

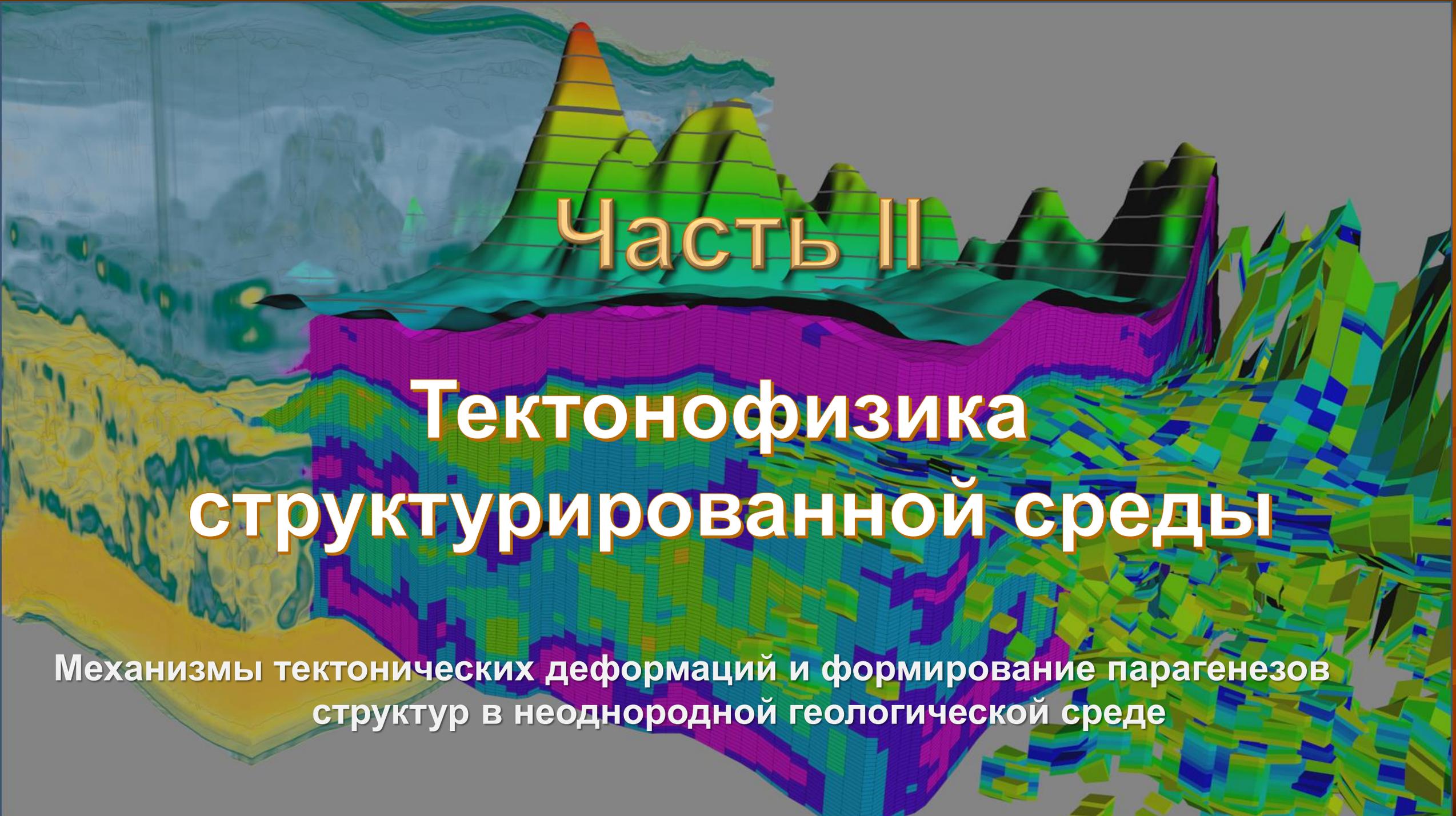


Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 9
Лекция 14

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 14

Дисгармония складчатой структуры

Дизъюнктивы сжатия

Асимметрия складок

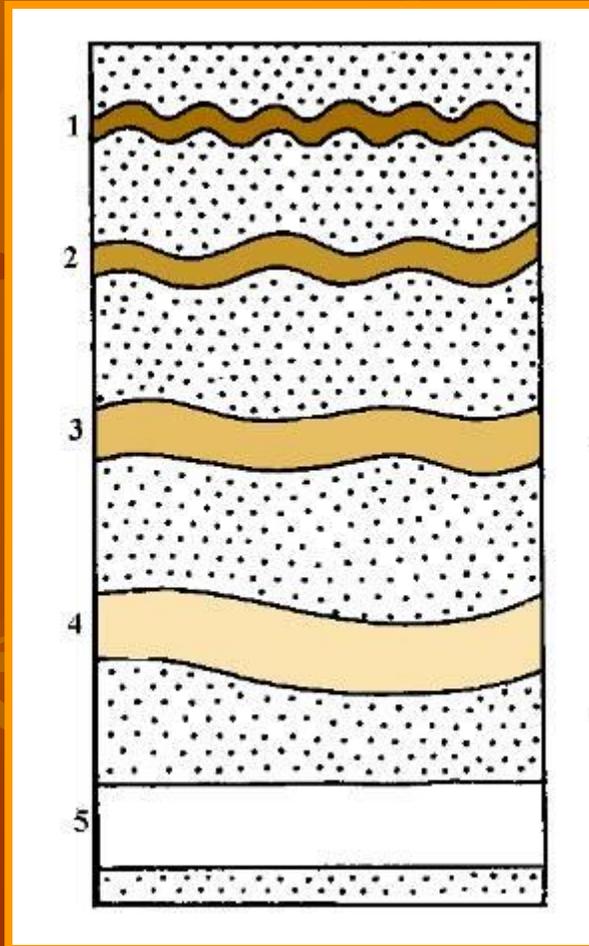
Переход деформации на уровень блоков



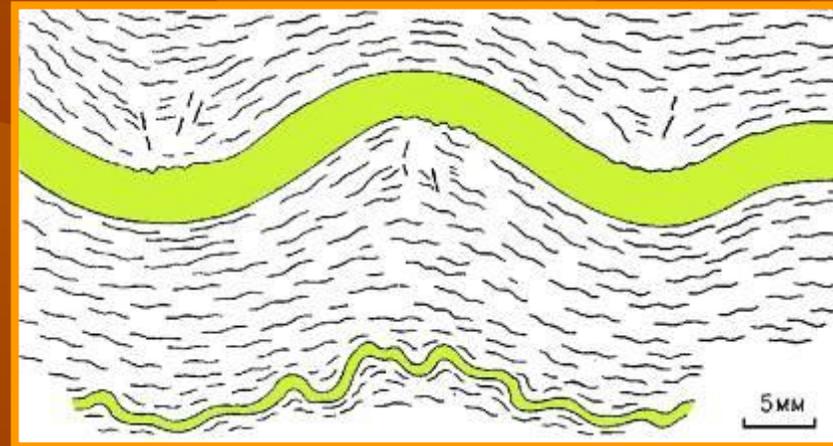
Дисгармония складчатости

Поскольку деформационные свойства слоев в составе пачек обычно изменяются в одном и том же разрезе в широких пределах, всякая складчатая структура, если ее рассматривать на большую мощность, оказывается дисгармоничной

Причины дисгармонии

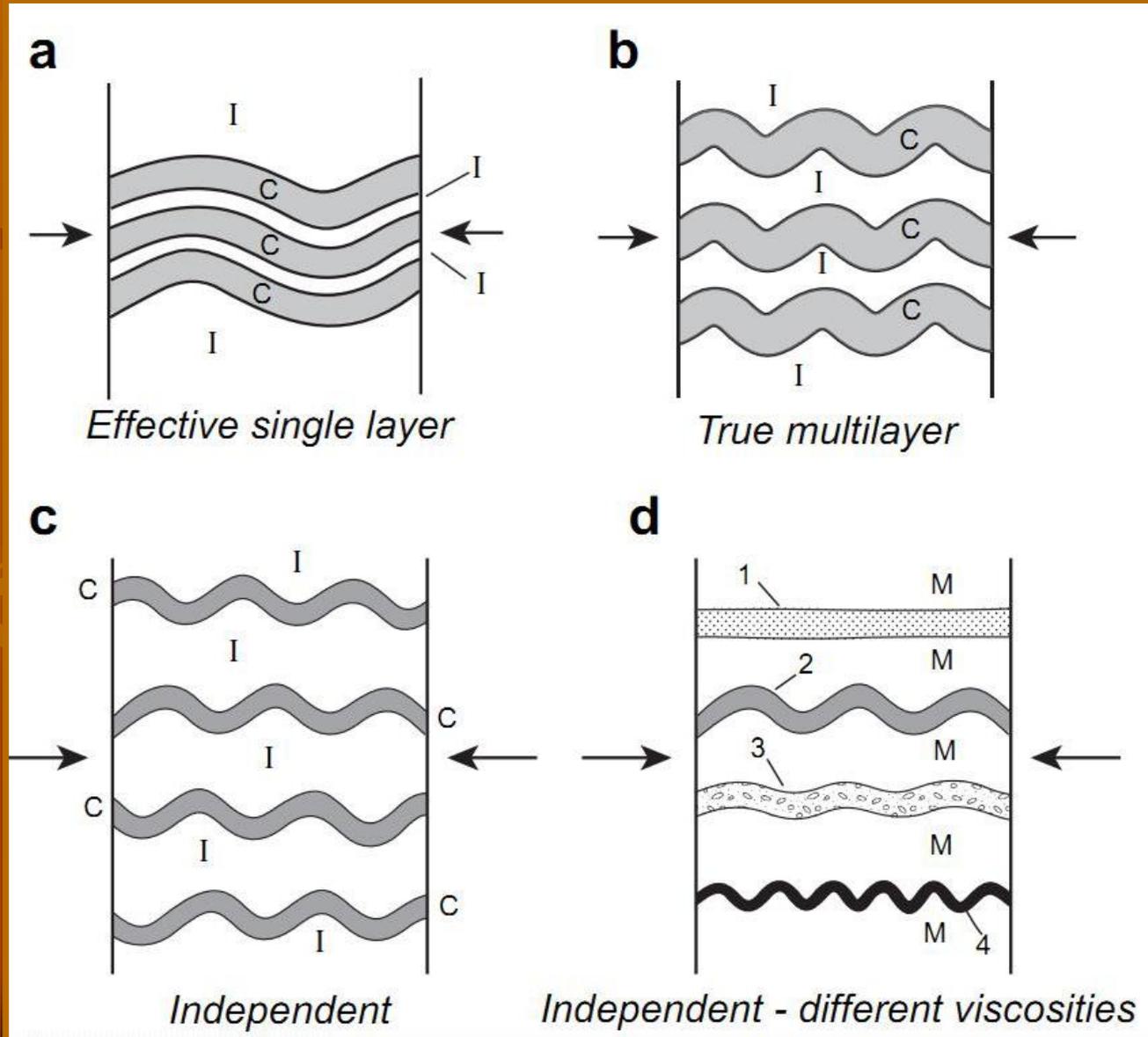


Деформация слоев с разной относительной вязкостью
(по Белоусову, 1977)



Эпидотовые прожилки разной мощности в хлорит-актинолит-сланцевых сланцах образуют складки с разной длиной волны
(по Громину, 1970)

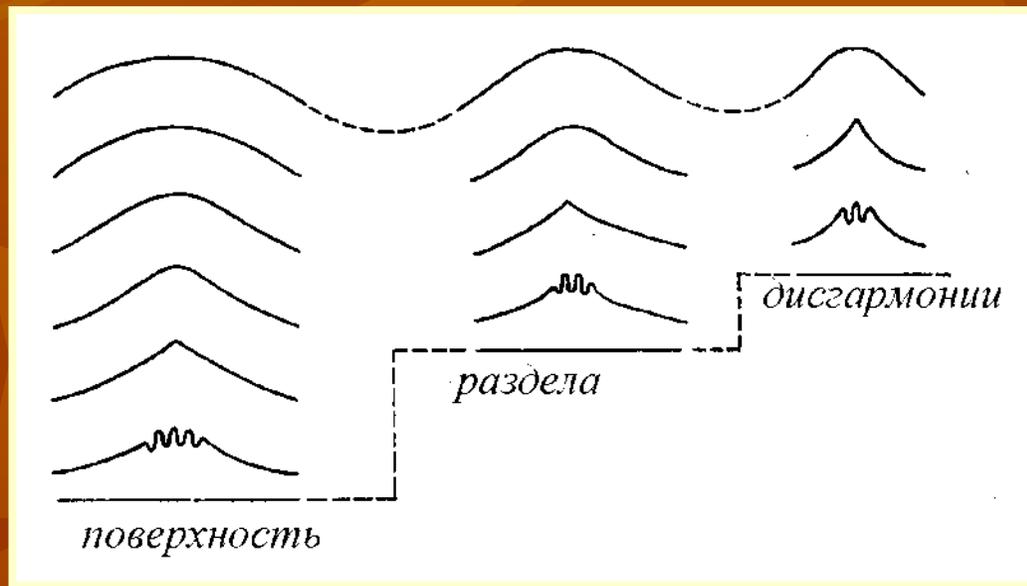
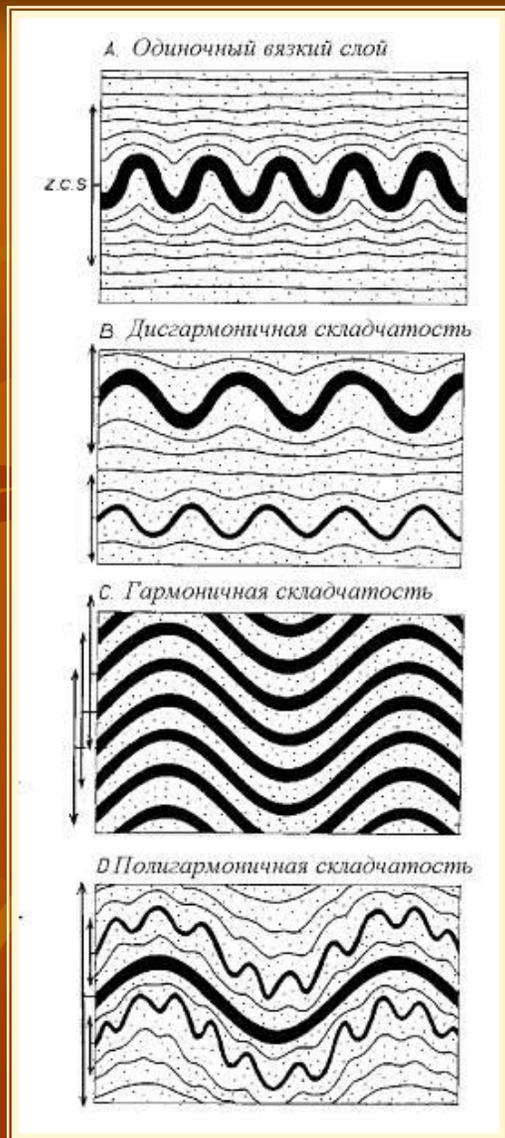
Гармоничные и дисгармоничные соотношения в пачках слоев



Идеализированная
конфигурация
складок в пачках
слоев

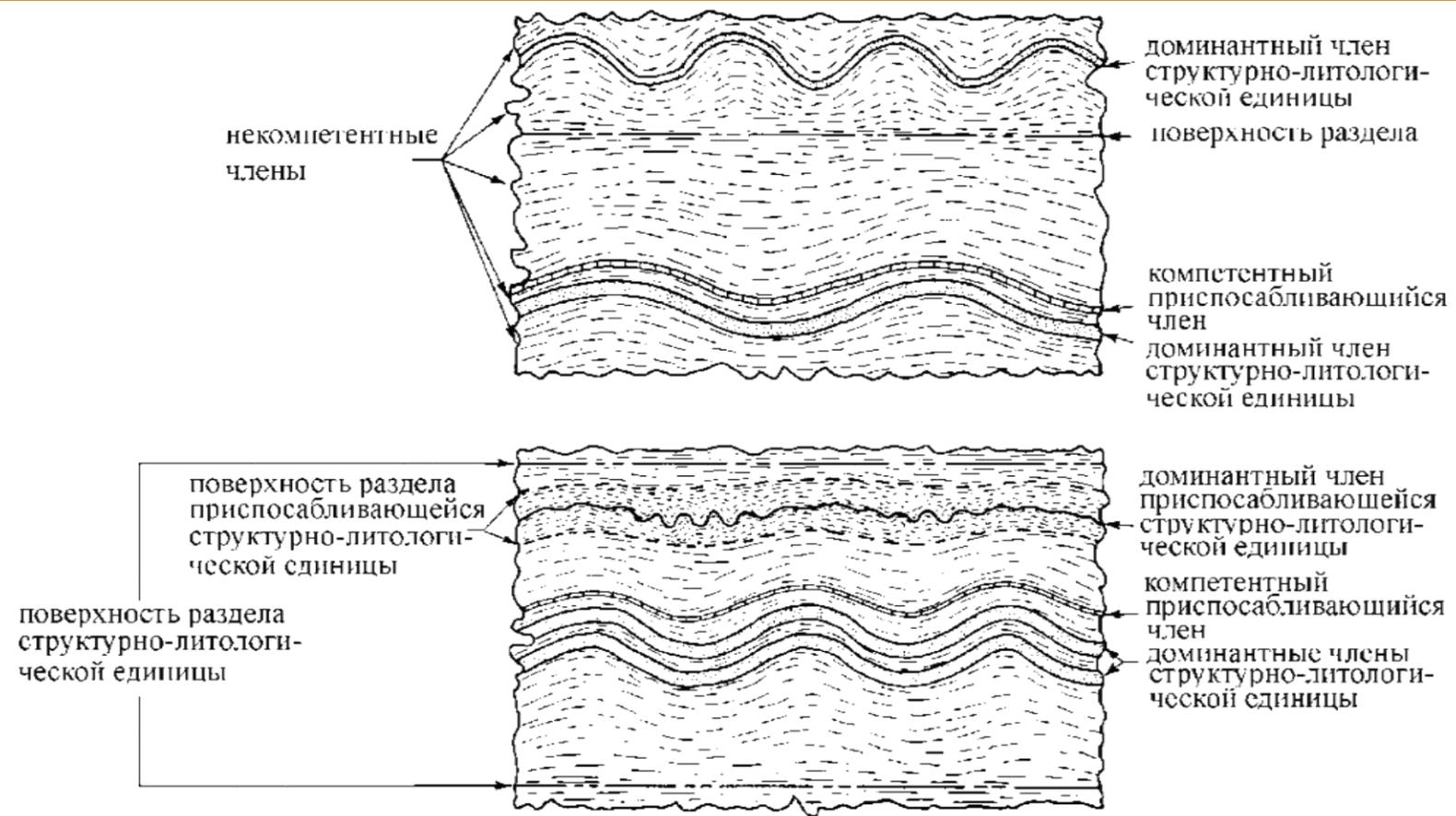
(no Hudleston,
Treagus, 2010)

Зоны контактовой деформации. Разделы дисгармонии



Концентрические складки не могут распространяться на большую глубину. Они отделяются от смежных пачек поверхностью раздела дисгармонии или поверхностью срыва (Ярошевский, 1981)

Схема, показывающая возможные соотношения складок изгиба, развитых в компетентных слоях, и некомпетентного вмещающего их материала, основанная на представлении о взаимодействии зон контактовой деформации (Z.S.C.) вокруг каждого компетентного слоя (Ramsay, Huber, 1987)



Идеализированная схема структурно-литологических единиц и их взаимоотношений (no Curri et al., 1962)

Слои и пачки с разной мощностью и вязкостью образуют складки разной величины. Существуют диктующие (доминантные) слои и пачки. Разделы дисгармонии проходят внутри маловязких пачек

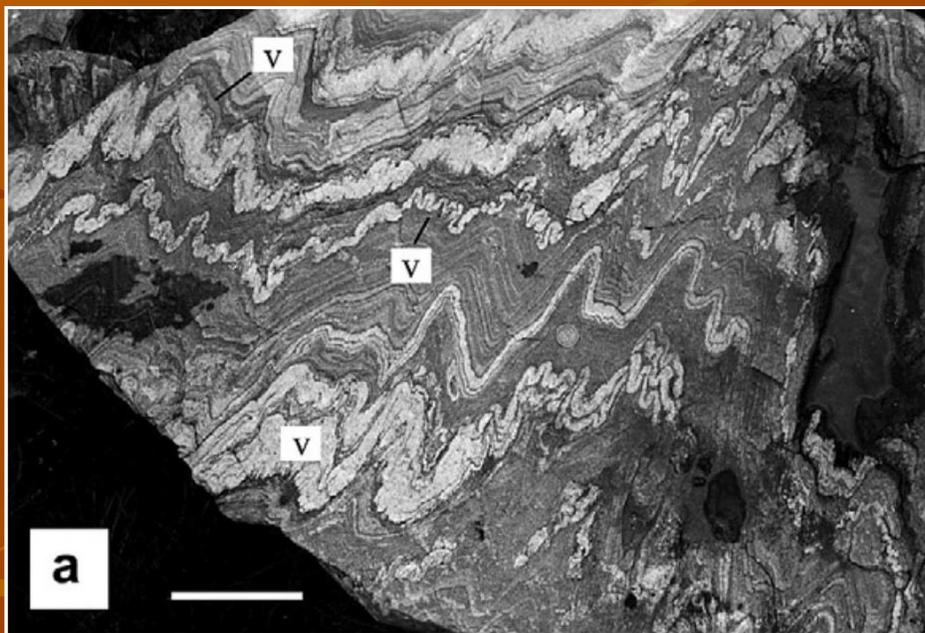
Даже теоретически, без учета случайных неоднородностей, всякая складчатая структура должна быть дисгармоничной



Дисгармоничная складчатость в пачке
переслаивания эвапоритов. Видны разделы
дисгармонии

Примеры дисгармоничной складчатости

Форма складок меняется от слоя к слою



(Hudleston, Treagus, 2010)

Дисгармоничная птигматитовая складчатость в метаморфических породах. Серое – мраморы, кремовое - сланцы



(Alireza Nadimi, 2009)

Еще примеры дисгармоничной складчатости



Соликамская впадина
(по Чайковскому и др.)



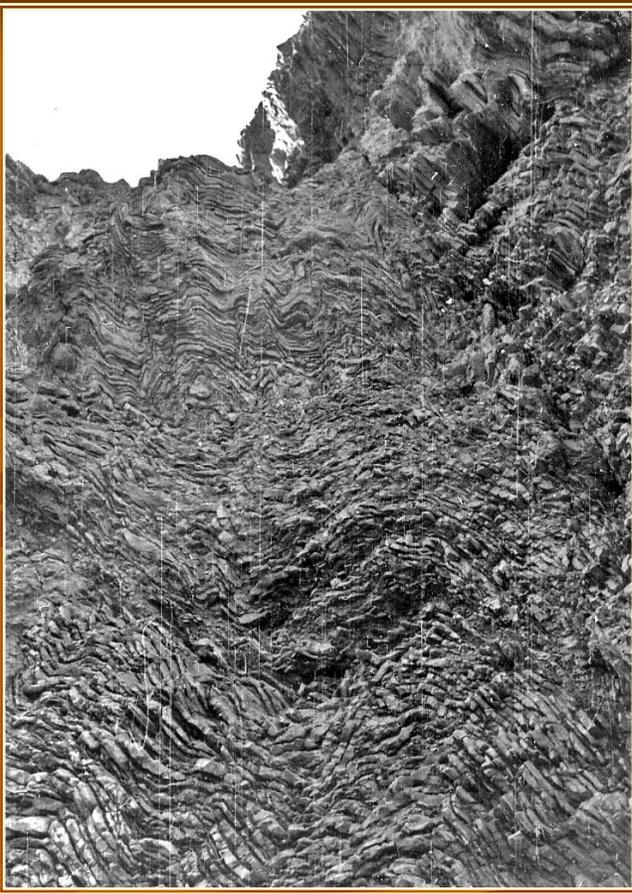
Причудливая дисгармоничная
складчатая структура в толщах
с птигматитовыми жилами
(Hudleston, Treagus, 2010)



12/07/2013

Усиление дисгармонии:

✓ Наличие осадочных неоднородностей



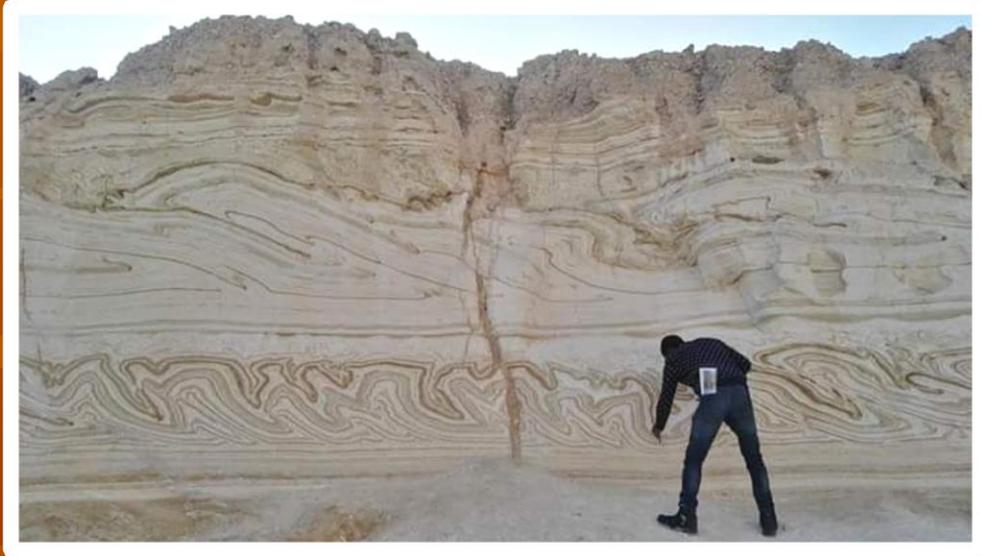
Карбонатный флиш с сингенетичными нарушениями.
Таласский хребет.
Северный Тянь Шань



(Waldron, Gagnon, 2011)



(Waldron, Gagnon, 2011)



Дисгармония в сланцах



Дисгармоничная складчатость в таврической серии Горного Крыма



Складчатость, сформированная путем гравитационного оползания на подводном склоне, всегда является дисгармоничной



Фото А.Б. Кирмасова

Усиление дисгармонии:

- ✓ Наличие осадочных неоднородностей
- ✓ Различие деформации в разных частях складчатой толщи
- ✓ Наличие «жестких» тел
- ✓ Новообразованные жилы и тела в метаморфических толщах



Крайняя степень дисгармонии – Юрские горы (по Вухторф, 1916) из Ярошевского, 1981)

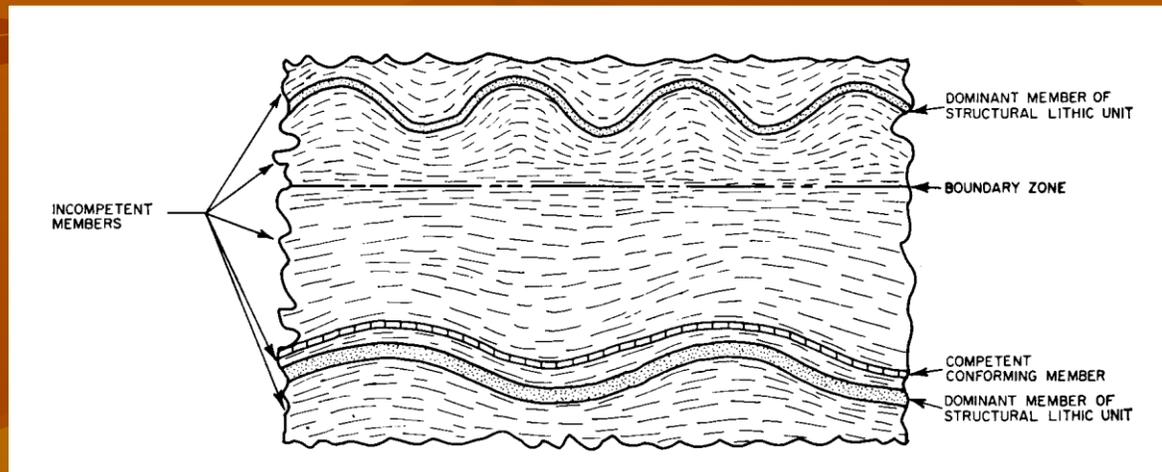
Разделы дисгармонии

Наличие дисгармоничных соотношений приводит к формированию разделов или зон дисгармонии, либо даже зон срыва

- *Поверхность раздела дисгармонии*: условная поверхность, выше и ниже которой имеет место другой размер и (или) форма складок
- *Зоны дисгармонии*: в относительно маломощной зоне перехода от одной складчатой пачки к другой развиваются весьма неправильные изменчивые складки, часто с обилием разрывных нарушений и со значительными смещениями вдоль слоистости
- *Зоны срыва*: разрывные нарушения, которые могут развиваться при резкой концентрации деформаций в разделах дисгармонии или при относительном изменении ориентировки осей деформации

В других случаях, при разрезе, пестром по механическим свойствам, форма складок может меняться от слоя к слою.

Разделы дисгармонии в располагаются
в местах постепенного изменения
деформационных свойств пачек

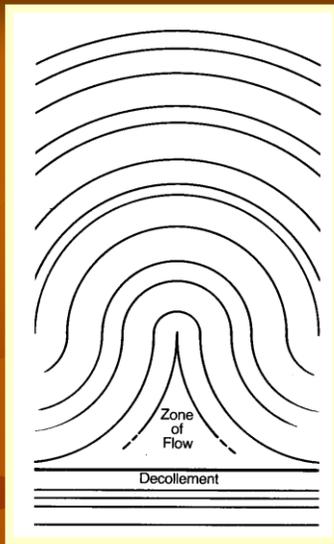


(no Curri et al., 1962)



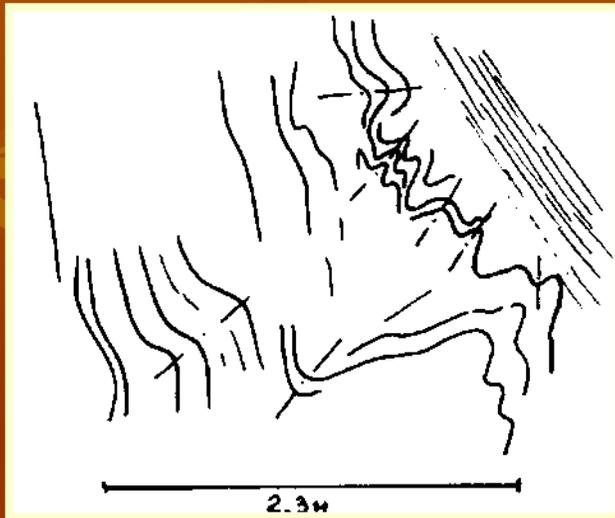
Зоны дисгармонии могут развиваться на
участках более резкой смены деформационных
свойств пачек или в пачках с сингенетичными
нарушениями слоистости

Срывы по разделам дисгармонии

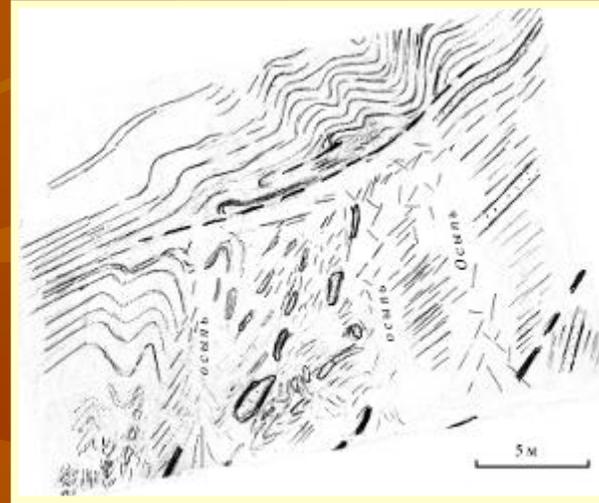


(по Дэвис, 1984)

Срывы, ограничивающие
концентрические складки



Срыв по зоне дисгармонии
(Султан-Уиздаг)



Срыв, связанный с различием деформационных
свойств (наличие пачки с сингенетичными
нарушениями)

Вообще многие разделы дисгармонии
могут наследоваться разрывами при
относительном изменении
ориентировки осей деформации

Следующий структурный уровень - уровень блоков



- Развитие складчатых поясов
- Скашивание (горизонтальный сдвиг в горизонтальной плоскости) на разных стадиях деформационного процесса
- Асимметричные складки – результат формирования в сложном поле деформаций
- Образование взбросов и надвигов и переход деформации на уровень блоков

Рис. В.Н. Войтенко

Переход деформации на уровень блоков

- После исчерпания релаксационных возможностей систем, связанных со структурами уровня зерен и слоев, деформация переходит на новый структурный уровень
- Предварительно формируются тектонические разрывы, являющиеся границами блоков
- Чаще всего эти разрывы подготовлены предшествующей складчатой деформацией
- Переход деформации на уровень блоков начинается, видимо, во время третьей стадии складкообразования
- Возможности изгиба исчерпаны, а однородная деформация в сильно неоднородной среде может происходить лишь ограниченно, тем более, что в деформируемой толще образовались ослабленные зоны
- К этому времени нередко меняется относительная ориентировка осей деформации и эта ситуация может оказаться благоприятной для скольжения по некоторым поверхностям

Границы блоков, подготовленные предшествующей деформацией

■ Зоны срыва

разрывные нарушения, которые могут развиваться при резкой концентрации деформаций в разделах дисгармонии или при относительном изменении ориентировки осей деформации

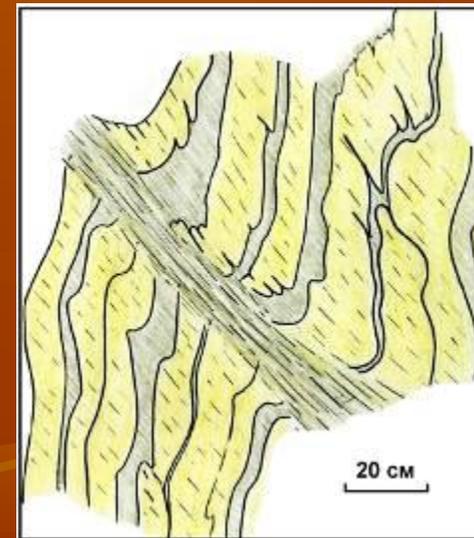
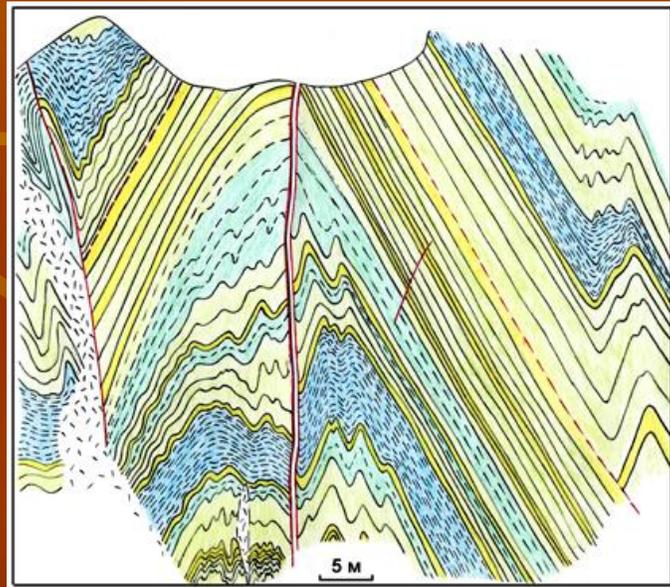
Границы блоков, подготовленные
предшествующей деформацией

- **ДИЗЬЮНКТИВЫ
сжатия**

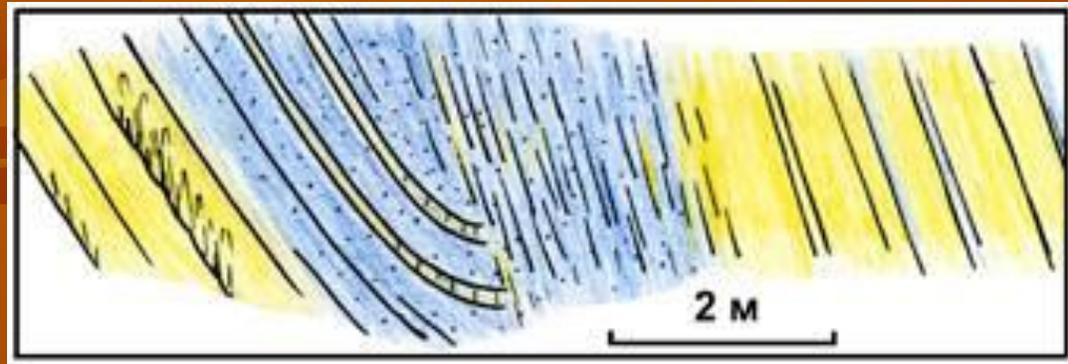
Мы говорили о парагенезе кливаж - складки. Это структуры разного ранга, которые начинают формироваться в разное время.

Рассмотрим теперь парагенез складки - дизъюнктивы сжатия. Это структуры одного ранга, формирующиеся примерно в одно время, а именно, на второй и третьей стадиях складкообразования

Дизъюнктивы сжатия (ДС) представляют собой плоские тела (зоны, швы), имеющие протяженность от первых десятков сантиметров до сотен метров

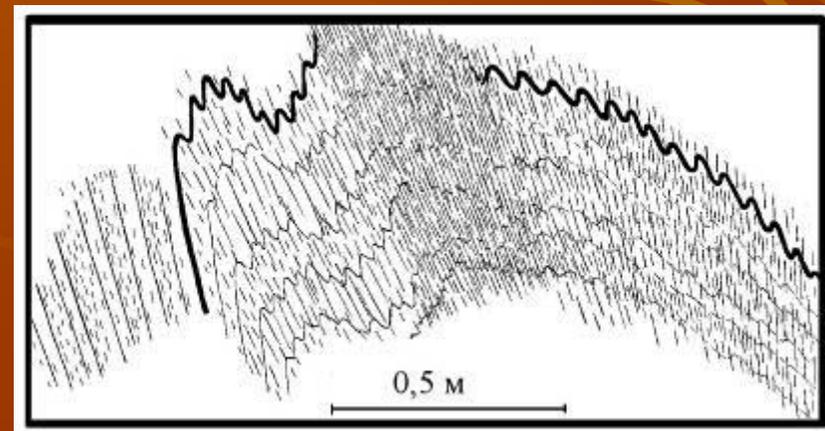


**Дизъюнктивы сжатия напоминают разрывы
и выглядят как зоны рассланцевания**



**Швы лишены следов каких-либо
брекчий или иных тектонитов.
В них доминируют слюдястые минералы.**

**По сравнению с вмещающими породами,
швы обеднены кальцитом или кварцем.
Местами наблюдаются новообразованные
тела, сложенные этими минералами**

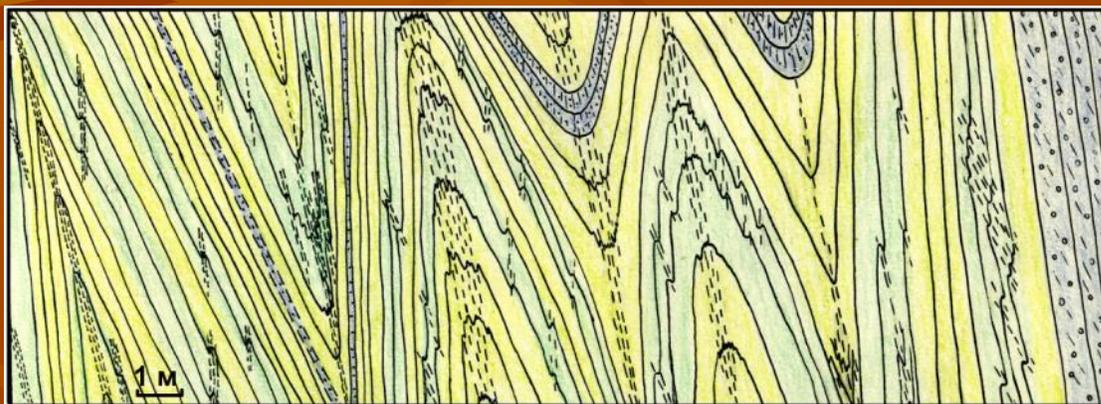


**В швах иногда присутствуют
реликты слоистости**

Дизъюнктивы сжатия обычно располагаются:

- Вдоль осевых поверхностей складок и тогда их можно назвать «осевыми швами» (1)
- Локализуются в зонах утолщенных смыкающих крыльев набегающих складок (2)

1



ДС наследуют зоны сгущения
кливажа и муллион-структур

2



Реже ДС сжатия обязаны своим появлением
вещественным неоднородностям – они приурочены к
пачкам с сингенетично нарушенной слоистостью

Из этого следует, что развитие ДС связано
с существованием неоднородностей ровня пачек слоев

(Рис. и фото А.Г. Малюжинца и Н.С. Фроловой)

Анализ фактического материала показывает:о

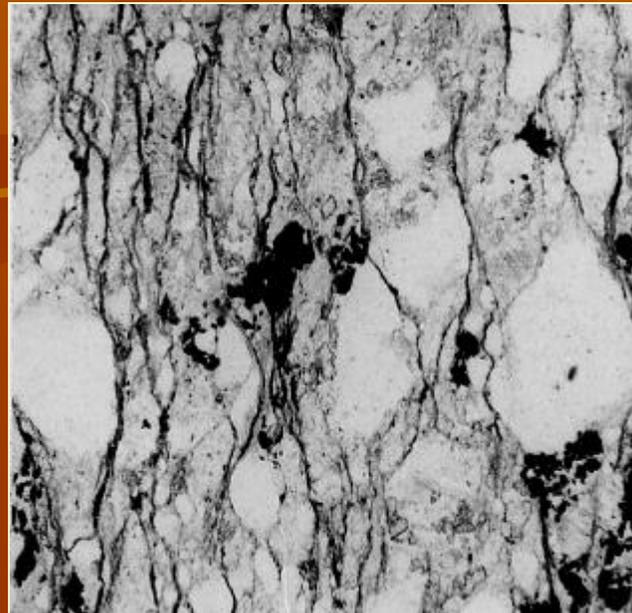
- ДС развиваются перпендикулярно оси максимального укорочения.
- ДС локализуются на участках концентрации деформации укорочения.
- ДС наследуют зоны сгущения кливажа и муллион-структур.
- Механизмом переноса вещества во время деформации при образовании ДС может быть только растворение под давлением

Следовательно,

Нужно рассмотреть процесс деформации в иерархически построенной неоднородной среде с участием компрессионной ползучести

Механизм формирования дизъюнктивов сжатия

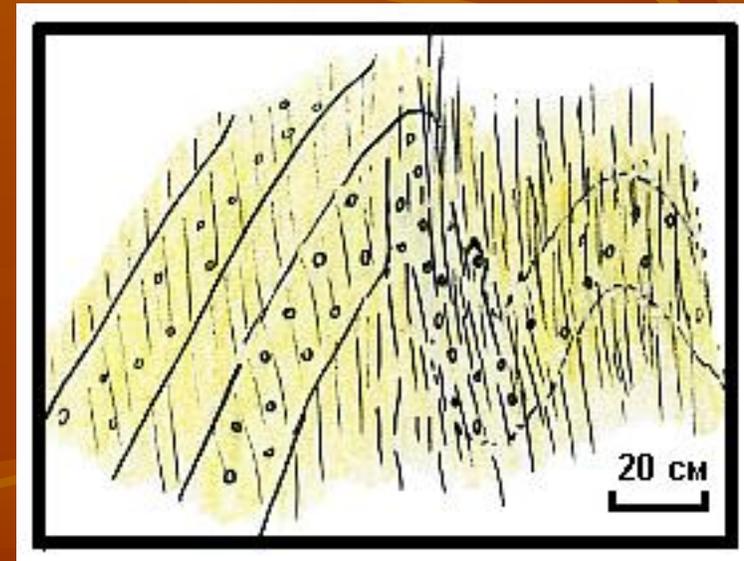
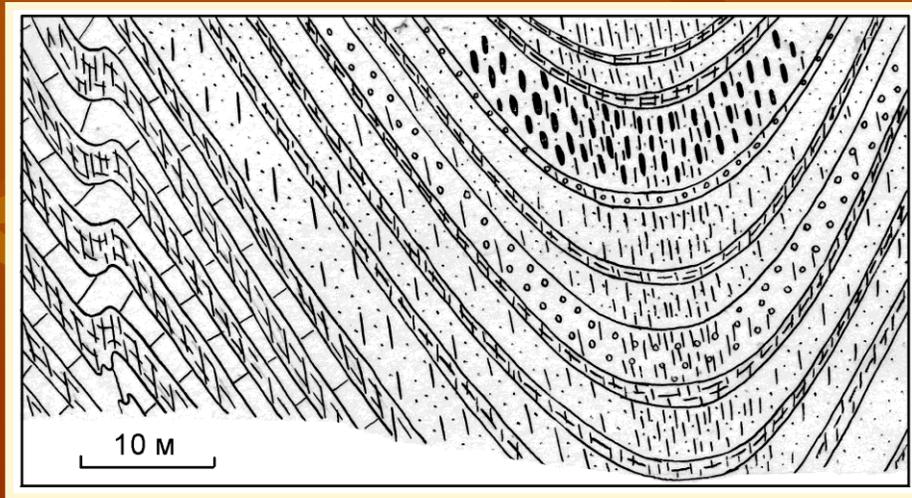
- Процесс начинается на самом низком структурном уровне – уровне зерен. Сначала перпендикулярно сжатию зарождается кливаж, являющийся структурой растворения под давлением. Каждый кливажный шов можно рассматривать как ДС на микроуровне



- Затем процесс переходит на более высокий структурный уровень: развиваются макрокливажные швы, приуроченные к границам вещественных, реже мелких структурных неоднородностей



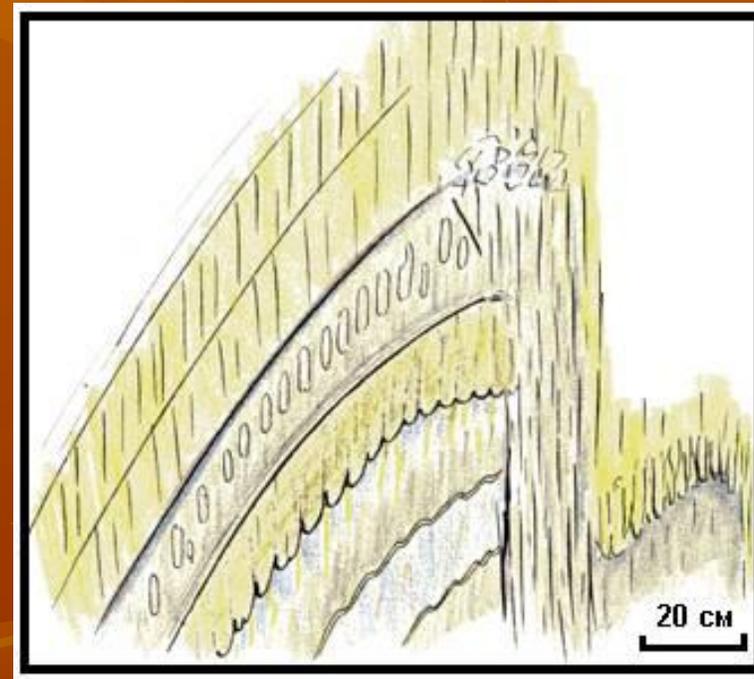
- Далее включается следующий структурный уровень. Неоднородности более крупного масштаба, например, осевые зоны складок и т.п., определяют появление зон сгущения кливажа на участках максимальной концентрации сжатия. В этих зонах концентрируется и флюидный поток с преобладанием выноса подвижных компонентов. В это время на участках относительного спада давления мобильные кварц и кальцит могут частично осаждаться (в рассеянном виде или в форме жильных тел). Таким образом, состав и структура этих зон начинает меняться, однако в них еще могут быть видны реликты слоистости.



(Рис. А.Г. Малюжинца и Н.С. Фроловой)

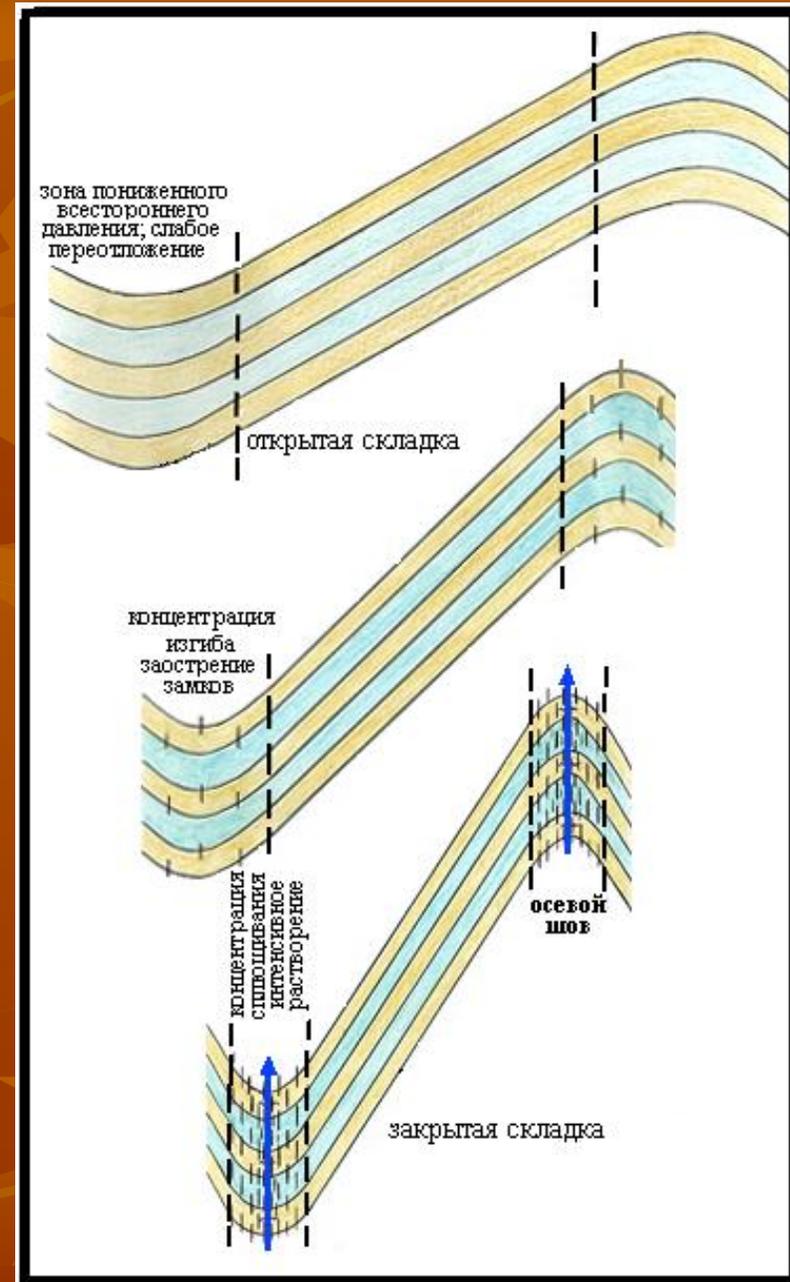
- С течением времени деформация быстро возрастает, а процесс растворения под давлением, к которому присоединяется катаклаз, концентрируется во все более узких зонах, которые можно назвать шовными. Они уже существенно отличаются по составу и структуре от вмещающих пород и становятся механически ослабленными.

Масштабы химической дифференциации при формировании крупных швов ДС могут быть на несколько порядков выше, чем при образовании кливажных и муллионных швов



(Рис. Н.С. Фроловой)

Схема формирования ДИЗЬЮНКТИВОВ СЖАТИЯ

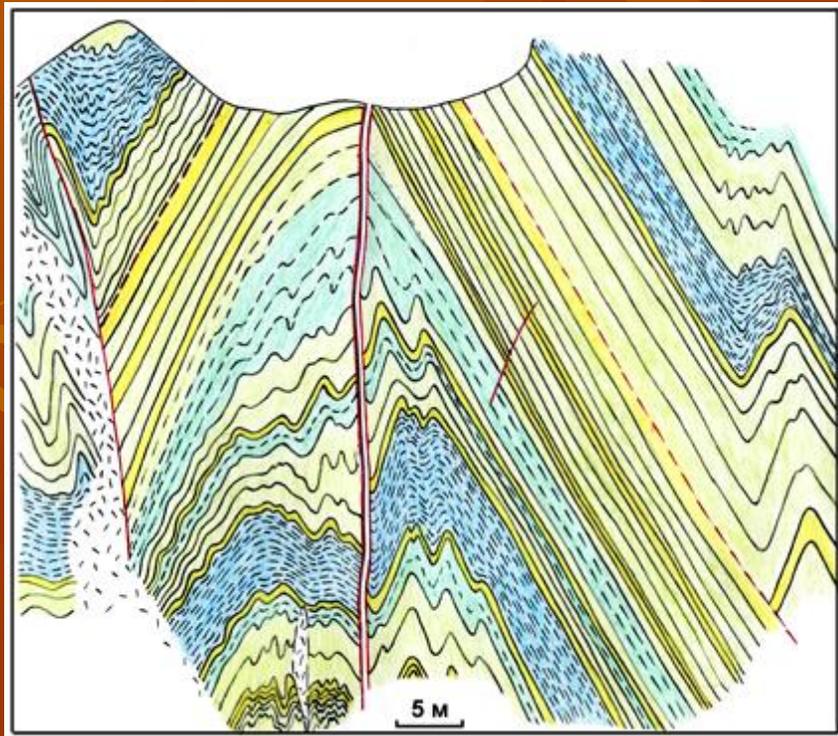


(по А.Г. Малюжину)

По сформировавшимся шовным зонам осуществляется сближение крыльев ДС (процесс, который можно назвать сшиванием). Его следствия:

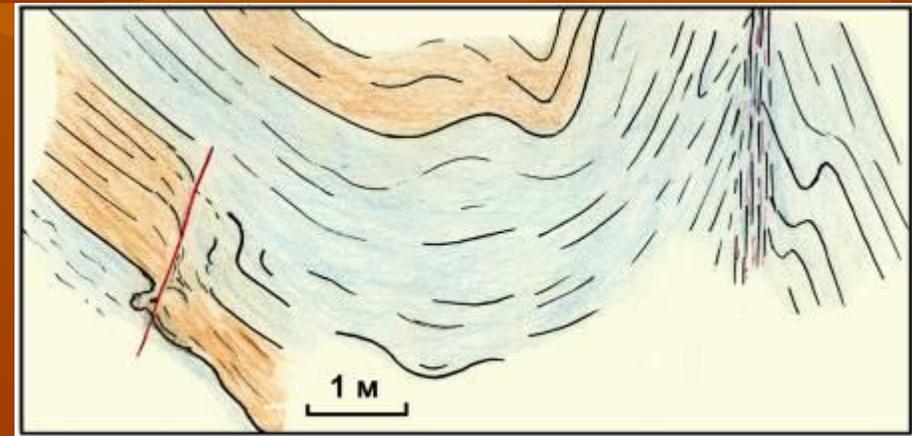
- Кажущее смещение слоев на противоположных крыльях (1)
- Преобразование дуговидных антиклиналей в гребневидные (2)

1



Таласский хр. Северного Тянь-Шаня

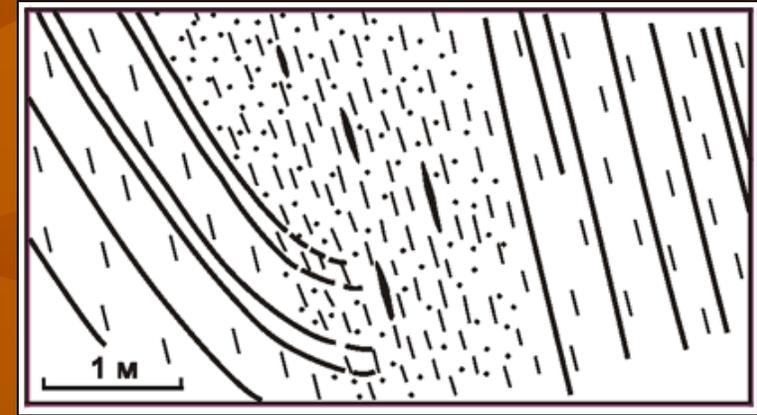
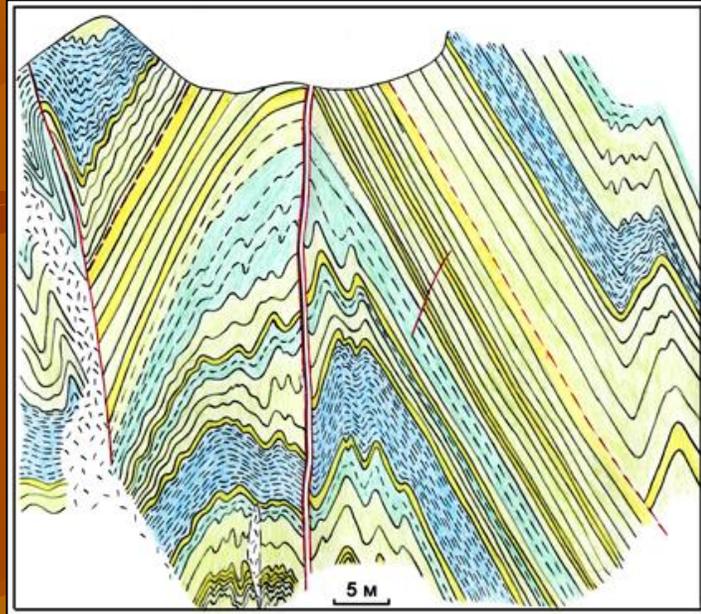
2



Хр. Султан-Уиздаг

(Рис. А.Г. Малюжинца и Н.С. Фроловой)

Интенсивное развитие ДС приводит к эффекту ложного моноклиналильного залегания: замки складок полностью перерабатываются в зонах «осевых швов»



(Рис. А.Г. Малюжинца и Н.С. Фроловой)

На далеко зашедшей стадии развития шовные зоны выглядят как разрывы, хотя какие-либо смещения вдоль них отсутствуют

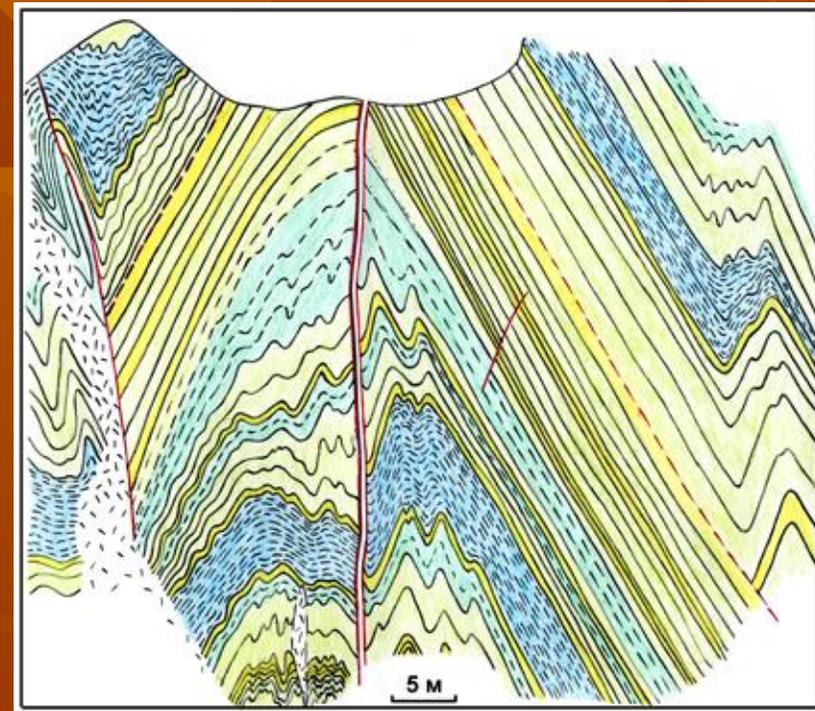
При изменении ориентировки сжатия, что часто происходит в складчатых областях, по ослабленным зонам ДС легко осуществляется движение. И тогда по формальным признакам такие разрывы обычно диагностируются как взбросы.

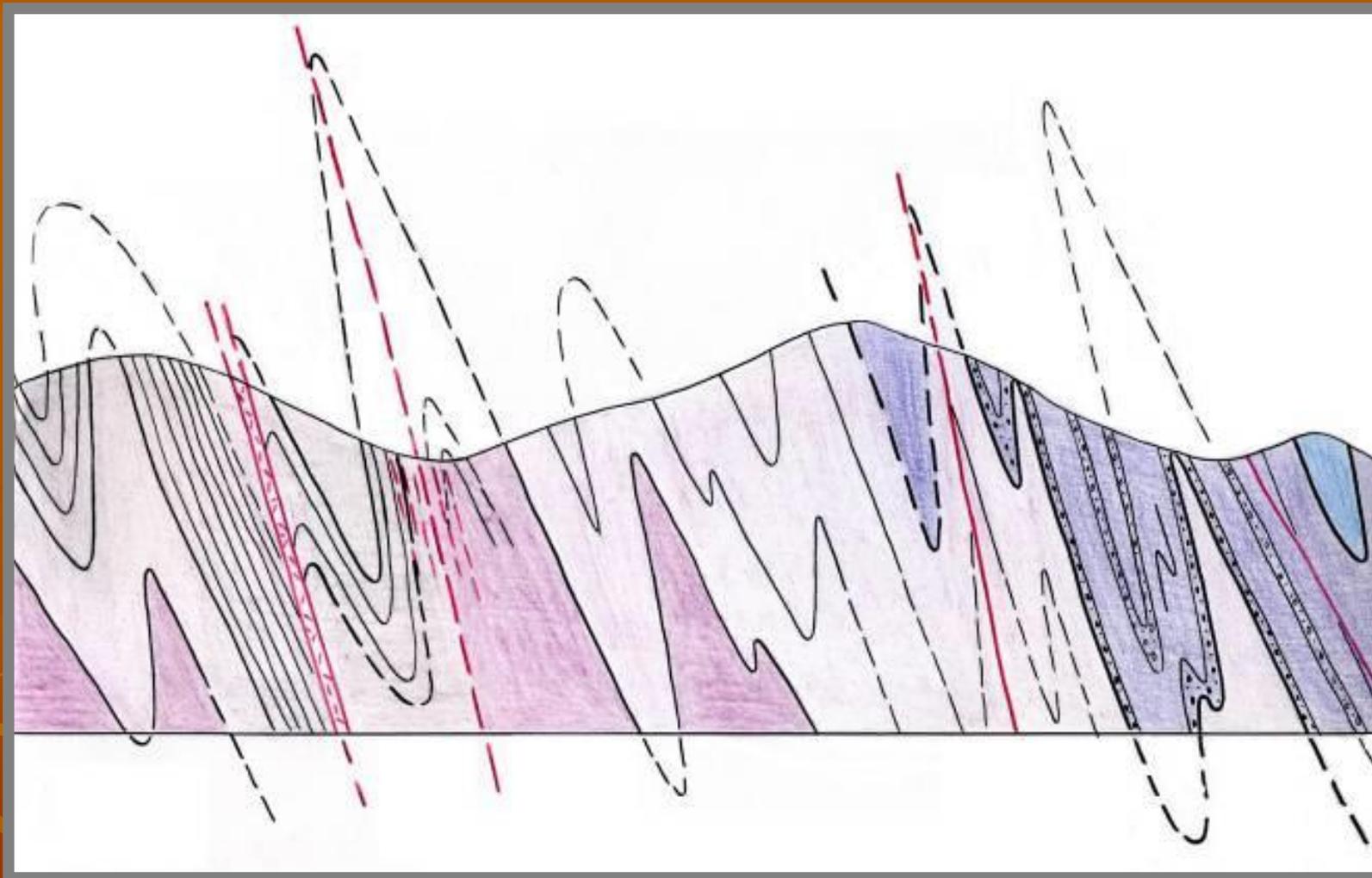
Итог

- Дизъюнктивы сжатия достаточно широко распространены в складчатых областях, хотя часто их трудно диагностировать
- ДС представляют собой зоны резкой локализации деформации укорочения. Концентрация деформации вызвана существованием неоднородностей (уровня пачек слоев), подготовленных на более ранней стадии структурообразования
- Механизмом деформации является компрессионная ползучесть (растворение под давлением)
- На поздних этапах деформации вдоль ДС могут происходить смещения взбросового типа. Однако зарождались они как разрывы, перпендикулярные оси максимального укорочения

Дизъюнктивы сжатия (осевые швы) как границы блоков

В процессе формирования этих швов образуются ослабленные зоны и происходит сближение разделяемых ими блоков. Однако при изменении относительной ориентировки осей деформации по швам происходят перемещения сдвигового типа, т.е. они превращаются в «настоящие» разрывы.





Взбросы, наследующие осевые швы (дизъюнктивы сжатия) при изменении относительной ориентировки осей деформации

Фрагмент (около 1,5 км) разреза через северную часть южного склона Таласского хребта (по Н.С. Фроловой).

Границы блоков

- Разрывы на подвернутых крыльях асимметричных складок

мы рассматриваем

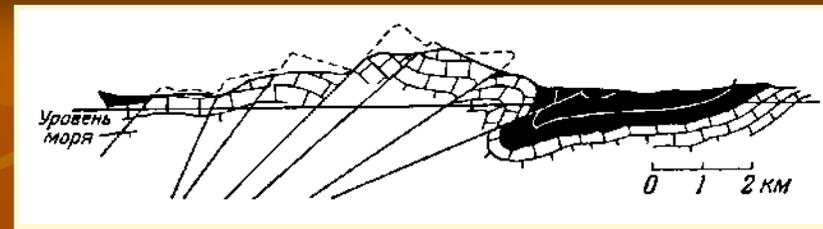
Геодинамическая обстановка:
сочетание горизонтального сжатия с горизонтальным скашиванием

Структурный уровень деформации:
уровень блоков

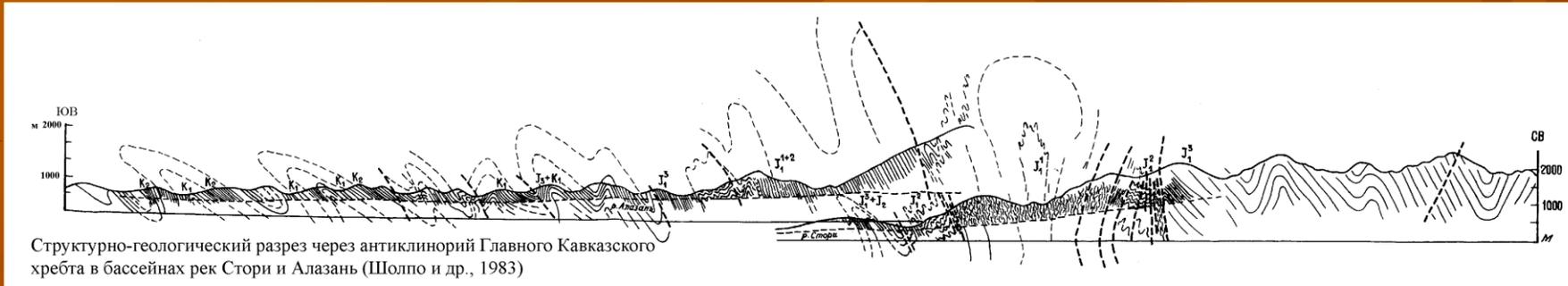
Структурный парагенез

Складки-надвиги
(определяющие структуры, последовательно формирующиеся во времени)

Вергентность складчатых сооружений



Фрагмент Апеннин (по де Ситтеру, 1960)

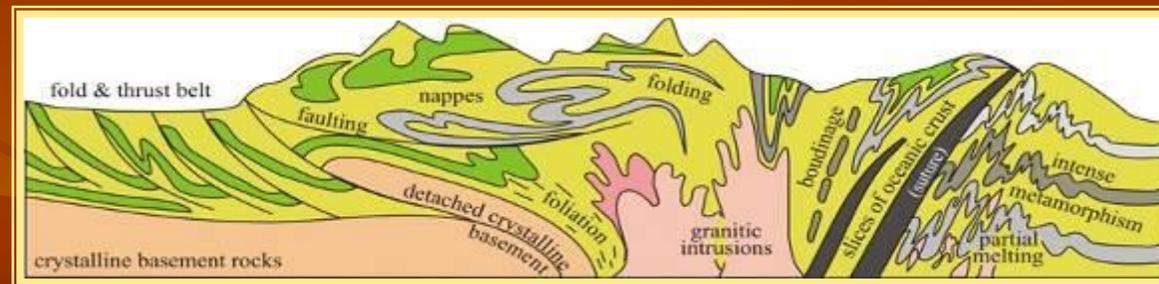


Структурно-геологический разрез через антиклинорий Главного Кавказского хребта в бассейнах рек Стори и Алазань (Шолпо и др., 1983)

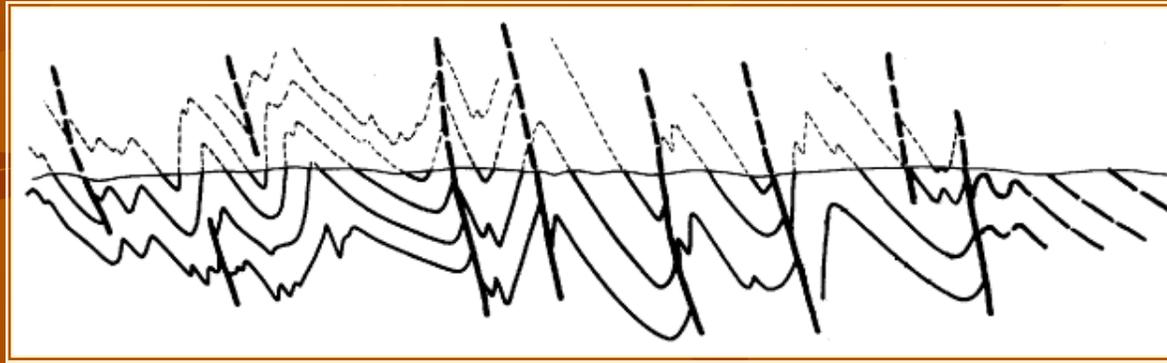


Схематический разрез французских Альп (из Руттена, 1972)

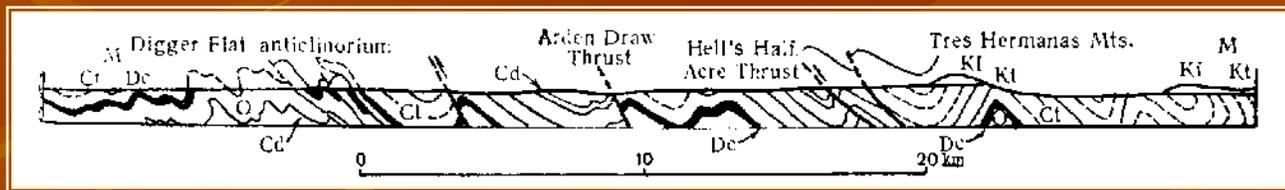
Схема строения складчатого сооружения



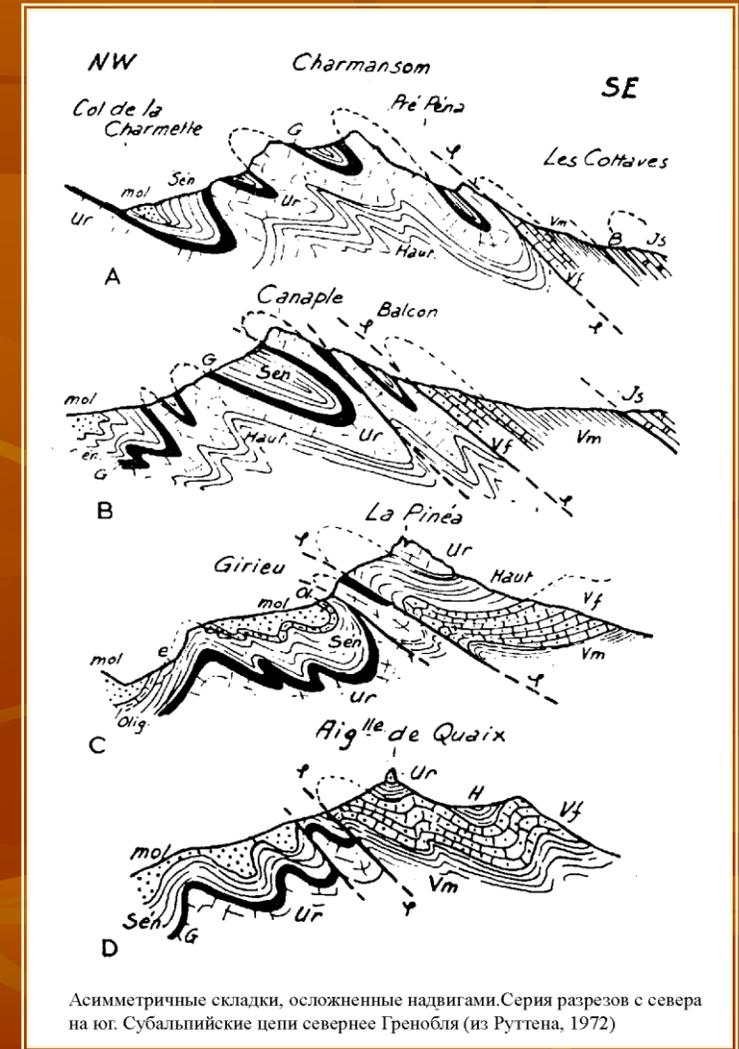
Асимметричную складчатость всегда сопровождают взбросы и надвиги



Асимметричные складки в Зилаирском синклинории Южного Урала (по В.В. Эзу)

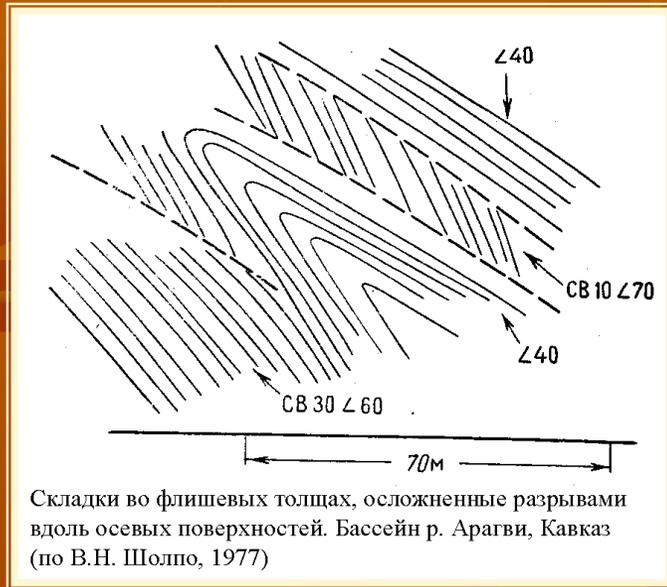


Геологический разрез через Марафонское поднятие (США) (Belousov, 1968)

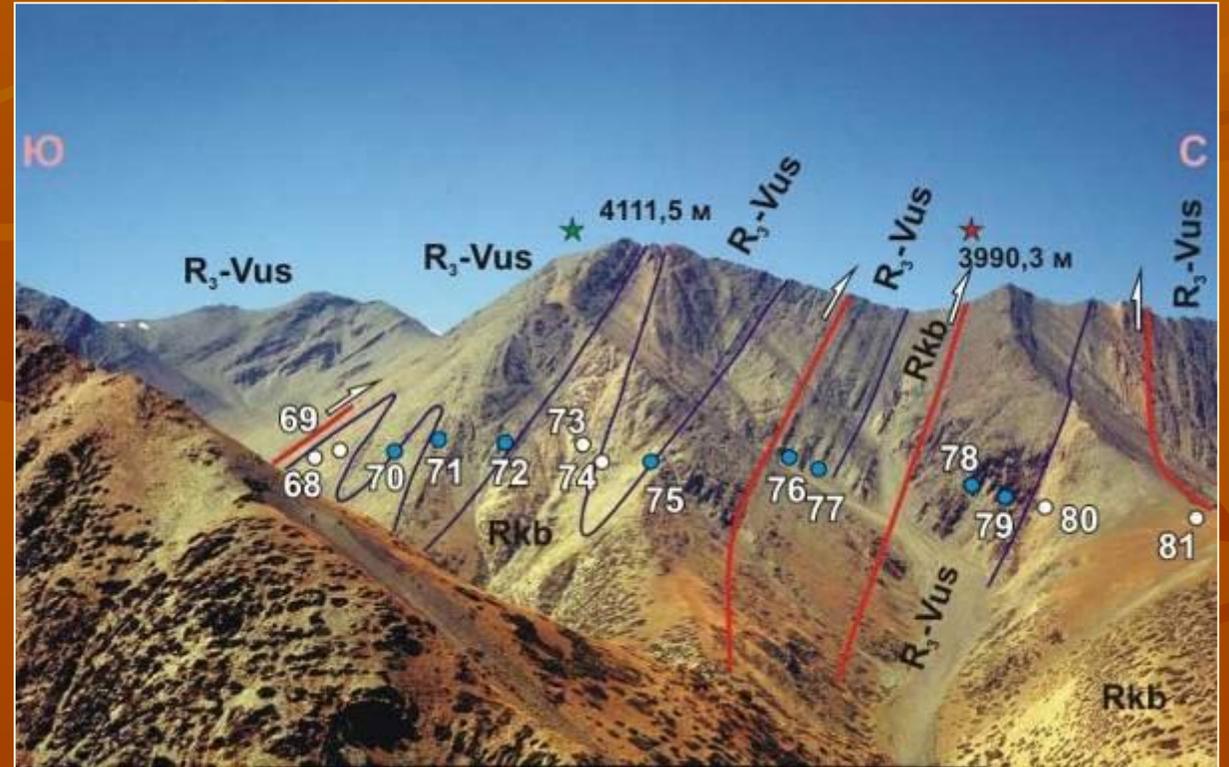


Асимметричные складки, осложненные надвигами. Серия разрезов с севера на юг. Субальпийские цепи севернее Гренобля (из Рутгена, 1972)

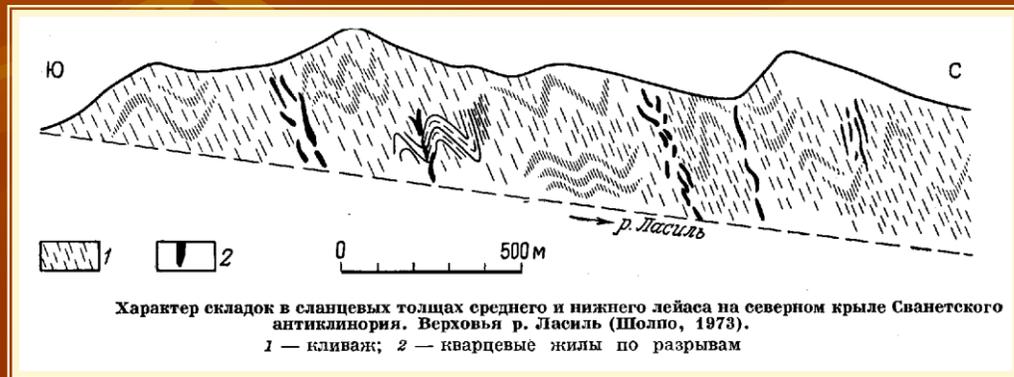
Асимметричные складки, осложненные разрывами



Кавказ



Таласский хребтет Северного Тянь-Шаня (рис. В. Н. Войтенко)



Асимметрия складок, ее типы, причины и следствия



Асимметричные складки формируются в механической обстановке сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом вдоль горизонтальной плоскости

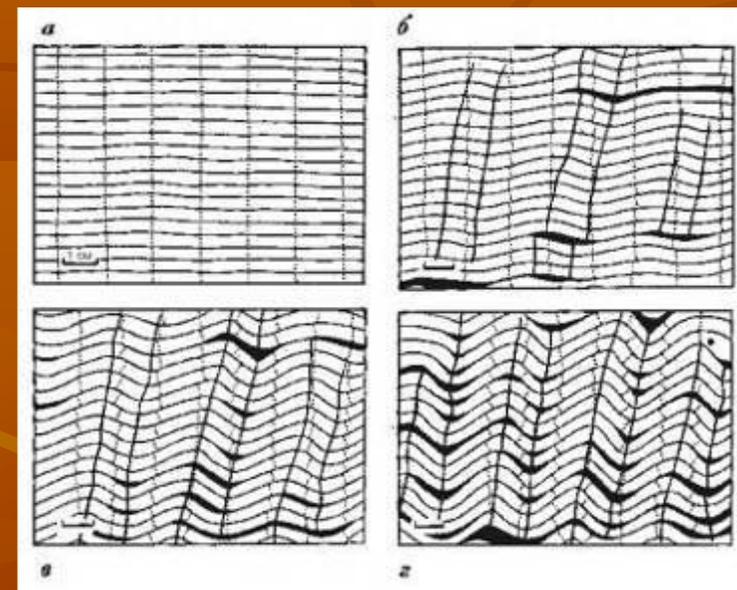
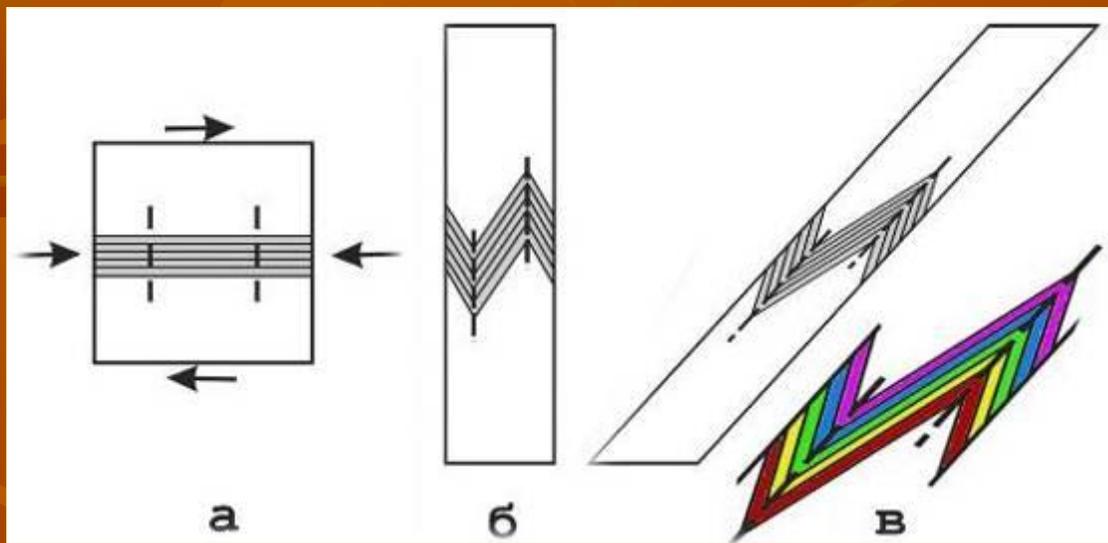
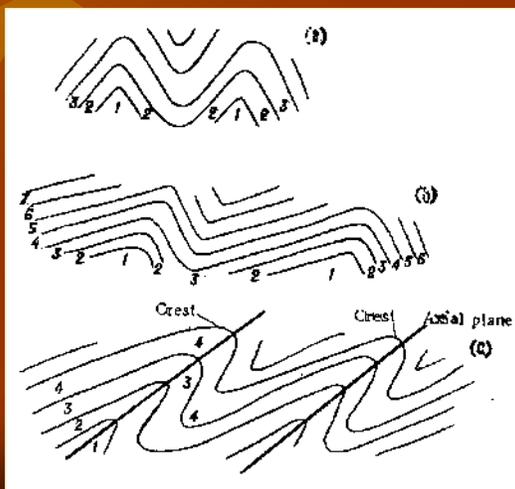


Схема (по М.А. Гончарову)

Этот процесс был воспроизведен экспериментально [Нюеррер *et al.*, 1983].



Постепенное увеличение степени асимметрии складок по мере возрастания составляющей горизонтального сдвига (Belousov, 1968)

Три типа асимметрии складчатости

[Гончаров, 1989]

Первый тип – слабая асимметрия складчатости, когда осевая плоскость складок слегка отклоняется от биссекторной плоскости, кливаж на обоих крыльях является секущим и в целом параллельным осевым поверхностям складок.



Таласский хребет, Северный Тянь-Шань



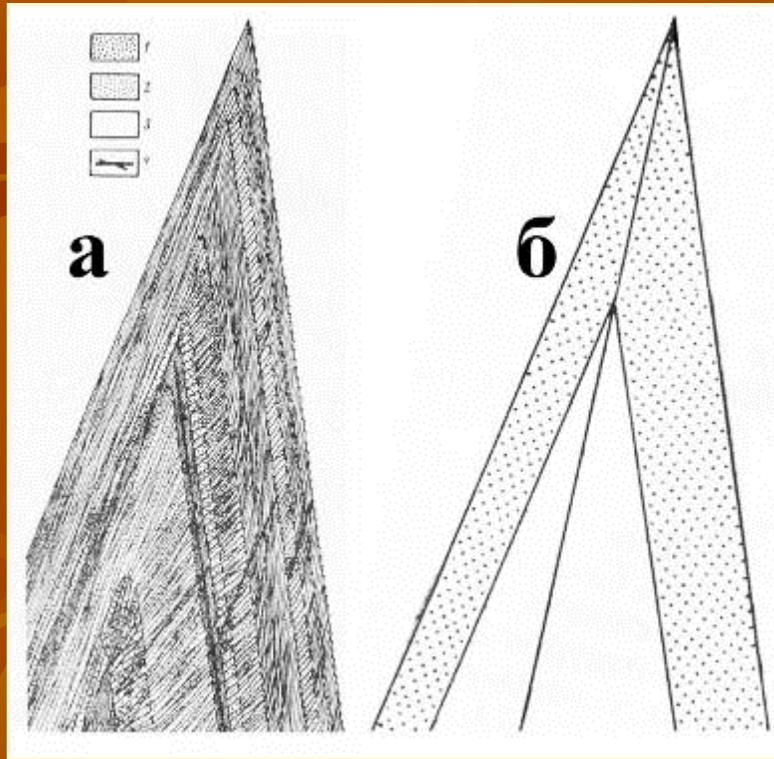
Фото Н.С. Фроловой

Этот тип складчатости формируется при значительном преобладании горизонтального сжатия над сдвигом вдоль слоистости.



Интернет-ресурс

Второй тип – умеренная (хотя и резко выраженная) асимметрия складчатости, когда осевая плоскость складок существенно отклоняется от биссекторной плоскости, кливаж на одних крыльях параллелен слоистости, а на противоположных крыльях является секущим.



Асимметричные складки в Зилаирском антиклинории Южного Урала (по М.А. Гончарову)

Этот тип складчатости образуется при примерном «паритете» горизонтального сжатия и сдвига.

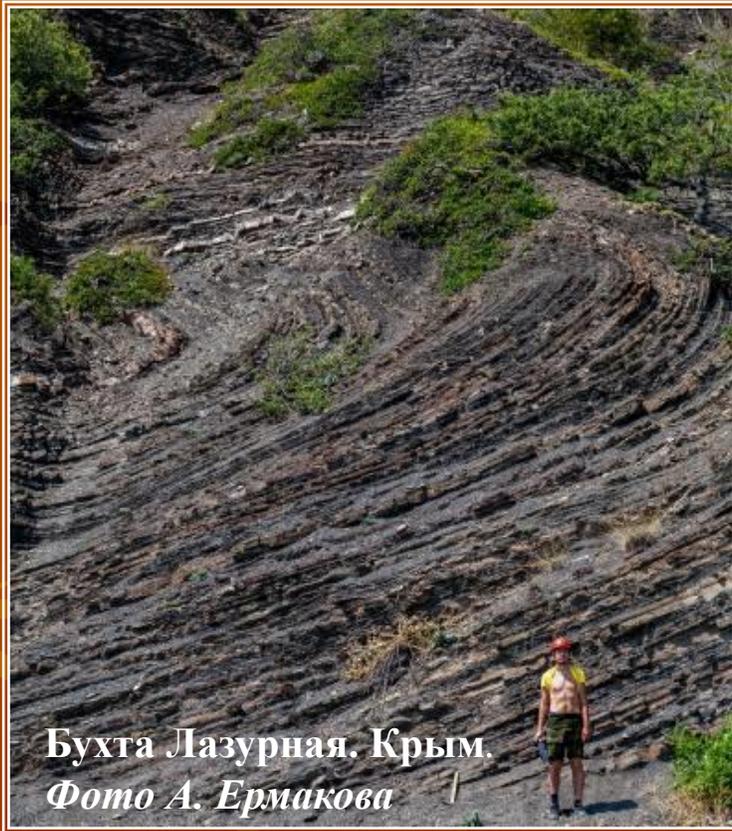


Рис. 2. Общий вид одной из антиклинальных складок. На восточном крыле (справа) кливаж секущий, на западном — послойный

Примеры асимметричных складок



Третий тип – сильная асимметрия почти изоклиальной лежащей складчатости; противоположные крылья складок резко различаются по своей длине.

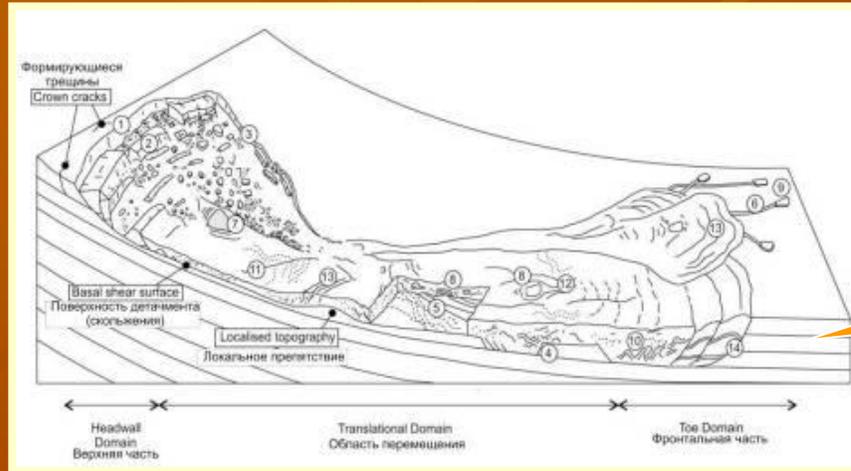


(интернет-ресурс)



Этот тип складок формируется при значительном преобладании сдвига вдоль слоистости над горизонтальным сжатием

Один из вариантов обстановки формирования асимметричных складок.
Укорочение достигается за счет наличия упора, а скашивание за счет трения в основании соскальзывающих масс



Модель деформаций в отложениях транспорта масс
(по Bull et al., 2009 из Никишин и др.)

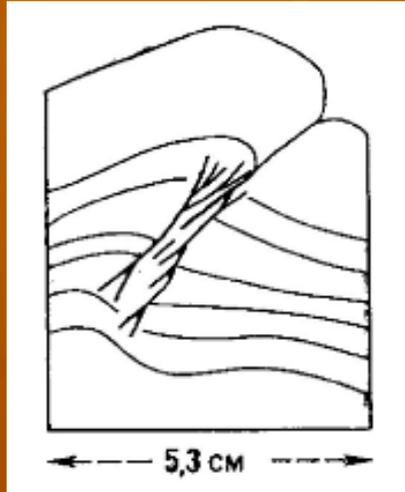
Асимметричные складки и складки, осложненные взбросами



Подводнооползневые асимметричные складки в отложениях Мертвого моря (по Alsop, Marco, 2011)

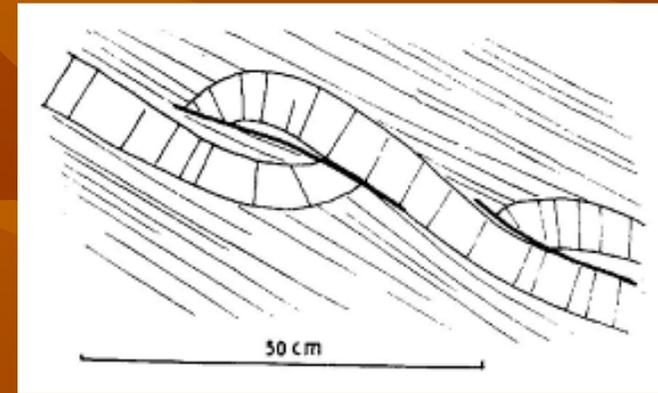
Разрывы на подвернутых крыльях асимметричных складок

а



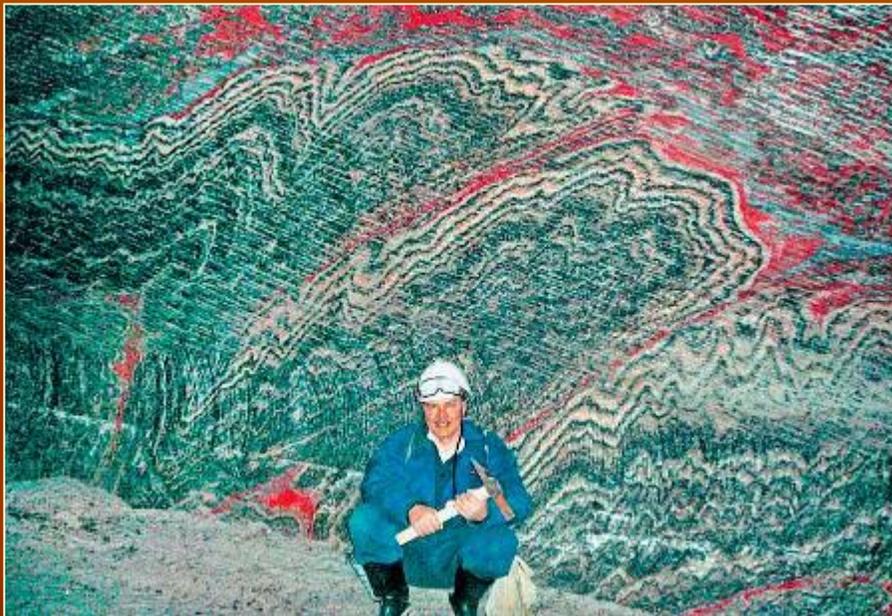
Эксперимент

б



Зарисовка обнажения

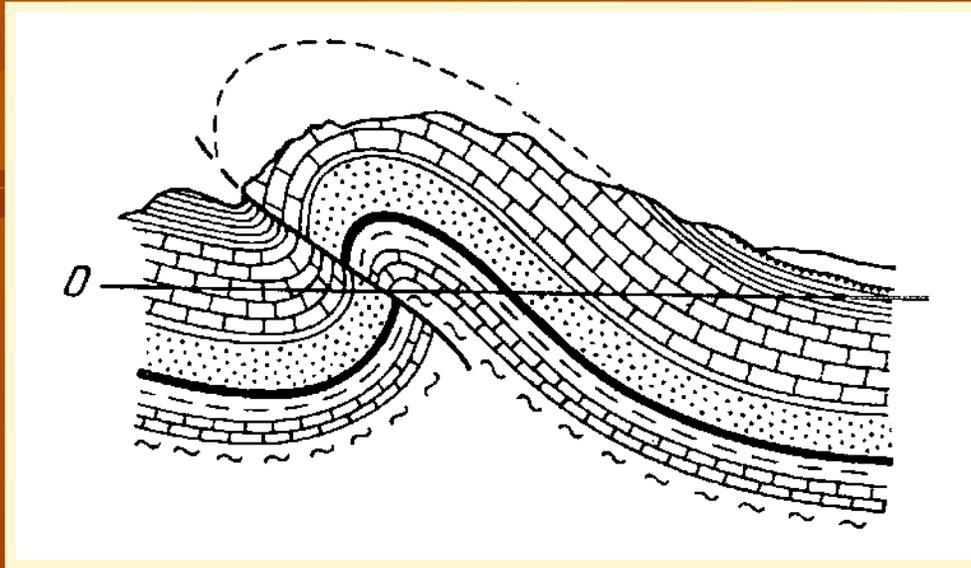
в



Толща слоистой соли, Соликамская впадина.

(а – по Белоусову, 1985; б – по Sitter, 1964);
в – Чайковский и др.)

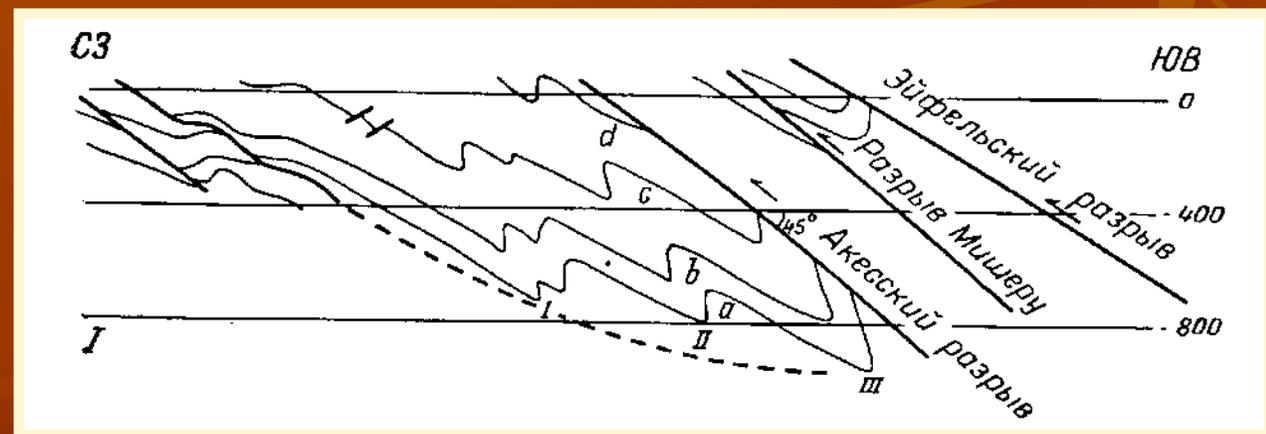
Разрывы на подвернутых крыльях асимметричных складок как границы блоков



Сначала образуются складки. При наложении горизонтального сжатия они становятся асимметричными, на их подвернутых крыльях формируются взбросы или надвижки.

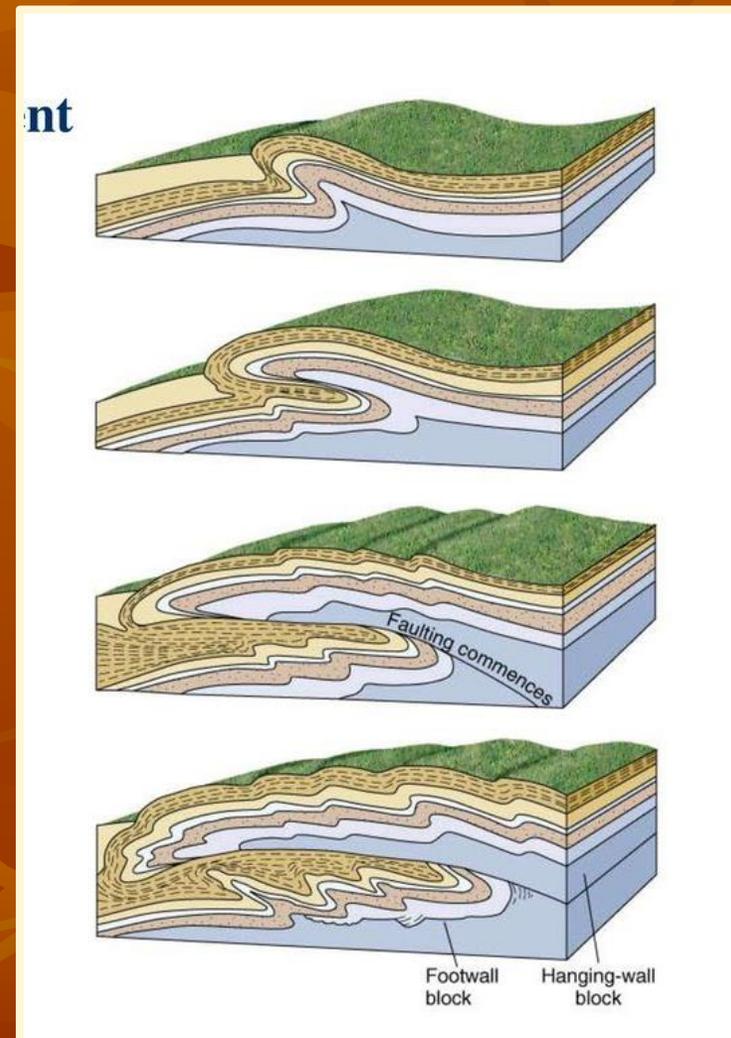
(по Ярошевскому, 1981)

Юрские горы (вверху) и
Льезский каменноугольный
бассейн (справа)



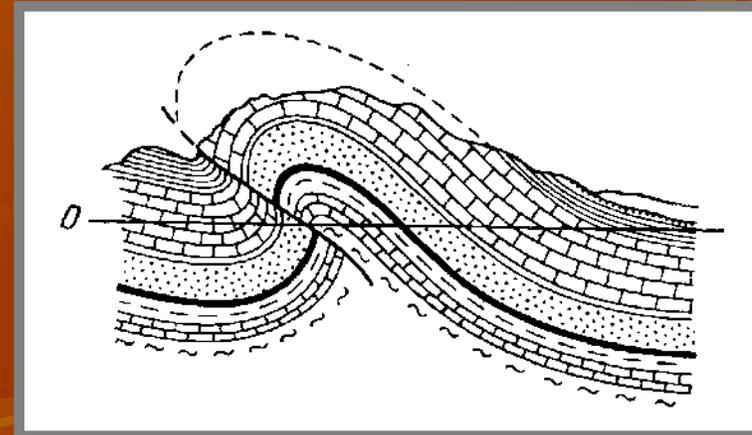
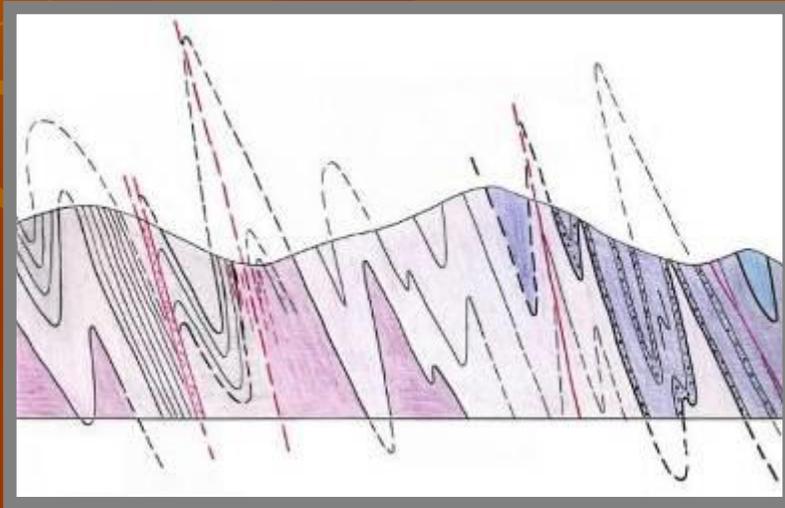
Считается, что некоторые сместители шарьяжей представляют собой разрывы, сформировавшиеся на подвернутых крыльях вначале асимметричных, а затем лежачих складок

Схема формирования покрова, постепенно развивающегося на подвернутом крыле опрокинутой складки (по Гейму, 1878)



Проверьте себя и ответьте на вопросы:

- ✓ Почему возникает асимметрия складок?
- ✓ В каком поле деформаций это происходит?
- ✓ Изменяется ли поле деформаций во время всего процесса складкообразования?
- ✓ Почему деформация переходит на уровень блоков?
- ✓ Каким образом осуществляется структурная подготовка границ блоков?
- ✓ Что формируется раньше – складки или надвиги?
- ✓ Каковы два основных способа формирования сопровождающих складки надвигов?
- ✓ Основные члены структурного парагенеза сочетания горизонтального сжатия с горизонтальным сдвигом в горизонтальной плоскости
- ✓ Время формирования этого парагенеза по отношению ко всему этапу складкообразования



Структурный парагенез, характерный для обстановки сочетания горизонтального сжатия и горизонтального сдвига в горизонтальной плоскости в складчатых областях:

Наклонные асимметричные складки и сопровождающие их взбросы или надвиги (последние формируются в конце этапа складкообразования)

Причины асимметрии складок – наложение на горизонтальное сжатие горизонтального скашивания, которое возрастает с течением времени.

Причины формирования соскладчатых взбросов и надвигов – переход от стадии изгиба к стадии общего сплющивания, сопровождающегося изменением относительной ориентировки осей деформации. В этой ситуации энергетически выгоднее осуществление деформации путем перемещения по разрывам.

Основной тип разрывов – взбросы и надвиги. Они формируются двумя путями:

- а) наследуют ослабленные зоны осевых швов;
- б) развиваются на подвернутых крыльях асимметричных складок.

Структурный уровень деформации: уровень слоистых толщ и блоков

Последовательность формирования: складки – надвиги.

Время формирования: конец этапа складкообразования

Какие же структурные парагенезы формируются на первой, второй и третьей стадиях складкообразования на разных структурных уровнях?

- Уровень толщи
- Уровень ритма и пачки
 - Первая стадия
- Уровень слоя
 - Вторая стадия
- Уровень агрегатов зерен
 - Третья стадия
- Уровень зерен

Проверьте себя и ответьте на поставленные выше вопросы

