

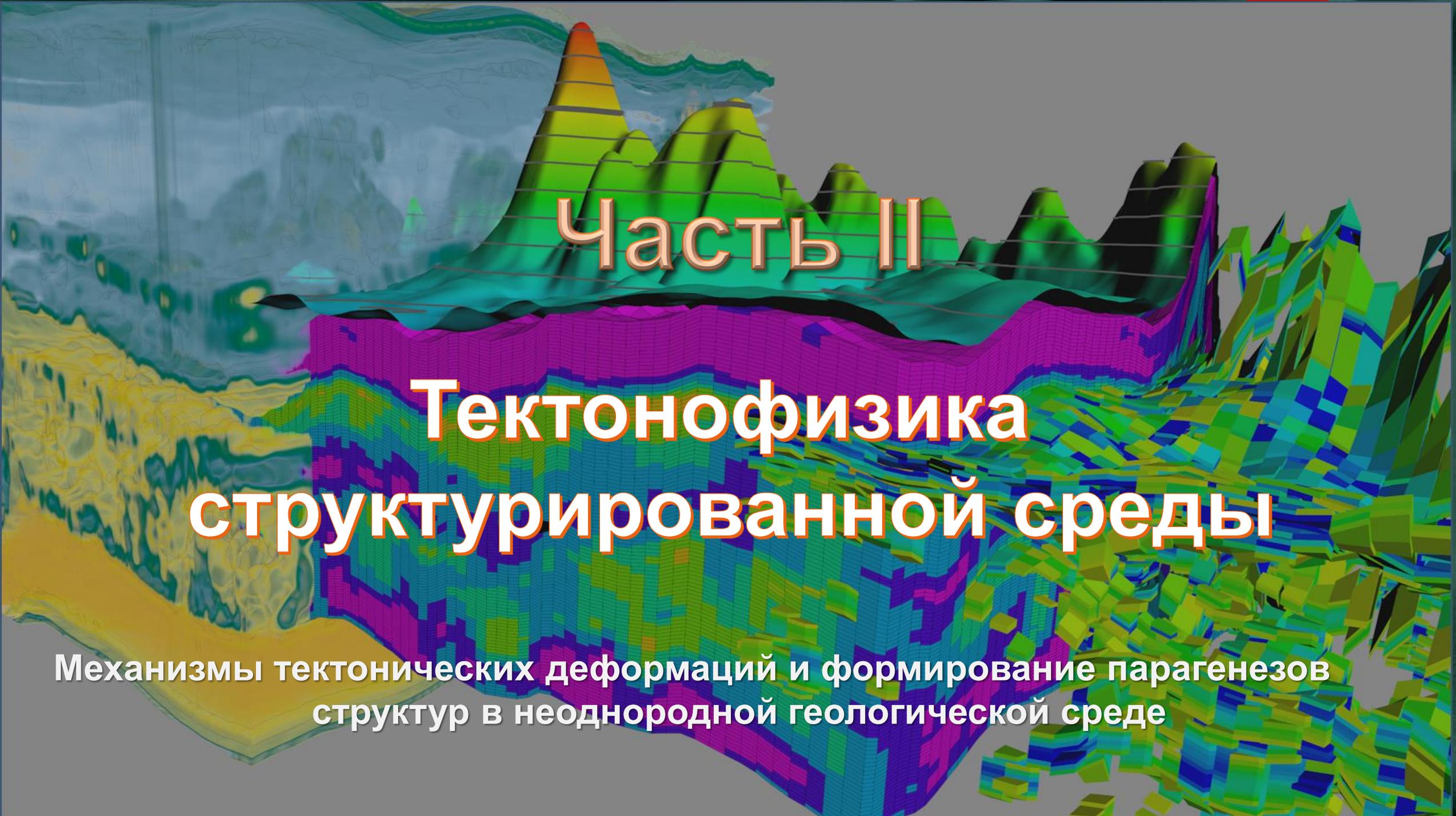


Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 13

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 13

СКЛАДКИ



СКЛАДКИ

Горно-складчатые области состоят из множества складок – изгибов слоев

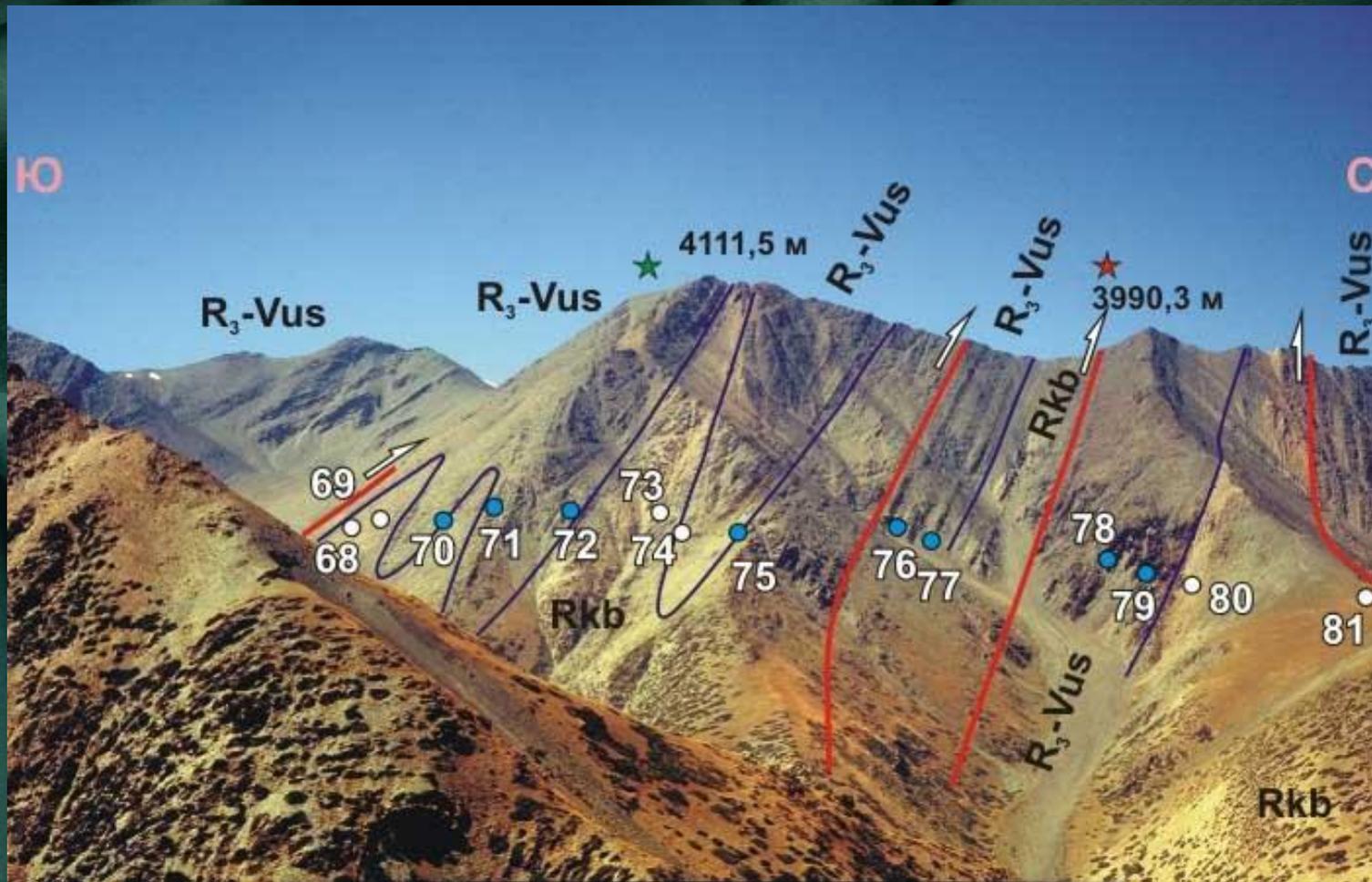
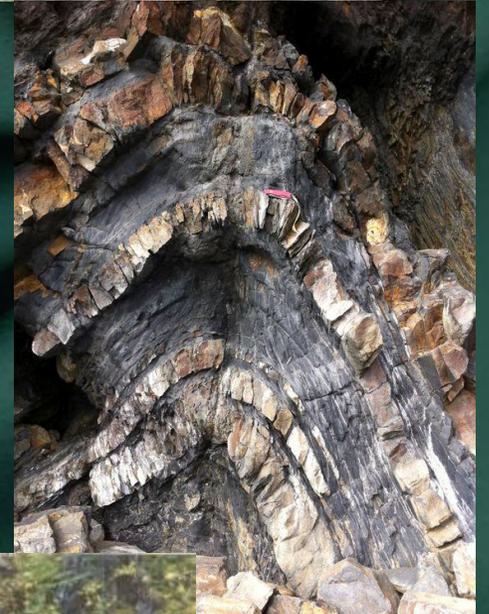
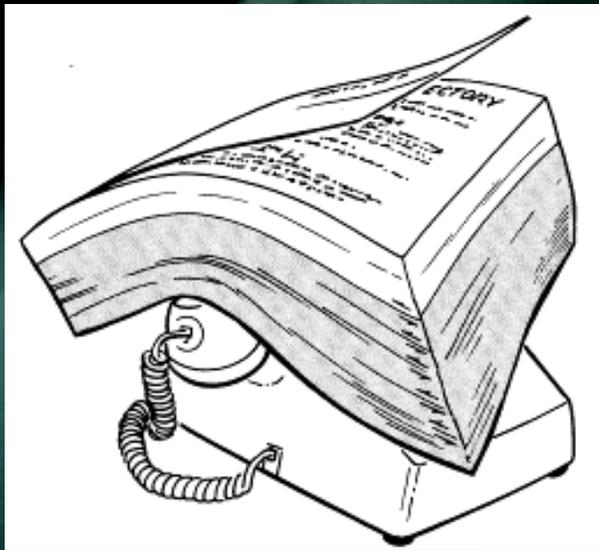


Рис. В.Н. Войтенко



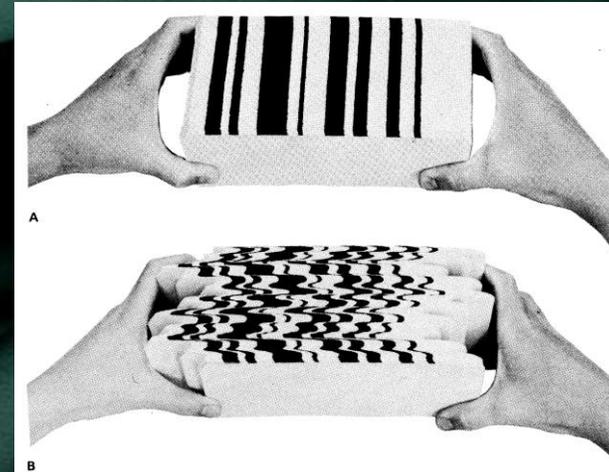
Кажется, складки образуются очень просто

Например, так...



(no Davis)

Или так...

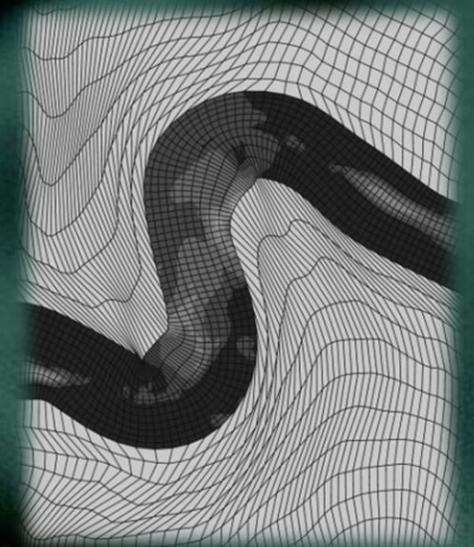
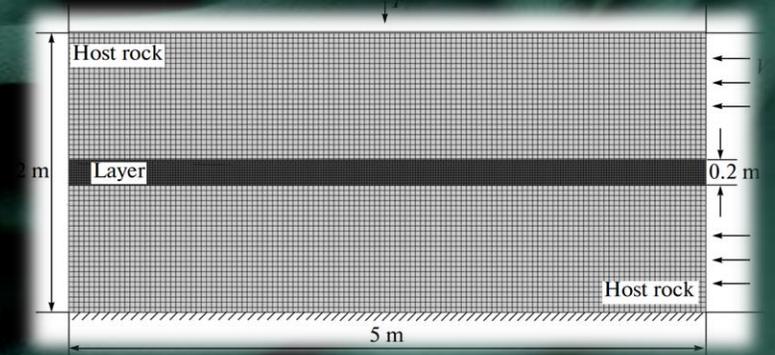
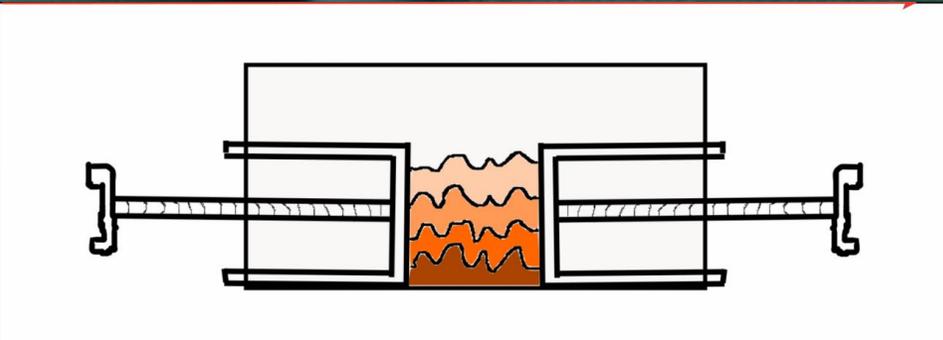
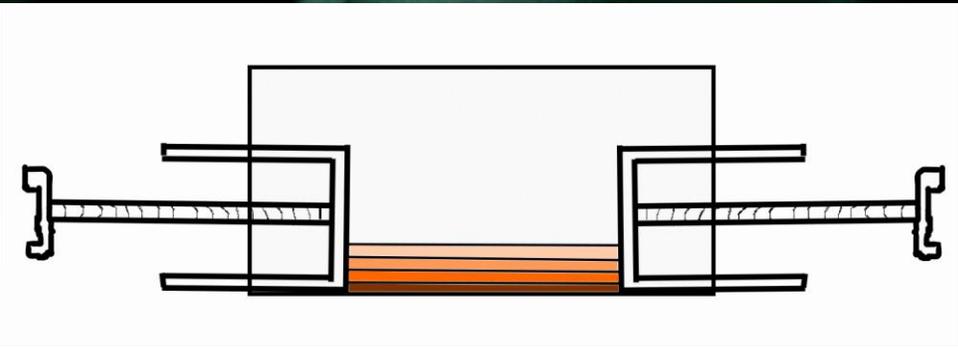


А может быть,
вот так?



(no Davis)

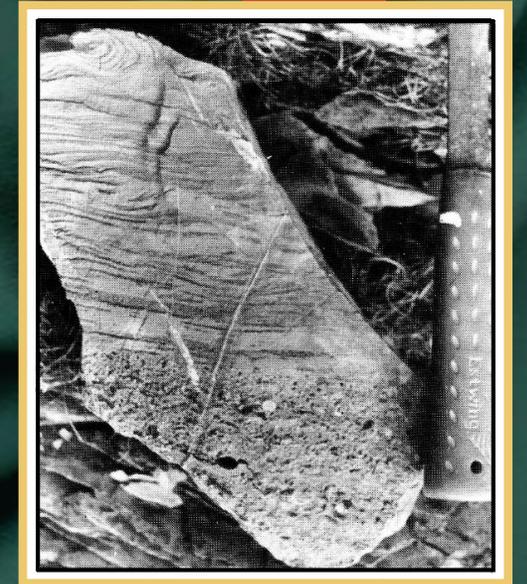
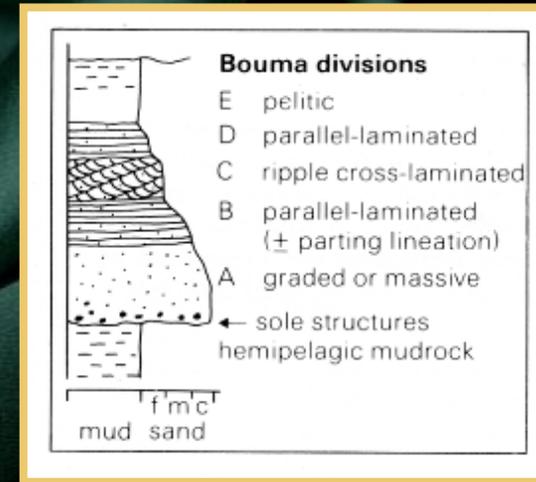
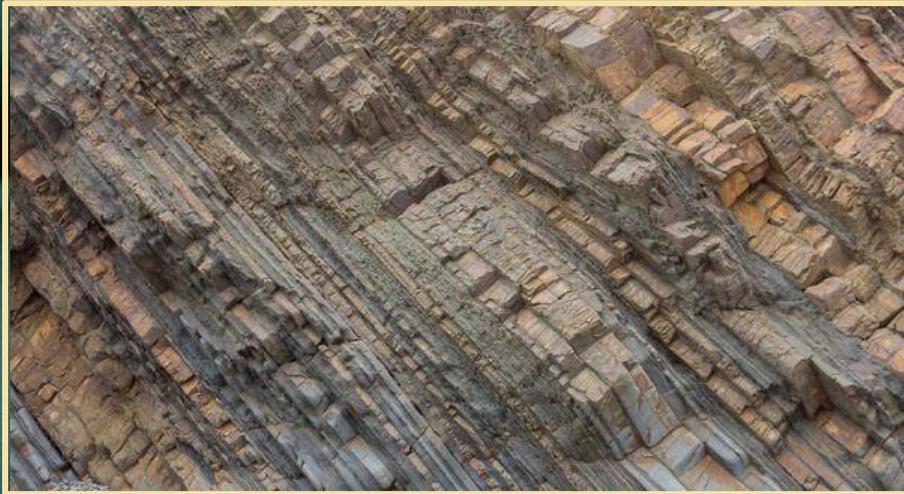
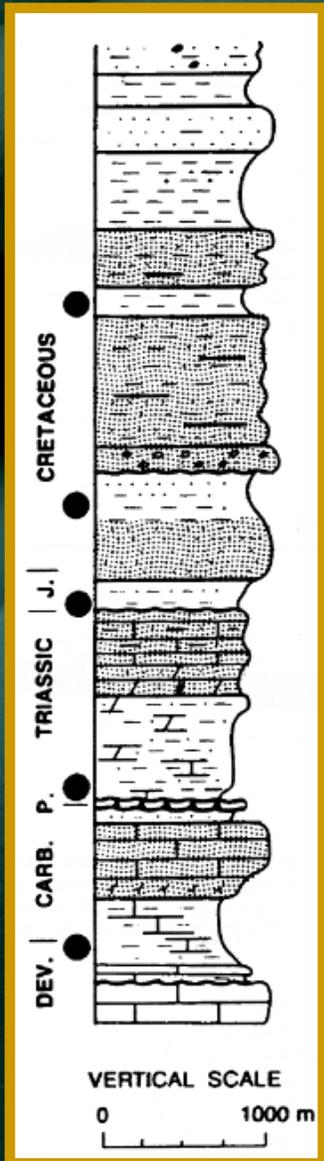
На самом деле, образование и развитие складок – сложный процесс. Изучить его особенности помогает моделирование – математическое и физическое



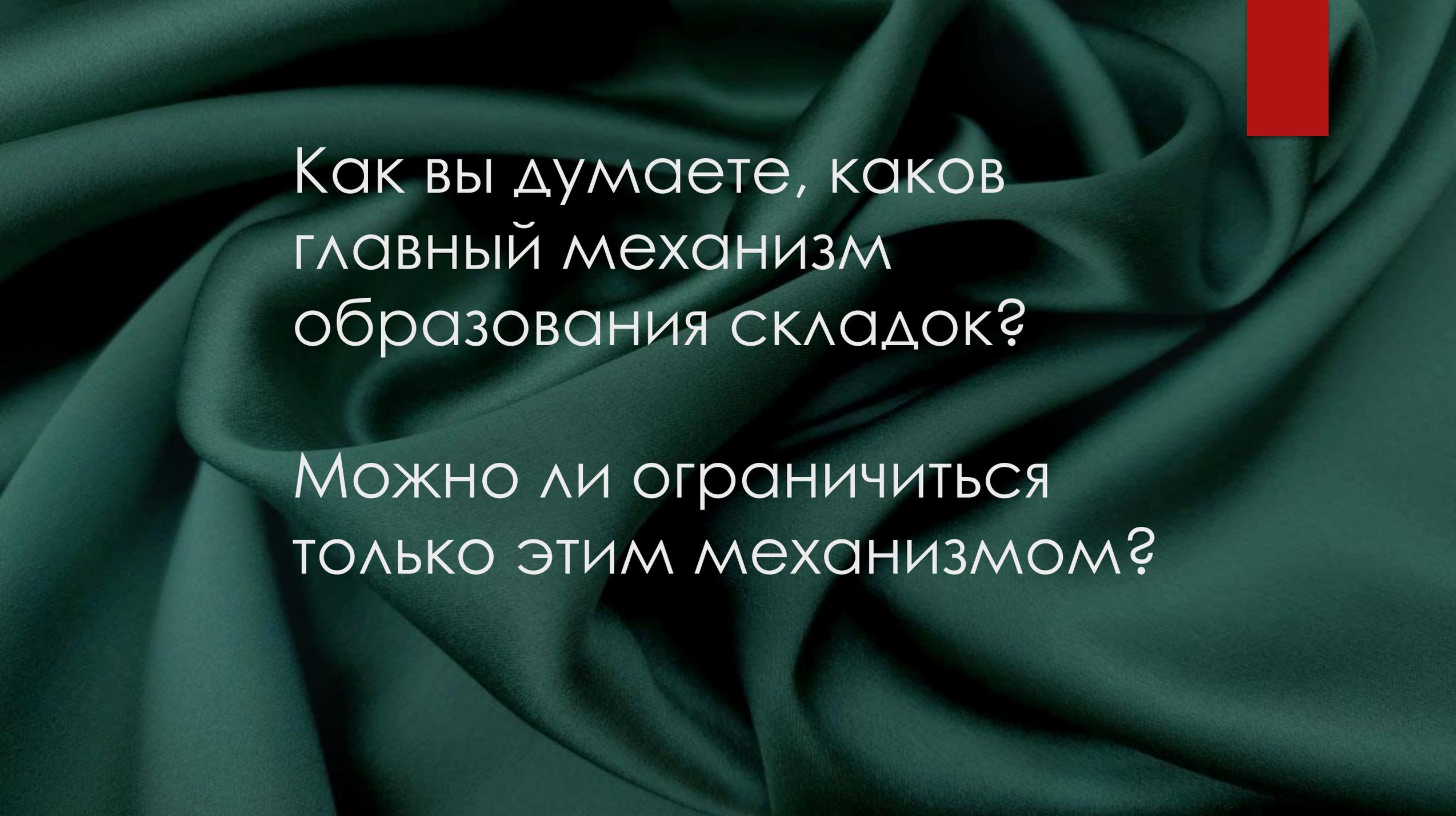
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/First Analogue_Modelling_of_Folding_by_Sir_James_Hall_in_1815.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/First_Analogue_Modelling_of_Folding_by_Sir_James_Hall_in_1815.gif)

(Babicev et al., 2014)

Структурный уровень слоев и пачек слоев



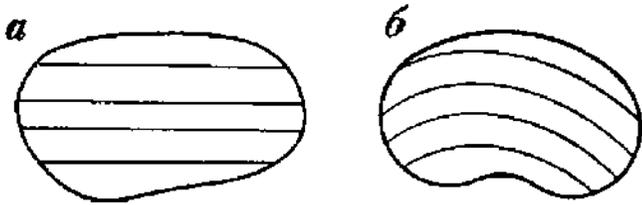
- Определение слоя
- Структурные элементы самого слоя
- Слой как структурный элемент более крупного объема. Деформационные свойства этого объема
- Различные типы чередований
- Важно: существование поверхностей пониженной прочности
- Понятие об эффективной вязкости и компетентности слоев. Контраст вязкости
- Изменение деформационных свойств слоев в зависимости от степени метаморфизма



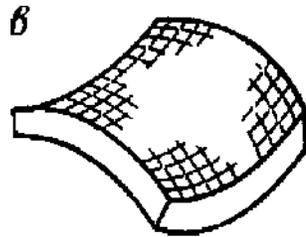
Как вы думаете, каков
главный механизм
образования складок?

Можно ли ограничиться
только этим механизмом?

ИЗГИБ И СКЛАДКИ



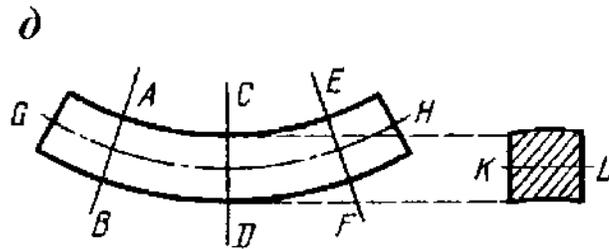
Плоские параллельные поверхности, проведенные в теле до деформации, превращаются в кривые поверхности, расстояния между которыми остаются всюду неизменными



Изгиб может представлять собой трехмерную деформацию



Основа складчатой деформации - серия чередующихся изгибов с выпуклостями в разные стороны, образуемые плоским телом



Изгиб - неоднородная деформация. Нормали к оси бруска остаются нормальными, но становятся непараллельными. GH - нейтральная линия

Определение изгиба (а, б)

Отличия природных складок от изогнутой пластины (г)

Особенности изгиба:

Расстояния между нормальными к бруску на одной стороне этого бруска становятся длиннее, а на другой – короче.

Есть некоторая поверхность, вдоль которой расстояния после деформации остаются неизменными (д)

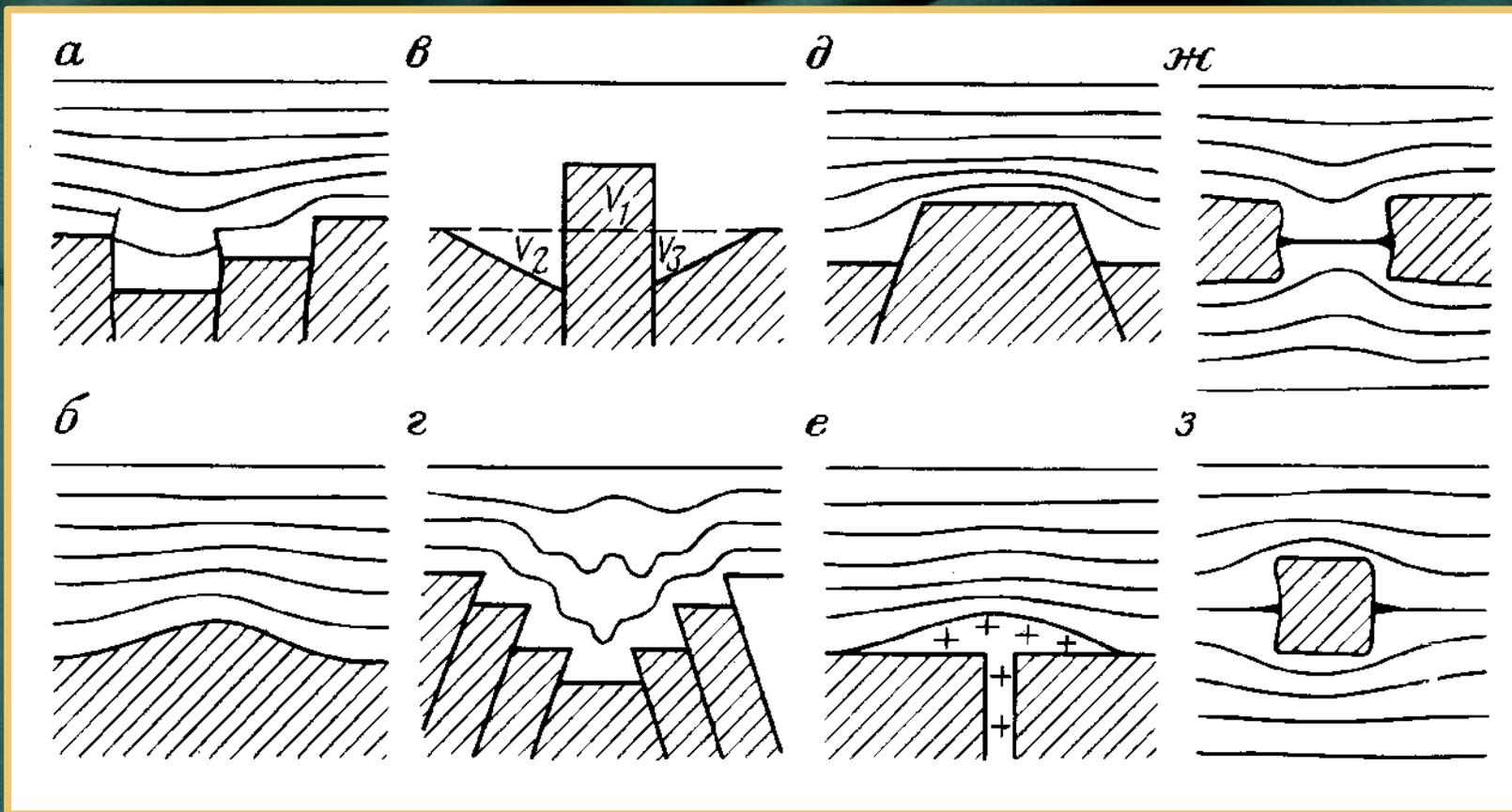
Сопротивление изгибу:

Влияние толщины тела и свойства материала

Поперечный и продольный изгибы

различаются по способу приложения сил (вдоль или поперек длинных осей изгибающихся тел)

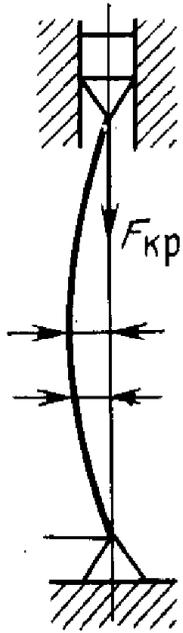
Складки поперечного воздействия (штамповые)



(По В.В. Эзу, 1985)

Продольный изгиб

(в условиях упругой деформации)



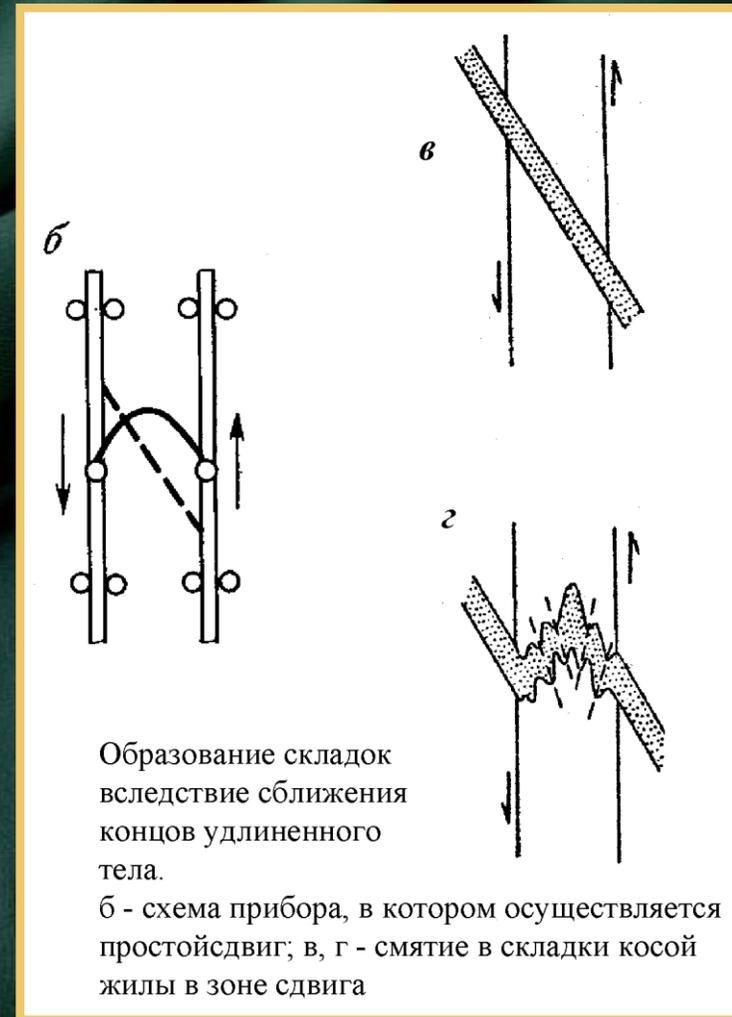
Выход тела из состояния неустойчивого равновесия в результате действия сжимающих сил вдоль длинной оси. $F_{кр}$ - критическая сила

- Неустойчивость формы
- Выход удлиненных тел из неустойчивого равновесия в результате действия сжимающих сил, направленных вдоль их длинной оси, называется продольным изгибом
- Понятие о потере устойчивости
- Критическая сила и ее зависимость от свойств материала и параметров тела
- Различие устойчивого и неустойчивого равновесия

(По В.В. Эзу, 1985)

Условия осуществления изгиба

- Среда должна состоять из удлиненных или пластообразных тел
- Концы удлиненного тела должны сближаться
- Способы сближения могут быть различными



(По В.В. Эзу, 1985)

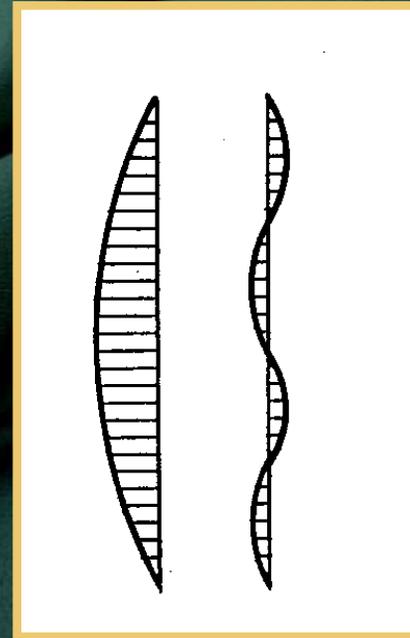
Продольный изгиб тел, способных к большим остаточным деформациям (в отличие от упругого изгиба)

- ▶ Однородное укорочение до изгиба (при медленной деформации)
- ▶ После начала изгиба (после выхода из состояния неустойчивого равновесия)
 - Идет релаксация напряжений
 - Деформация концентрируется в средней части длины тела
 - С течением времени скорость деформации возрастает

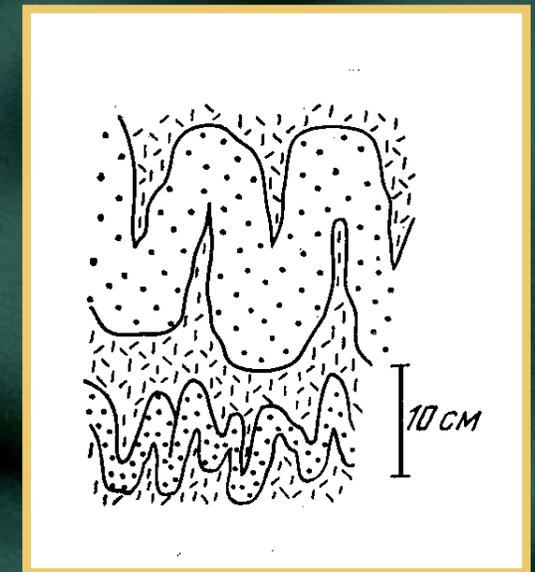
В среде, не оказывающей сопротивления,
тело образует одну складку

Продольный изгиб в среде, оказывающей сопротивление

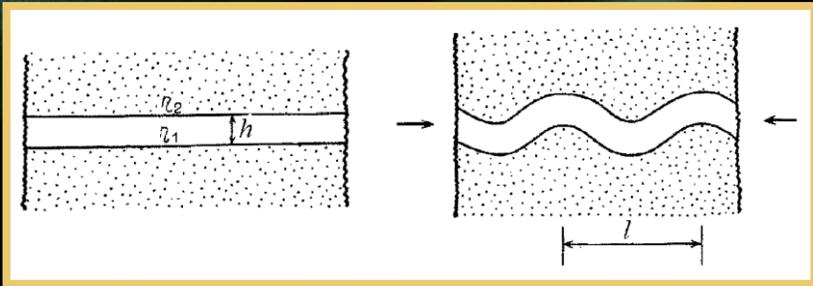
- Число складок, возникающих путем продольного изгиба, в пластине или слое заданной длины, зависит от соотношений **деформационных свойств** изгибающегося слоя и вмещающей среды.
- Ширина складок сильно зависит от **толщины** пластины или слоя.
- Теоретическое и экспериментальное изучение связей между параметрами слоя, вмещающей среды и начальными размерами складок осуществили **М. Био и Х. Рамберг**.



(По В.В. Эзу, 1985)



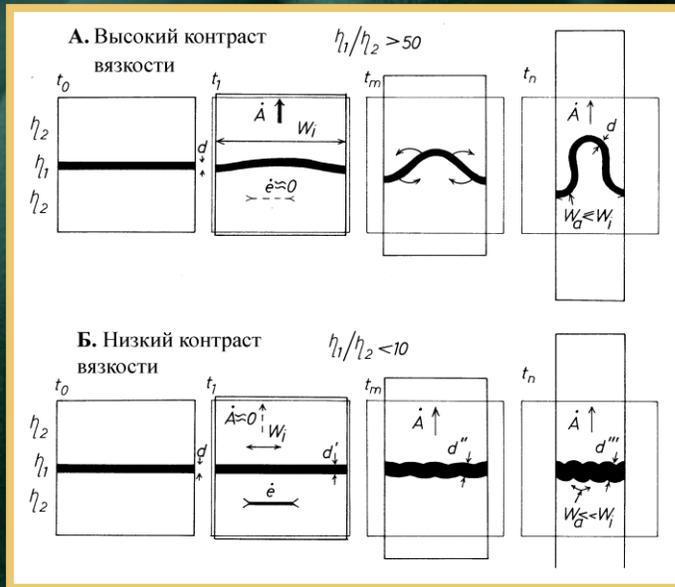
Деформация вязкого слоя, заключенного в маловязкую среду



(Ramsay, 1967)

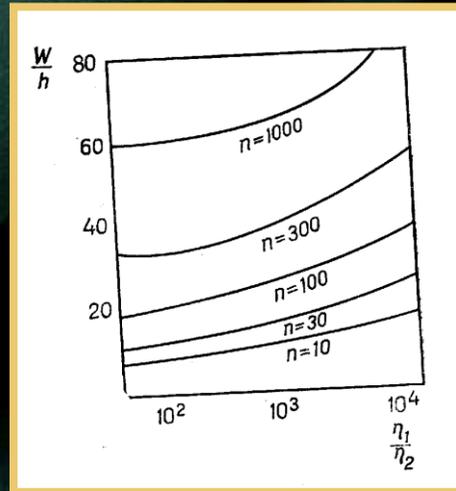
$$l = 2\pi h (\eta_1 / 6\eta_2)^{1/3}$$

Формула М. Био для определения размера доминирующей волны (для начала процесса складкообразования)



(no Ramsay, Huber, 1987)

Складки одиночного вязкого слоя при разном контрасте вязкости этого слоя и вмещающей среды



Результаты экспериментов по образованию складок изгиба в слоях разной вязкости (Biot, 1964)

$$\frac{\eta_1}{\eta_2}$$

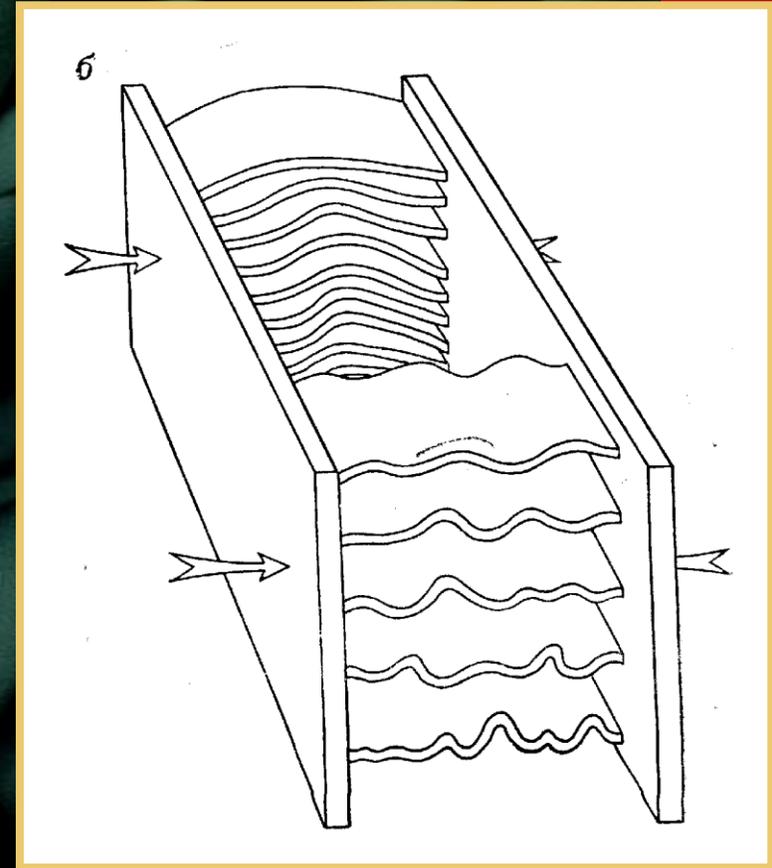
- отношение вязкости слоев одинаковой мощности h ,

W – ширина складок,

n – количество слоев

Выводы Г. Рамберга

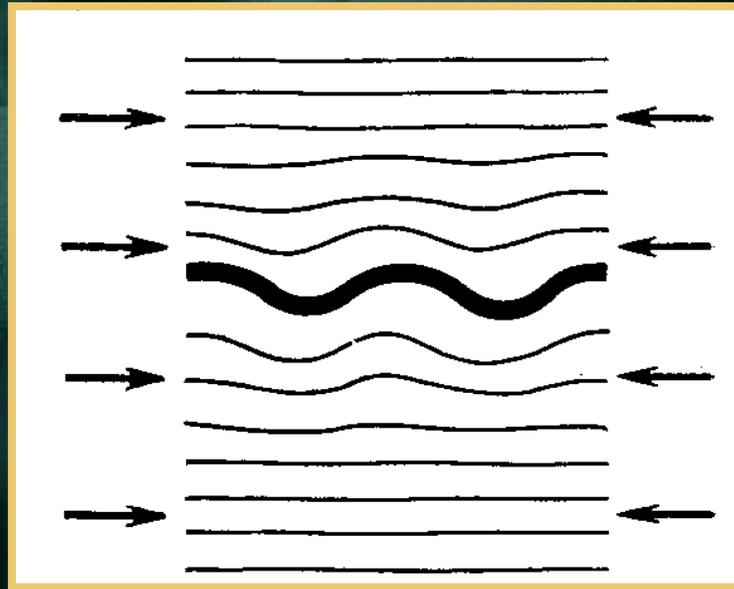
- ▶ Чем выше отношение вязкостей слоя и среды и чем тоньше слой, тем меньше изменяется исходная мощность слоя
- ▶ Чем меньше отношение вязкостей слоя и среды и чем толще слой, тем больше доля однородного укорочения до изгиба в общей деформации слоя и тем меньше степень сжатия и крутизна крыльев складок при одинаковом сближении концов



Один из экспериментов Г. Рамберга. Показаны только слои с повышенной вязкостью, располагающиеся в матриксе с меньшей вязкостью

Два замечания, которые понадобятся в дальнейшем

- ▶ Изгиб вязкого слоя может приводить к образованию складок поперечного воздействия

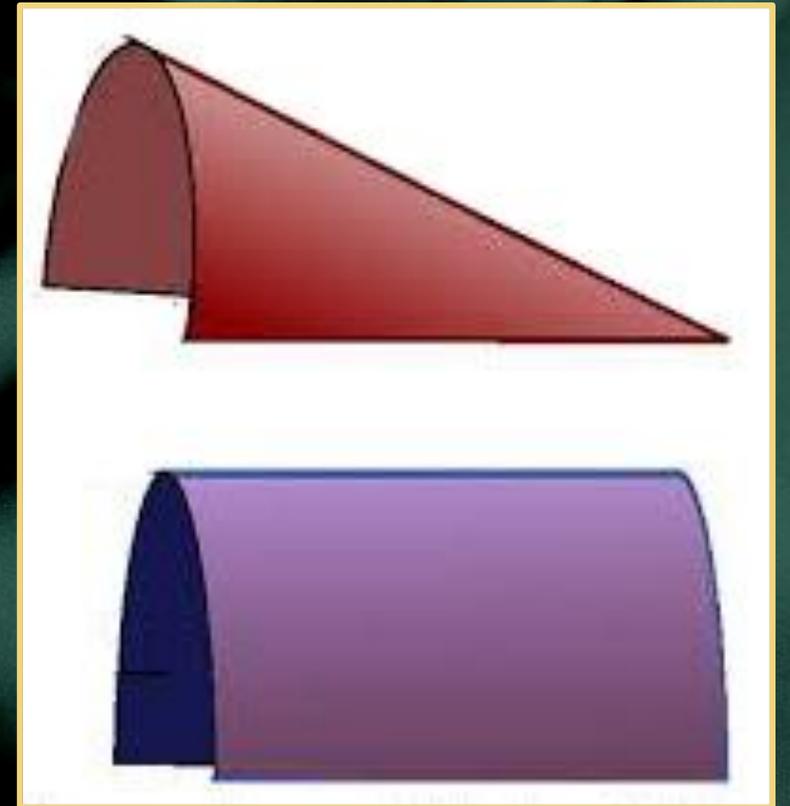


- ▶ Положение мест наибольшего изгиба, т.е. замков складок, не изменяется в ходе дальнейшего сближения концов деформируемого тела

(По В.В. Эзу, 1985)

Складки продольного укорочения

- О терминологии
- Образование складок в многослойной среде
- О концентрических и подобных складках
- Будем рассматривать цилиндрические складки, образующиеся в условиях плоской деформации

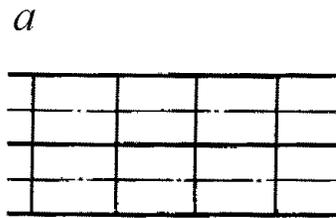


Концентрические СКЛАДКИ

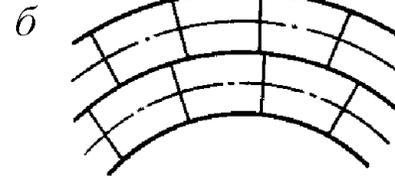


Концентрическими называют складки, в которых мощность каждого слоя, измеренная по нормали к слоистости, постоянна во всех частях складки.

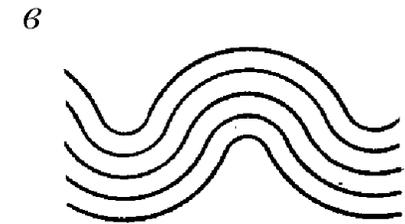
Изгиб в пачке слоев



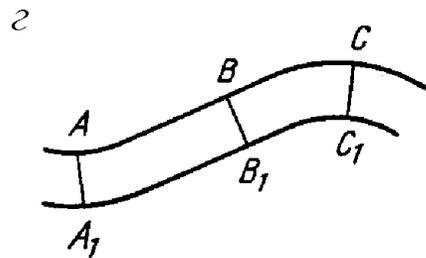
Слоистая пачка до деформации с выделенными в ней равными прямоугольниками



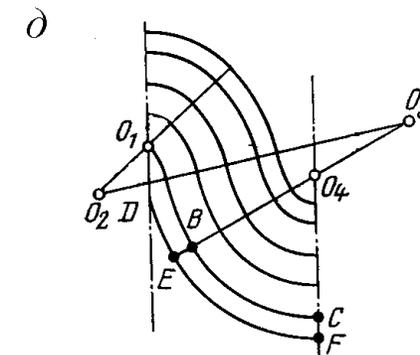
Слоистая пачка после изгиба. Прямоугольники превратились в изогнутые четырехугольники. Взаимное проскальзывание слоев максимально на крыльях



Концентрические складки как сочетание окружностей



Концентрическая складка, крыло которой включает прямолинейный участок



(по В.В. Эзу, 1985)

Длина слоев пачки, смятой в концентрические складки, остается одинаковой. Кривая DEF существовать не может. Такие складки не могут охватить сколь угодно большую мощность

Деформация слоев в концентрических складках состоит только в их изгибе, который сопровождается проскальзыванием слоя по слою

- ▶ Развитию концентрических складок благоприятствует большая относительная вязкость пород и малая величина трения между слоями



(по Б. Зандеру)



(по Дэвису)

Складка в вязких слоях, разделенных тонкими прослоями маловязких, в которых концентрируется скольжение

В иностранной литературе такие складки называют «складками изгиба со скольжением»

Эксперимент: укорочение слоистого образца из вязкого пластического материала с прослойками маловязкой влажной глины привело к формированию концентрических складок





(Интернет-ресурс)

Концентрическая складка, образованная вязкими слоями с тонкими прослоями маловязких



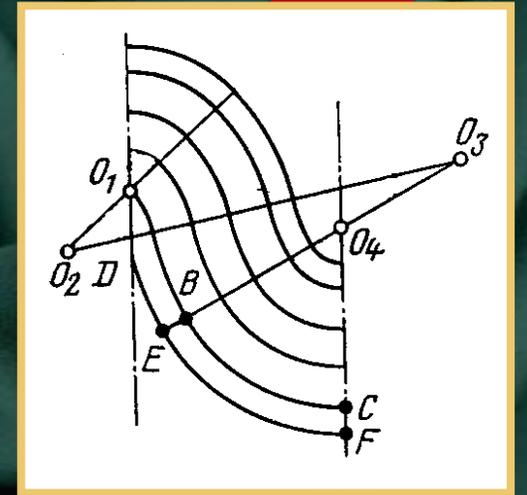
(no Ramsay, Huber)

Иногда концентрическими называют складки, в которые смяты вязкие слои, помещенные в маловязкий матрикс

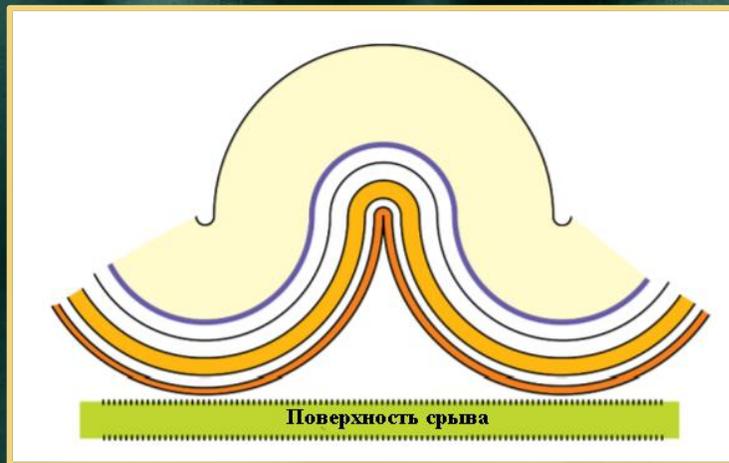
Важнейшее геометрическое свойство концентрических складок состоит в том, что они не могут охватить сколь угодно большую мощность

Складки обязательно имеют дисгармоничные соотношения со складками в подстилающей и перекрывающей толщах

Это следует из того, что протяженность всех поверхностей слоистости в пачке, смятой в концентрические складки, должна оставаться одинаковой. Но в концентрических складках все кривые не могут иметь одинаковую длину.



(По В.В. Эзу, 1985)



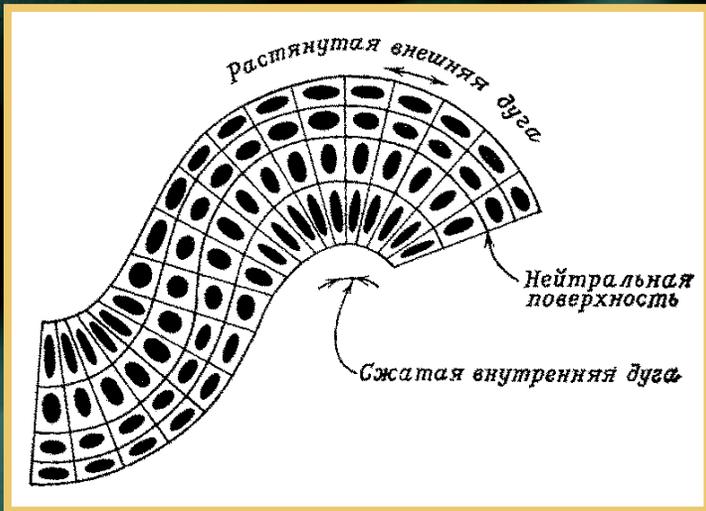
Идеальная концентрическая складка с поверхностью срыва

<https://www.files.ethz.ch/structuralgeology/JPB/files/English/8folds.pdf>



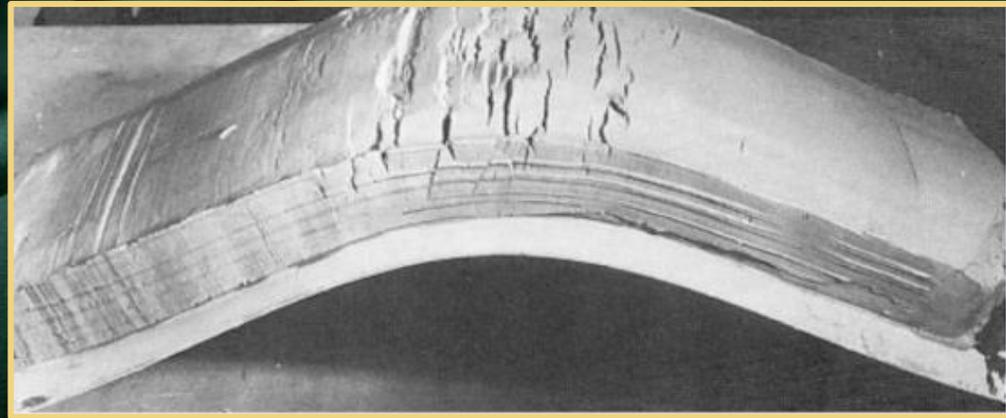
Определение предела распространения концентрической складки по разрезу

Внутрислойные деформации в концентрических складках

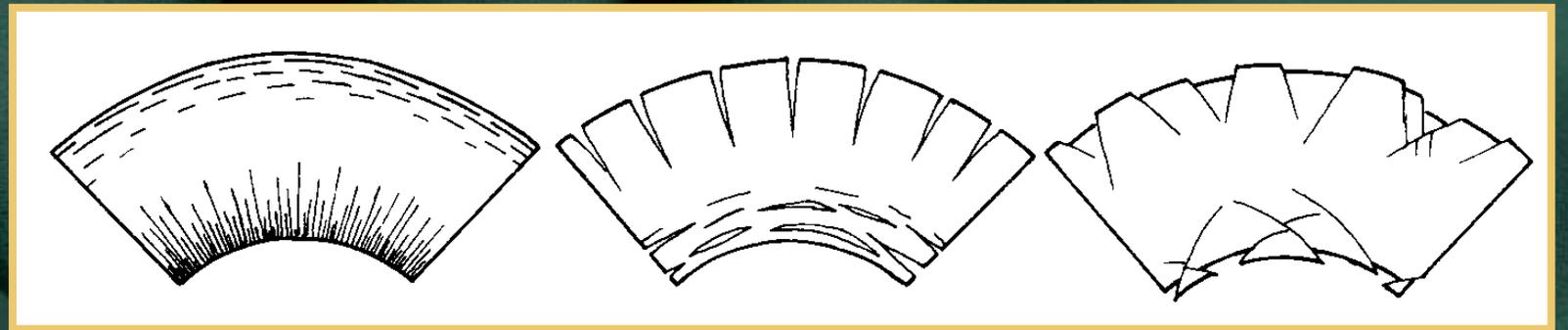


Поле деформаций в слое, смятом в концентрическую складку

(no Ramsay, Huber)

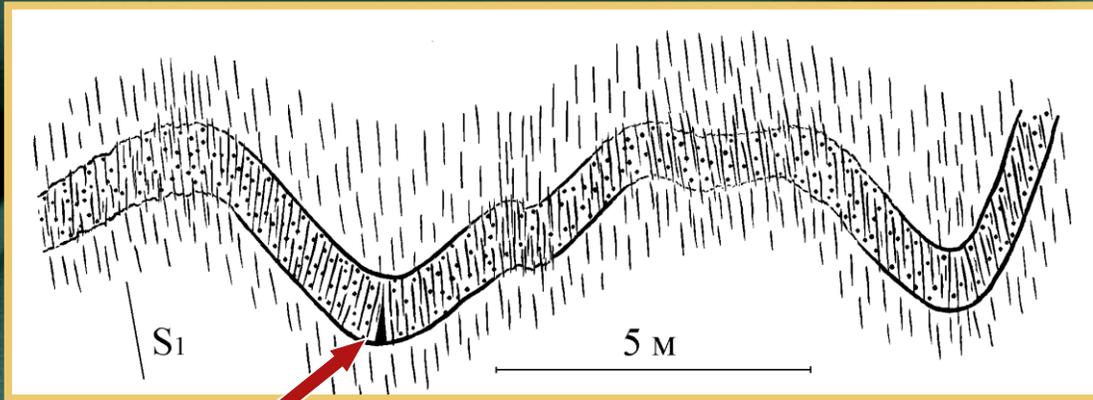


Аналоговая физическая модель. Интернет-ресурс

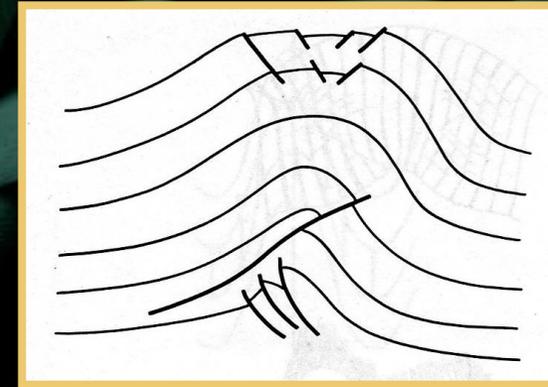


Структуры, которые могут образоваться в слое, смятом в концентрическую складку

Примеры структур



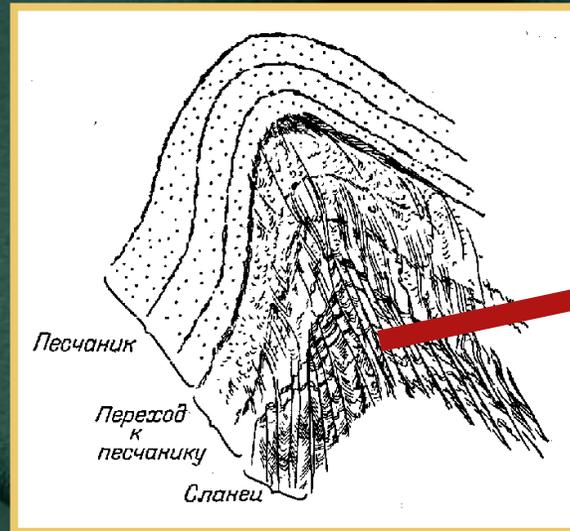
Клиновидные жилы



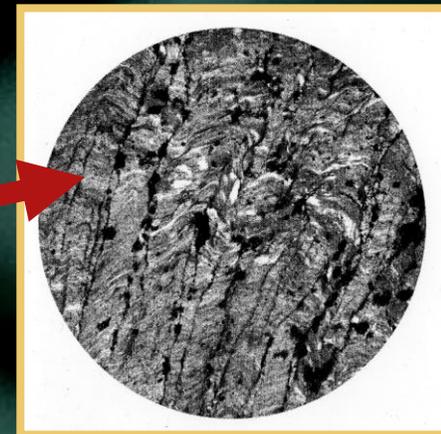
Разрывы, сформировавшиеся в зонах сжатия и растяжения
(по Николя, 1992)



(no Ramsay, Huber)



Кливаж плейчатости в зоне сжатия



ИТОГ

- ▶ Механизм образования концентрических складок исчерпывается изгибом пластов и межпластовым скольжением
- ▶ Внутрислойная деформация минимальна по сравнению со складками других видов. При этом пачка слоев может испытать большую деформацию
- ▶ Хотя образование концентрических складок энергетически выгодно, доля слоев и пачек, образующих концентрические складки, в складчатых структурах невелика, поскольку
 - Геометрия концентрических складок ставит жесткие ограничения их распространению вверх и вниз по разрезу
 - Для формирования концентрических складок нужен большой контраст вязкости слоев и легкость проскальзывания слоев друг подругу



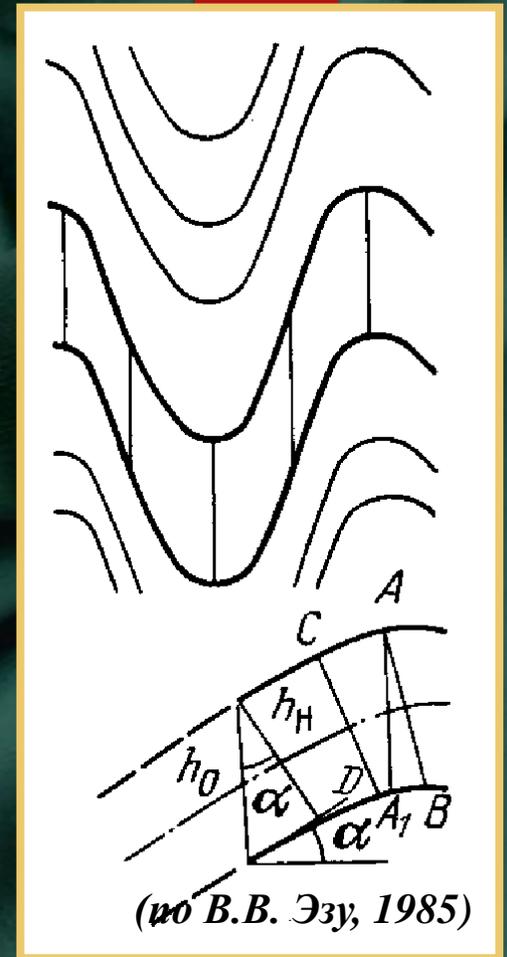
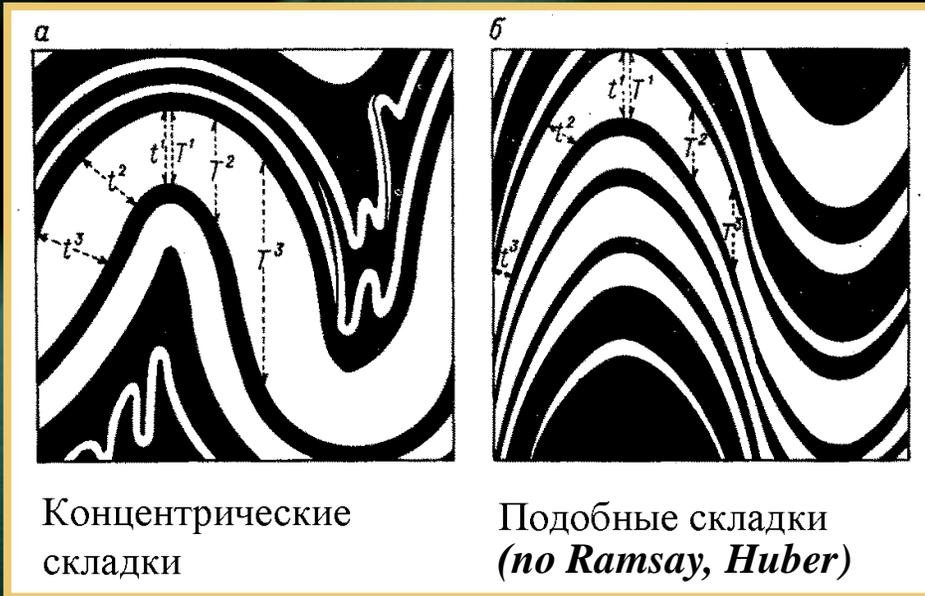
*Лаборатория тектонофизики
и геотектоники МГУ*

Подобные Складки



Подобными называются складки, в которых все изогнутые поверхности могут быть совмещены параллельным переносом вдоль осевых поверхностей, т.е имеют строго одинаковую форму.

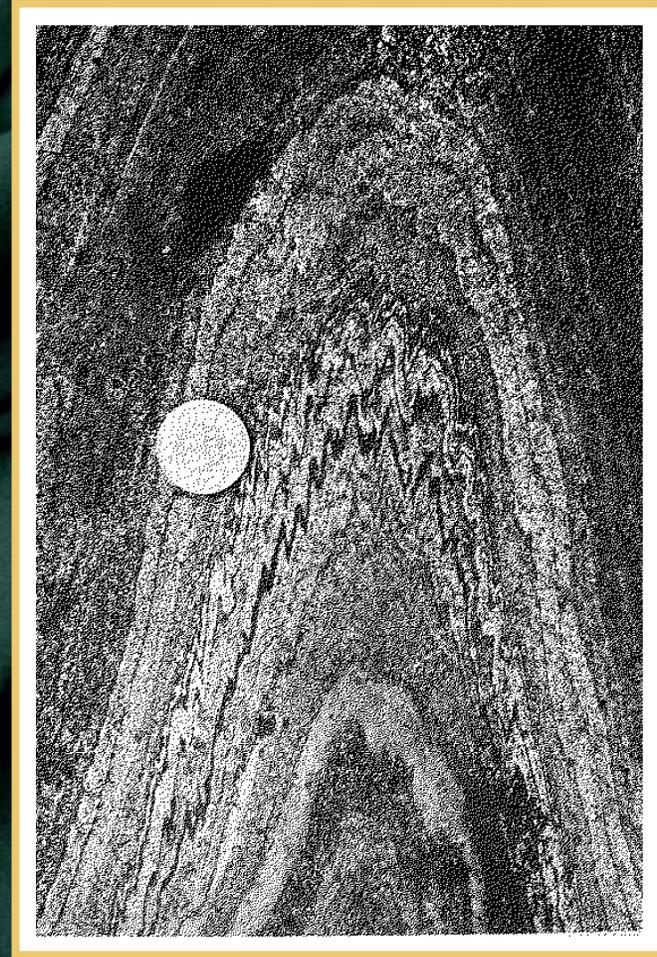
Осевая мощность в каждом слое одинакова во всех частях складки



- Форма поперечного сечения поверхностей, изогнутых в подобные складки, ближе всего к синусоиде
- Этими складками может быть заполнено сколь угодно большое пространство
- Нормальная мощность слоев в замках складок больше, чем в крыльях

Механизм образования ПОДОБНЫХ СКЛАДОК

- ▶ При образовании подобных складок толща в целом испытывает однородную деформацию укорочения-удлинения
- ▶ Каждый слой деформируется неоднородно. Осевая мощность увеличивается за счет:
 - Поворота (максимально в точке перегиба крыла)
 - Дополнительно за счет деформации укорочения-удлинения (максимально в замке складки)



(no Ramsay, Huber)

Утонения крыльев и перетекания материала из крыльев в замки не требуется

ИТОГ

- ▶ При образовании подобных складок слои испытывают большие деформации, чем при образовании концентрических
- ▶ Малая вязкость пород является предпосылкой образования подобных складок
- ▶ Одинаковая деформация всех слоев может осуществляться только в толщах с одинаковыми деформационными свойствами этих слоев
- ▶ Подобных складок в природе не бывает, встречаются складки, лишь приближающиеся к подобным, но достаточно редко



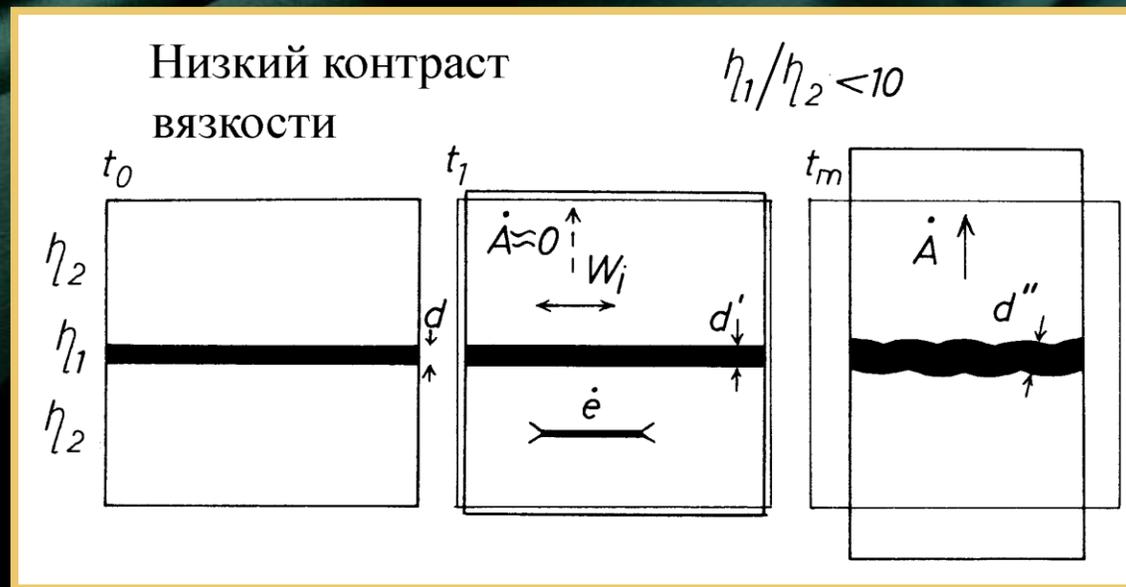
Большой Кавказ. Юра
(Фото Н.Б. Лебедевой)

Однородная деформация при складкообразовании

Первая или начальная стадия складкообразования

Однородное укорочение до образования складок

Эту деформацию трудно обнаружить и нелегко определить ее величину

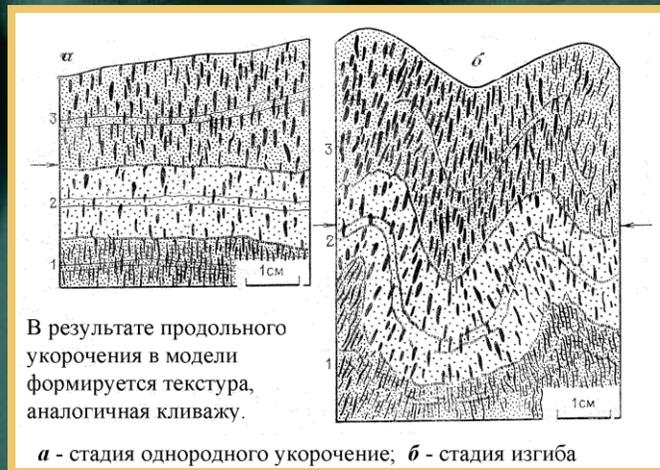
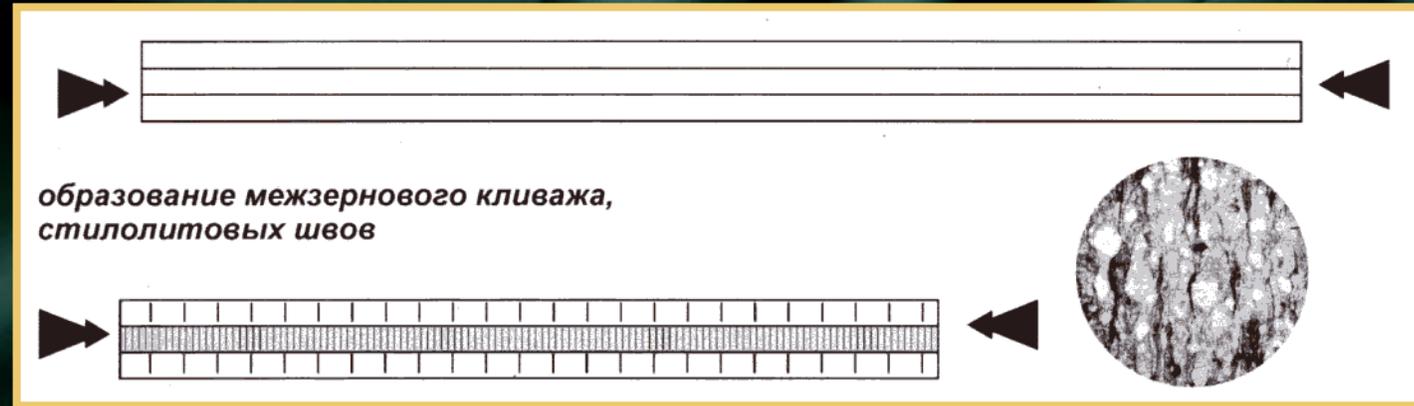


(no Ramsay, Huber)

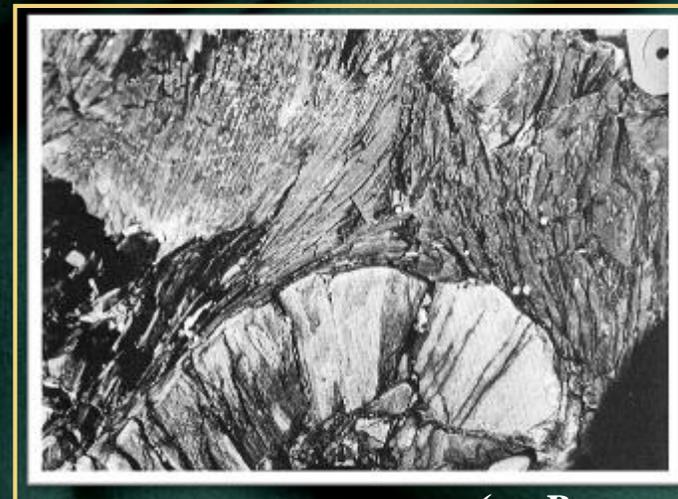
Чем толще и податливее слои, тем большую однородную деформацию они испытывают до появления в них изгибов

Структуры, которые могут образоваться на первой стадии

Кливаж



(по Н.Б. Лебедевой)

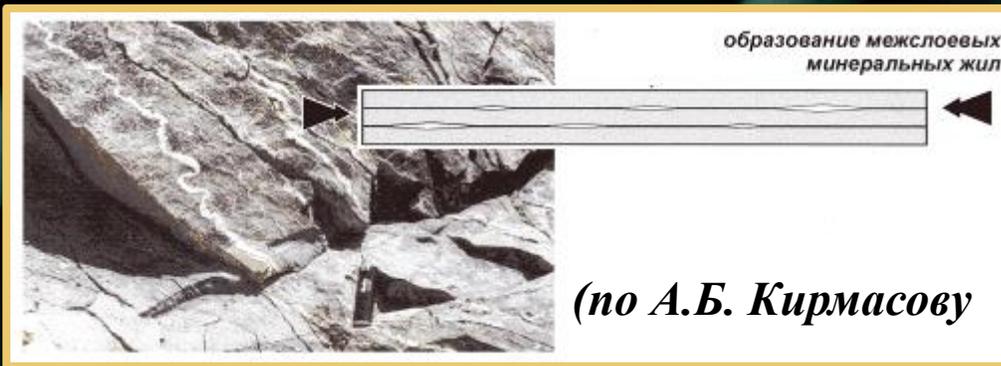


(по Ramsay, Huber)

(по А.Б. Курмасову)

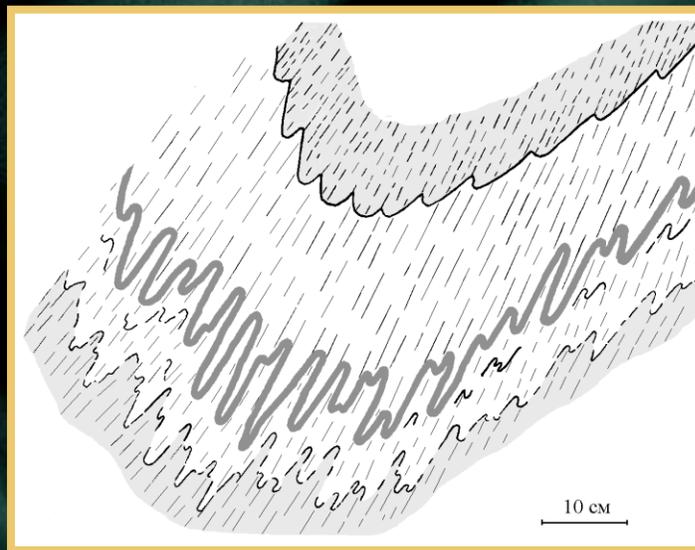
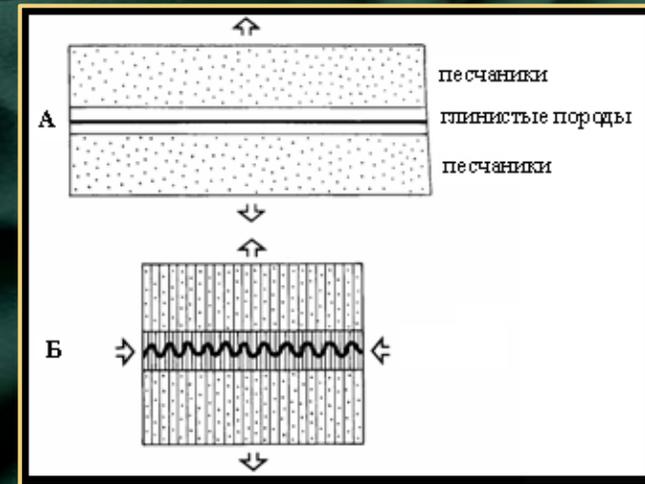
Доказательства: эксперименты, а также преломление кливажа, образующего прямой веер в вязких и обратный - в маловязких слоях

Послойные минеральные жилы



(по Ramsay, Huber)

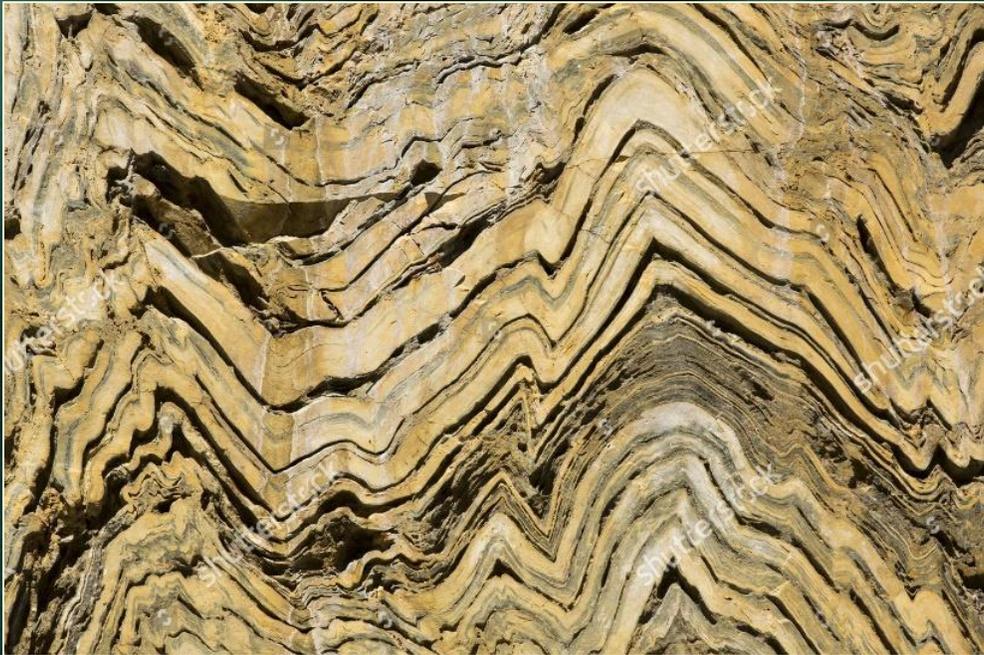
Послойные минеральные жилы после своего образования сминаются в мелкие складки



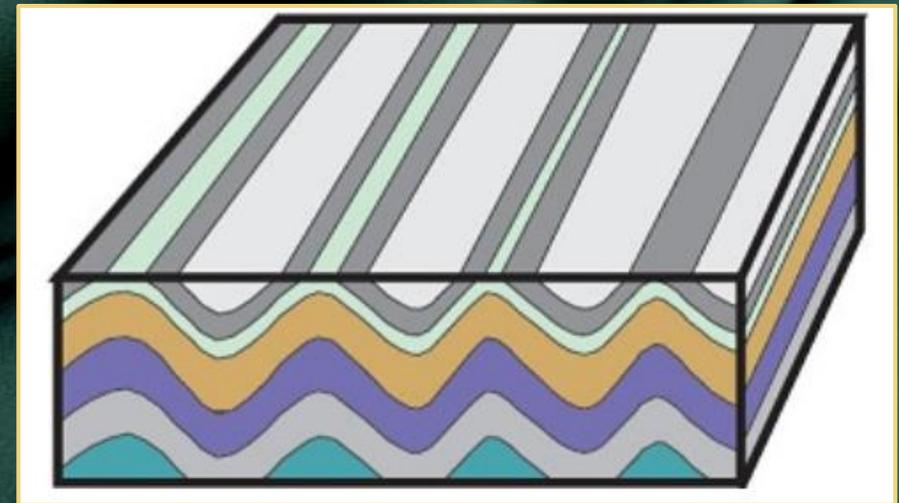
Хр. Султан-Уиздаг
Рис. Н.С. Фроловой

Вторая стадия складкообразования

Это стадия, во время которой происходит изгиб слоев. Изгиб обязательно дополняется другими механизмами, но без изгиба складок не бывает



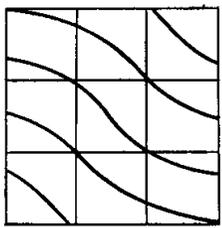
Интернет-ресурс



Эту стадию мы рассмотрели на примере концентрических и подобных складок и еще раз вернемся к ней позже.

Третья или заключительная стадия складкообразования

однородное укорочение после образования складок



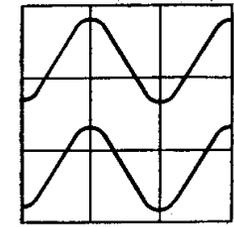
Концентрическая складка



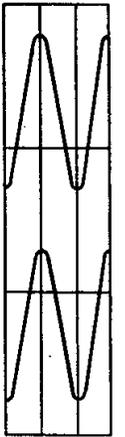
Однородная деформация

(по В.В. Эзу, 1985)

- ▶ Изгиба слоев не происходит
- ▶ Ранее существовавшие складки продолжают расти и увеличивать свою амплитуду
 - Подобные остаются подобными
 - Концентрические перестают быть концентрическими по морфологии



Подобная складка



Однородная деформация

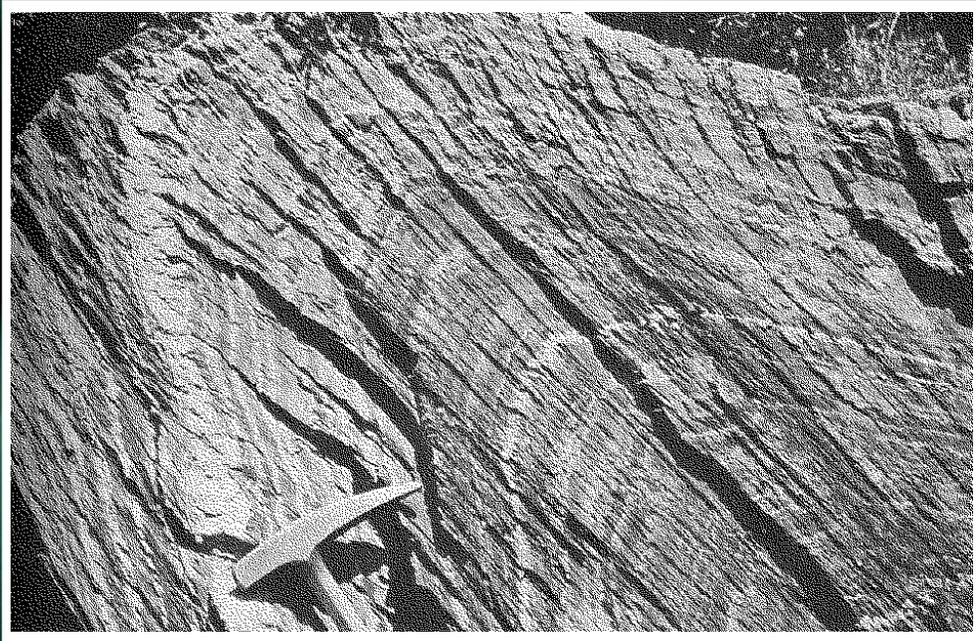
(по В.В. Эзу, 1985)

Следствие: происходит утолщение (в замках) и утонение (на крыльях) слоев, что может выразиться в развитии дополнительных более мелких складок или будинажа.

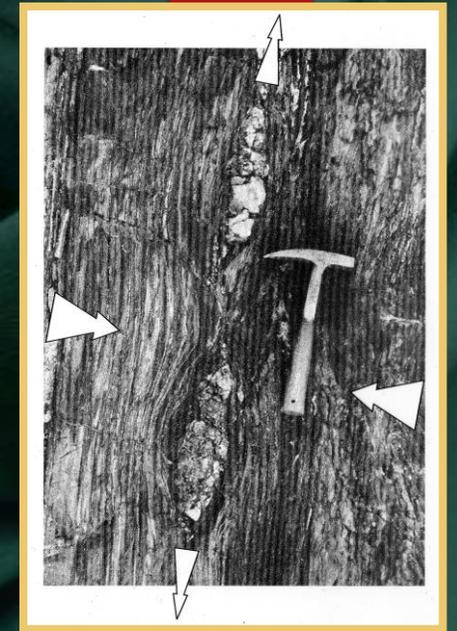
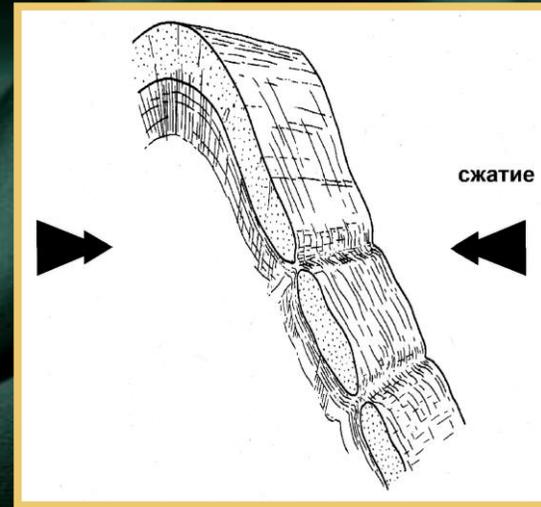
Предполагается развитие кливажа осевой плоскости (?)

Важно! Мощность вязких слоев в замках концентрических складок может увеличиться, однако они все же остаются «концентрическими» по механизму образования

Будинаж может иметь место на крыльях, если они повернуты под углом более 45° к оси укорочения.



(no Ramsay, Huber)



(фото Н.Б. Лебедевой)

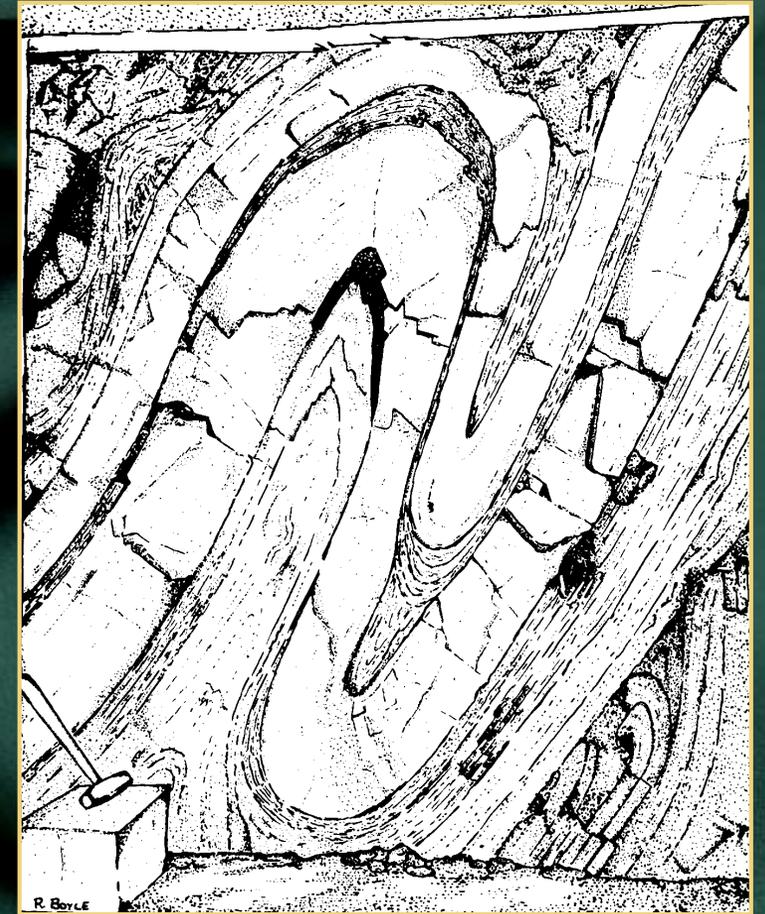
Точку зрения о существовании «кливажа осевой плоскости» поддерживают многие геологи, однако образование такого кливажа маловероятно

Причины перехода от изгиба к неоднородной деформации

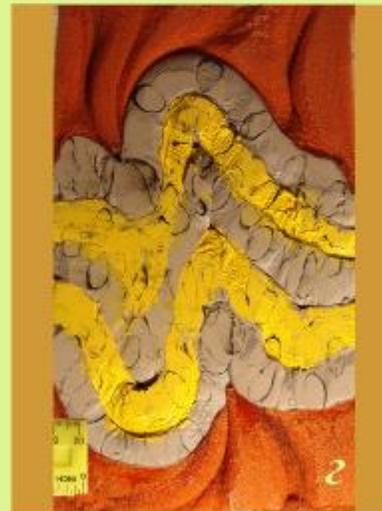
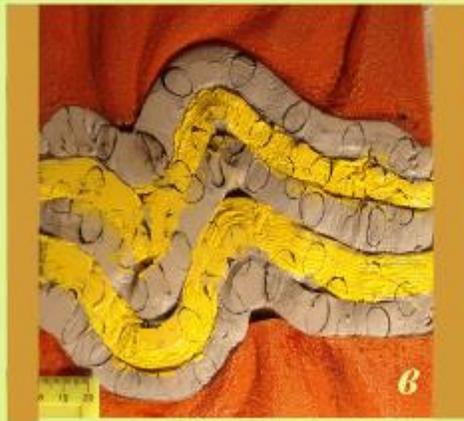
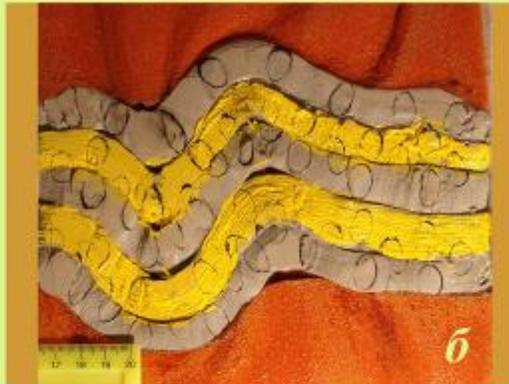
- Геометрические свойства концентрических складок
- Увеличение угла между слоистостью и направлением наибольшего укорочения в крыльях. Возрастание трения.
- Увеличение мощности слоев в замках складок

Углы наклона слоев, при которых изгиб сменяется однородной деформацией, зависит от многих причин. Вероятно, это происходит близко к переходу от открытых складок к закрытым

Прямых признаков однородного укорочения после образования складок практически не существует



Три стадии складкообразования в эксперименте



а – стадия продольного укорочения. Окружности превратились в эллипсы.

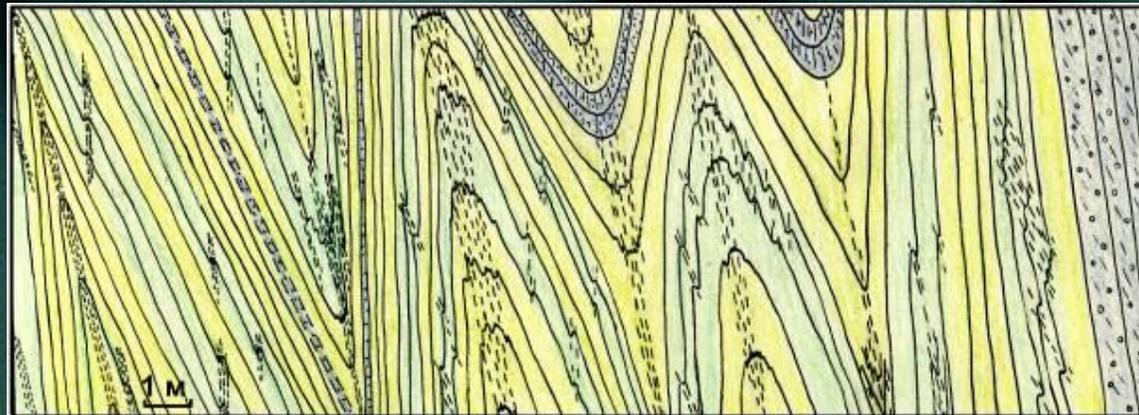
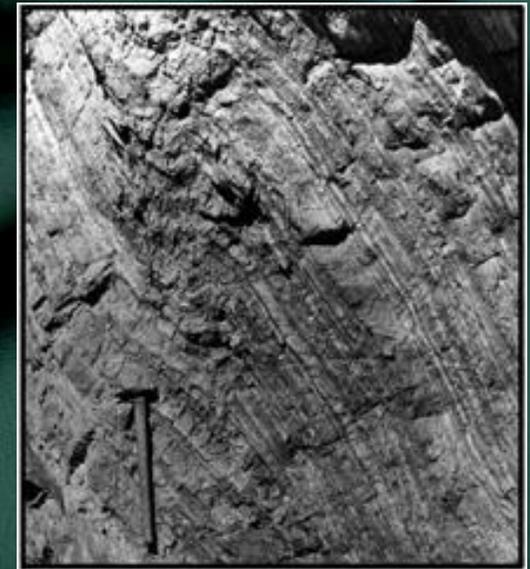
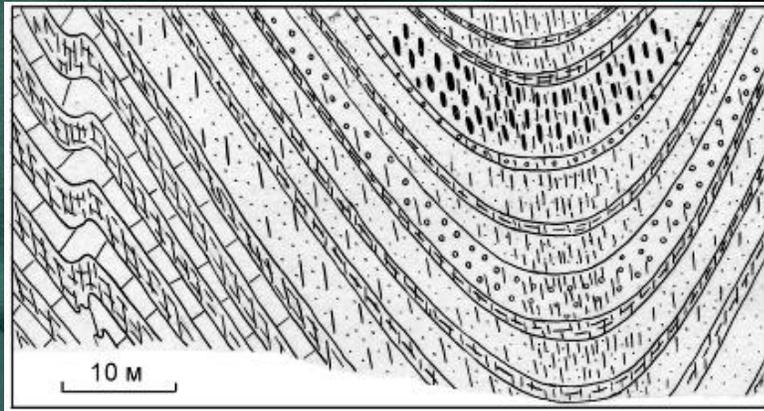
б – стадия изгиба. Формирование складок, близких к концентрическим. Разворот эллипсов.

в – переход к стадии общего сплющивания.

г – стадия общего сплющивания. Увеличение мощности слоев в замках. Смыкание крыльев.

Однородная деформация сплющивания на стадии изгиба

На второй стадии вдоль осевых поверхностей складок (в их замках) или на смыкающих крыльях набегающих складок может сформироваться кливаж, если он не успел образоваться на первой стадии по причине слишком большого контраста вязкости слоев



Таласский хр.,
рифей
Рис. и фото
Н.С. Фроловой

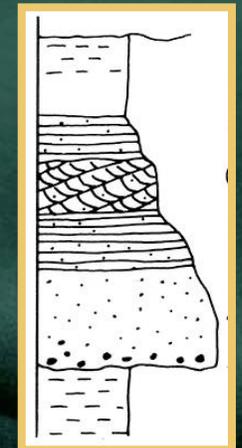
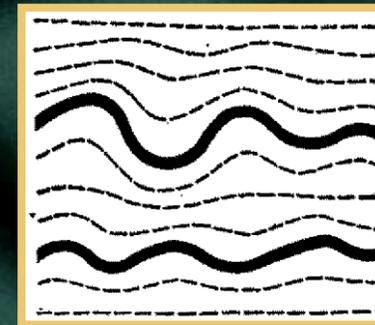
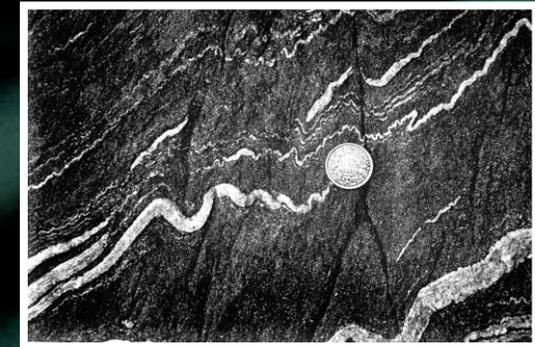
Кливаж образуется на
участках максимальной
деформации укорочения

Складки продольного укорочения в пачках неоднородного состава



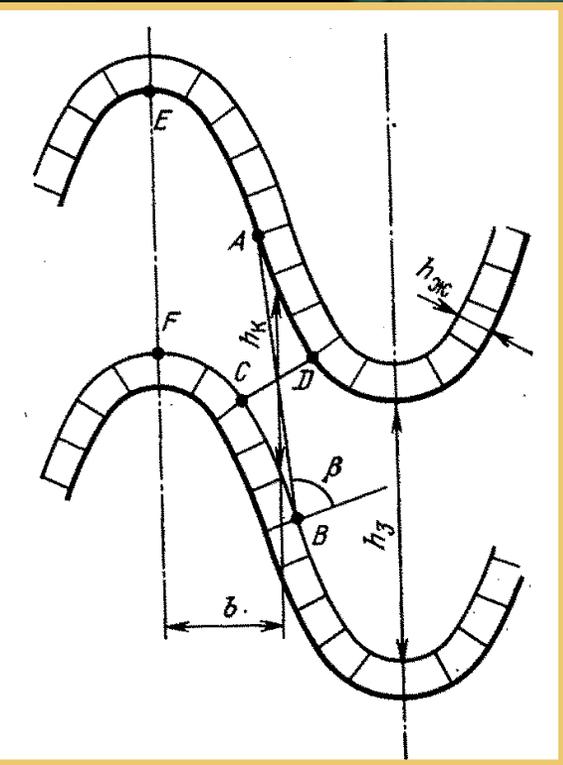
(по Б. Зандеру)

- Мощные относительно вязкие пласты, разделенные очень маломощными податливыми прослоями – концентрические складки
- Вязкие слои немногочисленны и разделены мощными пачками податливых слоев (контраст вязкости велик) – каждый вязкий слой изгибается самостоятельно
- То же, но контраст вязкости невелик – определяющими форму складок становятся податливые слои
- Частое ритмичное чередование слоев с разными деформационными свойствами – формируются «псевдоподобные» складки (складки, подобные по ритму). Эти складки будут рассмотрены далее

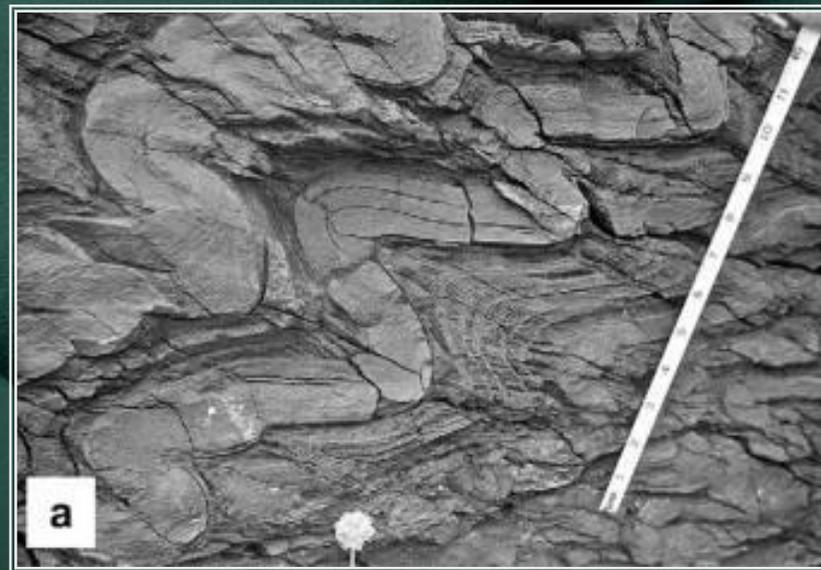


Складки, подобные по ритму, тип А

- В складках, подобных по ритму, остается постоянной **осевая мощность ритма**
- Контраст вязкости слоев велик: формируются складки, назовем их типом А.
- В этом случае вязкие слои образуют концентрические складки



(по В.В. Эзу, 1985)



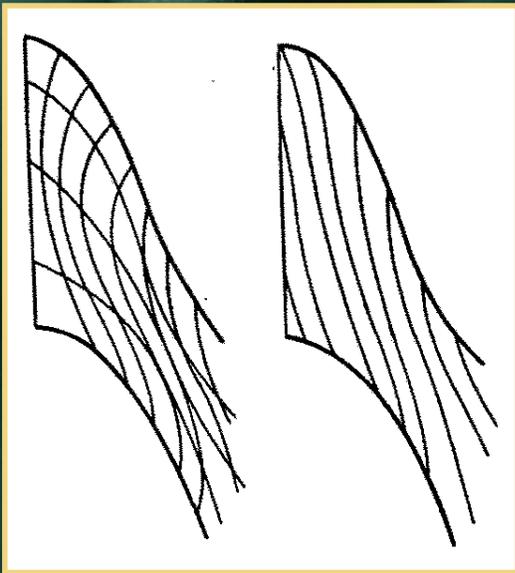
(Hudleston, Treagus, 2010)



Интернет-ресурс

Деформация маловязких слоев

- ▶ Мощность такого слоя в замке должна увеличиться, причем больше, чем в подобных складках.
 - Происходит выдавливание из крыльев в замки
 - Осуществляется простой сдвиг вдоль слоистости (часто с использованием кливажа) - см. схему на предыдущем слайде.



Замок складки, подобной по ритму.
Направление кливажа соответствует
кинематической модели

(no Ramsay, Huber)

**Важно: никакого «нагнетания»
и «перетекания»
материала маловязких слоев в
замки не происходит**

Искривление первоначальной прямоугольной сетки в слое с малой вязкостью и направление наибольших удлинений *(no В.В. Эзу, 1985)*

Складки в Таврическая серии, р. Бодрак, Крым

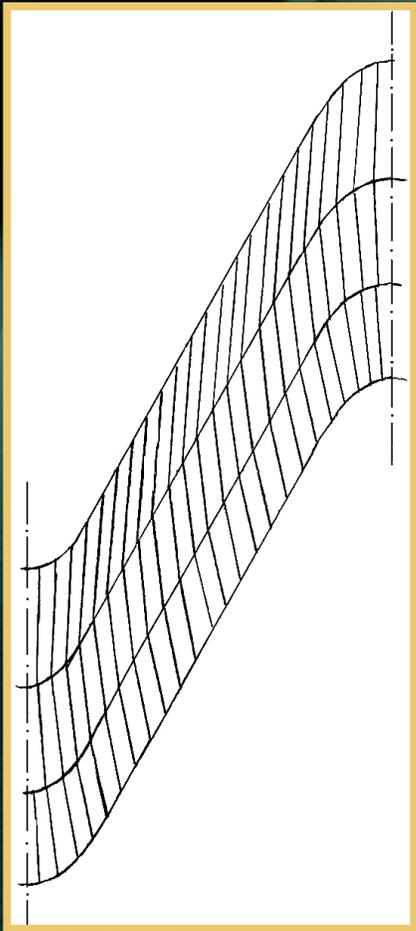




Интернет-ресурс

Складки, подобные по ритму. Тип Б

Ритмично построенные пачки. Небольшой контраст вязкости



Мощность наиболее вязкого слоя увеличена в замке, но меньше, чем у остальных слоев. Кливаж в вязких слоях образует прямой веер, но не перпендикулярен слоям.

Рифейские тощи Таласского хр.
Фото и рис. Н.С. Фроловой



Механизм образования складок, подобных по ритму, тип Б

На первой стадии закладывается кливаж во всех слоях

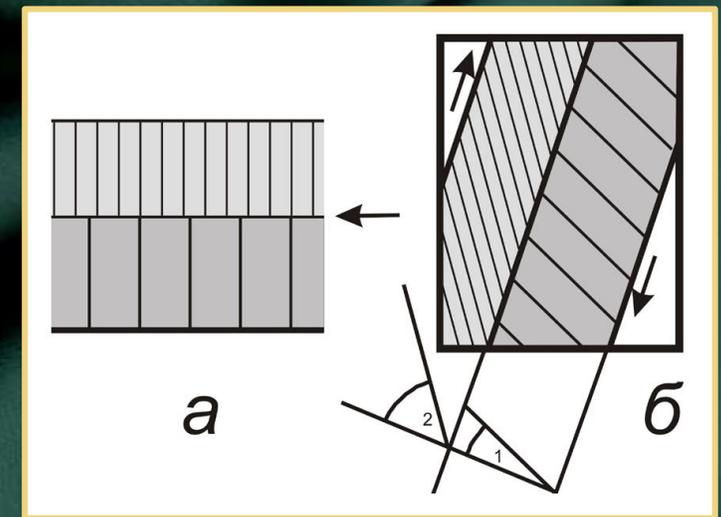
На второй стадии:

□ Вязкие слои

- Изгиб (если слой разделить на домены, то это поворот доменов)
- Неравномерное сплющивание (перпендикулярно осевой поверхности)
- Простой сдвиг (скашивание)

□ Маловязкие слои

- Изгиба нет
- Неравномерное сплющивание (аналогично подобным складкам)
- Простой сдвиг (скашивание)
- Иногда небольшое выдавливание из крыльев в замки
- В зависимости от характера сцепления возможно скольжение между слоями на границах ритмов



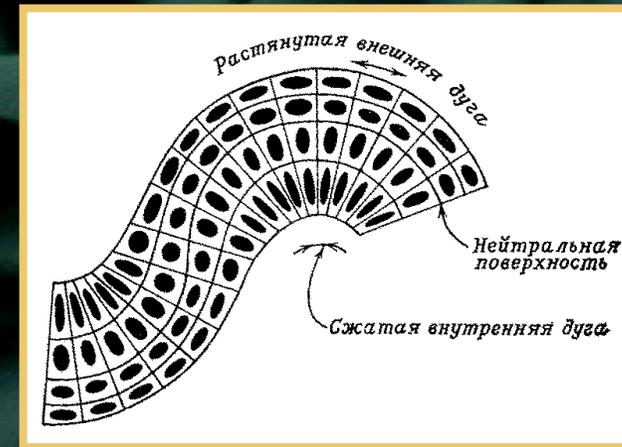
Скашивание на крыле складки

Мы с вами рассмотрели следующие типы складок:

Концентрические



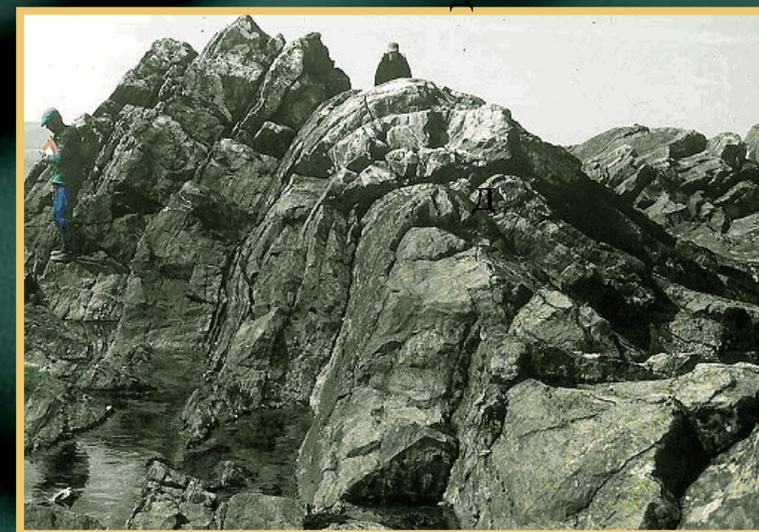
(по Ramsay, Huber)



(по Ramsay, Huber)

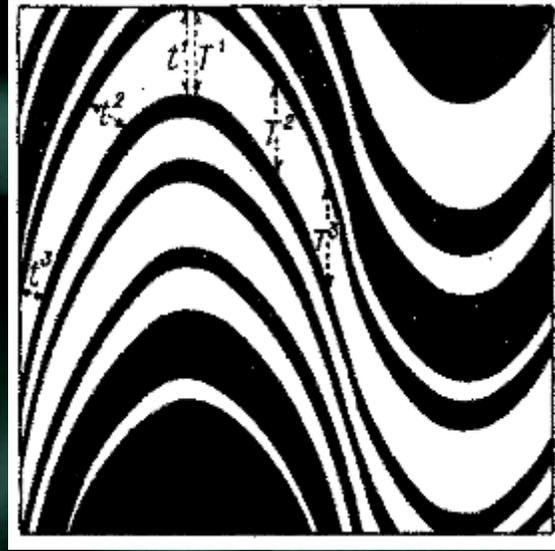
Ответьте на вопросы,
какова их:

- Морфология
- Деформационные свойства пачки
- Механизм



(интернет-ресурс)

Подобные



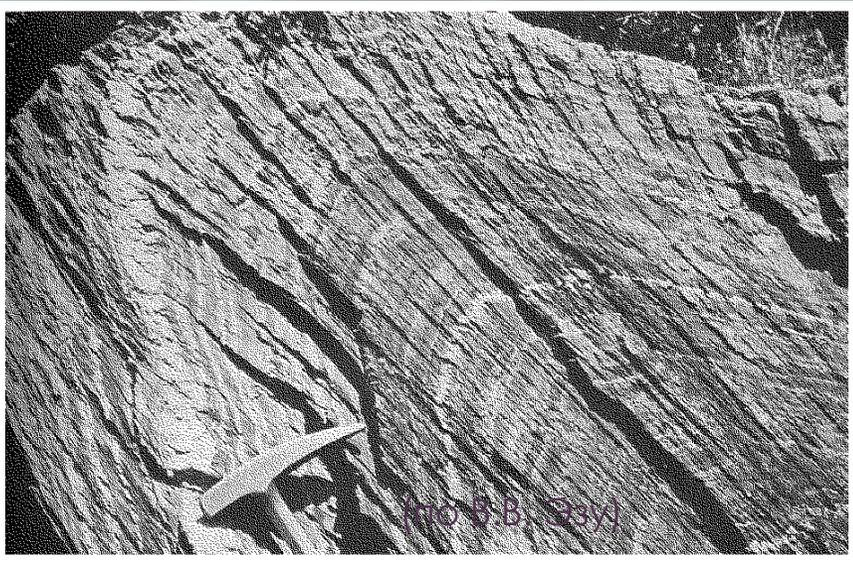
(no Ramsay, Huber)



Юрские толщи Большого Кавказа.
Фото Н.Б. Лебедевой

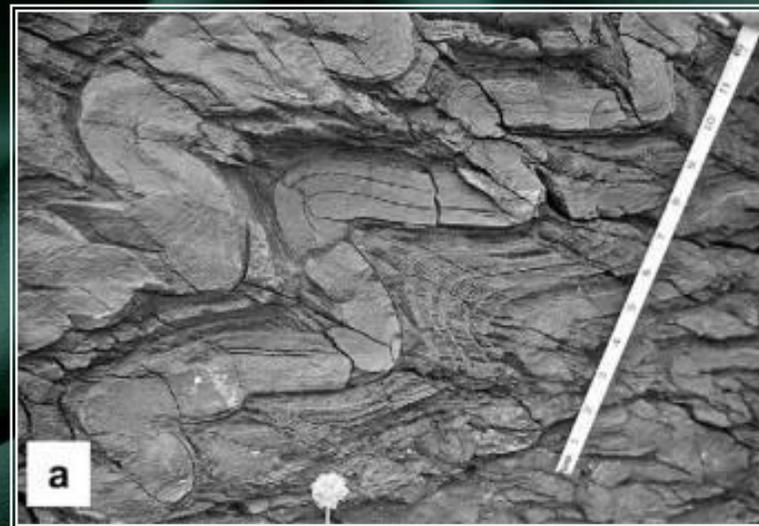
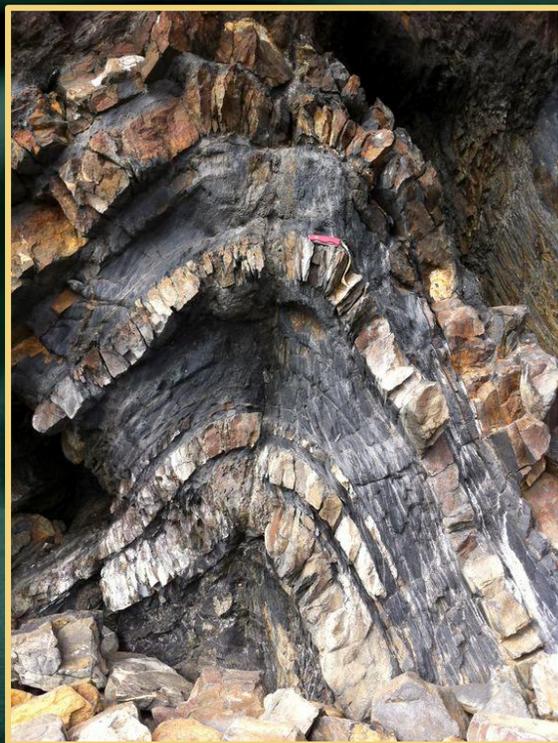
Ответьте на вопросы, какова их:

- Морфология
- Деформационные свойства пачки
- Механизм

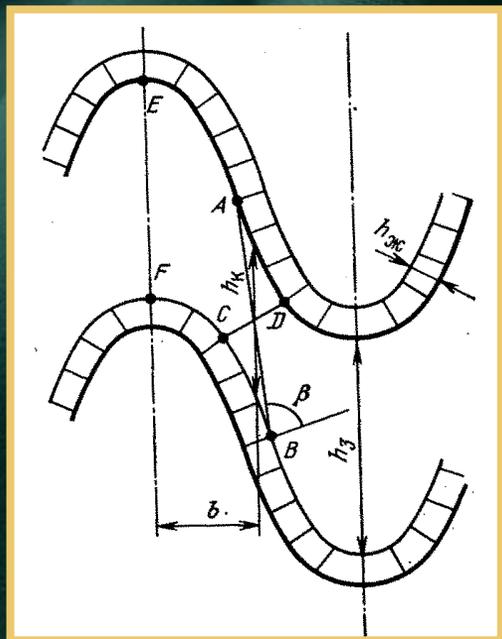


(no Ramsay, Huber)

Подобные по ритму, тип А



(no Hudleston, Treagus, 2010)



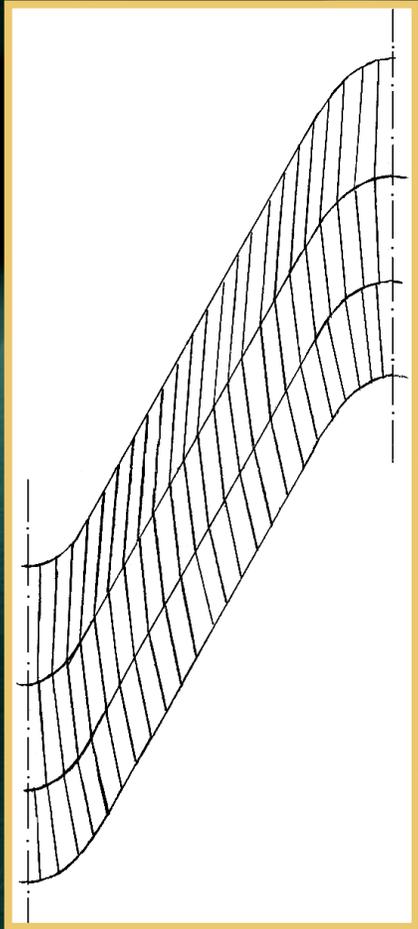
(no В.В. Эзу, 1985)



Ответьте на вопросы,
какова их:

- Морфология
- Деформационные свойства пачки
- Механизм

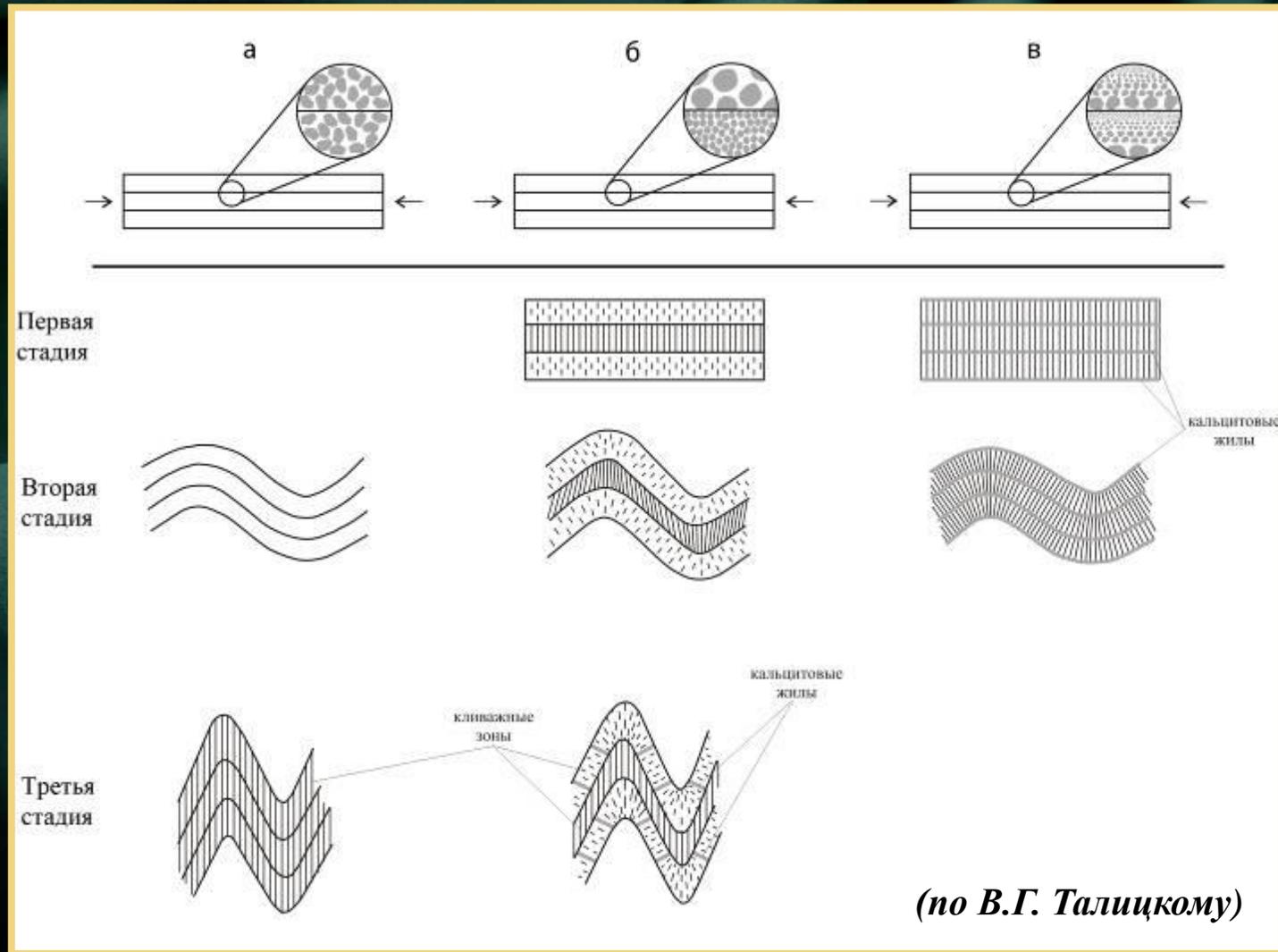
Подобные по ритму, тип Б



Ответьте на вопросы,
какова их:

- Морфология
- Деформационные свойства пачки
- Механизм

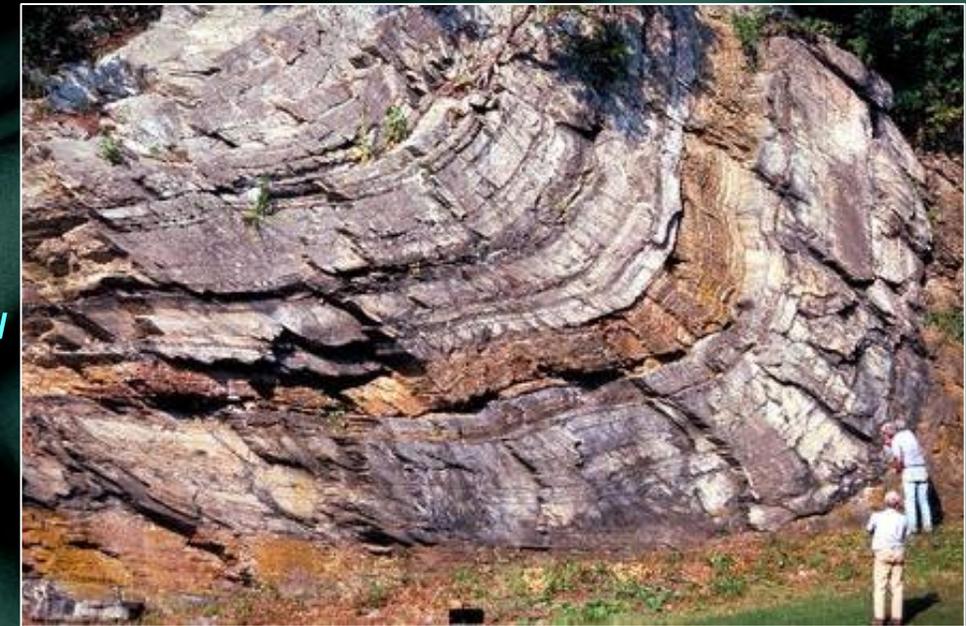
Три стадии складкообразования



Мы рассмотрели некоторые соотношения складок и кливажа

Ответьте на вопросы:

- ▶ В вязких слоях кливажа нет. *Что это за складки?*
- ▶ Кливаж есть во всех слоях. Он не параллелен осевой поверхности складок. *Что это за складки? Как ориентирован кливаж. О чем это свидетельствует?*
- ▶ Кливаж присутствует во всех слоях и параллелен осевой поверхности складки. *В каких двух ситуациях теоретически мог сформироваться такой кливаж?*
- ▶ Кливаж развит только в замках складок. *Что можно сказать о контрасте вязкости слоев? На какой стадии образовался такой кливаж?*



<https://serc.carleton.edu/spatialworkbook/activities/folds.html>





Складки на остров Сицилия