

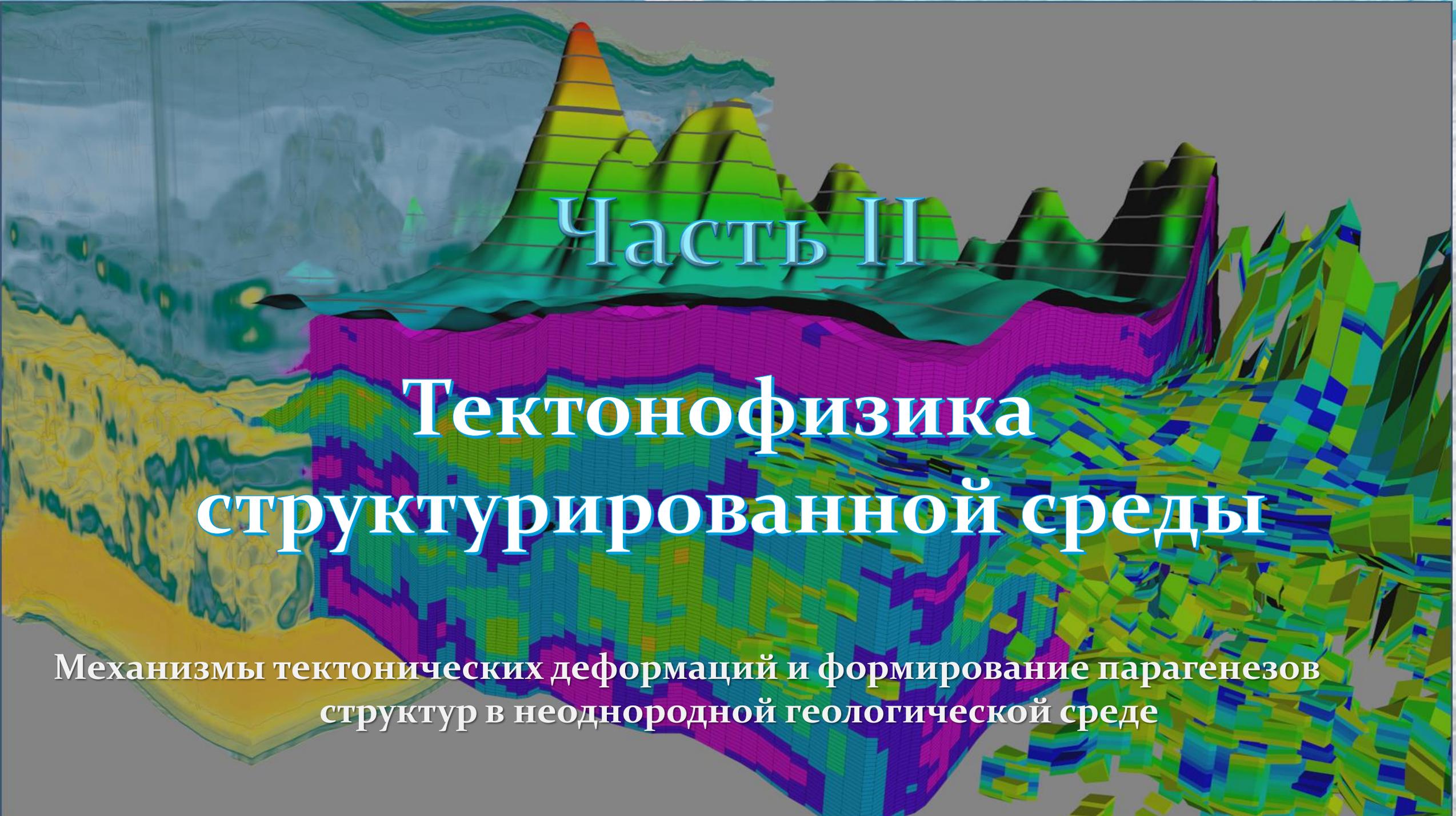


Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Лекция 9
Лекция 15

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 15

Стрейн-анализ

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Что и как можно реконструировать?

- Для чего могут быть нужны реконструкции?
- Можно ли реконструировать деформации?
- Можно ли реконструировать напряжения?
(ориентировка, величина)
- В каких случаях реконструкции возможны, а в каких нет?
- Отличие в подходе к деформациям и напряжениям

Особенности реконструкции деформаций и напряжений

- Решение обратных задач
- Что теоретически можно определить
- Почему деформации, а не напряжения
- Деформация запечатлевается в объектах, а напряжения нельзя наблюдать непосредственно
- Соотношение напряжений и деформаций в случае малой деформации.
- Кратковременность упругой деформации
- Трудности с определением величины напряжений
- Связь больших деформаций с величиной напряжений (ответьте, пожалуйста, есть ли таковая)

Значение количественной оценки деформаций горных пород и толщ

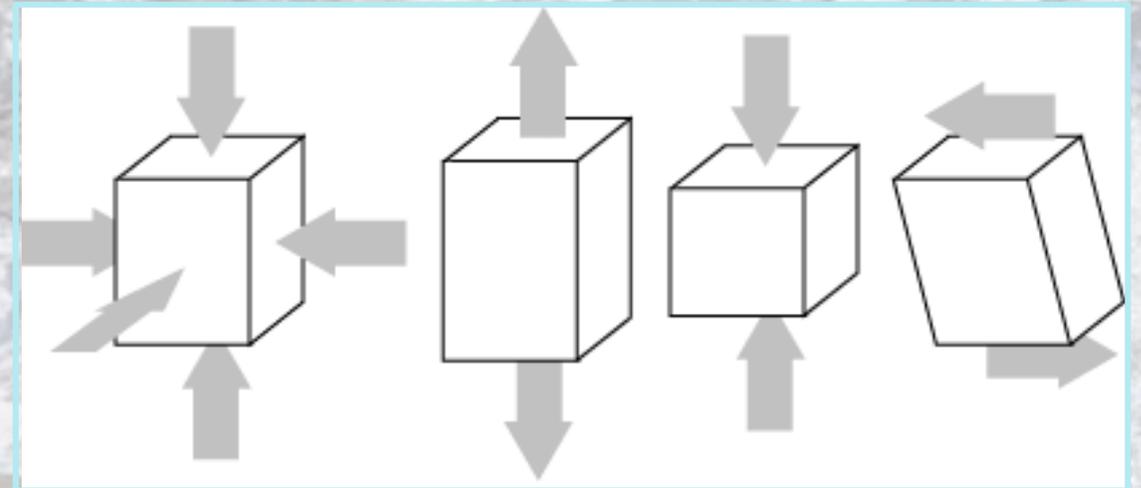
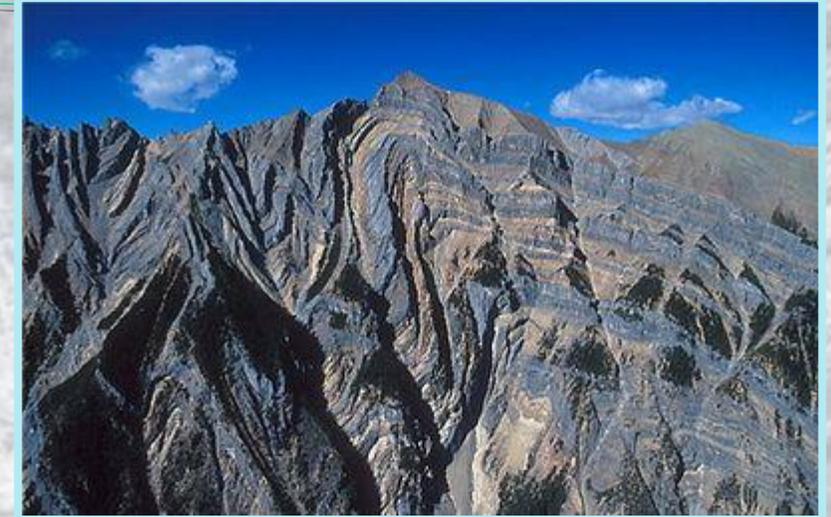
- Основа для понимания тектонических процессов, проверка гипотез
- Корреляция с характером других процессов, например, со степенью метаморфизма
- Использование для корректных палинспастических реконструкций

Особенности геологической среды

- Неоднородность геологической среды
- Неоднородность полей напряжений и деформаций
- Невозможность осреднения, распространения на большой объем
- Понятие о прогрессивной деформации (отличие от напряжений)
- Смена ориентировок осей деформации
- Разный механизм формирования структурных форм

Деформация и стрейн

- Английская терминология
- Русская терминология



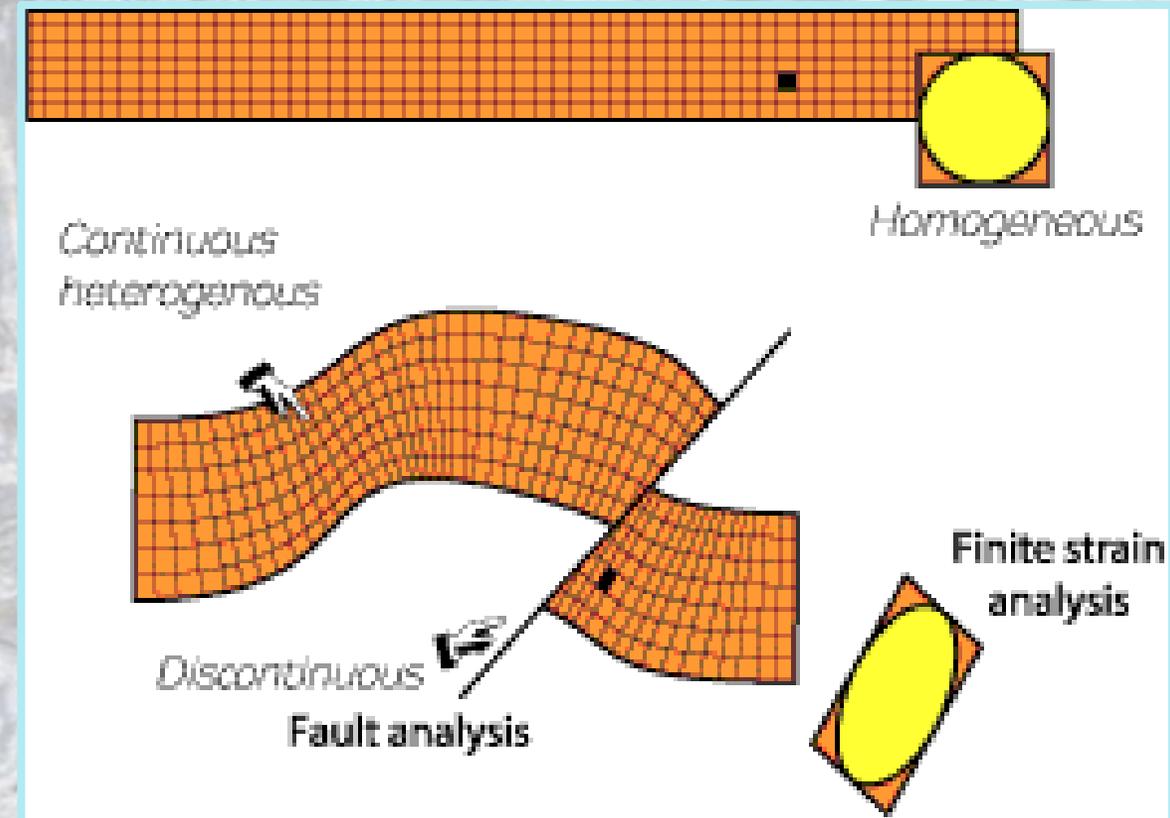
Деформация и стрейн

(с точки зрения механики сплошной среды)

Переход какого-то объема пород из недеформированного в конечное деформированное состояние можно описать с помощью сложных построений, в которых можно выделить:

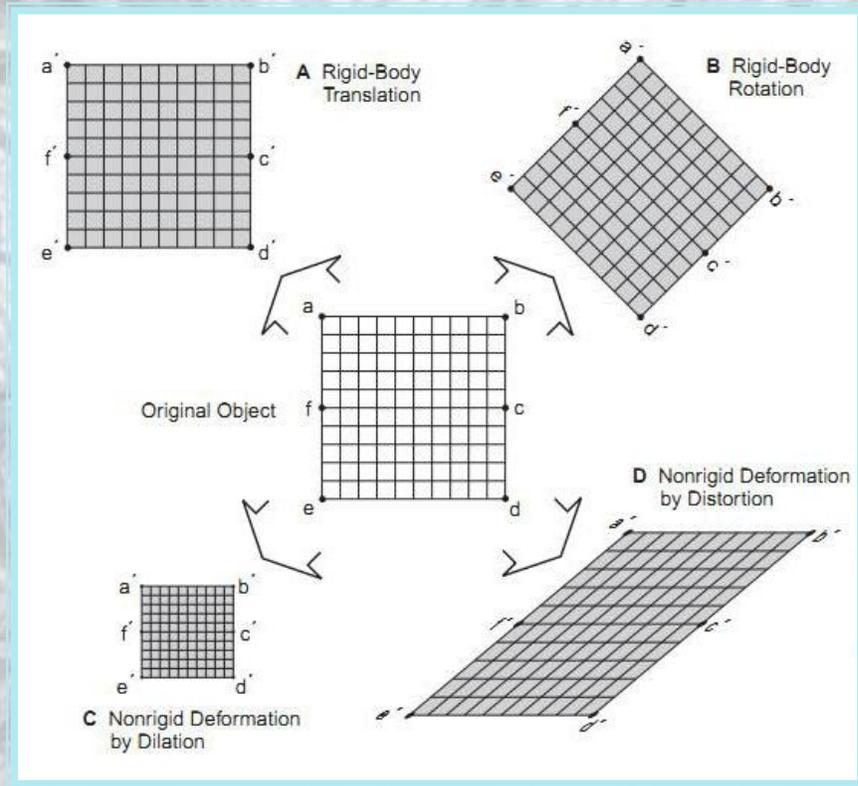
- трансляцию (перемещение)
- жесткое вращение
- собственно деформацию (*strain*).

В горных породах можно идентифицировать собственно деформацию, или *strain*. Таким образом, следует различать деформацию в широком смысле (*deformation*) и в узком (*strain*).



Измерение деформации

(в широком смысле слова)



Вращение – может быть описано положением оси вращения и направлением и углом поворота относительно этой оси;

Трансляция – может быть описана вектором, длина и направление которого отражают величину перемещения и его направленность;

Собственно деформация (стрейн) определяется изменением расстояния между материальными точками

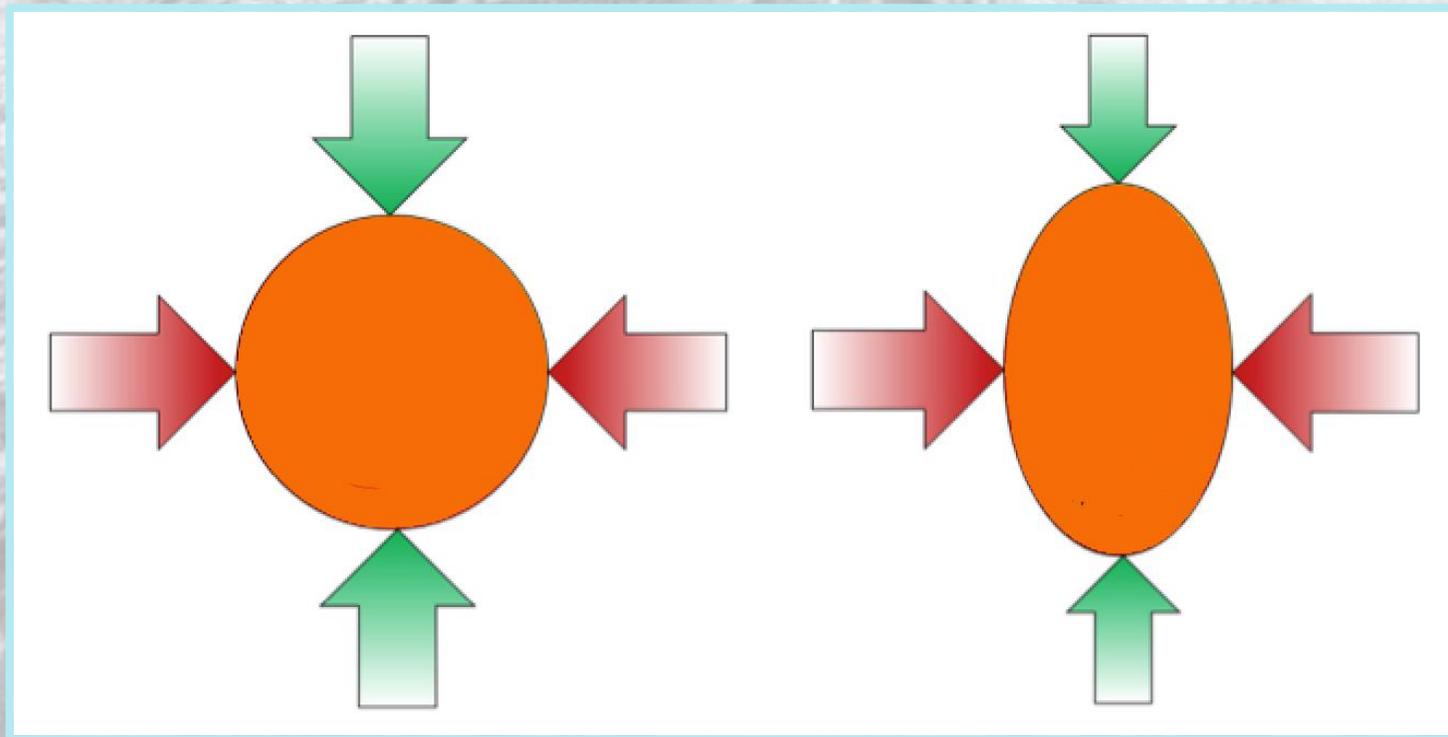
В горных породах можно выявить только стрейн. Методы его измерения в совокупности составляют так называемый *стрейн-анализ*.

Стрейн-анализ – что это?

- **Что в каждом конкретном случае можно назвать стрейном, зависит от масштаба рассмотрения и от того, куда мы помещаем начало координат**
- **Пример со складками**
- **А. В. Лукьянов: под стрейн-анализом следует понимать количественное изучение деформаций любого масштаба.**
- **Любое состояние неоднородной деформации можно анализировать как поле взаимосвязанных однородно деформированных элементов. Стрейн-анализ включает в себя как минимум два этапа: выделение квазиоднородных элементарных объемов с измерением их деформации и дальнейший анализ полученных результатов. Вариации деформации в отдельных элементарных объемах (образцах и обнажениях) не могут быть произвольными; если тело остается сплошным, они неизбежно согласованы друг с другом (концепция совместимости стрейна, по Дж. Рэмзи). Затем полученные данные используются для оценки деформации структур более крупного ранга.**

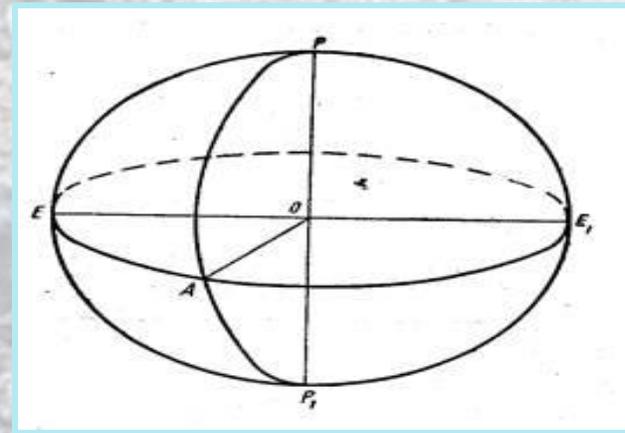
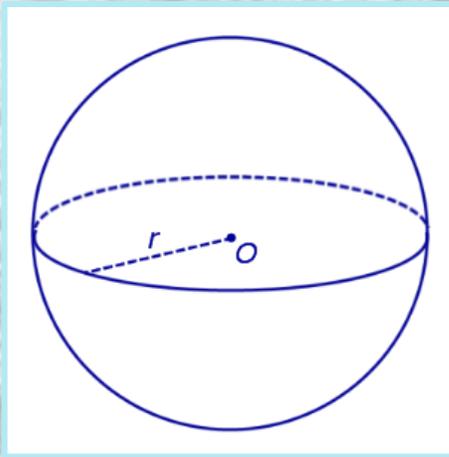
Описание деформации

- Какие параметры для характеристики деформации вы знаете?



Описание трехмерной деформации

- Трансформация сферы единичного радиуса в эллипсоид деформации



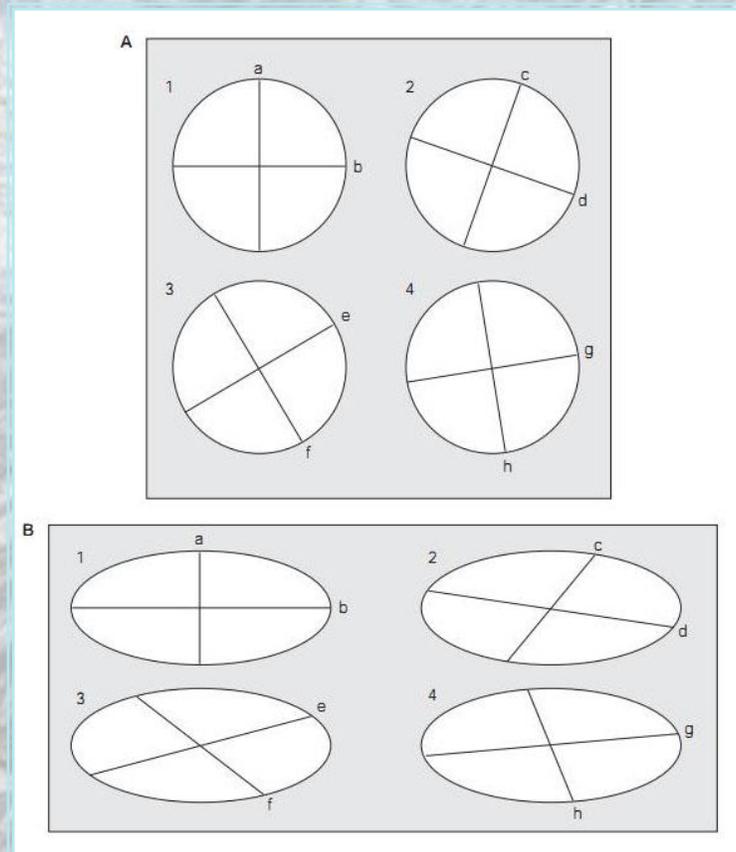
- Параметры для характеристики деформации:
 $k, \varepsilon, \gamma, \delta$

В чем отличие соосной и несоосной деформации?

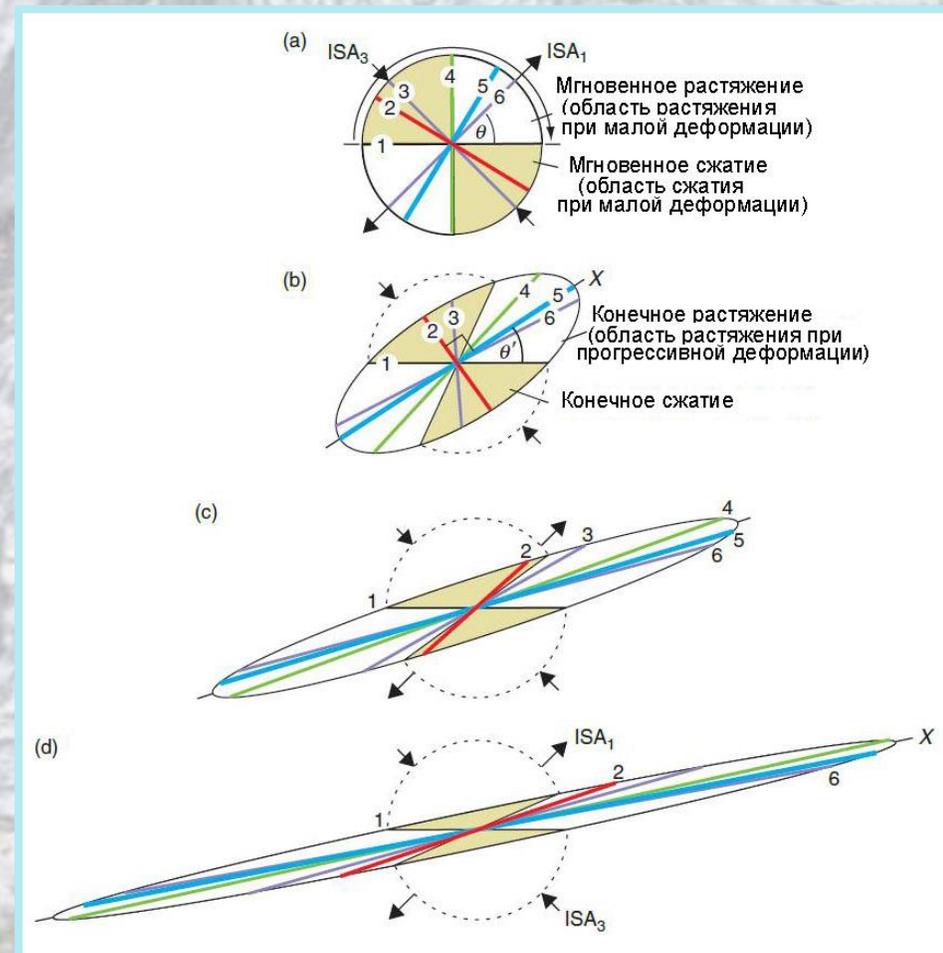
- **Определение соосной деформации**
- **Определение несоосной деформации**
- **Как еще можно назвать эти типы деформации**

Изменение длин и углов материальных отрезков

- Соосная и несоосная деформация

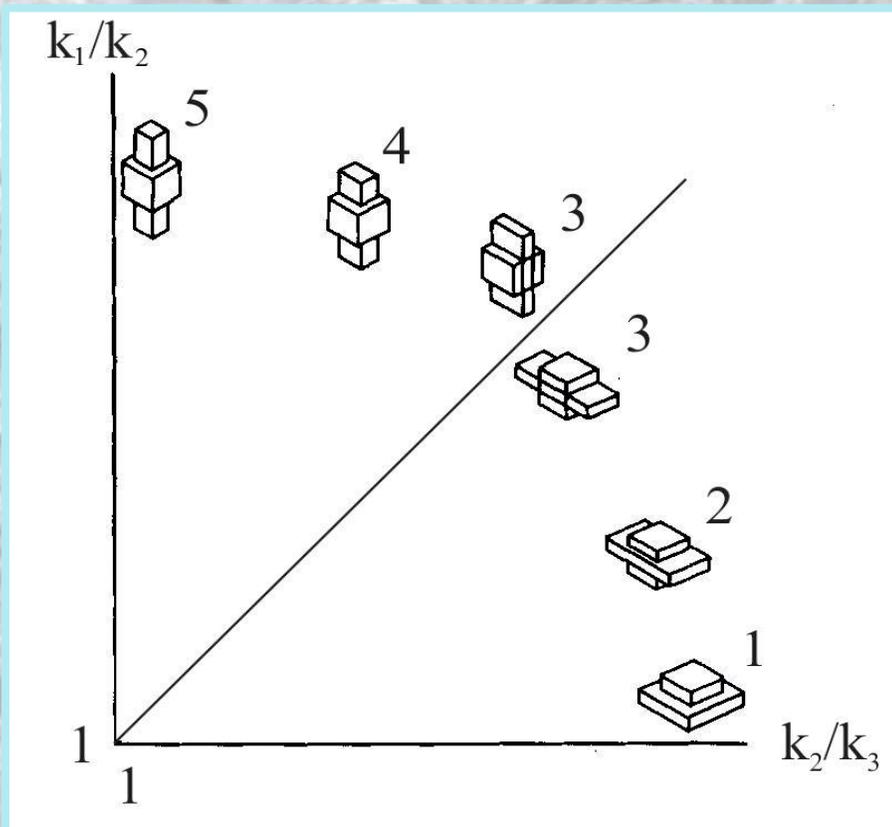


(Fossen, 2011)



Форма эллипсоида деформации зависит от соотношения величин деформации $k_1 > k_2 > k_3$ по его полуосям

Диаграмма Флинна



Пять типов трехмерной деформации укорочения-удлинения:

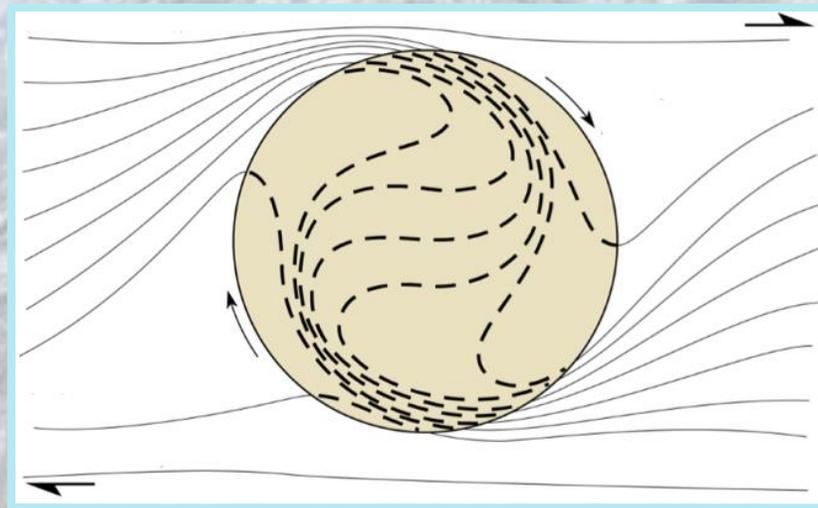
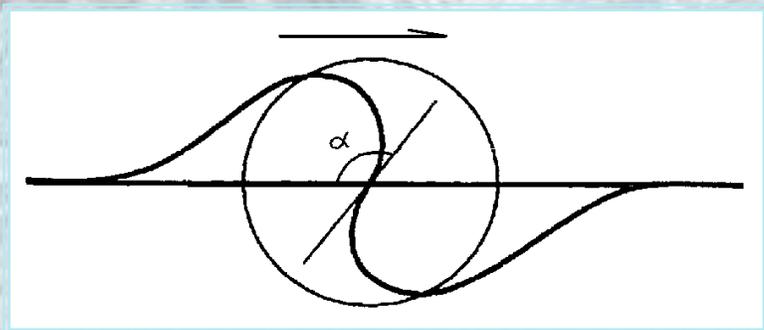
- 1 – одноосное сплющивание,
- 2 – трехосное сплющивание,
- 3 – двумерная (плоская) деформация,
- 4 – трехосное вытягивание,
- 5 – одноосное вытягивание.



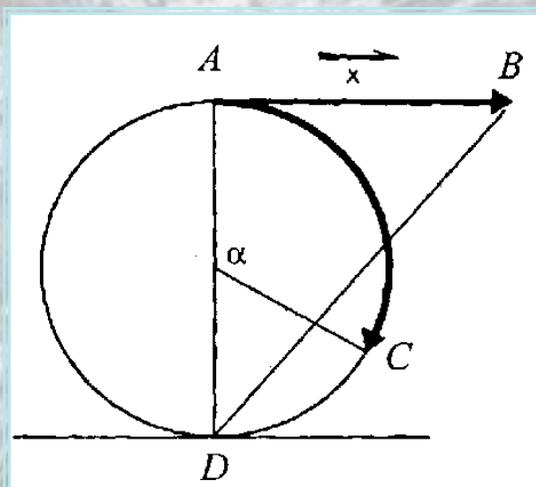
Природные индикаторы деформаций в земной коре: деформированные объекты разного масштаба

- Внутрислойные деформации

Поворот зерен. Структура снежного кома



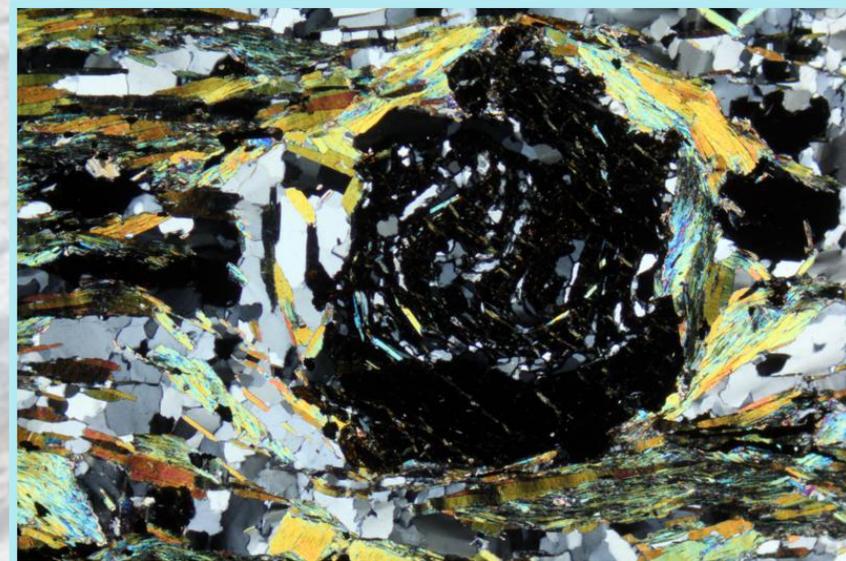
(no Jean-Pier Burg)



Чему равна амплитуда сдвига γ ?

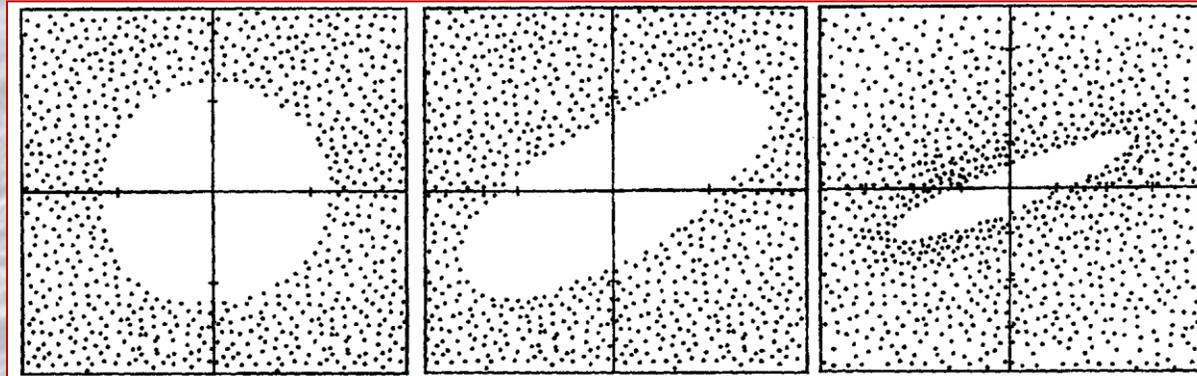
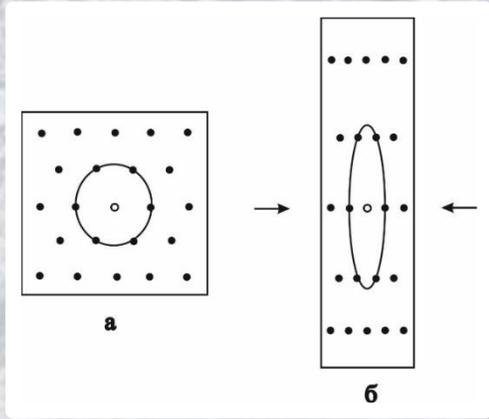
(по Николя, 1992)

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

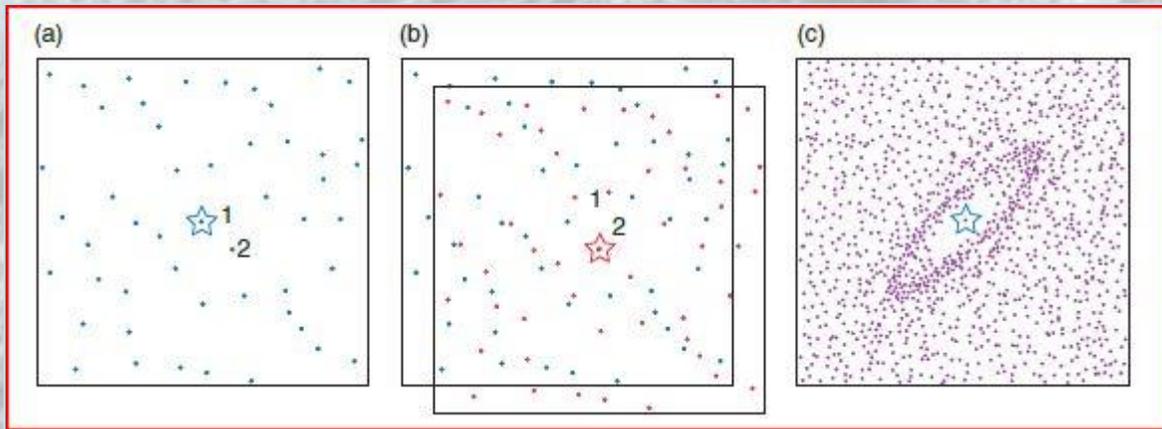


Статистический метод Фрая

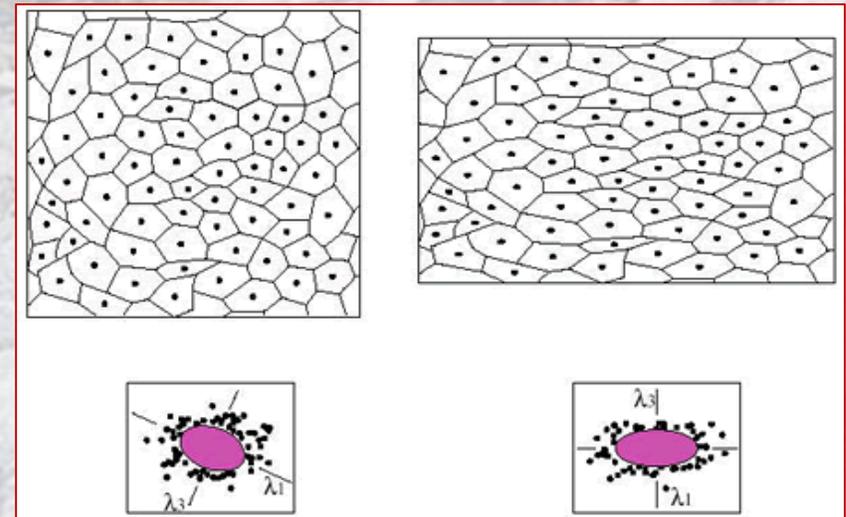
- Это способ определения эллипса деформации, основанный на анализе геометрических соотношений между центрами объектов



Пример диаграммы Фрая для сдвига. В центре простой сдвиг $\gamma=1$, справа $\gamma=2$
(по А. Николая, 1995).



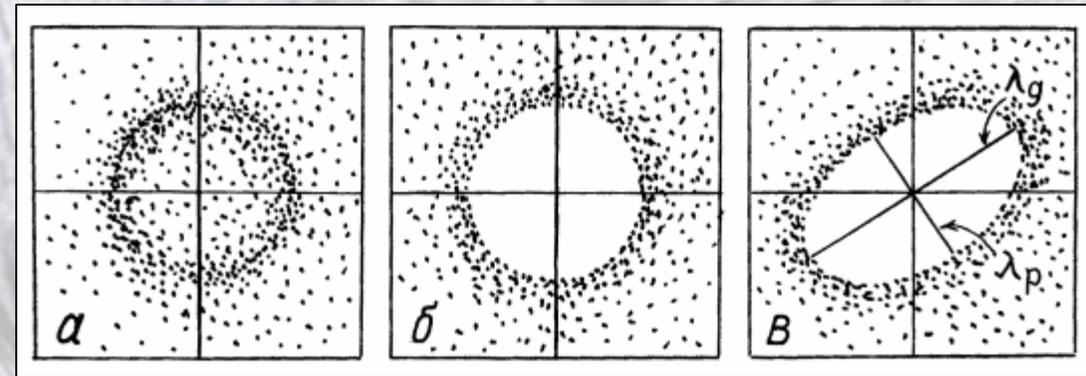
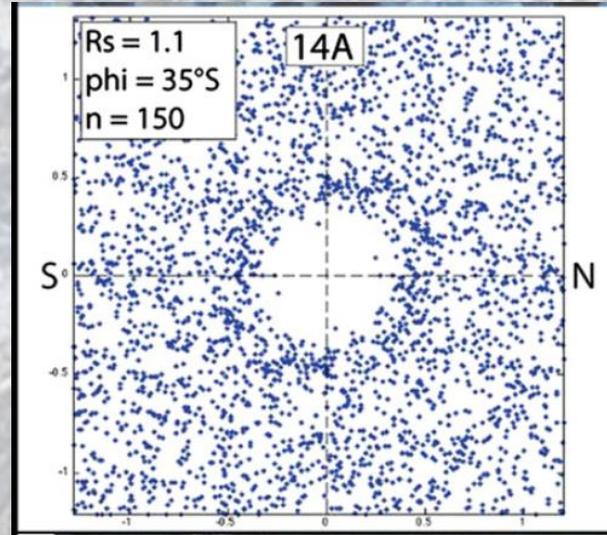
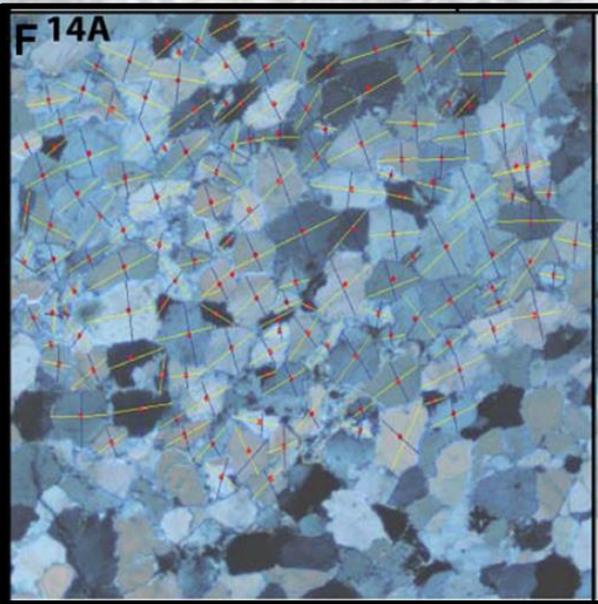
Принцип построения эллипса деформации
(Fossen, 2011)



trainwww.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Geol-3101/So2/twod.html

Нормализованный метод Фрая

Введена поправка, которая устраняет вариации, обусловленные несовершенству сортировки частиц по размеру

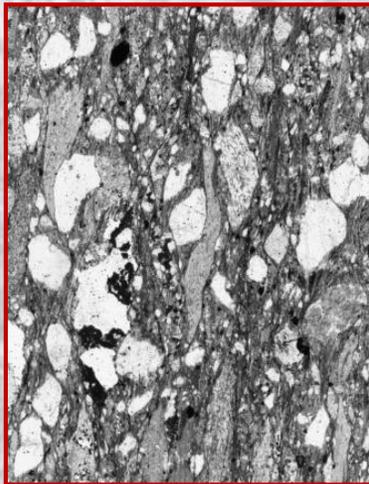


Диаграммы, полученные по методу Фрая: а - стандартный метод Фрая; б, в - нормализованный метод Фрая: недеформированный (б) и деформированный (в) агрегаты. (Родыгин, 2006)

Пример нормализованного метода Фрая. Складчато-надвиговый пояс, Восточные Гималаи (Long et al., 2011)

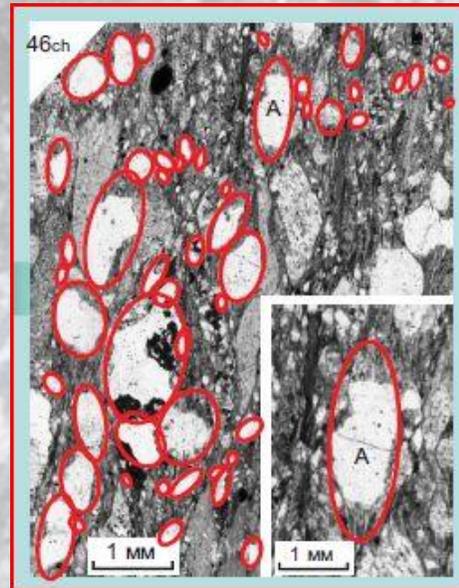
Необходимые условия

- Число объектов более 100
- Поле деформаций – однородное
- Число объектов не должно изменяться в процессе деформации
- Первоначальное распределение объектов должно быть однородным



Фотографирование шлифов

Изготовление шлифов в трех взаимно перпендикулярных плоскостях



Обработка с использованием специальных компьютерных программ

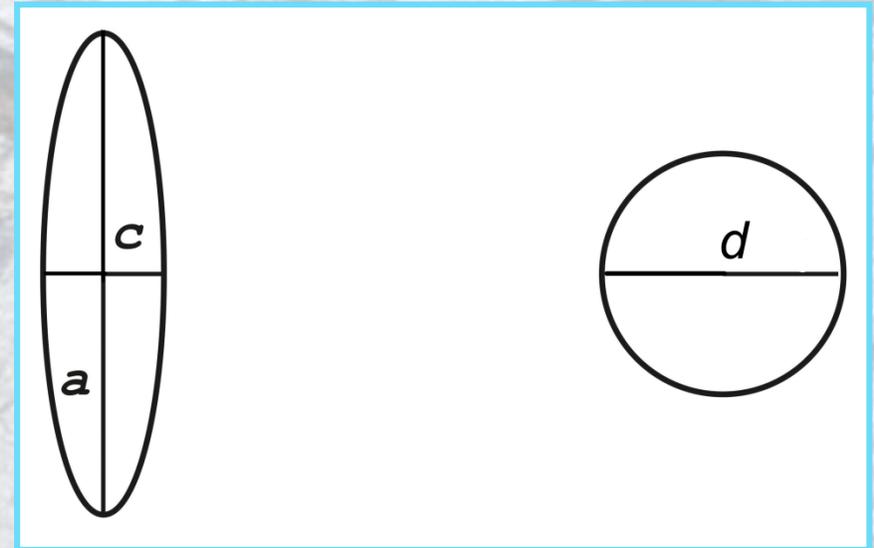
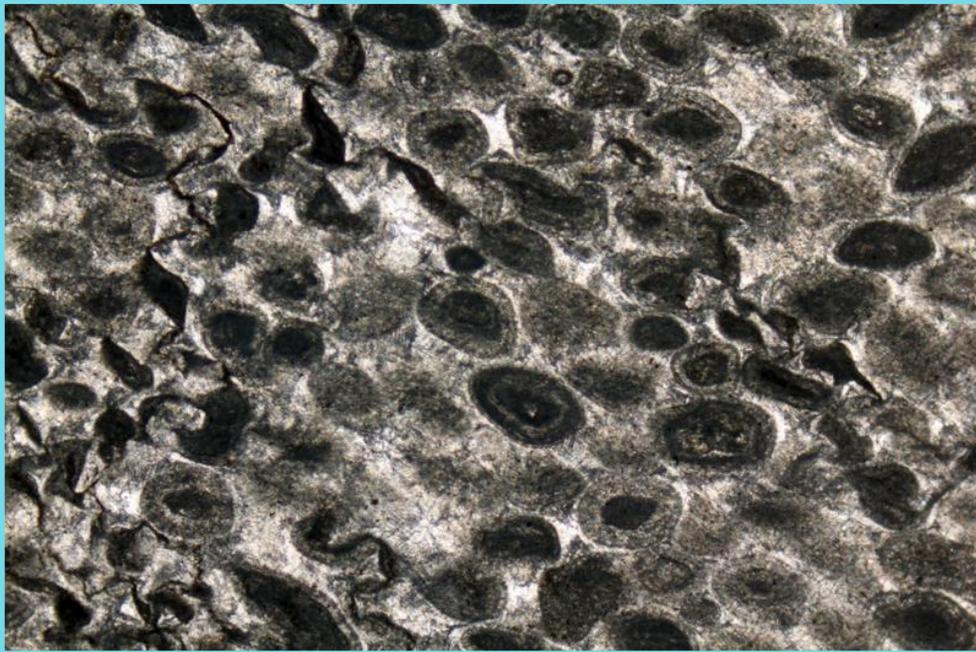
Стрейн-анализ

Вычисления и построение эллипсоида деформации (также используются специальные программы)

(по В.Н. Войтенко)

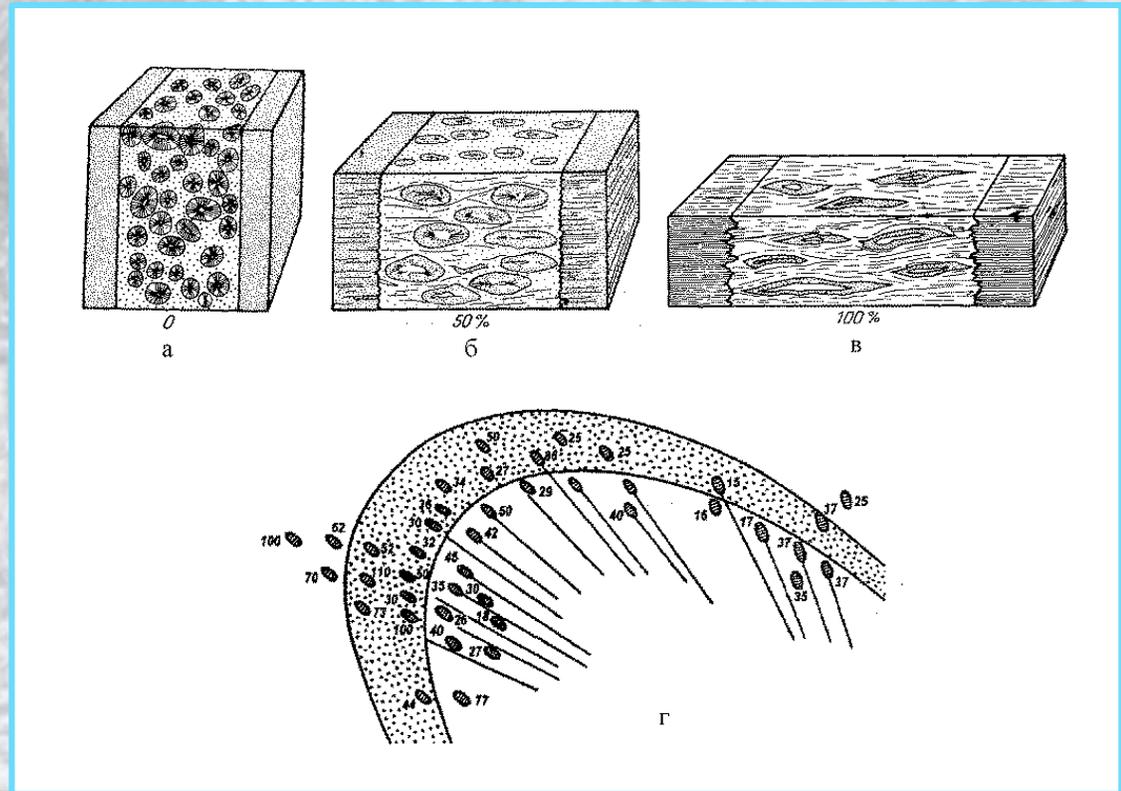
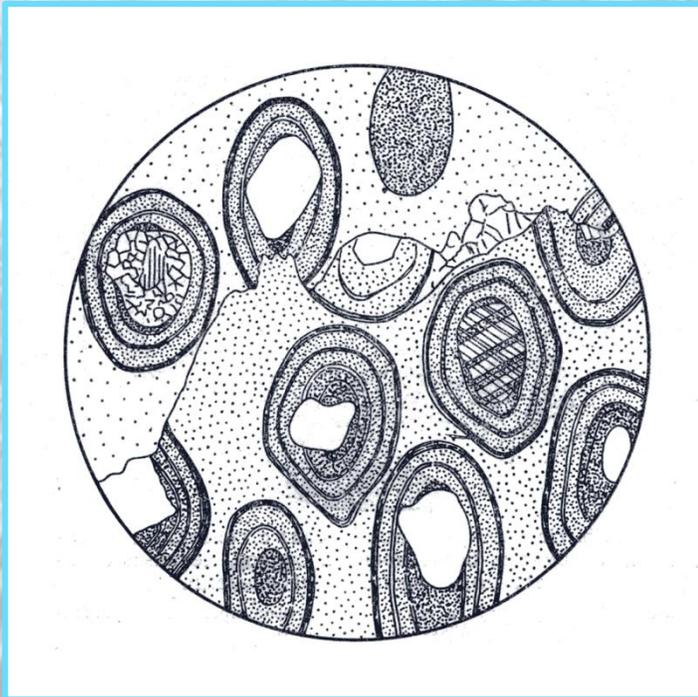
Измерение деформации по включениям, первоначальная форма которых известна

- оолиты, пятна диагенетического изменения, сферические окаменелости (фораминиферы, радиолярии), круглые окаменелости или круглые срезы цилиндрических форм (криноидеи, следы ползания червей)



Чему равно k ?

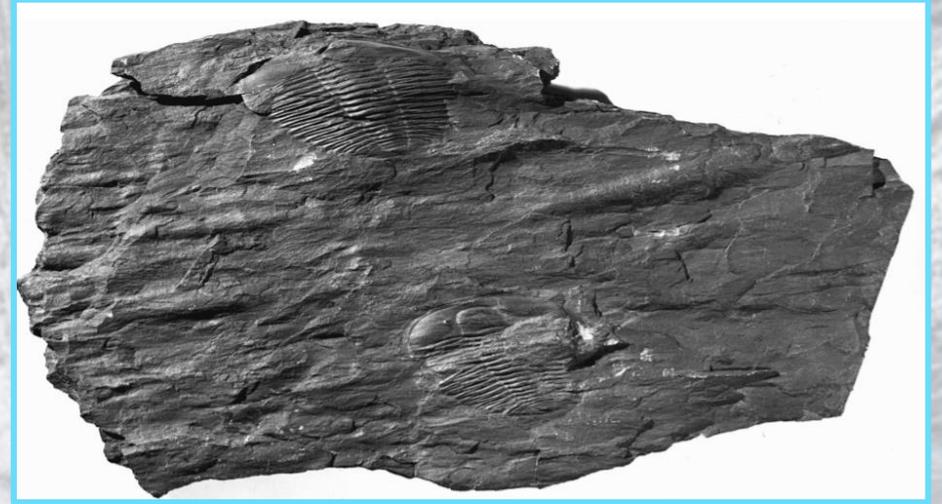
**Оолиты были детально изучены Э. Клоосом (1947)
в известняках кембро-ордовика Аппалачского пояса
(США, штат Мэриленд)**



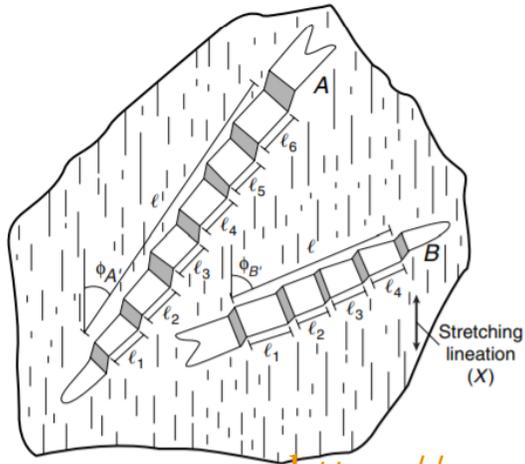
Ископаемая фауна



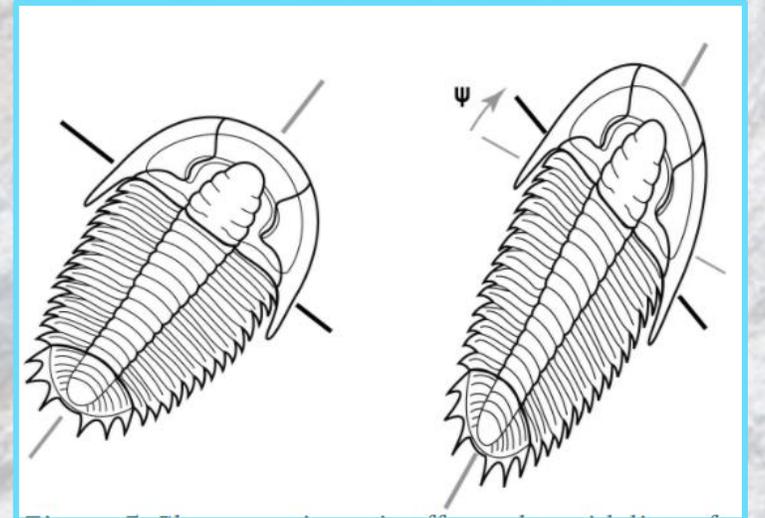
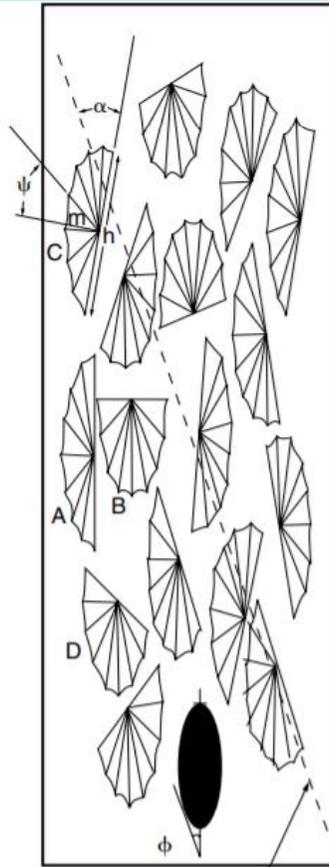
<http://geologylearn.blogspot.com/2017/01/why-perform-strain-analysis.html>



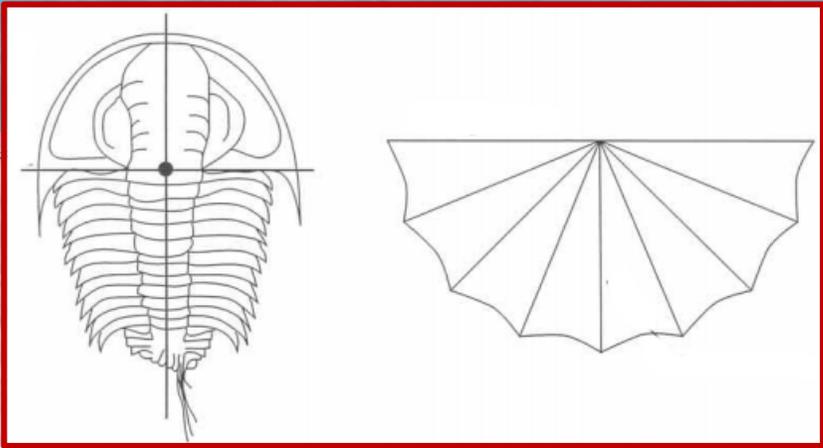
<https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-esze-cho4.pdf>



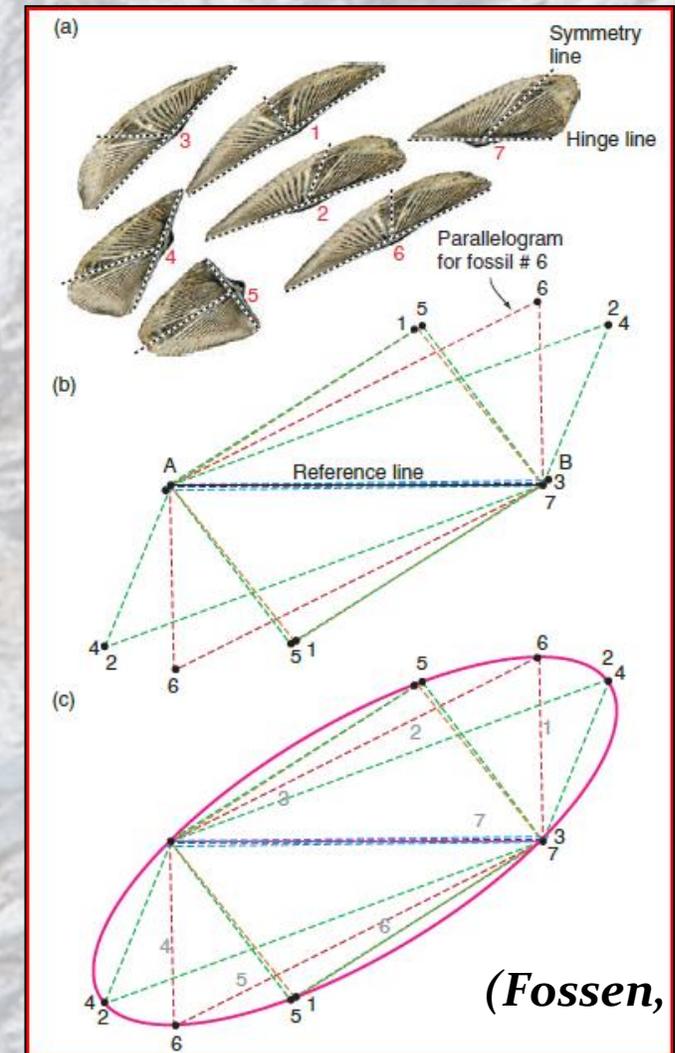
<https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-esze-cho4.pdf>



Метод Велмана (the Wellman method)



- Обычно применяется к окаменелостям с перпендикулярными линиями симметрии в недеформированном состоянии.
- Произвольно рисуется опорная линия. Идентифицируются линии, которые были ортогональны в недеформированном состоянии. Эти пары отрезков прочерчиваются от точки А, затем от точки В до пересечения этих отрезков. Получаются параллелограммы, вершины которых пронумеровываются
- Чтобы построить эллипс деформации достаточно соединить пронумерованные точки



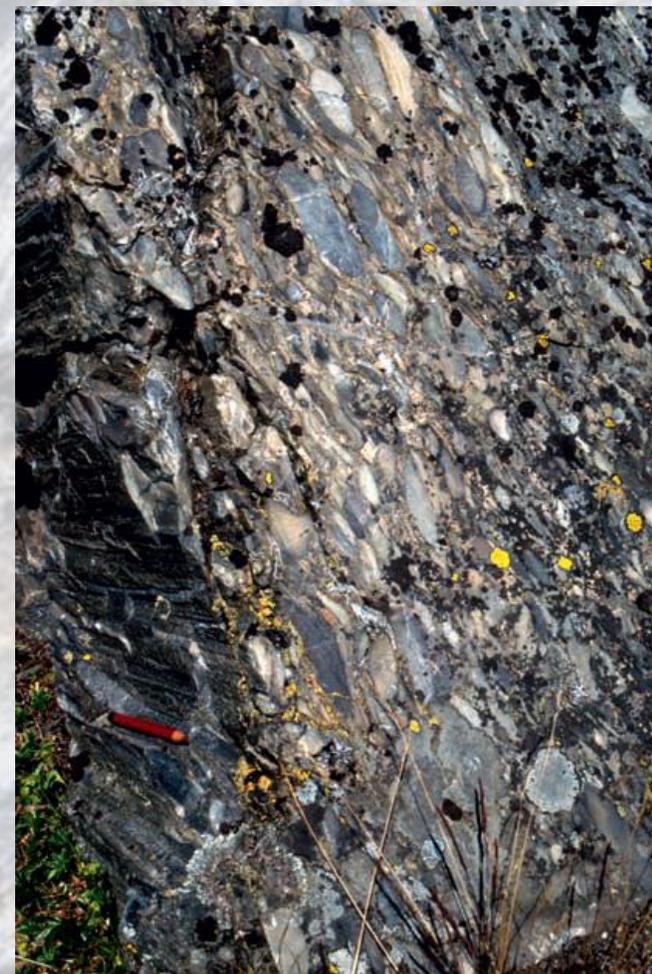
(Fossen, 2011)

Измерение деформации по объектам, имеющим исходную форму в виде эллипсов или эллипсоидов

- Деформированные гальки



Ориентировка и величина деформации



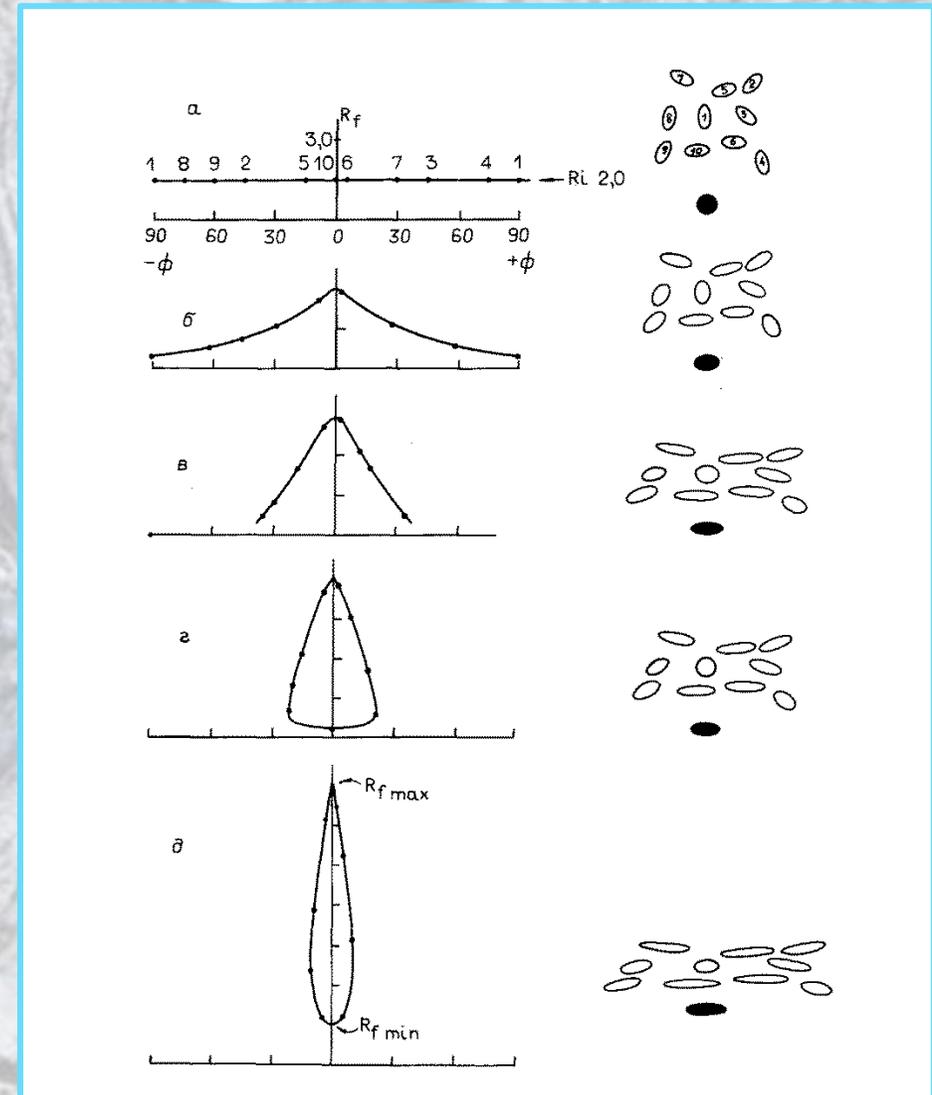
(Fossen, 2011)

Метод R_f/Φ_f (предложил Дж. Рэмзи в 1967 г.)

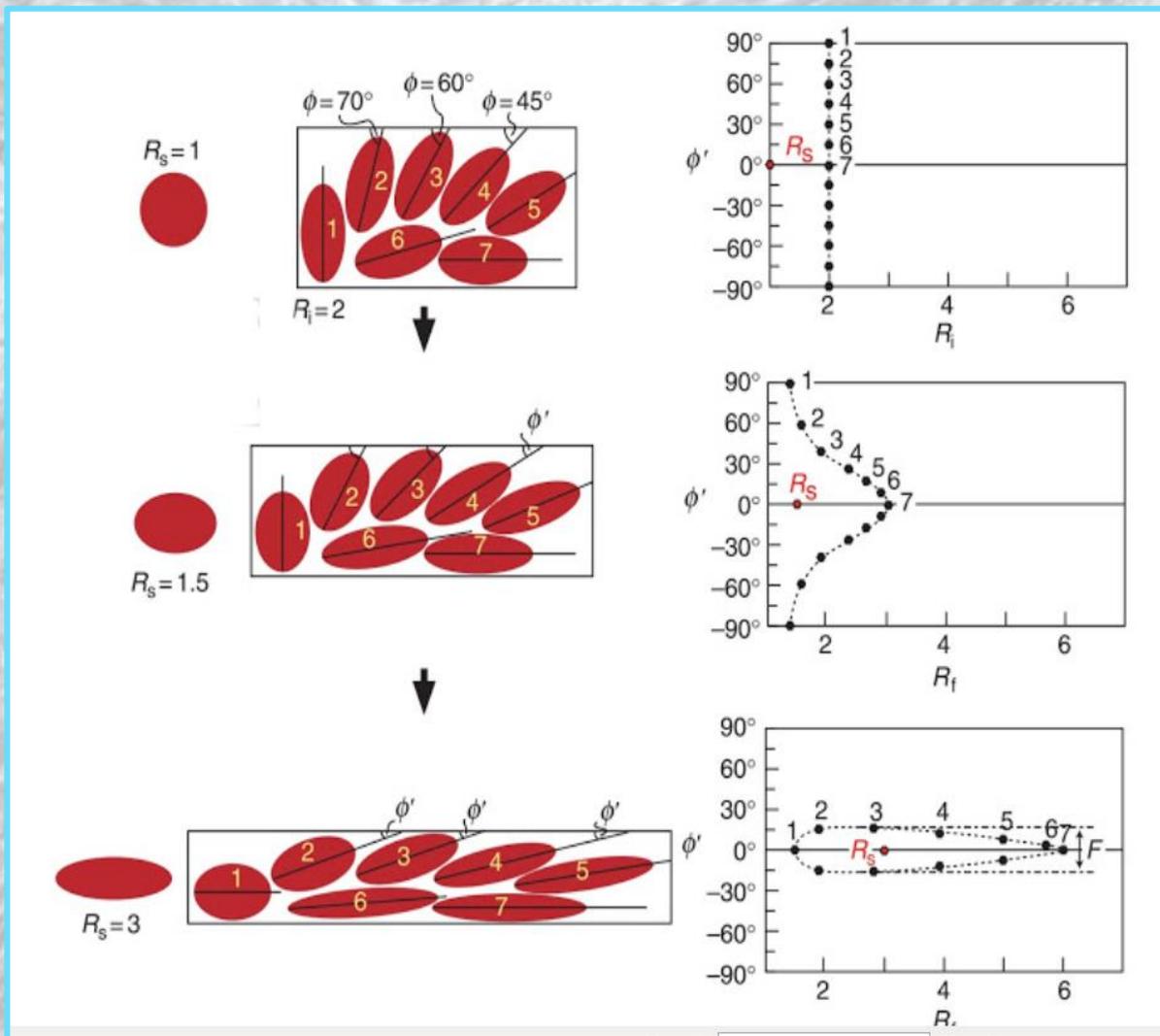
- Пусть гальки расположены хаотически. Обозначим отношение длинной и короткой осей галек через R_i , а угол между длинной осью и некоторой опорной линией Φ_i . В начальном состоянии этот угол произволен. Отношение осей галек и их ориентировка после деформации изменятся, назовем эти величины, соответственно, R_f и Φ_f . Определив множество значений R_f и Φ_f , можно найти форму и ориентировку эллипса деформации.

$$R_d^2 = R_{f \max} \cdot R_{f \min}$$

$$k = \sqrt{R_d}$$



(Николя, 1995)



В реальности получают облако точек. Подбирают кривую, наилучшим образом описывающую облако, а затем сравнивают со множеством расчетных кривых

$$R_s = (R_{fmax} R_{fmin})^{1/2}$$

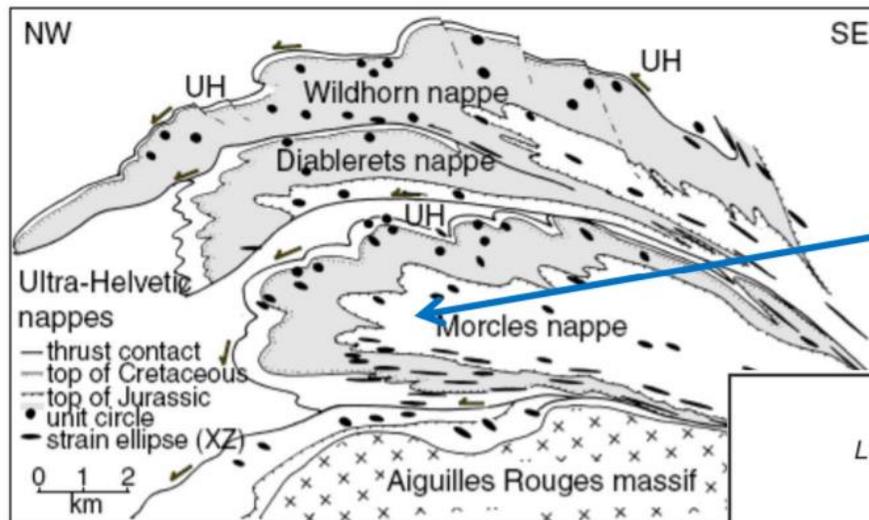
R_d на предыдущем слайде и R_s на этом слайде – отношение осей эллипса деформации

(no Ramsay, Huber, 1983)

Ограничения метода

- **Метод применим лишь для тел с постоянным соотношением длинной и короткой осей. Для реальных объектов обычно получают не кривые, а облако точек. Подбирают кривую, наилучшим образом описывающую облако, а затем сравнивают эту кривую со множеством расчетных кривых, которые построены для разных первоначальных соотношений осей объектов и эллипса деформации**
- **В реальных объектах эллиптические тела имеют некоторую предпочтительную ориентировку. Требуется специальный анализ и введение соответствующих поправок.**
- **В природе гальки обычно более вязкие, чем матрикс**

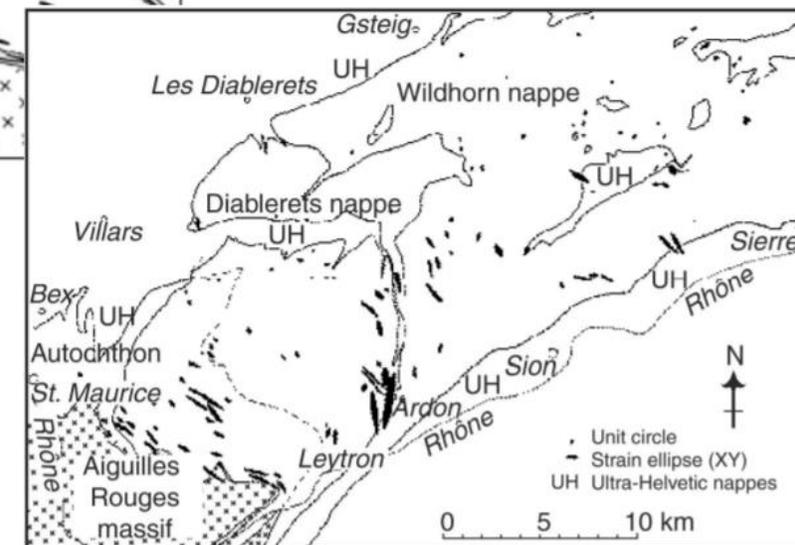
Изображение стрейна на карте и разрезе



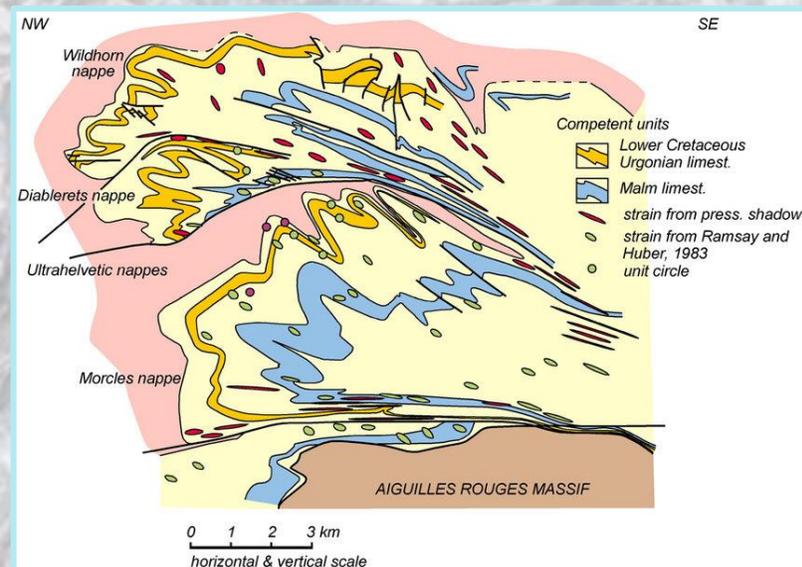
Helvetic "nappes", Switzerland.

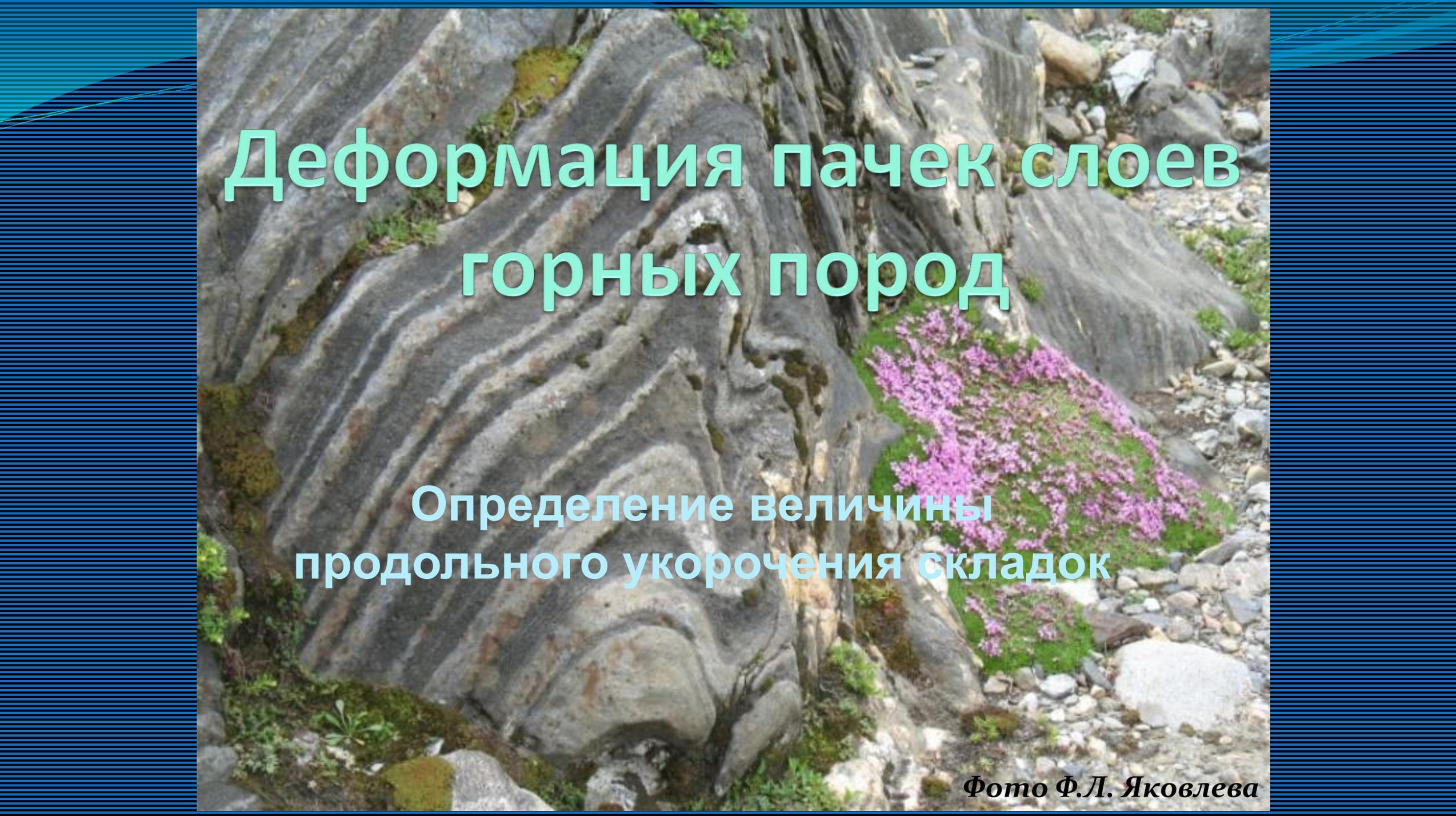
Ben van der Pluijm

http://www.impacttectonics.org/GEO310/Lectures/GCH_L4_Deformation_Strain.



Обобщенное поперечное сечение через западные Гельветские покровы (по Casey and Dietrich, 1997), показывающее эллипсы деформации (XZ-сечения эллипсоида деформации), взятые у вышеупомянутых авторов и Ramsay and Huber (1983).
(no Bastida et al., 2014)





Деформация пачек слоев горных пород

Определение величины
продольного укорочения складок

Фото Ф.Л. Яковлева

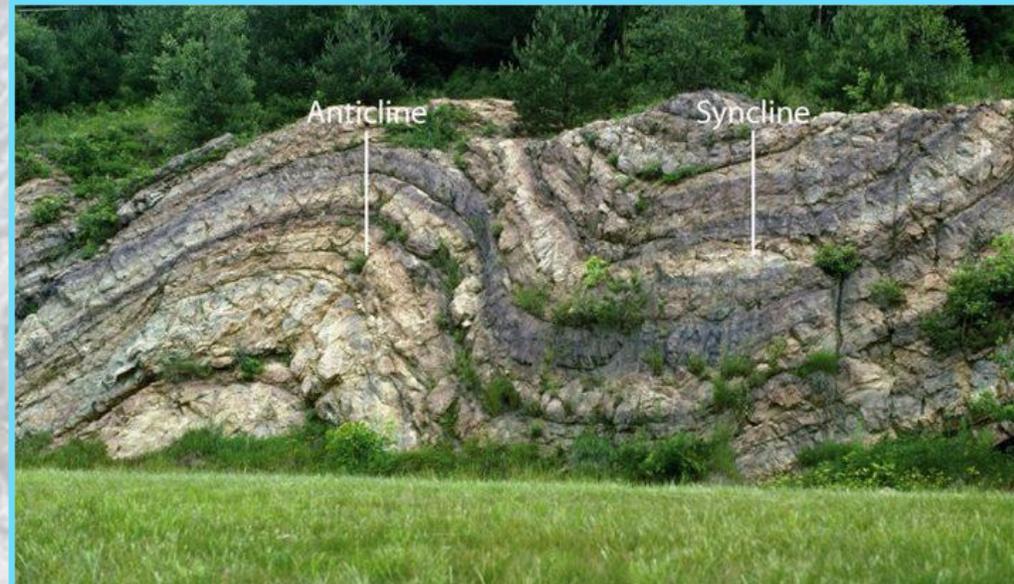
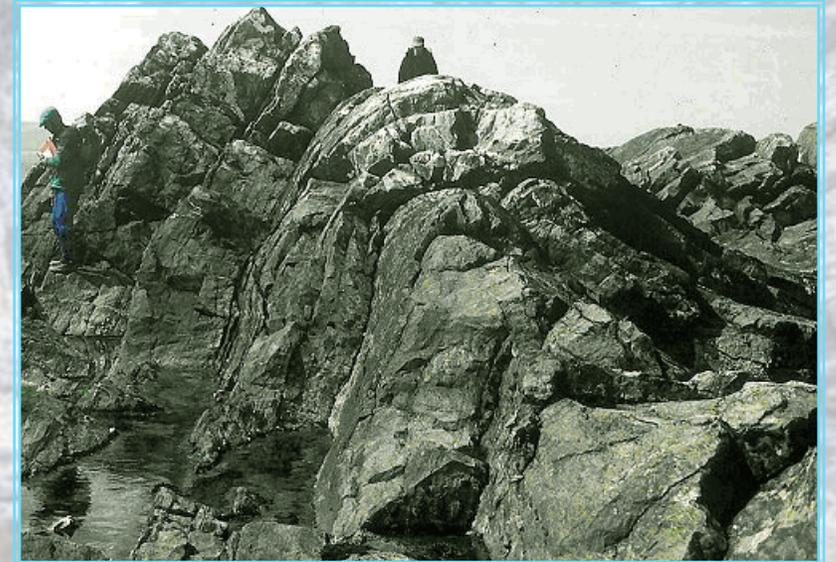
Длина и мощность слоев остается постоянной

- В этом случае складки можно просто «распрямить» (любым способом). Отношение длины слоя к его проекции и будет коэффициентом продольного укорочения

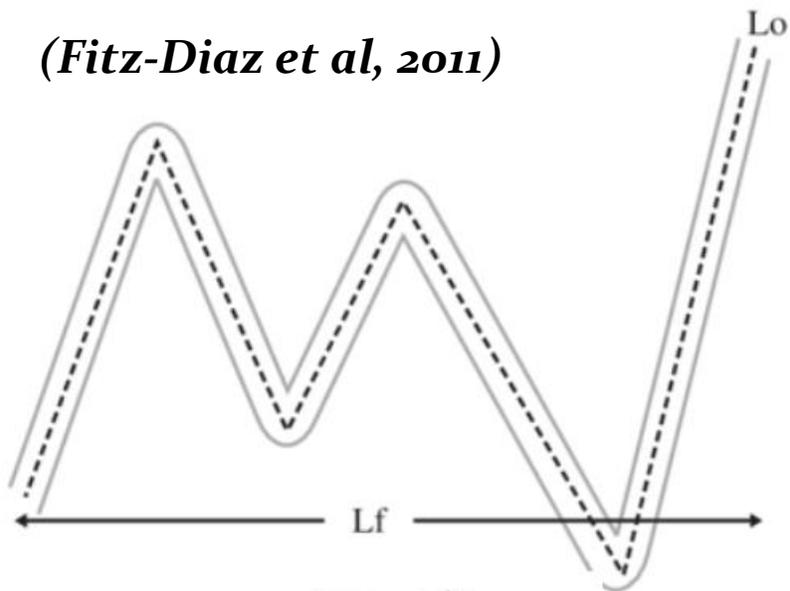
Какие это складки:

Концентрические

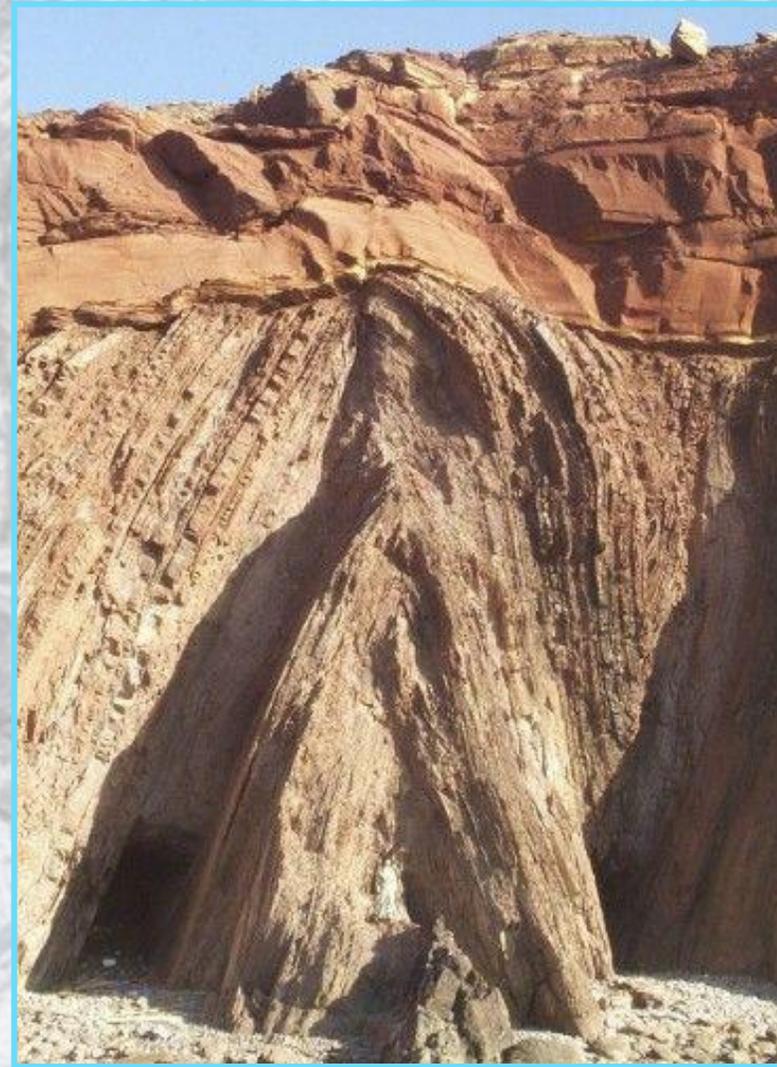
Подобные по ритму типа А



(Fitz-Diaz et al, 2011)



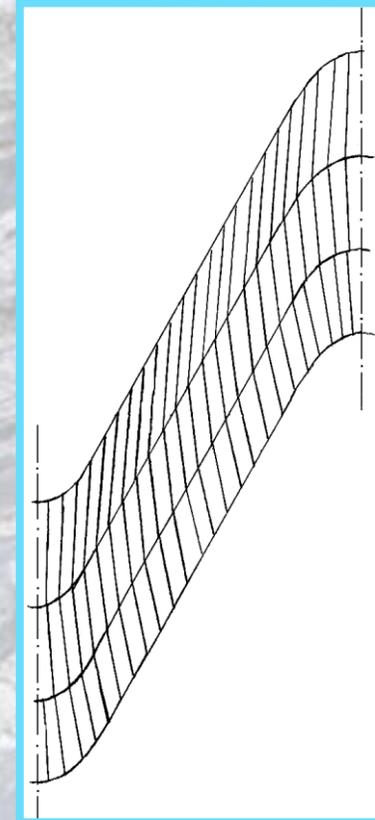
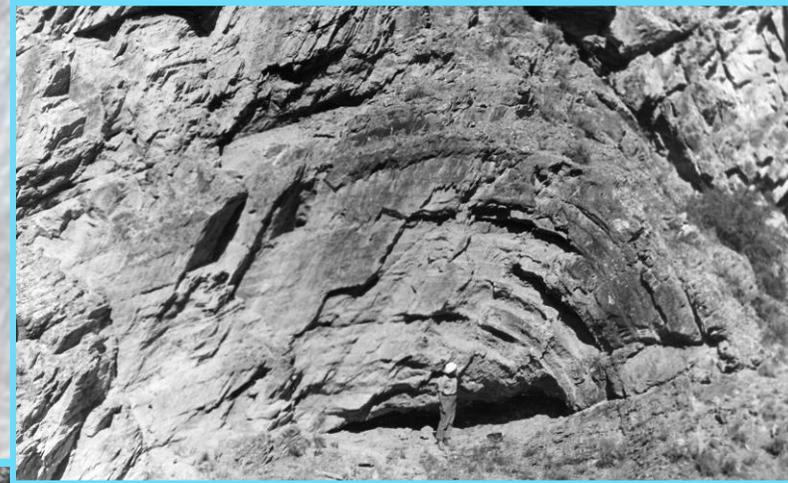
$$\text{укорочение} = \frac{(L_o - L_f)}{L_o} * 100\%$$



Интернет-ресурс

Мощность и длина слоев изменяются

- Индикаторы такого изменения:
 - ✓ Увеличение мощности вязких слоев в замках складок
 - ✓ Наличие кливажа



Интенсивный кливаж в терригенных толщах с небольшим контрастом вязкости. Большой Кавказ. Фото Н.Б. Лебедевой

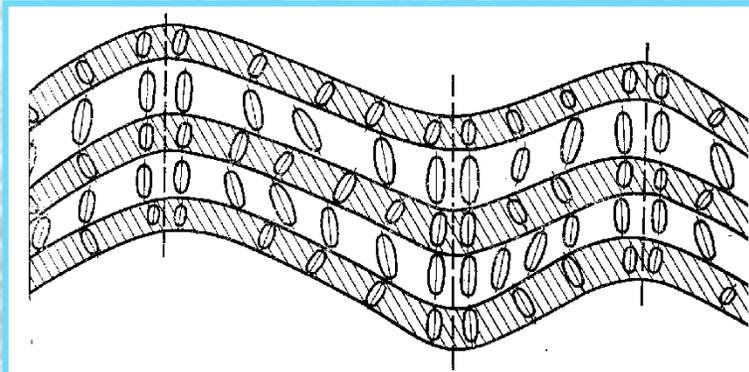


Таласский хр. Чередование известняков, карбонатных и филлитовых сланцев. Фото и рис. Н.С. Фроловой

**Это складки, подобные по ритму, тип Б.
В них имеет место значительная внутрислойная деформация**

С чем связано увеличение мощности слоев

Если мощности всех слоев увеличиваются в замках складок, и во всех слоях развит кливаж, значит перед формированием собственно складок слои испытали продольное укорочение. Это происходит при небольшом контрасте вязкости слоев на первой стадии складкообразования. Внутрислойная деформация в этом случае значительна.

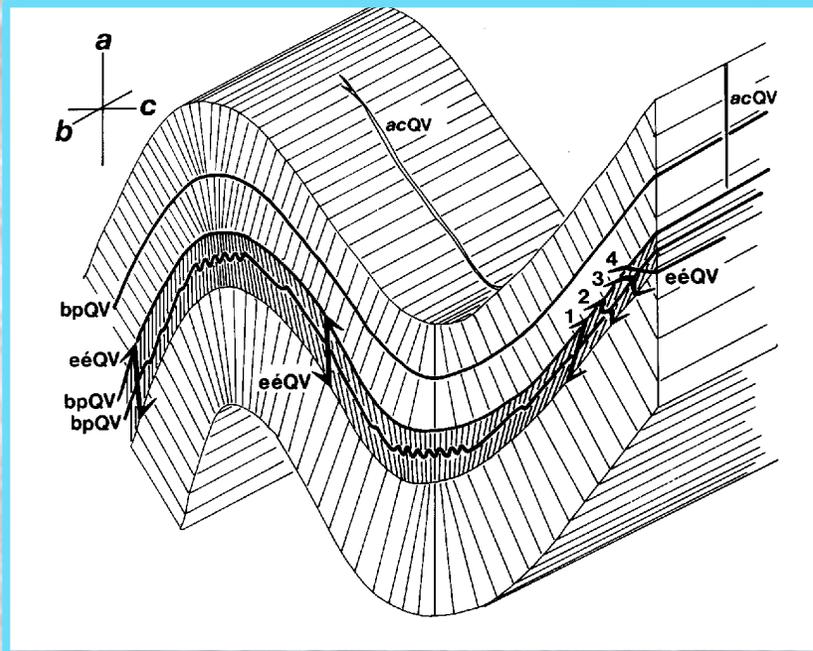


Поле деформаций в складке продольного изгиба, образованной слоями разной вязкости. Результаты моделирования на эквивалентных материалах

(эксперимент Т.М. Гептнер, Лаборатория тектонофизики и геотектоники МГУ)

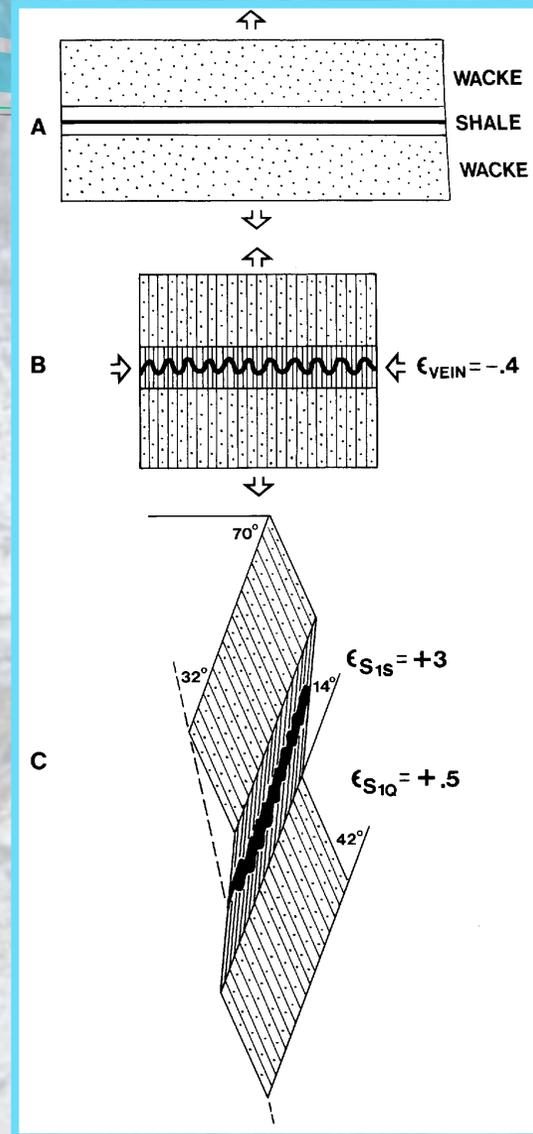
В этом случае простое распрямление слоев даст заниженный коэффициент продольного укорочения (иногда в несколько раз)

Складчатые жилы



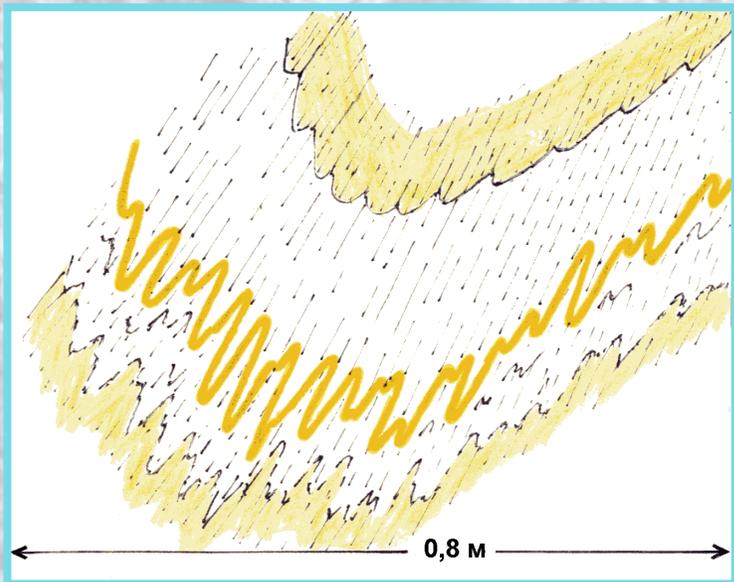
Кварцевая жила параллельна слоистости и образовалась до начала собственно складчатых деформаций (А). На первом этапе складкообразования жила смялась в симметричные складочки (В). Во время формирования собственно складки (второй этап) произошел изгиб вязких слоев, а маловязкие (с жилой внутри) приспособивались к этой деформации

(Henderson and others, 1986)

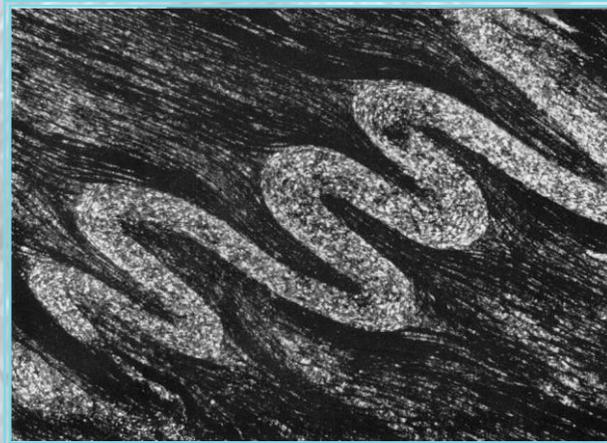


Такие жилы можно использовать для определения величины укорочения слоев, смятых в более крупную складку

Использование смятых в складочки жил для определения величины деформации



Смятая в сжатые складочки кальцитовая жила. Султан-Уиздаг. Рис. Н.С. Фроловой



Складчатая жила в кливажированных породах (Ramsay, Huber, 1987)



Открытая складка в кливажированных слоях. Таласский хр. , Северный Тянь-Шань
Фото Н.С. Фроловой

Если просто распрямить складки, одна из которых показана на рисунке справа, коэффициент продольного укорочения K окажется равным примерно 1,5. Но в слоях была найдена складчатая кварцевая жила. K , определенный по этой жиле, оказался близким к 6.

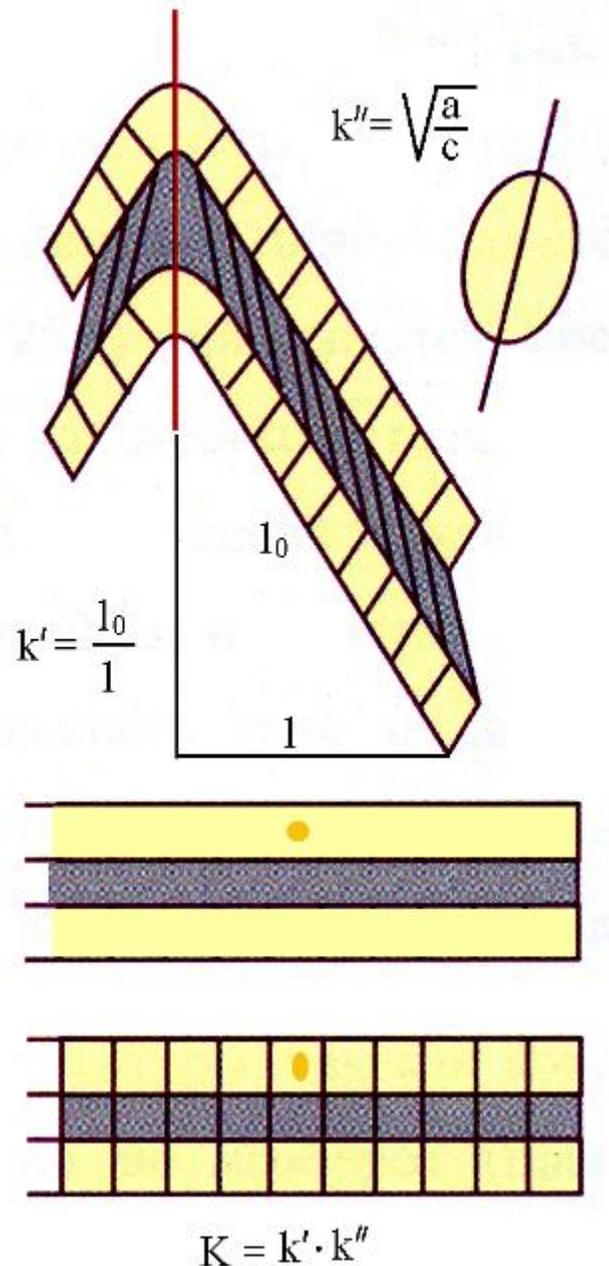
Методы определения величины продольного укорочения в складках в случае изменения мощности слоев в процессе деформации



Patrice F. Rey

Определение величины укорочения пачки слоев, смятой в складки

Принцип подхода к определению величины укорочения



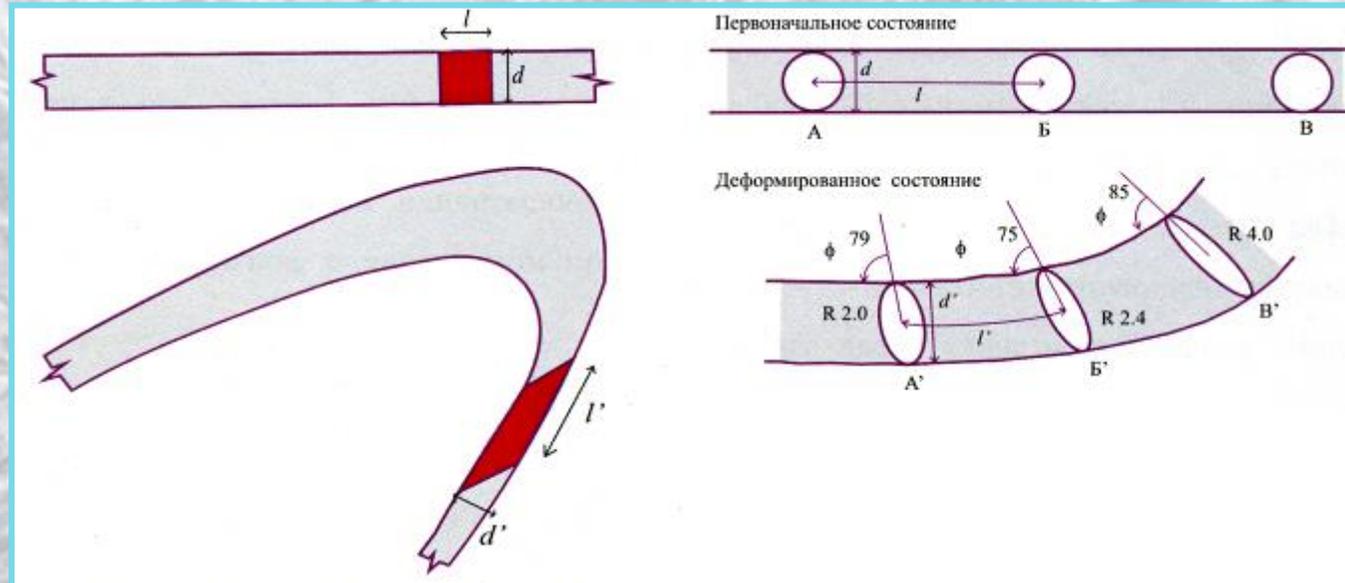
- Если слои испытали однородное укорочение, это выразилось в формировании внутрислойных деформационных структур и текстур. Такую составляющую общей деформации необходимо учитывать
- Общая деформация K (величина, показывающая, во сколько раз укоротились слои) равна произведению k' (отношение длины слоя к его проекции) и k'' (величина внутрислойной деформации, которая может быть установлена методами стрейн-анализа)

(По Ф.Л. Яковлеву с добавлениями)

Это только общий подход

Метод Рэмзи

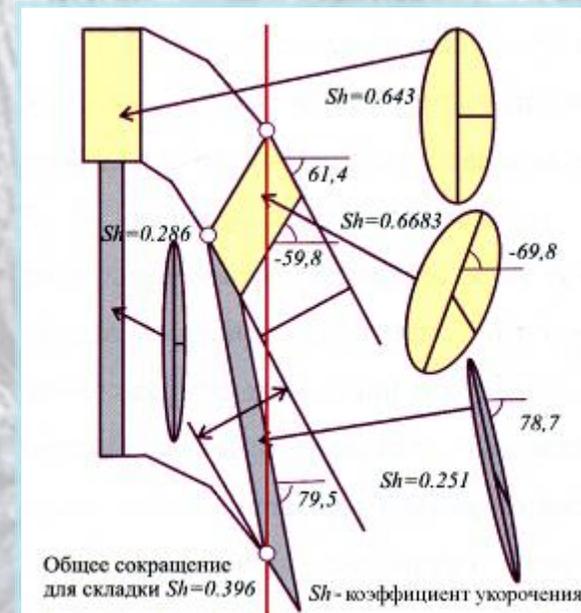
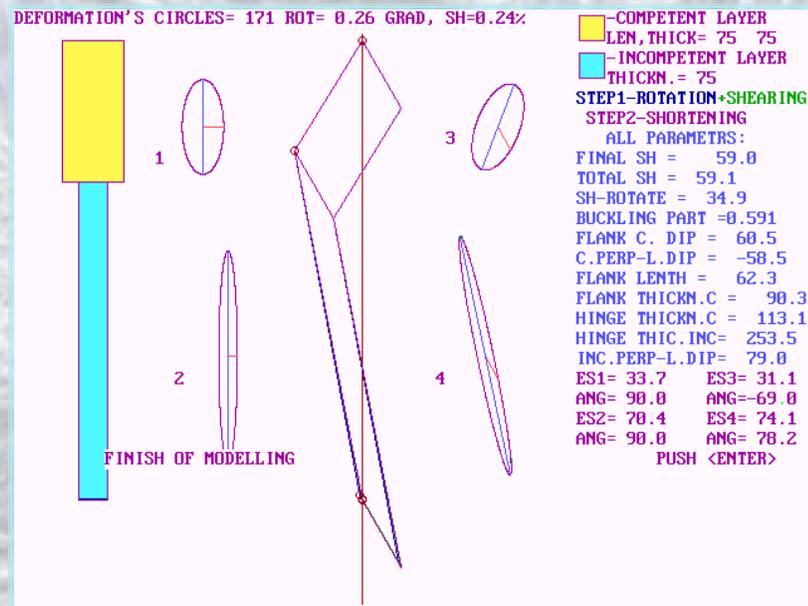
Используется поправочный коэффициент (F-фактор)



(рис. из В.Н. Войтенко, 2007)

- Один из способов, разработанный Дж. Рэмси, заключается в применении поправочного коэффициента. Его принцип заключается в следующем: длина слоя может быть вычислена как сумма произведений отрезков центральной линии слоя на поправочный коэффициент.
- Чтобы вычислить поправочный коэффициент, нужно измерить углы между слоистостью и длинной осью эллипсов деформации (ϕ) и рассчитать отношения длинной и короткой осей эллипсов (R)
- Существуют готовые палетки (Ramsay, Huber, 1987) со значениями ϕ и R , откуда можно снять значение поправочного коэффициента
- Этот способ можно использовать, если у нас есть данные стрейн-анализа (предполагается также постоянство объема и плоская деформация)

Кинематическая модель Ф.Л. Яковлева и ее использование для определения величины укорочения



В этой модели складчатые деформации осуществляются путем сочетания изгиба и сплющивания. В компьютерной модели выделялись домены. Изгиб=поворот доменов. Осуществлялись малые приращения поворота и сплющивания. Вычисления производились для разных отношений вязкости. При решении прямой задачи были получены складки с разным соотношением мощности слоев в замке и на крыле и с разным углом наклона крыльев.

- По результатам вычислений построена номограмма "угол наклона крыла складки — отношение мощности компетентного слоя на крыле к его мощности в замке", на которой нанесены изолинии величины укорочения

Измерив эти параметры в реальных складках, можно нанести их на диаграмму и получить величину укорочения K .

