

Геологический факультет МГУ  
Кафедра динамической геологии  
Лаборатория тектонофизики и геотектоники



# Экспериментальная тектоника

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

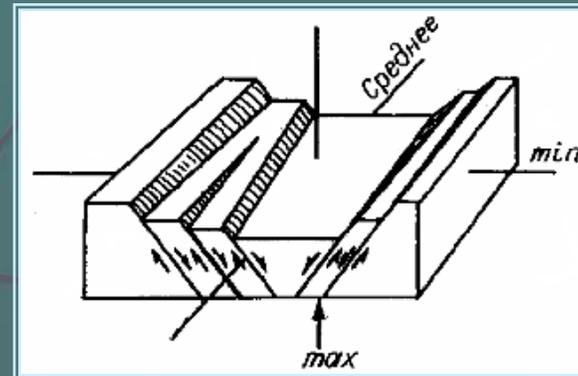
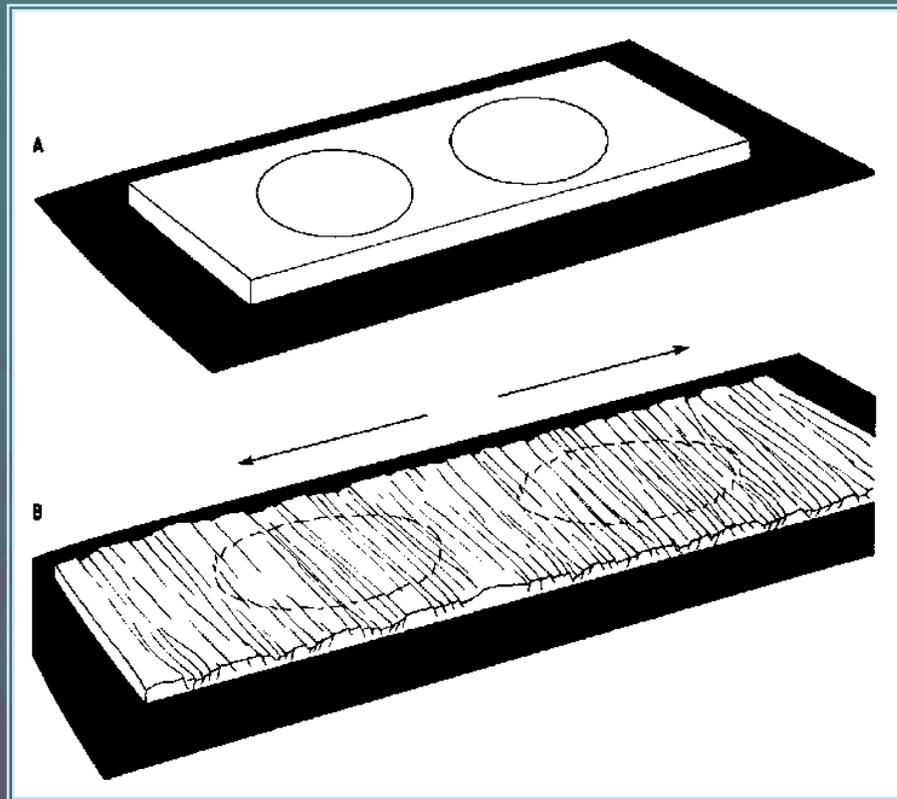


# Лекция 8

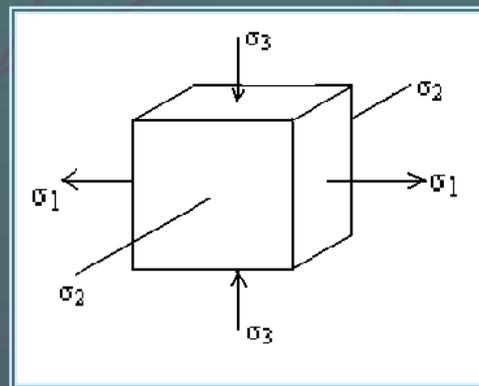
**Моделирование обстановки  
горизонтального растяжения**

# Растяжение, равномерное по всей длине образца

Эксперимент Э. Клооса (1955) - растяжение на резиновой ленте.



Ось растяжения горизонтальна, ось компенсирующего сжатия – вертикальна. Это соответствует геодинамической обстановке растяжения.



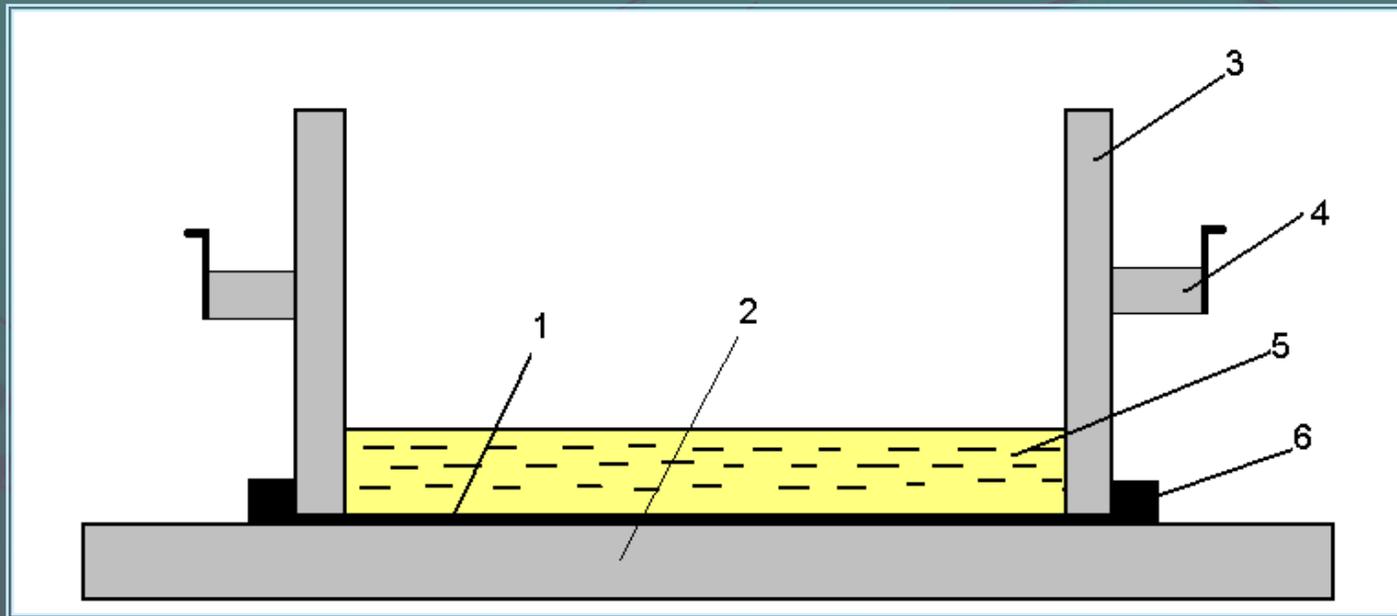
Эквивалентный материал – влажная глина

Сформировалась система сбросов, равномерно распределенная в пространстве, однако сместители этих сбросов падают в разные стороны. Таким образом, мы видим систему горстов и грабенов

Растяжение,  
равномерное  
по всей длине  
образца

## Эксперименты Лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ

### Растяжение на эластичной ленте



Схеме прибора

Эквивалентный материал –  
влажная глина

Важно, чтобы подожка не укорачивалась в горизонтальном направлении.  
В данном случае это требование, в основном, соблюдалось

Растяжение,  
равномерное  
по всей длине  
образца

## Развитие разрывов при растяжении на эластичной ленте

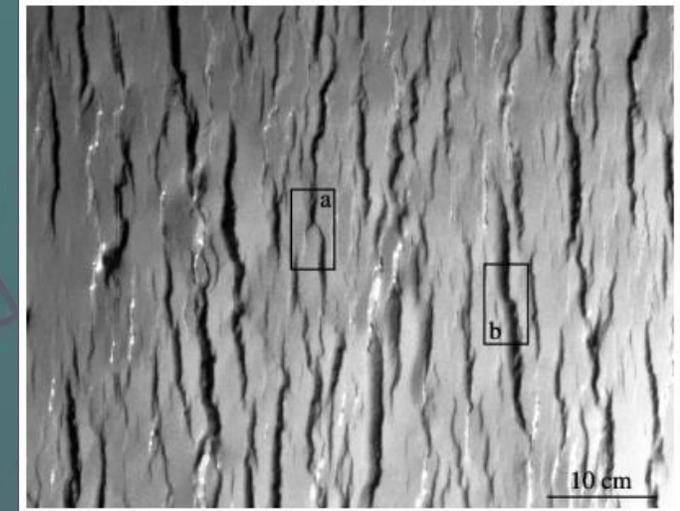
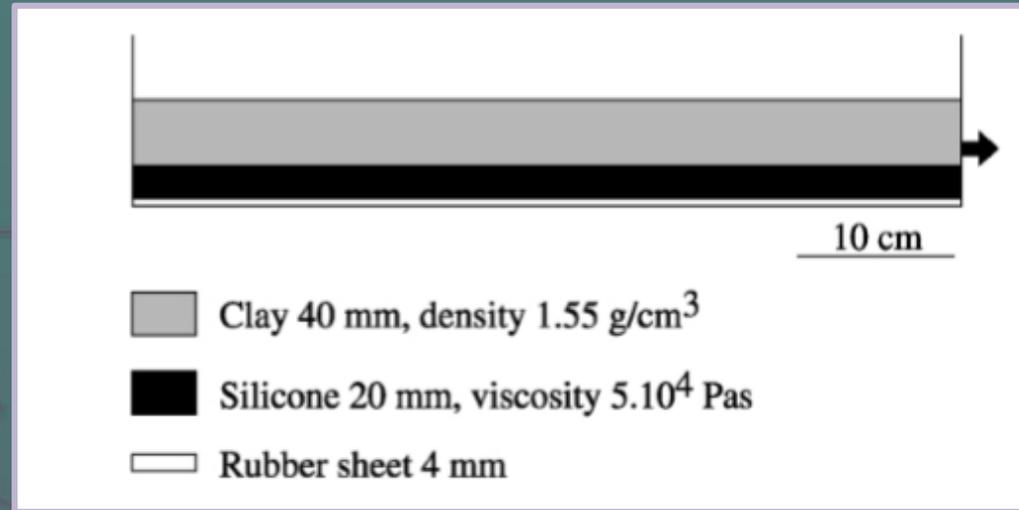
Сформировалась система сбросов с незначительной  
сдвиговой составляющей



Обратите внимание - сбросы не прямолинейны

Растяжение,  
равномерное  
по всей длине  
образца

## Растяжение на резиновом листе



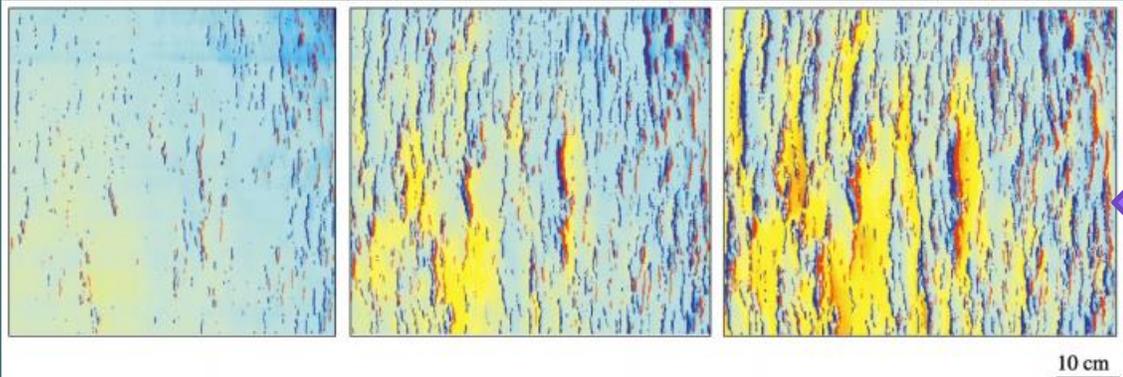
**Установка:** коробка размерами от  $60 \cdot 50 \cdot 10$  до  $60 \cdot 70 \cdot 10$ . Один из бортов неподвижен, другой мобилен. К основанию установки прикреплен резиновый лист толщиной 4 мм таким образом, что при движении мобильного борта, он растягивается.

**Материал:** чистая промышленная каолиновая глина в виде порошка. В порошок добавляли воду так, что в итоге ее содержание получилось около 40% + силиконовый слой

**Модель:** 1. лист резины 2. силикон мощностью 2 см 3. влажная глина мощностью 4 см (некоторые эксперименты без слоя силикона)

**Скорость:** Для одноуровневых моделей эксперименты проводились со скоростями 8,28 см/час и 18 см/час. Для двухуровневых моделей со скоростями 3,96 см/час, 8,28 см/час и 18 см/час.

*N. Bellahsen, J.M. Daniel, 2005 г. Influence of viscous layers on the growth of normal faults: insights from experimental and numerical models*

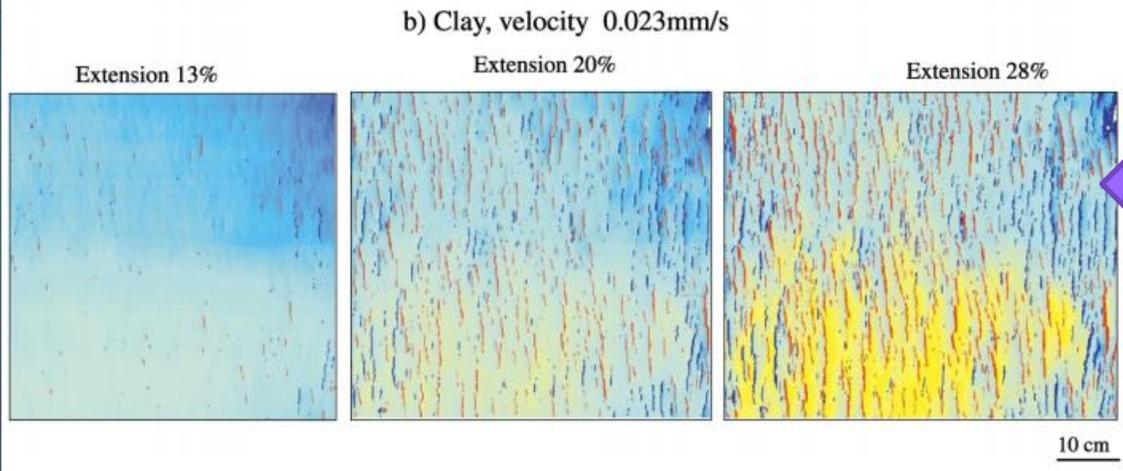


### Глина без силикона

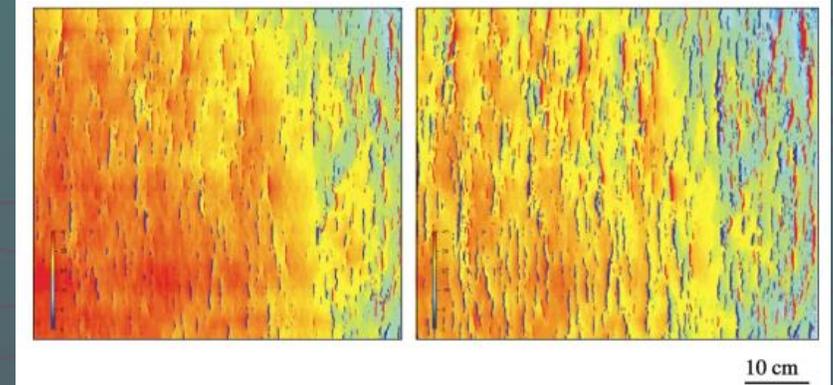
18 см/час



**Вывод:** чем медленнее скорость растяжения, тем более неоднородное и локализованное распределение разломов в пространстве



8 см/час

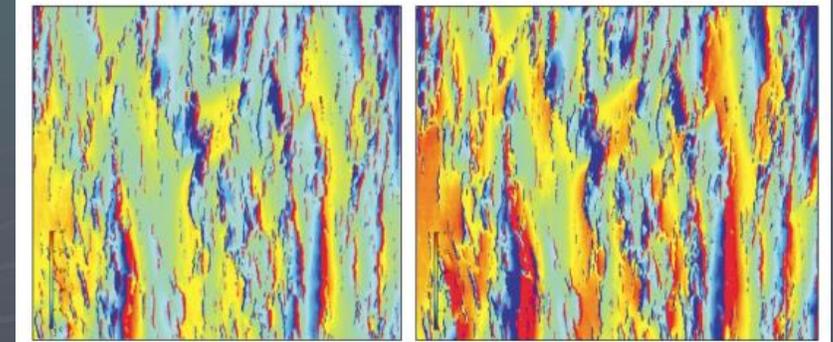


### Глина с силиконом:



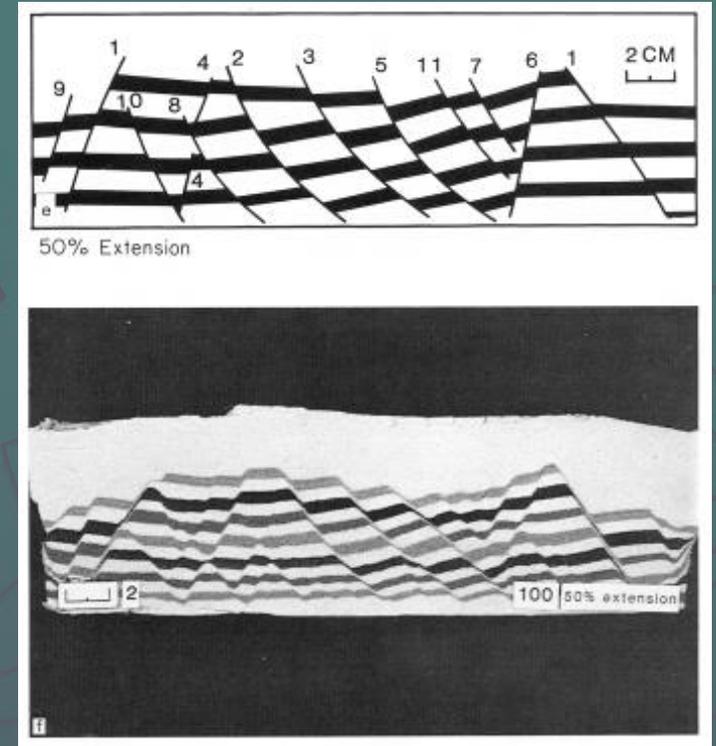
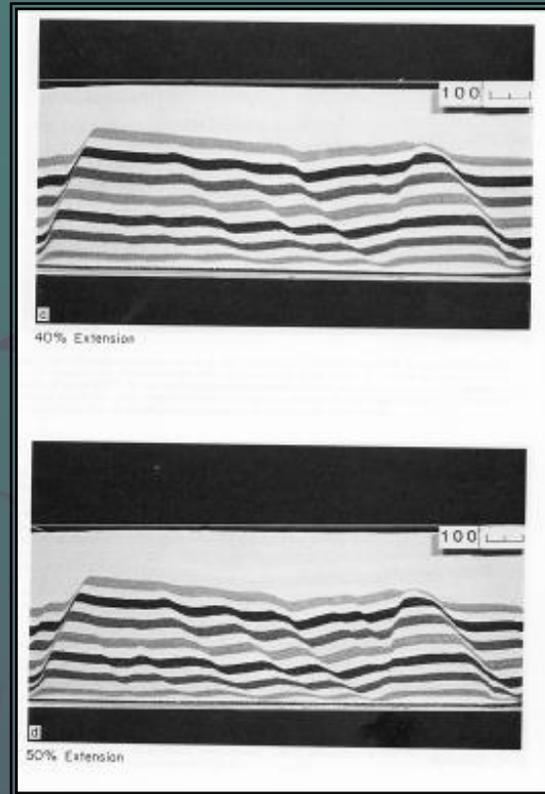
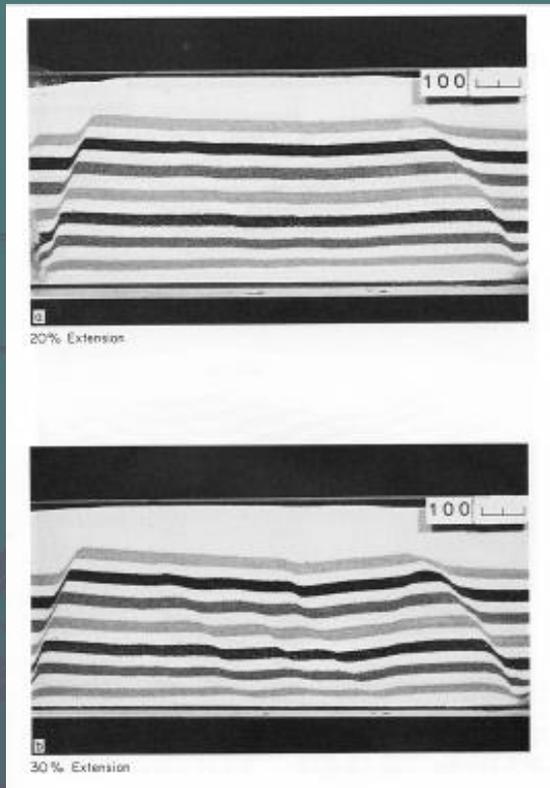
**Верхние:** 18 см/час

**Нижние:** 3,96 см/час



Растяжение,  
равномерное  
по всей длине  
образца

## Эквивалентный материал-песок



(a-d) Развитие разрывов в условиях однородного растяжения над однородно растягиваемой резиновой пластиной.

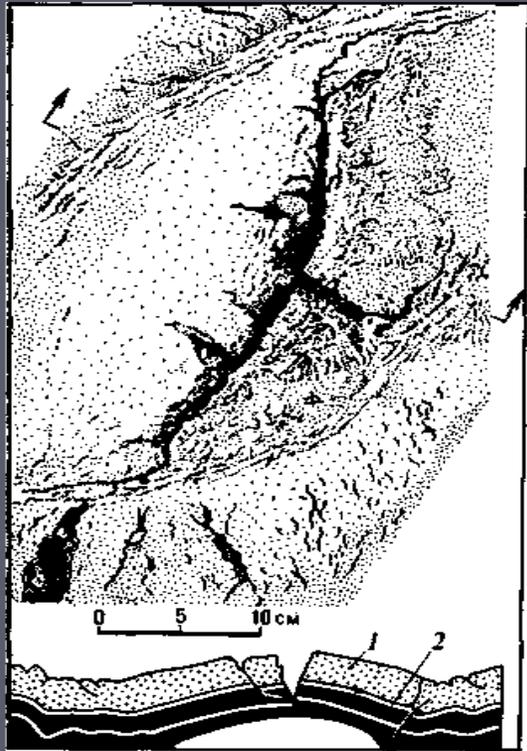
(e) Разрез через разрывную структуру, показывающий развитие равномерно распределенных листрических разрывов, а также поворот слоев между сместителями разрывов.

*K.R. McClay & P.G. Ellis (1987)*

# Первые эксперименты

- ▶ Эксперименты по воспроизведению зон растяжения проводились еще в конце XIX века. В 1892-1894 годах в Германии ставил эксперименты ученый **Э. Рейер**. Его можно считать основоположником экспериментальной тектоники в современном понимании. Он моделировал всевозможные обстановки, в том числе растяжение – получал горсты, грабены, структуру будинажа, изучал радиальные и концентричные разрывы, осложняющие куполовидные антиклинали и т.д. В первой половине XX века ученые начали рассматривать структуры растяжения более подробно. **Г. Клоос**, например, помимо сдвигов, моделировал грабены (Cloos H., 1930).
- ▶ Одни из самых известных экспериментов принадлежат **Э. Клоосу** (Cloos E., 1968) – в своей работе он попытался симитировать региональные структуры побережья Мексиканского залива. В задачи исследования входило воспроизведение максимально симметричных грабенов. Эквивалентным материалом служила глина. Для создания симметричного растяжения он использовал два вида приборов, на которые нагружался материал: состыкованные деревянные доски и металлические пластины, наложенные друг на друга, которые в процессе двигались в противоположные стороны.

# Моделирование сбросов над сводовыми поднятиями



Экспериментальное воспроизведение  
Байкальской рифтовой системы.  
(вспучивание вермикулита при нагревании)  
(по Лучицкому и Бондаренко, 1967).

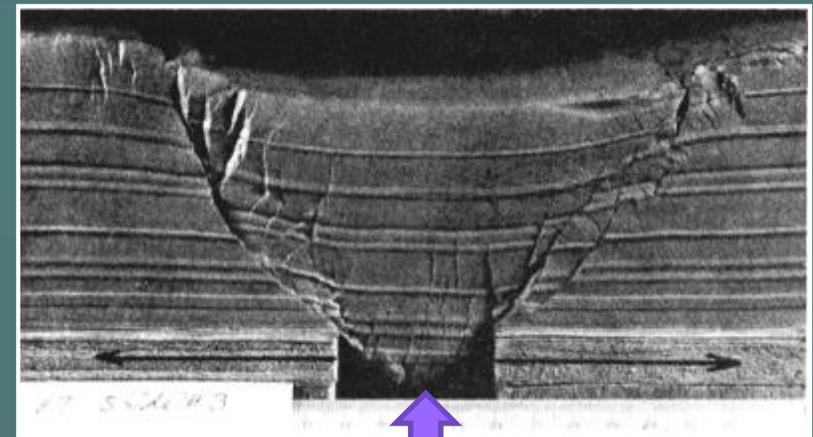
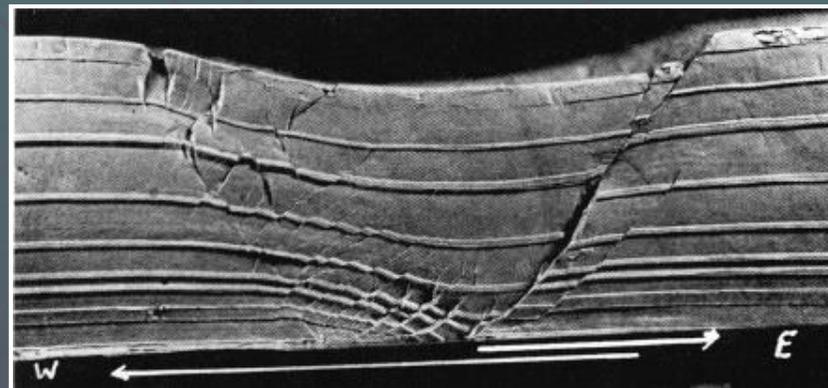
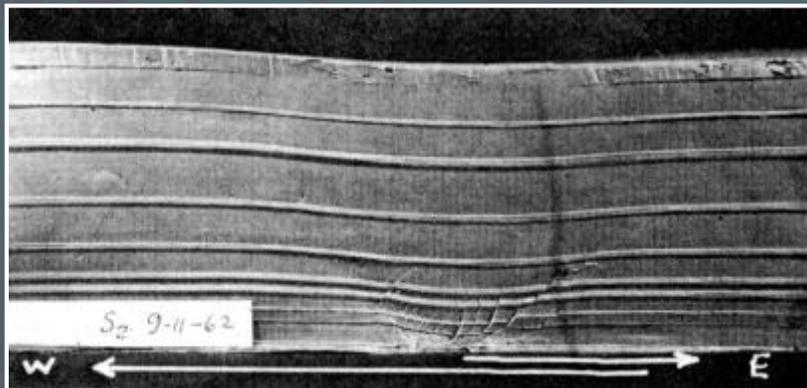
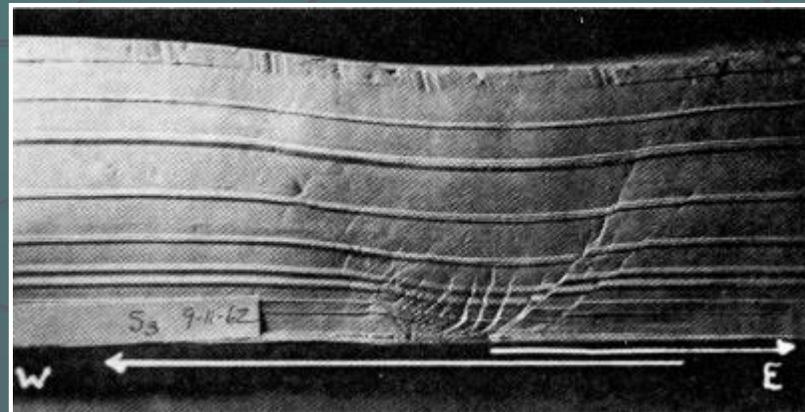
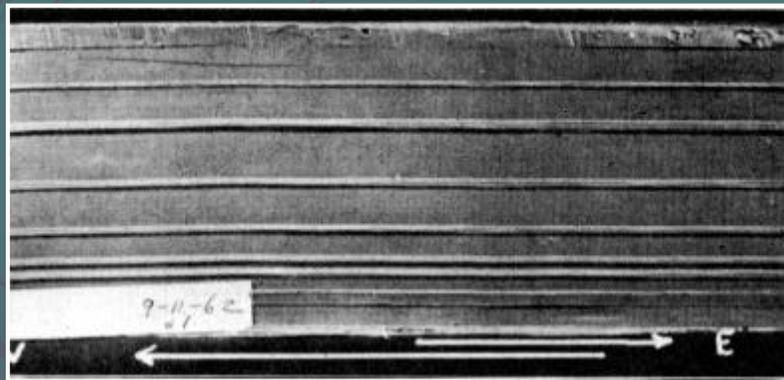


Опыт Г. Клооса по моделированию структур  
растяжения над растущим поднятием  
(резиновый баллон надувался в процессе опыта)  
(из *Методы моделирования*, 1988)

# Формирование грабенов в экспериментах

Эквивалентный материал - глина

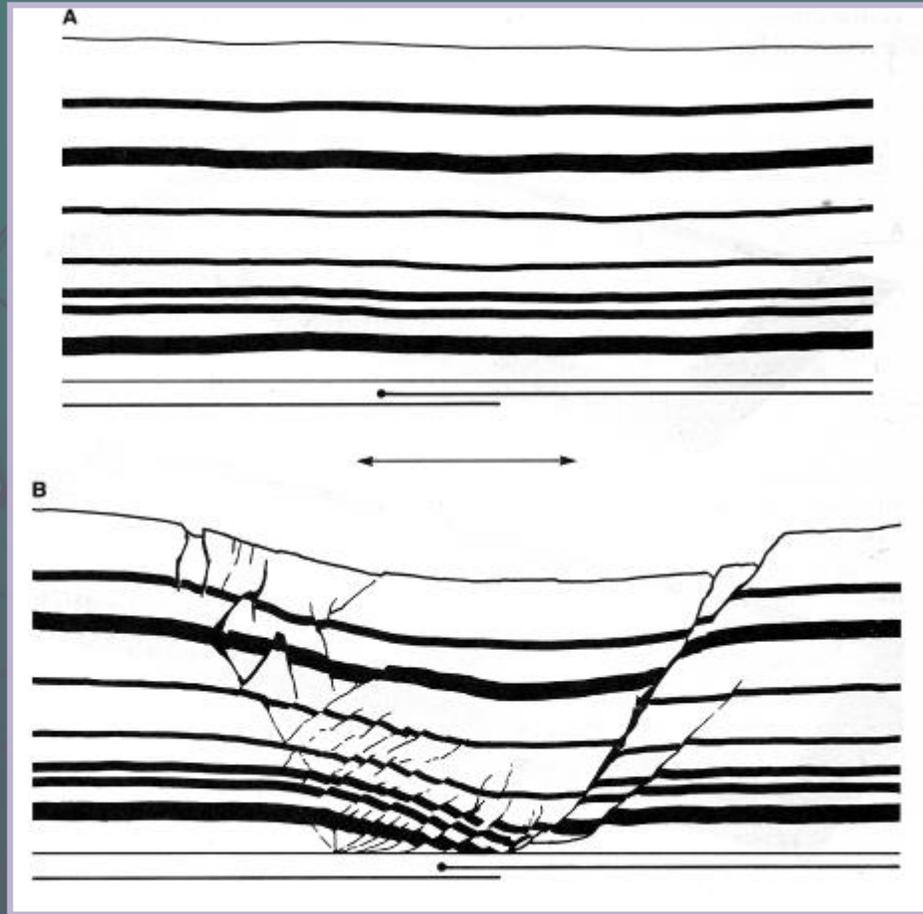
Модели Э. Клооса (1968)



Здесь глина лежала на двух  
деревянных досках

Брикет из влажной слоистой глины  
лежал на двух тонких  
перекрывающихся пластинах,  
которые постепенно раздвигались,  
обеспечивая растяжение  
в зоне перекрытия.

## Моделирование отдельных грабенов

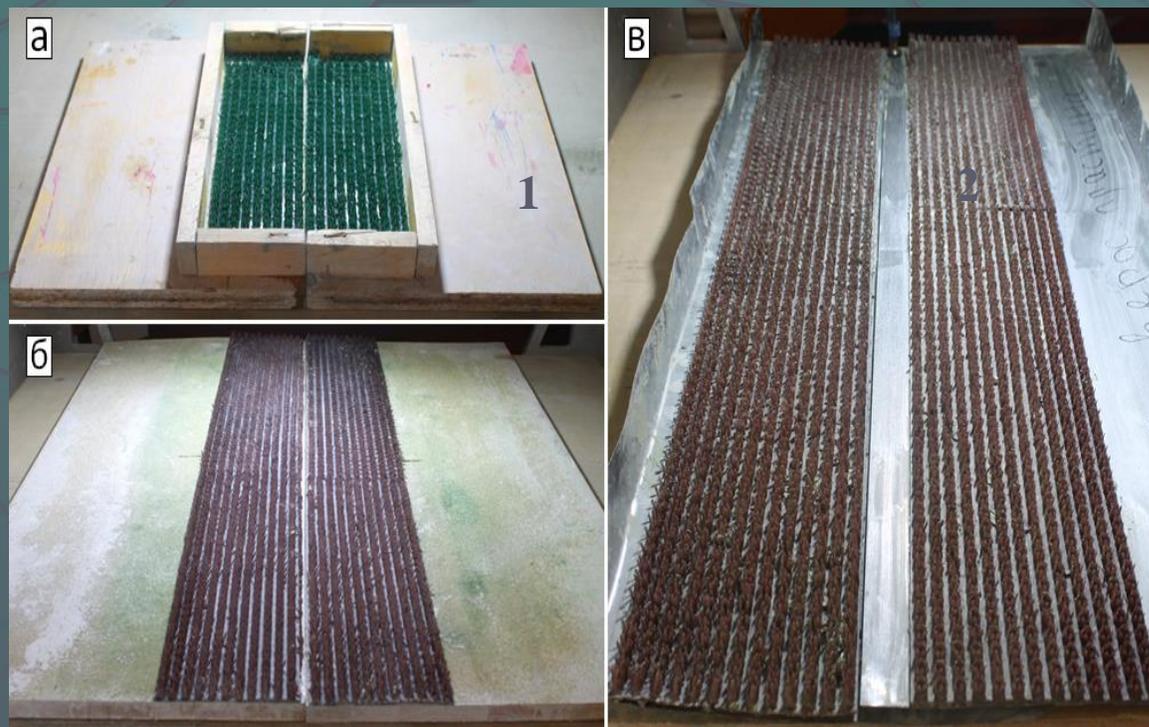


### Эксперимент Э. Клооса, 1968 (рисунок по фотографии)

Сформировался асимметричный грабен. Правое ограничение имеет слабо выраженную листрическую форму. Слева видна система мелких антитетических сбросов, вследствие движения по которым слои наклонены к центру грабена

Техника моделирования

Приспособление к прибору  
для тектонофизического  
моделирования



деревянный sand-box (а)

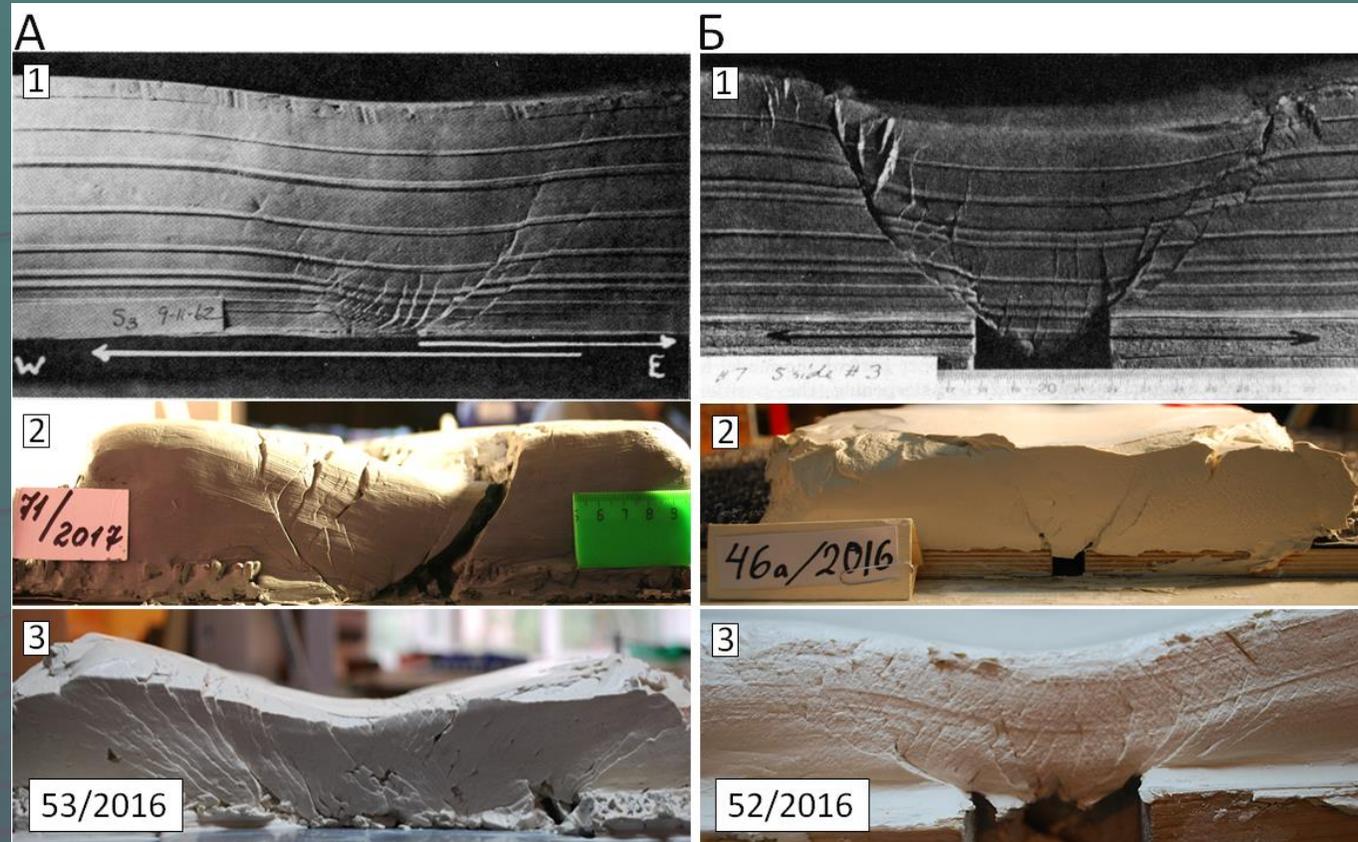
фанерные доски с шипами (б)

металлические пластины, перекрывающие  
друг друга, с шипами и бортиками (в)

Эквивалентные материалы

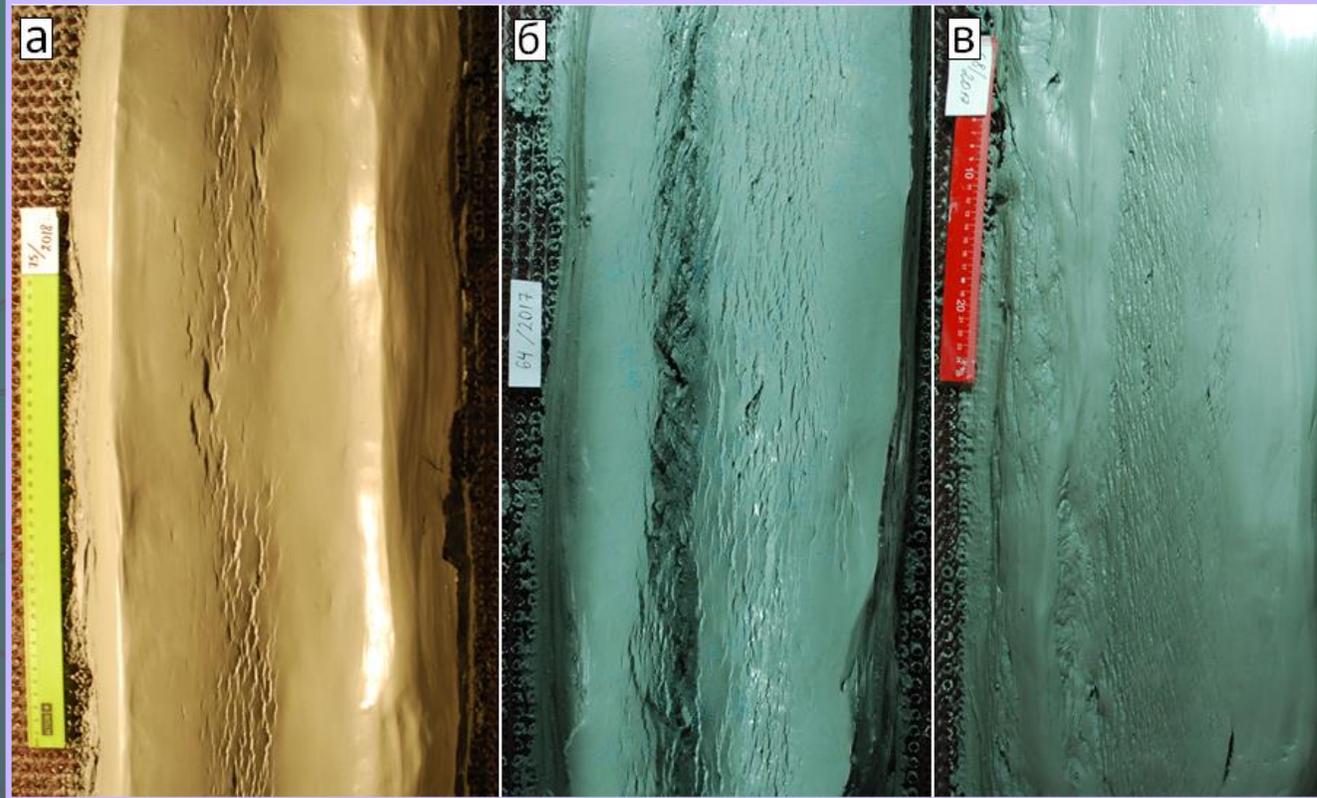
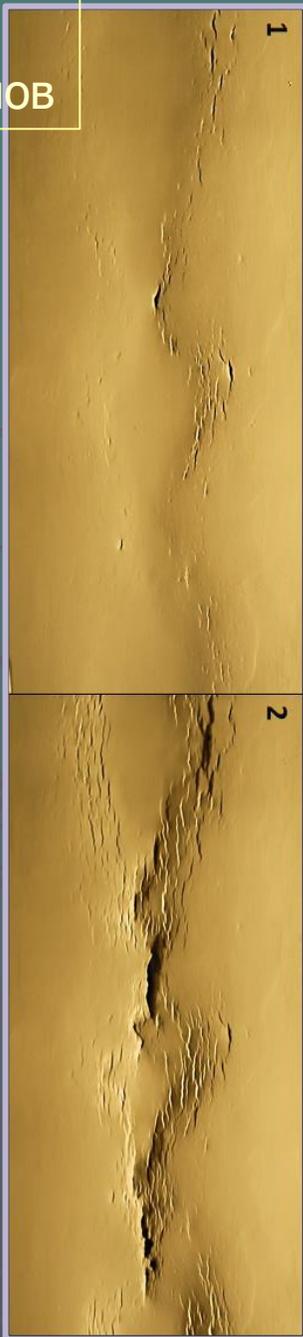
каолиновая глина (1); бентонитовая глина (2)

# Модели грабенов



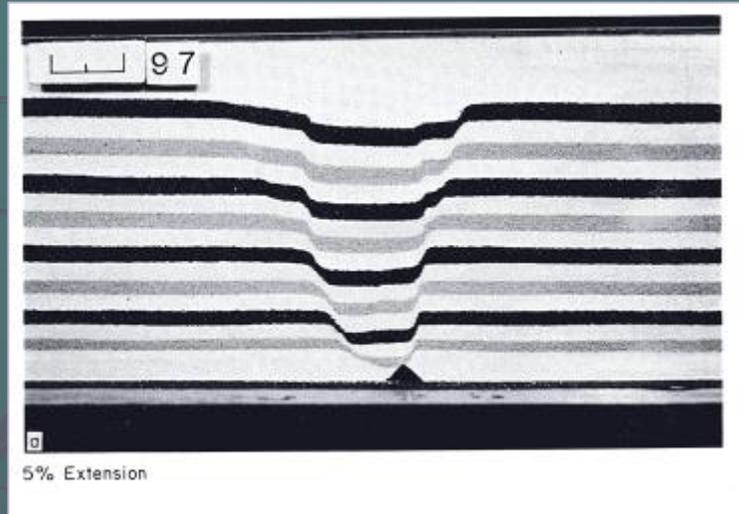
Поперечные разрезы моделей рифтовых зон: **А** – на металлических пластинах, **Б** – на деревянных досках. **А1, Б1** – по Э. Клоосу (Cloos E., 1968); **А2,3 и Б2,3** – в экспериментах лаборатории тектонофизики и геотектоники

# Моделирование отдельных грабенов

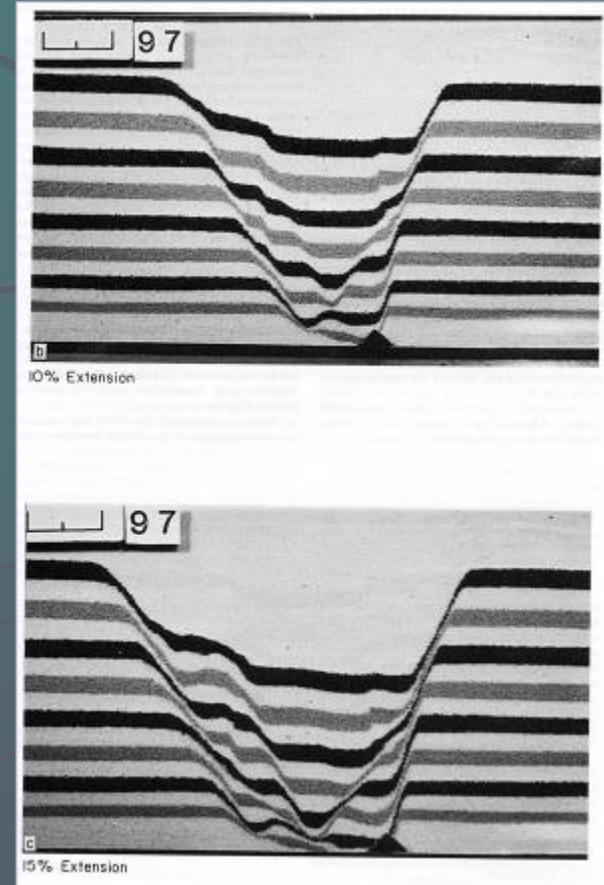


Грабены. Вид сверху. Эксперименты лаборатории тектонофизики и геотектоники

# Моделирование грабенов с применением песка

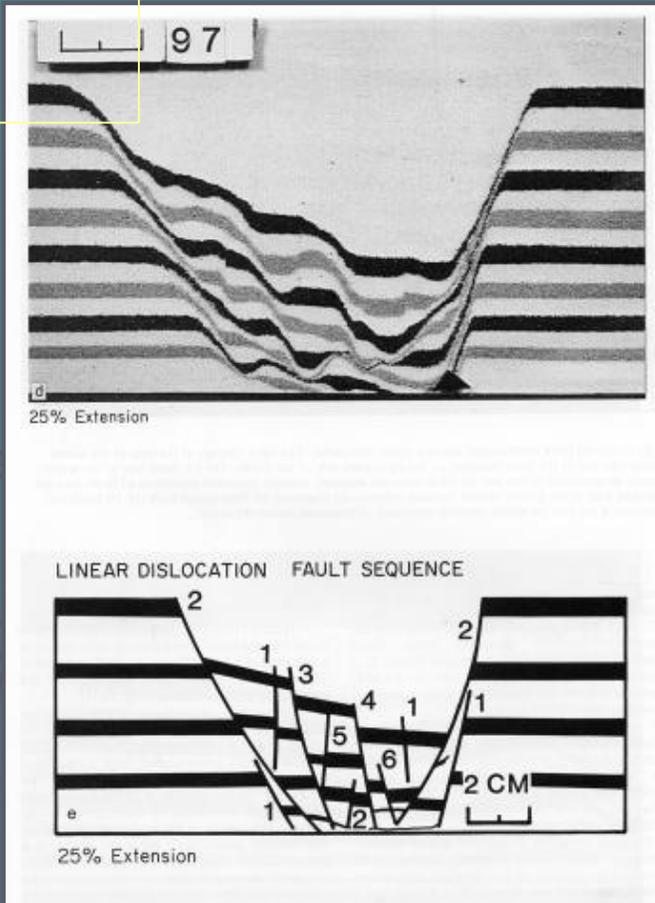


Разрывы, развивающиеся над линейной зоной. Черный треугольник в основании модели показывает конец фиксированной плиты основания с правой стороны модели. Левая сторона модели постепенно продвигается налево



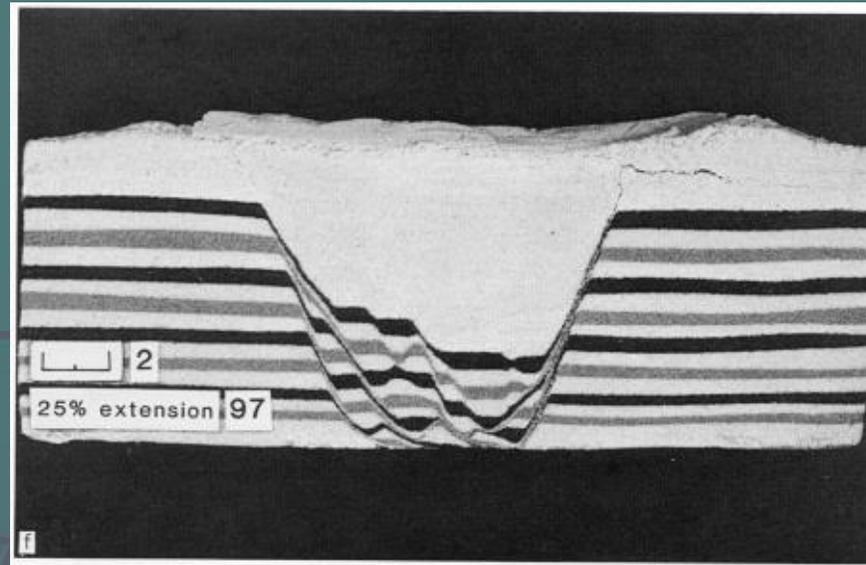
Analogue models of extensional fault geometries  
*K.R. McClay & P.G. Ellis (1987)*

## Моделирование отдельных грабенов

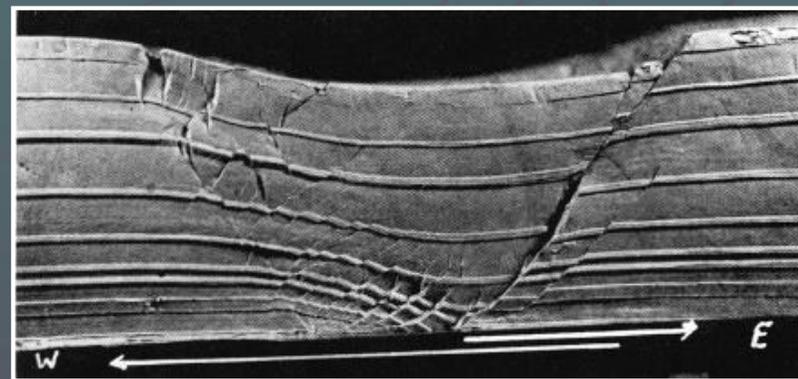


Разрез через разрывную структуру, показывающий преобладание зарождающихся разрывов в висячем крыле грабена. Небольшое обрушение лежащего крыла обрезано разрывом, ориентированным под большим углом (1).

*K.R. McClay & P.G. Ellis (1987)*

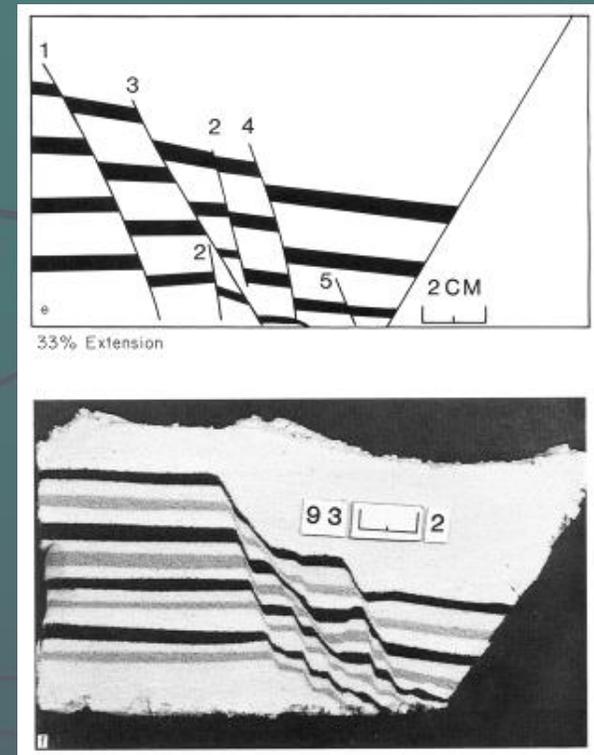
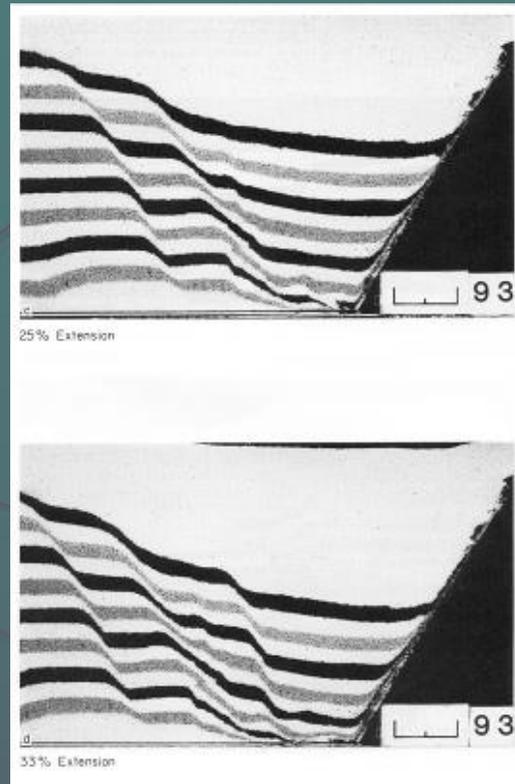
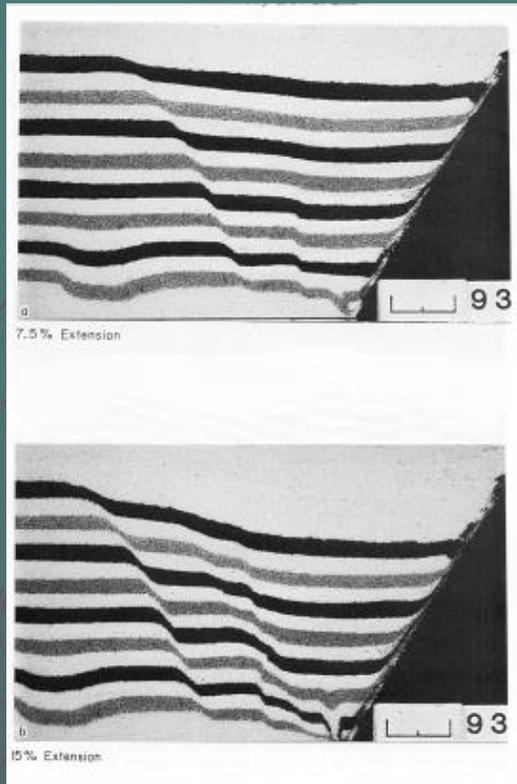


Один из разрезов, срезающий 2 см в модели, показывающий непрерывность структур поперек модели



Для сравнения - эксперимент Э. Клооса (1968)

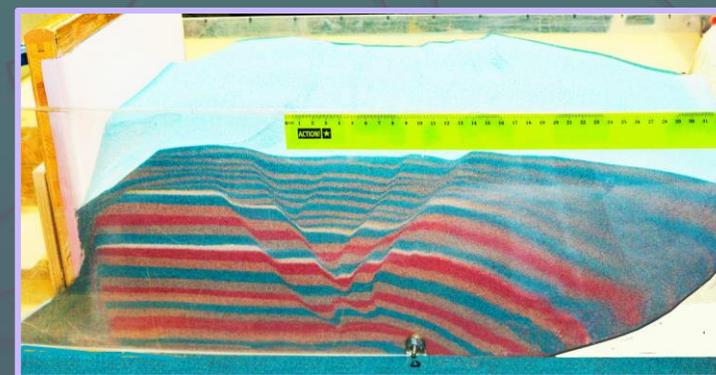
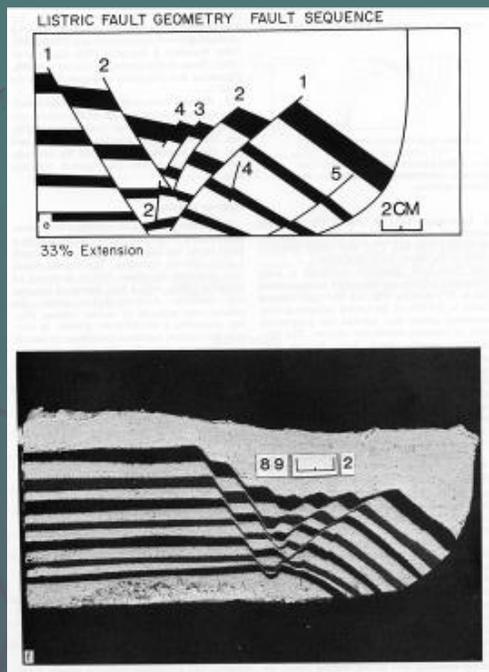
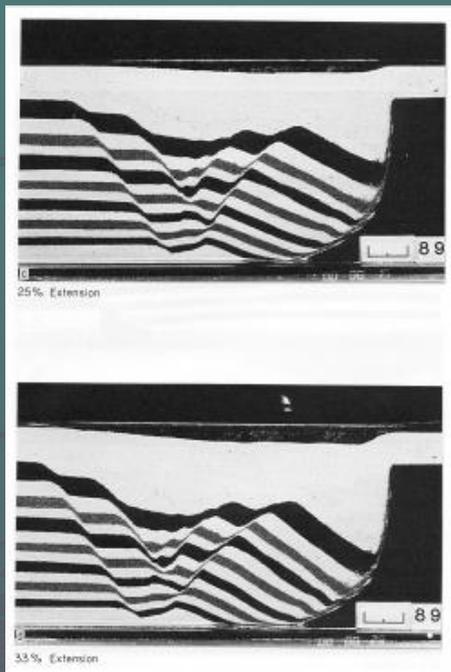
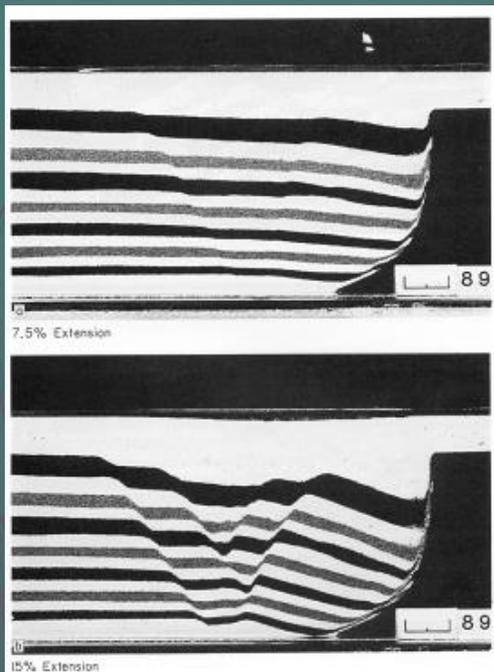
# Моделирование грабена, ограниченного плоским разрывом



- (a-d) Последовательное развитие разрывов. Правая сторона модели неподвижна, в то время как левая движется в противоположную сторону с постоянной скоростью.
- (e) Разрез через разрывную структуру, показывающий предпочтительное зарождение разрывов в висячем крыле. Имеет место небольшой поворот слоистости.
- (f) Один из разрезов, срезающий 2 см в модели.

*K.R. McClay & P.G. Ellis (1987)*

# Моделирование грабена, ограниченного листрическим разрывом



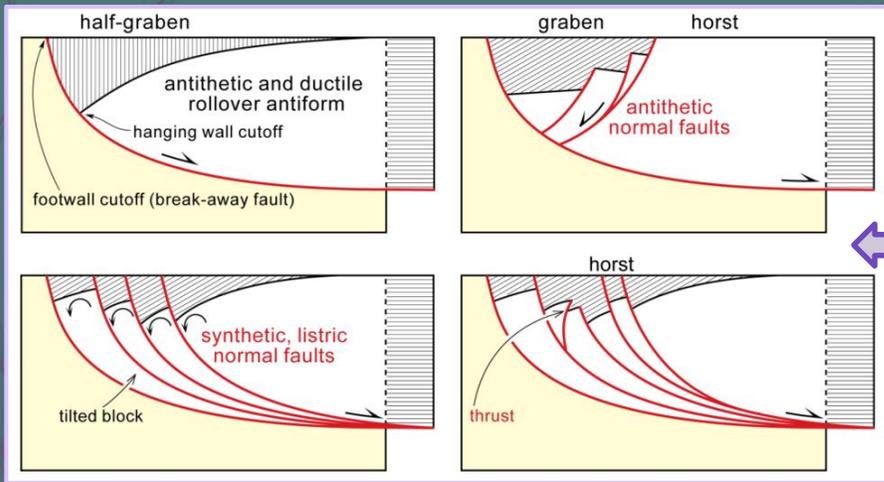
(a-d) Развитие разрывов, ассоциирующихся с листрической поверхностью.

(e) Разрез через разрывную структуру, показывающий плоские и криволинейные листрические разрывы развивающиеся в центре проседающего грабена. Зарождение разрывов происходит в висячем крыле.

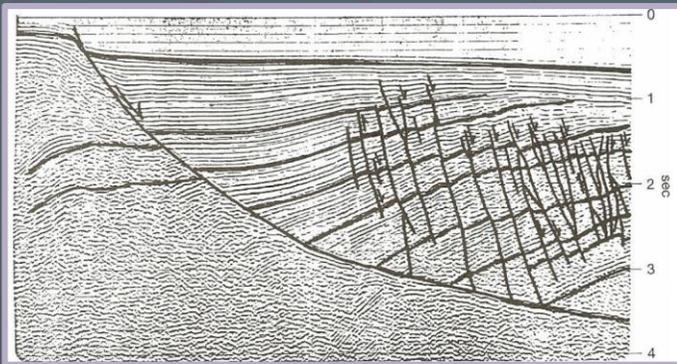
(f) Один из разрезов, срезающий 2 см в модели

Системы сбросов, развивающиеся близ листрического разлома при растяжении. Эксперименты лаборатории тектонофизики и геотектоники МГУ

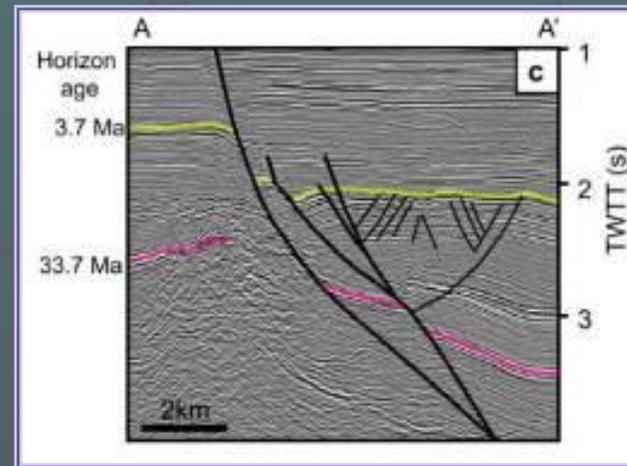
# Структуры второго порядка, связанные с изогнутой конфигурацией поверхности сместителя



Листрическая форма разрыва. Потенциальное зияние висячем крыле компенсируется под влиянием силы тяжести с помощью пластической или разрывной деформации: А - rollover antiform (антиклиналь висячего крыла;) В – система антитетических сбросов (*no Hamblin, 1965*)



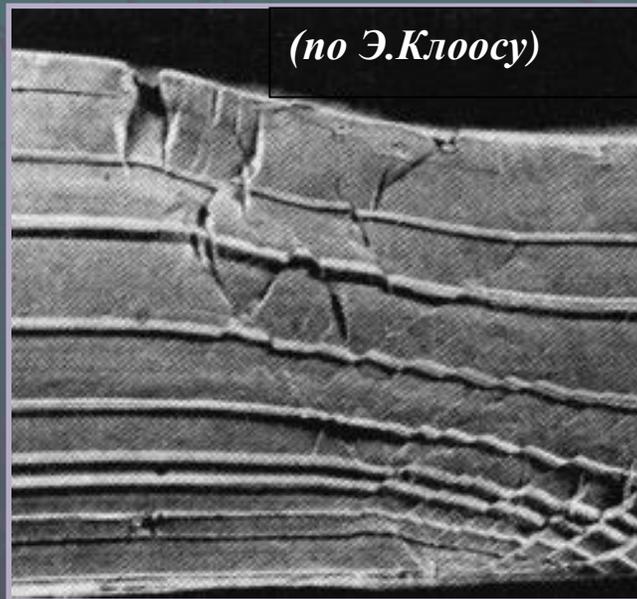
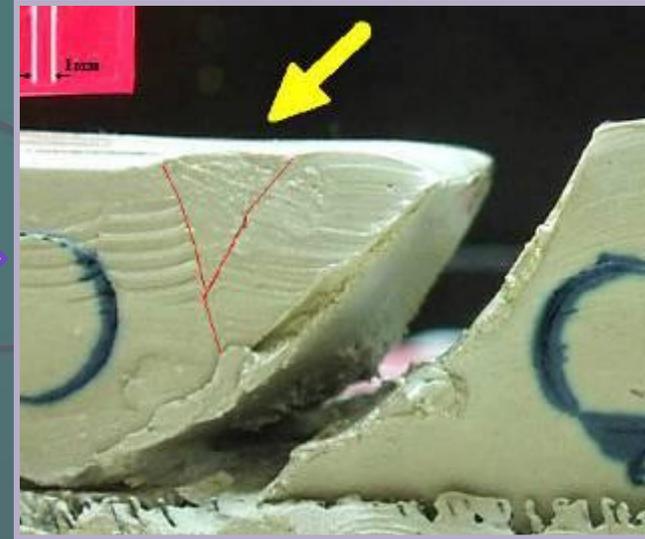
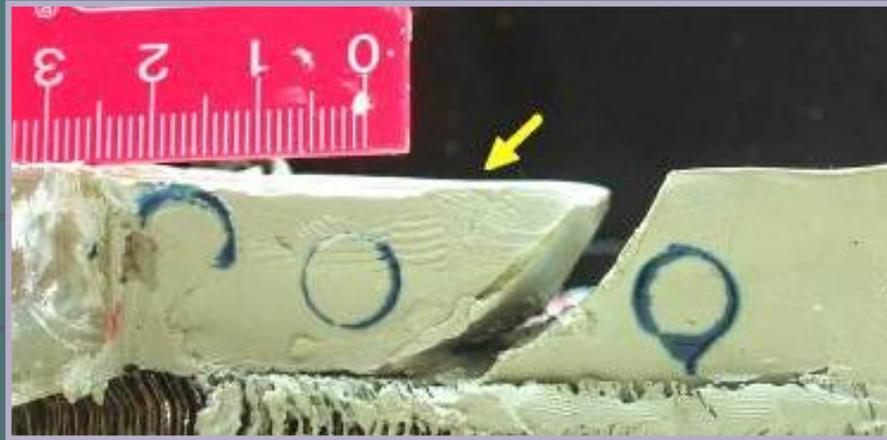
(*Twiss & Moores, 2007*)



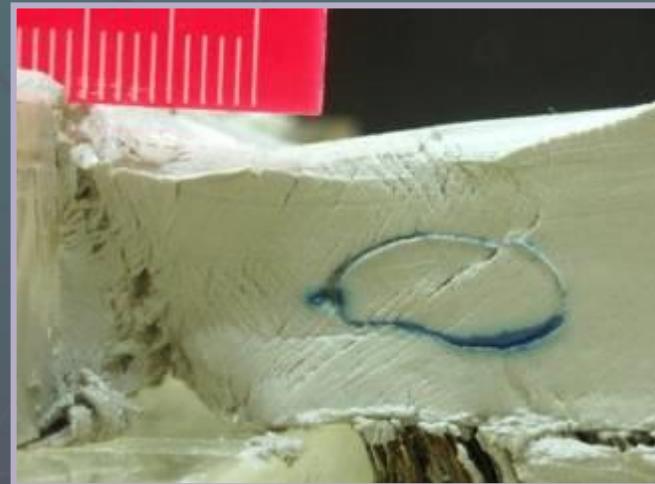
(*Giba et al., 2012*)



# Антитетические разрывы второго порядка в эксперименте

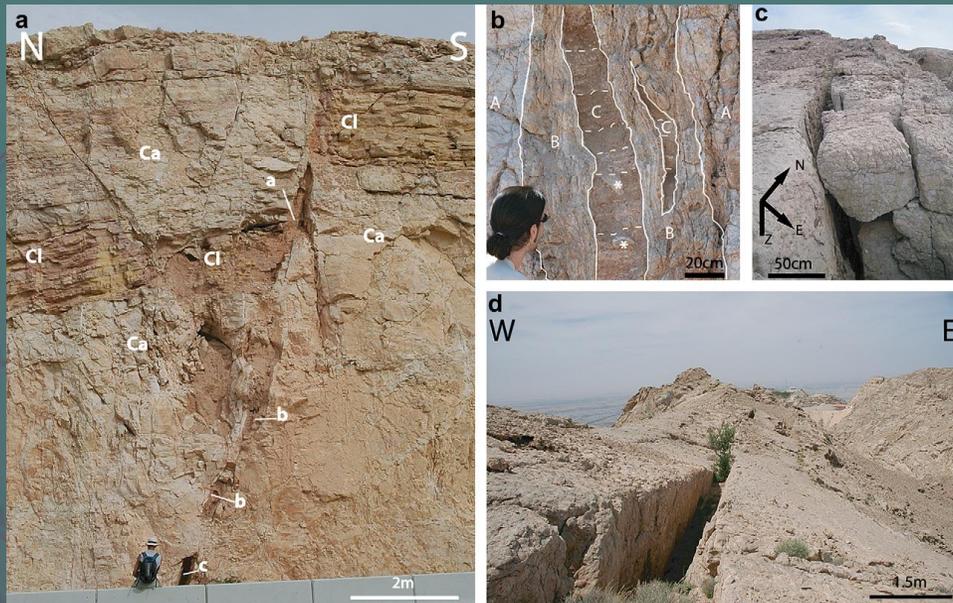


(по Э.Клоосу)



# Пример моделирования грабенообразной структуры растяжения

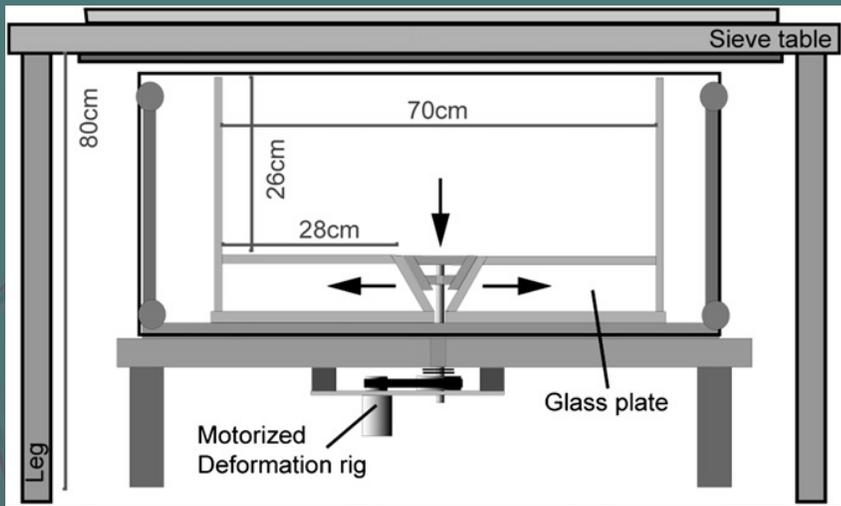
*van Gent et al., 2009*



Аналоговая модель формирования дилатансионных сбросов и разрывов в разрывной зоне развития карбонатных пород с использованием когезивной (связной) полугидратной пудры ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). Эволюция этой дилатансионной разрывной зоны включает спектр процессов, таких как фрагментацию, перенос брекчии силами гравитации и формирование дилатансионных изломов поверхностей

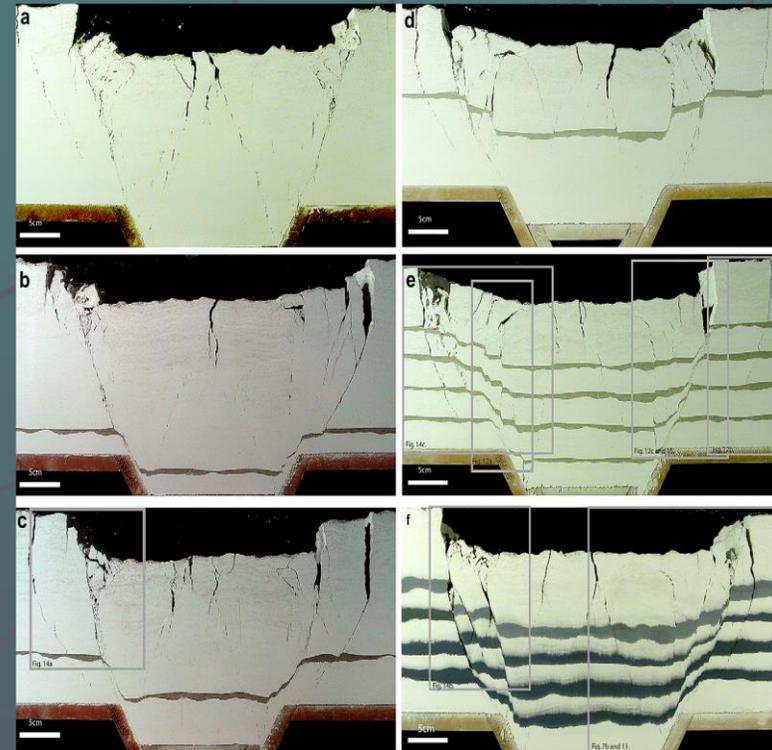
Была произведена оценка условий подобия (предел прочности, когезия, угол внутреннего трения). Были изучены гомогенные и слоистые модели. Использовался песок, как относительно податливый слой и смесь полугидрата с графитом как несколько менее податливый слой.

Деформация была проанализирована посредством фотографирования через определенные промежутки времени и программы Particle Image Velocimetry (PIV) для расчета эволюции поля перемещений. С помощью PIV картина деформации была изучена в деталях.



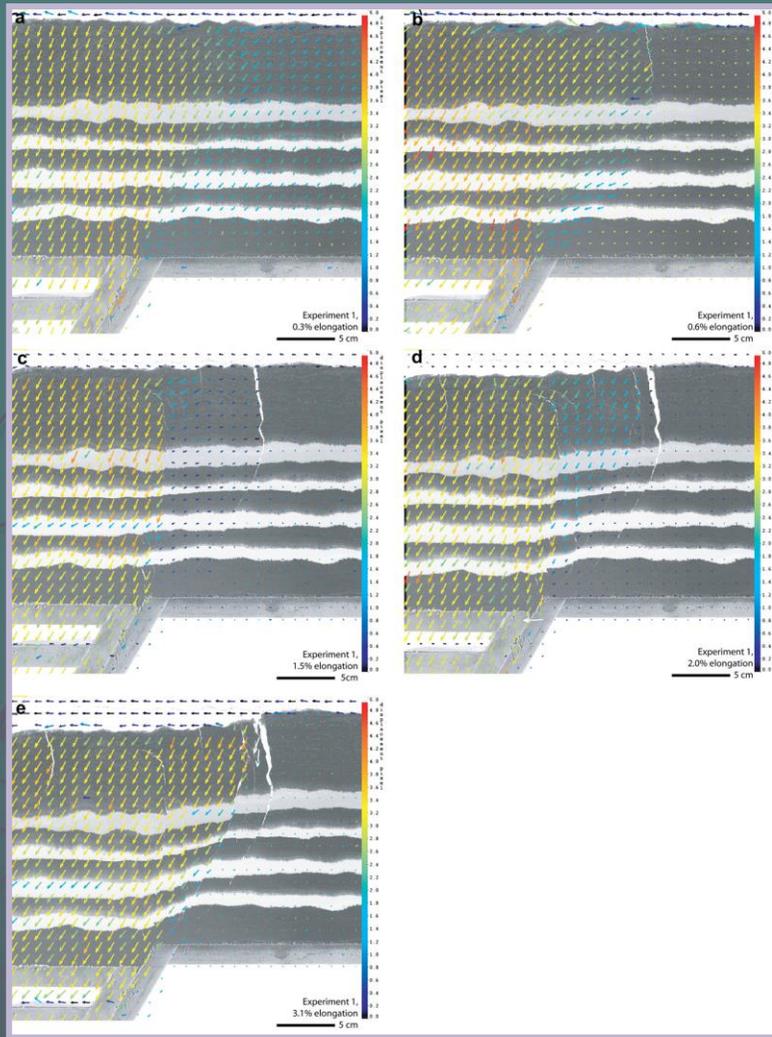
Прибор состоит из панели для деформации размером 70x15 см, смонтированной между двумя гладкими стенками. Наклонные пластины имеют угол 60°. Опущенный блок тянется вниз с помощью электромотора. Это заставляет приподнятые блоки скользить вбок, создавая главную гребенообразную структуру.

В опытах использовалась когезивная (связная) полугидратная пудра ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). Слева – однородные модели. Справа - слоистые модели, использован песок как относительно податливый слой и смесь полугидрата с графитом как несколько менее податливый слой.

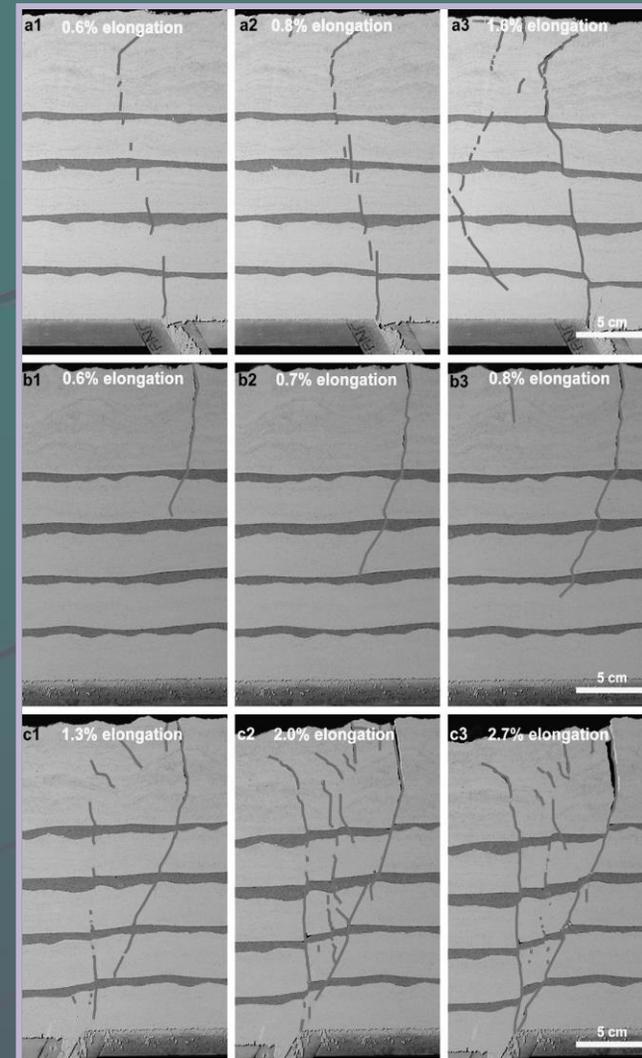


*van Gent et al., 2009*

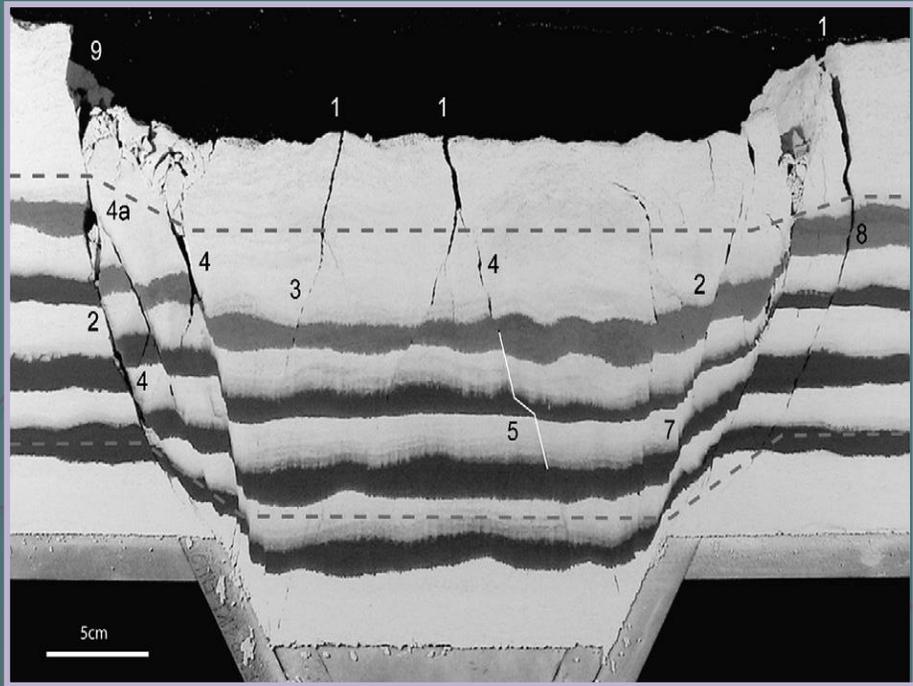
Фотографии экспериментов с использованием различных материалов при растяжении около 7%.



Эволюция разрывной области, визуализированной с использованием метода PIV (Particle Image Velocimetry)

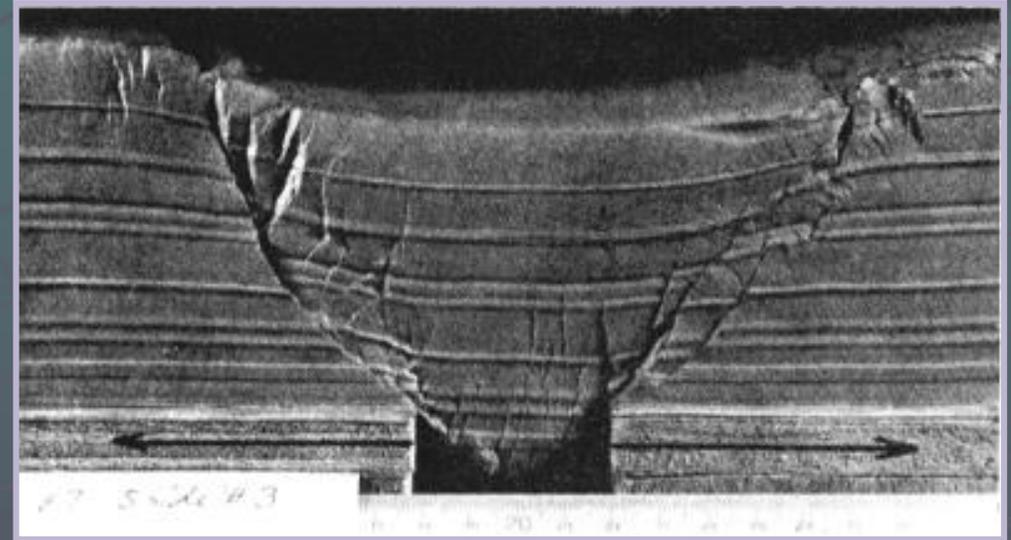


Особенности развития нарушений песчаных прослоев на начальной стадии деформации

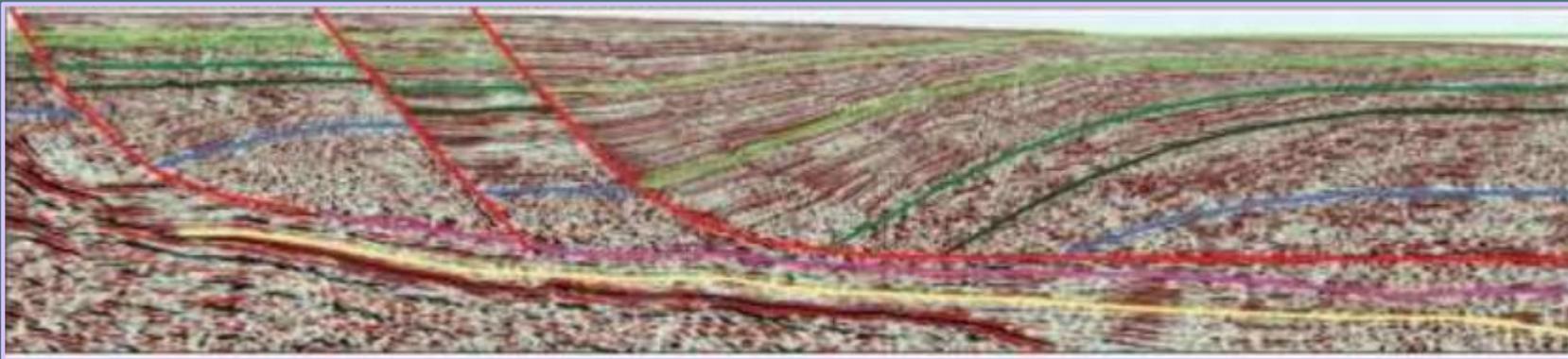


Пример эксперимента с характерными структурами (растяжение 7%).  
Пунктирные линии показывают зоны с различным типом нарушений.

Для сравнения – опыт Е. Клооса на глине



# Моделирование систем растяжения с детачментом

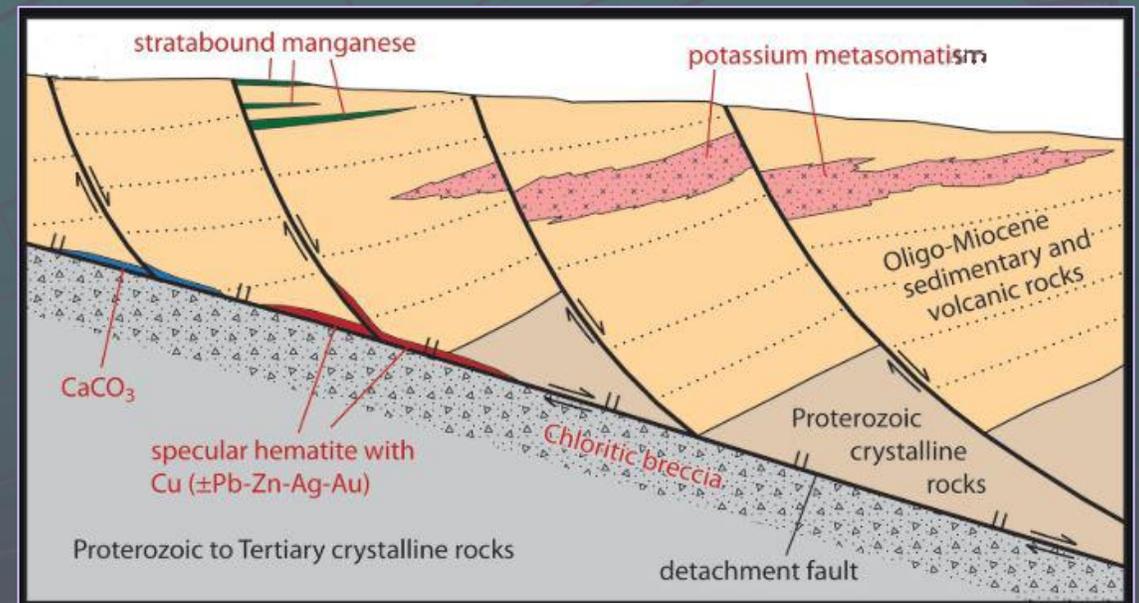


Природный пример. Система растяжения  
Кетцалькоатль (Мексика)

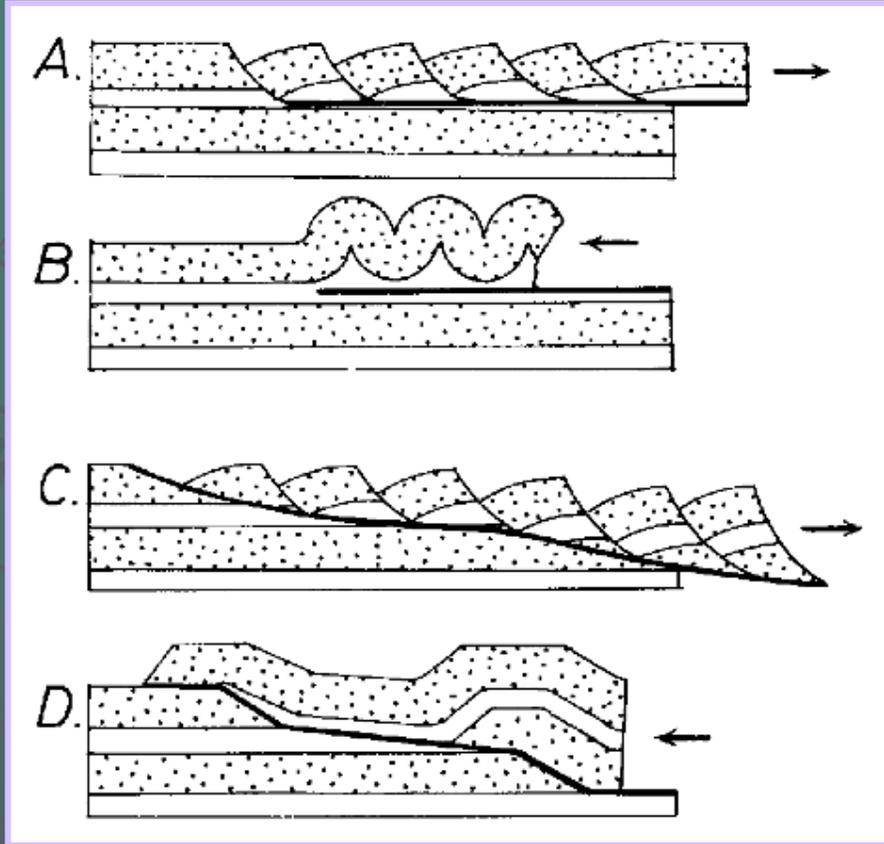
<https://www.hgs.org/civicrm/event/info?id=1921>

Еще пример зоны срыва (детачмента)

<https://wryheat.wordpress.com/tag/arizona-geology/>

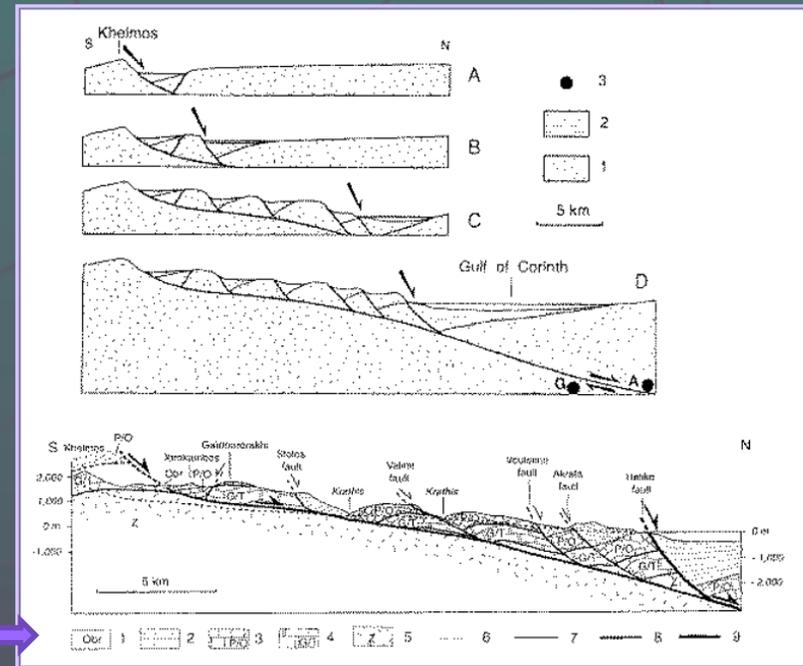


# Поверхности срыва в областях растяжения

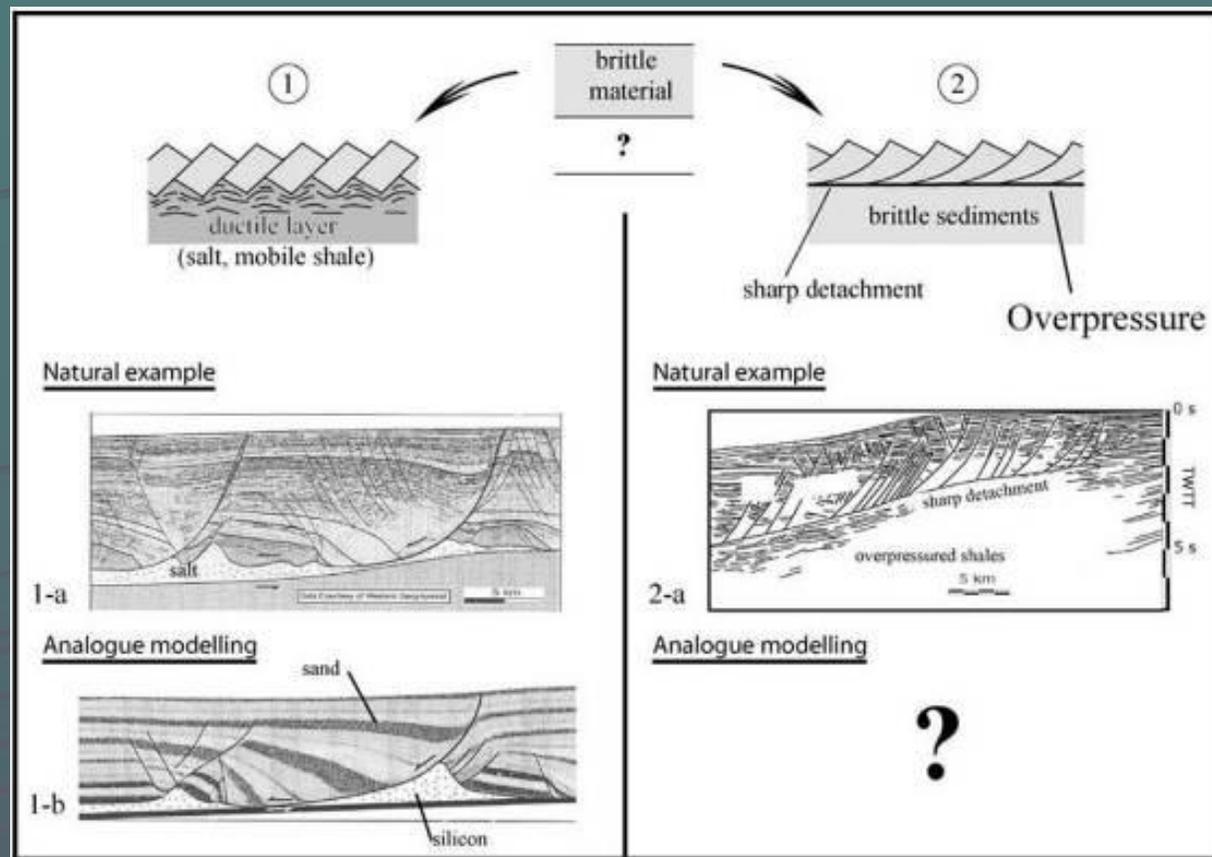


Пример поверхности срыва. Греция.  
(no Van der Plijm and Marchak, 1997)

Поверхности срыва: растяжения (A, C) и сжатия (B, D). A и B – послойные поверхности срыва (decollement), C и D – ступенчатые поверхности срыва (detachment) (Ramsay, Huber, 1987)

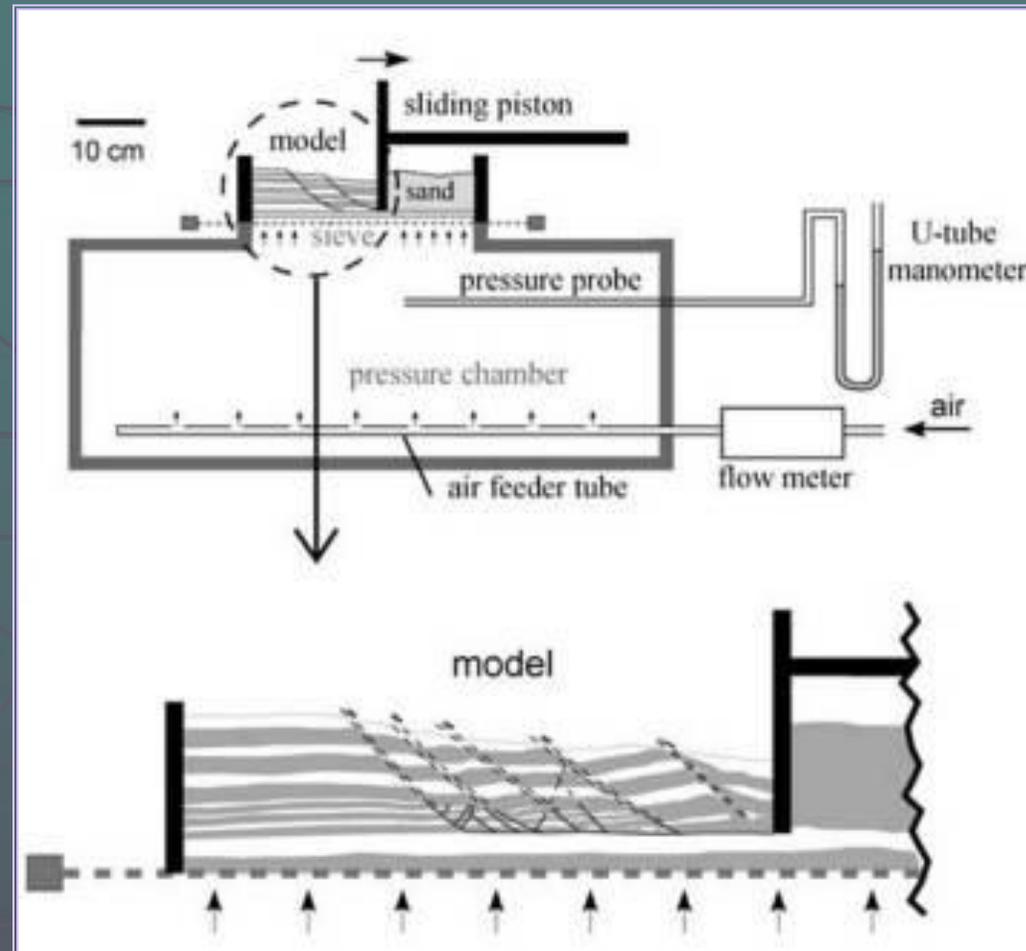


# Моделирование структур, развивающихся над поверхностью срыва



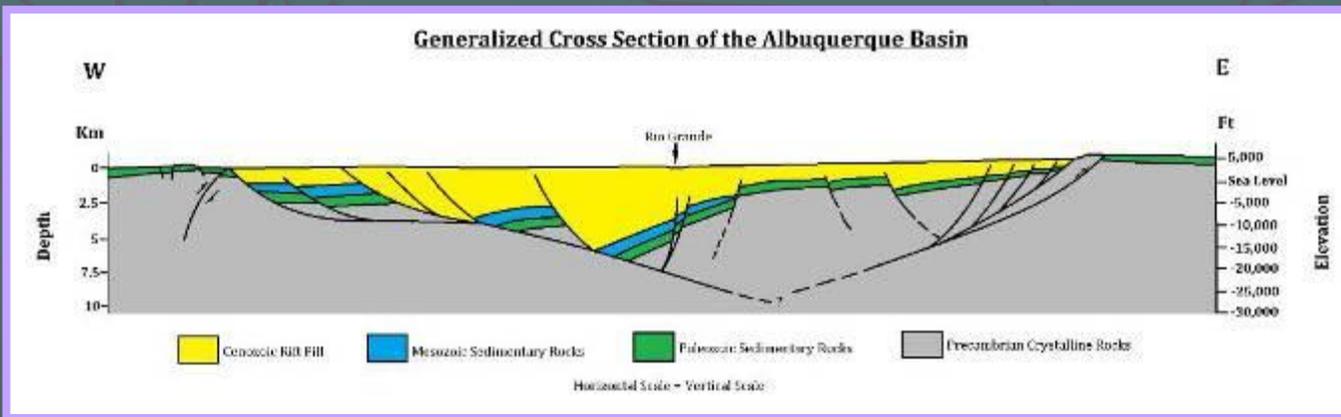
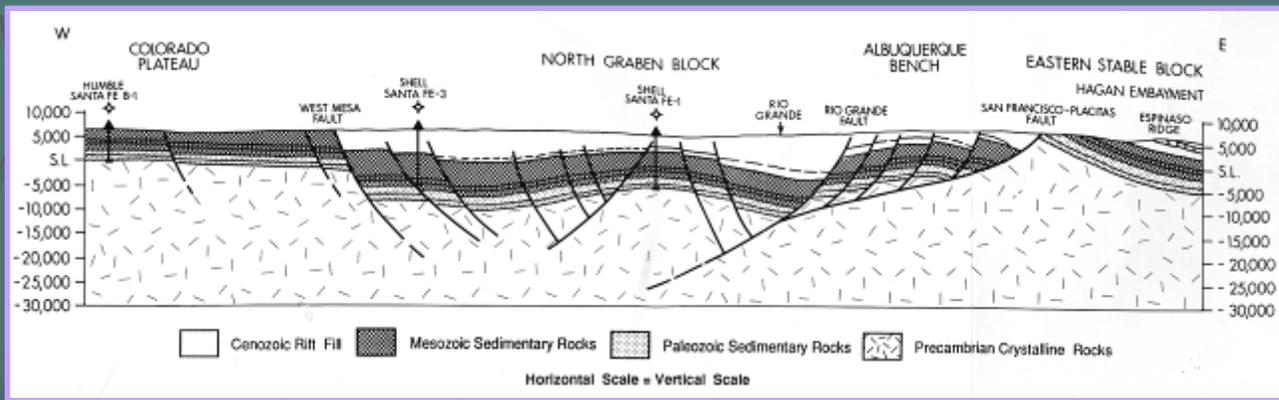
Вверху показаны детачменты, развитые в текучем материале (1) или вследствие наличия сверхвысокого флюидного давления в хрупких породах (2). Сейсмический пример растущих разрывов и неровностей в кровле соли показан на рис. 1-а. Побережье Анголы (no Fort, 2002). Экспериментальная модель (рис. 1-б) включает в себя базальный слой силиконовой пасты (no Fort, 2002) (из Mourgeus, Cobbold, 2006).

## Эксперимент (*Mourgeus, Cobbold, 2006*)



Скольжение модельного материала происходит на воздушной подушке

# Моделирование сложных систем растяжения



- ▶ Изучение процесса рифтогенеза популярно в последние несколько десятилетий в связи с тем, что в результате растяжения происходит прогибание больших территорий и образуются осадочные бассейны, а именно к осадочным бассейнам приурочены природные запасы нефти, газа и угля. Большая часть современных исследований направлена на то, чтобы предсказывать самую вероятную структурную конфигурацию на глубине для дальнейших разведочных работ нефтяной индустрии.

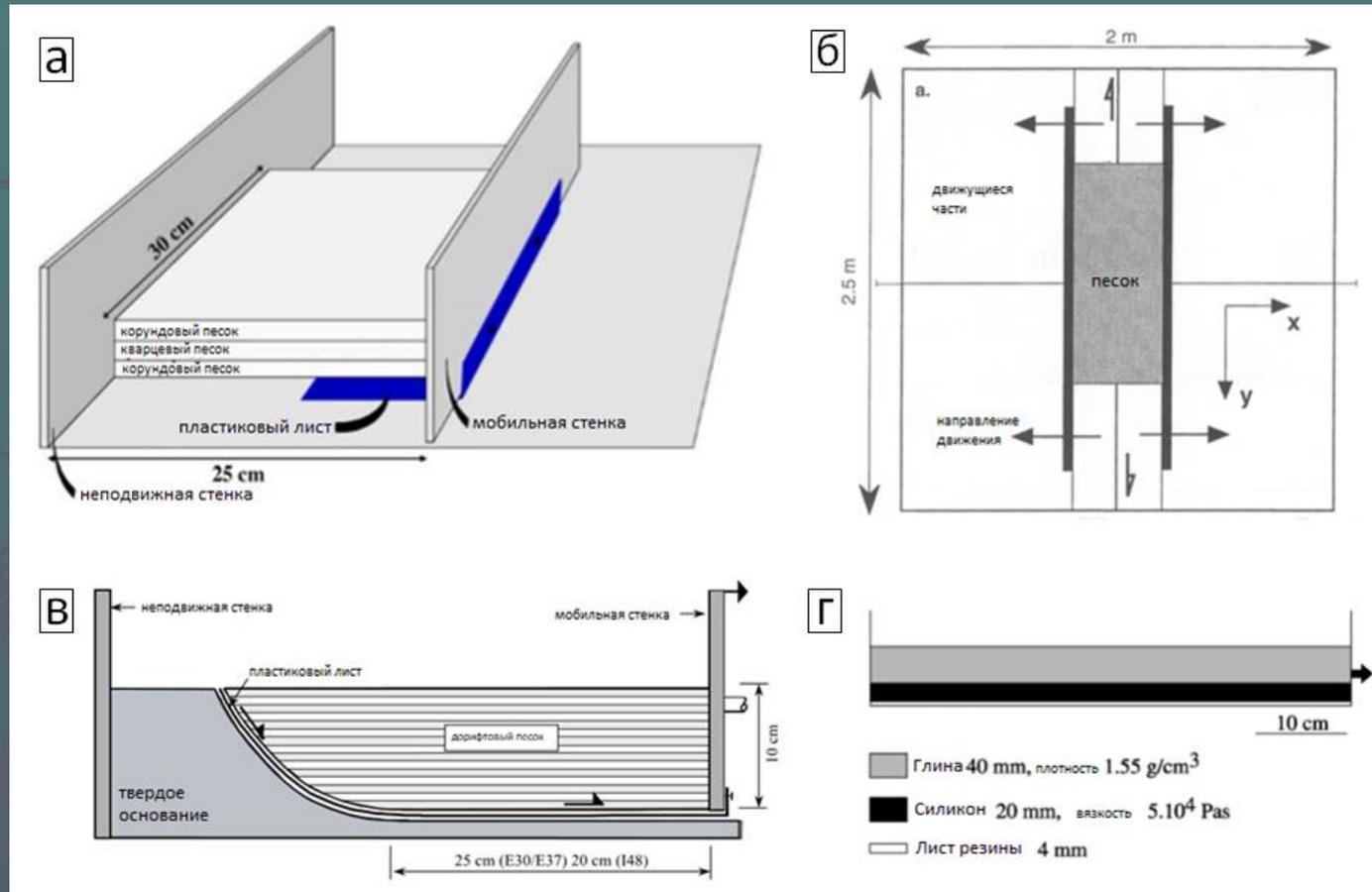
Геологические разрезы через центральную часть рифта Рио Гранде (*Russel and Snelson, 1990*)

## Материалы и установки для моделирования растяжения

Самые часто используемые эквивалентные материалы, такие же, как и для воспроизведения сдвиговых зон – сухой песок и влажная глина. Для лучшего наблюдения за деформацией материалы часто окрашиваются в разные цвета и кладутся слоями. Основная разница между песком и глиной в том, что они обладают разной когезией (связь между молекулами внутри тела), у песка она меньше. Также в качестве аналогового материала часто используется силикон или смеси вышеперечисленных материалов.

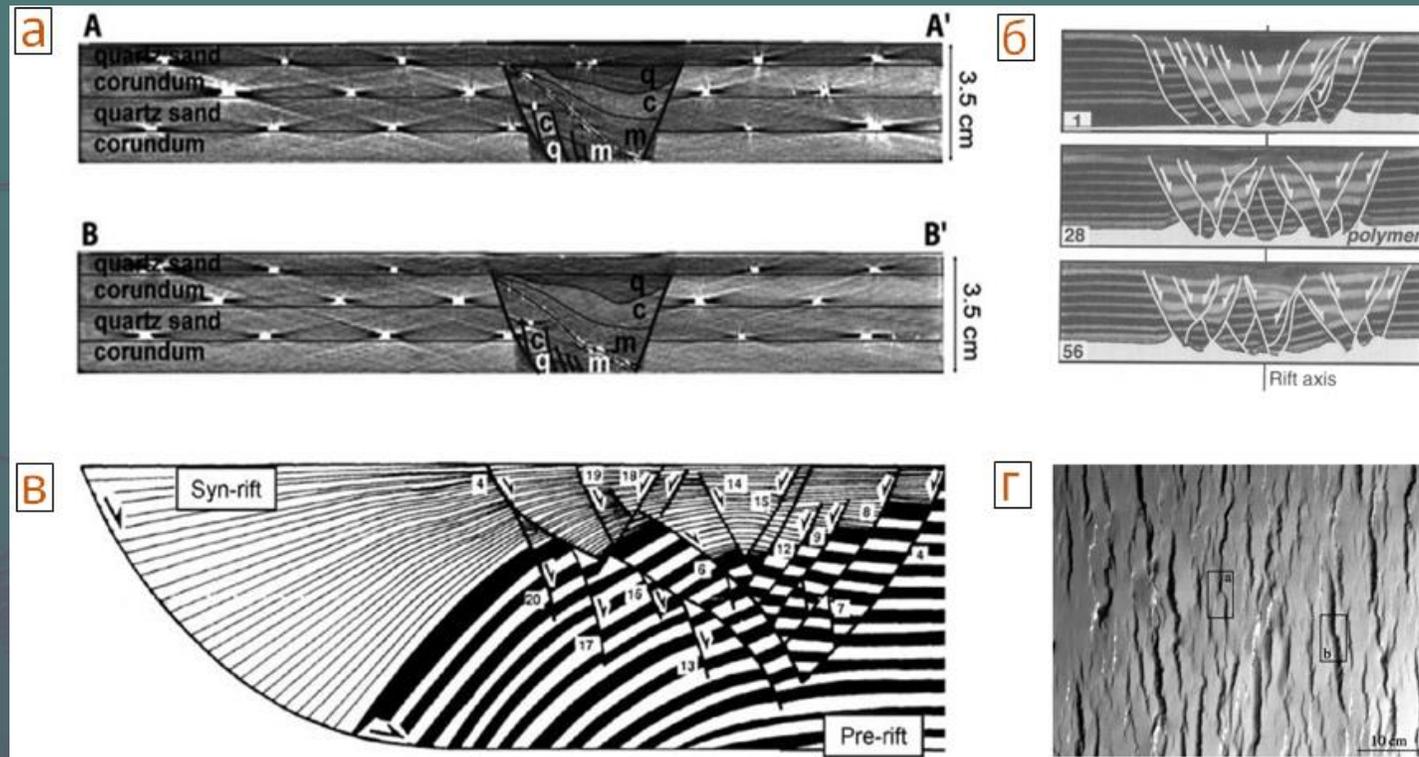
Помимо наличия самой модели, важна приборная установка, благодаря которой будет осуществляться деформация. Установки, как правило, универсальные, то есть на них можно делать эксперименты с различными обстановками. Таким образом, они либо те же, что и для сдвиговых зон, либо построены на том же принципе: у них существует горизонтальное основание и как минимум два борта, один из которых зафиксирован на поверхности, а другой может перемещаться в две стороны. Прибор может быть сделан как из металла, так и из дерева

# Схемы современных установок для воспроизведения обстановки растяжения



*a* – (Panien et al., 2005); *б* – (Keep, McClay, 1997); *в* – (Crook et al., 2006); *г* – (Bellahsen et al., 2003).

# Результаты воспроизведения обстановки растяжения

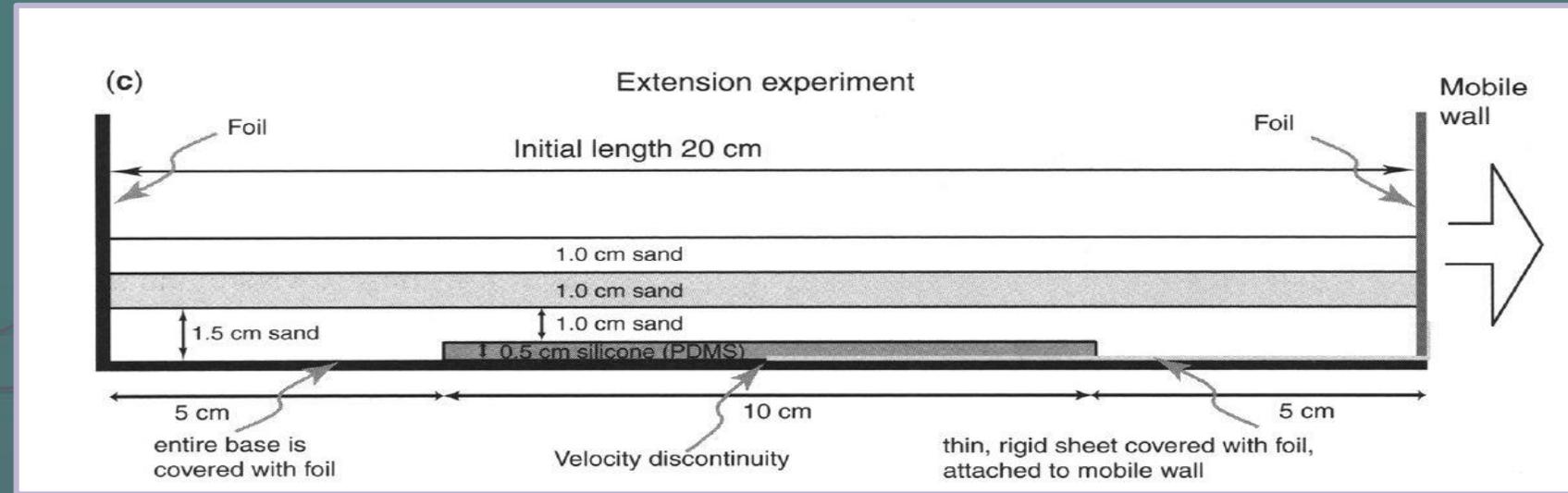
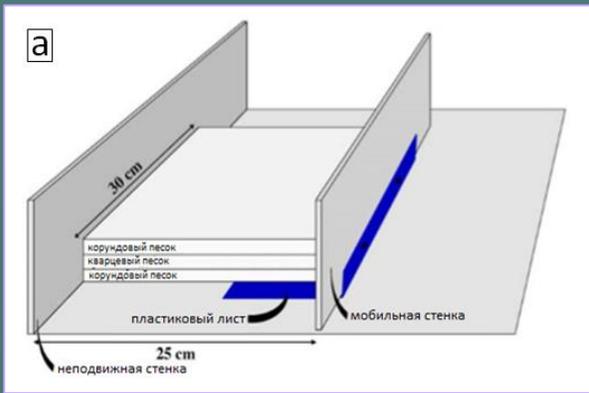


а – изображения получены с помощью рентгеновской томографии образцов, вид сбоку (Panien et al., 2005); б – вид сбоку (Keep, McClay, 1997); в – вид сбоку (Crook et al., 2006); г – вид сверху (Bellahsen et al., 2003).

Пятью лабораториями был проведен эксперимент по воспроизведению обстановки растяжения с целью дальнейшего сравнения своих результатов

Моделировался процесс растяжения в верхней части земной коры, в частности – влияние вязкого базального слоя на локализацию разломов в вышележащем хрупком слое. Во всех экспериментах был использован один и тот же материал для вязкого базального слоя – полидиметилсилоксан (PDMS), но различные материалы для хрупкого слоя (отличающиеся по своим свойствам – плотности, фрикционным свойствам, размерам зерен и т.д)

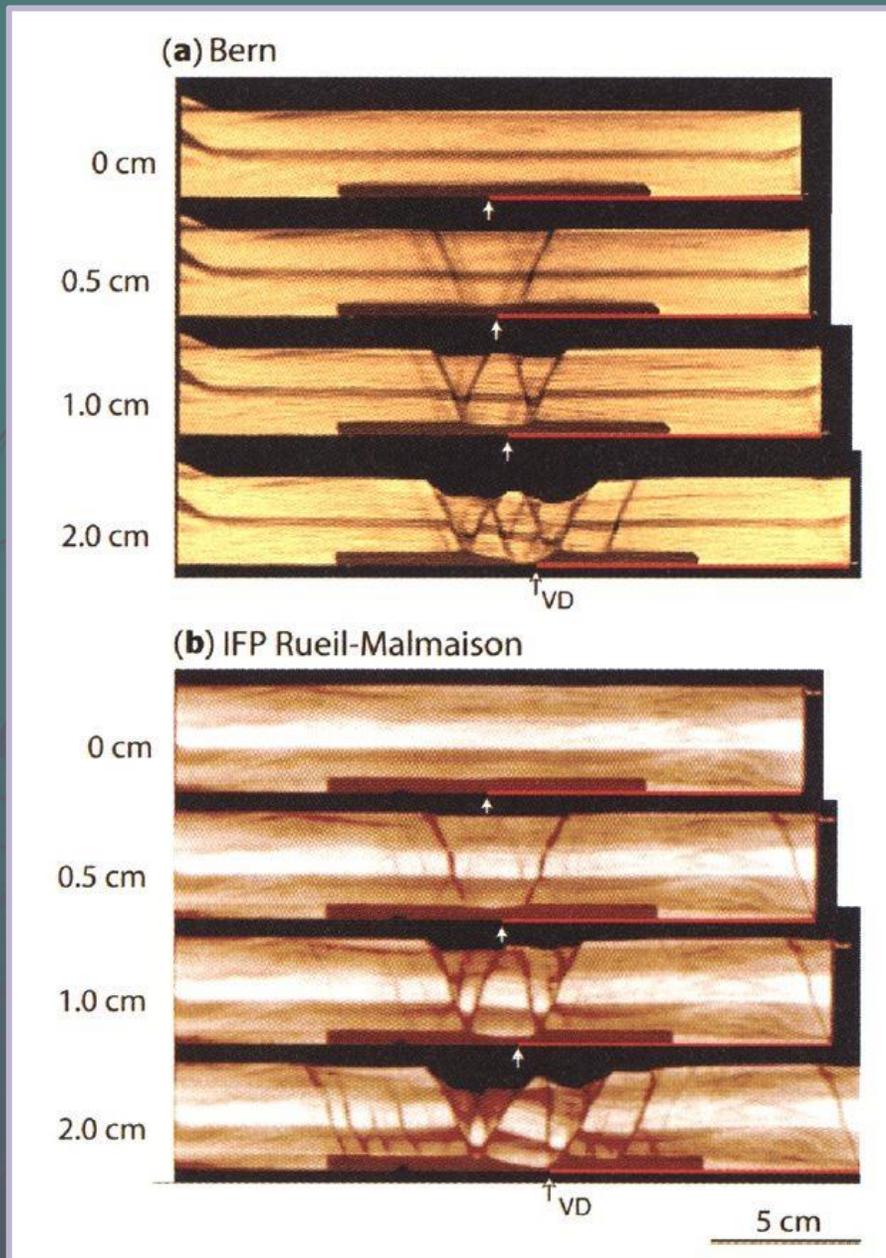
Основной целью было сравнение полученных результатов и установление того, как пойдет эксперимент при применении различных материалов для хрупкого слоя. Полученный таким образом опыт поможет в дальнейшем подбирать оптимальные материалы для проведения эксперимента и улучшит его.



На верхнем рисунке представлена установка, на которой проводился эксперимент. Подвижная стенка движется вправо. Ниже отмечены лаборатории, которые проводили данный эксперимент, а также указаны размеры их моделей

**Table 2.** Model dimensions and details of model set-up

| Laboratory            | Model dimensions* (cm) (shortening experiment) | Model dimensions* (cm) (extension experiment) | Fixed or mobile back wall (shortening experiment) | Alkor foil sidewalls parallel to displ. direction | Small exit slot (shortening experiment) | Thickness rigid basal sheet (extension experiment) | Monitoring method                     | Other changes with respect to prescribed set-up |
|-----------------------|--|---|---|---|---|--|---------------------------------------|---|
| Bern                  | 35.8 × 80                                      | 20 × 80                                       | Mobile  | Yes   | No                                      | 0.5 mm   | CT scan                               |   |
| Florence <sup>†</sup> | n.a.   | 20 × 90                                       | n.a.  | Yes   | n.a.                                    | ?  | Surface, final sections               |   |
| Kyoto                 | 94 × 50  | n.a.  | Fixed   | No  | 0.5 mm                                  | n.a.   | Surface, side                         |   |
|                       |  |   |   | Yes   |   |  |                                       |   |
| Parma <sup>‡</sup>    | 60 × 33  | n.a.  | Mobile  | Yes   | No                                      | n.a.   | Surface, side, final sections         |   |
|                       |  |   |   | No  |   |  |                                       |   |
| Pavia                 | 70 × 30  | n.a.  | Mobile  | No  | No                                      | n.a.   | Surface, side                         |   |
| Piscataway            | n.a.   | 20 × 61                                       | n.a.  | No  | n.a.                                    | 0.2 mm   | Surface, final sections               | Extension to 3 cm                               |
| GFZ Potsdam           | 340 × 20                                       | n.a.  | Fixed   | No  | 1 mm                                    | 0.3 mm   | Surface, side                         |   |
| IFP Rueil-Malmaison   | 37 × 78  | 20 × 78                                       | Mobile  | Yes   | No                                      | 0.5 mm   | CT scan                               |   |
| Toronto               | 41.9 × 45                                      | 29.2 × 45                                     | Mobile  | Yes   | Late stage, < 1 mm <sup>§</sup>         | 1.6 mm   | Surface, side (short), final sections | Initial width ext. expt. 29.2 cm                |
| Uppsala               | 41 × 30  | n.a.  | Mobile  | Yes   | No                                      | n.a.   | Surface, final sections               |   |



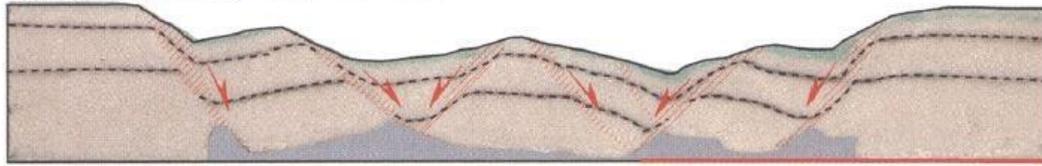
На рисунке показана эволюция моделей в 2-х лабораториях на 4-х стадиях смещения. Данные разрезы идут по центру моделей

По общим наблюдениям после смещения в 1 см зоны разломов формируются **во всех** моделях. При дальнейшем растяжении появляются новые, более молодые разломы, зона разломов расширяется

Bern – 35 cm from side



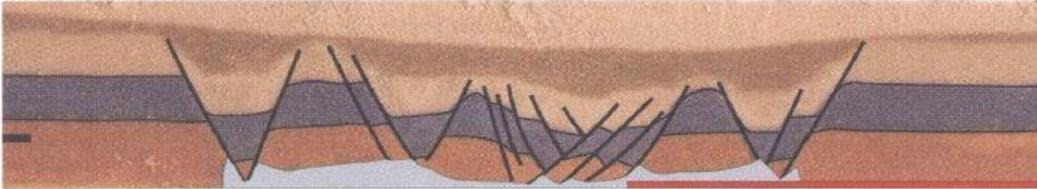
Florence (large width) – 20 cm from side



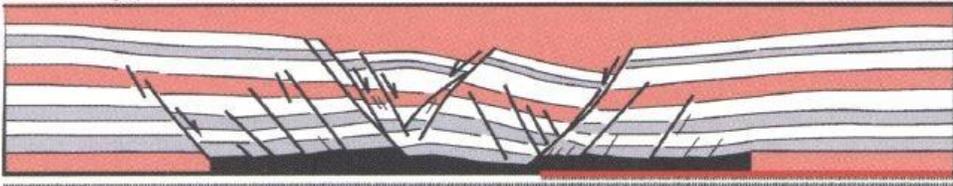
IFP Rueil-Malmaison – centre



Toronto – centre



Piscataway (3 cm displ) – 15 cm from side



Разрезы моделей при смещении 5 см ( 3 см – последний разрез)

В целом, эксперименты всех лабораторий показали примерно одинаковый результат, отличия заключались в основном в углах наклонов разломов, что как раз обусловлено различием свойств использованного материала

# Классические эксперименты Мак Клея и сравнение с численными моделями

*A.J.L. Crook et al. / Journal of Structural Geology 28 (2006)*

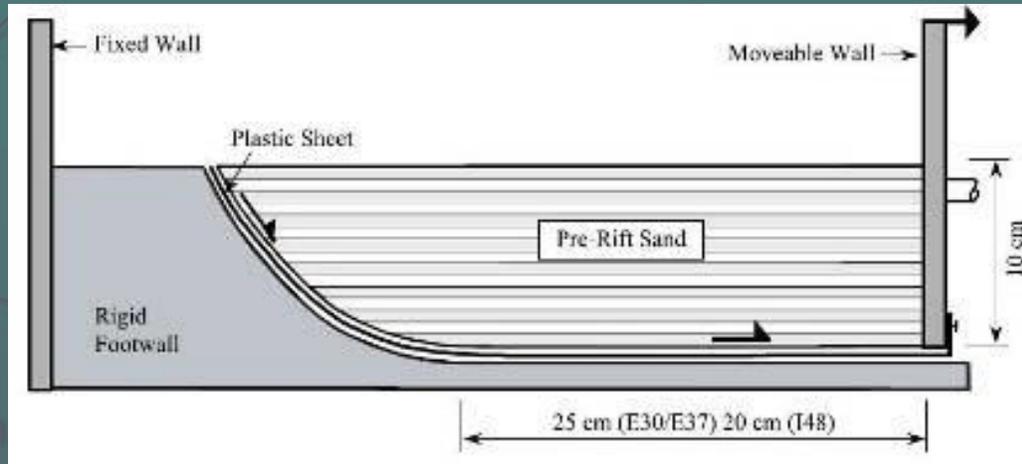
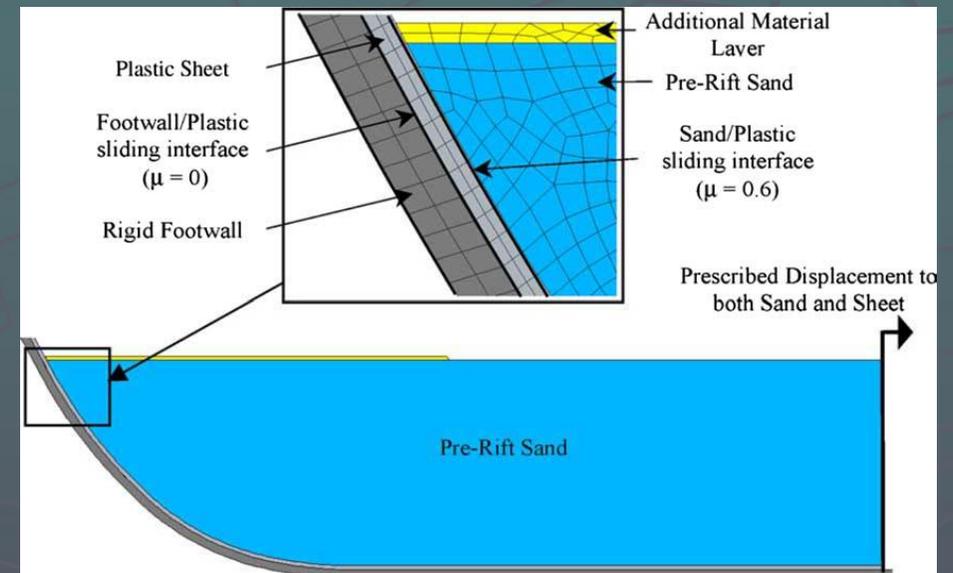
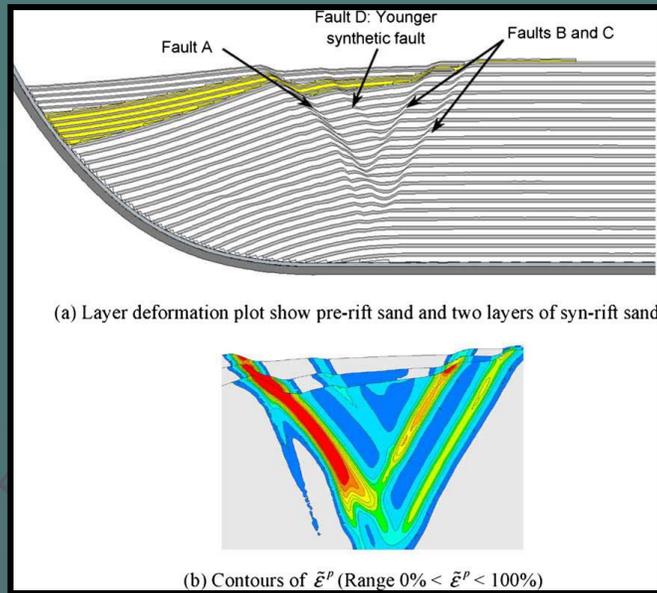


Схема прибора для моделирования растяжения типа «detachment geometry» (McClay, 1990).

Численная модель для одного из экспериментов Мак Клея

*(из Crook et al, 2006)*



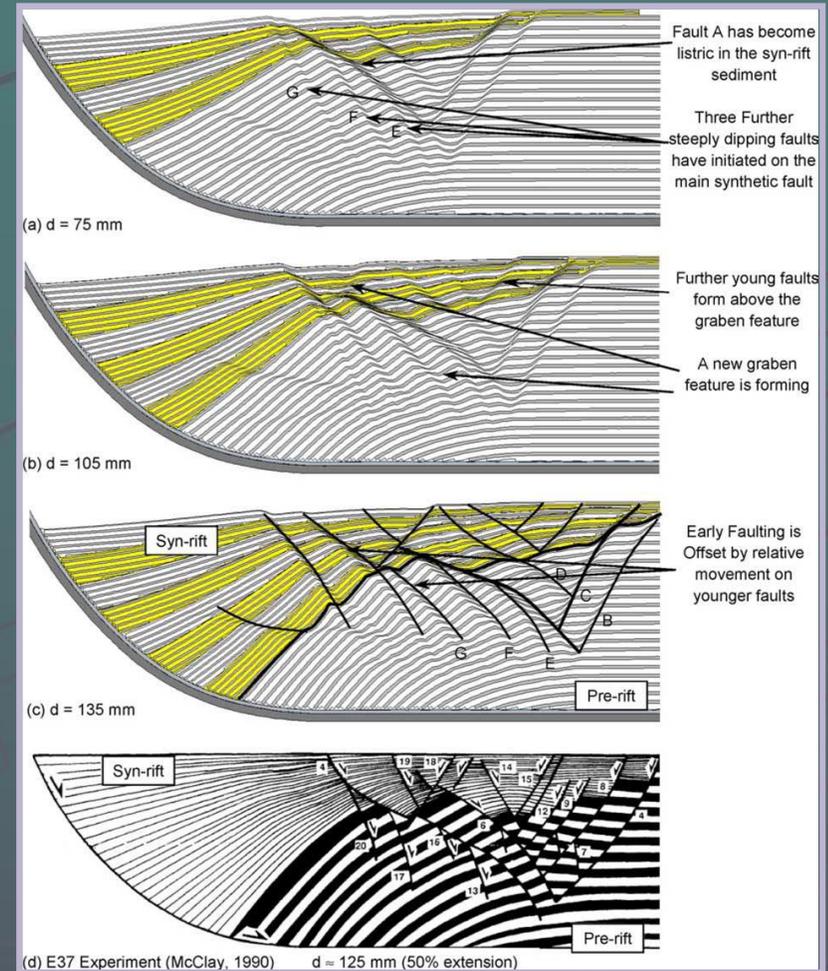


Конфигурация в дрифтовых слоях песка после 45 мм растяжения

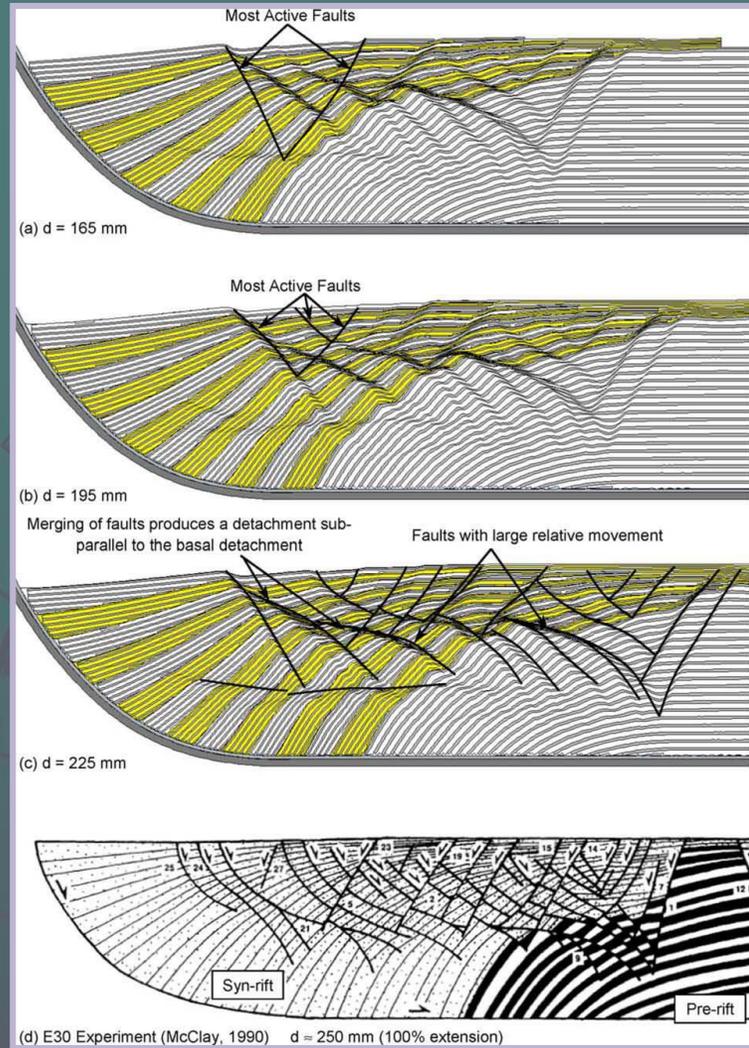
Сравнение прогноза, полученного при численном моделировании, и эксперимента Мак Клея

Растяжение 75, 105 и 135 мм

эксперимент Мак Клея



Чередование с желтыми слоями – синрифтовый комплекс



Сравнение прогноза, полученного при численном моделировании с другим экспериментом Мак Клея (из *Crook et al, 2006*)

Внизу-модель Мак Клея (черно-белая)

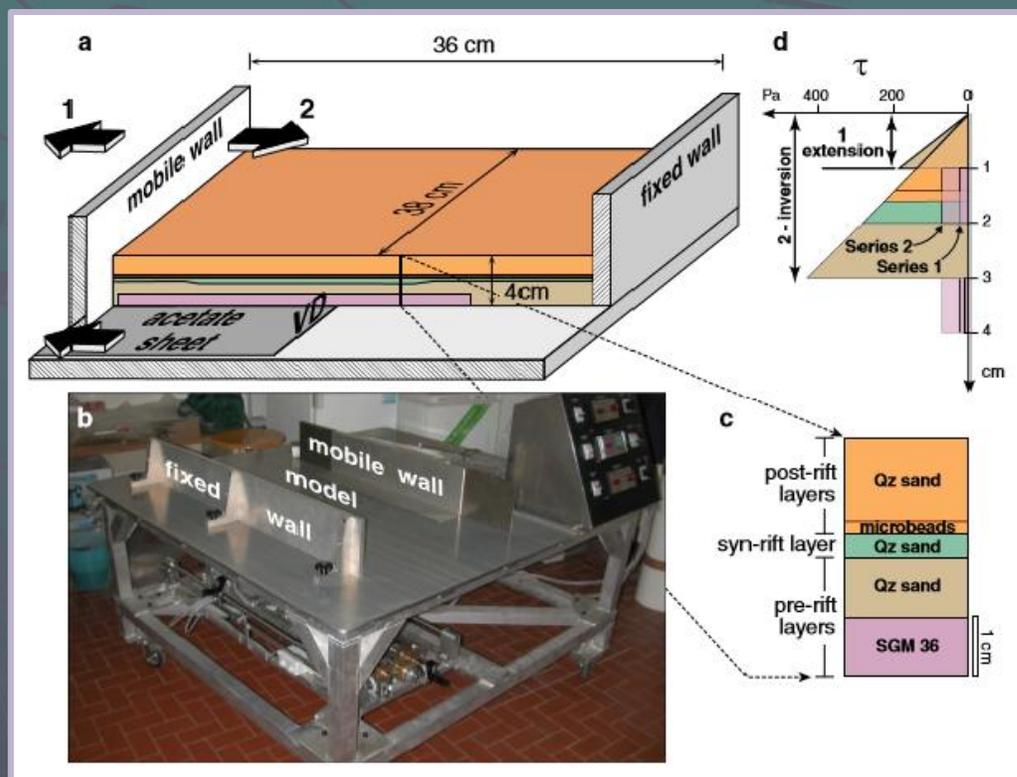
# Инверсия бассейна

*M. Bonini et al., 2012a.* Basin inversion and contractional reactivation of inherited normal faults: A review based on previous and new experiments

Инверсия бассейна и контракционная реактивация унаследованных сбросов: обзор, основанный на предыдущих и новых экспериментах

**Установка:** неподвижное основание, фиксированная и мобильная стенки.

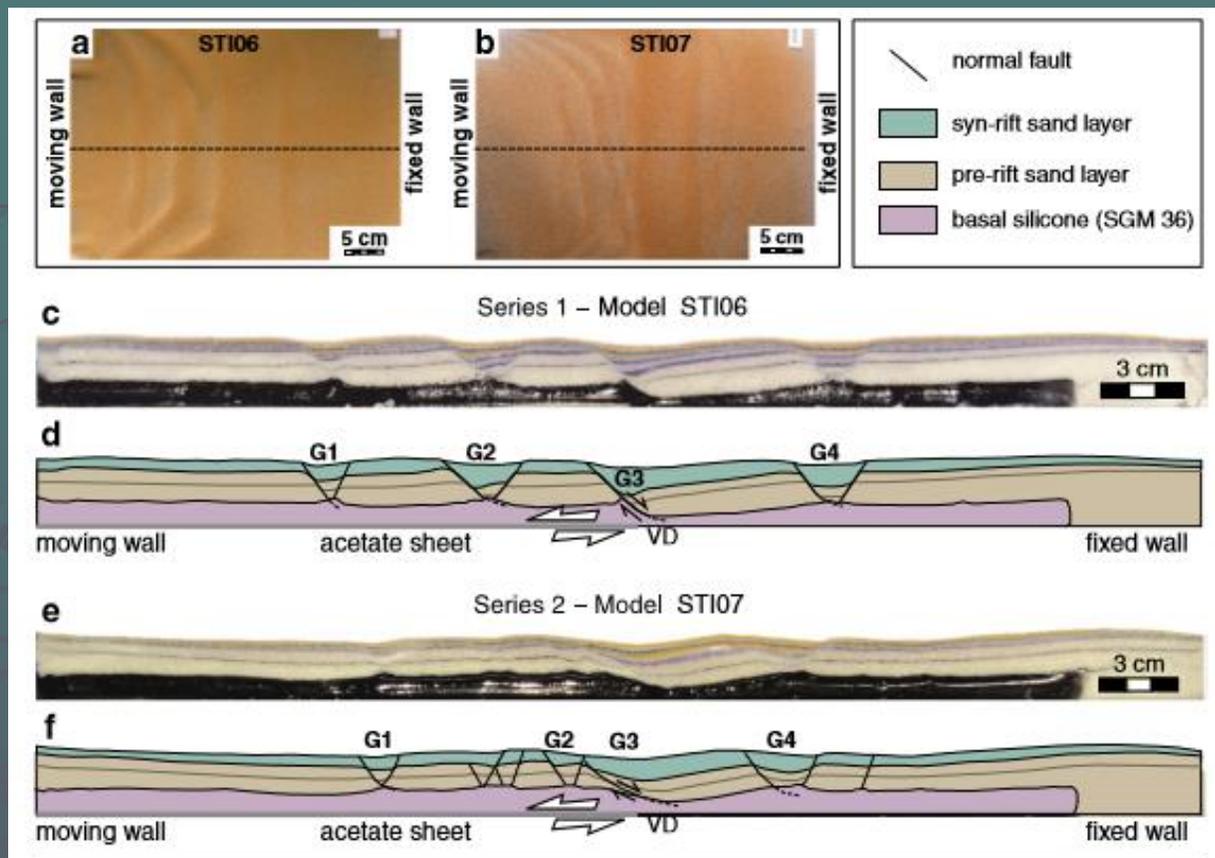
**Материал:** сухой кварцевый песок и силикон



1. Ацетатный лист
2. Силикон мощностью 1 см (эвапориты)
3. Песок мощностью 1 см (карбонатные дрифтовые осадки)
4. В процессе растяжения в равные промежутки времени на модель, в образовавшиеся впадины, просеивается цветной песок до одного уровня.
5. Микрогранулы (microbeads)
6. Песок (пострифтовые осадки) – 1,4 см

Изначальные размеры модели: 36\*38\*2 см

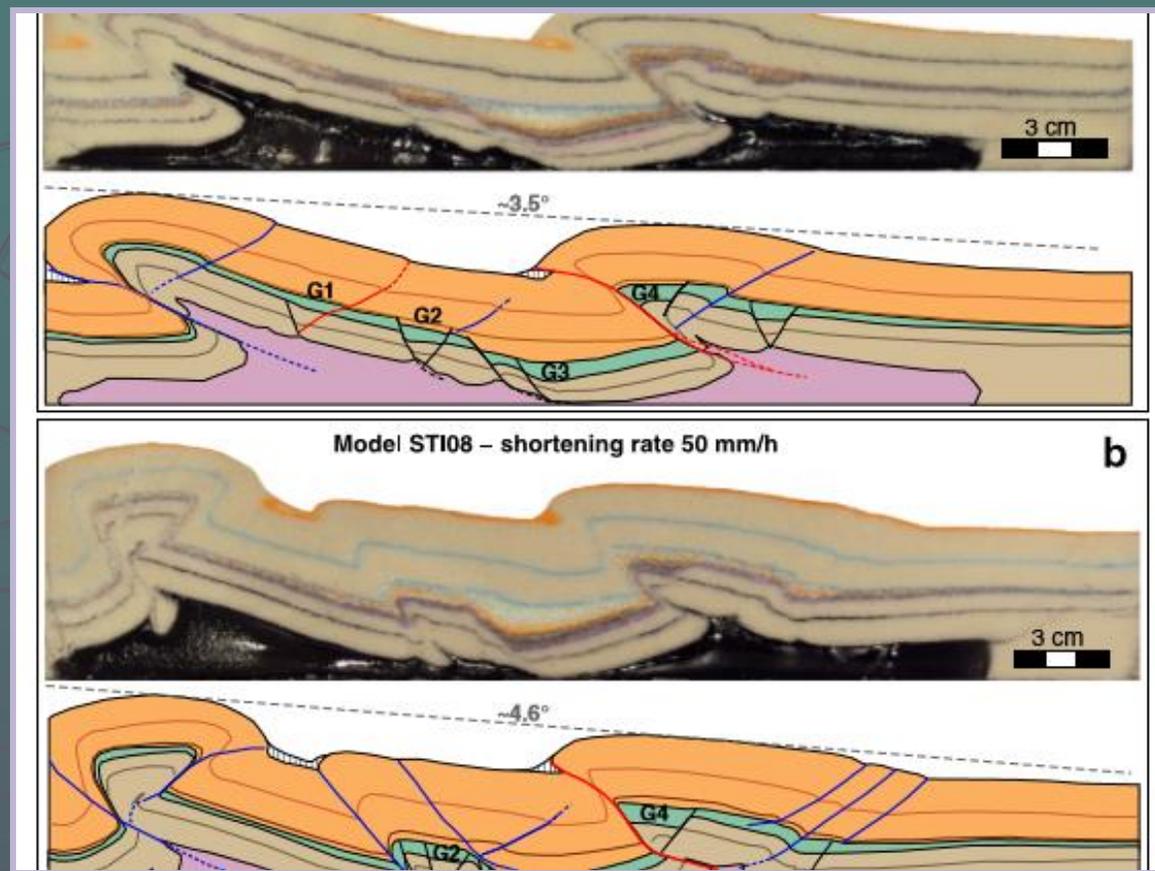
# Первая фаза деформации - растяжение



Серия 1: 1,5 см/час

Серия 2: 5 см/час

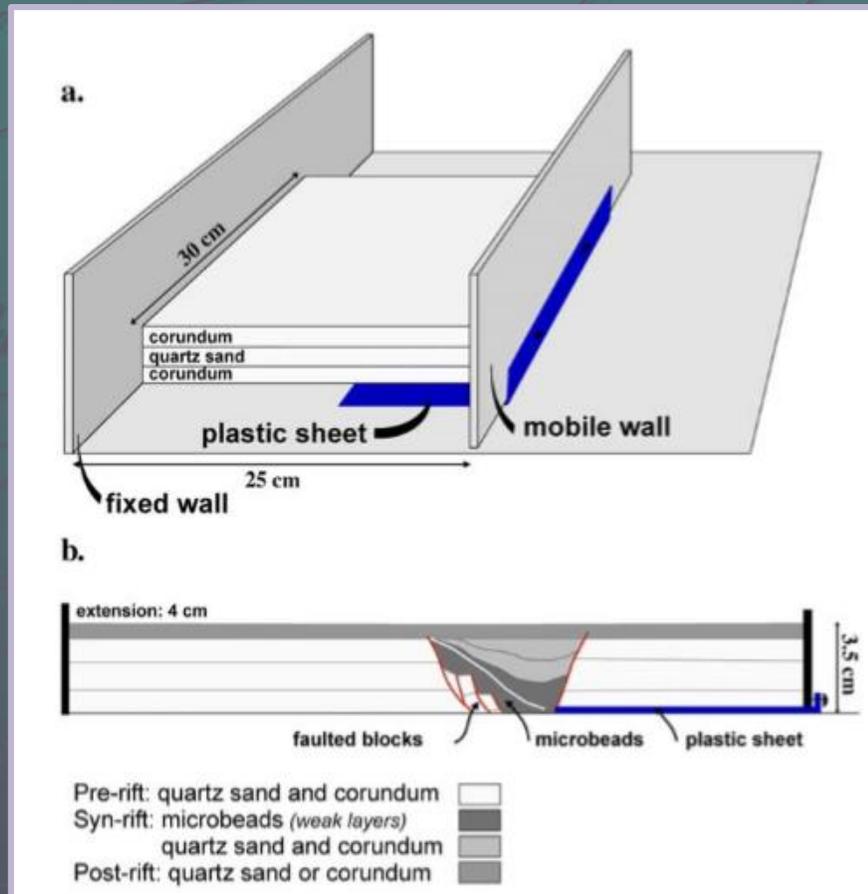
## Вторая фаза деформации - укорочение



Структура, сформировавшаяся в конце второй фазы деформации (укорочение) во второй серии моделей

# Моделирование инверсии бассейна

*M. Panien et al., 2005г.* Sandbox experiments on basin inversion: testing the influence of basin orientation and basin fill



**Установка:** деревянный sandbox, к мобильной стенке которого прикреплен тонкий пластиковый лист.

**Материал:** сухой кварцевый песок размерности 0,08 – 0,12 мм.  
Корундовый песок 0,07 – 0,11 мм

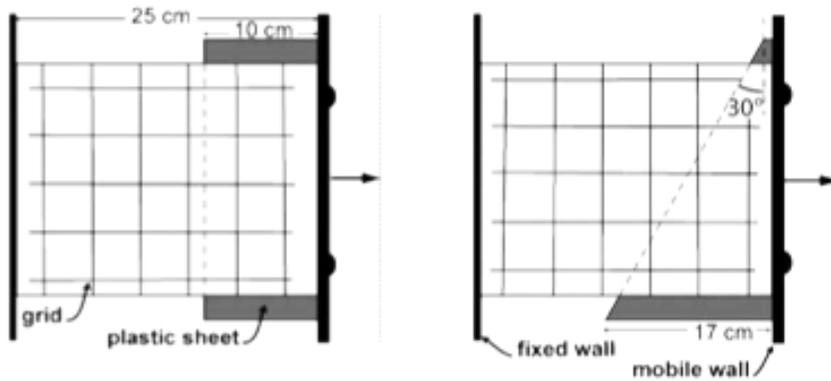
**Модель:**

1. Microbeads – 0,5 мм
2. Корундовый – 1см,
3. Кварцевый – 1см,
4. Корундовый – 1 см

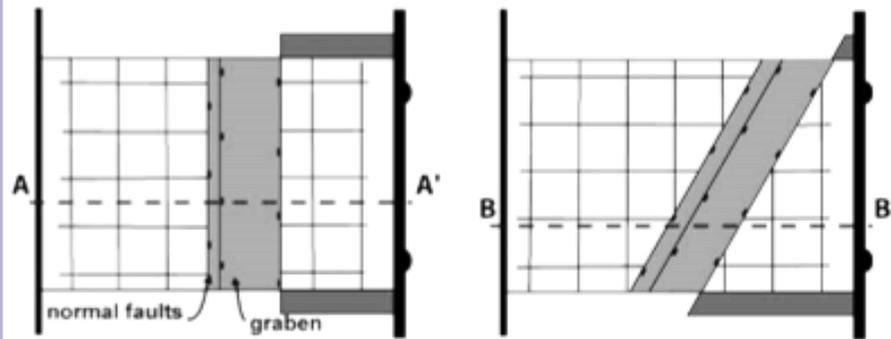
normal graben (NG)

oblique graben (OG)

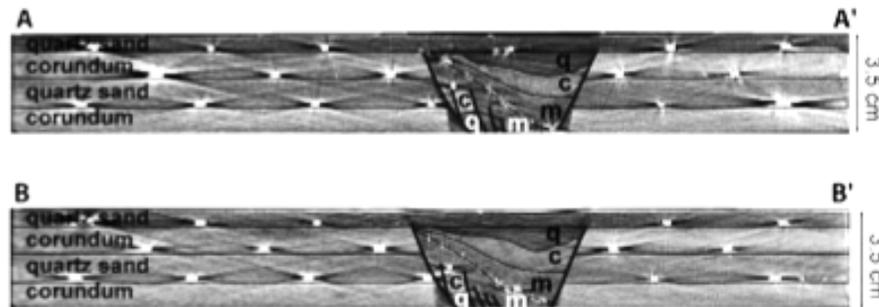
a. initial state



b. end of extension



c. cross-sections at the end of extension



# Растяжение

В процессе моделирования после каждого сантиметра растяжения сверху просеивается гранулированный материал – синрифтовые осадки.

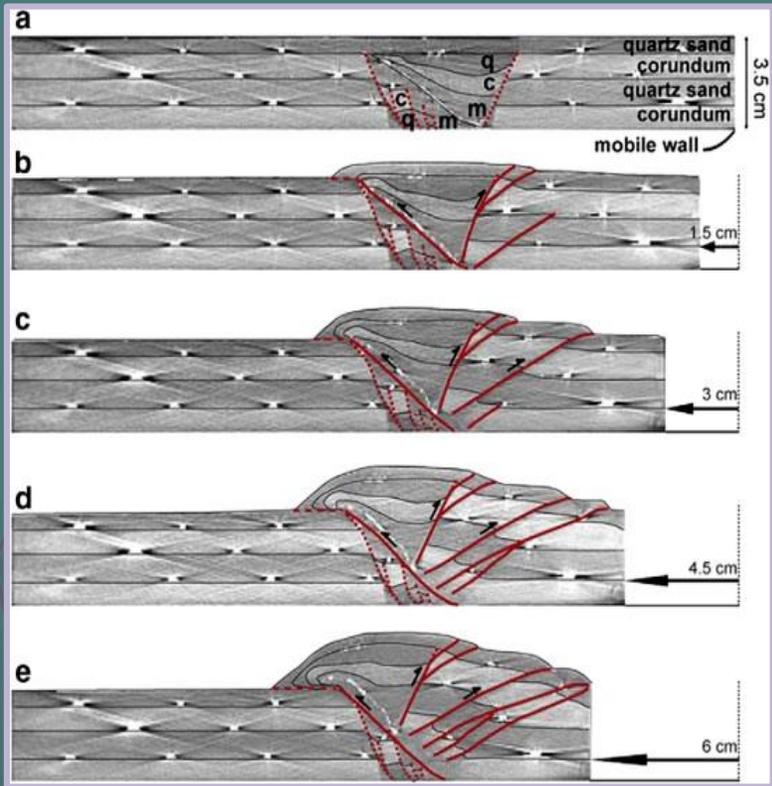
Эксперимент останавливали при растяжении в 4 см.

Скорость растяжения (а затем и сжатия) - 2,4 см/час.

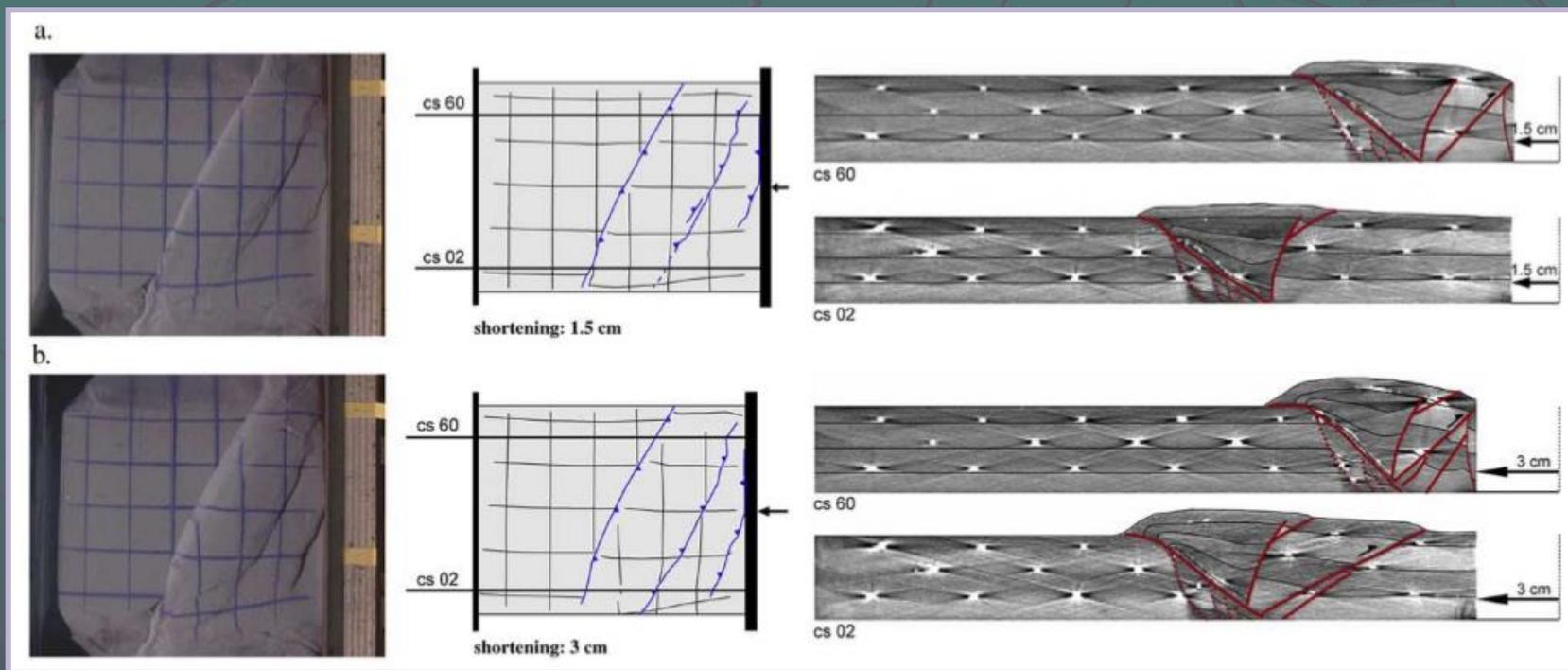
+ X-ray компьютерная томография с помощью СТ-сканера.

## Вторая фаза деформации - сжатие

Модель, демонстрирующая двухэтапную деформацию: а – образец после фазы растяжения (грабен); b-e – последовательные этапы укорочения. Видно поднятие, осложненное надвигами.



Ортогональное растяжение,  
а затем сжатие

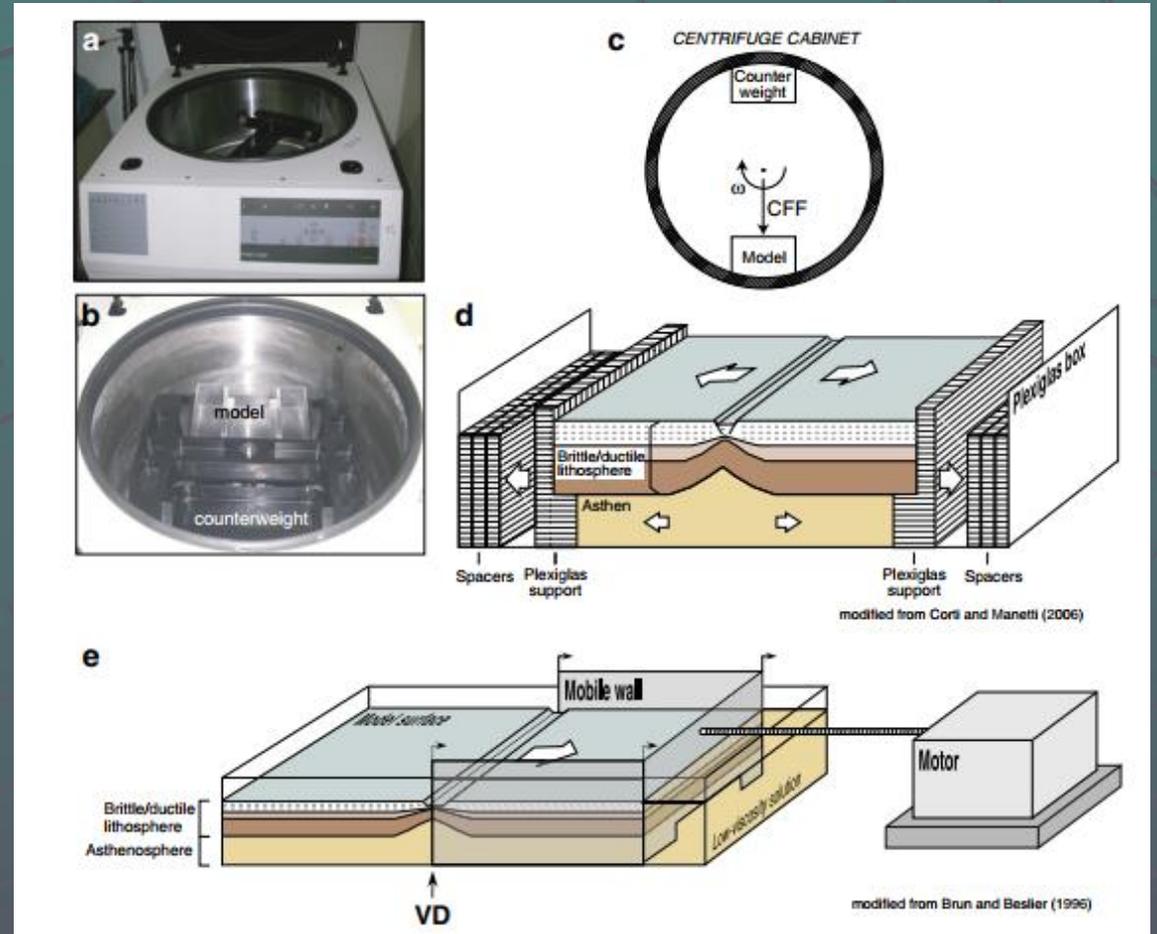


Результаты для косого грабена после сжатия на 1,5 см

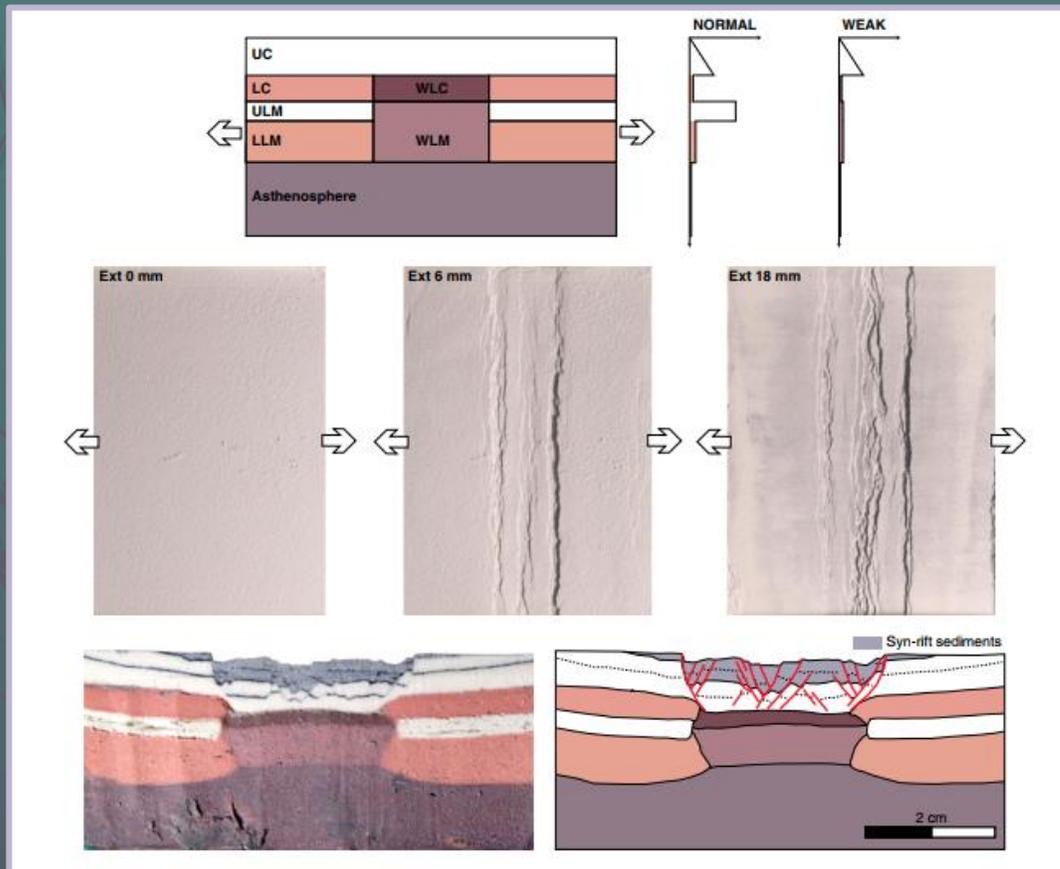
# Модели масштаба литосферы, выполненные с использованием центрифуги

## Схема моделирования

(Brun and Beslier (1996) из G. Corti, 2012)



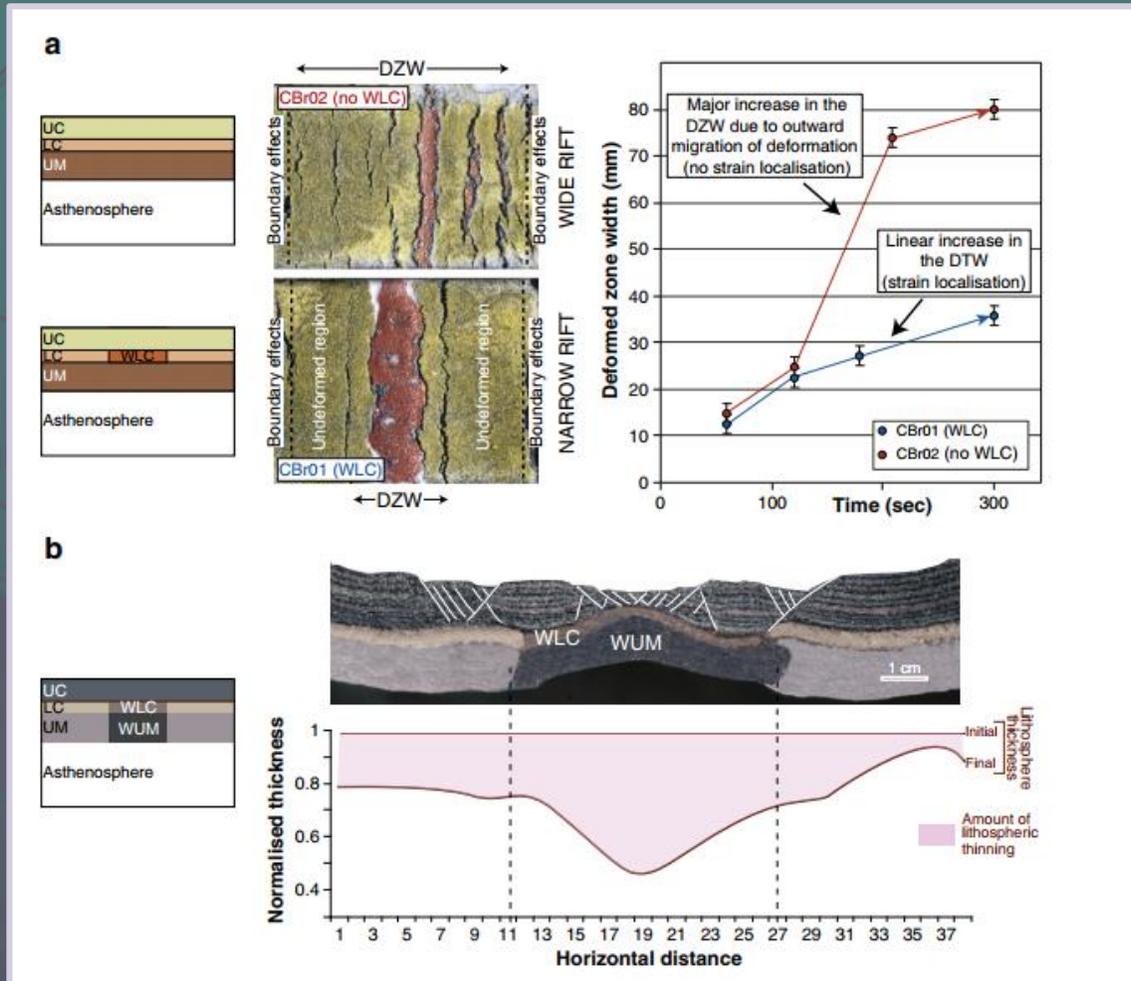
## Контроль растяжения слабой зоной



### Эквивалентные материалы

- ▶ LC: нижняя кора (смесь силикона и корундового песка, 100:20% по весу); LLM: нижняя литосферная мантия (смесь силикона и корундового песка, 100:80% по весу); ULM: верхняя литосферная мантия (смесь пластилина и полидиметилсилоксана, 100:45% по весу); UC: верхняя кора (порошок калиевого полевого шпата); WLC: ослабленная нижняя кора (смесь силикона, корундового песка и олеиновой кислоты, 100:20:10% по массе); WLM: слабая литосферная мантия (смесь силикона, корундового песка и олеиновой кислоты, 100:80:10% по массе).

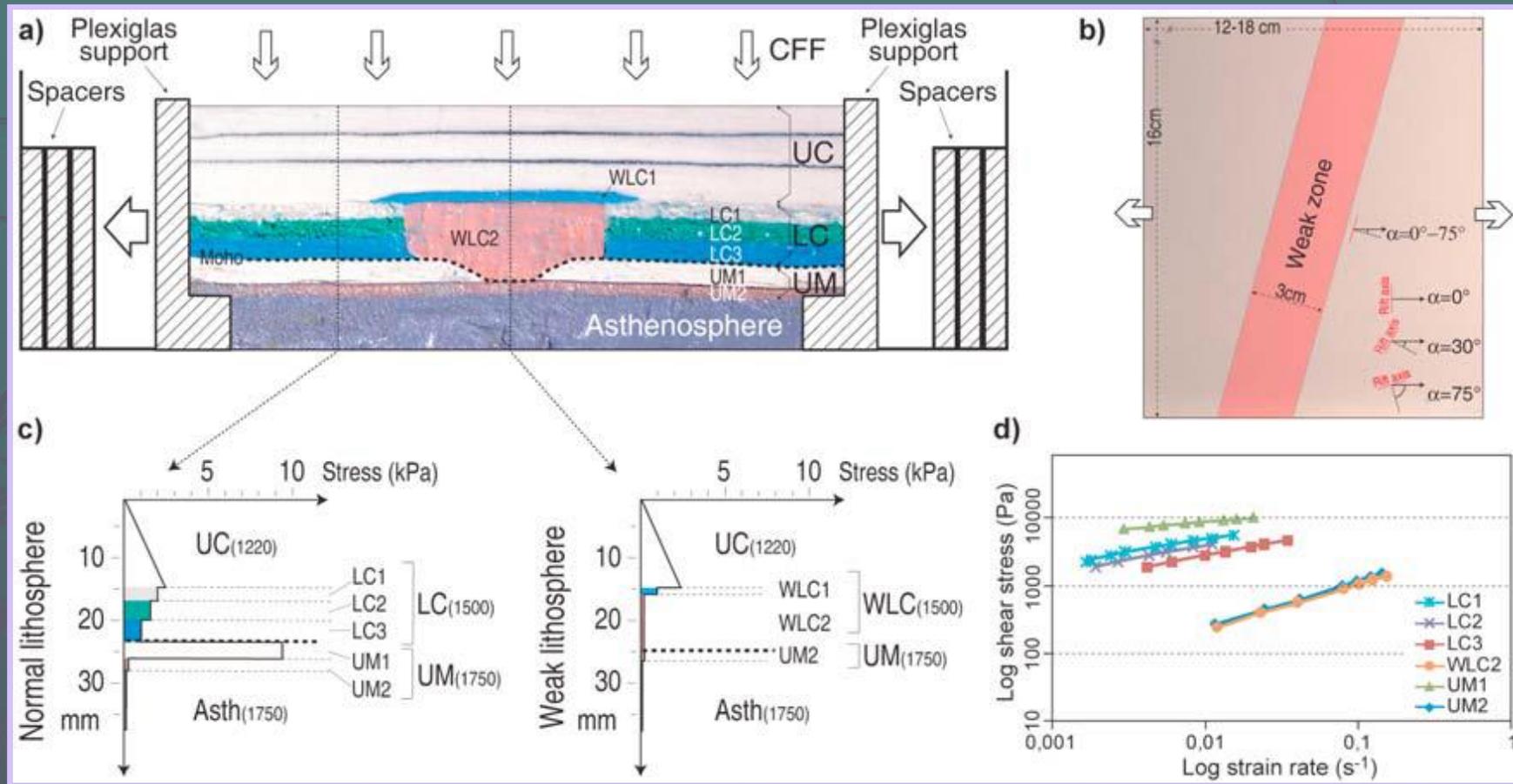
# Эксперименты с разным первоначальным строением деформируемой толщи



(a - from Corti et al., 2003b)  
 b - (from Sokoutis et al., 2007)

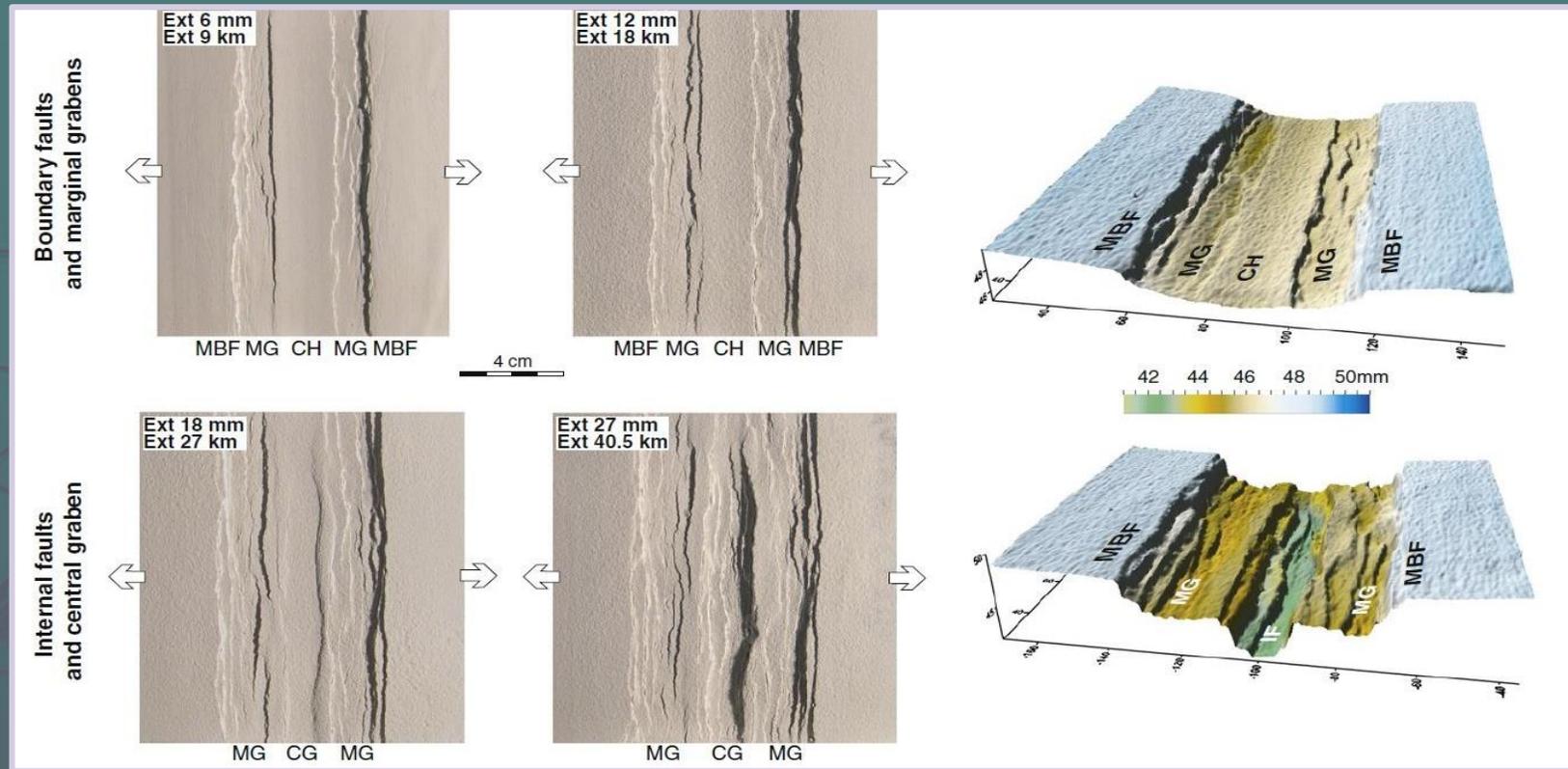
Модели с наличием слабой зоны

# Модели ортогонального и косого рифтинга в масштабе литосферы



(Agostini et al., 2009)

# Ортогональный рифтинг



Эксперимент по моделированию ортогонального рифтинга. В ходе эксперимента также считывалась и строилась цифровая модель рельефа. В начале деформаций образовались 2 главные границы разломов. Границы разломов также разграничивают 2 системы краевых грабенов, между которыми находится центральная, недеформированная часть рифтовой долины. При дальнейшем растяжении деформации охватывают и центральную часть, где образуется центральный грабен

(no Agostini et al., 2009 из Corti, 2012)

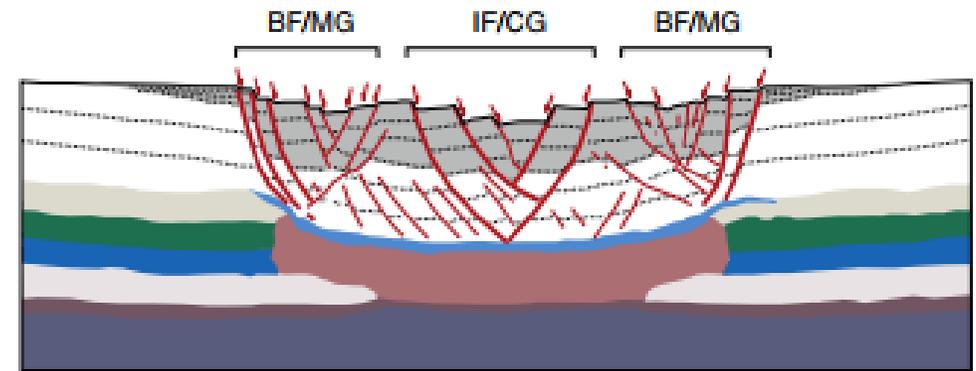
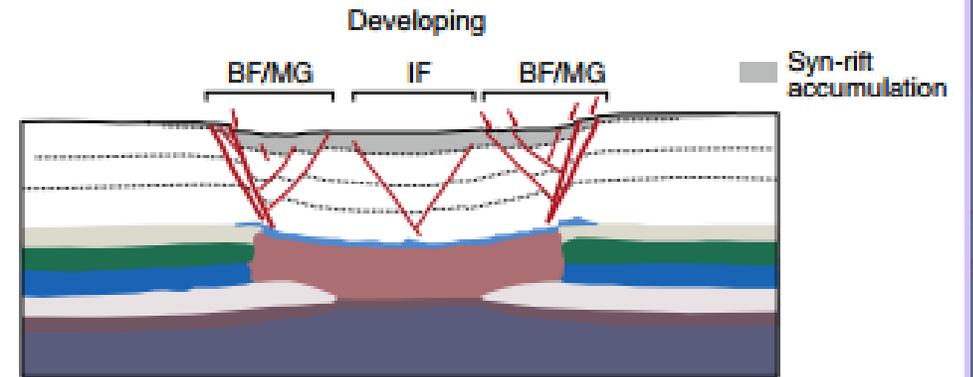
Модели масштаба литосферы.  
Наличие слабой зоны

Эволюция моделей ортогонального рифтинга, проиллюстрированных в виде последовательных сечений при различной величине растяжения (from Corti et al., 2010).

a

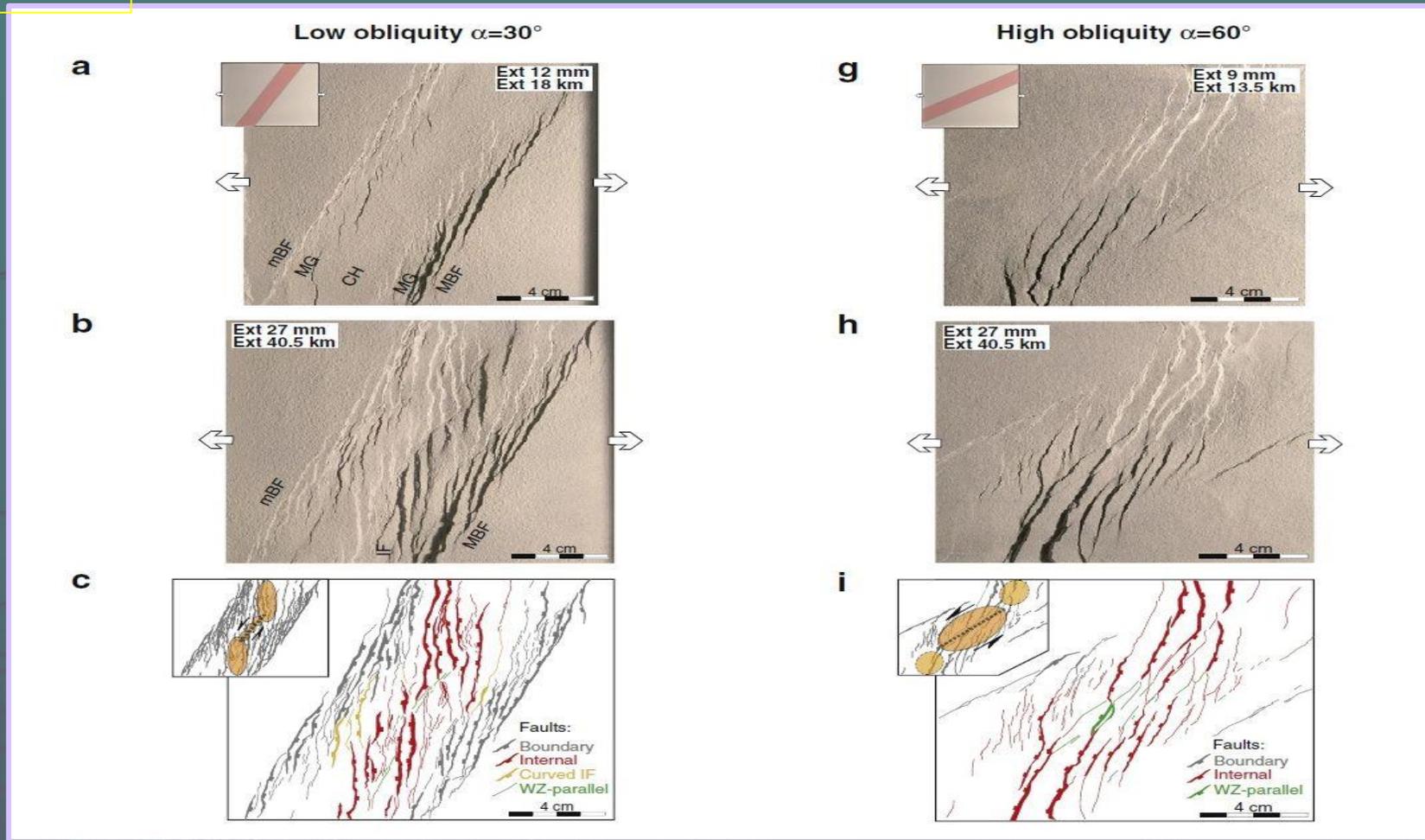
Boundary faults  
and marginal grabens

Internal faults  
and central graben



2 cm

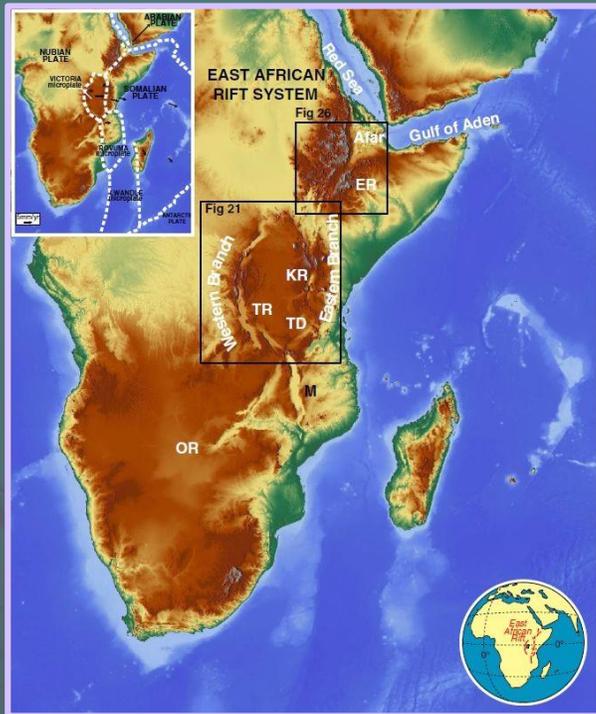
Модели масштаба литосферы.  
Наличие слабой зоны



Эксперименты по моделированию косо́го рифтинга. Было проведено несколько опытов, в которых растяжение шло под разными углами (через  $15^\circ$ )

(no Agostini et al., 2009 из Corti, 2012)

# Сравнение результатов экспериментов с природными структурами



Восточно-африканская рифтовая долина и ее западная и восточная ветви. Именно с ней изначально планировалось сравнить результаты экспериментов

(Corti, 2012)



Западная ветвь Восточно-африканской рифтовой долины. Она хорошо подходит для сопоставления с результатами экспериментов, так как ее различные части испытывают как ортогональное, так и косое растяжение

(Corti, 2004)

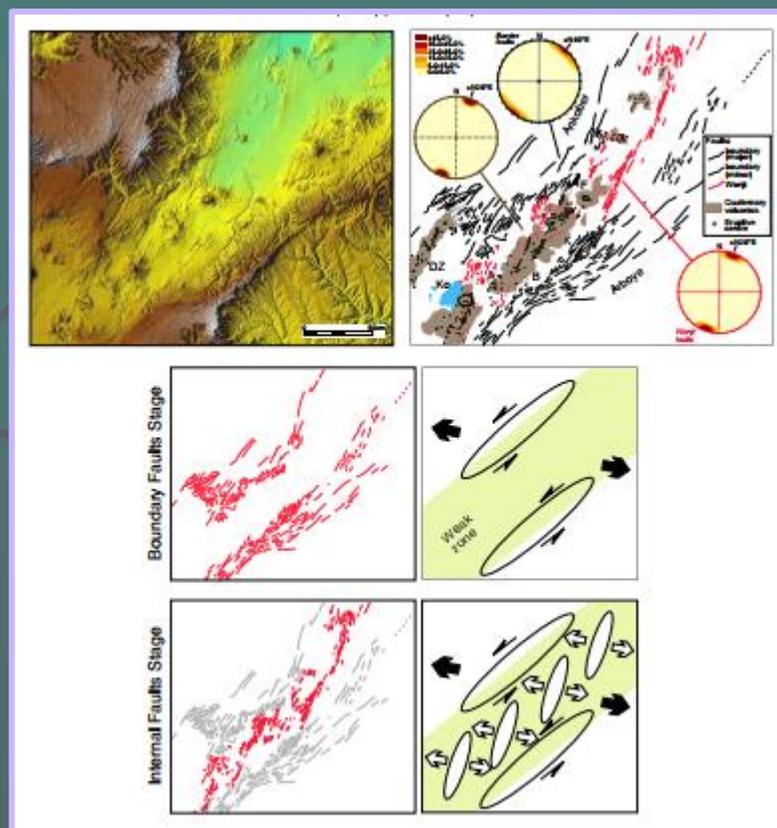
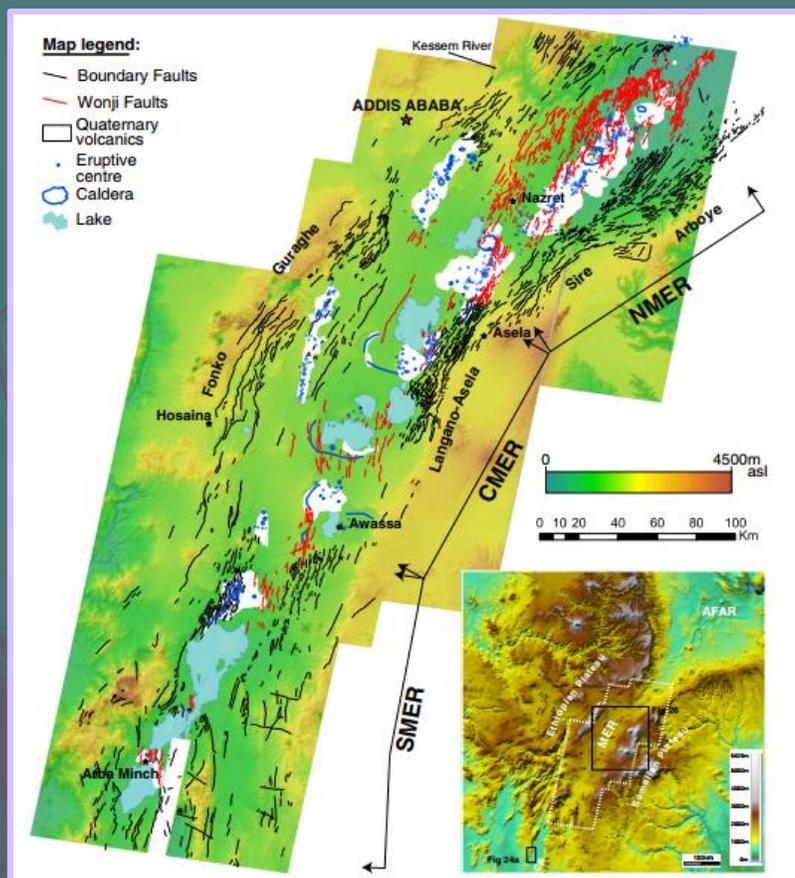
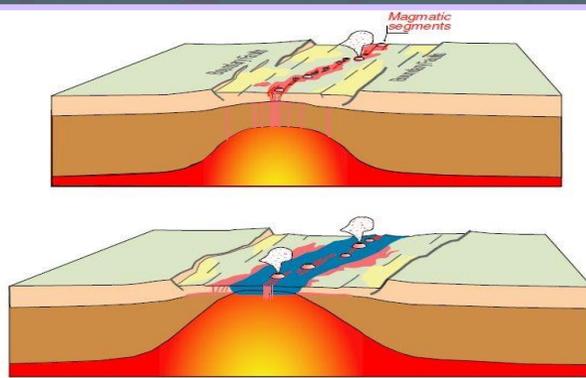
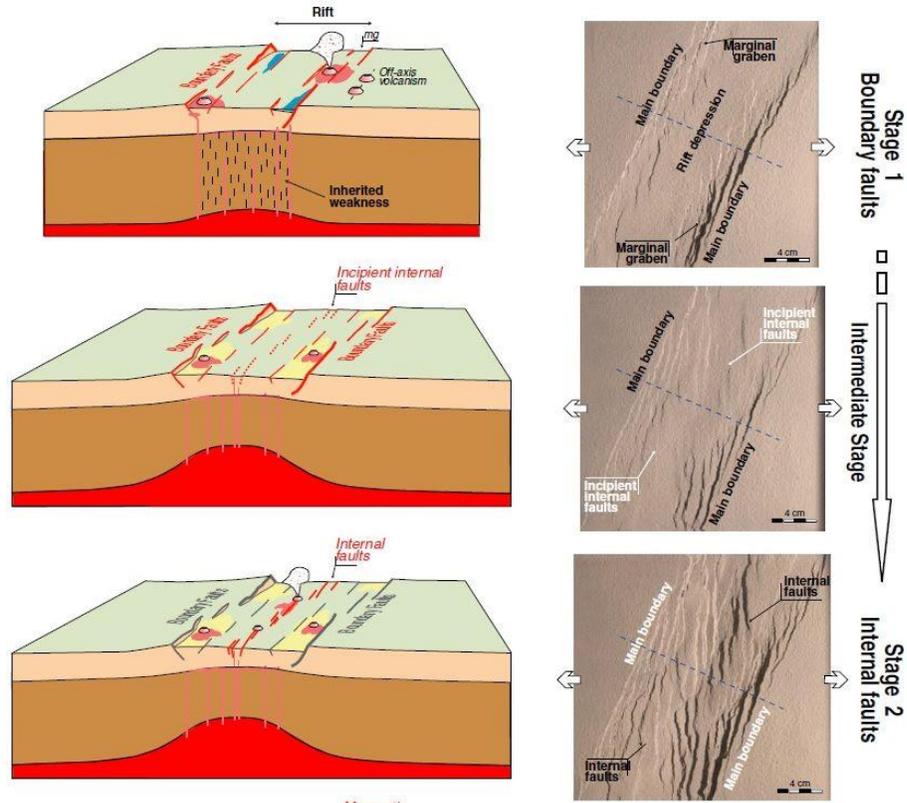


Схема разломов в Главном Эфиопском рифте

( no Agostini et al., 2009 из Corti, 2012)

Северного части Главного Эфиопского рифта: цифровая модель рельефа и схематическая структурная схема (no Corti, 2009). Внизу – схема предполагаемрй эволюцию этого сегмента рифта. Считается, что имеет место хорошая сходимость с результатами экспериментов



Focusing of magma upraising along internal faults  
 Strong modification of the continental lithosphere by extensive magma intrusion  
 Strong feedback between magmatism and deformation  
 Rupture of the continental lithosphere  
 Magmatic segments acting as new oceanic spreading centers

Результаты экспериментов и их сопоставление с развитием рифтовой долины в целом. Видно, что на начальных стадиях развития преобладает растяжение и образование систем разломов и грабенов, а на заключительных стадиях активную роль начинает играть магма, которая поднимается к поверхности и в конечном итоге может привести к разрыву сплошности земной коры

(Corti, 2012)

