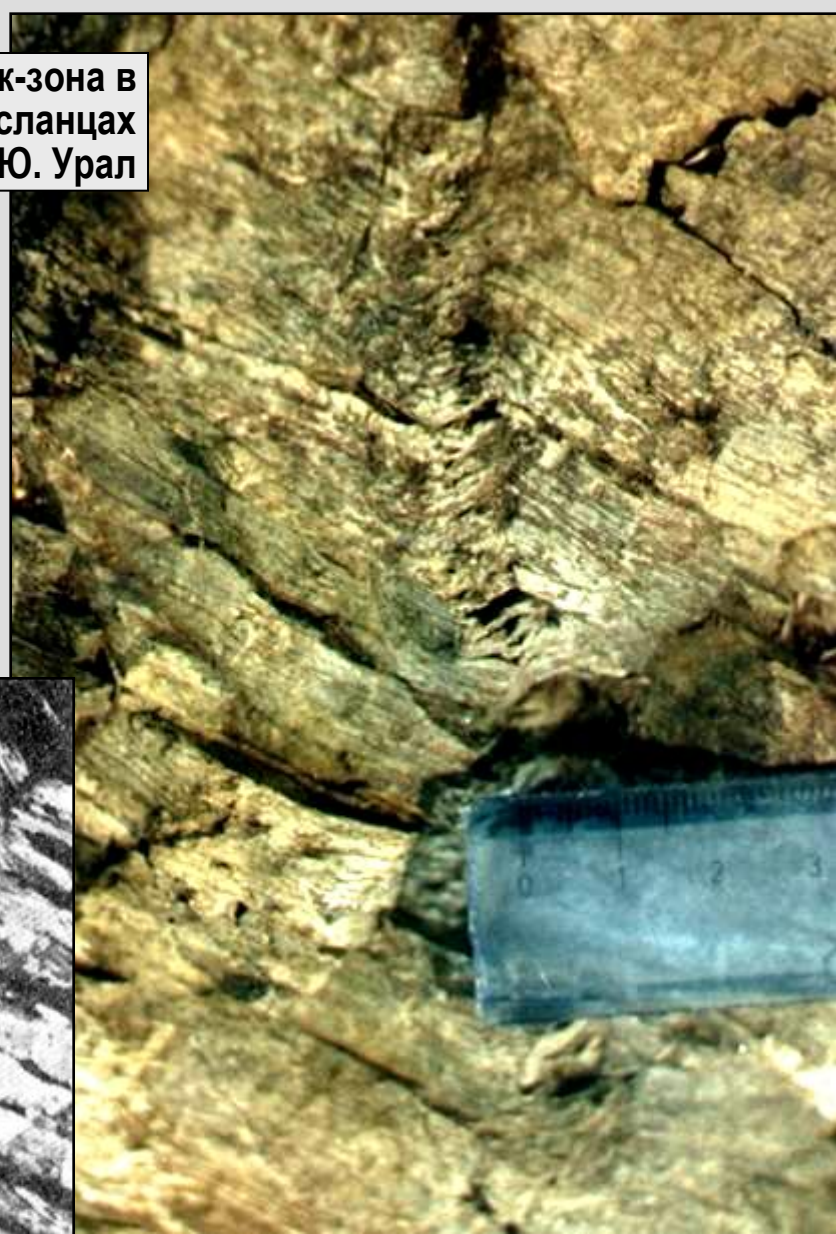
Эта модель работает при относительно низких давлениях.

ВВ! Таким образом, наличие в породах кинк-зон прямо указывает на то, что ось сжатия ориентировалась субпараллельно или под небольшим углом к слоистости!

Примеры кинк-зон

Левосторонняя кинк-зона в
аповулканогенных сланцах
девона. Ю. Урал

Механически образование кинк-зон может
сопровождаться **раскрытием пустот** и
микротрещин, в которые может
переоткладываться минеральное вещество.
Пустоты между пластинами кинк-зоны —
показатель невысокого давления



Правосторонний кинкбанд
С. Ирландия. По СГиТП

Левосторонняя кинк-зона в
апотерригенных сланцах ордовика.
Ю. Урал. Фото Н.В. Правиковой

**ВВ! В большинстве
экспериментов кинк-зоны
образуются под углом более 45°
(чаще 60°) к направлению сжатия.
Почему – никто не знает!**



Правостонняя кинк-зона в
апотерригенных сланцах
ордовика. Ю. Урал

Механизм формирования кинк-зон близок к механизму формирования шевронных складок, т.е. складок с точками излома, а не изгиба.

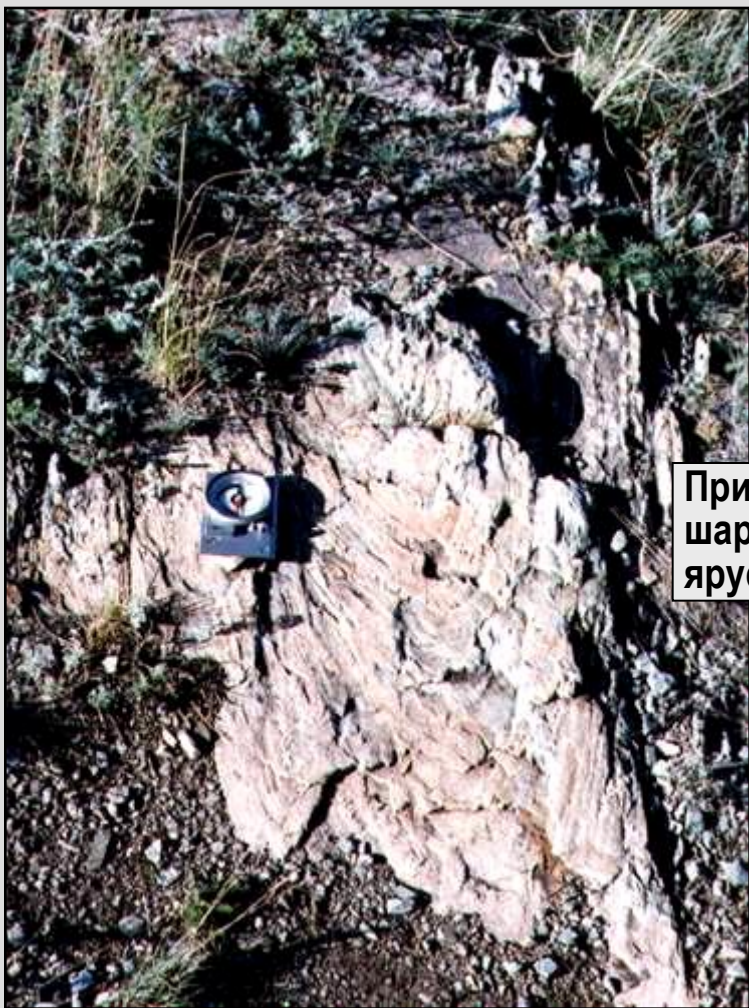
Шевронные складки формируются в тонкослоистых толщах за счет сжатия, ориентированного параллельно слоистости, при высокой вязкости пород

Локальная зона шевронных складок, ограниченная двумя зонами излома – "мегакинкбенд"



Складки волочения

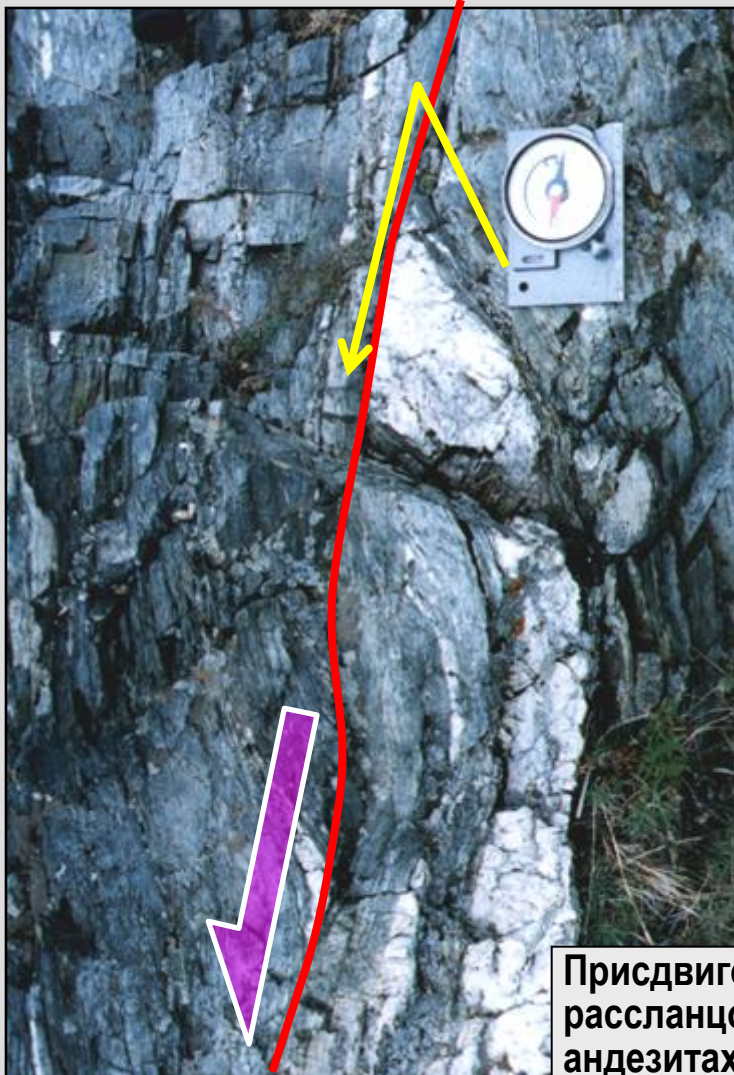
Складки волочения – приразломные складки, слои в которых обычно подвернуты в сторону движения противоположного крыла разрыва. Обычно их классифицируют по иницирующему разрыву



Присдвиговая складка с вертикальным шарниром в алевролитах франского яруса. Южный Урал



Привзбросовая складка в углистых алевролитах нижнего карбона. Южный Урал

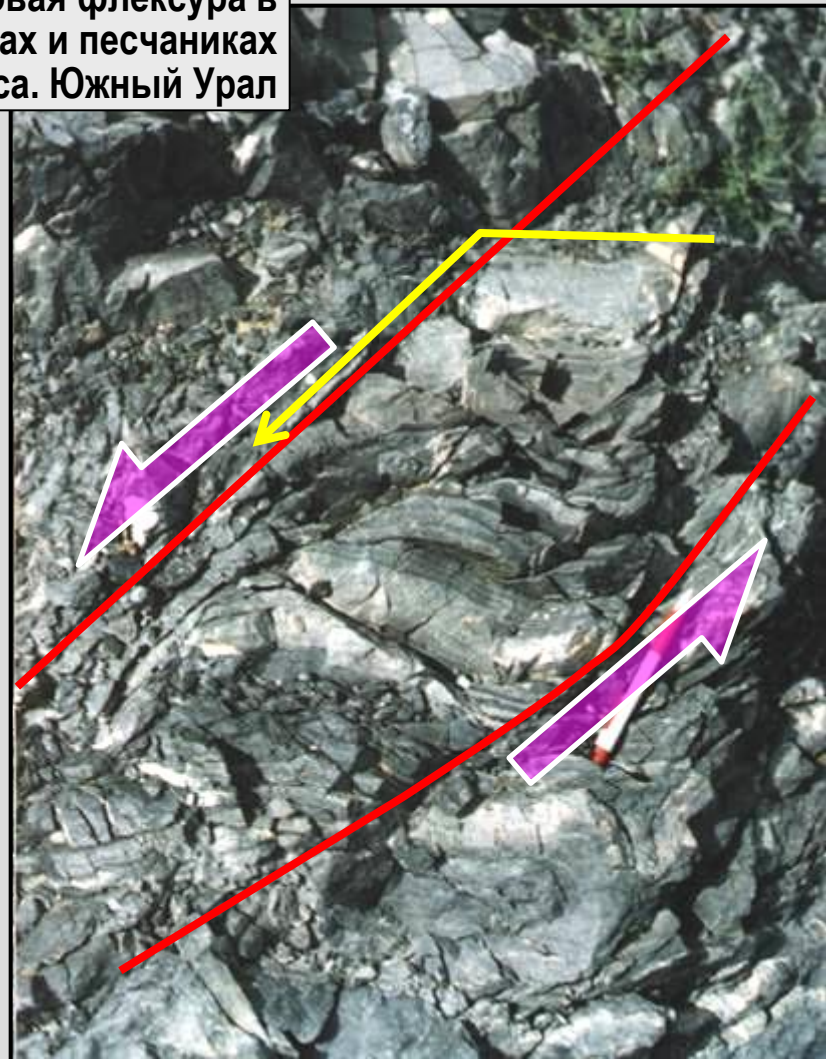


Если слои образуют острый угол с вектором движения противоположного крыла разлома, то они, как правило, **подворачиваются** по направлению его движения

Присдвиговая флексура в алевролитах и песчаниках триаса. Южный Урал

Присдвиговая складка в рассланцованных андезитах нижнего карбона. Южный Урал

Если слои образуют тупой угол с вектором движения противоположного крыла разлома, то они, как правило, **выполаживаются** по направлению его движения



Реальное поведение пластов зависит от их реологии. Мягкие, тонкослоистые пачки легче образуют **подвёрнутые** складки волочения, а компетентные могут изгибаться в обратную сторону, образуя **структурные горбы**.



Складки, кливаж, кинк-зоны, будинаж



Сложная структура в с ордовикских апотерригенных сланцах:
концентрические складки, прерывистый осевой кливаж,
разбудинированные кварцевые жилы и кинк-зоны. Ю. Урал



ПАРИЖ ПАРИЖ

Внешний вид геологических структур бывает обманчив! Даже если они подписаны официально!



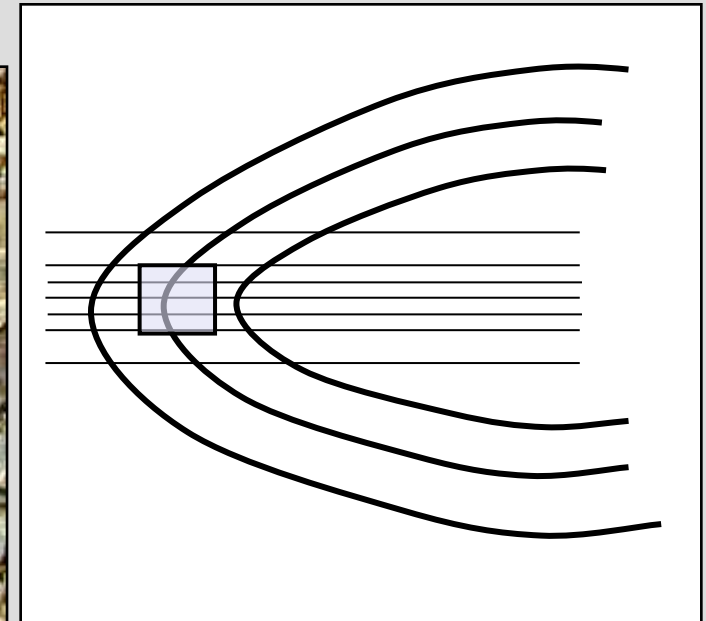
Финальный тест 1



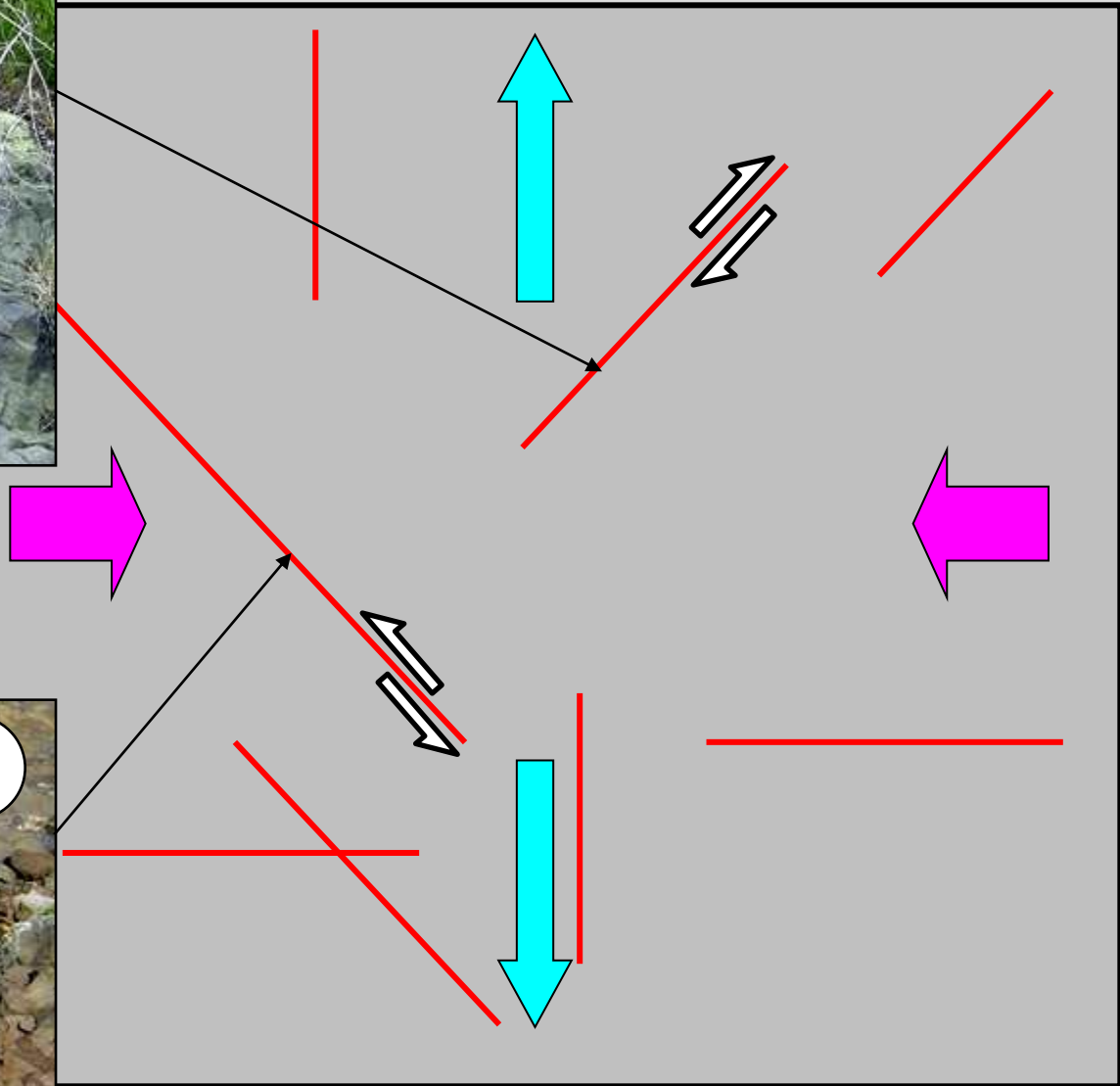
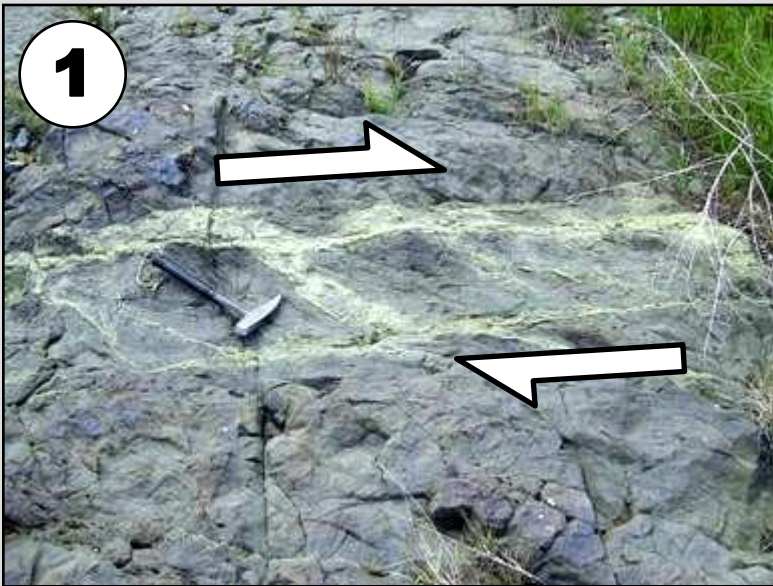
На снимке виден крутой грубый широтный кливаж в слоистых алевролитах, стоящих на головах. Микролитоны расположены поперек слоистости.

Какая это часть складки?

Что можно сказать о морфологии складки?

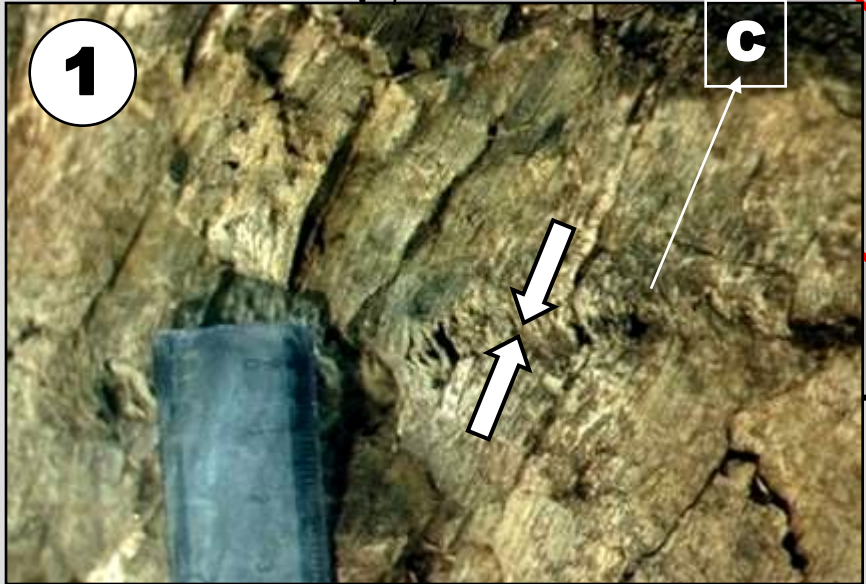
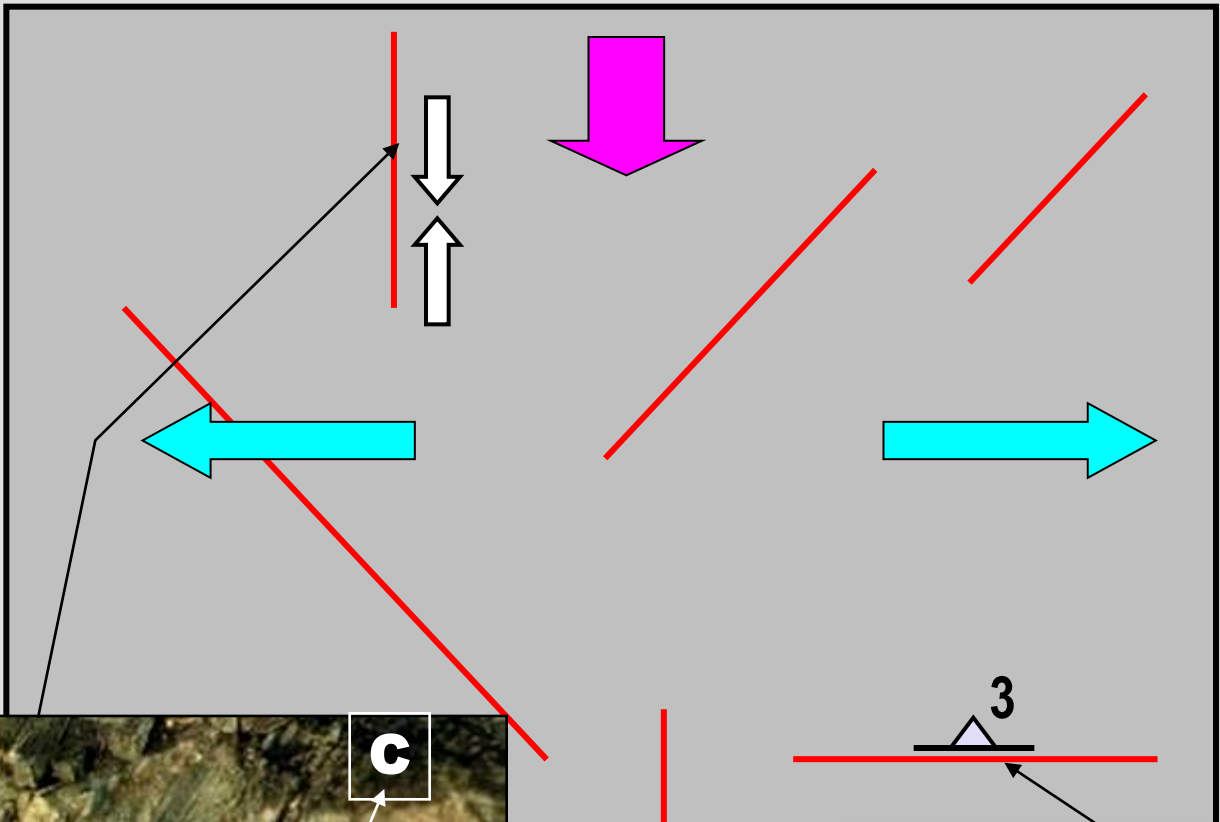


Финальный тест 2



Восстановите поля напряжений по мезоструктурам

Восстановите поля напряжений по мезоструктурам **Финальный тест 3**



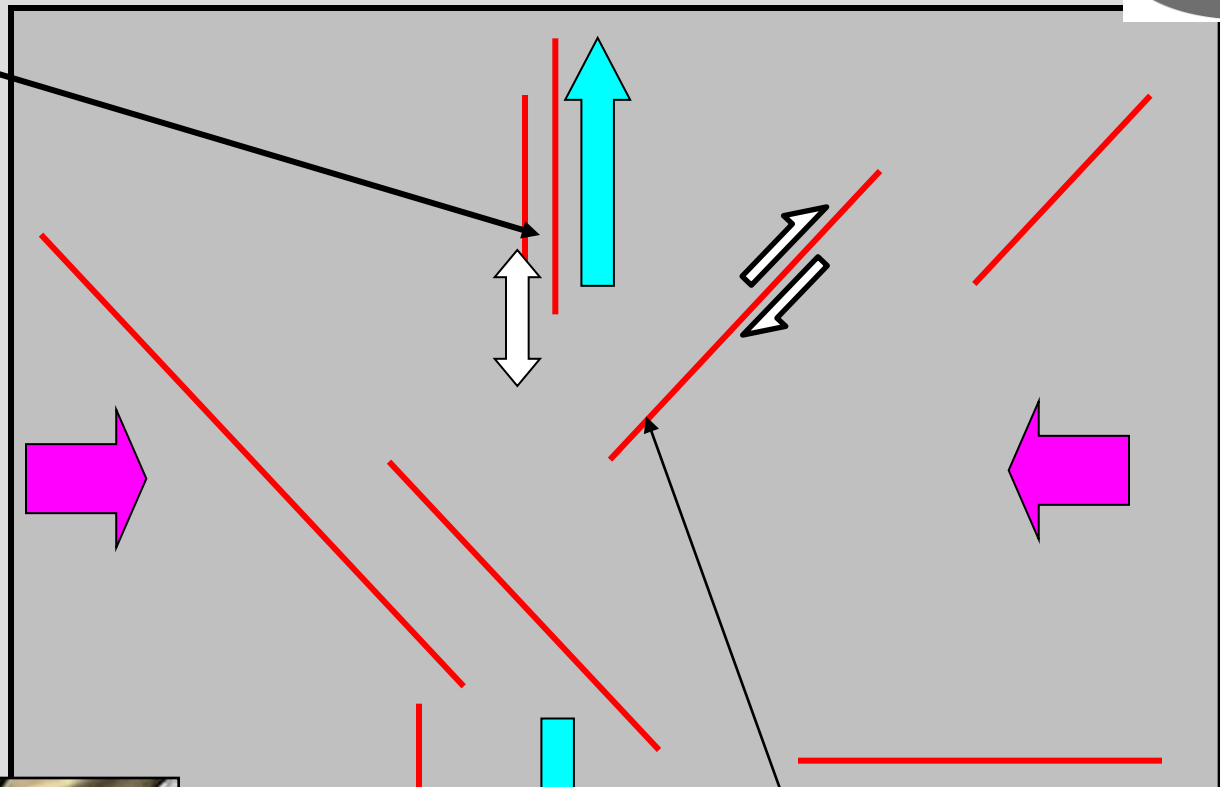
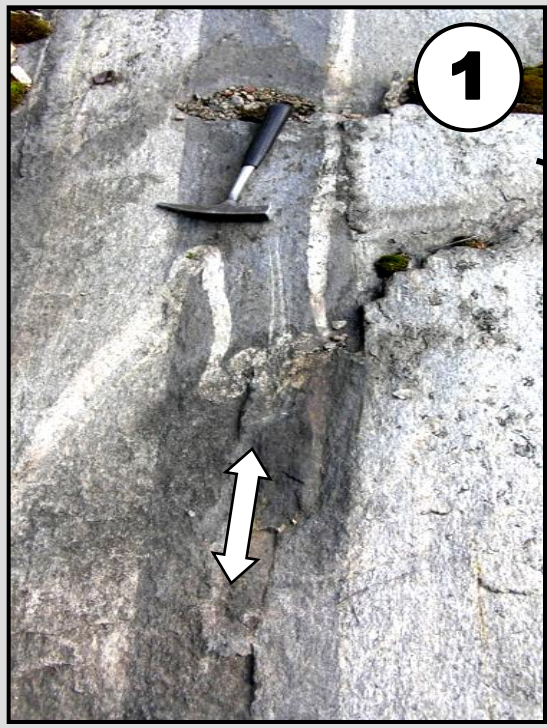
1



2

Финальный тест 4

1

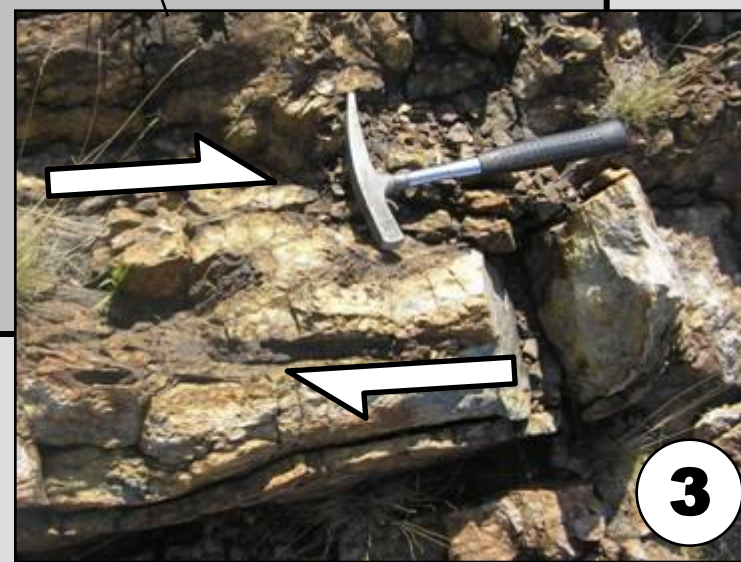


2



АзПд-270∠15

15



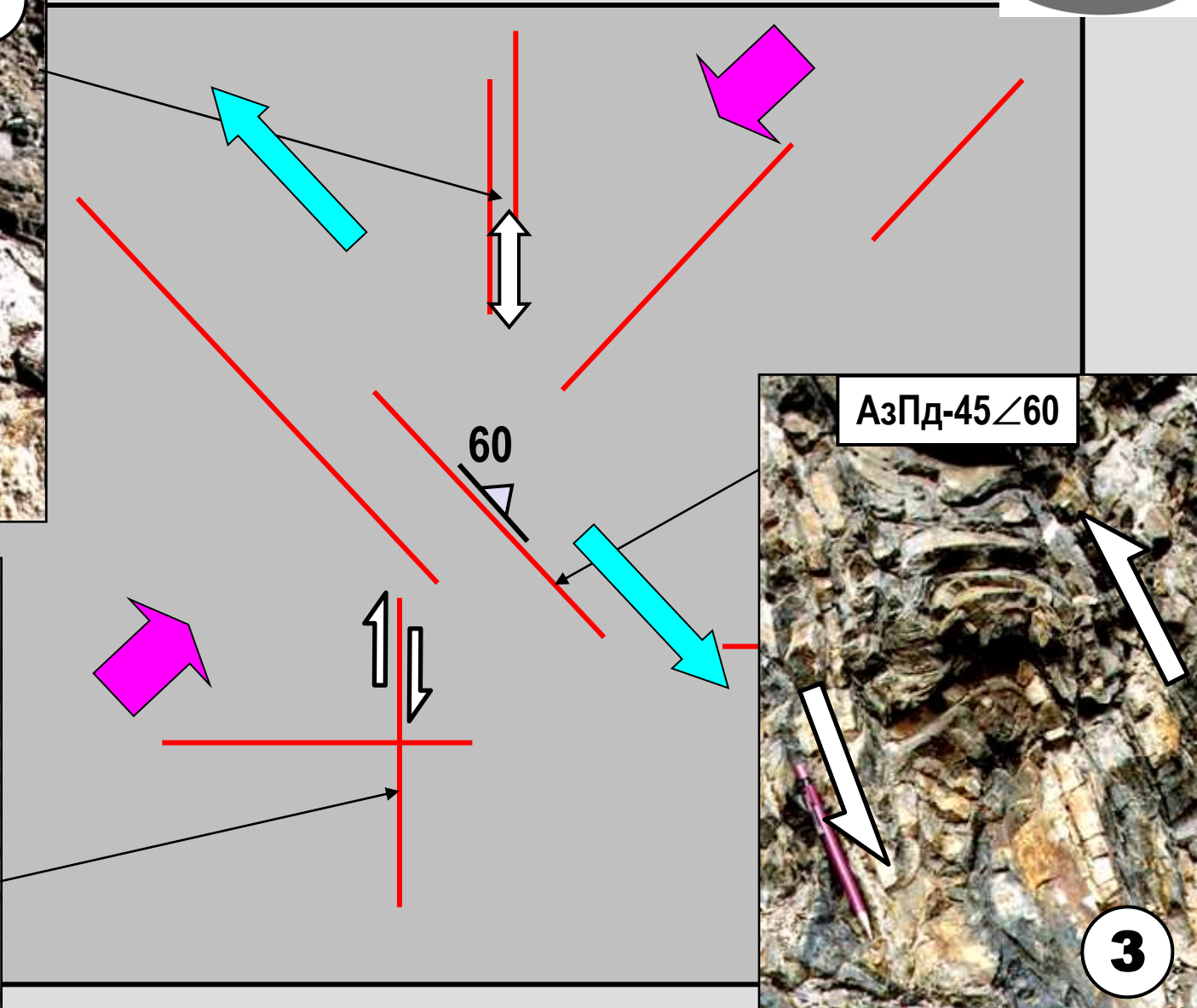
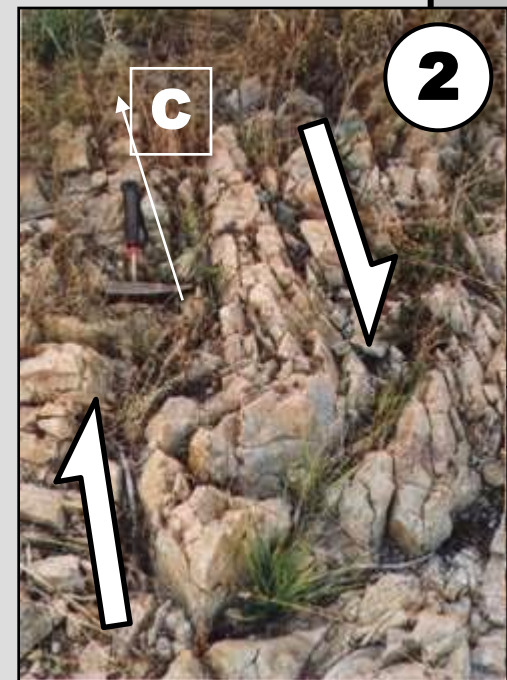
3

3 АзПд-270 $\angle$ 88
Ш АзПд-0 $\angle$ 3

1

Финальный тест 5

АЕВЕЛЕВ



АзПд-45 $\angle$ 60

3

Восстановите поля напряжений
по мезоструктурам