

Геологический факультет МГУ
Кафедра динамической геологии
Лаборатория тектонофизики и геотектоники



Экспериментальная ТЕКТОНИКА

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

Лекция 3

- Способы регистрации и обработки результатов экспериментов
- Моделирование складчатых, складчато-покровных структур разного ранга

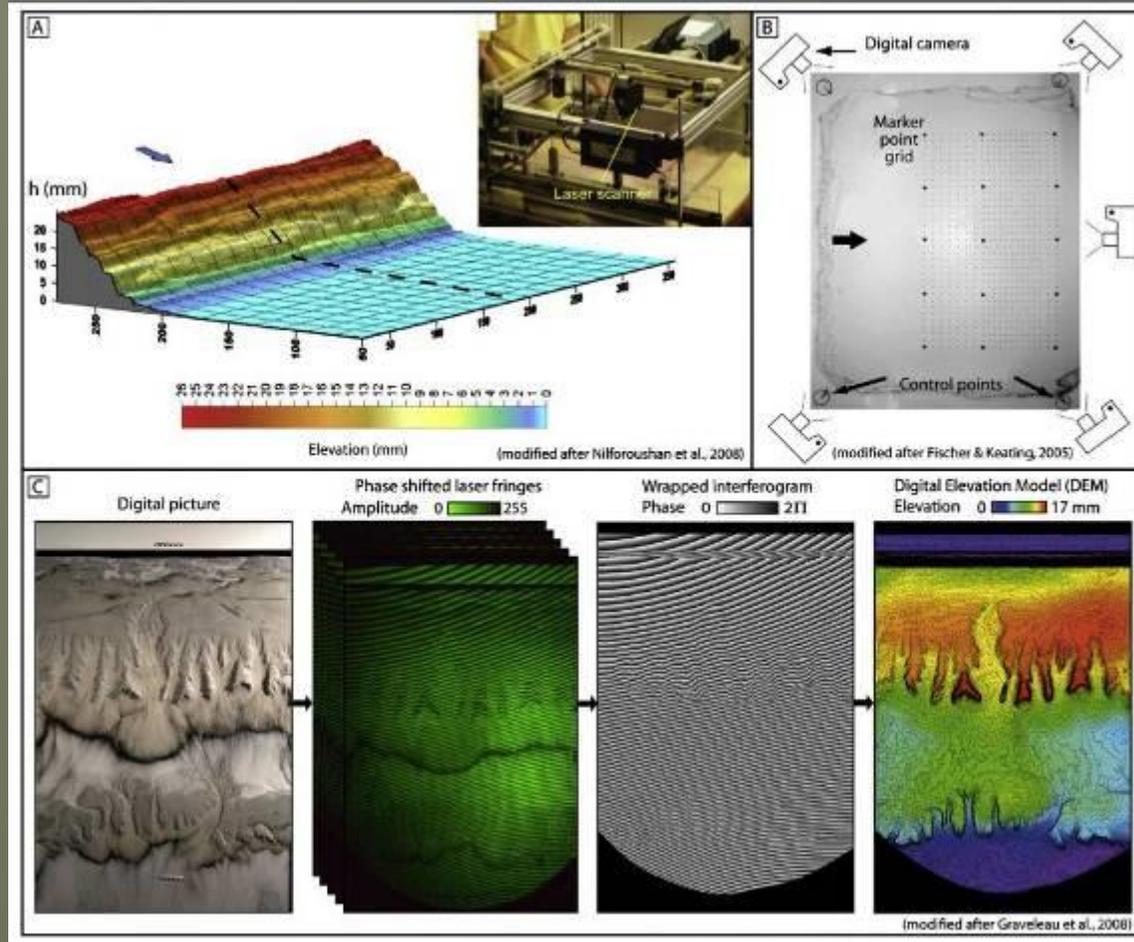
Способы регистрации и обработки результатов экспериментов

- Констатация исходного состояния образца
 - Часто используется нанесение окружностей и сеток
- Наблюдение за развитием деформаций в образце
 - непосредственное наблюдение за непрерывным процессом
 - остановка опыта на отдельных стадиях процесса деформации
- Регистрация результатов эксперимента

Для регистрации результатов используется стандартная цифровая фото и видео аппаратура для получения двумерных изображений. Прогрессивным моментом в этом плане является получение трехмерных изображений моделей с помощью сканеров. Техническим новшеством представляется использование большого медицинского X-лучевого сканера для получения объемных изображений внутренней структуры многослойных моделей, имеющих в своем составе слои со специальным контрастным веществом.



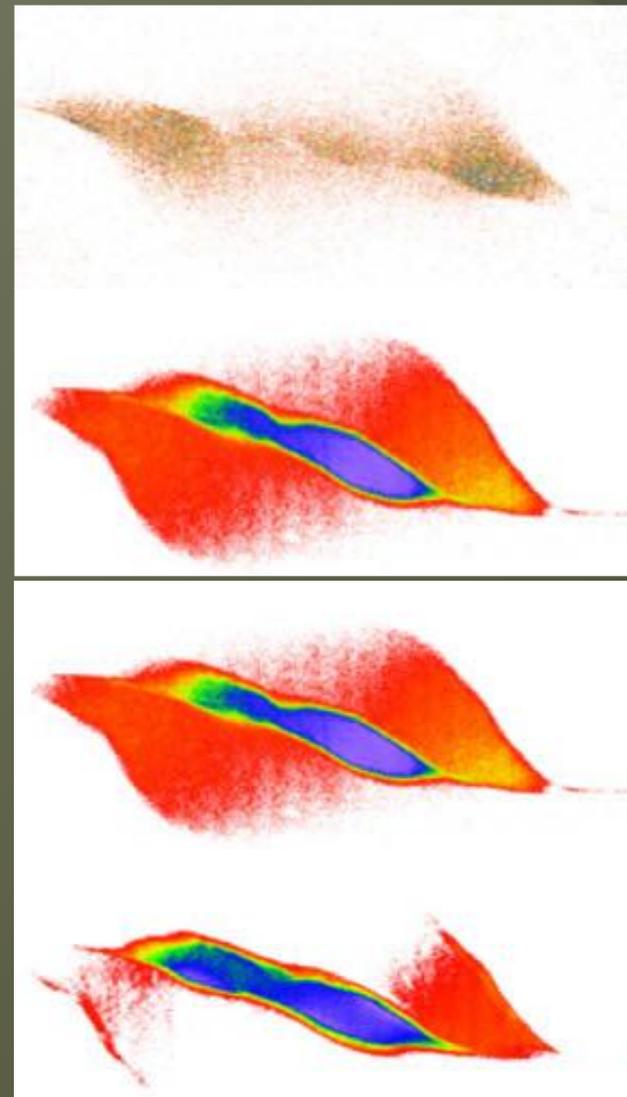
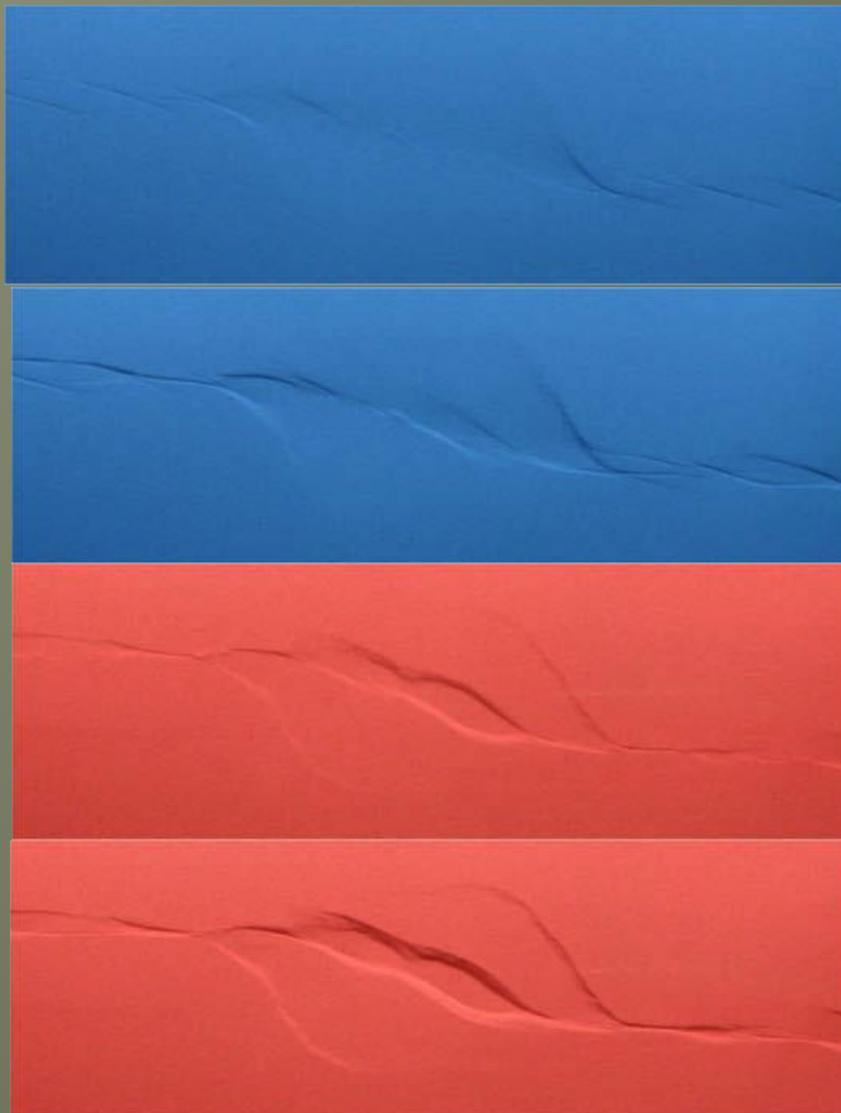
Примеры регистрации результатов Изучение рельефа моделей



(Graveleau et al., 2012)

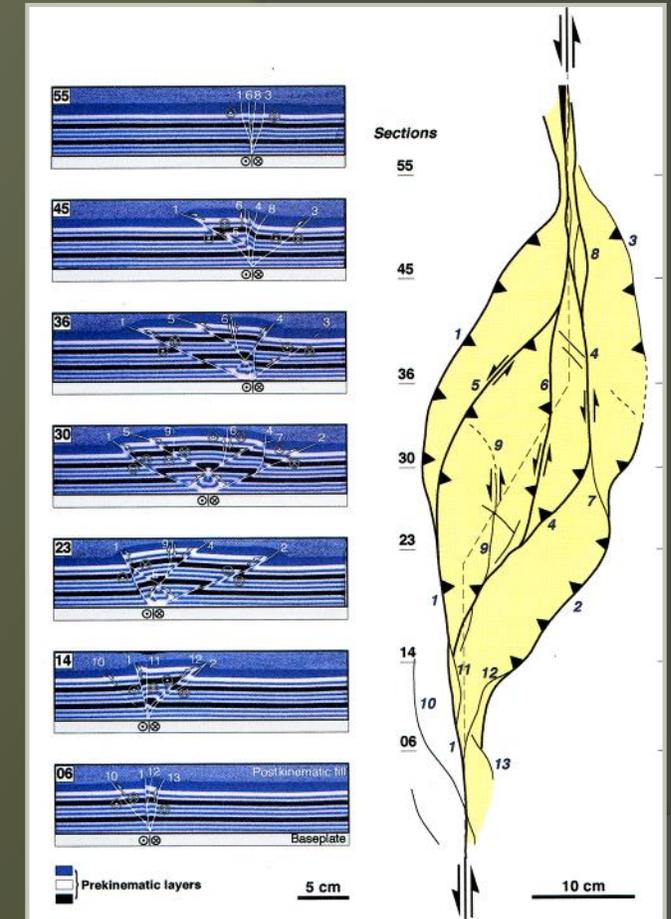
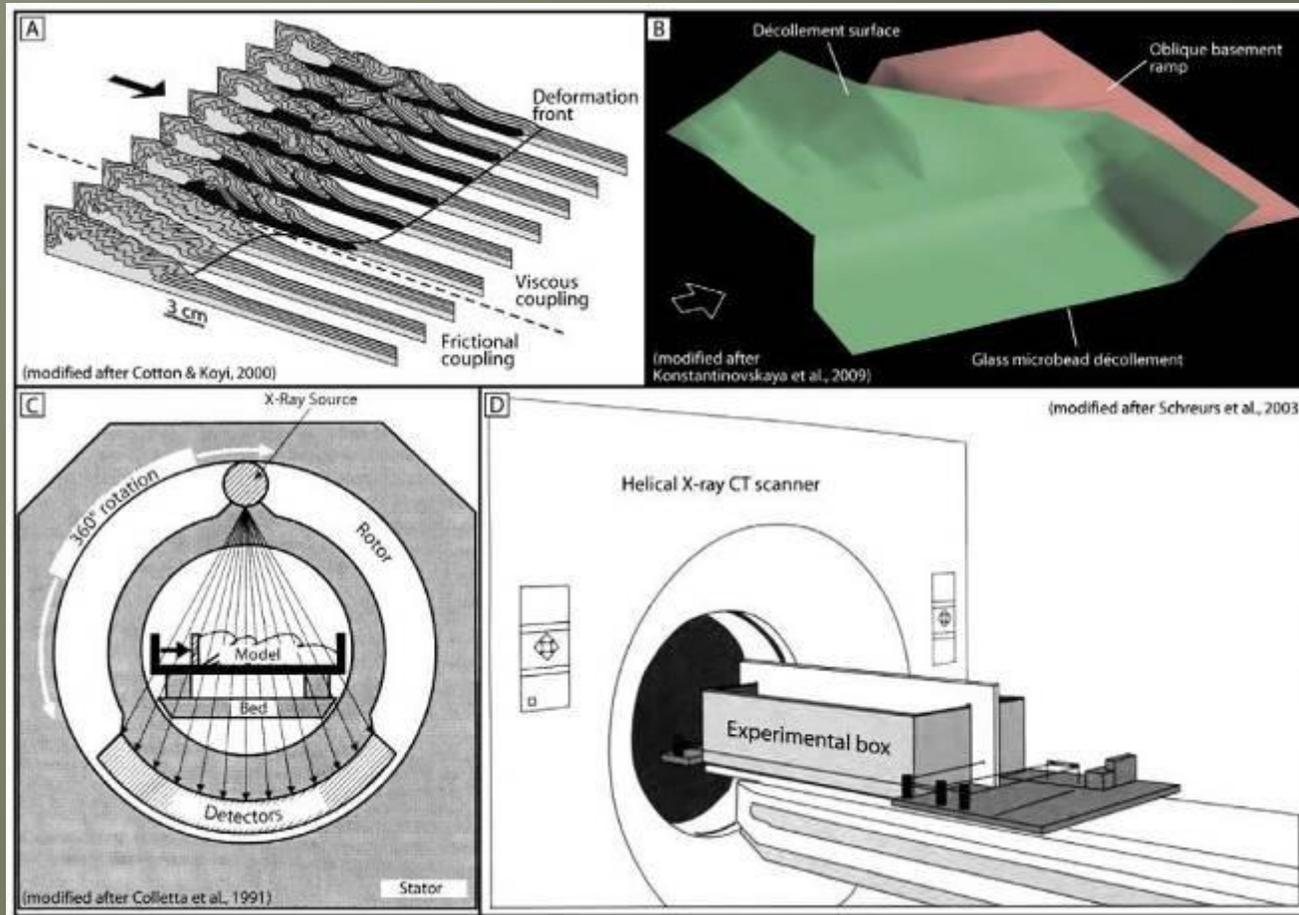
А – лазерное сканирование, Б – стереофотограмметрия, С – лазерный интерферометр

Моделирование транстенсии (пул-аппарт бассейна) с лазерным сканированием рельефа



4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins Jonathan E. Wu ^{a,*}, Ken McClay ^a, Paul Whitehouse ^{a,1},
Tim Dooley ^b ^a Fault Dynamics Research Group, Department of Earth Sciences, Royal Holloway University of London,
Egham, Surrey, TW20 OEX, UK

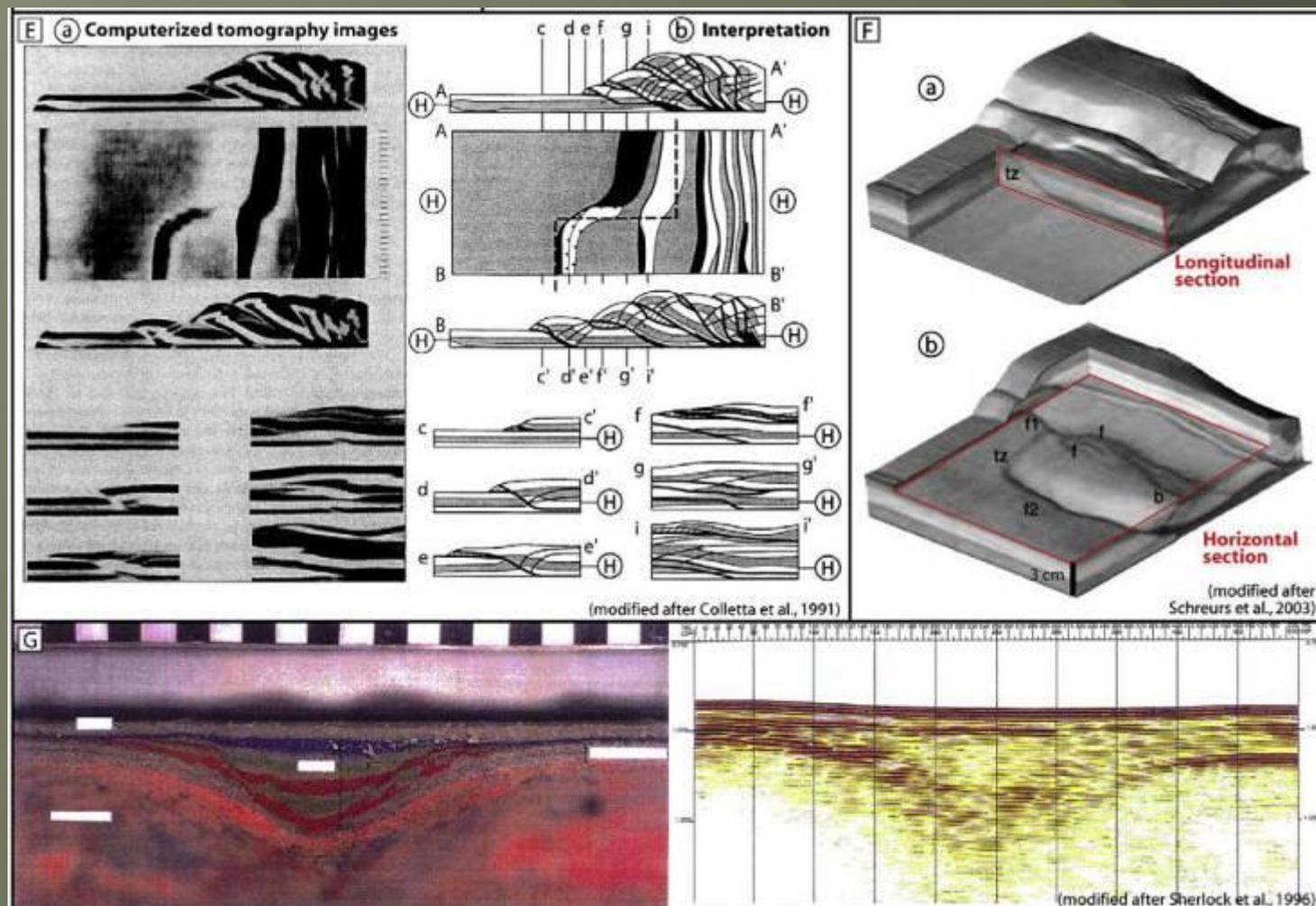
Примеры регистрации результатов Изучение внутренней структуры моделей



А - серия разрезов, В – оцифровка и обработка, С – X-лучевой (рентгеновский) компьютерный томограф, D – спиральный рентгеновский компьютерный томограф (продолжение на следующем слайде)

(McClay & Vongra, 2001)

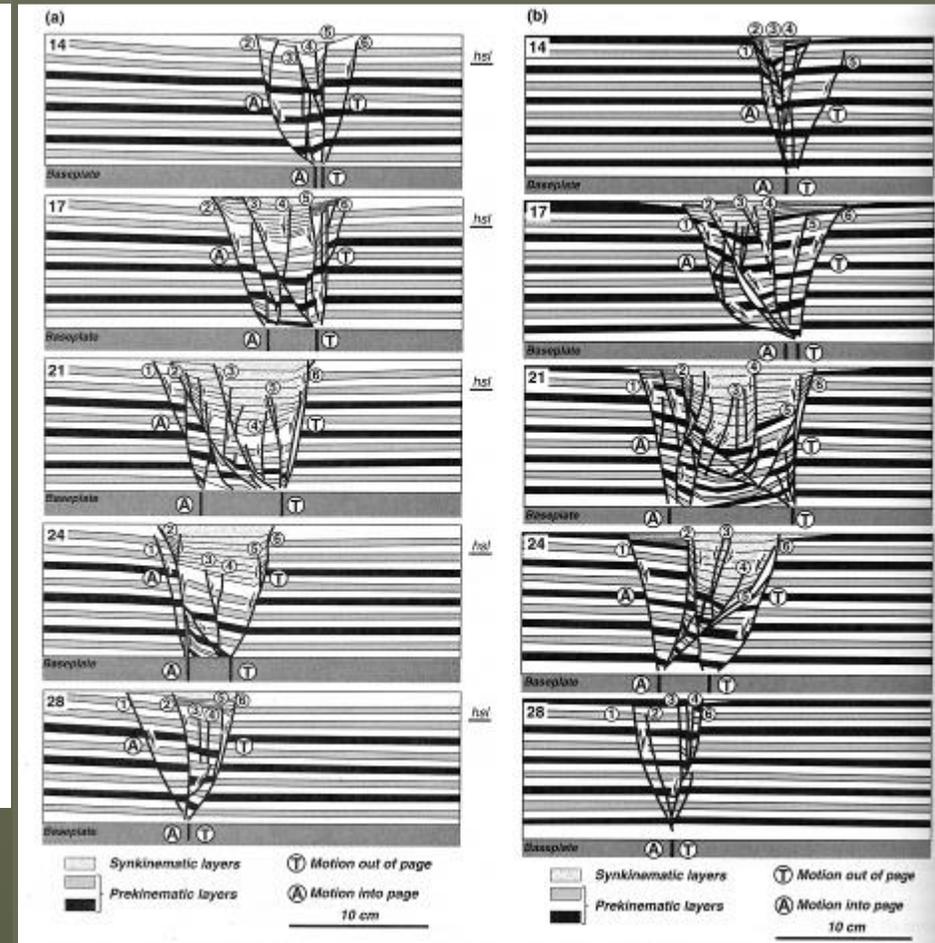
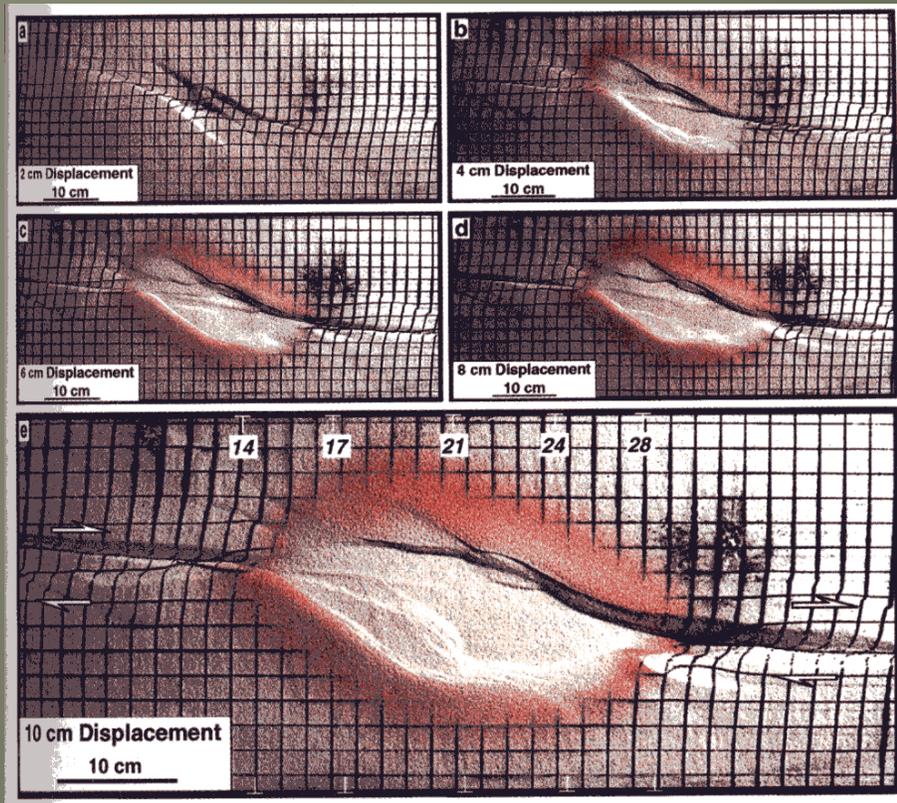
(Graveleau et al., 2012)



Е – полученные картинки и их интерпретация, F - 4D обзор эволюции модели,
 G – метод отраженных сейсмических волн

(Graveleau et al., 2012)

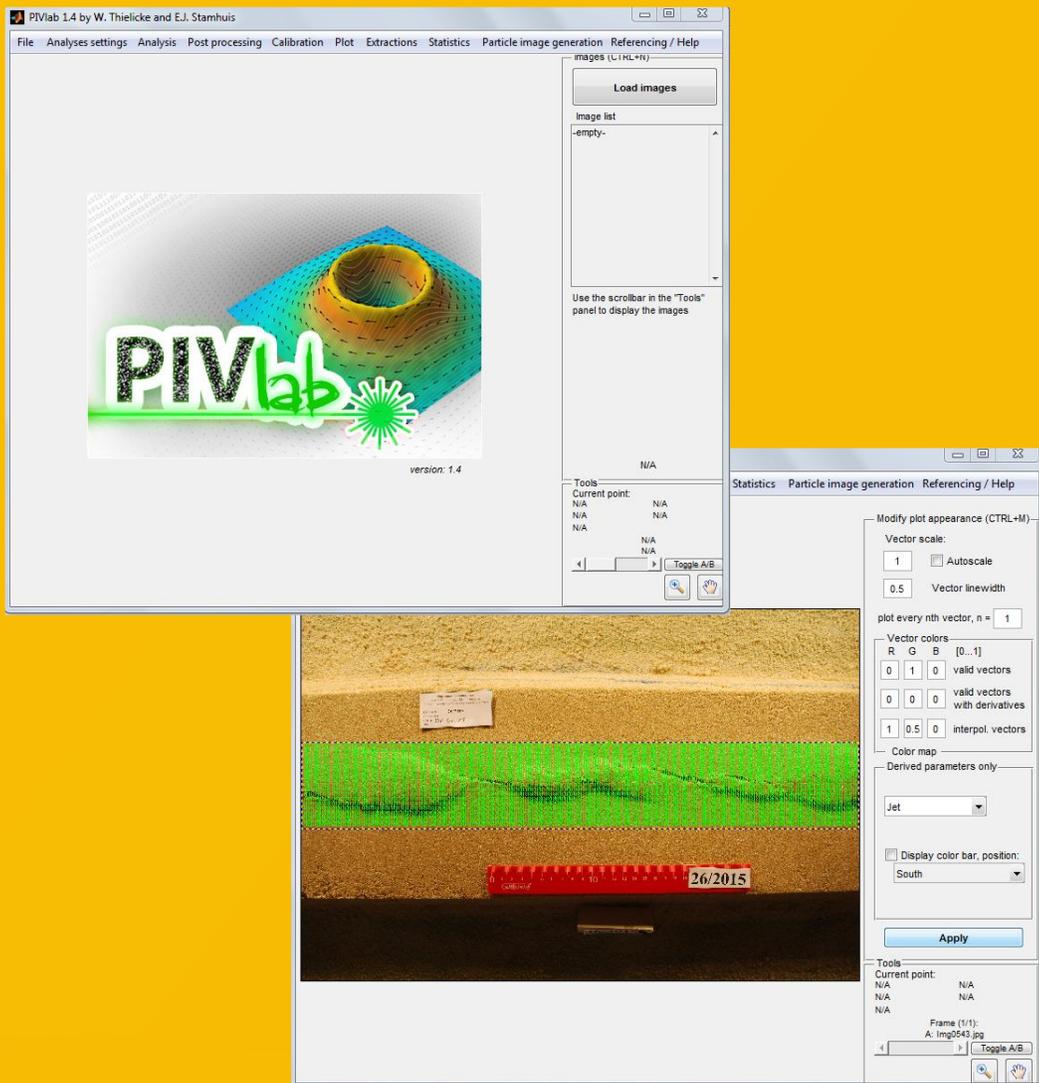
Примеры регистрации результатов. Моделирование транстенсии



1. На поверхности – сетка
2. Фото через небольшие интервалы
3. Пропитка желеобразным веществом и разрезание
4. Оцифровка и обработка в программе 3-D Move

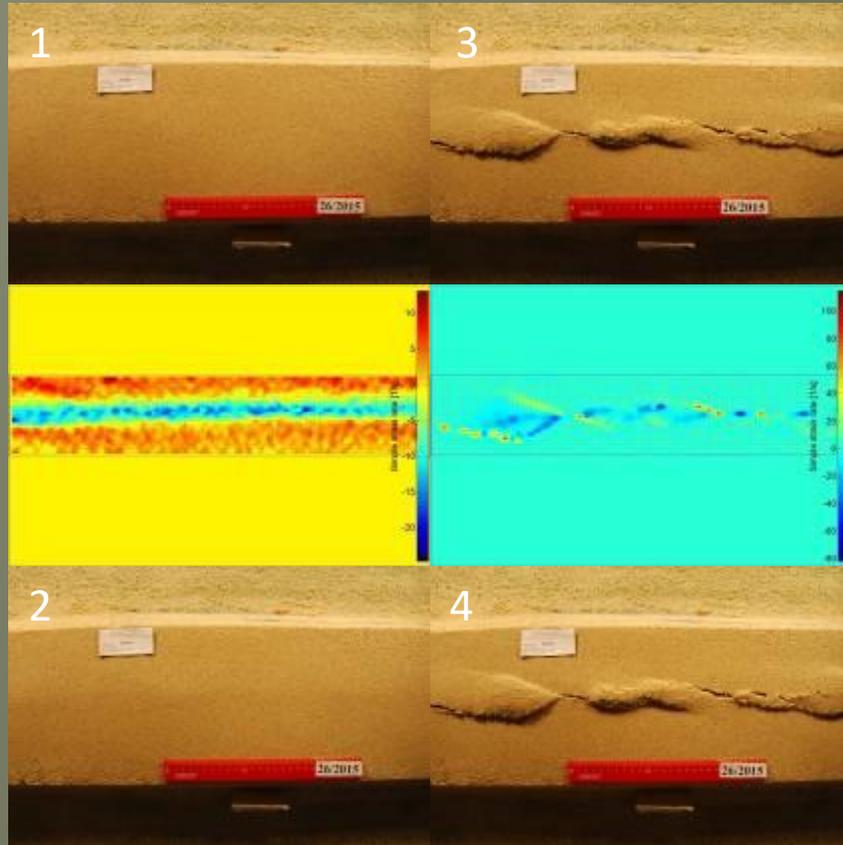
(Dooley & McClay, 1997)

Метод PIV (Particle Image Velocimetry)

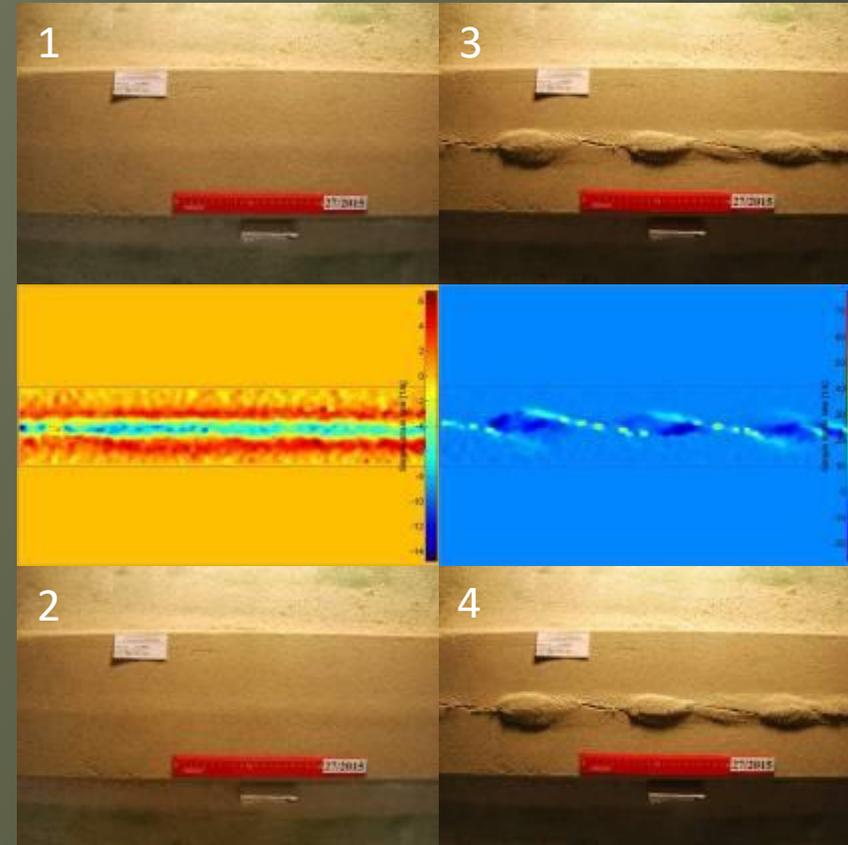


- Программа позволяет находить на двух фотографиях одну и ту же точку и рассчитывать вектор ее перемещения.

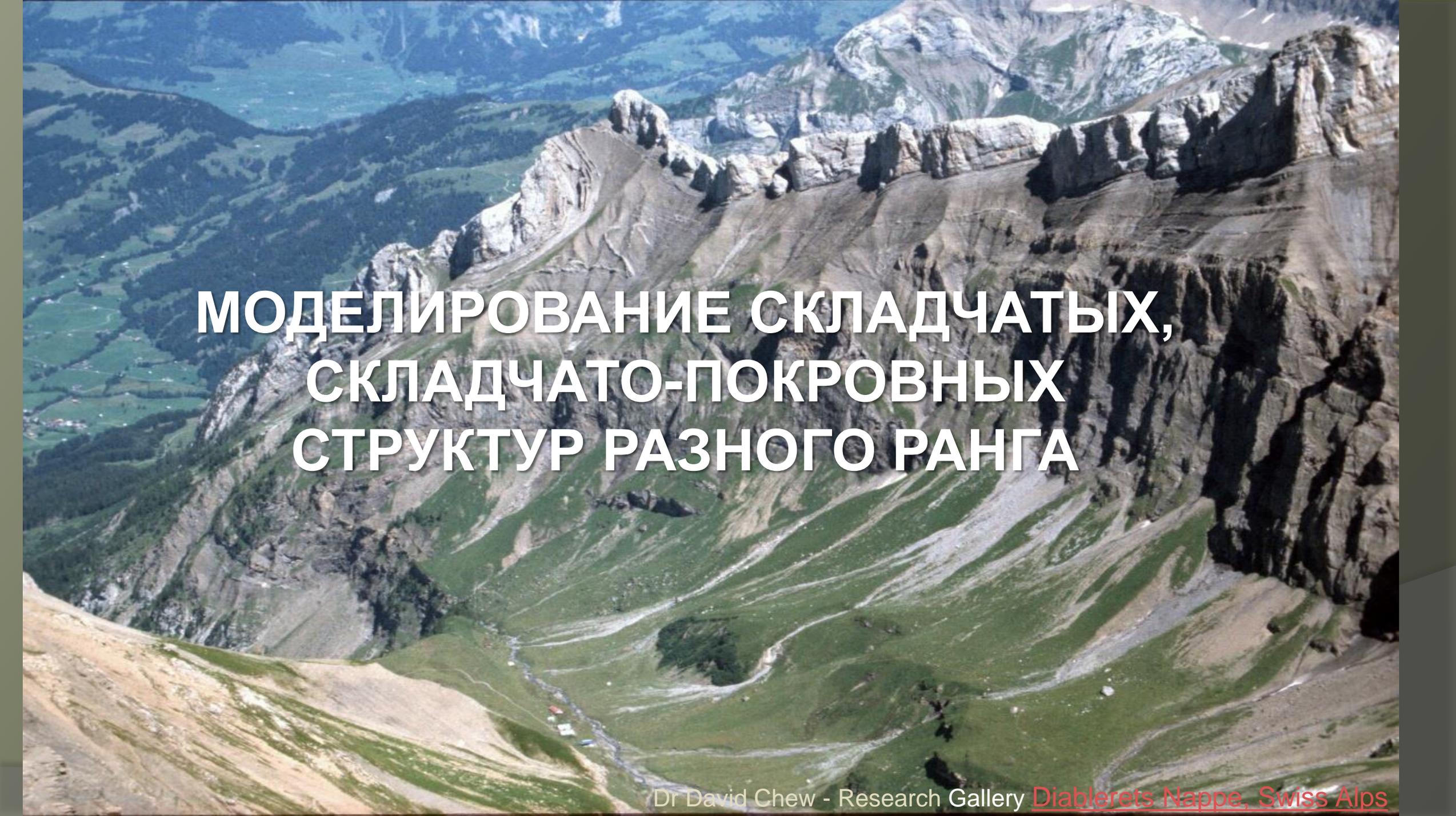
Анализ опытов в программе PIVlab



- Анализ опыта 26.
1-2 – начало; 3-4 – конец.

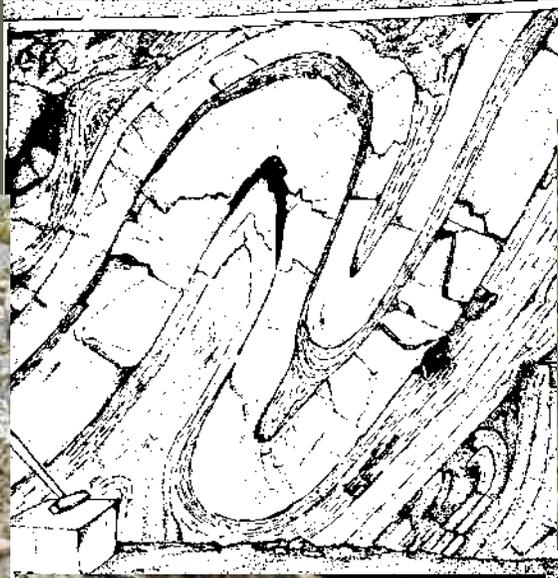


- Анализ опыта 27
1-2 – начало; 3-4 – конец.

An aerial photograph of a mountain range, likely the Swiss Alps. The foreground shows a valley with a river and green slopes. The middle ground features a prominent mountain range with a series of peaks and ridges. The background shows more distant mountain ranges and a valley. The text is overlaid in the center of the image.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКЛАДЧАТЫХ, СКЛАДЧАТО-ПОКРОВНЫХ СТРУКТУР РАЗНОГО РАНГА

Моделирование отдельных складок в складчатых областях



Истоки

Эксперимент проводится с моделью явления

Модель: сближение концов плоских тел приводит к их изгибу (серия изгибов – это и есть складки).

Откуда известно: из механики и жизненных наблюдений

Что сближается: концы плоских тел или серии таких тел

Как сближается: два штампа

один штамп

сокращается основание

Цель экспериментов: подтвердить представление о формировании складок, выявить особенности складчатой структуры в зависимости от различных условий (например, мощности слоев)



Первые эксперименты



Сэр Джэймс Холл

1761—1832

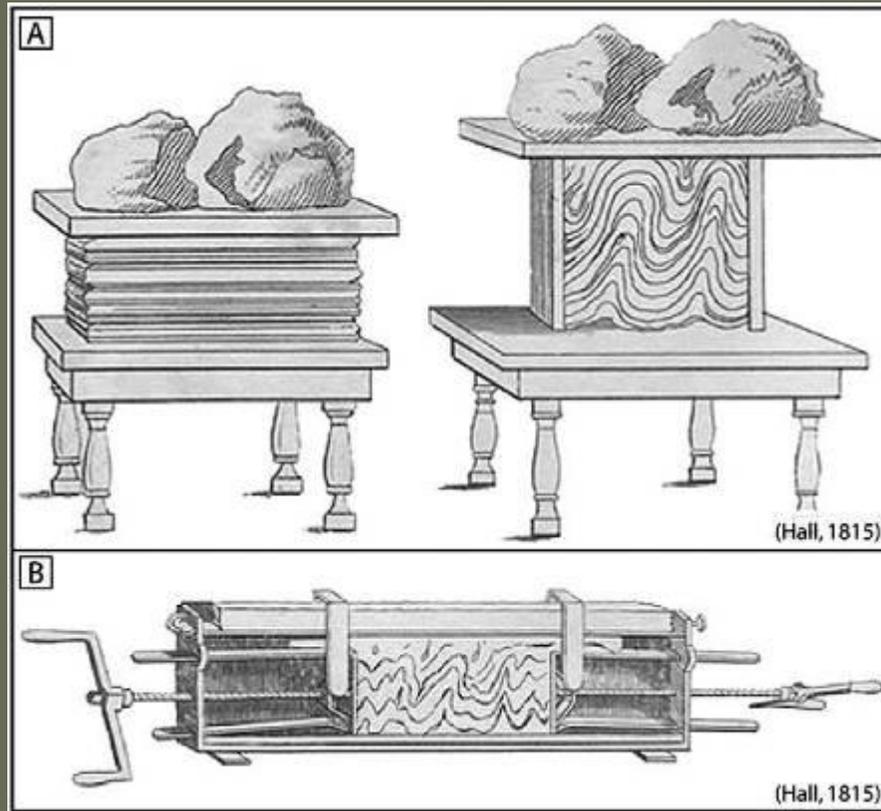
**Шотландский ученый – натуралист,
химик, геолог и геофизик**

**1796 – впервые в мире провел
эксперименты с расплавлением
и кристаллизацией базальта**

**1812 – впервые представил
Эдинбургскому Королевскому
Обществу результаты
аналогового моделирования**

**1815 – первые опубликованные
результаты экспериментов по
воспроизведению складчатости**

Эксперименты Дж. Холла



А – стопка лоскутов,
два штампа

Б – слои глины, пистон

(из Graveleau and others, 2012)

Подтверждение представлений о причине образования складок

Эксперименты Дж. Холла

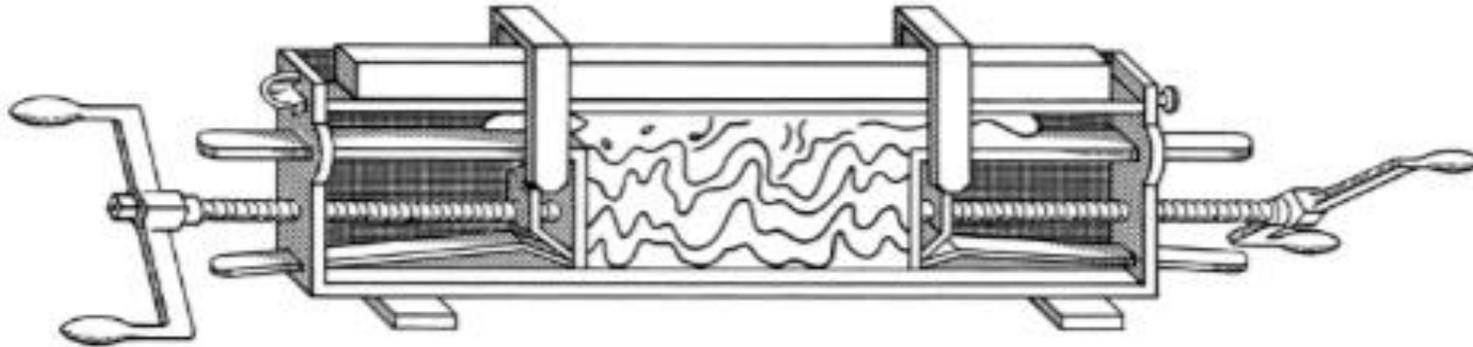


Fig. 4. Machine for scale model of folding by lateral compression, presented by Hall to the Royal Society of Edinburgh in 1812.

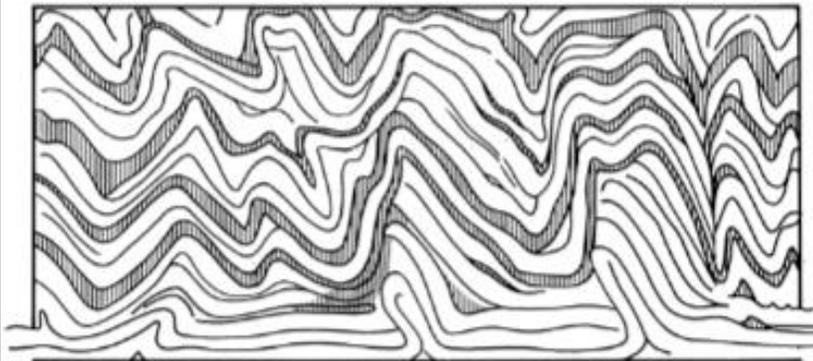


Fig. 5. Model folds resulting from Hall's experiment.

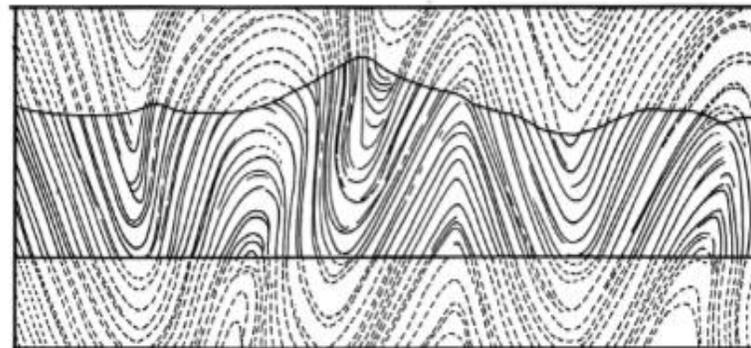
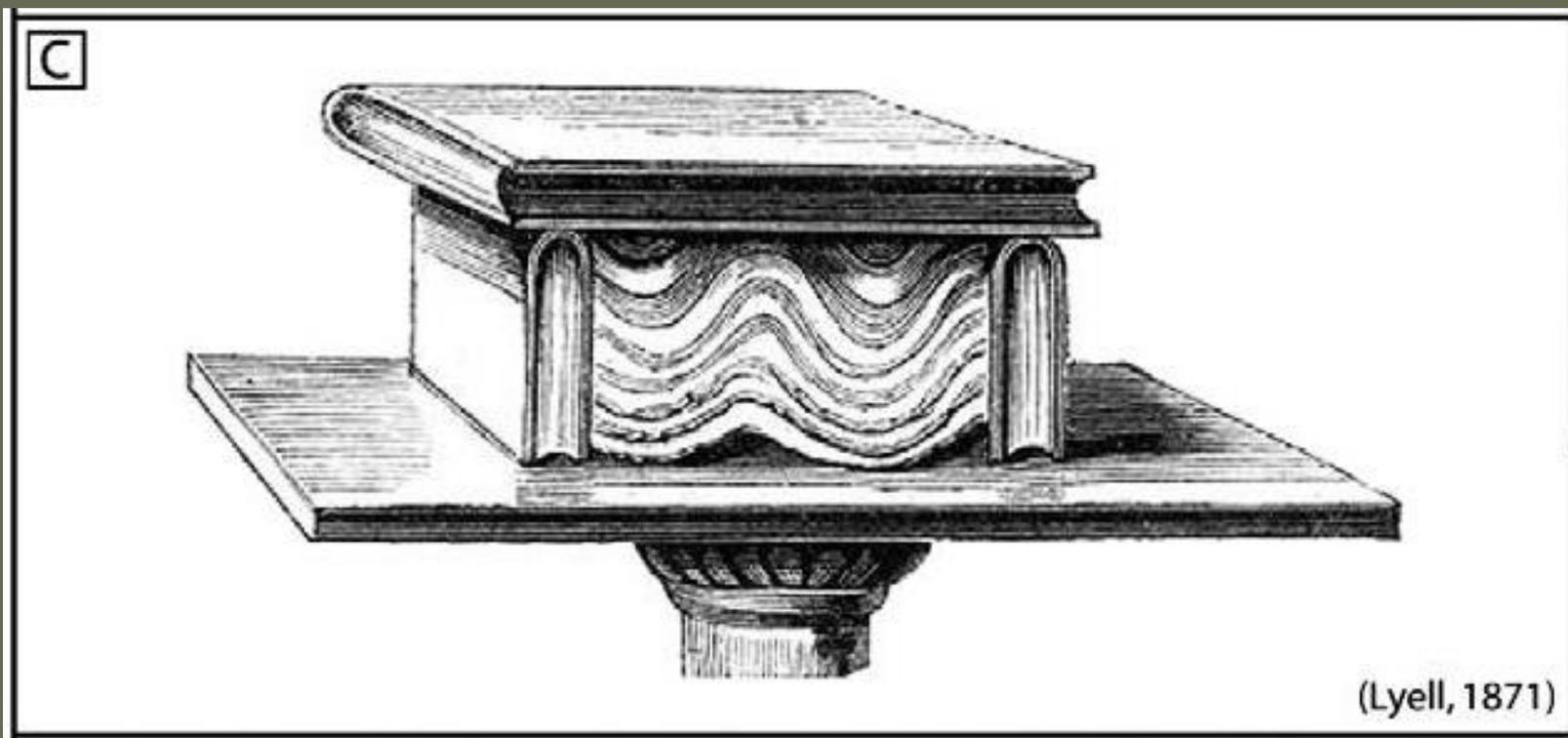


Fig. 3. Folded strata (continuous lines) and their continuation (dashed lines) where eroded or hidden from view.

Через 50 лет

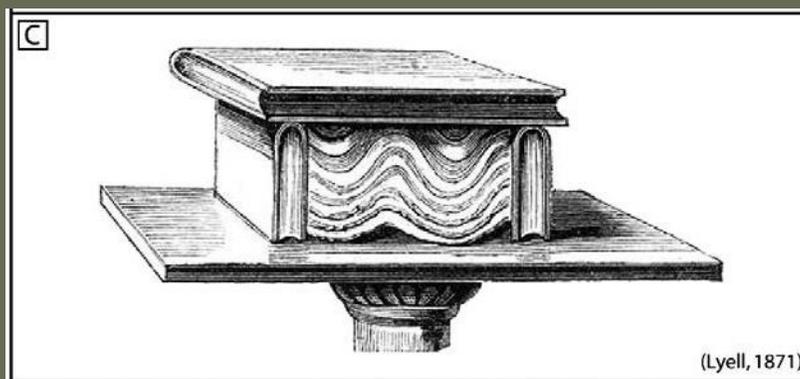
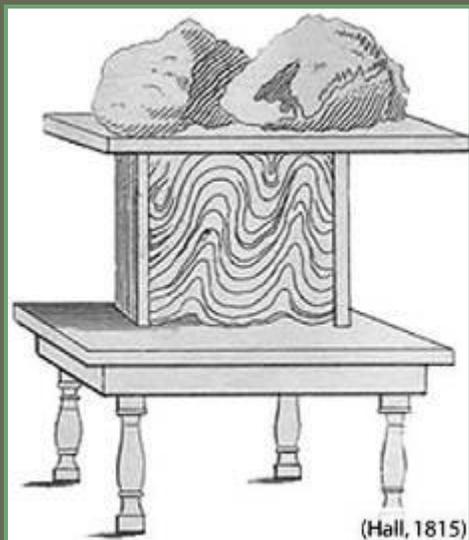


(из Graveleau and others, 2012)

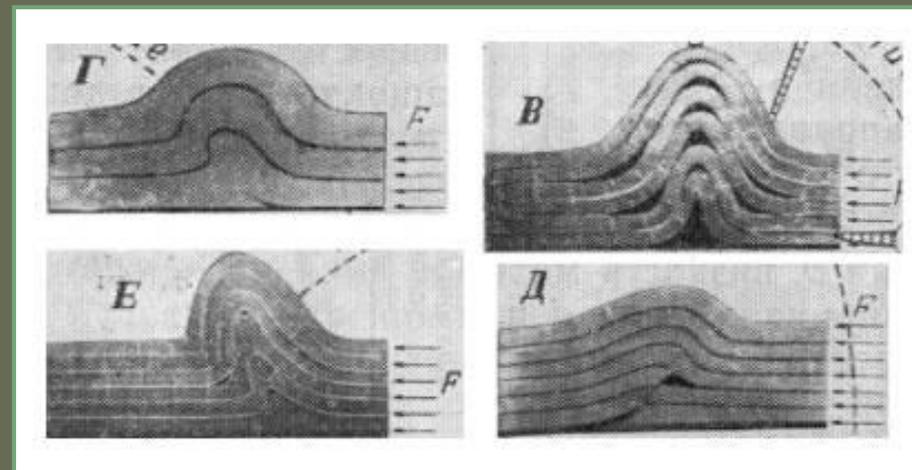
Песок и куски материи

Похожи ли эти складки на природные?

Оценим граничные условия этих экспериментов



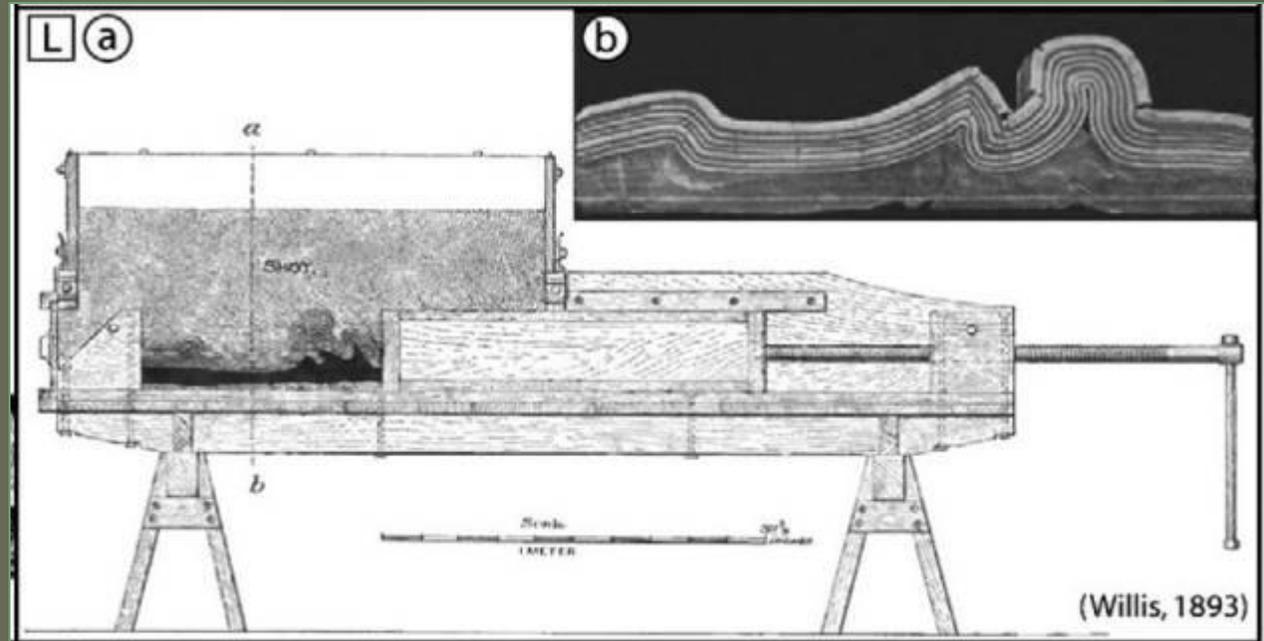
(из Graveleau and others, 2012)



В чем особенность формирующихся в этих условиях складок?

(По М.В. Гзовскому и И.М. Кузнецовой 60-е годы XX века)

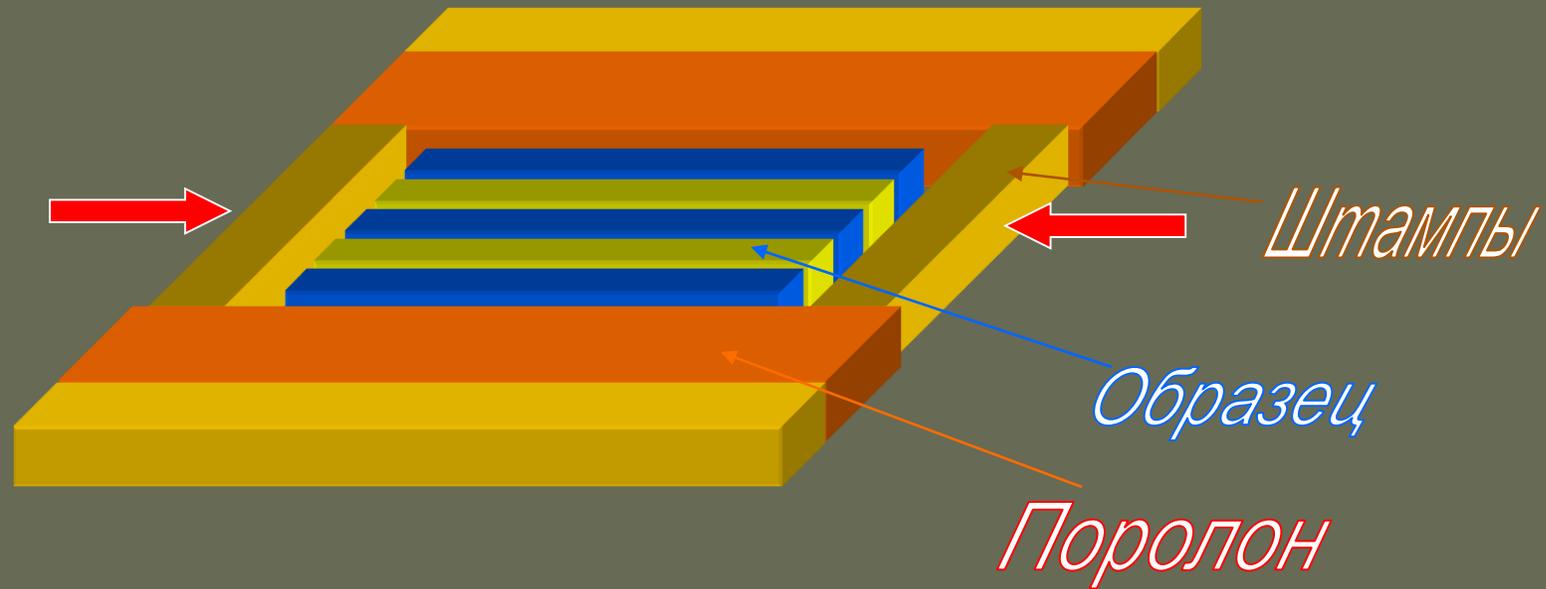
Виллис (1893) пытался моделировать складчатость Аппалачей. В качестве вертикальной нагрузки он использовал свинцовую дробь. Эквивалентный материал – смесь воска и гипса или скипидара.



(из Graveleau and others, 2012)

Как видно из рисунка, в этом эксперименте **на жестком основании** находился **слой маловязкого вещества**, которое частично участвовало в деформациях. Здесь антиклинали и синклинали примерно равноправны, а более сжатые складки располагаются ближе к штампу

Схема прибора для моделирования складок продольного укорочения и других структур горизонтального сжатия



Для того, чтобы, с одной стороны, обеспечить некоторое сопротивление свободному росту складок «вверх», а с другой стороны, чтобы жесткое основание не мешало росту синклиналей «вниз», можно применить простой прибор, изображенный на этом рисунке. Рама с двумя свободно двигающимися боковыми планками лежит на столе (Лаборатория тектонофизики и геотектоники МГУ)

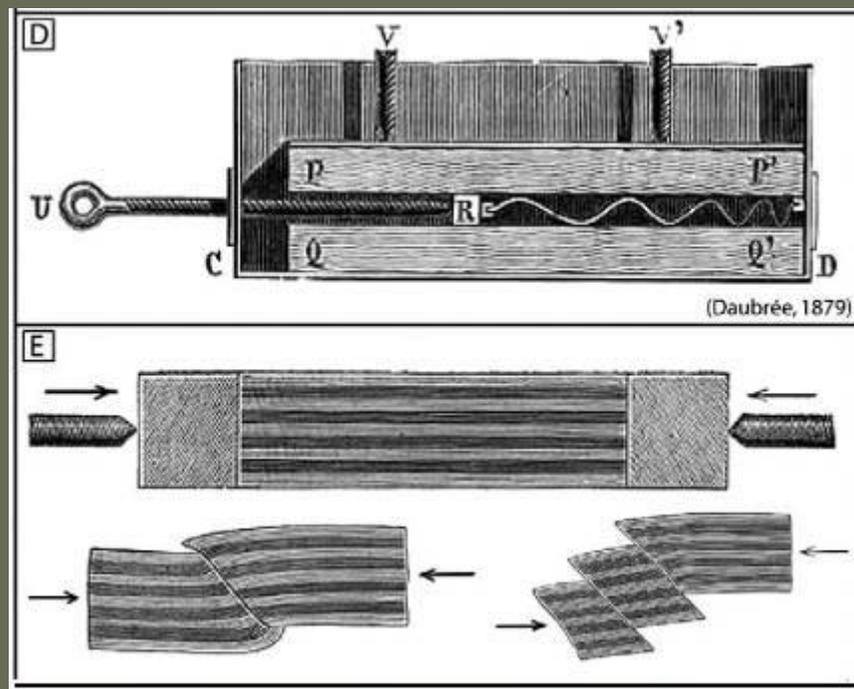
В этом эксперименте формируются равномерно заполняющие пространство, равноправные, симметричные антиклинали и синклинали.



Какой тип складок сформировался?

Эквивалентный материал – влажная глина и терракотта (м-л на основе глины)

Изучение особенностей складчатой структуры



(из Graveleau and others, 2012)

Е – модель из воска, в которой складки развиваются после разрывов. Первая модель, которую позже сравнили с аккреционной призмой

Добрэ (1878, 1871) изучал влияние всестороннего давления, а также свойств слоев (мощность, вязкость) на геометрию складок одиночного слоя
←
Материал: цинк, железо и свинец

Выводы: длина волны складок зависит от мощности слоя и отношения вязкости слоя к вязкости вмещающей среды

Эти выводы были позже подтверждены расчетами Био и экспериментами Рамберга (60-е годы XX века)

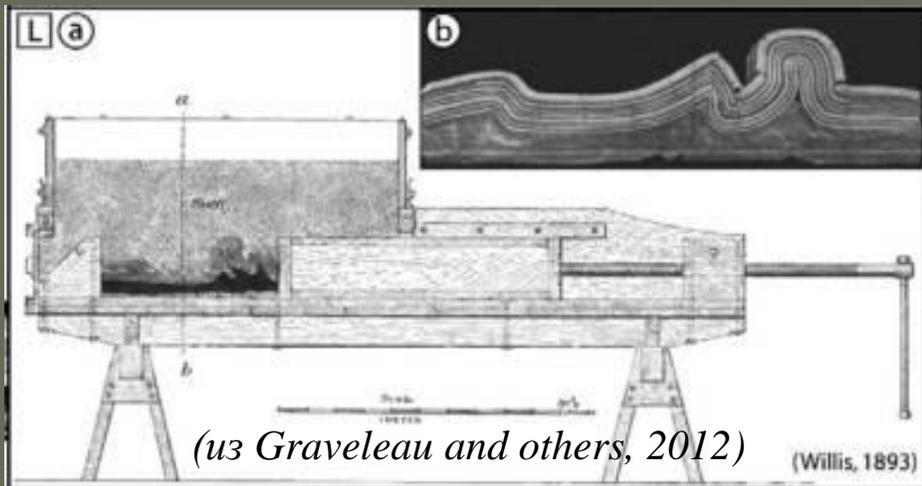
Соблюдались ли условия подобия в экспериментах Добрэ?

Эксперименты по воспроизведению участков складчатых сооружений

Большинство экспериментов проводилось, чтобы подтвердить господствующие представления о формировании складчатости

КОНТРАКЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА:

1. многочисленные эксперименты, связанные со сближением штампов



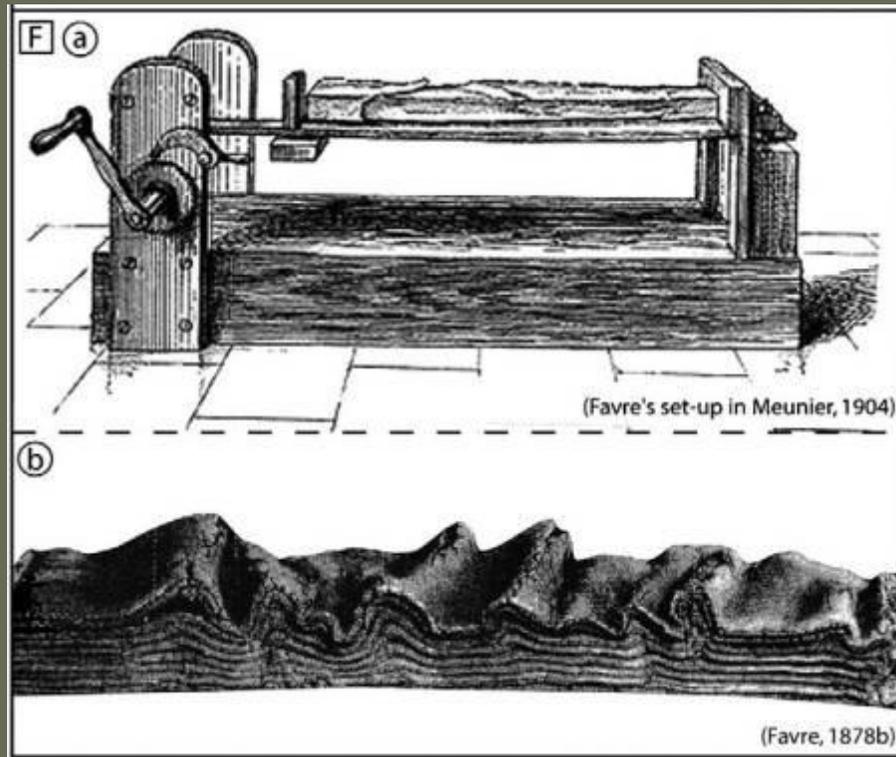
Модель формирования складчатости при горизонтальном сжатии геосинклинальных толщ сближающимися более «жесткими» платформами.
(Виллис, 1891, 1893; эксперименты ИФЗ АН СССР, МГУ им. Ломоносова и др.)

Вывод: формирование складчатости происходит в основном у сближающихся стенок прибора, либо образуется равномерная складчатость, но при условии нагрузки сверху (например, стальные шарики)

Соблюдались ли граничные условия в этих экспериментах?

2. Модель: согласно одному из представлений контракционной гипотезы, сокращается поверхность подкоровой оболочки

Эксперименты с укорочением подложки



Фавр (1878) осуществил эксперимент с помощью постепенного укорочения предварительно растянутой резины, на котором располагался образец из глины.

Сходные опыты были осуществлены Г. Клоосом (1929-1930) для воспроизведения складчатой структуры Альп

(из Graveleau and others, 2012)

Соблюдались ли граничные условия в этих экспериментах?

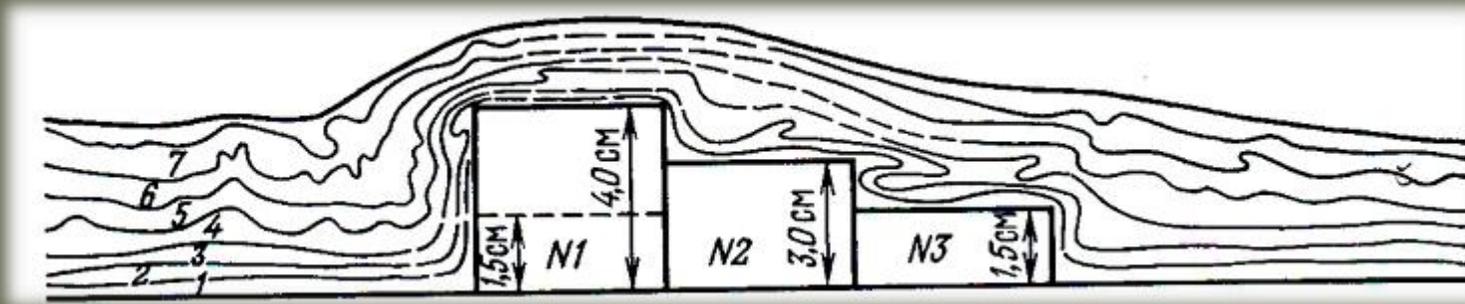
Эксперименты, учитывающие гравитационный фактор

Гипотеза гравитационного сползания слоистых толщ по склонам тектонических поднятий, созданных глубинными процессами (Рейер, 1892-1894)

Эксперименты, учитывающие гравитационный фактор

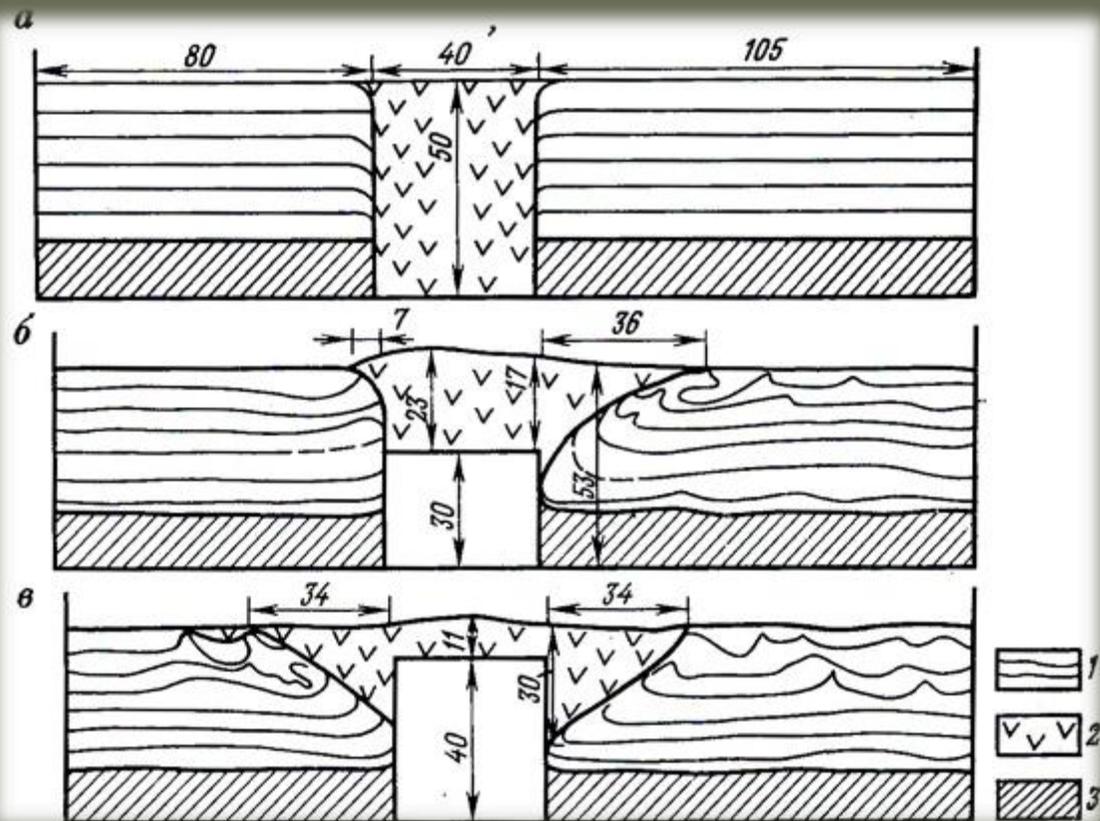
Гипотеза гравитационного сползания слоистых толщ по склонам тектонических поднятий, созданных глубинными процессами (Рейер, 1892-1894)

Воспроизведение гравитационной складчатости с помощью различных штампов



Складчатость, возникающая при течении слоистой толщи (канифоль с машинным маслом и глинистые промазки) по склонам поднятий, образованных жесткими штампами (Лебедева, 1966)

Что противоречит природным данным в этом опыте?



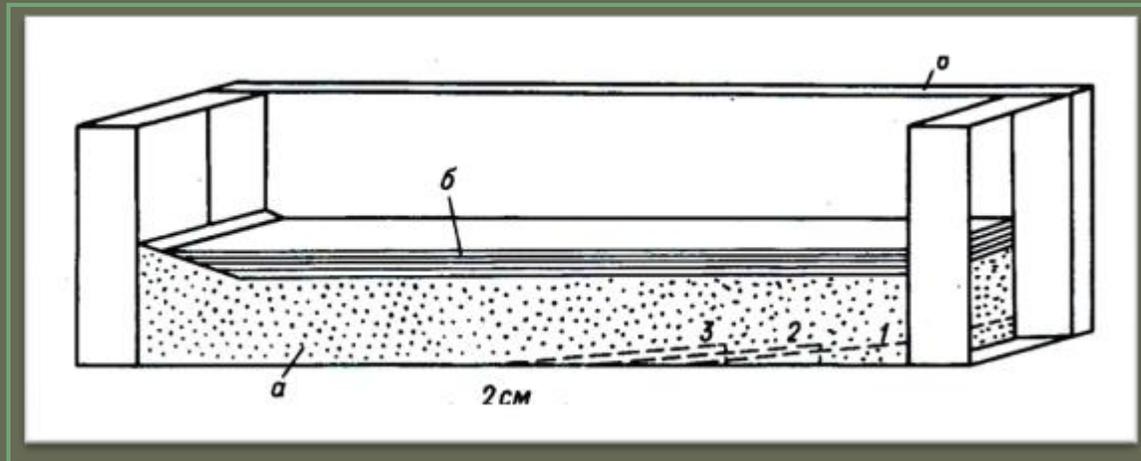
Складчатость в слоистой толще при расползании пластичного монолитного поднятого штампа (по Н.Б.Лебедевой)

а-в – стадии эксперимента;
 1 – канифоль с прослоями глины,
 2 – неслоистая канифоль,
 3 – пушечная смазка

Сравните этот рисунок с предыдущим слайдом

Гипотеза: «орогеническая волна», распространяющаяся из центра геосинклинальной области к ее периферии (Ж. Обуэн, 60-е годы прошлого века)

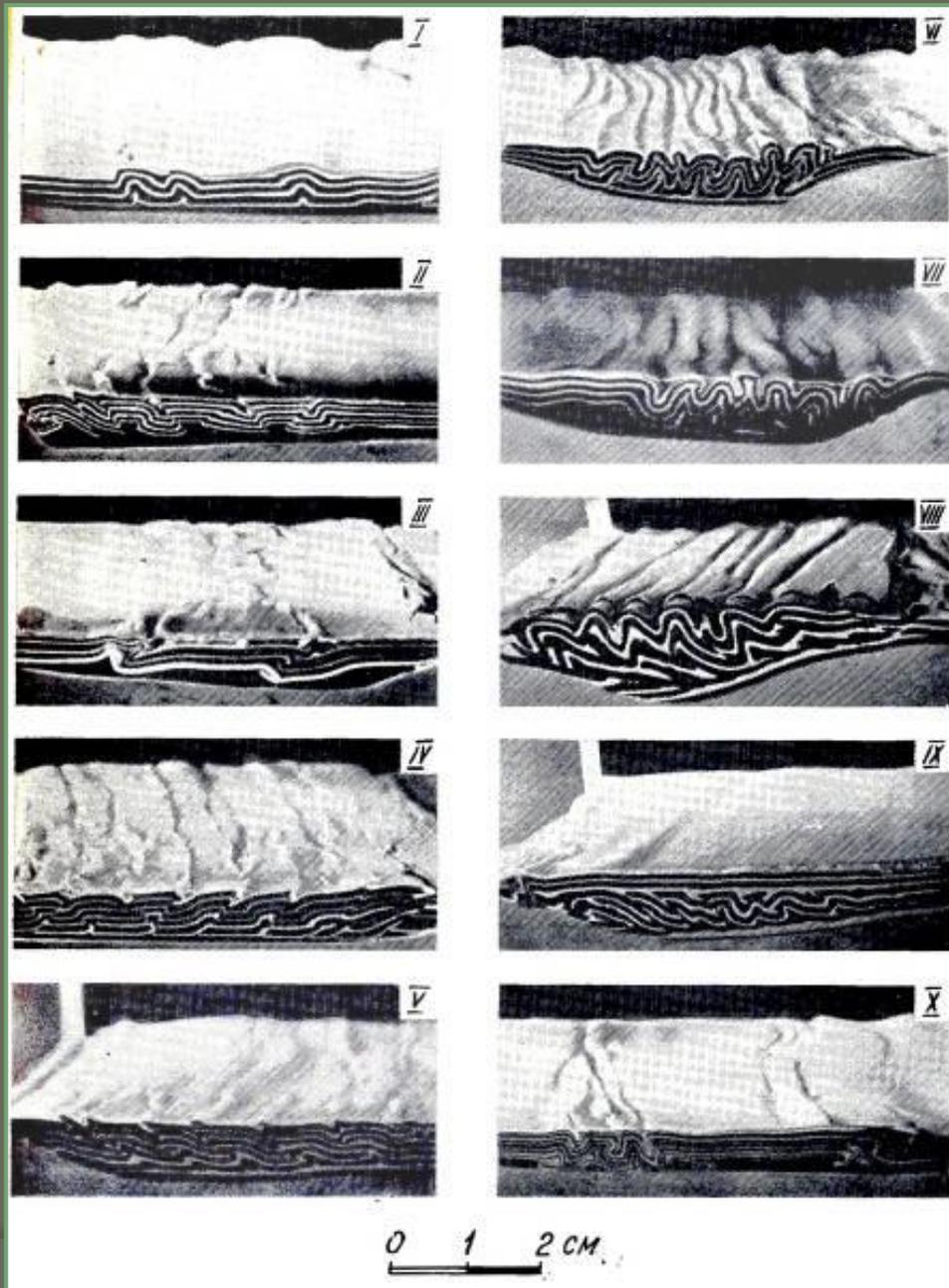
Эксперименты по воспроизведению гравитационной складчатости В.Г. Гутермана



«Фундамент» – пластилин. «Чехол» – чередование более и менее вязких слоев (порошок целлюлозы, глина, смесь геля с графитом и целлюлозой; вазелин с маслом, гель с сахаром)

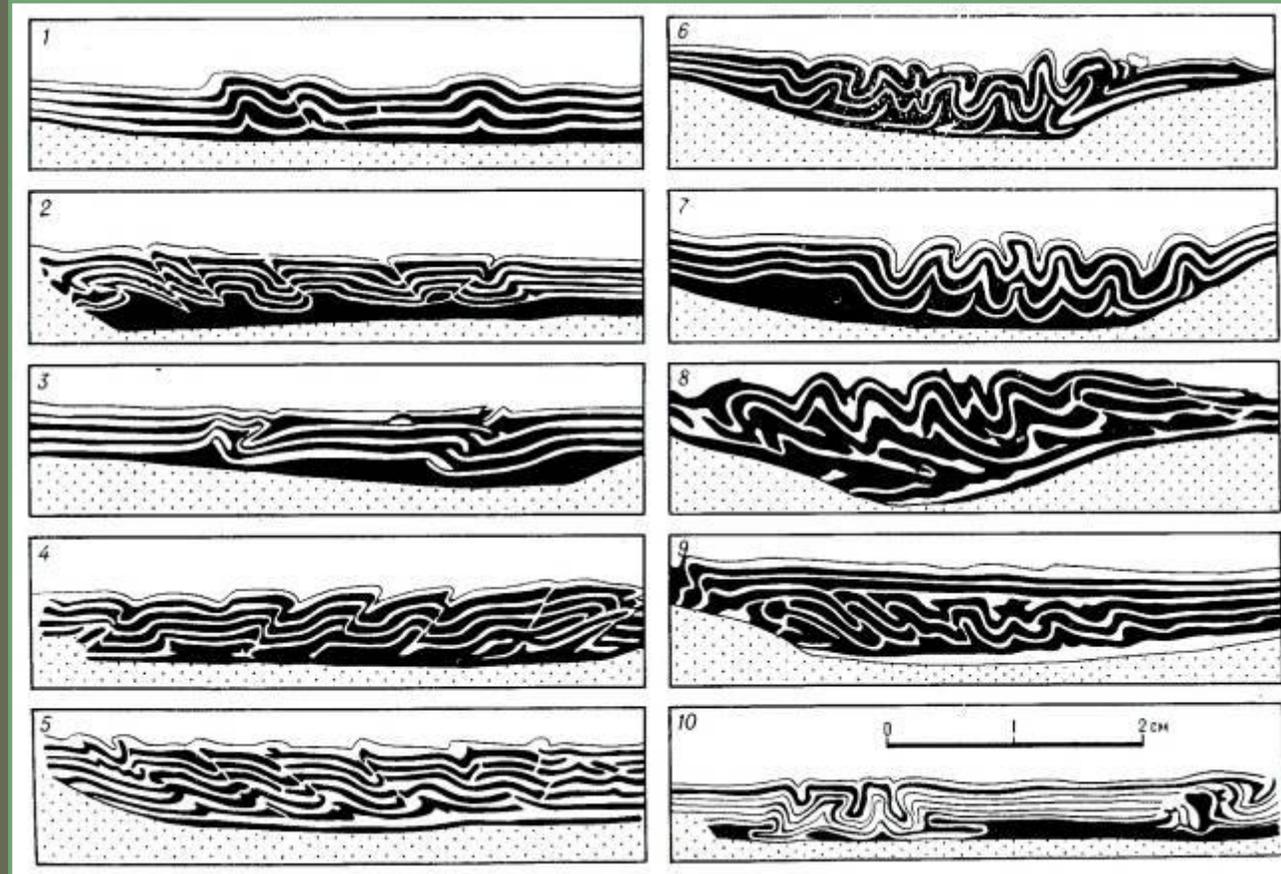
Для «усиления» поля тяжести была использована центрифуга

В основание модели постепенно вставлялись клинья, вызывавшие постепенное расширение зоны приподнятой поверхности образцов



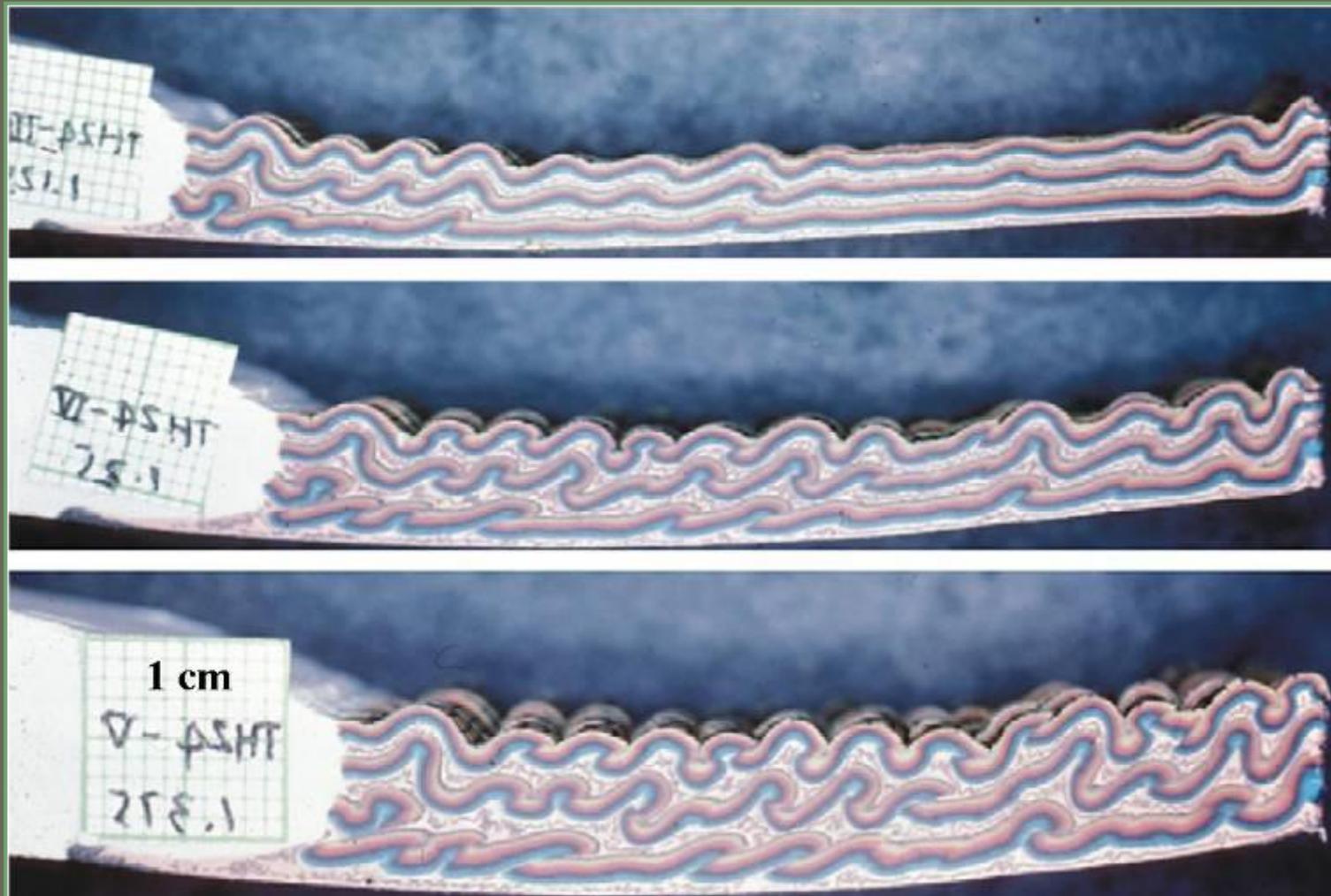
Различные морфологические типы
гравитационной складчатости
(Гутерман, 1987)

Какова причина и обстановка формирования
этих складок?



(Гутерман, 1987)

Сходные эксперименты



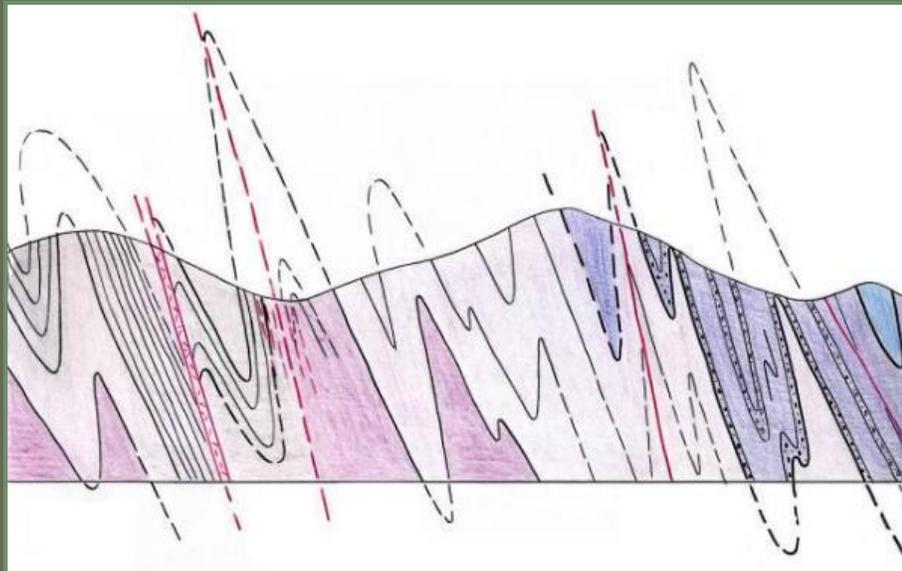
Здесь также использовалась центрифуга

(Liu, S., Dixon, J.M., 1990)

Складчатая зона Северного склона Таласского Алатау (Северный Тянь-Шань)



Фрагмент



Сравните реальные складчатые
структуры с экспериментальными

Гипотеза: причиной складчатых деформаций являются конвективные процессы (не путать с механизмом формирования отдельных складок)

Эксперименты по воспроизведению складчатых структур и складчатых сооружений, обусловленных только инверсией плотности

Две группы опытов

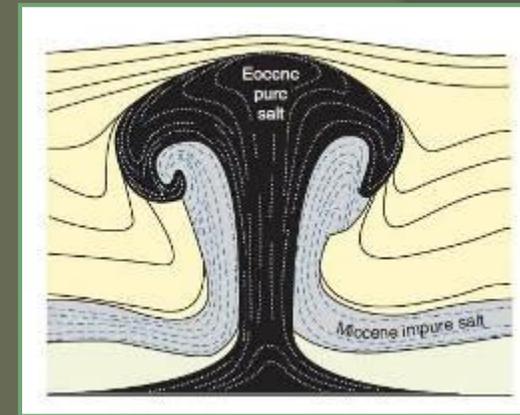
1. Инверсия плотности создается в образце до опыта
2. Инверсия плотности возникает в процессе опыта

Опыты Рамберга (60-е годы прошлого века). 1-я группа опытов:

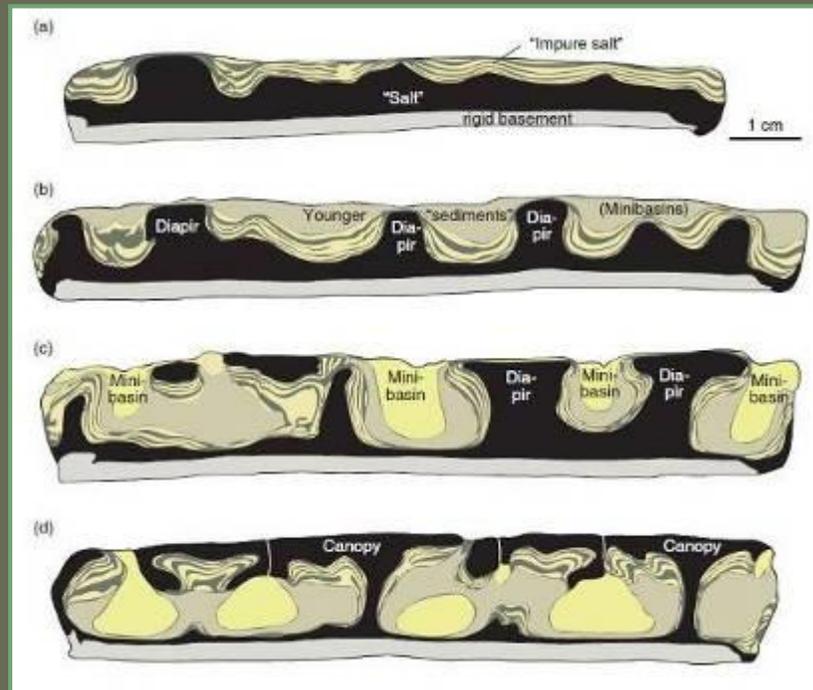
- две однородных толщи - легкая нефть и тяжелый раствор соли. Купола;
- тонкослоистые образцы (три пакета разной плотности). Опыт в центрифуге. Купола и осложняющие их структуры

Экспериментальное подтверждение формирования диапировых структур вследствие всплывания легкого материала

Опыты Х. Рамберга в центрифуге



Соляные структуры в Dasht-e Kavir, Иран (из Fossen, 2011)



(по Х. Рамбергу, из Fossen, 2011)



Центрифугированная модель купола из силикона со смятыми и складки и разорванными слоями модельной глины; купол прорвал слоистую толщу грунтовки контрастной расцветки.

(Рамберг, 1970)

Инверсия плотности возникает в процессе опыта

Имитация инверсии плотности с помощью теплового импульса (Гончаров, Горелов, 1975)

Эквивалентный материал: сплав канифоли с машинным маслом

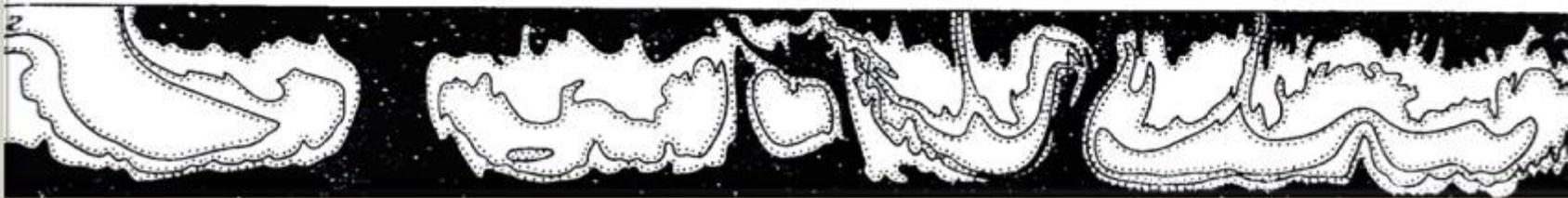
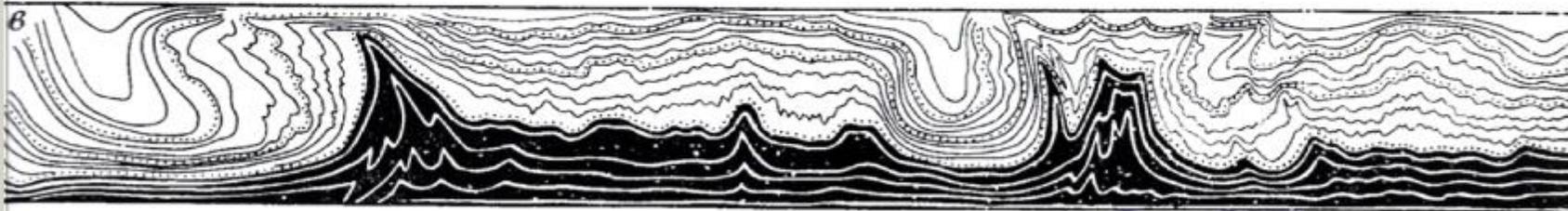
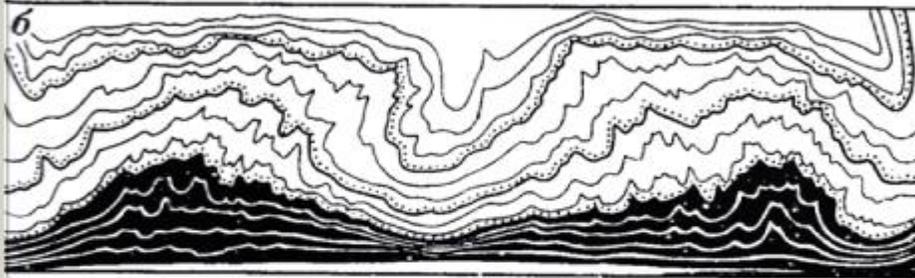
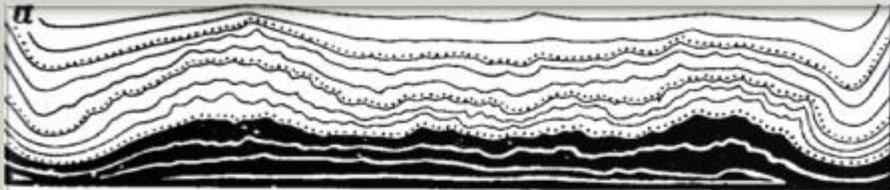
Техника изготовления образцов: охлаждение, дробление, засыпка тонкими слоями, уплотнение под прессом, слабое нагревание

Способ реализации теплового импульса: прибор с проводящей нижней стенкой (дном) и теплоизолирующими остальными стенками помещался в термокамеру.

Изучение результатов: охлаждение и разрезание образца

Результат опыта: В модельных образцах формируется складчатость, линейная в плане (была подобрана такая разность температур в подошве и кровле образца – около 5° - чтобы было лишь слегка превышено первое число Рэля R_1). Крупные структурные формы осложняются мелкими складками

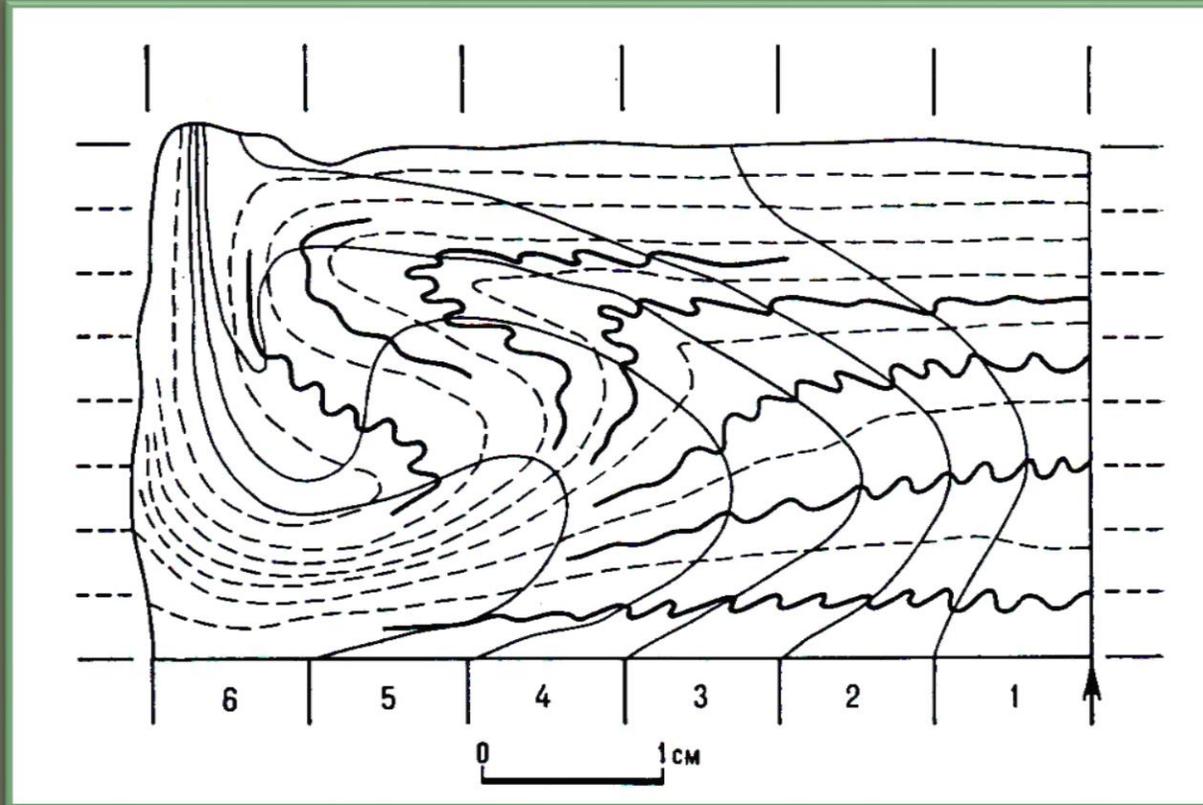
Инверсия плотности вызвана горизонтально-однородным тепловым импульсом



Крупные линейные структурные формы и осложняющая их мелкая складчатость, возникающая в результате конвективного процесса в слоистых образцах
(по М.А. Гончарову и Ю.М. Горелову)

Найдите сходство и различие с природными складчатыми сооружениями

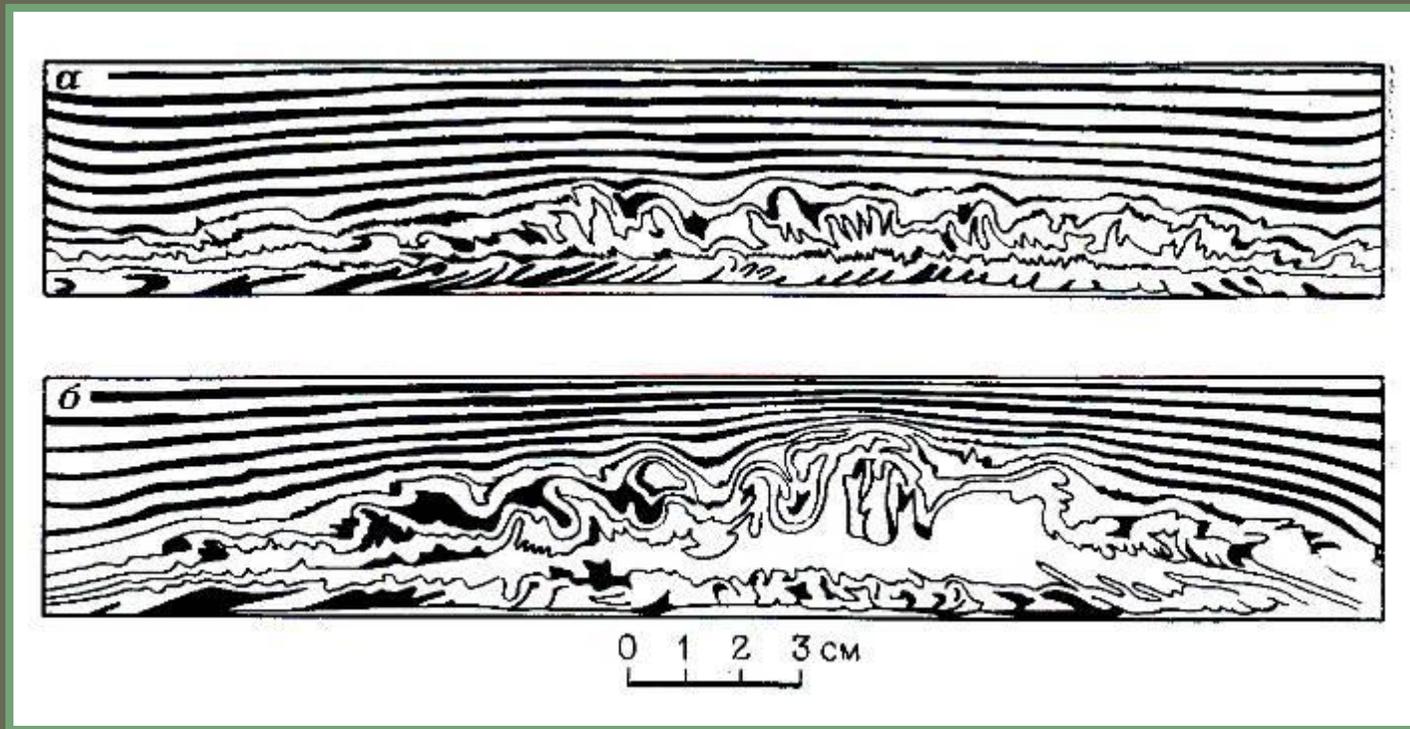
Инверсия плотности вызвана горизонтально-неоднородным тепловым импульсом



Особенности конвективных складчатых деформаций при неравномерном подогреве снизу (по М.А. Гончарову и Ю.М. Горелову)

*Здесь показана
половина модели*

Какие два ранга структур вы видите? В чем причина формирования крупных поднятий и опусканий? За счет чего образуются мелкие складки? Сходство с каким типом складчатых сооружений можно обнаружить?



Еще один эксперимент по моделированию конвективной складчатости. Слоистые образцы подогревались только снизу. Подъем изотерм происходил медленно. Фронт конвекции постепенно поднимался (по В.Г. Талицкому)

Эксперименты по воспроизведению структур форланда

Складчато-покровные области

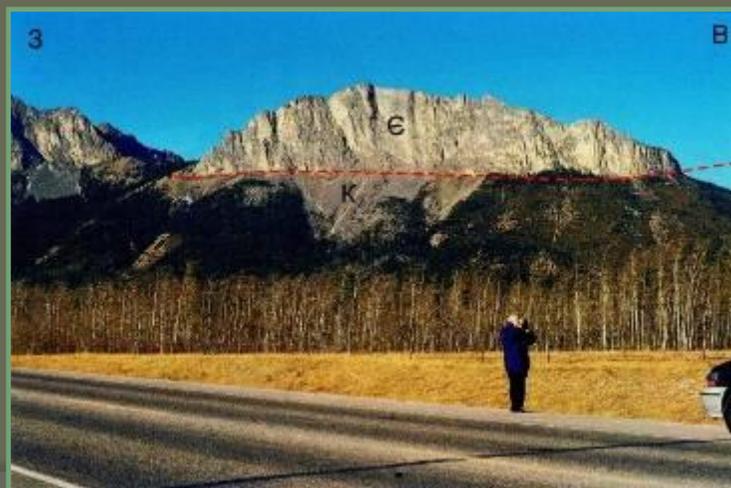
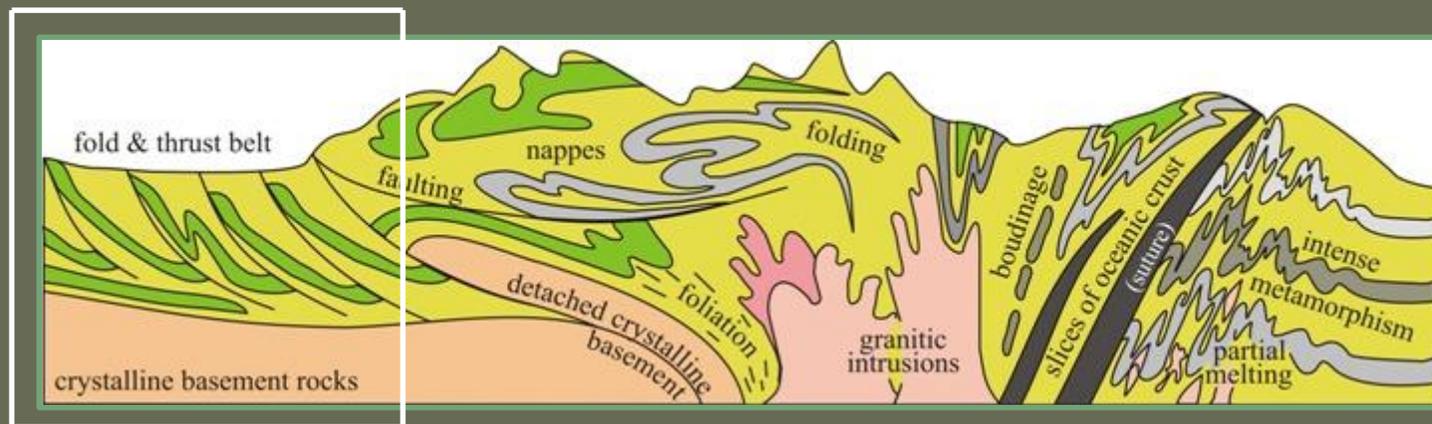
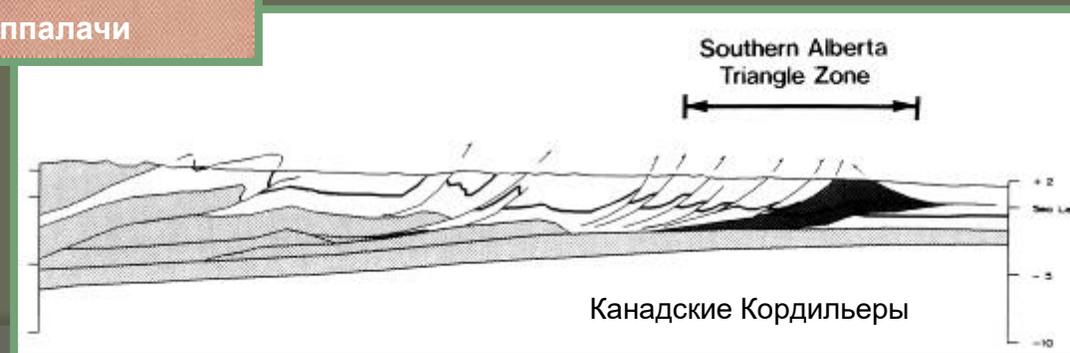
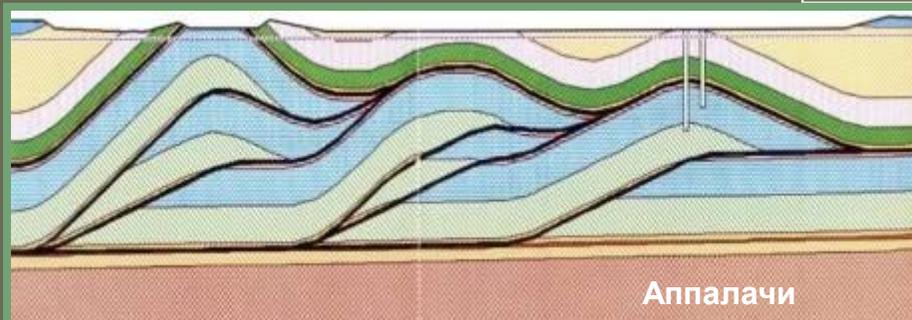
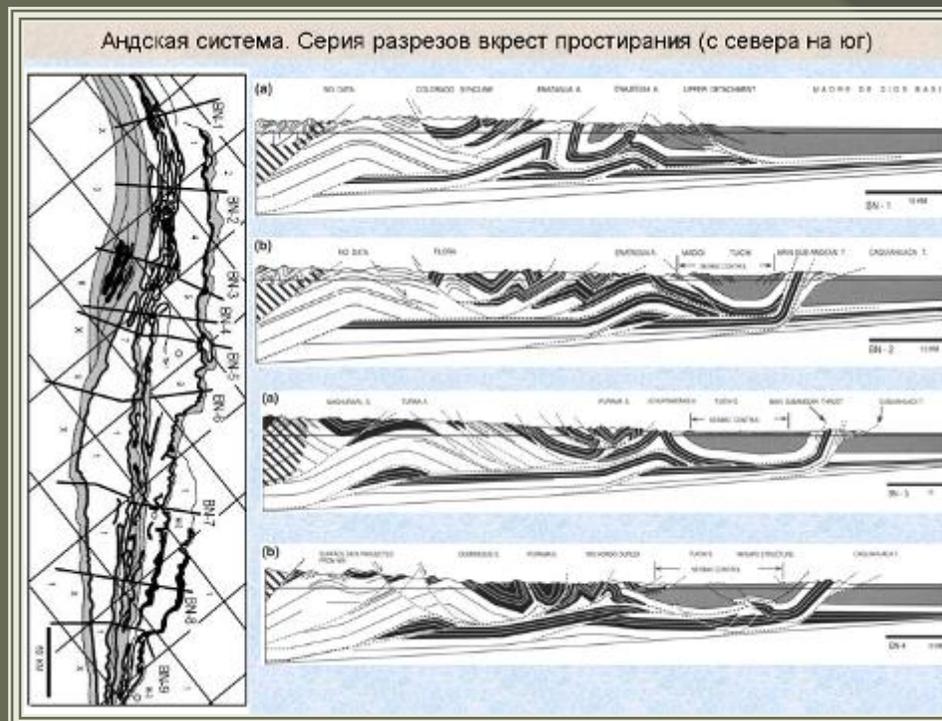
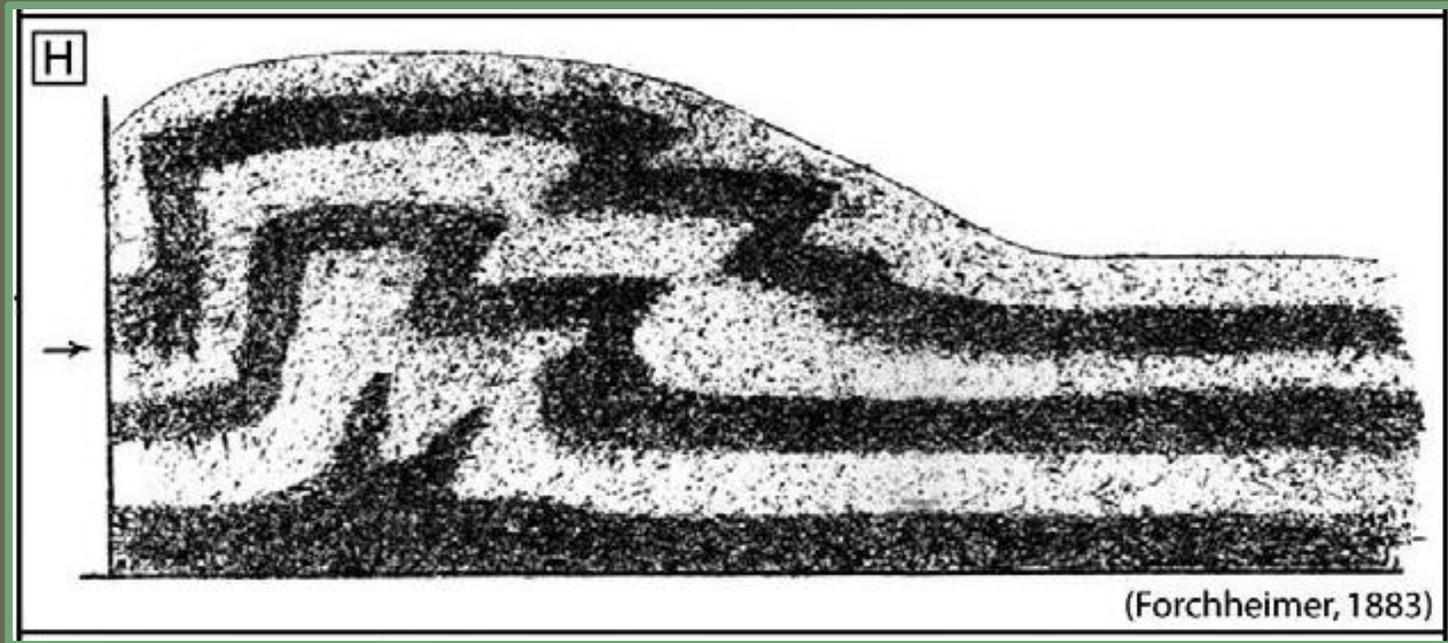


Фото Н.В. Короновского

Современная интерпретация складчато-покровных областей



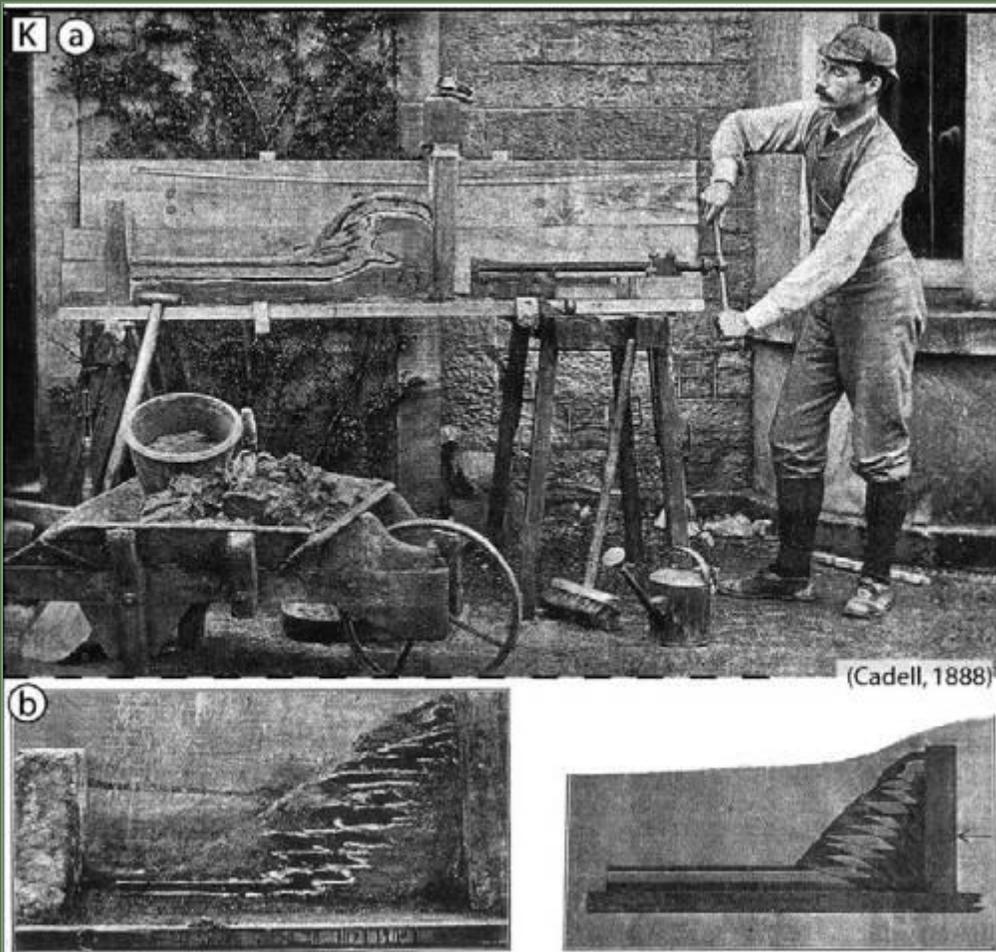
Надвиговые структуры начали моделировать очень давно



(из Graveleau and others, 2012)

Форхаймер (1883) проделал множество экспериментов с разными условиями нагружения. Многослойные модели он изготавливал из влажной глины и песчаной смеси. В одном из его экспериментов сформировалась структура, которую более поздние исследователи сопоставляют с аккреционной призмой

Почему сформировался именно такой тип структуры? Проанализируйте граничные условия и тип воздействия на образец



Кэделл (1888) также осуществил различные виды экспериментов для изучения формирования структуры горно-складчатых сооружений.

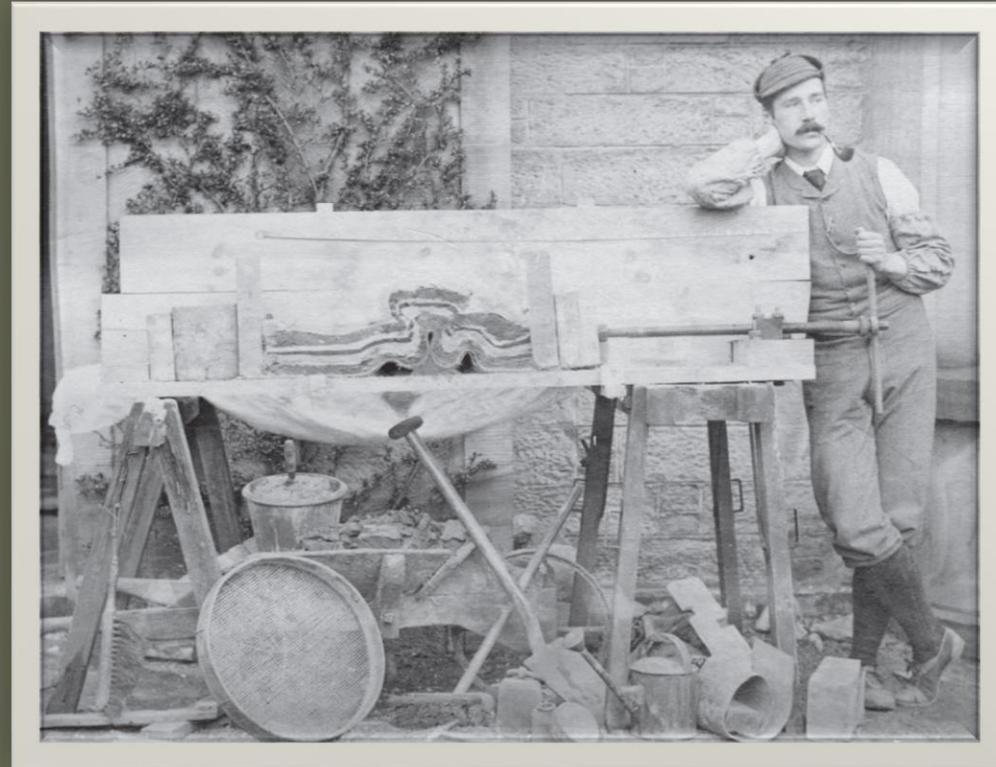
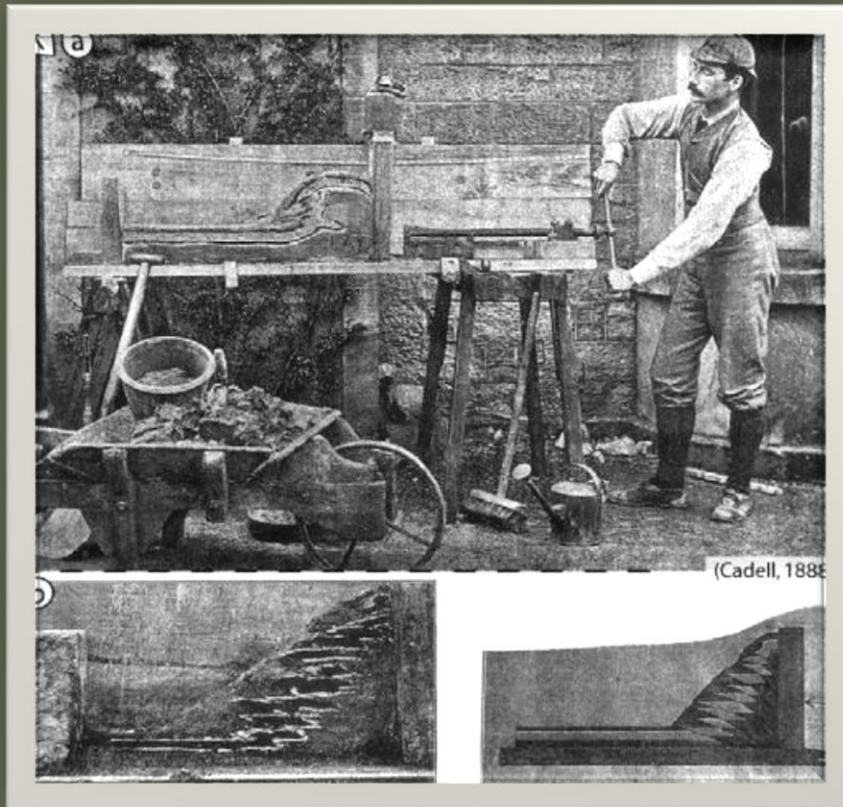
(из Graveleau and others, 2012)

Считается, что его вклад в экспериментальную тектонику - это получение надвиговых структур.

В моделях Кэделл использовал гипс, влажный песок, разные виды глины. Надвиговые структуры в его экспериментах развивались от тыла к фронту и часто сопровождалась складками.

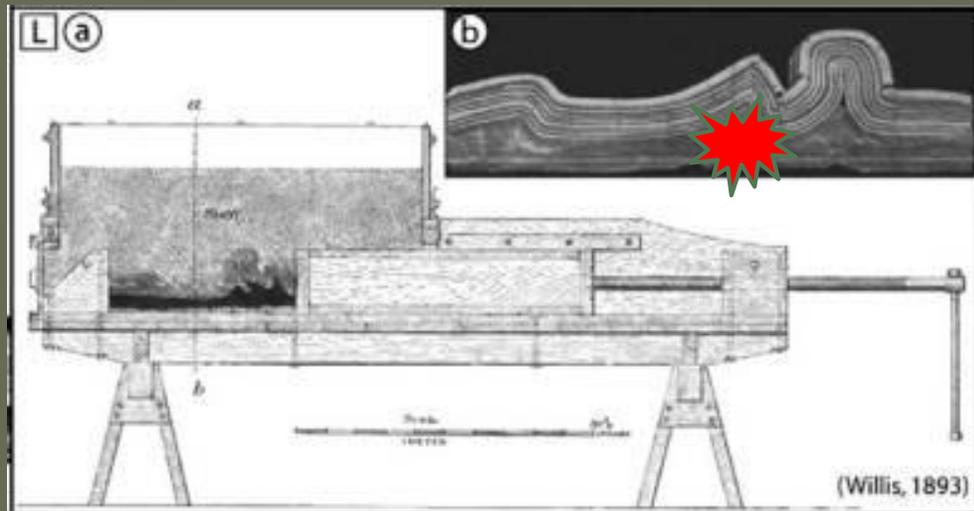
Почему сформировался именно такой тип структуры? Проанализируйте граничные условия и тип воздействия на образец

- Как вы думаете, почему в ЭТИХ опытах сформировалась разная структура?



Проанализируем эксперименты

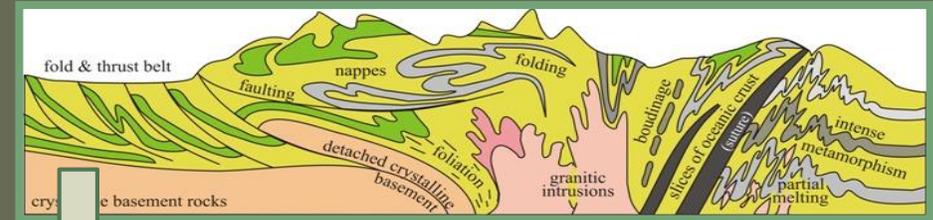
- В только что описанных двух и многих других, более поздних экспериментах, осуществлялось укорочение горизонтально лежащих слоев с помощью бокового штампа.
- Слои лежали на жестком основании



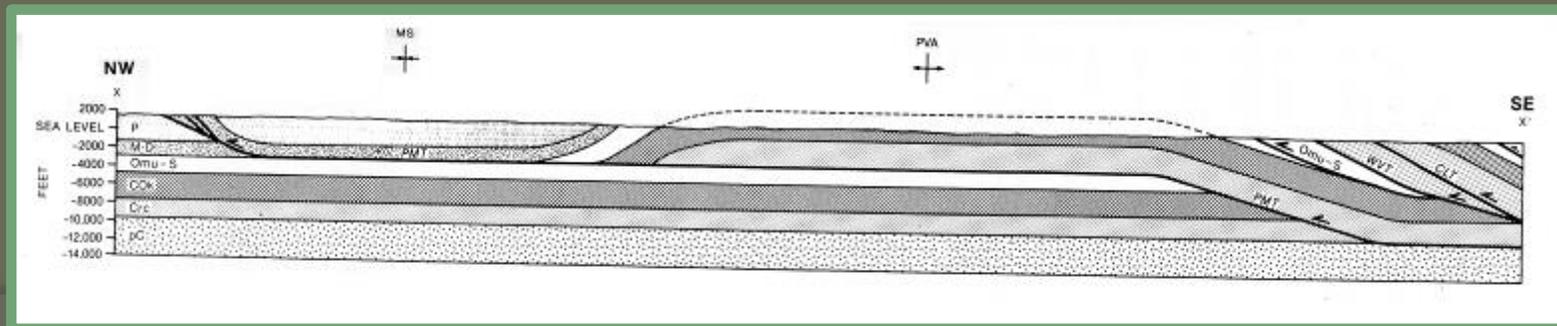
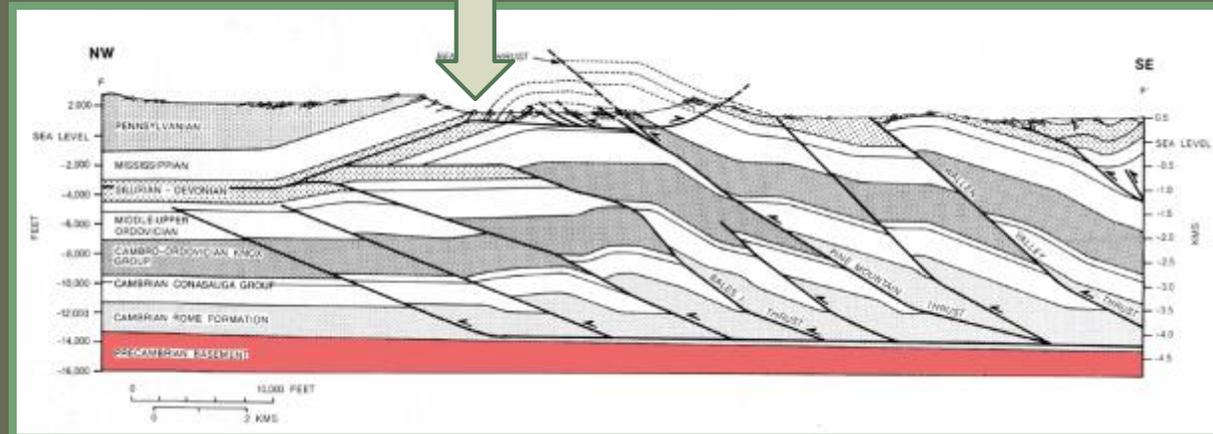
А это эксперименты Виллиса

В чем отличие последнего эксперимента Кэделла от эксперимента Виллиса?

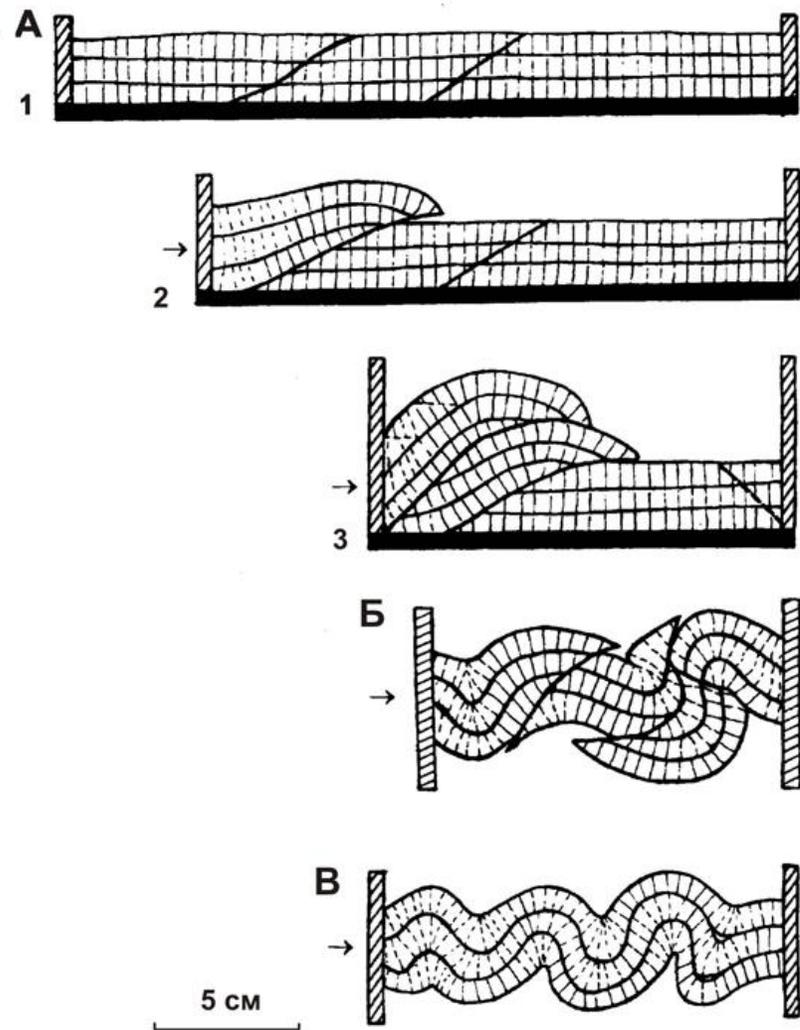
В природных складчато-покровных областях (на западе их называют надвигово-складчатыми поясами – fold-thrust belts) фундамент залегает неглубоко и по своим реологическим свойствам резко отличается от чехла



Это должно привести к тому, что синклинали не смогут свободно прогибаться вниз (Гончаров, Фролова, 1995)



Это предположение можно проверить
с помощью физического моделирования



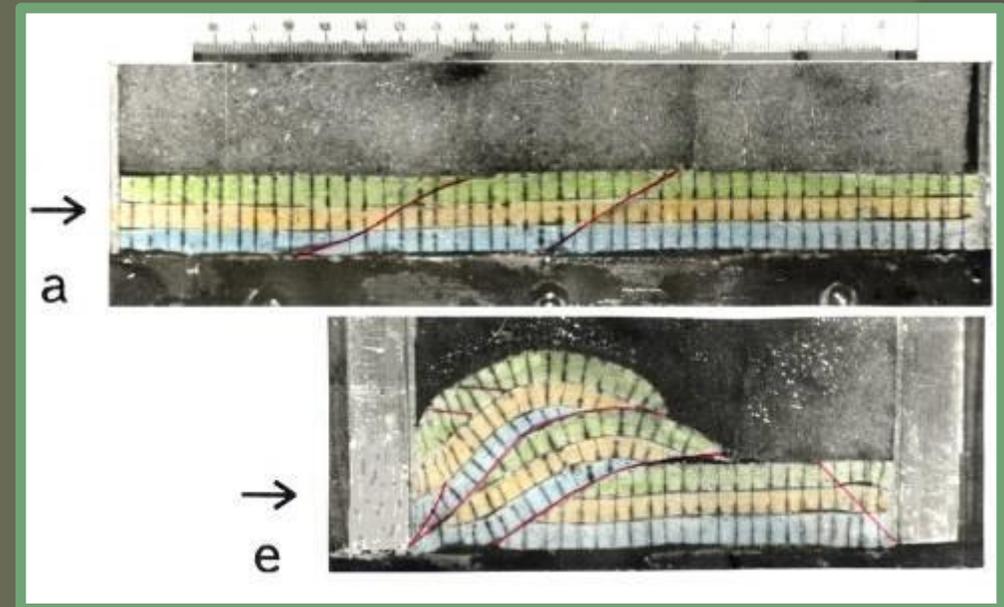
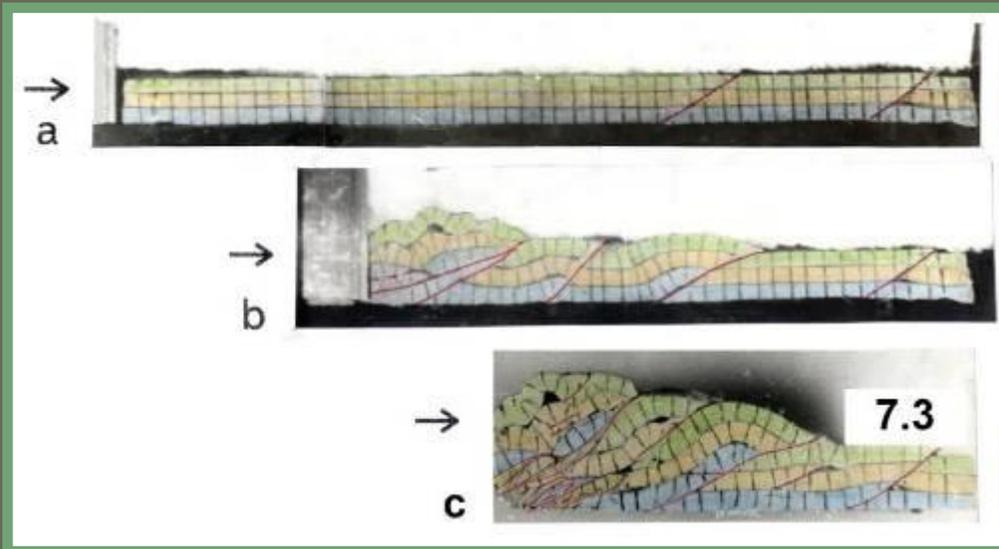
A – модель с жестким основанием;
Б, В – без него

Эквивалентный материал – влажная глина

(Фролова и др., 1997)

Пример физического моделирования фрагментов складчато-покровных областей

Нагружение осуществлялось
с помощью давления бокового
жесткого штампа

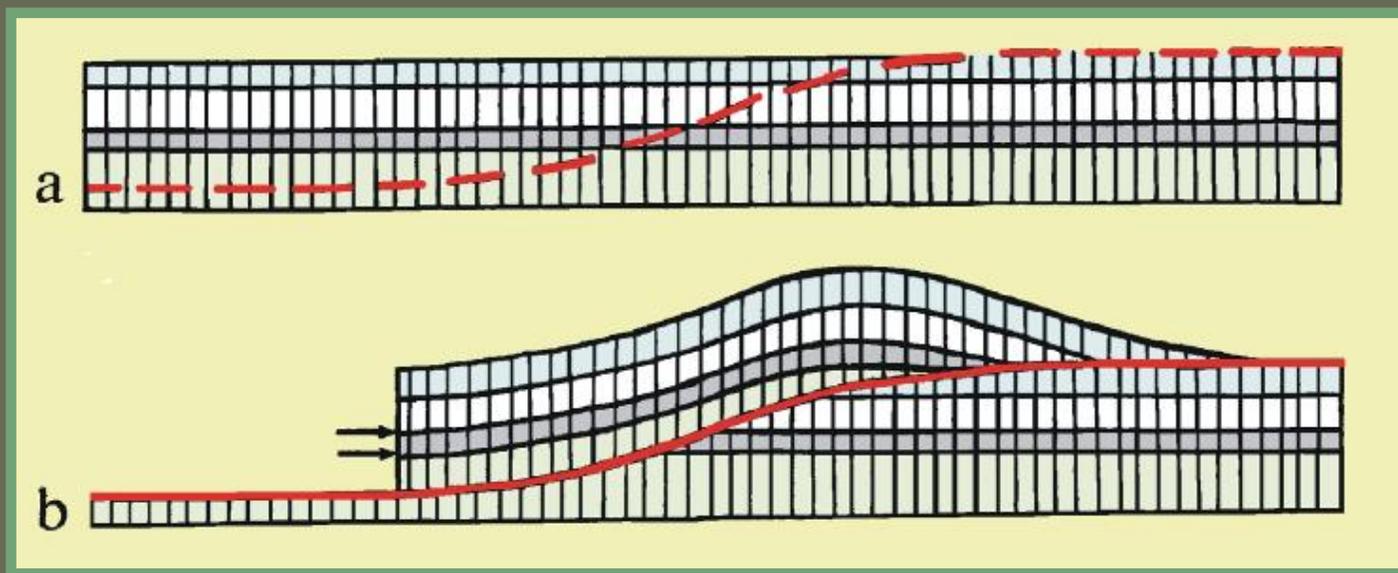


Образцы изготавливались из влажной
достаточно вязкой глины со значительным
сцеплением между слоями

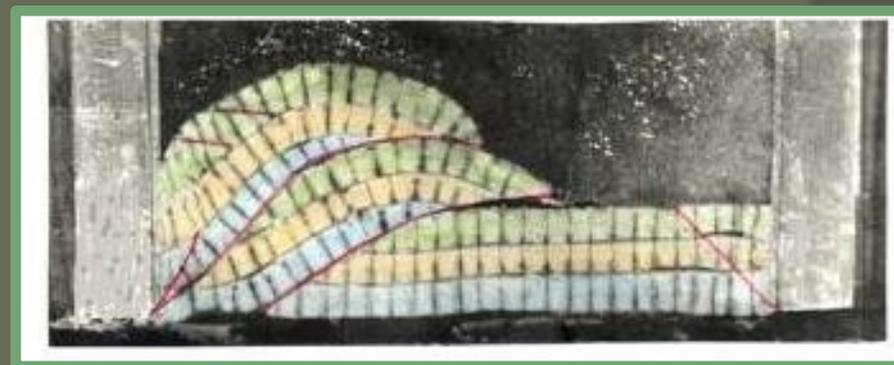
Эксперименты Лаборатории тектонофизики и
геотектоники МГУ, 90-е годы XX века (Фролова и др., 1997)

Почему при вроде бы горизонтальном сжатии
образуются надвиги?
Какова здесь причина формирования складок?

Кинематическая модель формирования шарьяжей (только во внешних частях горно-складчатых сооружений)

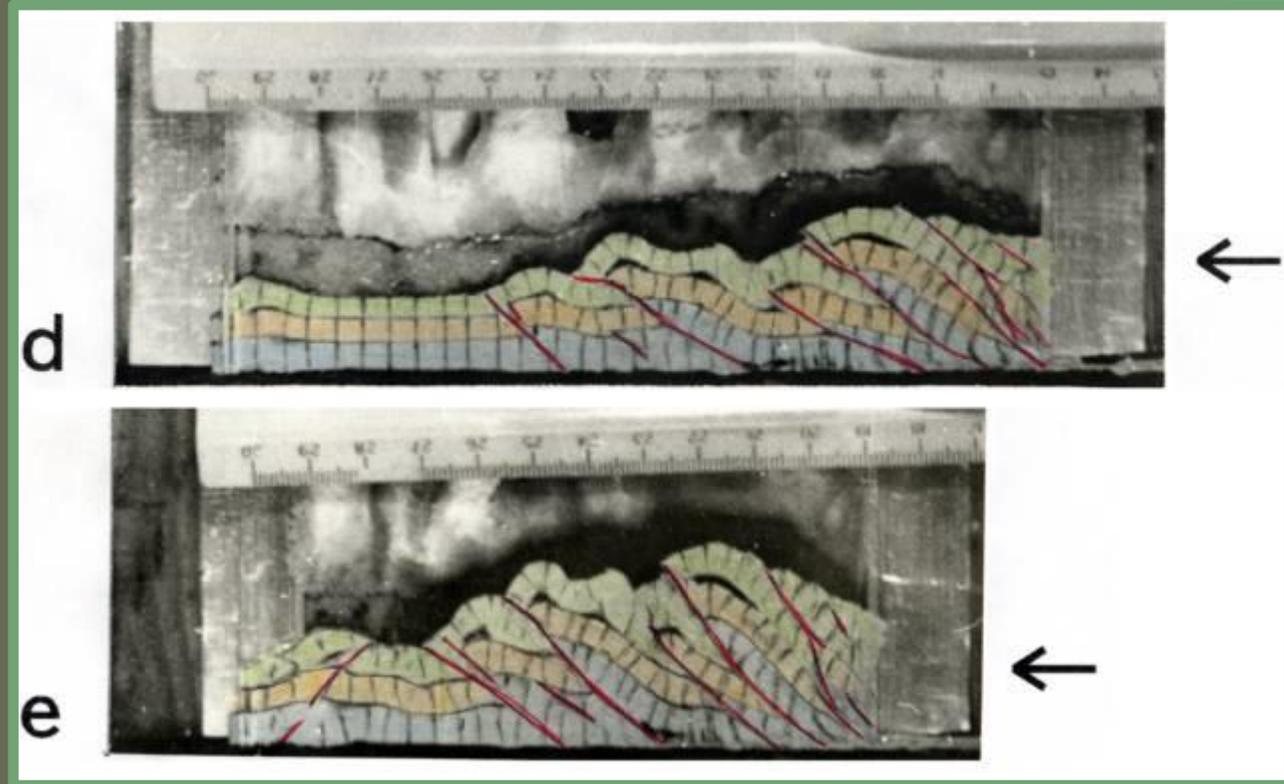


Физическая модель



(Гончаров, Фролова, 1995)

В этом опыте сила сцепления между слоями была более слабой, чем в предыдущем



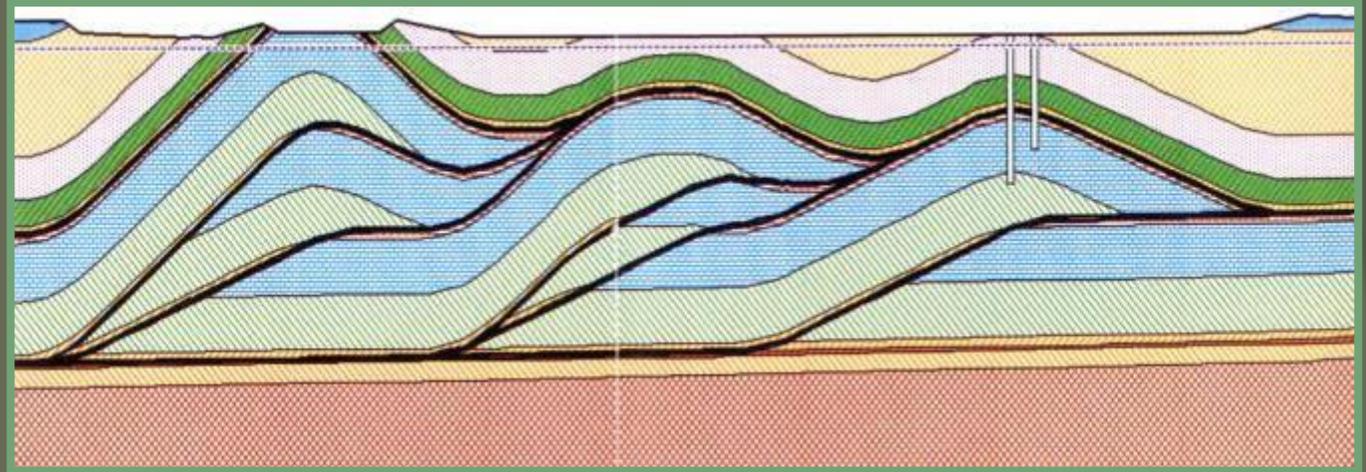
Эксперименты Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ, 90-е годы XX века (Фролова и др., 1997)

В опытах менялась вязкость глины, сила сцепления между слоями, характер вышележащей нагрузки. Смыкающие надвиги были или прорезаны заранее, или возникали сами.

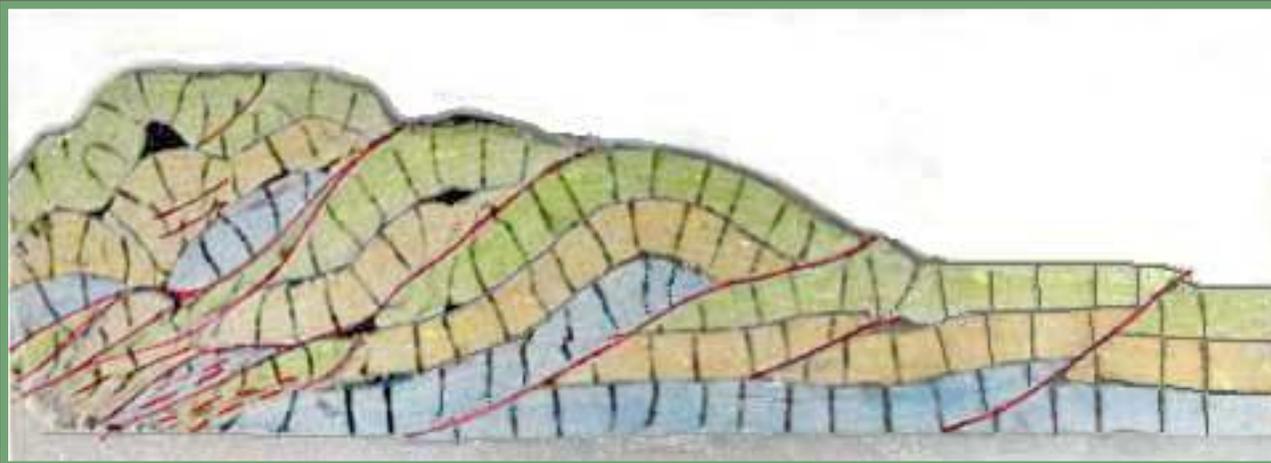
Существуют ли в природе такие жесткие штампы, как в этих экспериментах?

Сравнение физических моделей с моделями, построенными с привлечением геологических данных

Поперечный разрез через одну из
складчато-покровных областей,
составленный по
комплексу данных

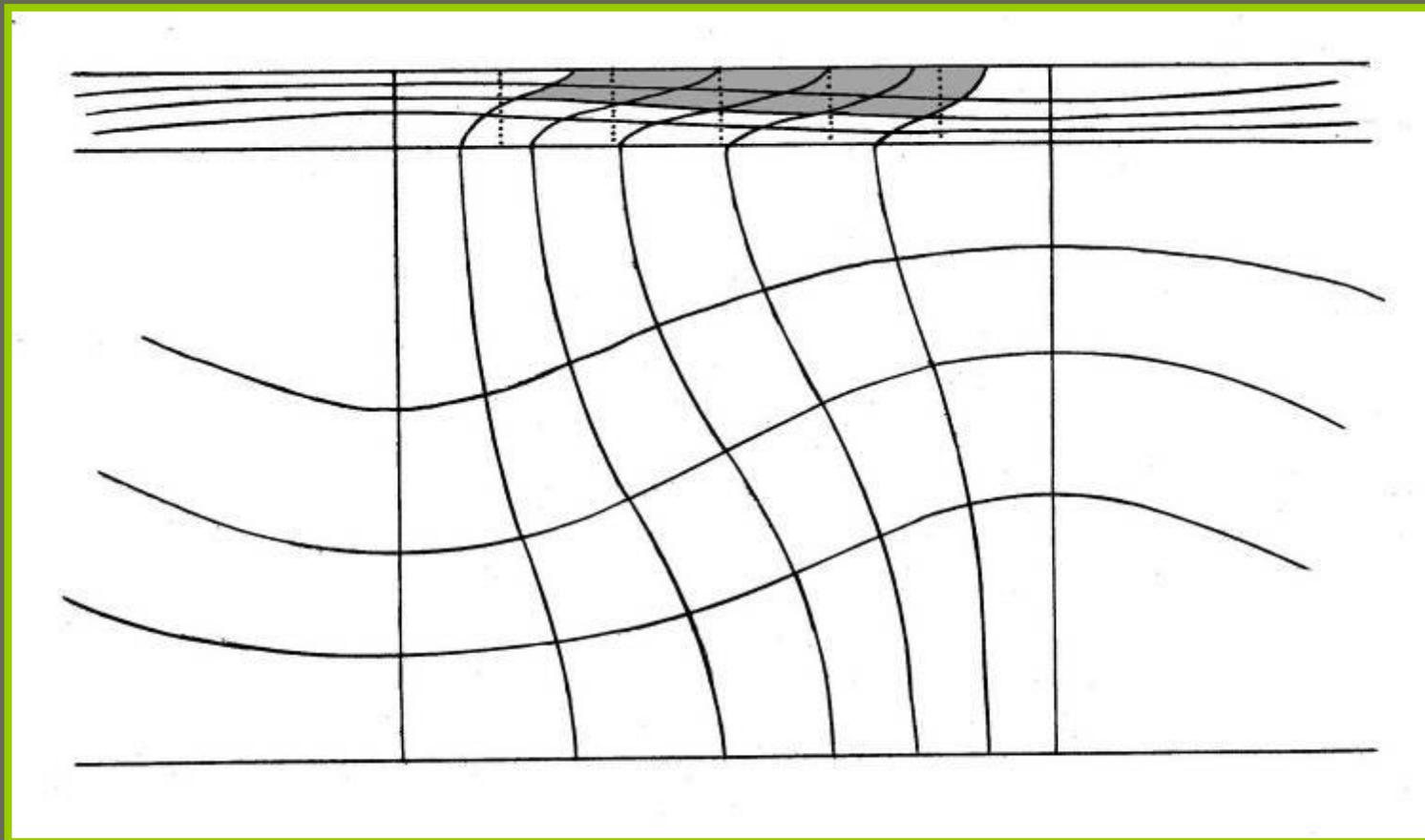


Сбалансированный разрез через Аппалачи



Физическая модель. Образец из
глины.
Получилась структура, весьма
напоминающая природную.

Обстановка формирования шарьяжей



Сравните граничные условия этой модели и экспериментов

Простейшая численная модель двухъярусной компенсационной организации тектонического течения в тектоносфере. Искривленные линии первоначально образовывали ортогональную сетку; первичное вертикальное положение линий этой сетки в верхнем ярусе показано пунктиром; серым цветом показана область возможного формирования шарьяжей (по М.А. Гончарову)

