

Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Тектонофизика

A hand is shown from the bottom, holding a glowing, semi-transparent globe of the Earth. The globe shows continents and oceans with a bright, ethereal light emanating from it. The background is a dark blue space filled with numerous white stars.

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



2

Лекция 1

Введение

Деформация

3

Фролова Наталья Сергеевна,
Ведущий научный сотрудник,
кандидат геолого-минералогических
наук n.s.frolova@mail.ru





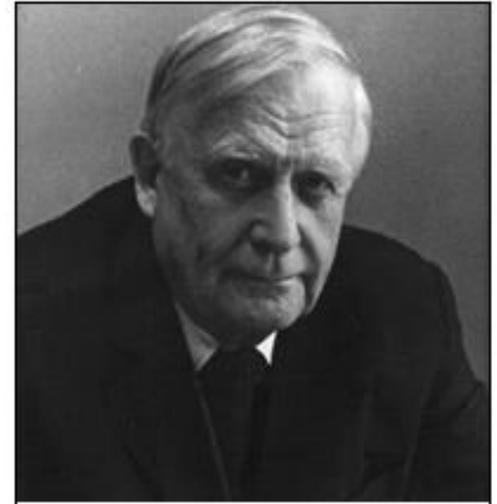
Лаборатория тектонофизики и геотектоники

Основана в 1953 г

[http://dynamo.geol.msu.ru/labs/
tectonophysics/Main-page.htm](http://dynamo.geol.msu.ru/labs/tectonophysics/Main-page.htm)



М.А. Гончаров (1933-2014)



В.В. Белоусов (1907-1990)



Тектонофизика. *Тектоника с применением физики.*

5

Википедия: **Тектонофизика** — раздел геофизики, изучающий физические основы деформации геологических тел в литосфере и динамические геологические процессы. Данный раздел охватывает изучение как отдельных минералов, так и тектонических плит и процессов (сил и напряжений), происходящих в коре и мантии Земли, геодинамическую обстановку и структурные парагенезы.

В физике много разделов

Первый из них – это механика.

Механика включает статику (равновесие сил), кинематику и динамику.

В тектонофизике тоже эти 3 раздела.

Статика – это современная структура земной коры.

Складки, разрывы и другие структурные формы – это **результат** некоторого процесса.

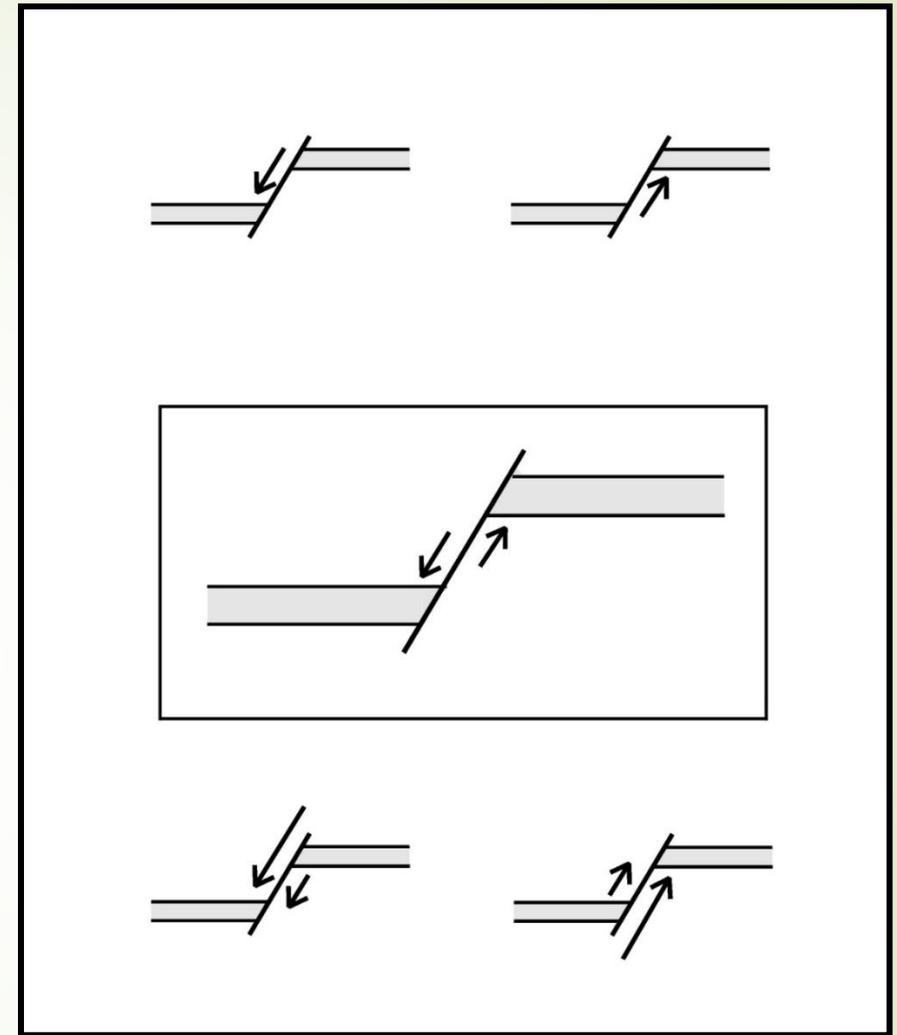
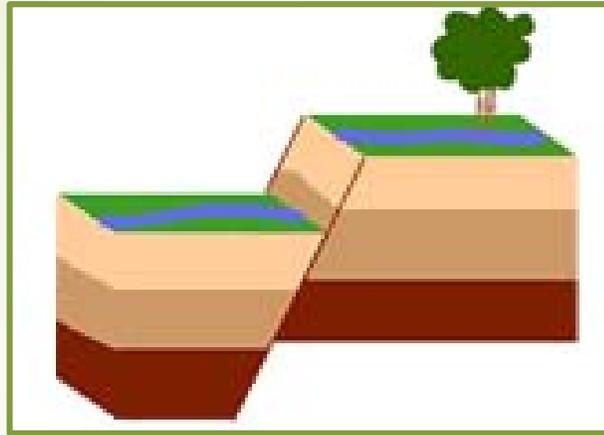
Следующий вопрос – что за **процесс**?
Какие **движения** произошли в земной коре, чтобы образовались складки и разрывы?

Вот это уже **кинематика**.



Фото Д.С. Зыкова

Сброс - статика



Кинематика

Горизонтальное сжатие?

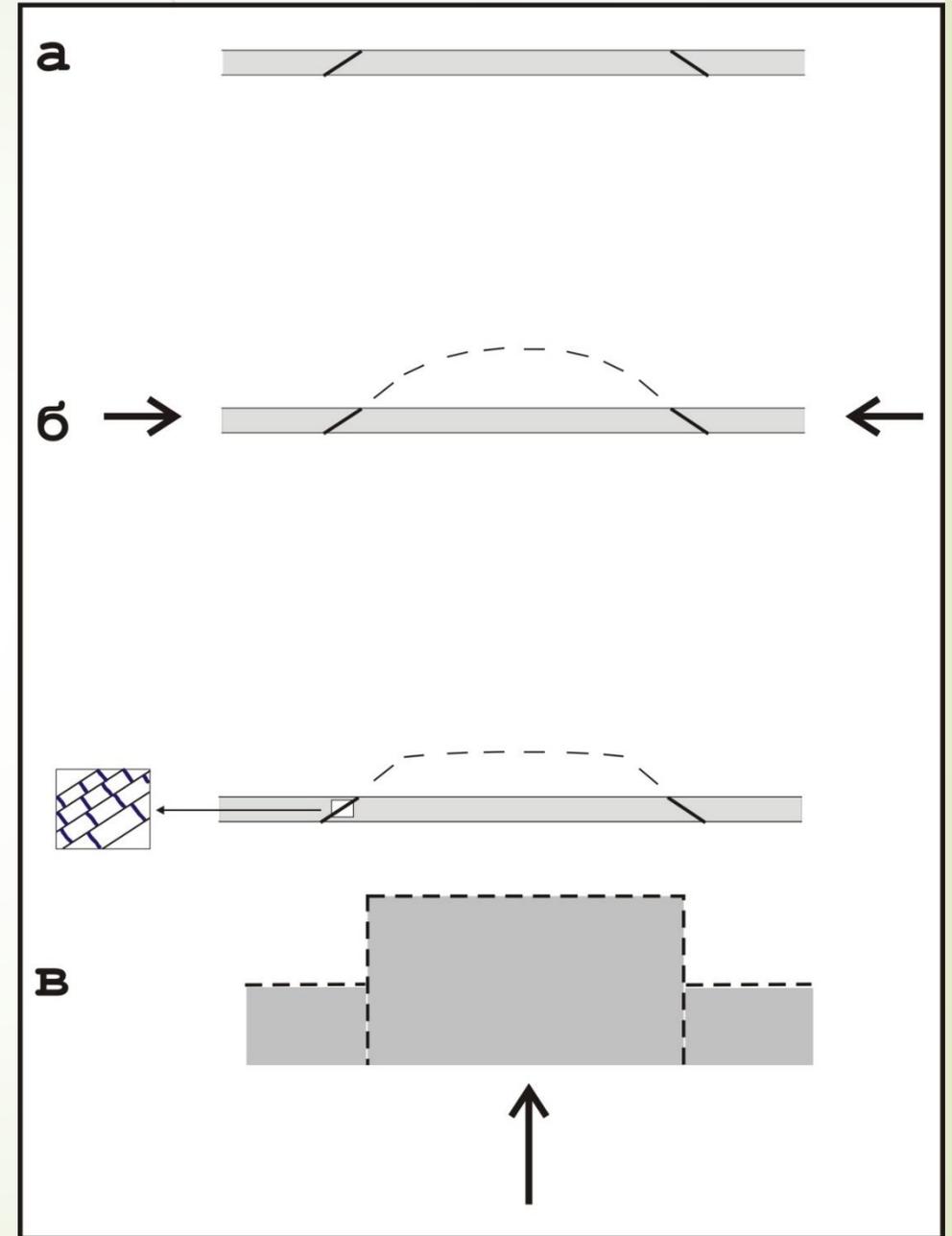
7



Интернет-ресурс

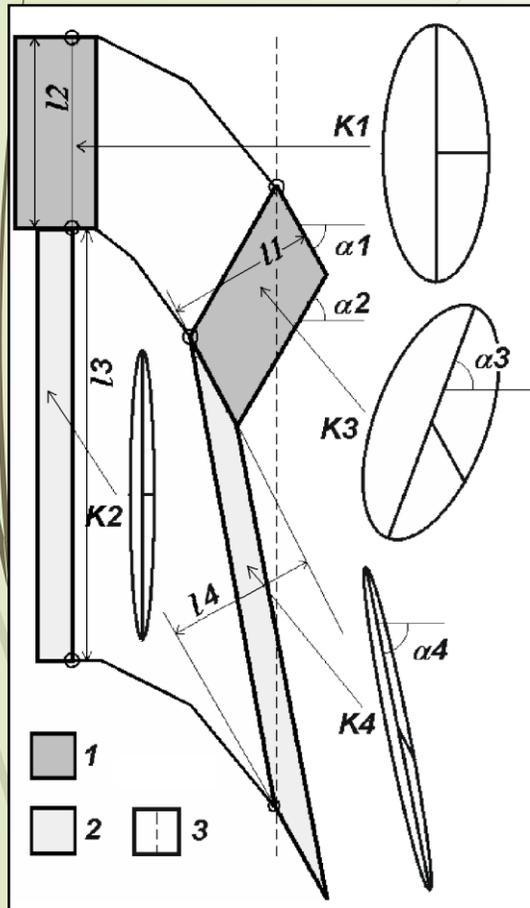
Подъем блока?

Итак, надо знать действующие силы.
Для начала – хотя бы их направление.
Это уже **динамика**.



Кинематика + динамика = механизм формирования.

8



(Яковлев, 1981)

Знание *механизма формирования структур* того или иного типа подразумевает, что известны характер воздействия на определенный массив горных пород, последовательность образования элементов структуры, их взаимные геометрические и динамические соотношения (по В.Г. Гутерману)

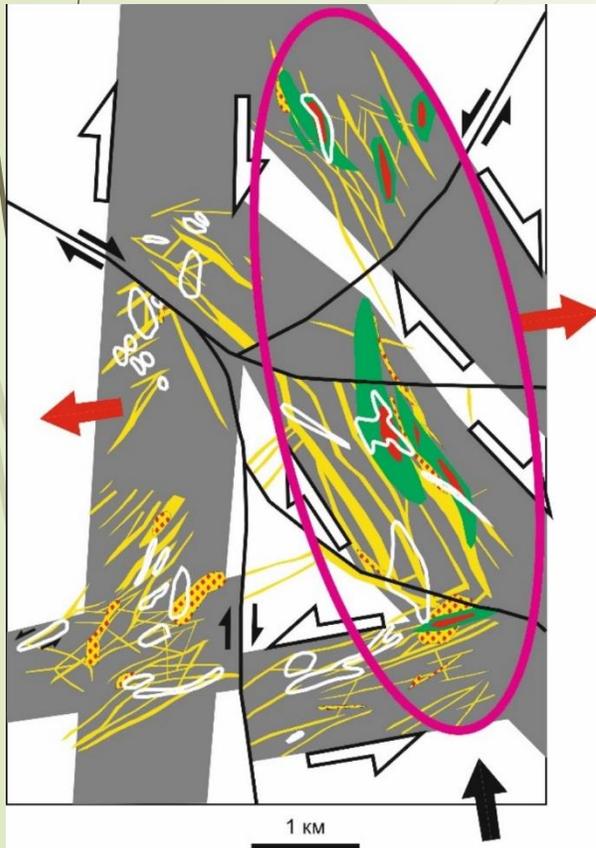
Замечание: физики обычно изучают **процесс**.

Геологи же – **результат** процесса, т.е. решается **обратная** задача. Это сильно усложняет исследование.

«Тектонофизика – учение о механизмах развития деформационных структурных элементов земной коры» (Гзовский, 1975)

Значение тектонофизики

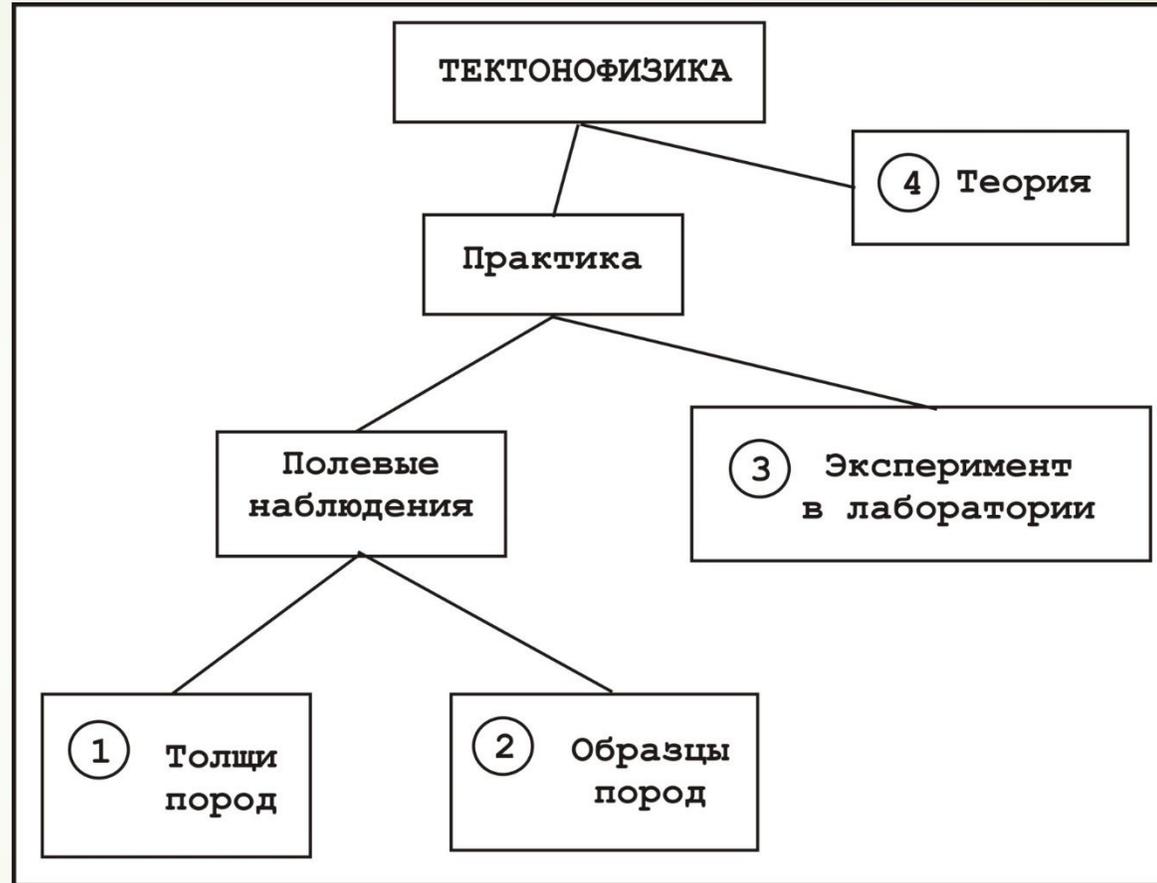
9



(Читалин и др., 2018)

- **Фундаментальное значение:** до сих пор недостаточно изучены конкретные физические механизмы формирования тектонических объектов. Это ведет к тому, что в настоящее время, как и почти на всех этапах развития геотектоники, сосуществуют различные, часто взаимоисключающие взгляды на причины и особенности геотектонических процессов.
- **Практическое значение :**
- Если на основании ограниченного числа полевых наблюдений установлен тип структуры с известным механизмом формирования, то тем самым установлены и основные закономерности ее строения, напряженного и деформированного состояния. Это знание не освобождает от необходимости геолого-геофизических исследований конкретных структур, но позволяет получить нужную информацию при меньших затратах труда и средств (Гутерман, 1987)
- На основании теоретических представлений тектонофизики вырабатываются методики или методы структурного анализа, который крайне необходим для целей прогноза локализации рудных тел и месторождений полезных ископаемых, в том числе путей миграции и ловушек нефти и газа.
- В последнее время лавинообразно нарастает количество данных, полученных в результате сейсморазведки. Их грамотная интерпретация невозможна без знания о механизмах образования тектонических структур, т.е. без тектонофизики.
- Знание о структурах, развивающихся в настоящее время, позволяет предсказывать размещение очагов землетрясений, или участков медленных, но существенных смещений, что необходимо учитывать при строительстве атомных и гидроэлектростанций, трубопроводов, тоннелей и других крупных сооружений.

Методы тектонофизики



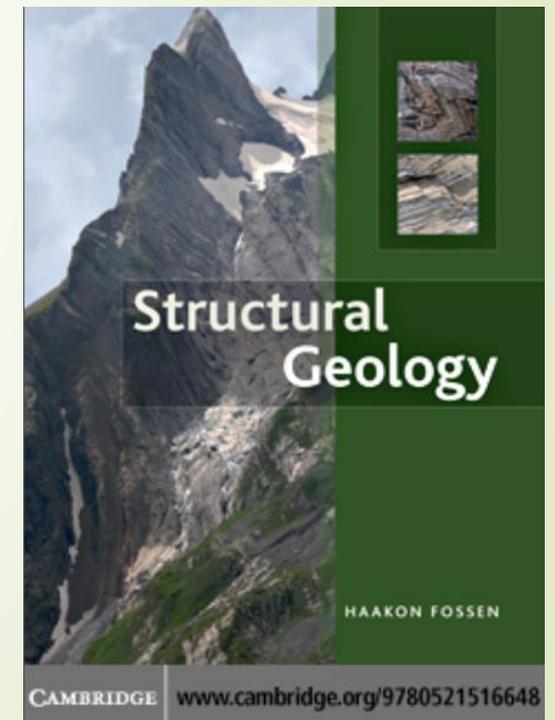
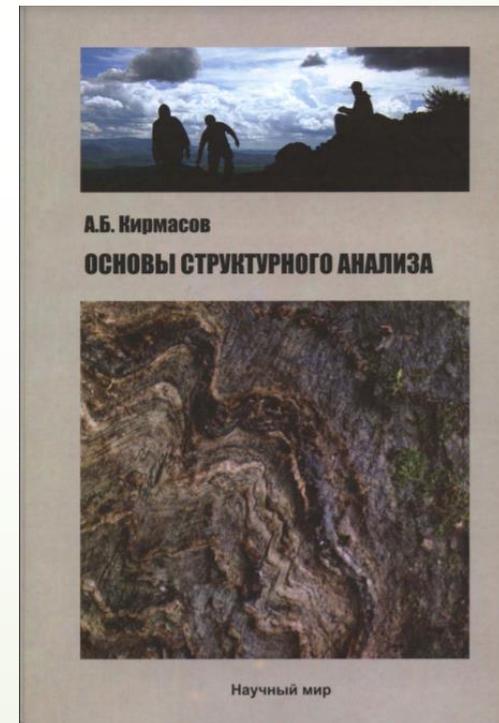
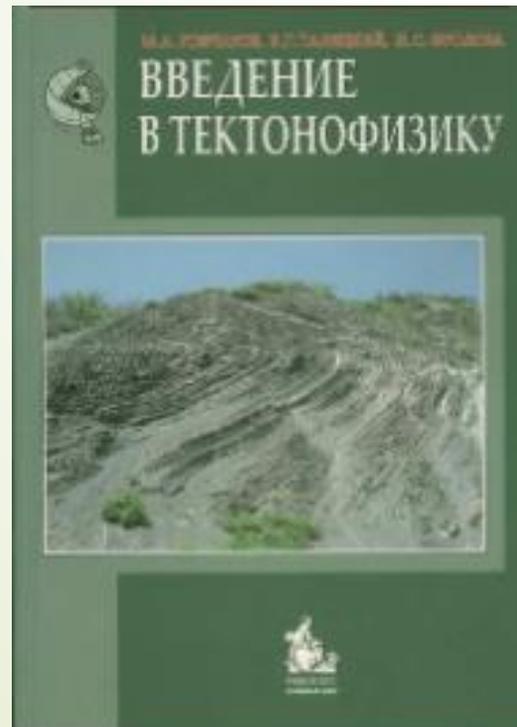
Теория: механика сплошной среды и механика среды со структурой

Отличие объектов изучения в физике и тектонофизике

Построение курса

- Лекции с решением задач
- Самостоятельная работа с заданиями
- Текущая проверка
- Зачет перед экзаменом
- Экзамен

Литература:





Часть 1.
Тектонофизика сплошной
(неструктурированной среды)

Раздел 1.
**ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ДЕФОРМАЦИИ
И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Представление о земной коре как механически неоднородной среде

Главное свойство геологической среды – это ее неоднородность. Земная кора состоит из тел разного ранга и «поведения». Например, это:

- фундамент и чехол;
- тектонические блоки и разделяющие их зоны разломов;
- толщи разного состава и строения;
- слои разного состава;
- породы, состоящие из разных минералов;
- дефекты в кристаллических решетках минералов.

В физике хорошо разработана лишь механика сплошной среды, однородной и изотропной. Эту механику лишь ограниченно можно приложить к тектонофизике.

От чего зависит результат деформации?

Тип напряженного состояния и свойства среды: характер неоднородности и поведение (деформационные свойства)

На **деформационные свойства** геологической среды влияет множество факторов:

длительность процесса;
литостатическое давление;
температура;
давление флюида и т.д.

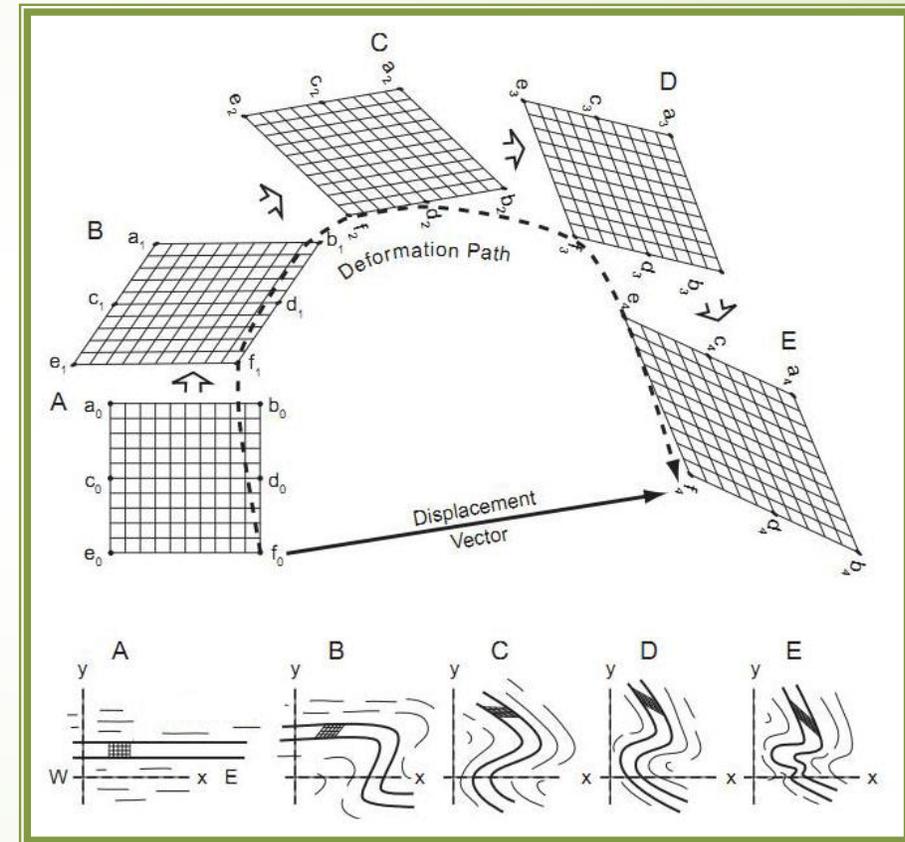
Деформация

(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*).

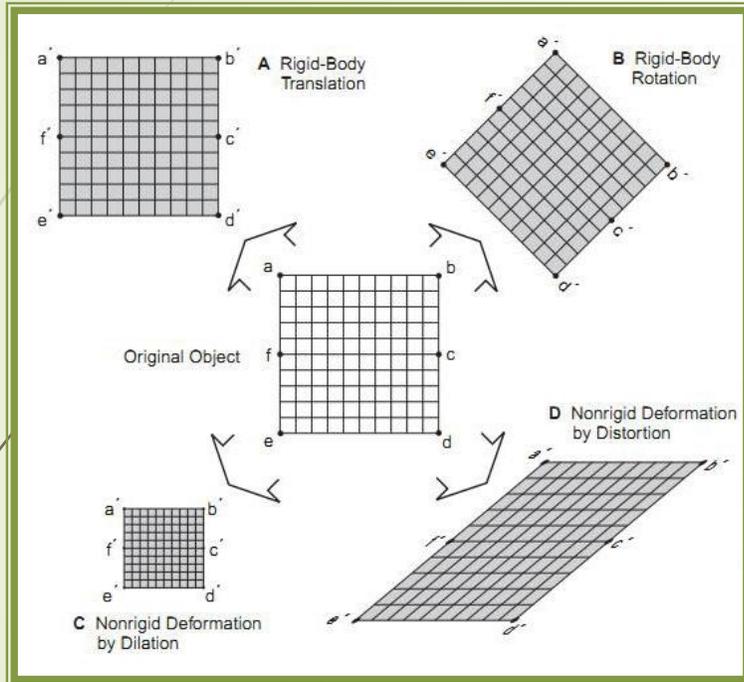
В горных породах можно идентифицировать собственно деформацию, или *strain*. Таким образом, следует различать деформацию в широком смысле (*deformation*) и в узком (*strain*).



(Davis, 2012)

Измерение деформации (в широком смысле слова)

15



(Davis, 2012)

ДИСТОРСИЯ механическая - изменение взаимного расположения материальных точек среды (тела), вызванное внеш. воздействием или внутренними силами
ДИЛАТАЦИЯ изменение объема тела

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

Деформацией тела называется изменение его формы и (или) объема, происходящее под воздействием приложенных к телу внешних сил

Деформации бывают малые и большие, однородные и неоднородные.

Тектоническим деформациям свойственна неоднородность. Это объясняется тем, что даже в однородной среде неоднородная деформация энергетически «выгоднее», чем однородная. К тому же тектонические деформации происходят, как правило, в неоднородной среде. Однако в ней можно выделить элементарные объемы, в которых деформация квазиоднородна.



(Davis, 2012)

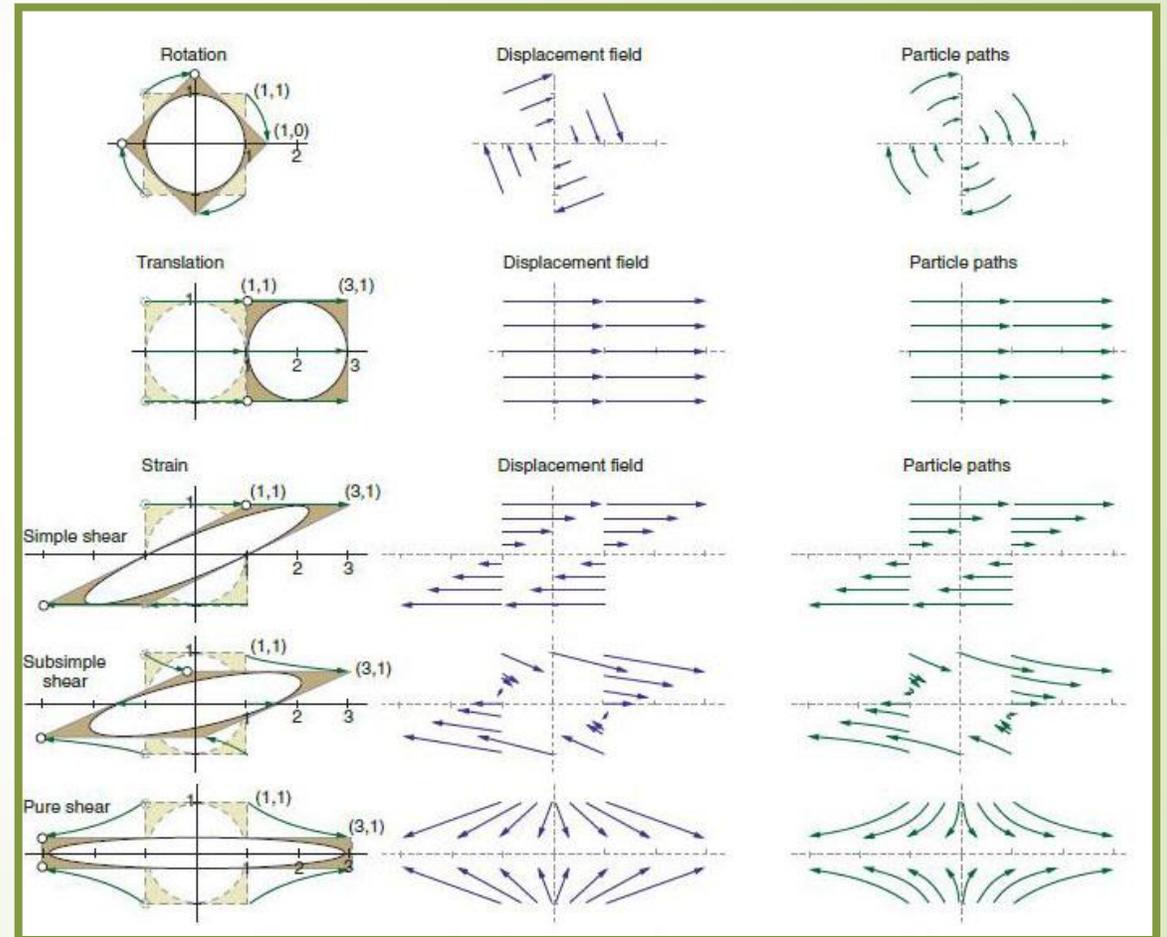
Понятие о плоской, или двумерной, деформации

17

Виды плоской однородной деформации: удлинение-укорочение (чистый сдвиг).
Простой сдвиг

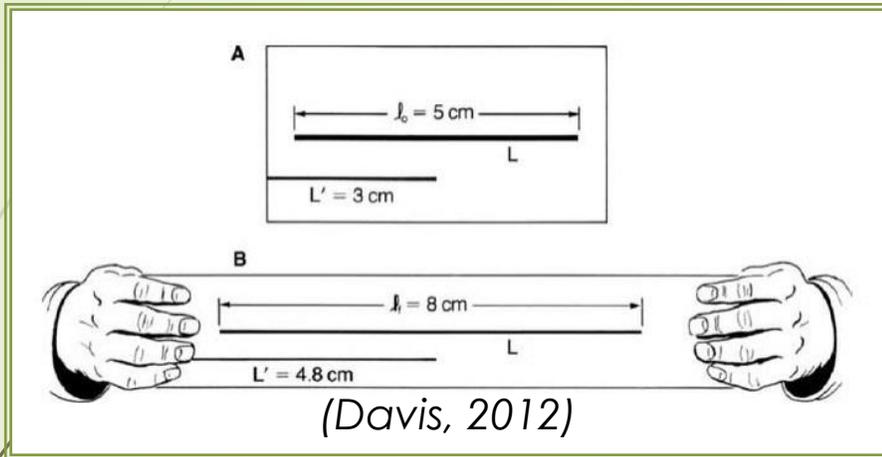
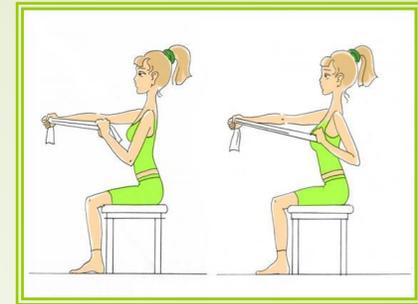
Поле перемещений и путь материальных частиц для жесткого перемещения, вращения и сдвига.
Показаны разные типы деформации

только **плоскую деформацию удлинения-укорочения можно называть чистым сдвигом*



(Fossen, 2010)

Размерность и единицы измерения деформации



Увеличение длины принято обозначать положительным числом процентов, а уменьшение длины - отрицательным

Посчитайте, пожалуйста, величину деформации верхнего отрезка на рисунке (отрезок длиной 5 см увеличил длину до 8 см)

«Процентная» мера.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Например, если $\Delta l/l_0 = 0,3$, то это 30%.

На **сколько процентов** удлинение.

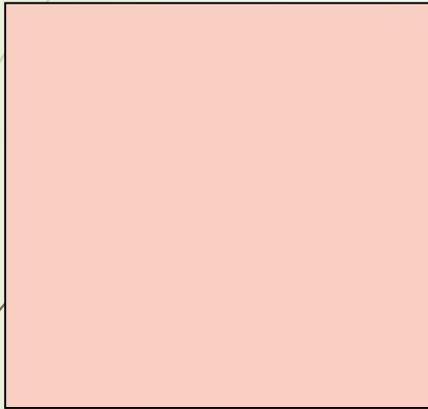
«Кратная» мера.

$$k = \frac{l}{l_0}$$

Например, $l/l_0 = k = 1,3$.

Во **сколько раз** удлинение.

Выведите зависимость между k_1 и k_3



Рассмотрите квадрат со стороной, равной 1.

Найдите его площадь.

При деформации укорочения-удлинения квадрат превратится в прямоугольник.

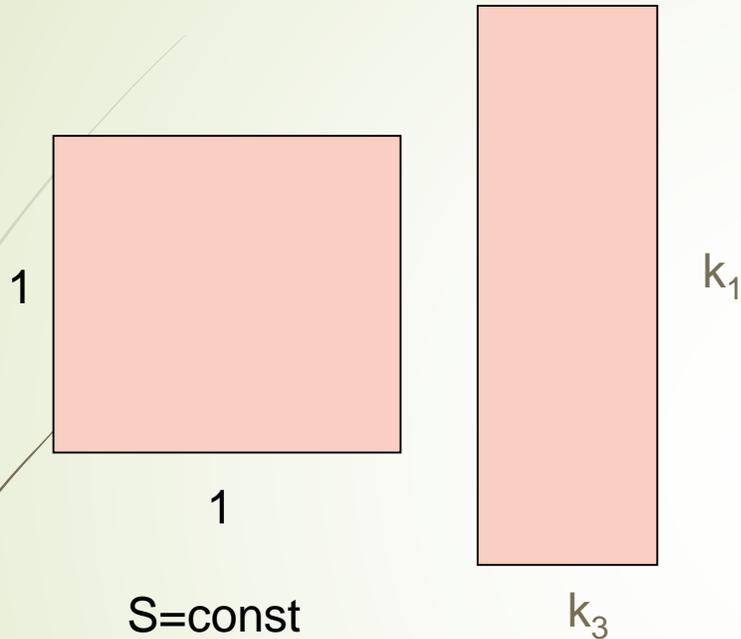
Чему будут равны его стороны после деформации?

Какова его площадь?

Примите во внимание, что площадь фигур сохраняется.

Удлинение обозначают символом k_1 , а укорочение символом k_3

Зависимость между k_1 и k_3



$$k_1 \cdot k_3 = 1$$

$$k_3 = 1 / k_1$$

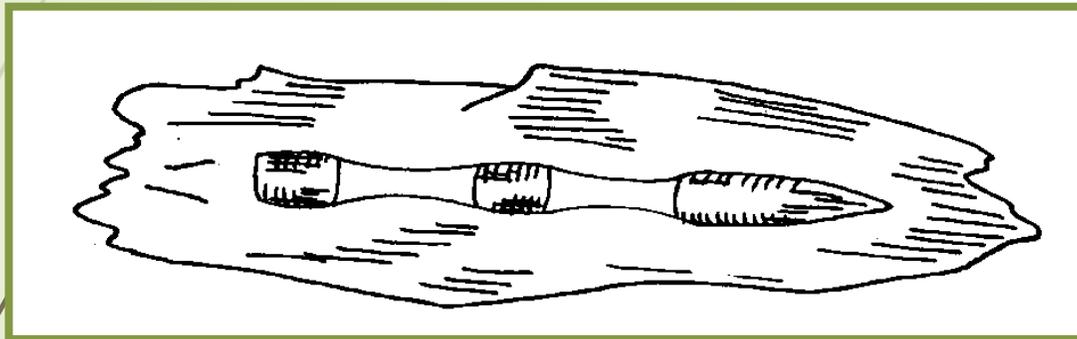
Например, если тело удлинилось в полтора раза ($k_1 = 1,5$),
то оно укоротилось тоже в полтора раза ($k_3 = 0,67$)

Если индекс не указан, то по умолчанию подразумевается коэффициент удлинения

Задача 1.



- ▶ Определить величину относительного удлинения по растянутому белемниту (в «кратной» и процентной мере).



Воспользоваться определением удлинения

Обратите внимание, насколько отличаются k и ϵ

Задача 1а. Вывести зависимость между k и ϵ

Чтобы вывести эту зависимость, надо воспользоваться определением удлинения в «кратной» и «процентной» мере

Зависимость между k и ε

«Процентная» мера.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = k - 1 \qquad k = \varepsilon + 1 .$$

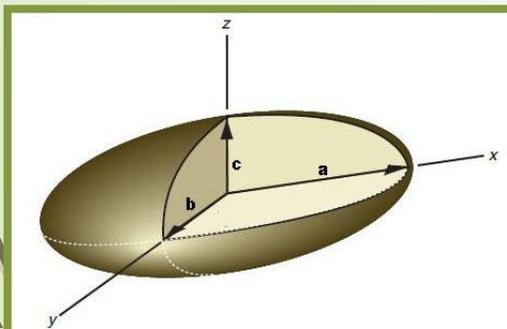
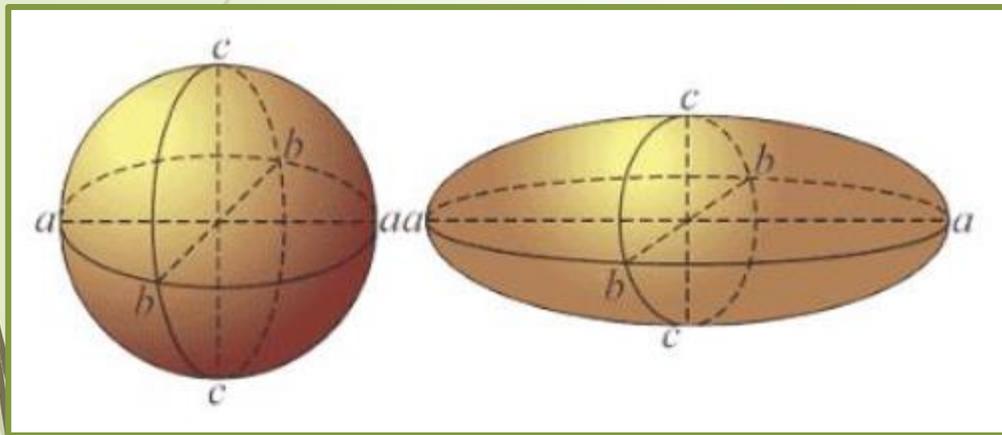
«Кратная» мера.

$$k = \frac{l}{l_0}$$

*k без индекса по умолчанию -
коэффициент удлинения*

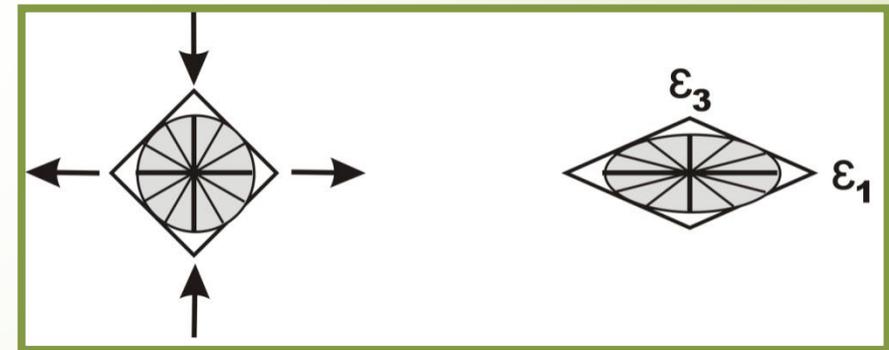
Главные оси деформации. Эллипс и эллипсоид деформации

Трехмерная деформация. Представим себе недеформированное тело в виде шара. При деформации шар превратится в трехосный эллипсоид. Представление об эллипсоиде деформаций введено Г. Беккером в 1893 г.



Плоская деформация. Впишем в квадрат круг. Он превратится при деформации в эллипс

Длинная и короткая оси эллипса – **главные** оси деформации, в направлении которых происходят **максимальное** удлинение и **максимальное** укорочение. А все другие материальные так называемые «волокна» – диаметры круга – изменяются в промежуточной степени.



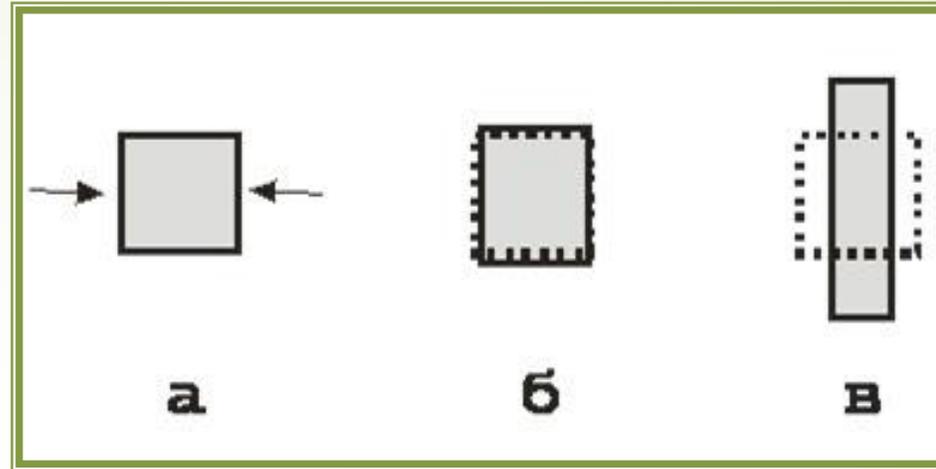
О знаках.

Удлинение считается положительной деформацией (+), а укорочение – отрицательной (-).

Но тогда можно написать: $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$; $\varepsilon_1 > 0$; $\varepsilon_3 < 0$

Малые и большие деформации

24



В случае **малой** деформации:

$$S = (1 - \alpha) \times (1 + \beta) = 1 - \alpha + \beta - \alpha \beta = S_0 = 1,$$

где α и β – **бесконечно малые** величины удлинения по вертикали и укорочения по горизонтали.

Поэтому их произведение является бесконечно малой величиной более высокого порядка, и им можно пренебречь.

В результате получаем:

$\alpha = -\beta$. Теперь применим последовательно «процентную» и «кратную» меры деформации:

1. В случае малой деформации:

а) Удлинение на 1% соответствует укорочению тоже на 1%. Деформация выражается **одним** числом. Это **удобно**.

б) Удлинение в 1,01 раза соответствует укорочению в 0,99 раза.

Деформацию приходится выражать **двумя** числами. Это **неудобно**.

2. В случае большой деформации:

а) Удлинение в 2 раза соответствует укорочению тоже в 2 раза. Одно число, **удобно**.

б) +100% и –50%. **Два** числа, **неудобно**.

Задача 2. Слой испытал удлинение вдоль слоистости в 1,2 раза. Найти его удлинение в процентной мере

Задача 3. Белемнит в результате деформации удлинился на 50%. Какова его деформация в кратной мере?

*Воспользуемся выведенными нами зависимостями
 $\varepsilon = k - 1$ и $k = \varepsilon + 1$*



Однородные и неоднородные деформации геологических тел

26

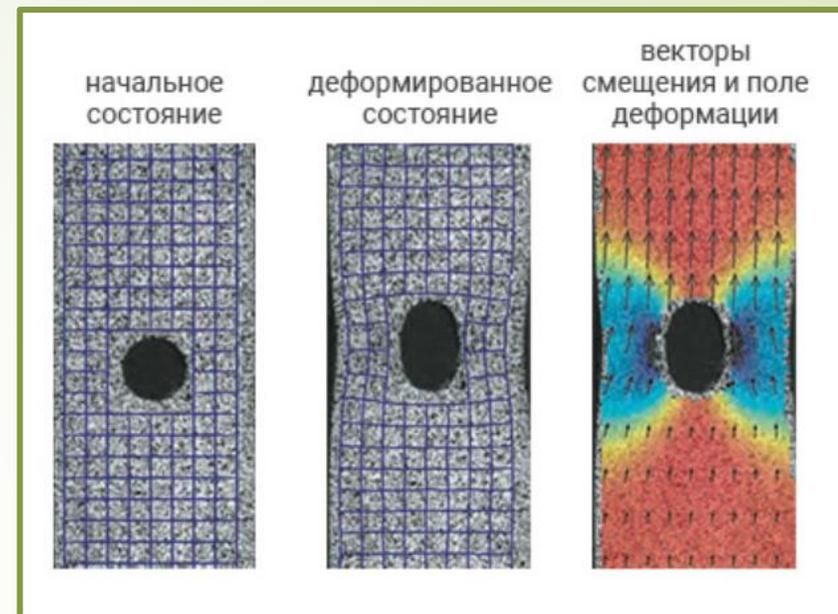
Деформация **элементарного** объема.

Понятие о **поле** деформаций.

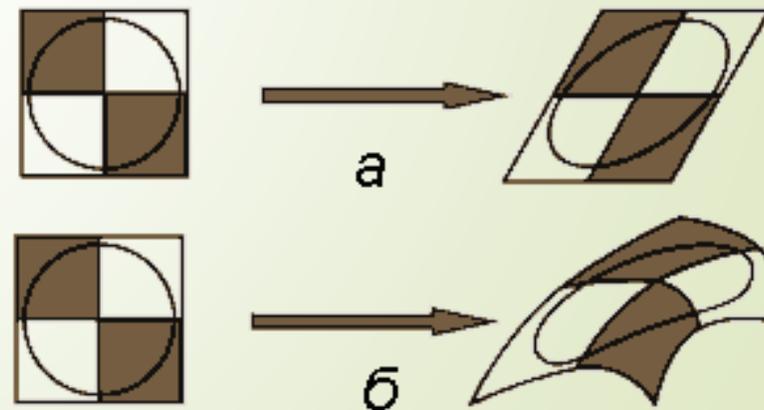
Различаются **однородные** и **неоднородные** поля деформаций, или более просто и привычно, но не вполне точно, однородные и неоднородные деформации.

В случае однородной деформации прямые линии или плоскости остаются прямыми, а параллельные сохраняют свою параллельность.

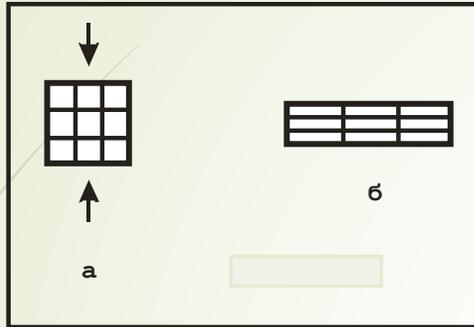
Нельзя говорить об однородности или неоднородности деформации **вообще**.
Надо всегда ставить вопрос: о каком **конкретном** объеме идет речь
и каковы те **элементарные** объемы, которые его слагают и по которым мы судим
об однородности деформации.



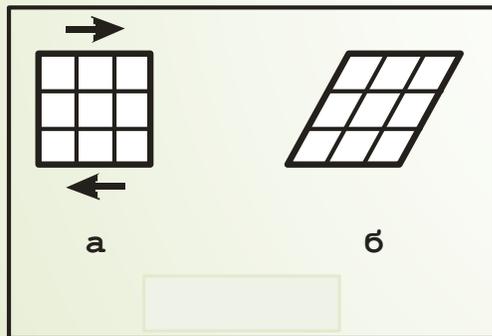
<https://www.cameraliq.ru/faq/beskontaktnoe-izmerenie-deformacii-metodom-DIC/>



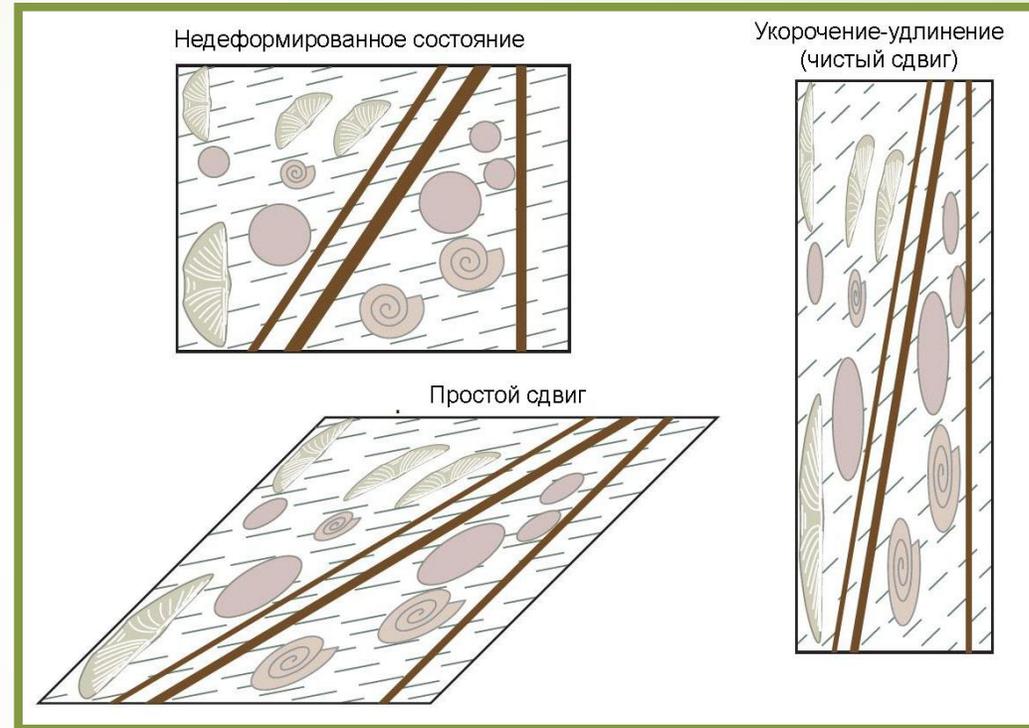
Однородные деформации



Удлинение-укорочение
(чистый сдвиг)

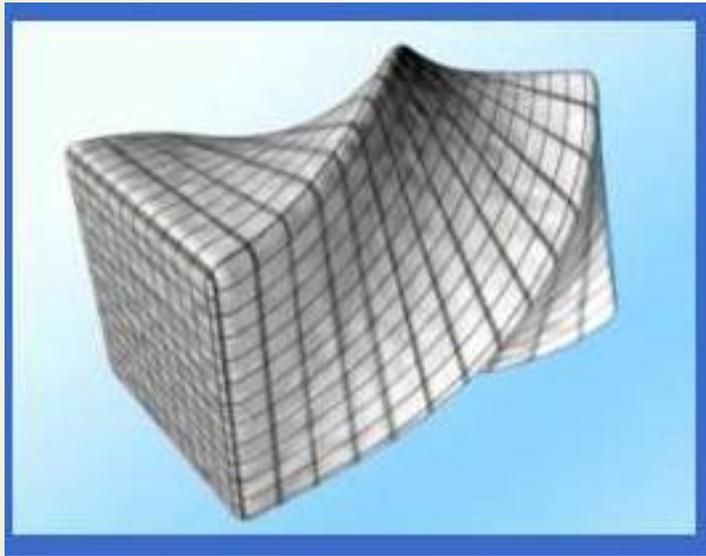


Простой сдвиг

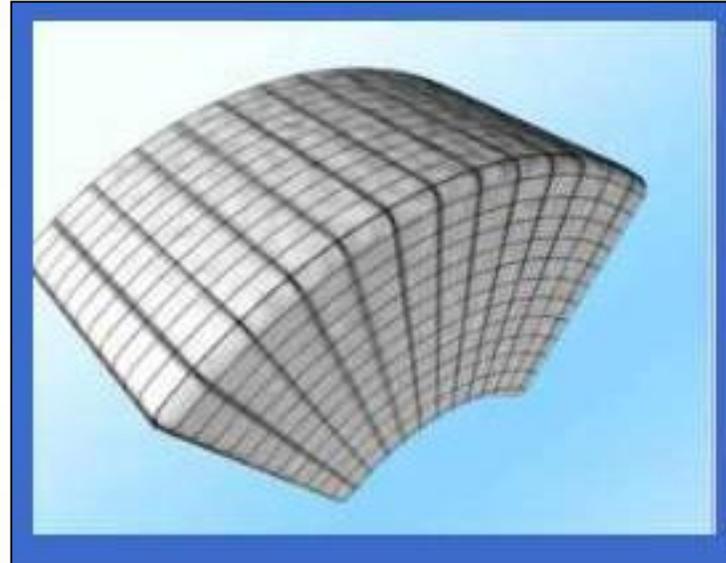


Однородная деформация в некотором объеме
горной породы с окаменелостями и дайкой
(Fossen, 2010)

Неоднородные деформации



кручение



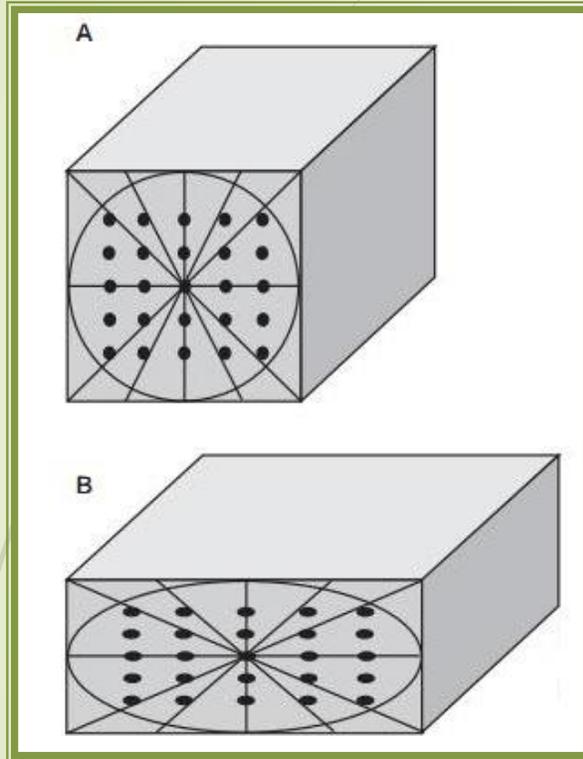
изгиб

Скорость деформации, ее размерность и единицы измерения

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Единица измерения: с^{-1} .

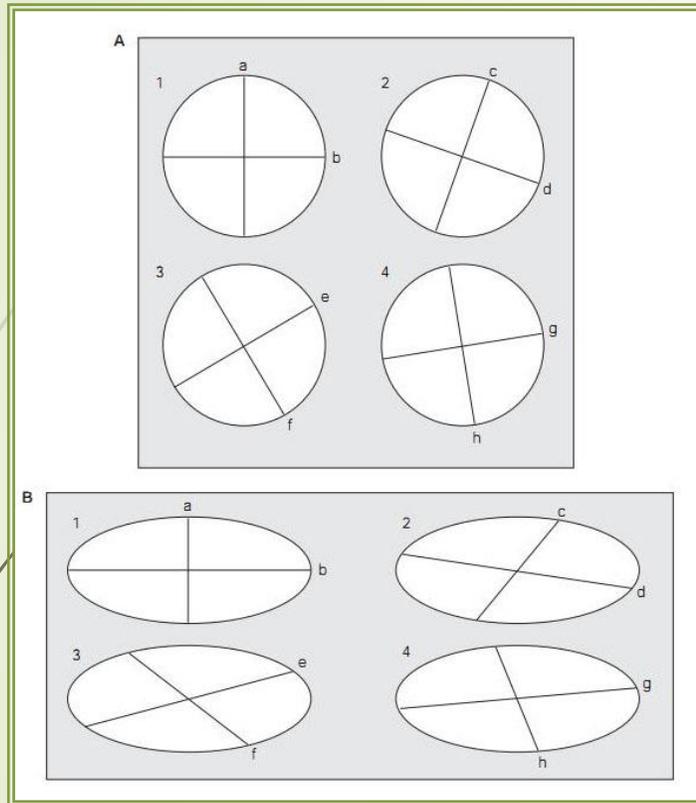
Деформация укорочения-удлинения



(Fossen, 2010)

В самом названии этой деформации содержится представление о том, что происходит с телом, испытывающим такую деформацию. Добавим, что:

- Деформация укорочения-удлинения – это однородная деформация, в результате которой куб превращается в параллелепипед.
- В случае плоской деформации квадрат превращается в прямоугольник (когда оси деформации параллельны сторонам квадрата) или в ромб (когда оси деформации параллельны диагоналям квадрата). При этом не меняется объем деформируемого тела. Такая деформация называется **чистым сдвигом**.
- Оси напряжений и деформаций всегда совпадают, т. е. это деформация — **соосная**.
- В результате деформации укорочения-удлинения меняется длина всех отрезков, а также их ориентировка (не меняют своей ориентировки только отрезки, параллельные главным осям деформации), расстояние между параллельными прямыми.



(Fossen, 2010)

Плоская деформация укорочения - удлинения (чистый сдвиг)

Круг превращается в эллипс.

Подчеркнем, что оси напряжений и деформаций всегда совпадают, т. е. это деформация — *соосная*.

Обратите внимание на вращение отрезков внутри тела. Это вращение так и называется - *внутренним*

Еще одна задача напоследок



Задача 4

- Тело в результате плоской деформации без изменения объема укоротилось на 25%. Насколько оно удлинилось (в процентах)?

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Примечание: если рассматривать укорочение, то конечная длина станет меньше начальной, поэтому ε будет отрицательным

Деформация, однако...

33

