

# Экспериментальная ТЕКТОНИКА

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

# Лекция 4

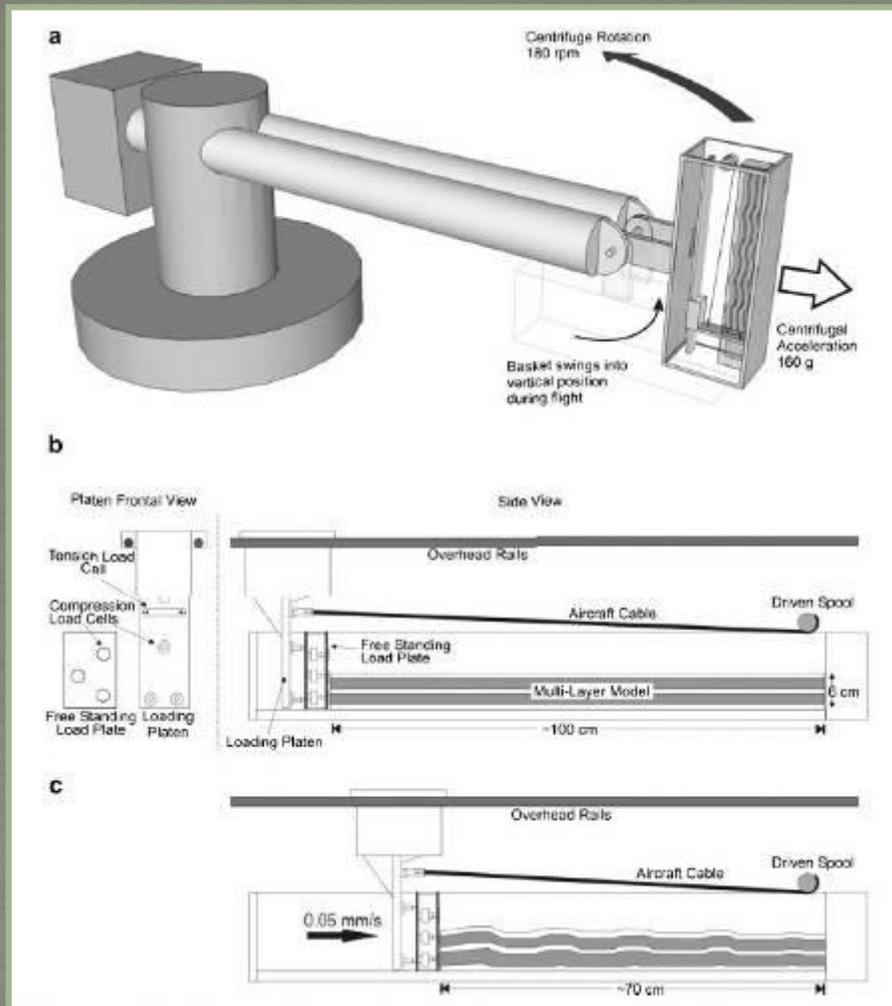
---

Современные эксперименты по воспроизведению складчатых структур и складчатых сооружений

# Эксперименты с применением большой центрифуги

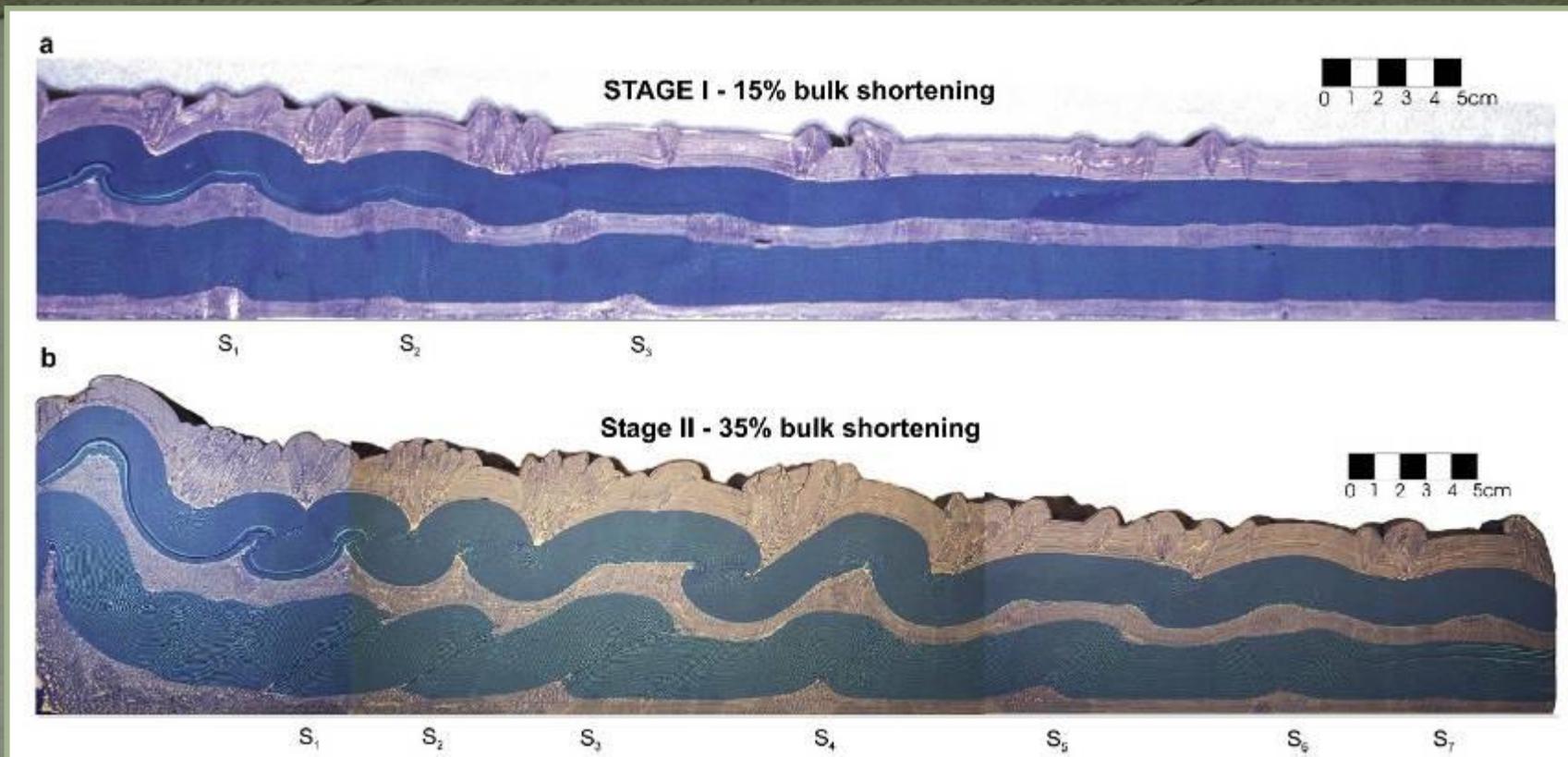


The C-CORE Accutron 680-2 centrifuge Experimental Tectonics Laboratory, Department of Geological Sciences, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada (*Noble, Dixon, 2011*)



Принципиальная схема центрифуги с сердечником: а) показывает ориентацию корзины в состоянии покоя и «в полете». Схематические профили тестовой слоистой пачки, используемой для укорочения моделей: (б) в начале; (с) после того, как модель подвергается 30% - ному укорочению.

(Noble, Dixon, 2011)



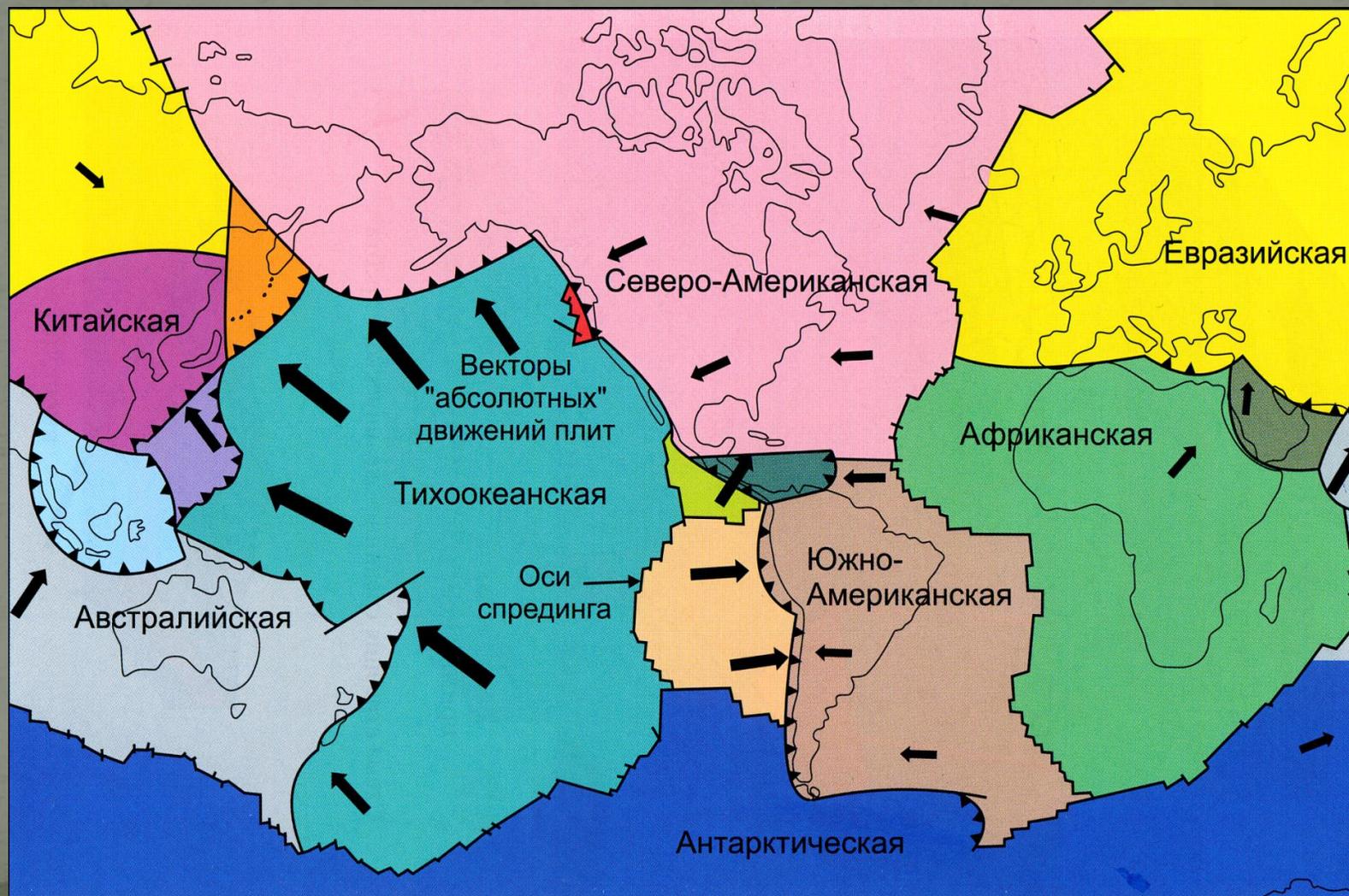
(Noble, Dixon, 2011)

Поперечные профили модели ТН16, имеющие место после (А) стадии I и (Б) стадии II деформации. Складки изгиба и связанные с ними надвиговые структуры, которые в дальнейшем развиваются, помечены в порядке их последовательного развития, как на фотографиях стадии I, так и на фотографиях стадии II. Эквивалентные материалы – пластилин и силикон

Что здесь образуется сначала, а что потом - складки или надвиги?  
А в складчато-надвиговых областях – что формируется в первую очередь?

# Моделирование складчатых областей (продолжение)

## Концепция тектоники плит



# Вернемся к гипотезам о формировании горно-складчатых областей

С 70-х годов прошлого века в связи с **концепцией тектоники плит** снова широко обсуждаются различные варианты **внешнего воздействия** на осадочные толщи горно-складчатых областей.

- Это вызвало новую волну соответствующих экспериментов

- Экспериментальные работы выполнялись, в основном, в технике

«sand-box» моделирования (Hubert, 1951)

Большинство западных исследователей считает, что сухие слабосвязанные гранулированные материалы подходят для моделирования структур верхней коры и, в частности, для моделирования аккреционных призм

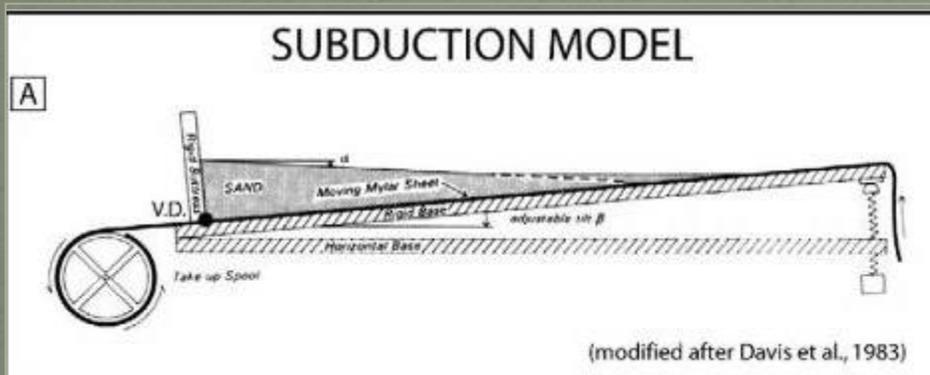
# Граничные условия

- Кинематические и механические граничные условия: простая конвергенция или субдукция.
- Материал деформируется посредством упора (см рисунок)
- Эквивалентный материал: сухой песок или (реже) влажная глина.
- Упор жесткий (металл, дерево) - рис. А, С ; или деформируемый (изготовлен из того же эквивалентного материала). Рис. В, D.
- Добавим, что может меняться также форма упора

# Два крайних члена моделей, согласно тектонике плит

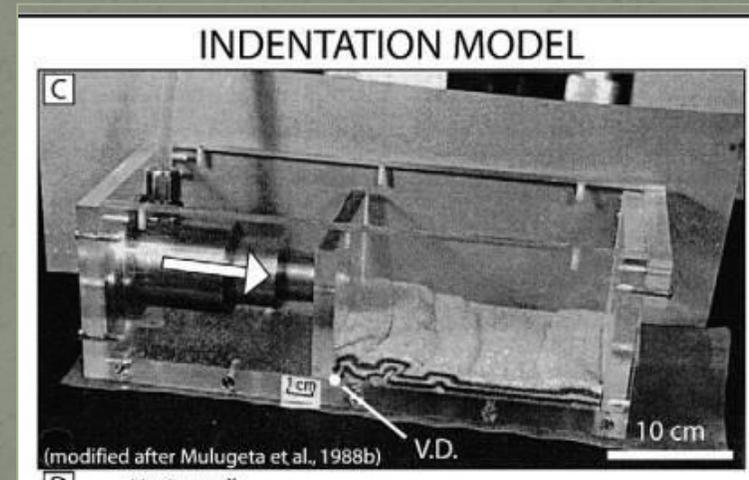
- «Субдукционная модель»

Пленка в основании модели тащит модельный материал под фиксированный упор (рис. А ).  
Движение навстречу упору вызывает укорочение и деформацию материала



- «Модель индентора»

Движущийся штамп, или индентор, деформирует материал (рис. С )

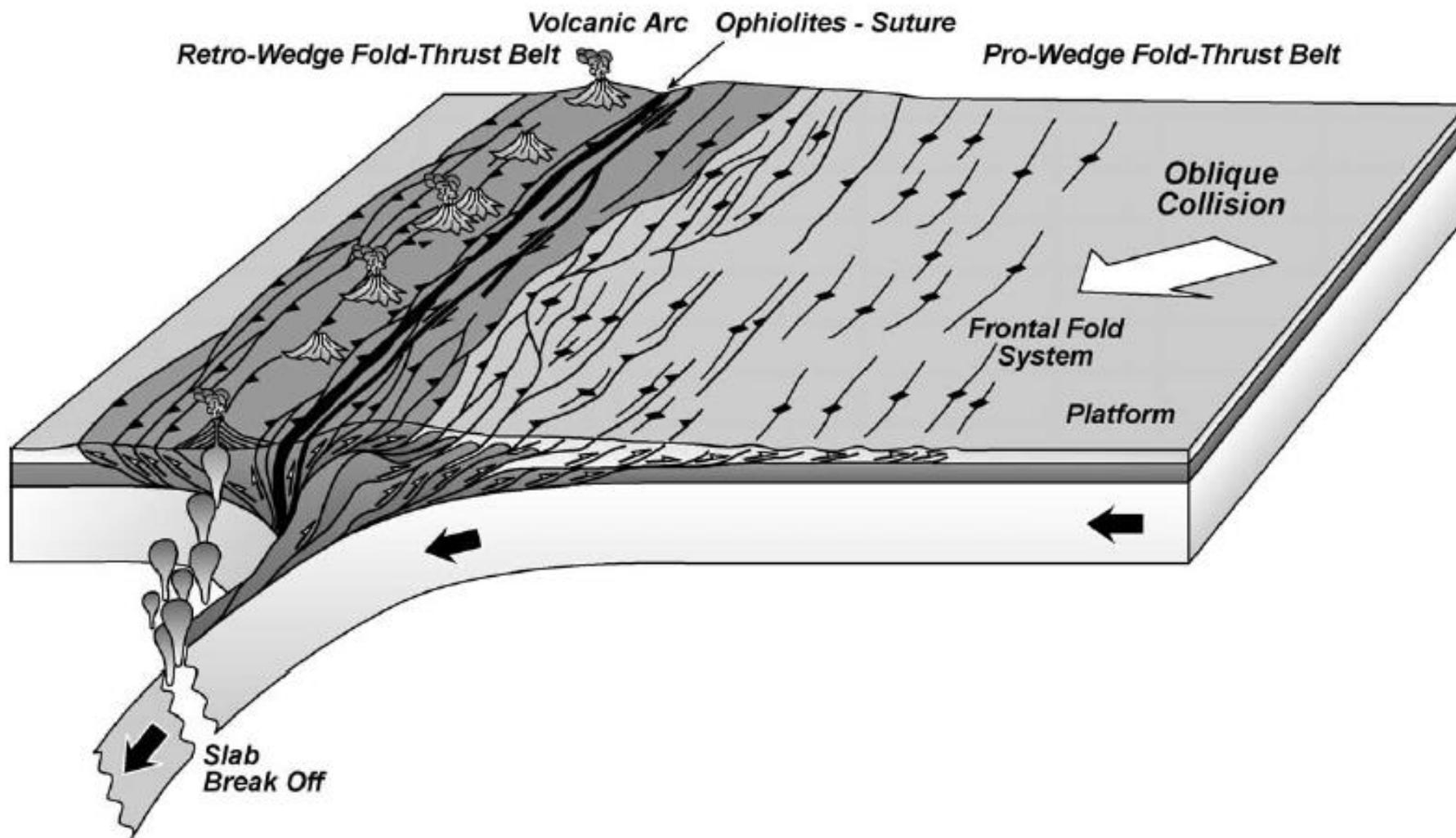


Считается, что такое различие в граничных условиях мало влияет на результат деформации

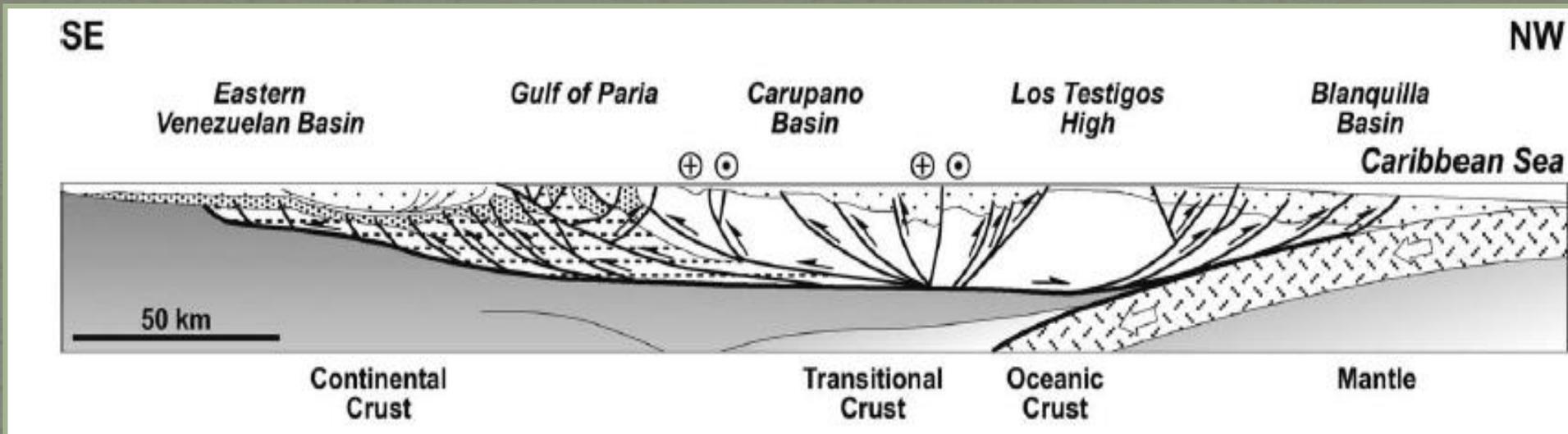
Энергетически выгоднее субдукционная модель

(из Graveleau and others, 2012)

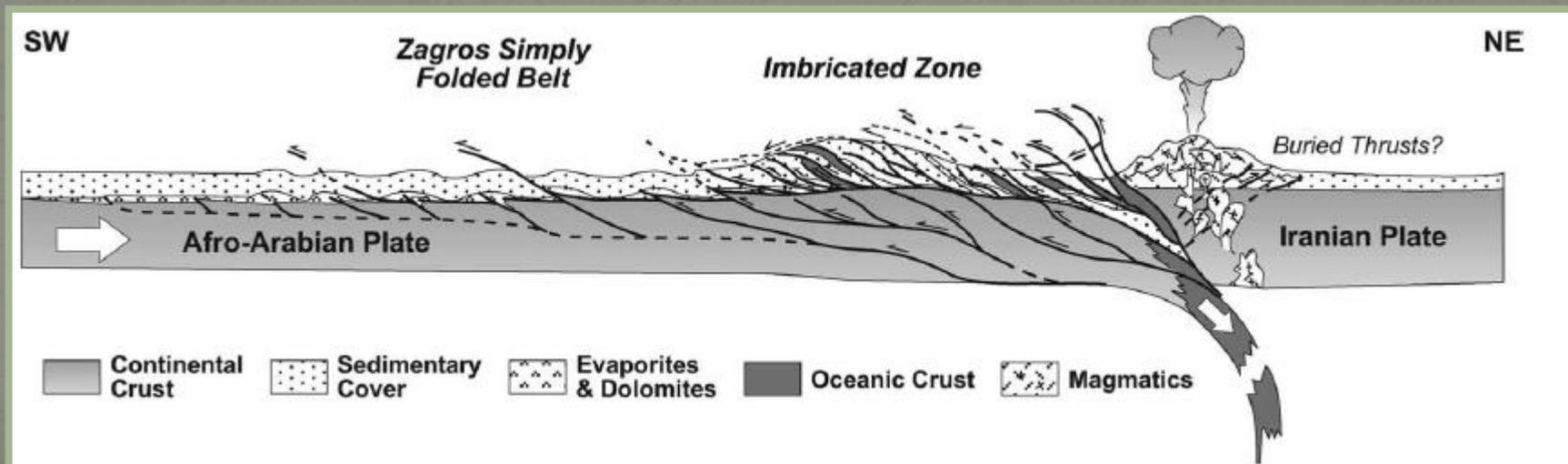
# Модель аккреционной призмы



# Примеры аккреционных призм

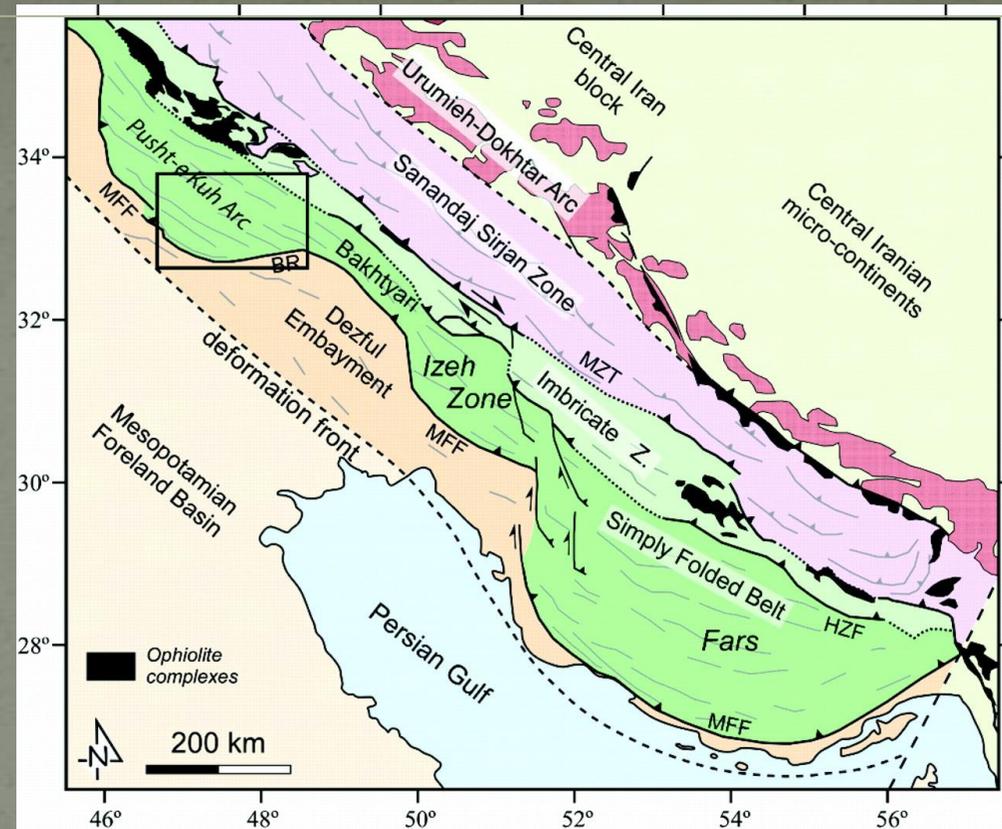
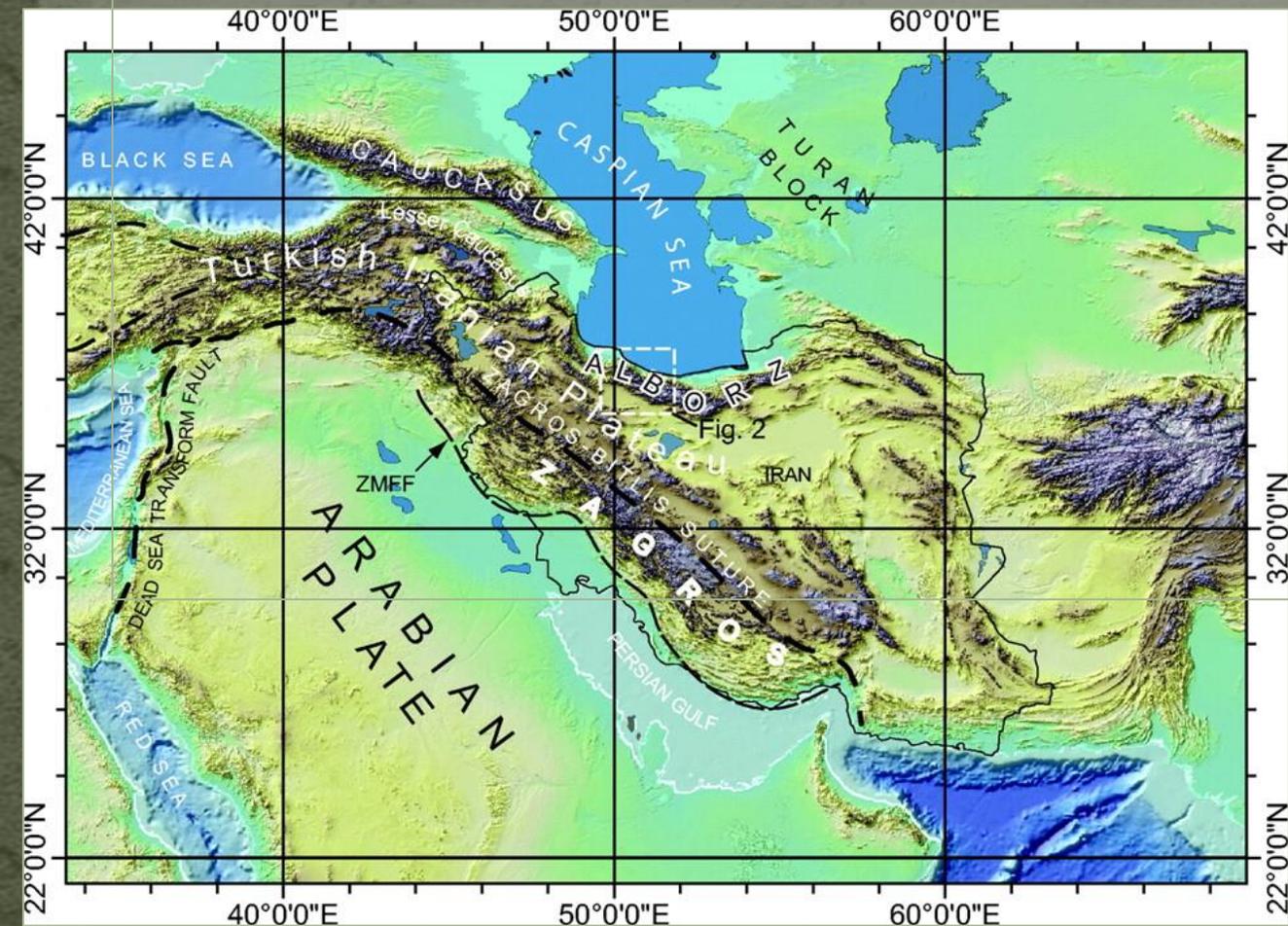


Карибский бассейн

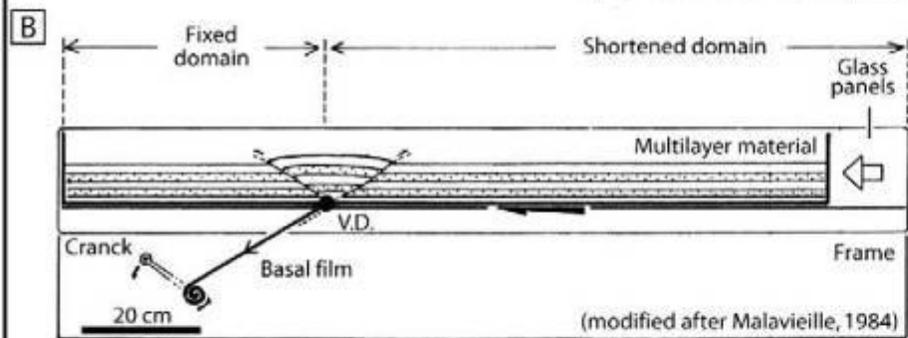
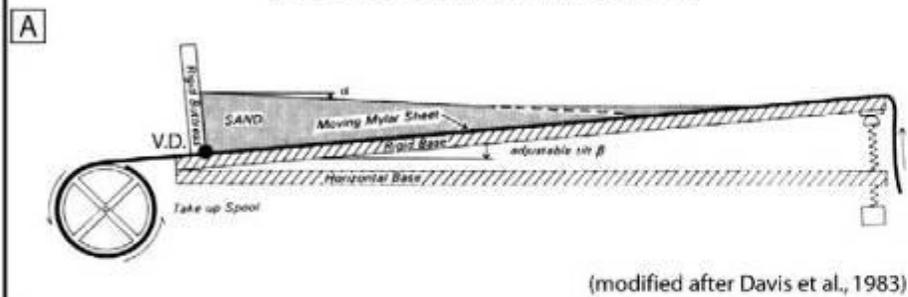


складчатая система Загроса

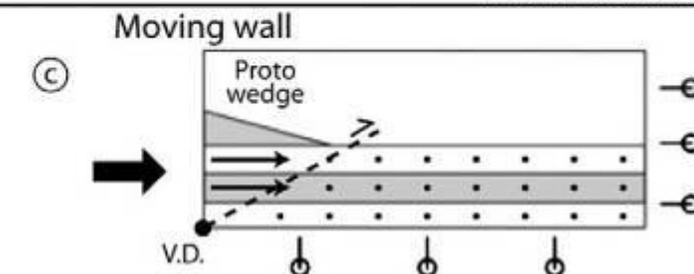
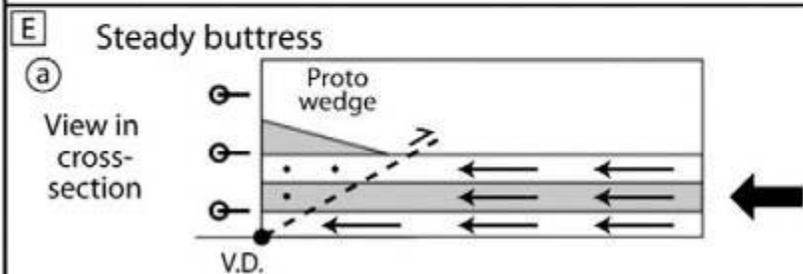
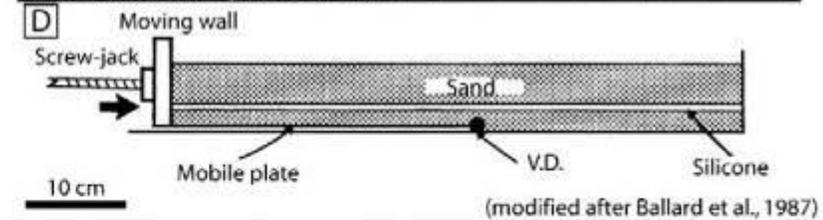
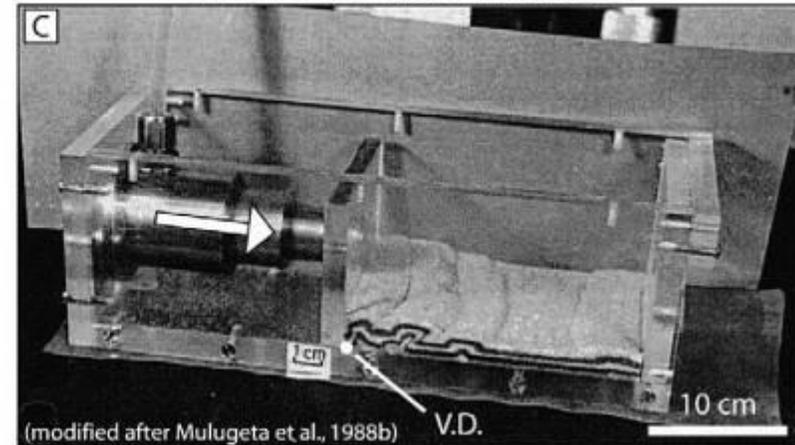
- Складчатая система Загроса на схеме и карте



## SUBDUCTION MODEL



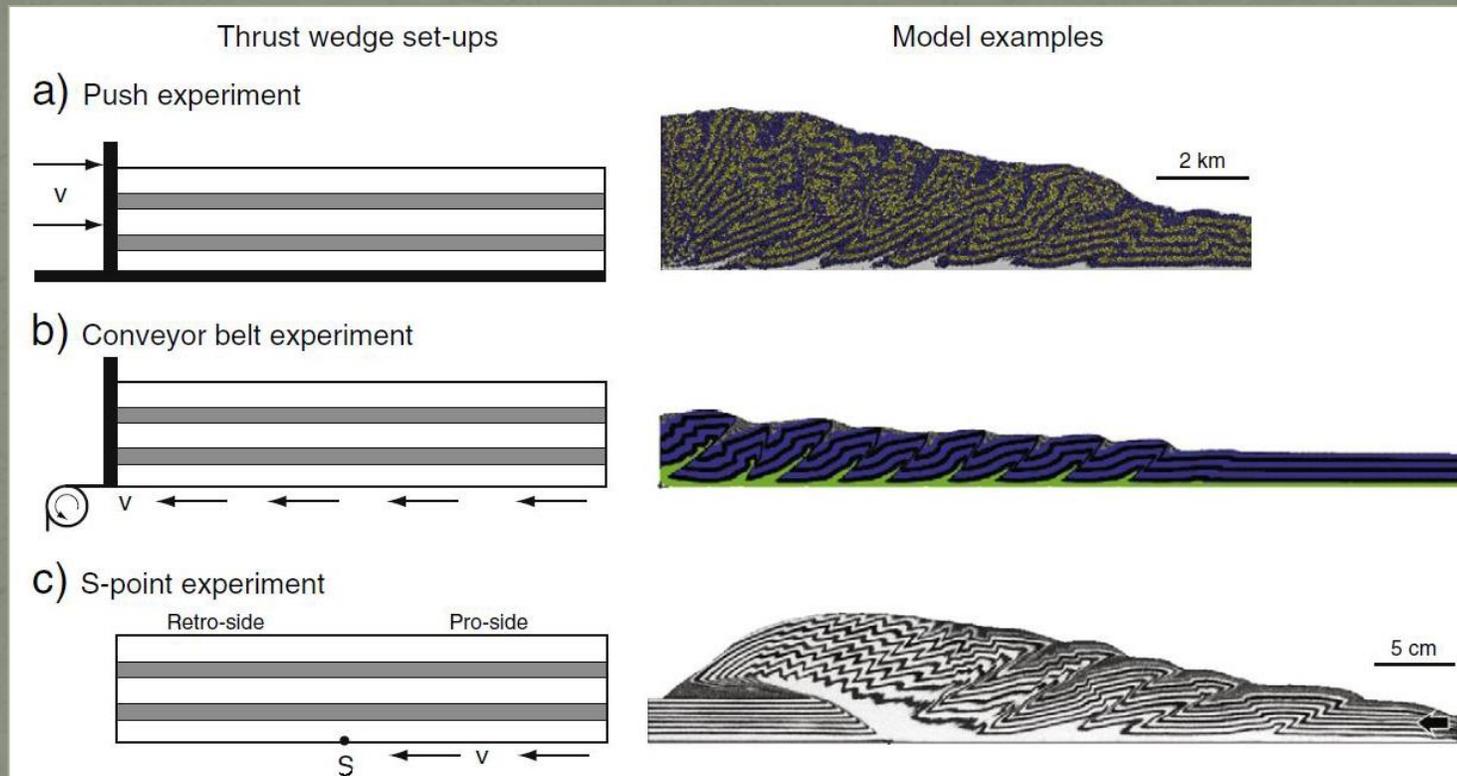
## INDENTATION MODEL



(uz Graveleau and others, 2012)

V.D. - velocity discontinuity

# Примеры граничных условий, используемых в численном и аналоговом моделировании надвиговых клиньев (по Buiter, 2012)



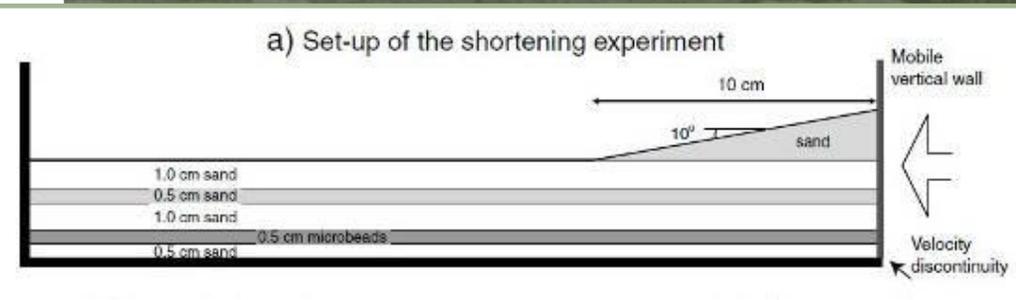
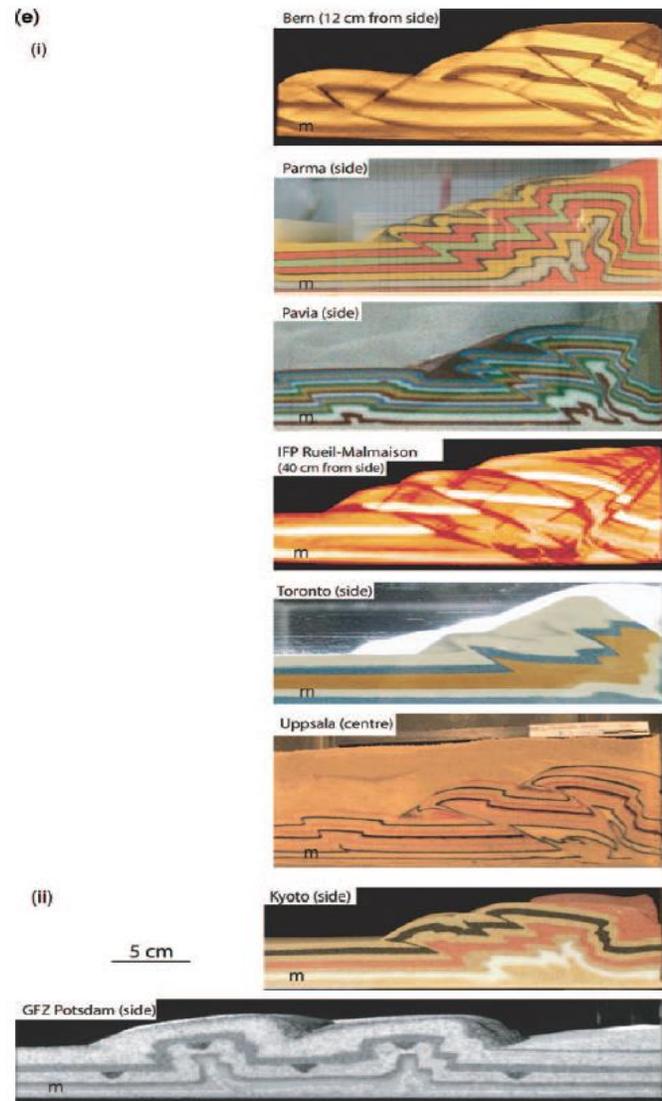
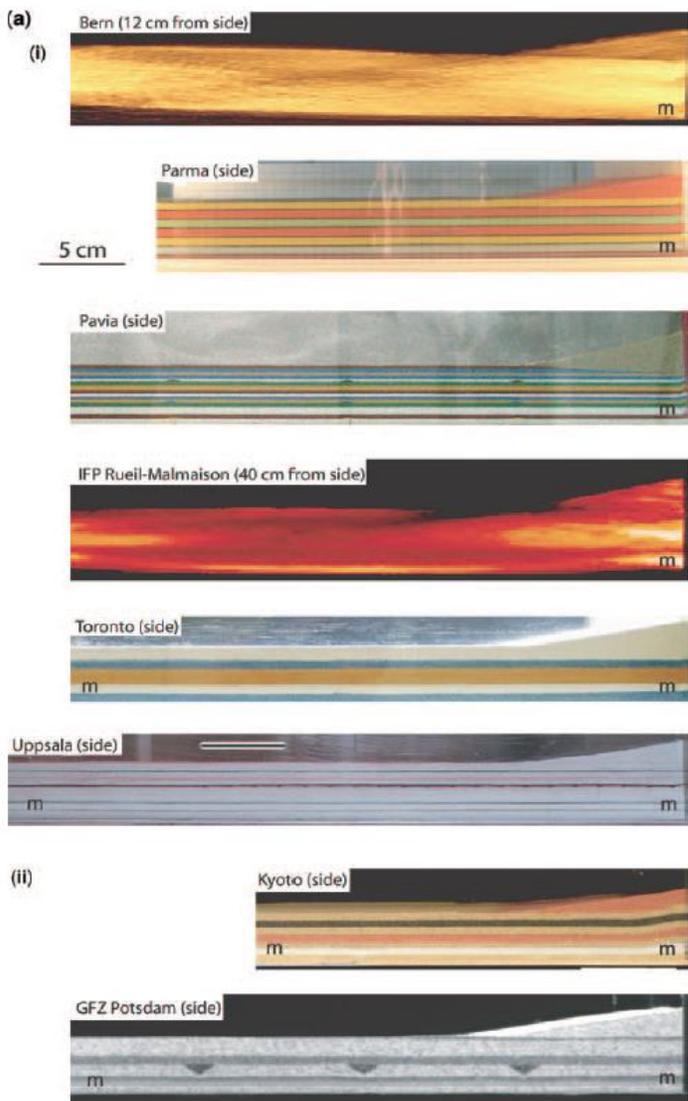
# Моделирование аккреционных призм

В нескольких лабораториях по всему миру были выполнены эксперименты по воспроизведению аккреционных призм в одинаковых условиях

**Analogue benchmarks of shortening and extension experiments**

GUIDO SCHREURS, SUSANNE J. H. BUTER

2006



Примеры экспериментов с движущимся штампом. Условия моделирования во всех экспериментах были сходными (Buiter, 2012)



Сравнить с опытом Форхаймера

Через 10 лет эксперименты повторили, но условия были не просто сходными,  
а максимально одинаковыми

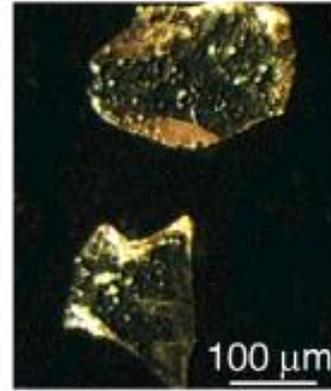
# Benchmarking analogue models of brittle thrust wedges

Guido Schreurs, Susanne J.H. Buiter, 2016

## Quartz sand



## Corundum sand



origin:

Triassic quartz sand

bauxite

composition:

99 %  $\text{SiO}_2$

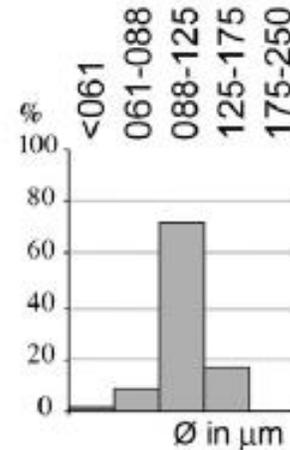
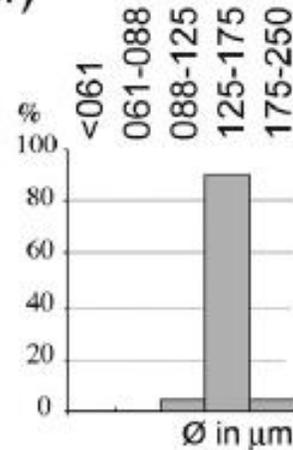
95 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$

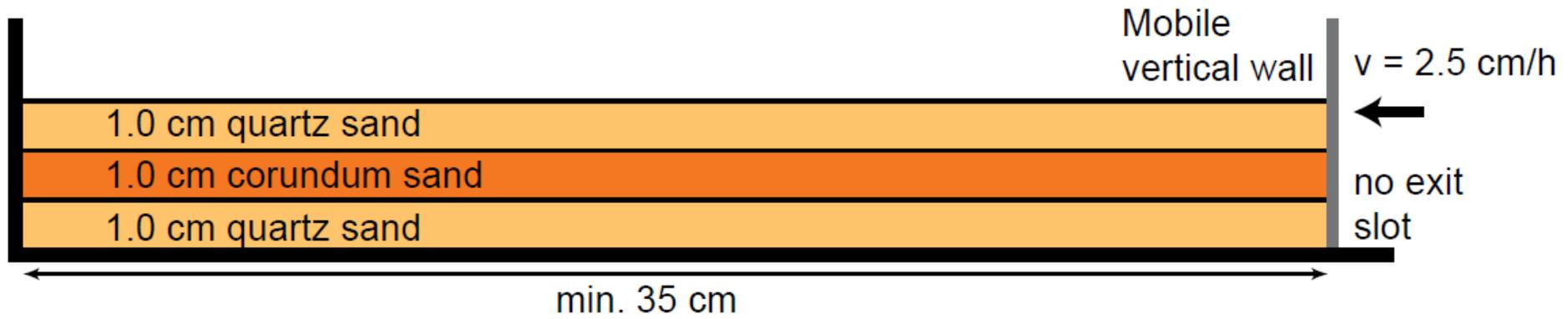
grain size range  
(as indicated by supplier)

80-200 μm

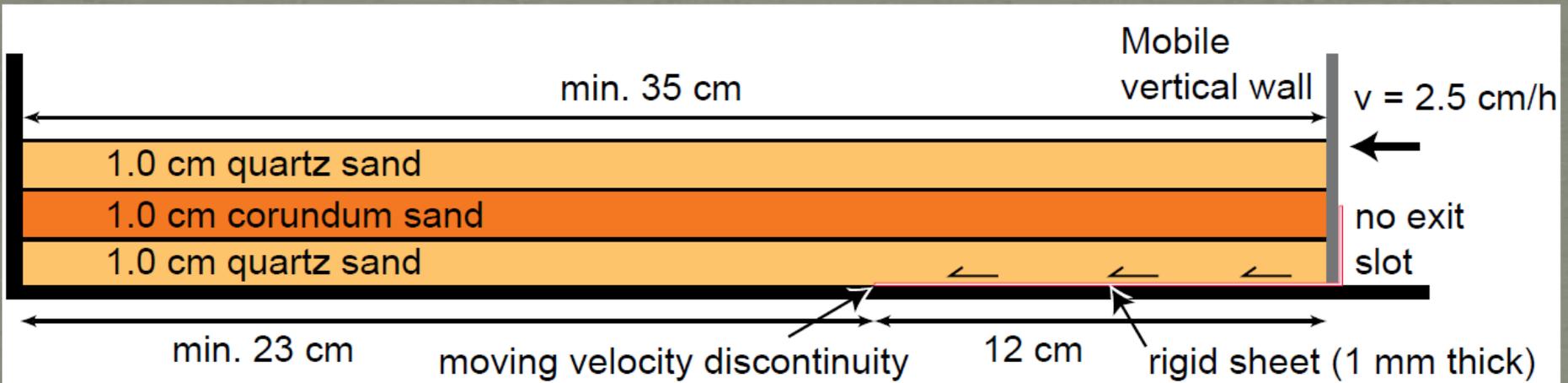
88-125 μm

grain size distribution  
(μm)

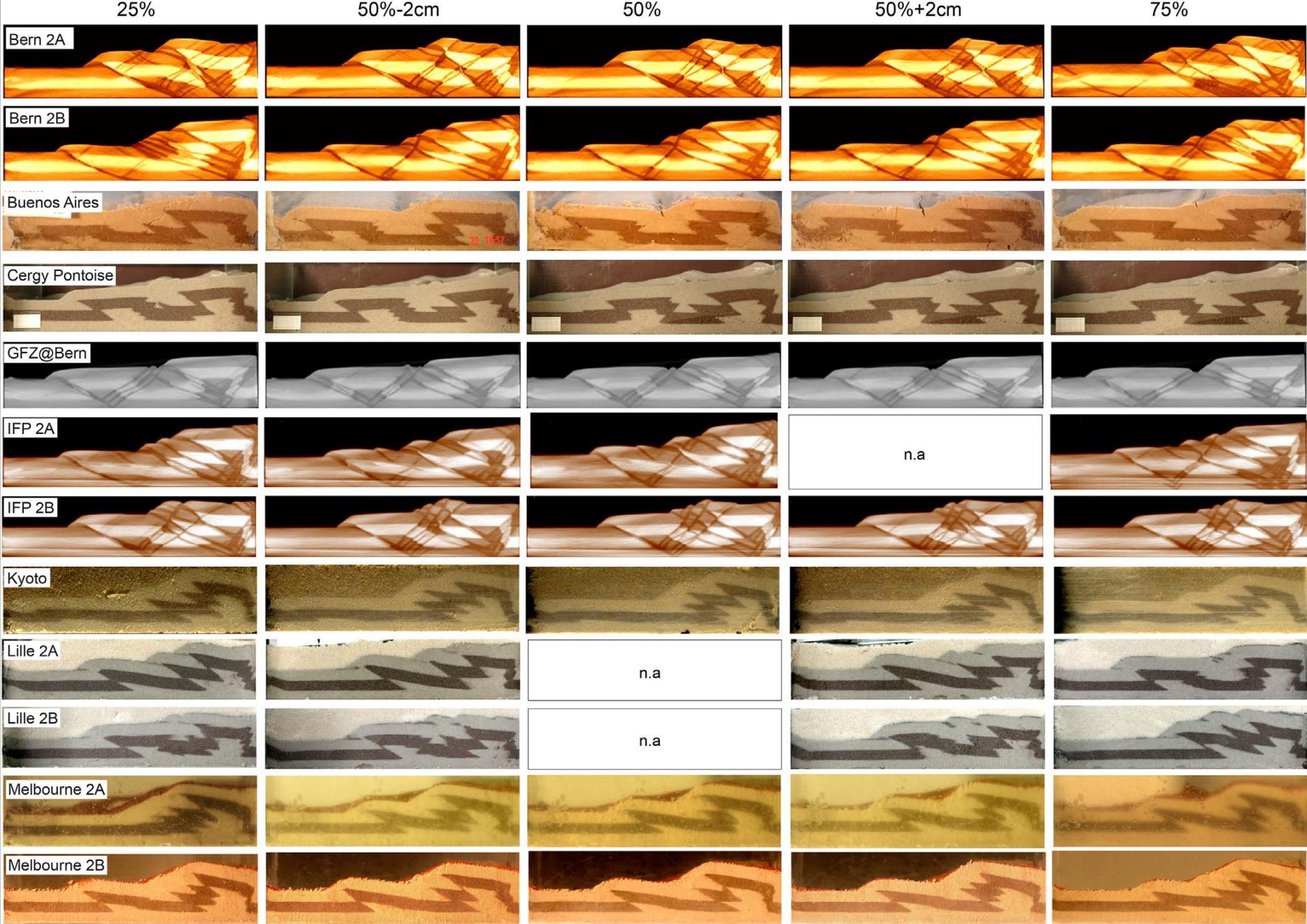




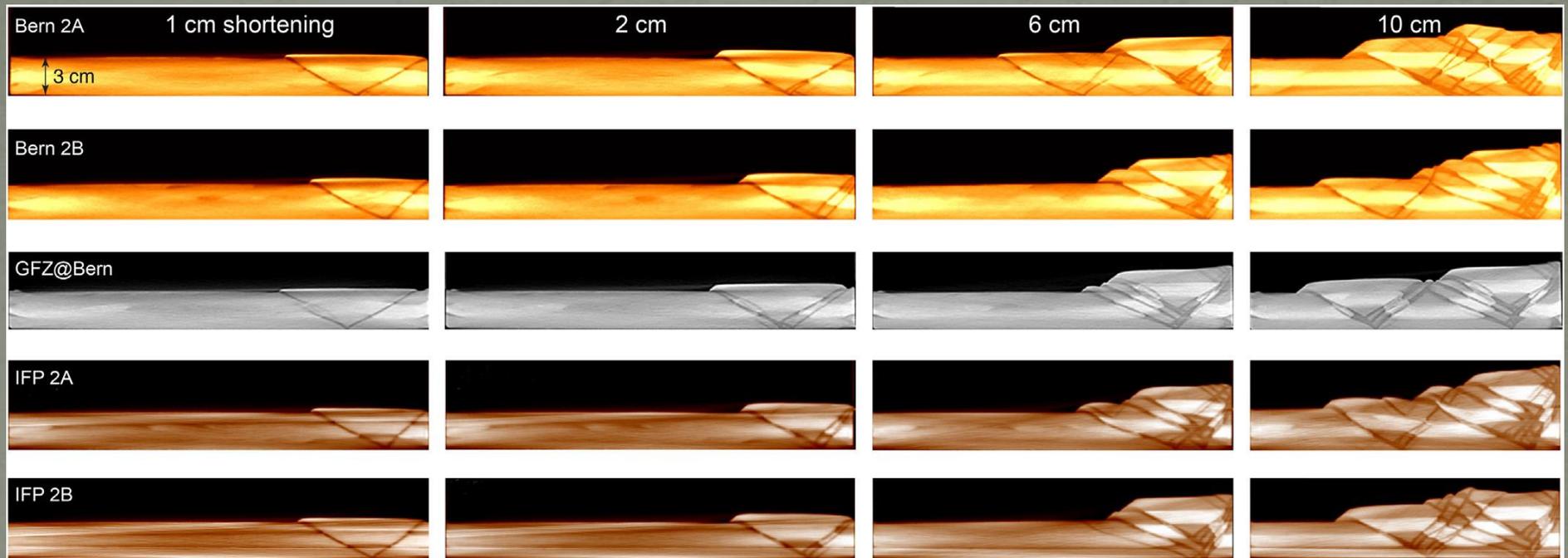
**Fig. 12.** Model set-up for experiment 2.



**Fig. 22.** Model setup for experiment 3.



Experiment 2



Experiment 2, XRCT



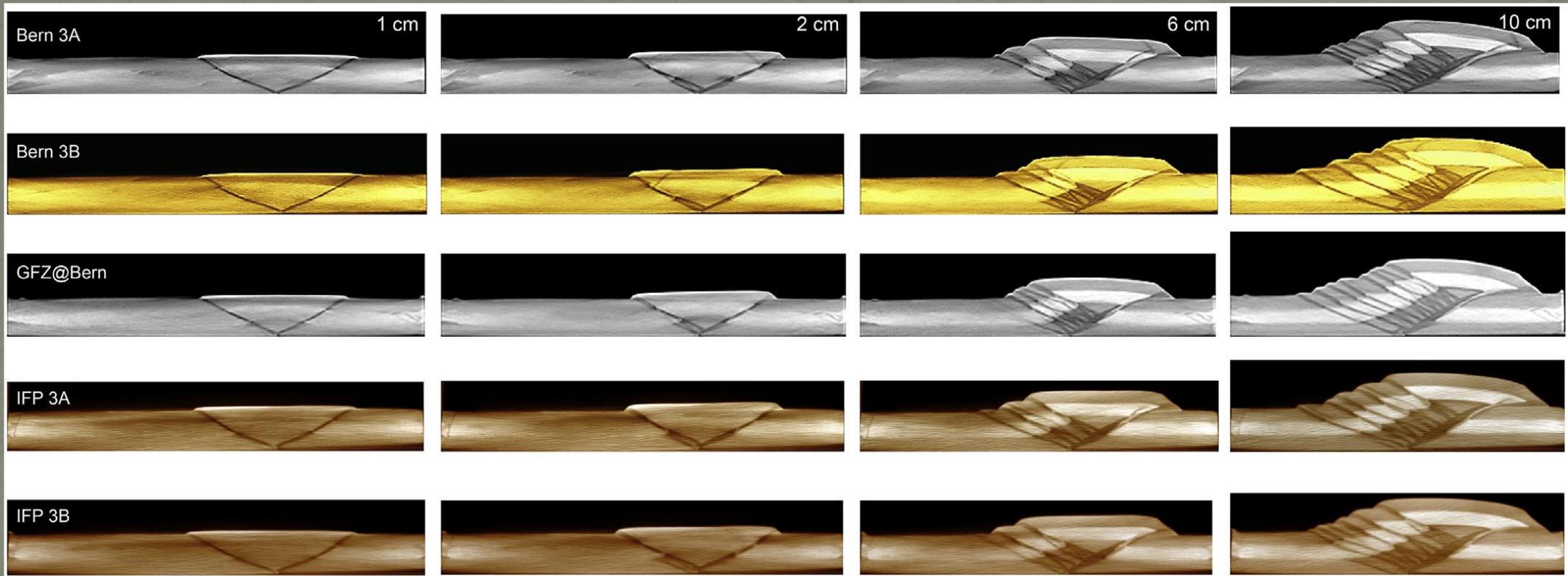
1

2

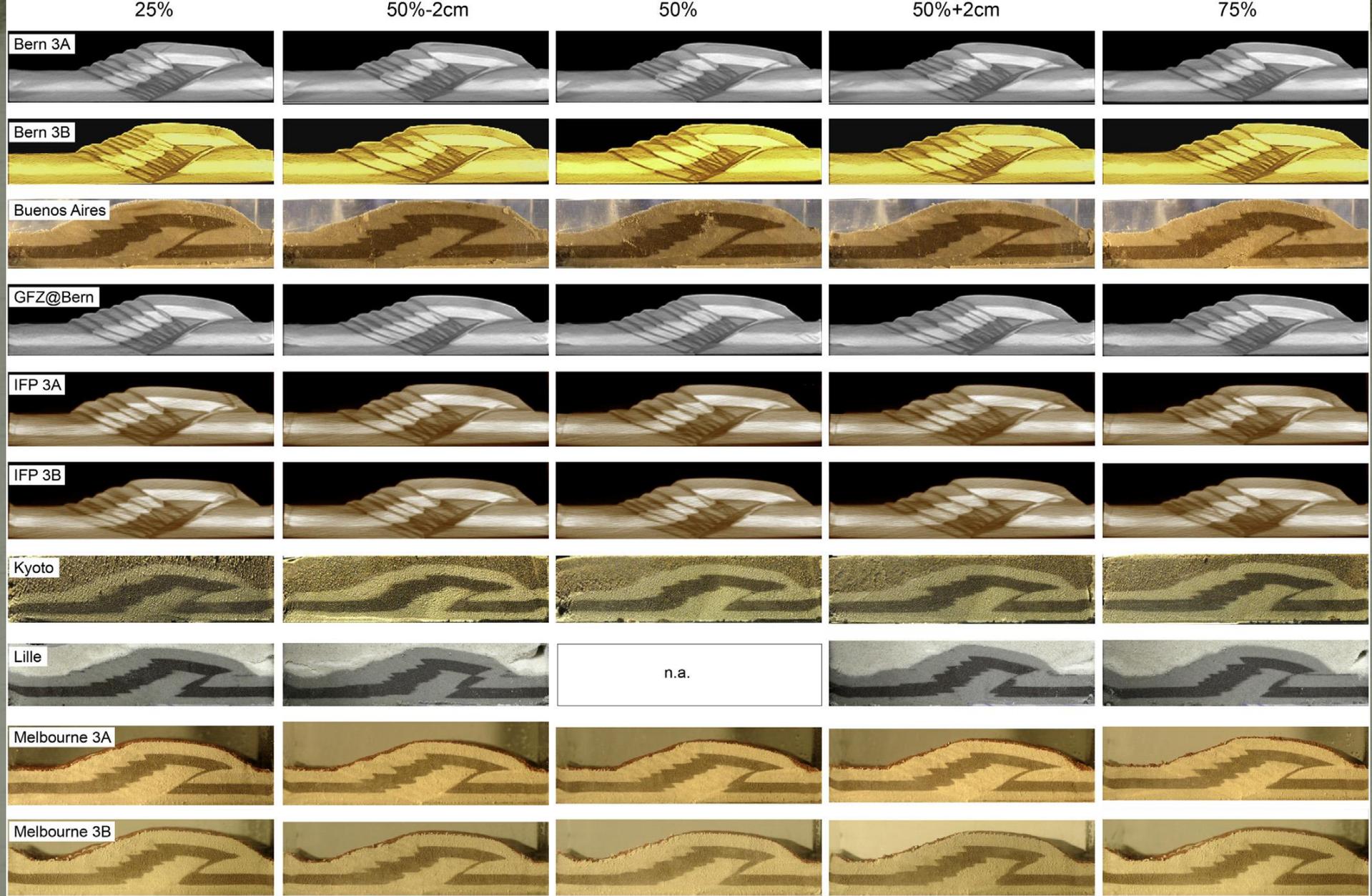
3

4

5

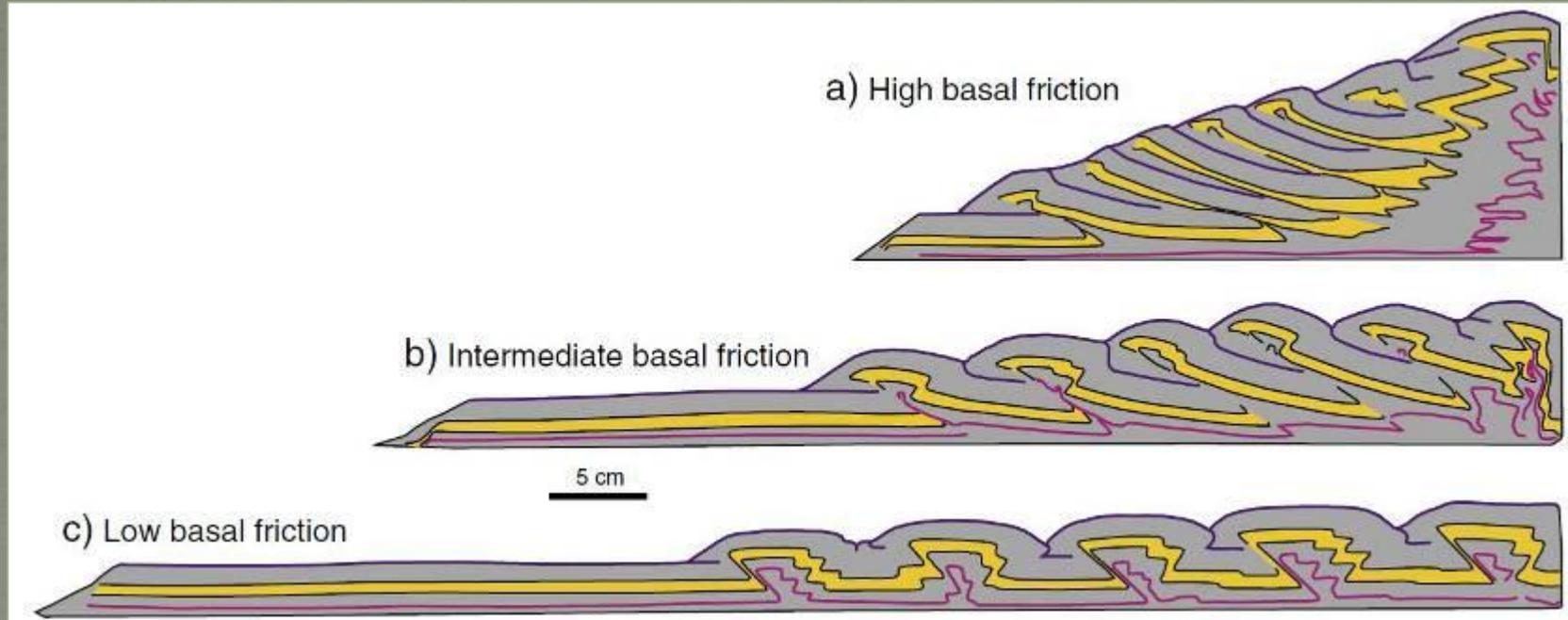


Experiment 3, XRCT



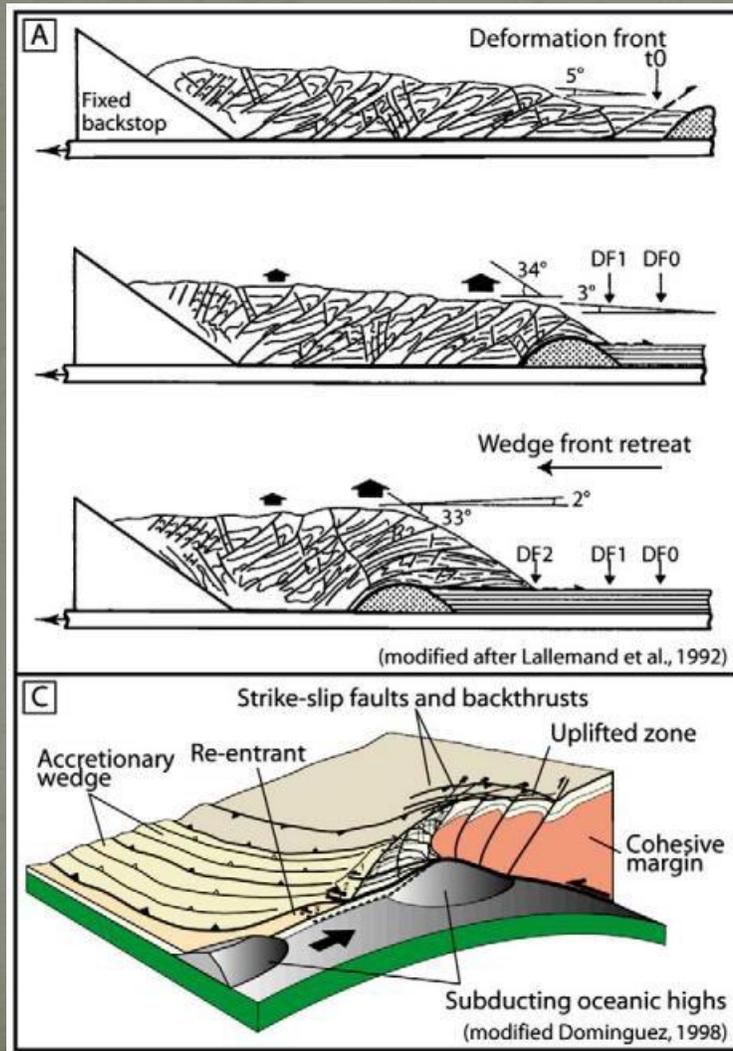
Experiment 3

# Надвиговые клинья разной конфигурации. Зависимость от величины трения на подошве



В каждом из этих экспериментов базальное трение было разным.  
Эквивалентный материал – песок, деформация с помощью движущегося штампа (push experiment) (no Huiqi et al., 1992)

# Влияние неровностей субдуцирующей плиты на динамику аккреционного клина



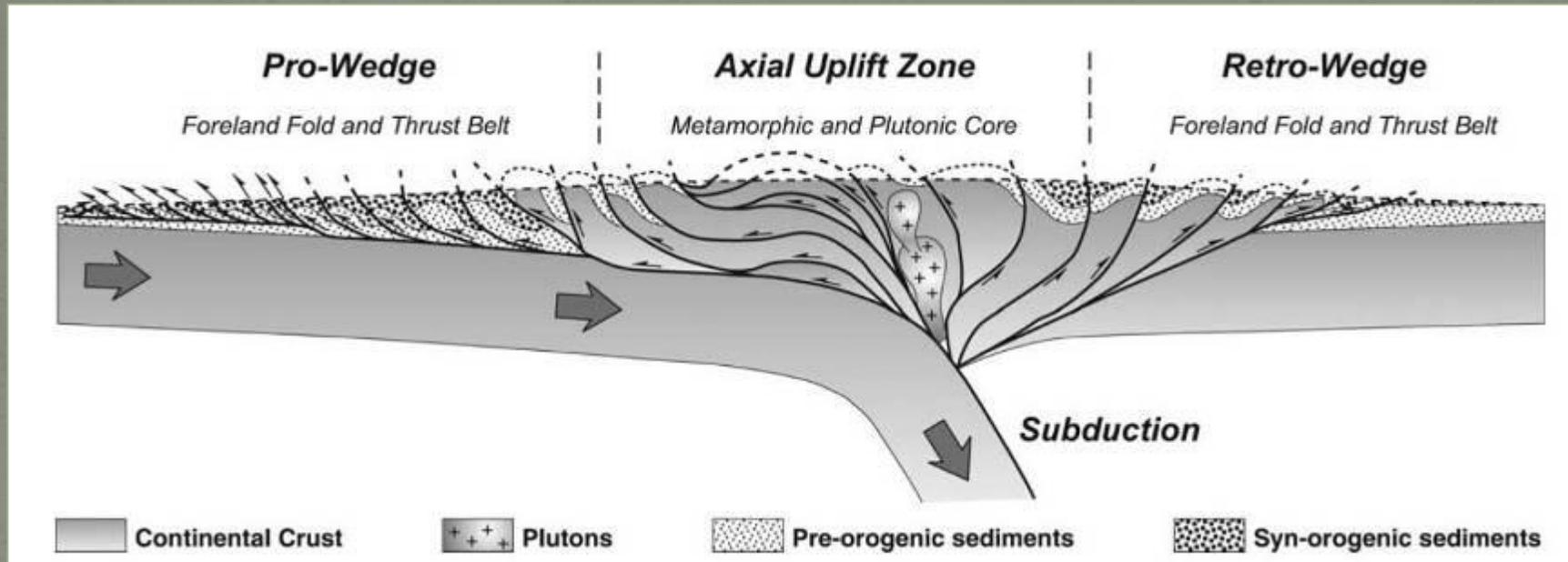
А – Эволюция деформации, вызванная субдуцированным горным хребтом. Аккреционный клин изменяется коренным образом, как только хребет начинает протаскиваться под аккреционной призмой.

С – Обобщенная трехмерная схема. Появляются характерные структуры: обратные надвиги на фронте подводной горы, субвертикальные сдвиги и сбросы в задней части горы.

(Graveleau et al., 2012)

# Моделирование косо́й конвергенции

McClay and other (2004) «3-х мерная эволюция складчато-надвиговых поясов, формирующихся при косо́й конвергенции». Это субдукционная модель, S-point experiment



Концептуальная модель коллизионного дивергентного орогена

Как мы видим, эксперимент будет проводиться с моделью (общие представления о строении и механизме формирования складчато-надвиговых сооружений)

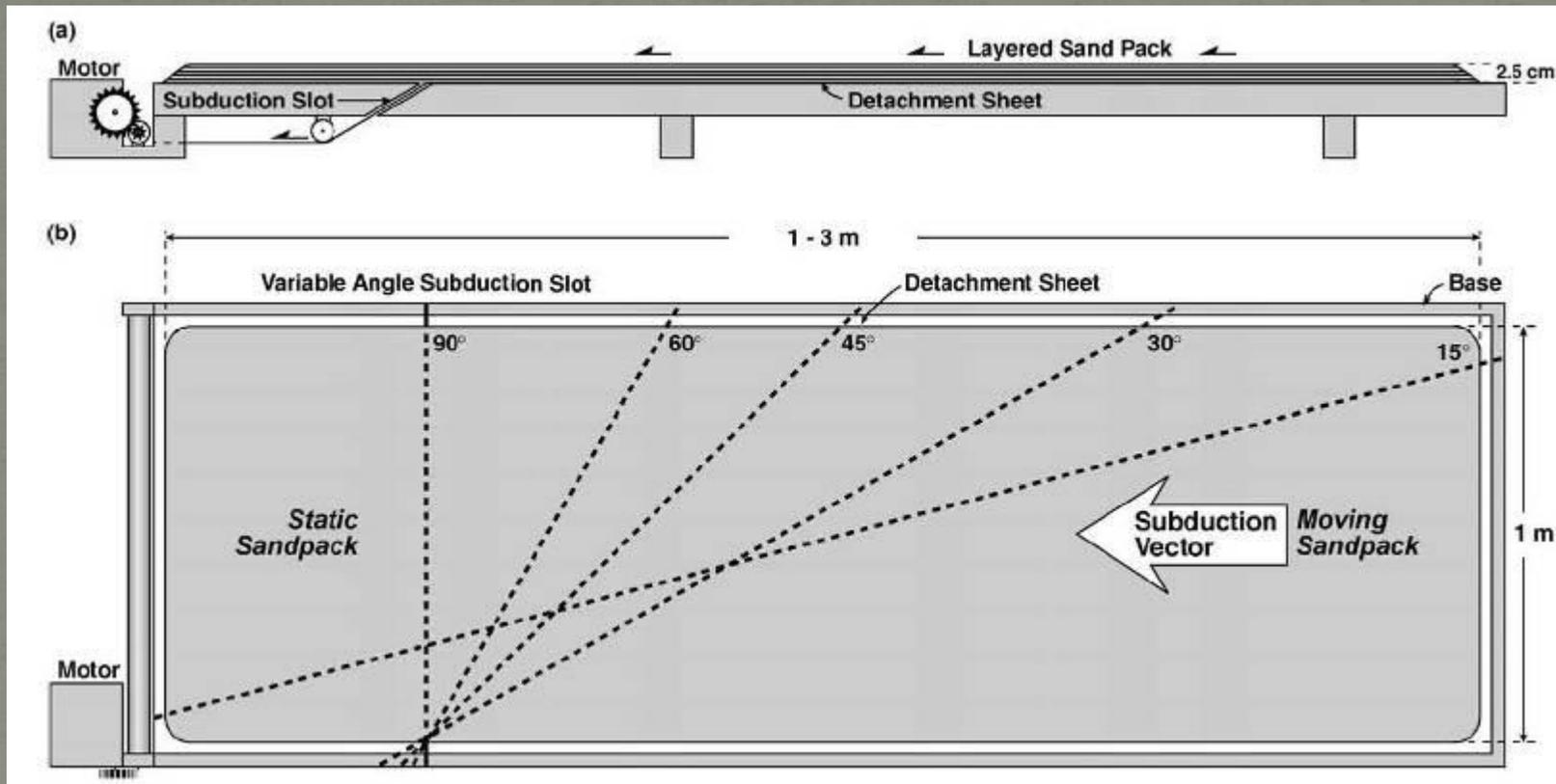
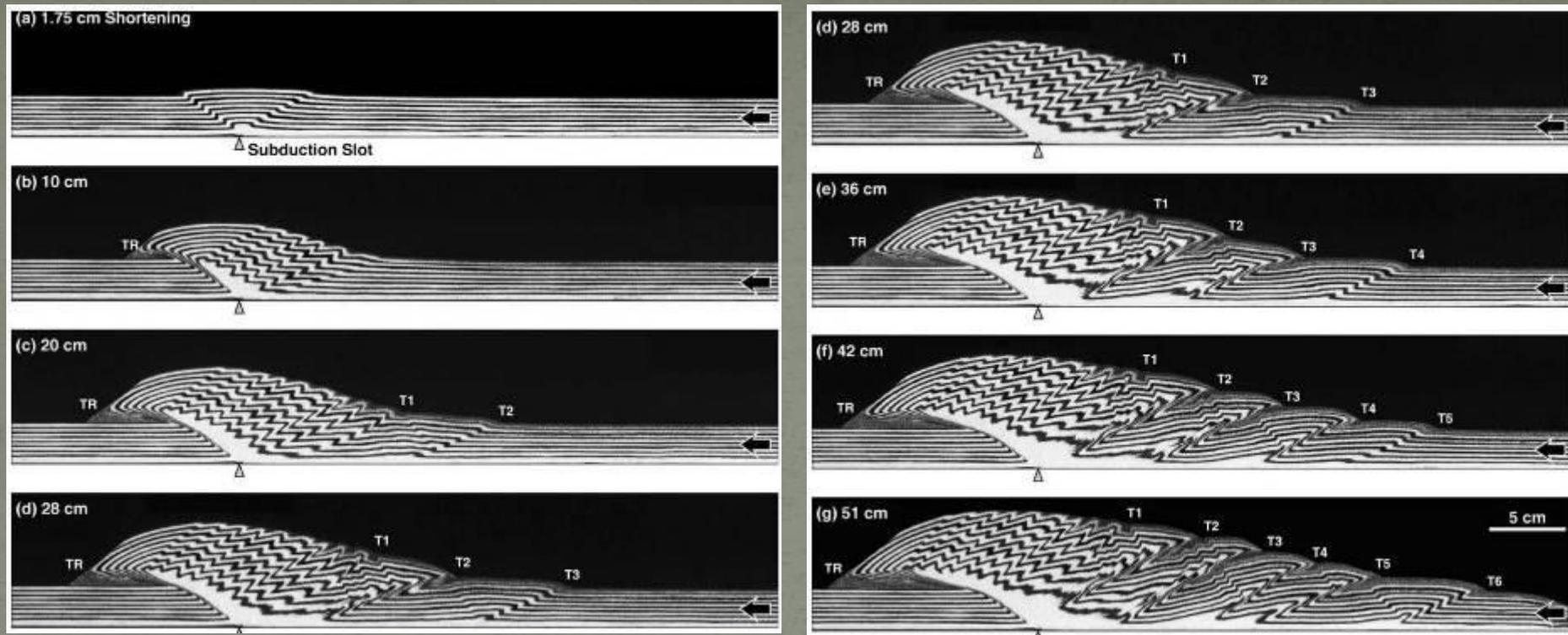
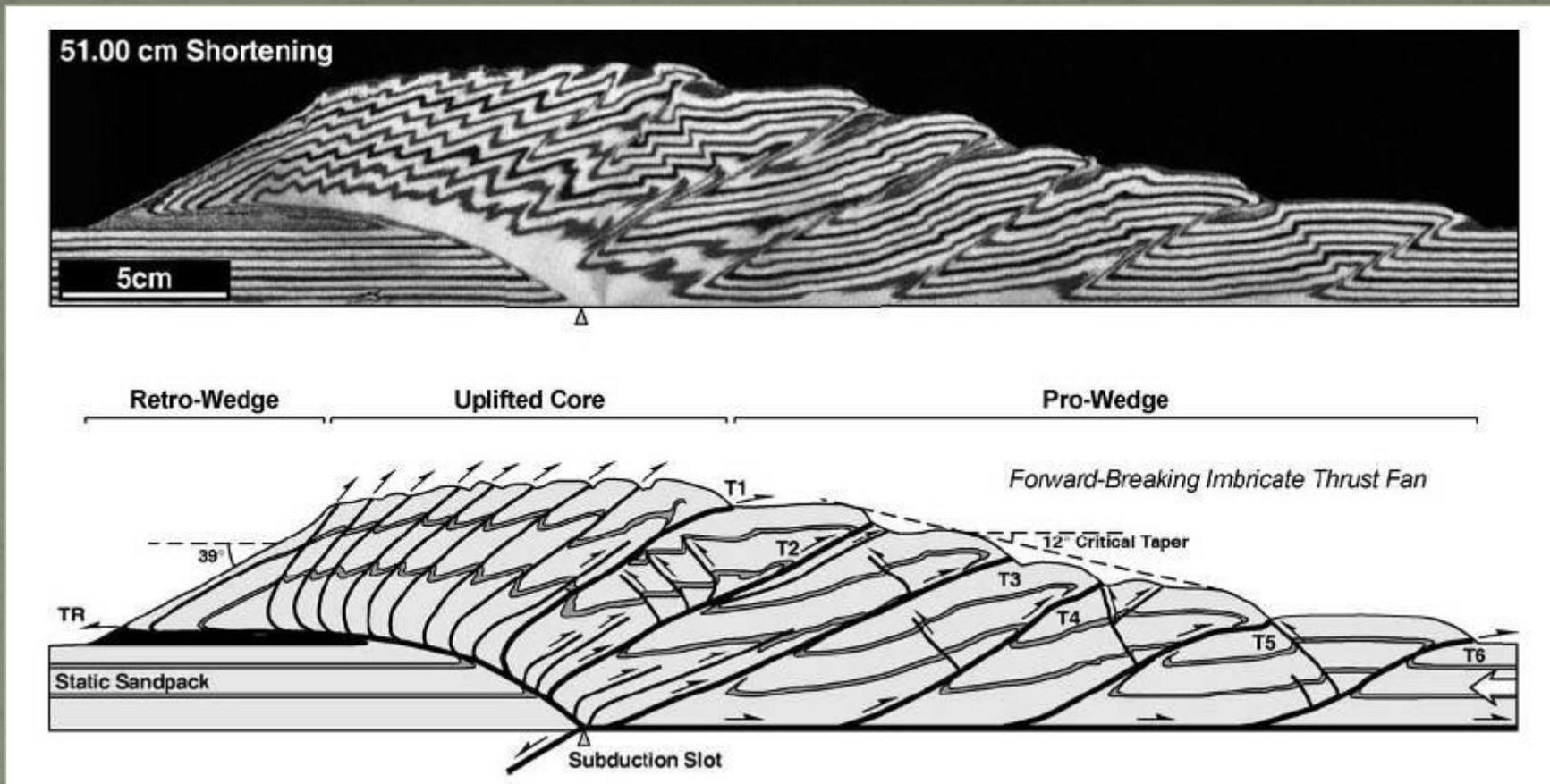


Схема установки. S-point – субдукционная щель.

McClay and other (2004)



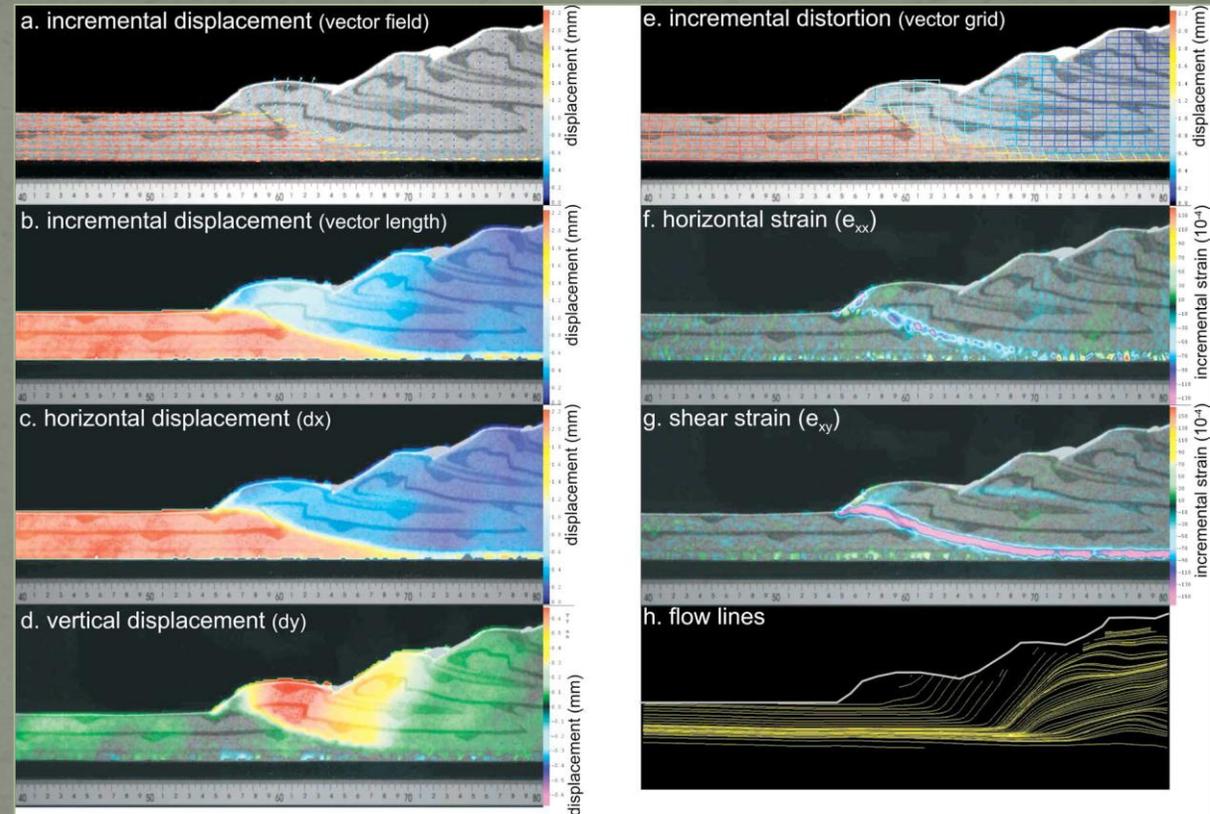
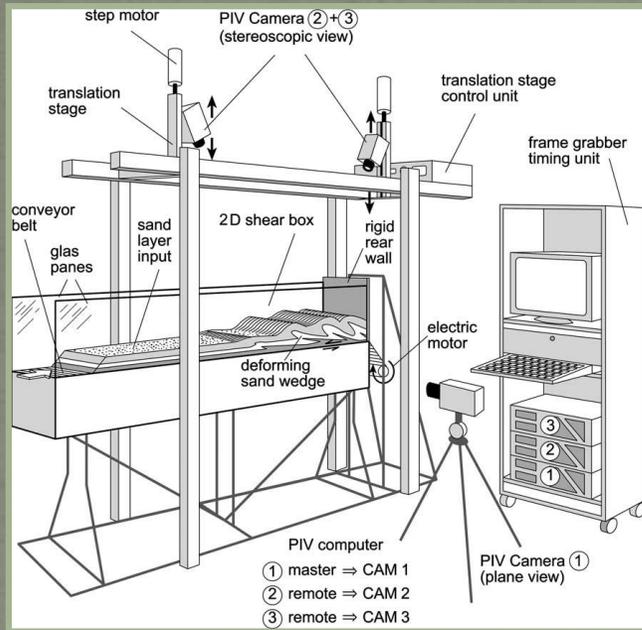
Результат эксперимента при ортогональной конвергенции



Вертикальный разрез конечной стадии эксперимента и рисунок с интерпретацией этой модели McClay and other (2004)

Справа- чешуйчатый надвиговый веер. Здесь действительно были созданы условия для его формирования. Есть ли другие пути для создания этих условий?  
 Что показывает этот эксперимент?

# Моделирование процессов надвигообразования в акреционных клиньях

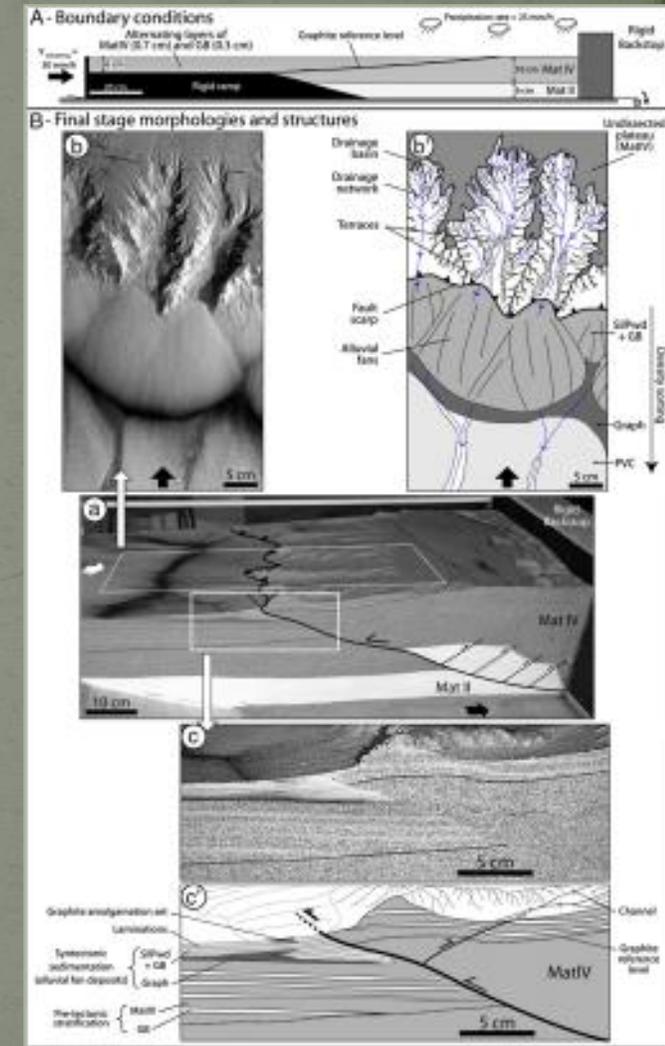
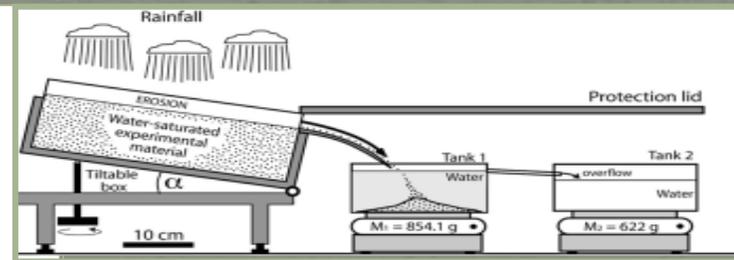


Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques  
J. Adama\*, J.L. Uraib, B. Wienekec, O. Onckena, K. Pfeifferc, N. Kukowskia, J. Lohrmanna, S. Hotha, W. van der Zeeb, J. Schmatzb

aGeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Germany

(из материалов С.А. Борнякова)

# Экспериментальное исследование взаимосвязи тектонических и седиментационных процессов

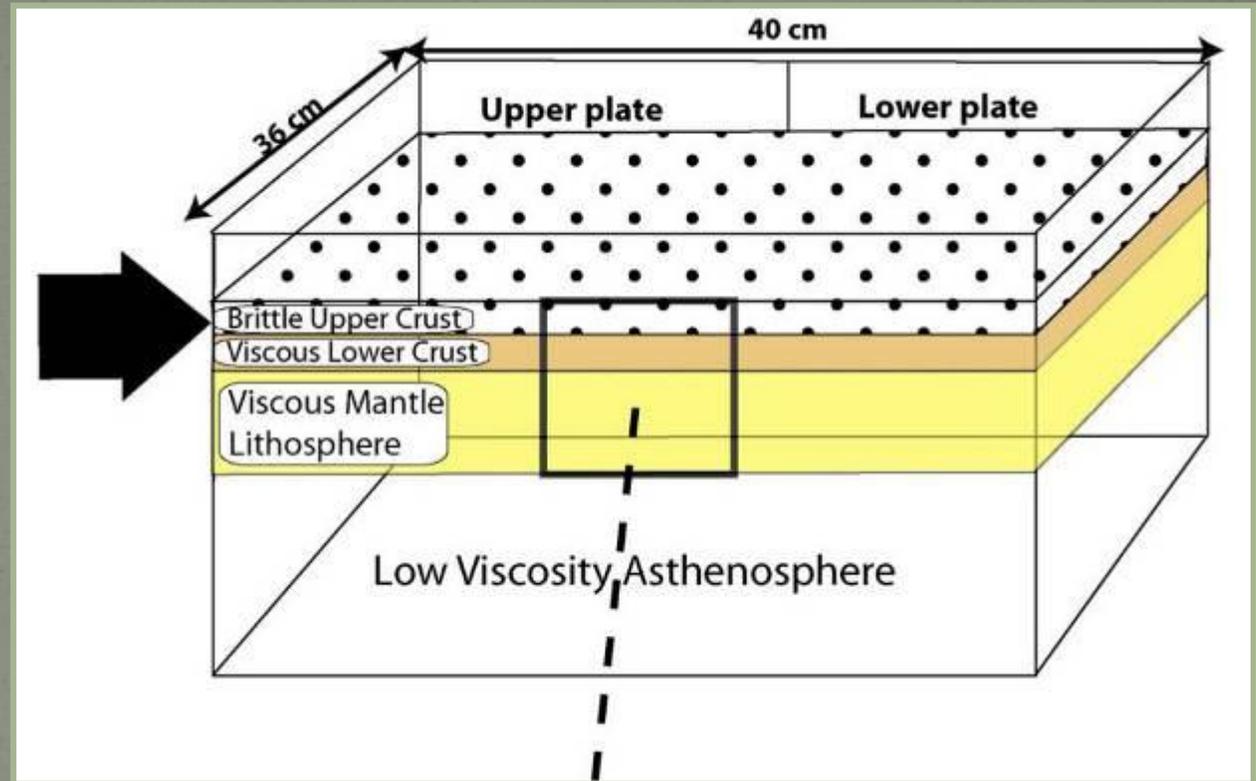


F. Graveleau, J.-E. Hurtrez, S. Dominguez, J. Malavieille  
 A new experimental material for modeling relief dynamics and interactions between tectonics and surface processes // Tectonophysics 513 (2011) 68–87

# Пример более сложного моделирования континентальной коллизии

Модели были выполнены в прозрачном резервуаре с одной движущейся стенкой, что вызывало «конвергенцию плит»

Мантийная литосфера ( $1.5\text{g/cm}^3$ ) плотнее, чем астеносфера ( $1,46\text{ г/см}^3$ ), что делает возможным проявление «субдукции».



**Астеносфера** – маловязкая: смесь polytungstate и глицерина

**Мантийная литосфера** – вязкое поведение: вязкая силиконовая паста

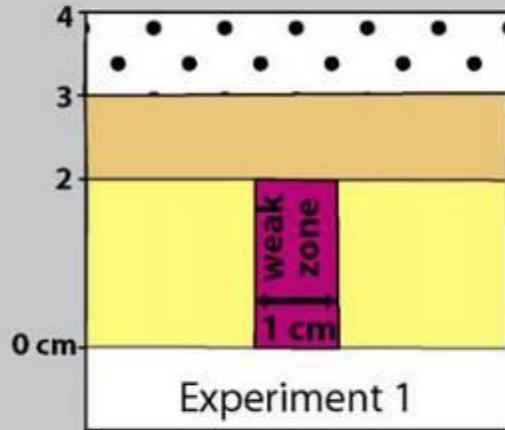
**Нижняя кора** - вязкое поведение: маловязкая силиконовая паста

**Верхняя кора** – хрупкое поведение: полевошпатовый песок

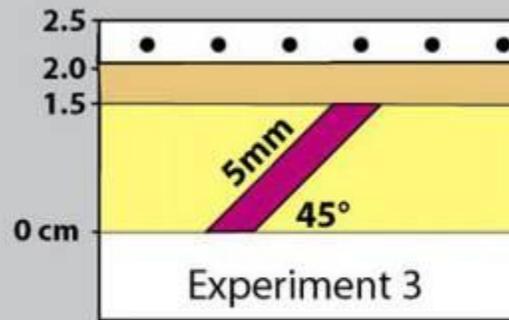
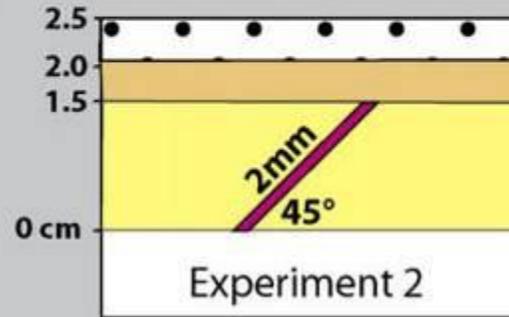
Вязкие слои представляют собой смесь полидиметил-силоксанового полимера (PDMS) с сульфатом бария

*(Luth and other, 2010)*

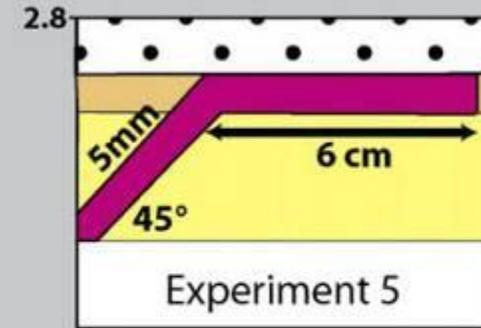
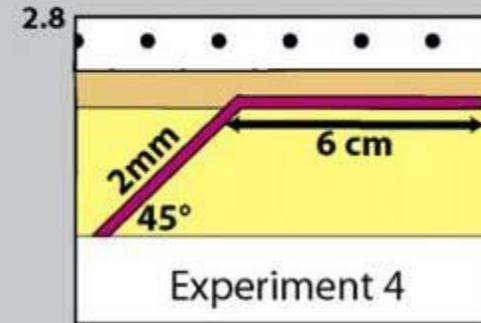
### Vertical weak zone



### Inclined weak zone

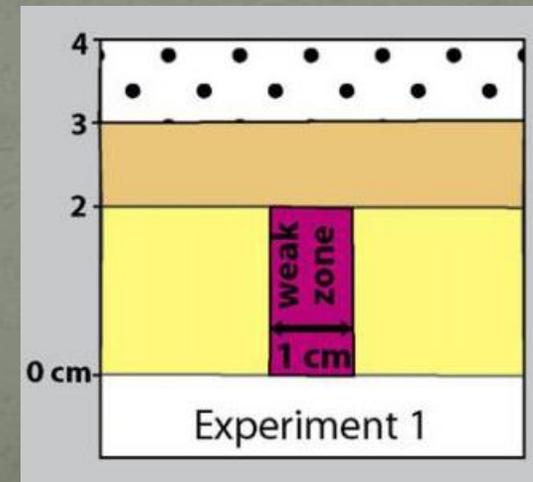
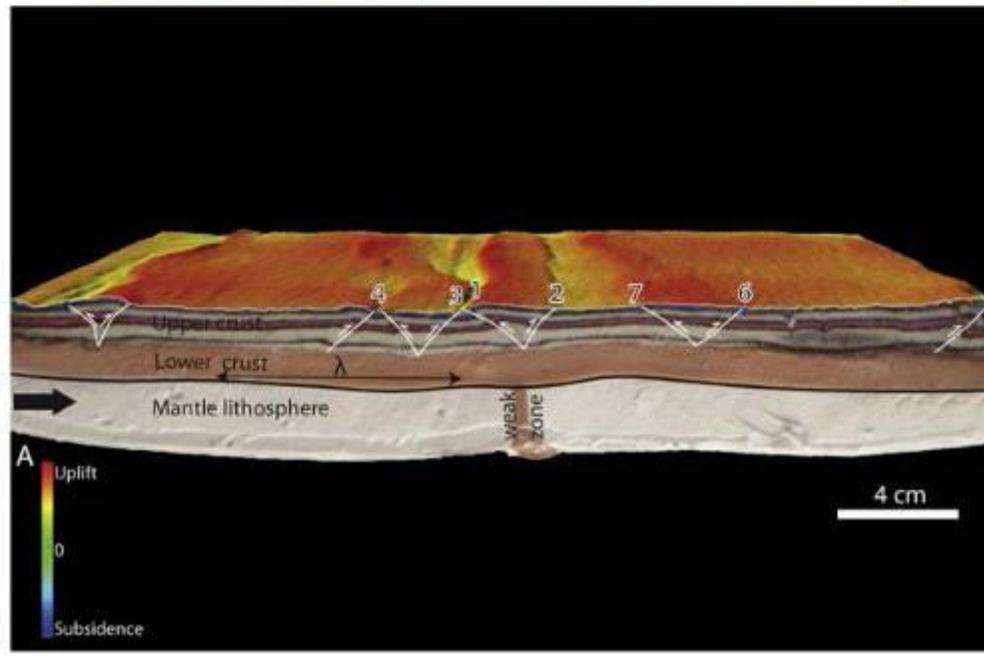
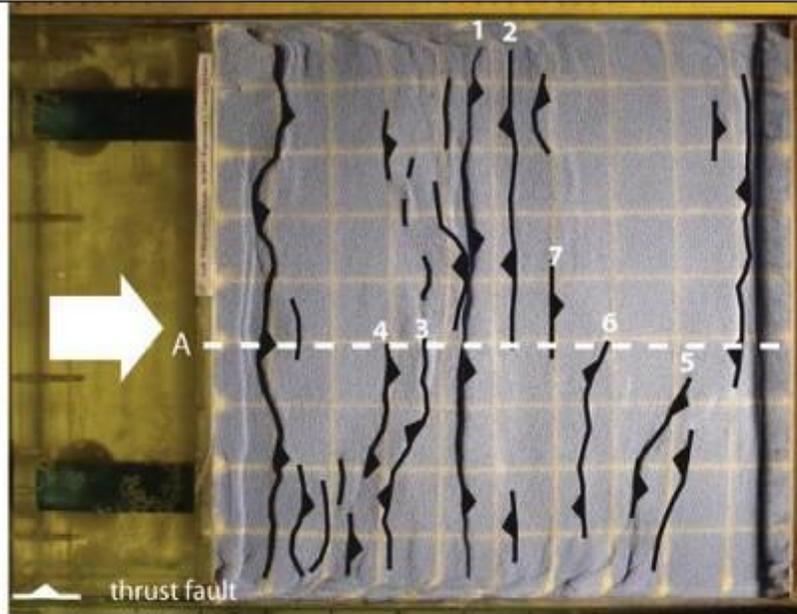


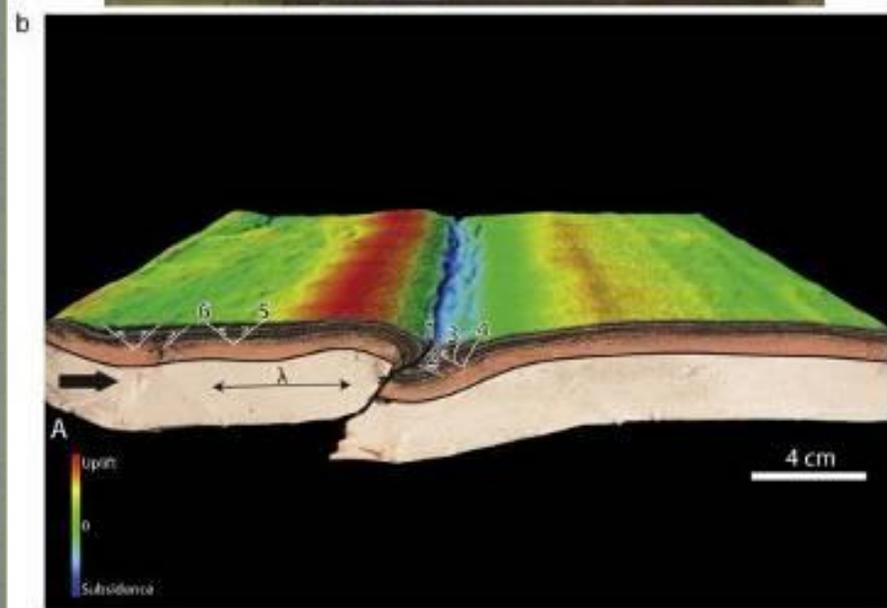
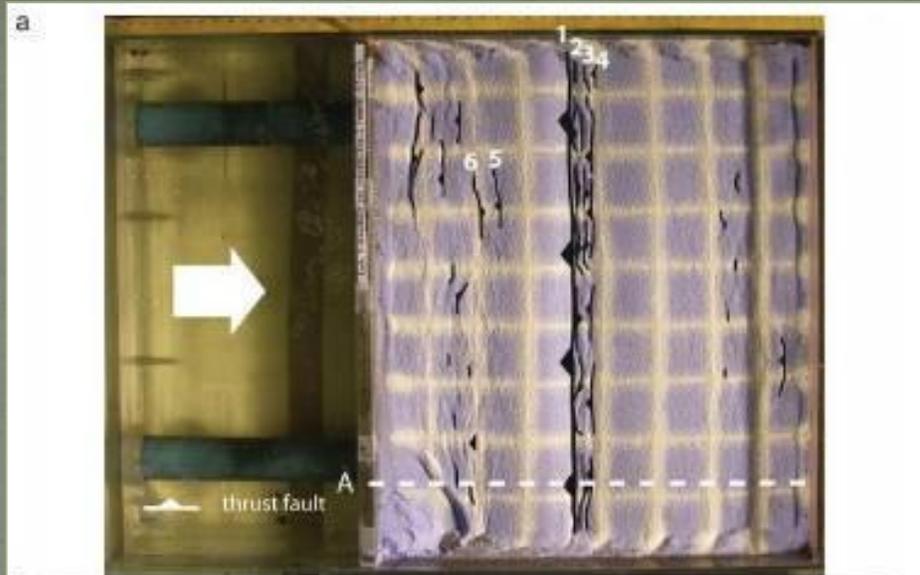
### Inclined weak zone & weak lower crust



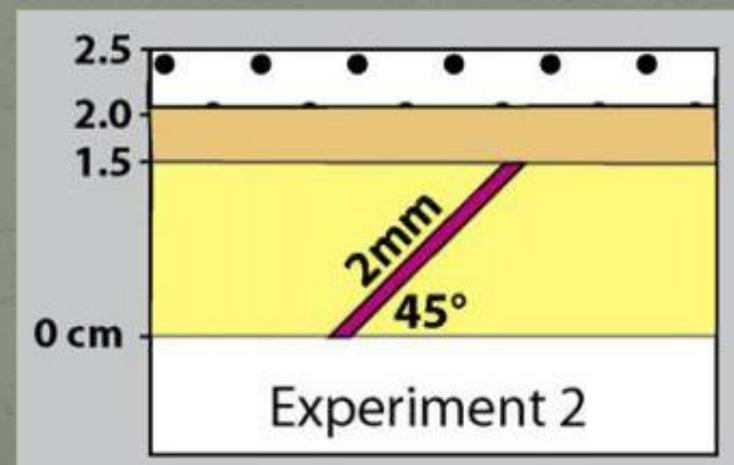
Для того чтобы смоделировать субдукцию литосферы, была сделана слабая зона из силикона типа Rhodorsil, которая разделяет мантийную литосферу сближающихся плит. Эта слабая зона представляет собой ослабленную внутреннюю пластину, или субдукционный канал. Кроме того, в экспериментах 4 и 5 слабая зона продолжалась вдоль поверхности Мохо нижней пластины на 6 см для обеспечения полного коро-мантийного разъединения

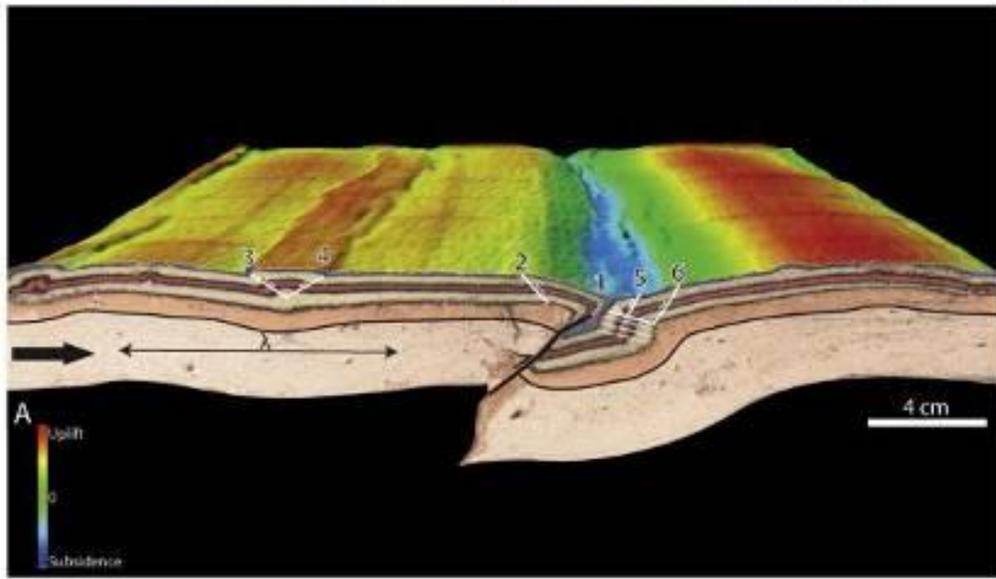
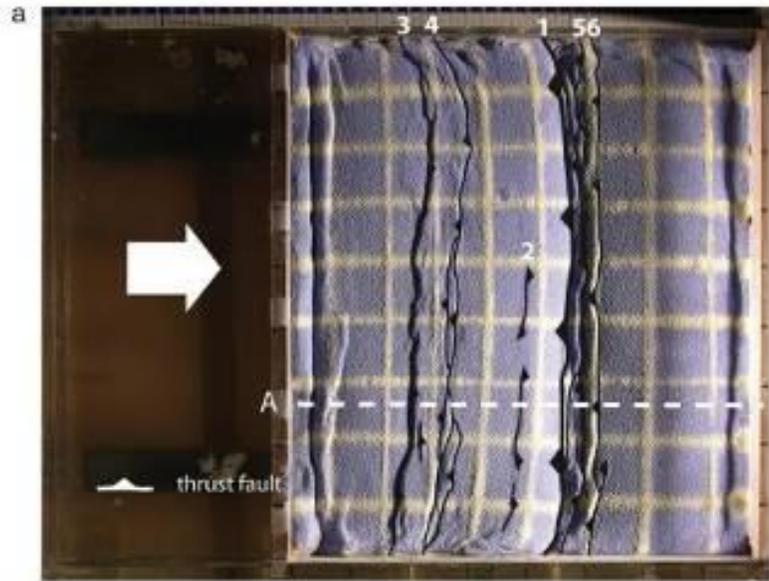
# Эксперимент с вертикальной границей плит



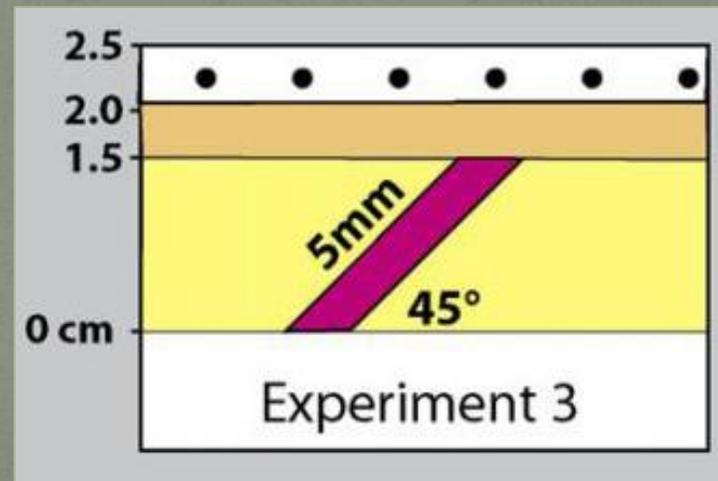


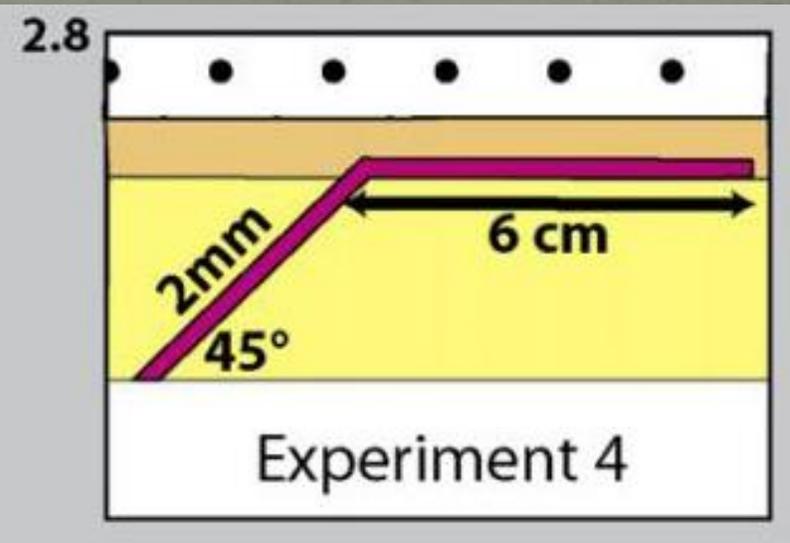
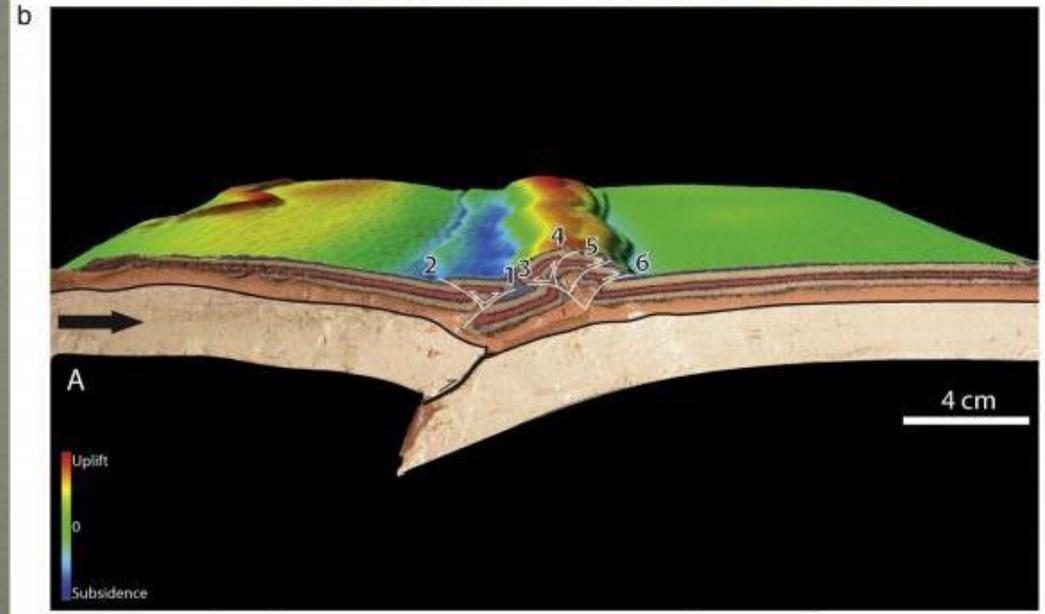
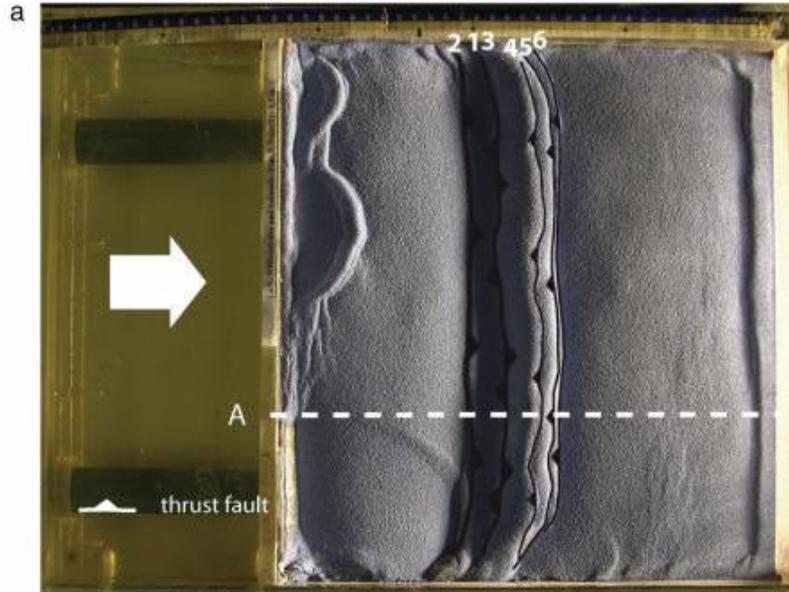
Эксперимент с наклонной  
границей плит





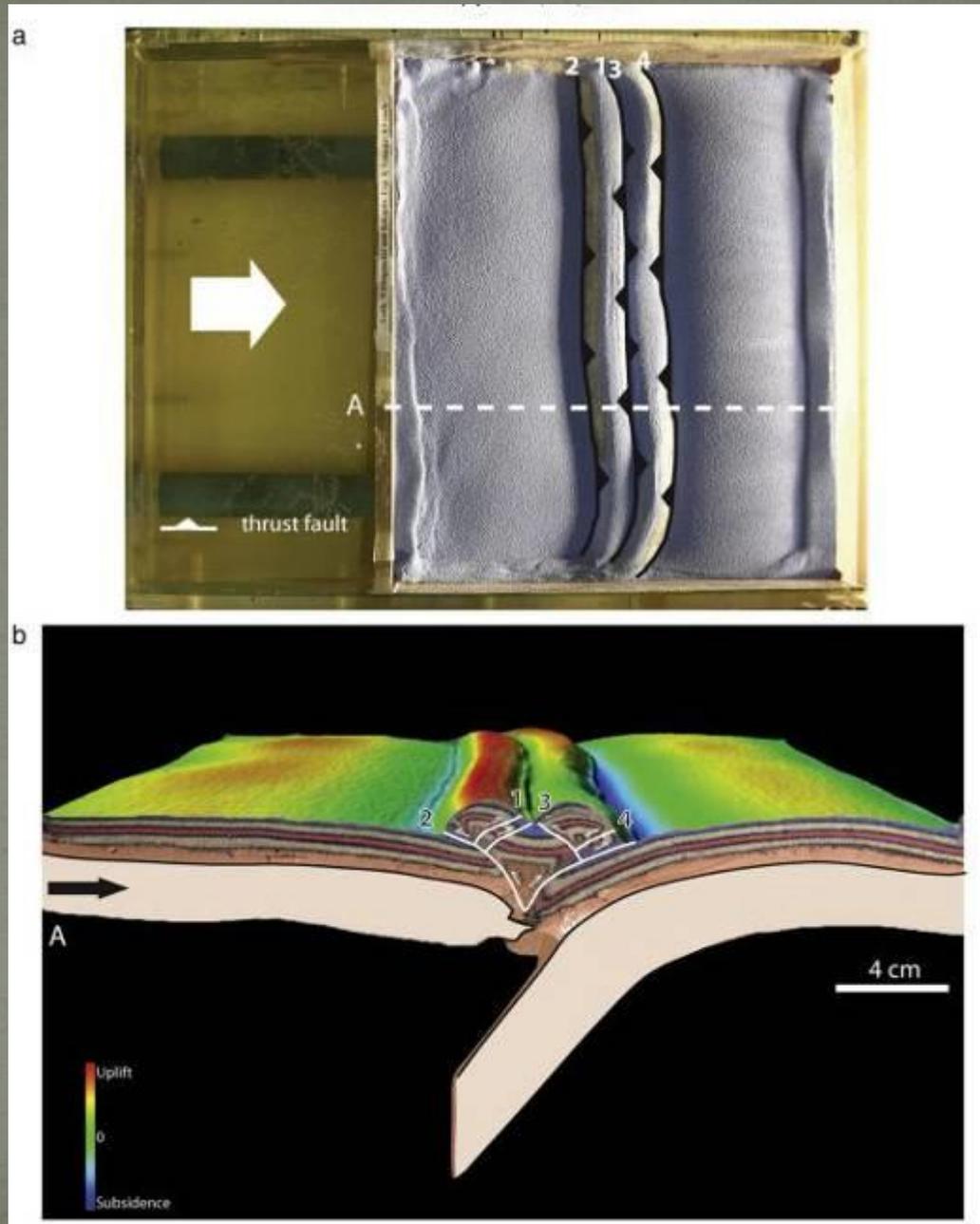
Эксперимент с наклонной границей плит



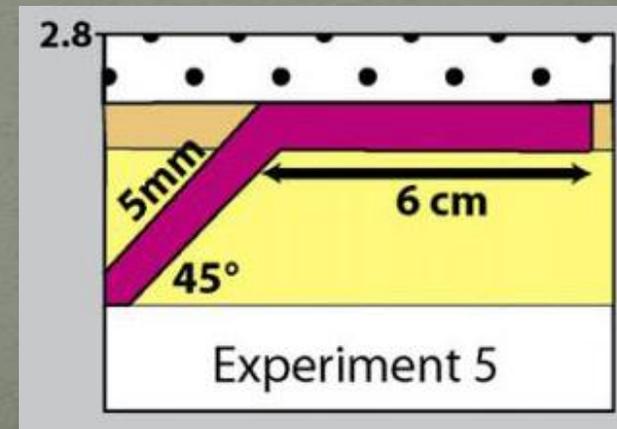


В экспериментах 4 и 5 слабая зона продолжалась вдоль границы Мохо нижней пластины на 6 см для обеспечения полного коромантийного разъединения.

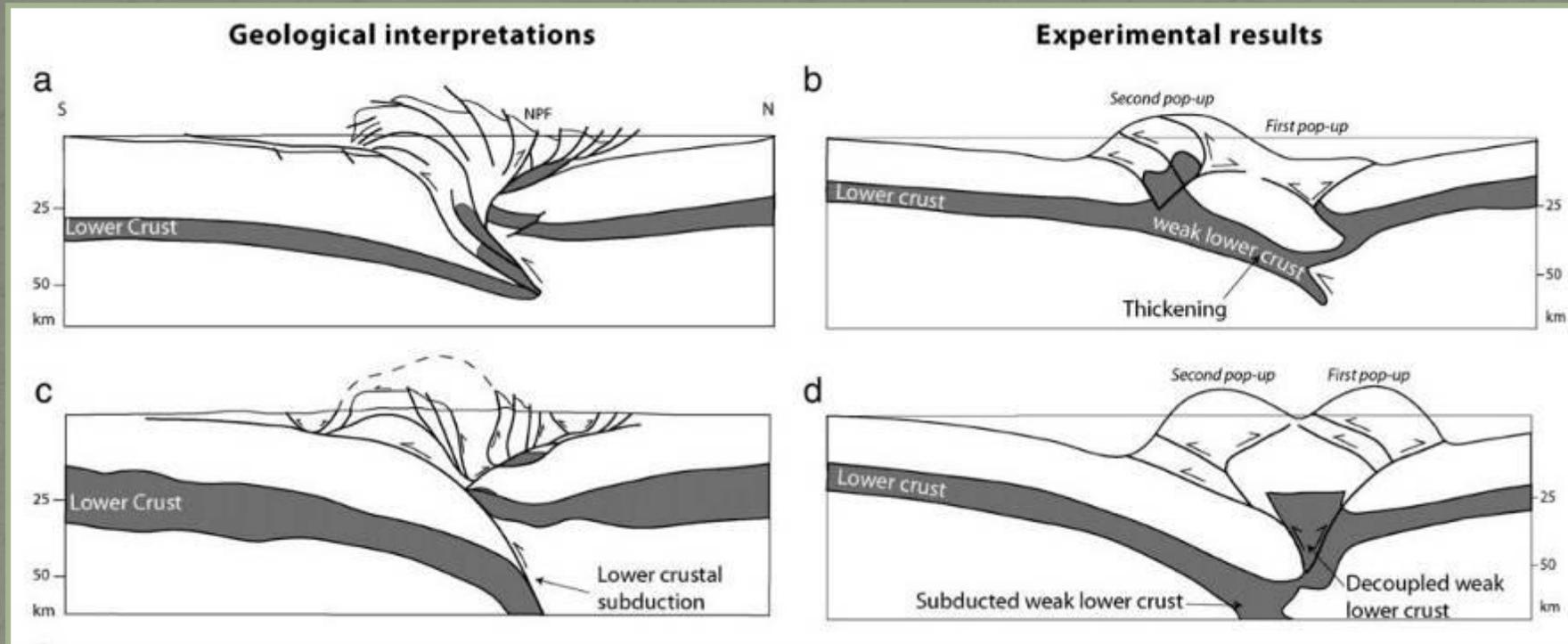
*Эти эксперименты отличаются от эксперимента МакКлея*



Здесь слабая зона имеет большую толщину



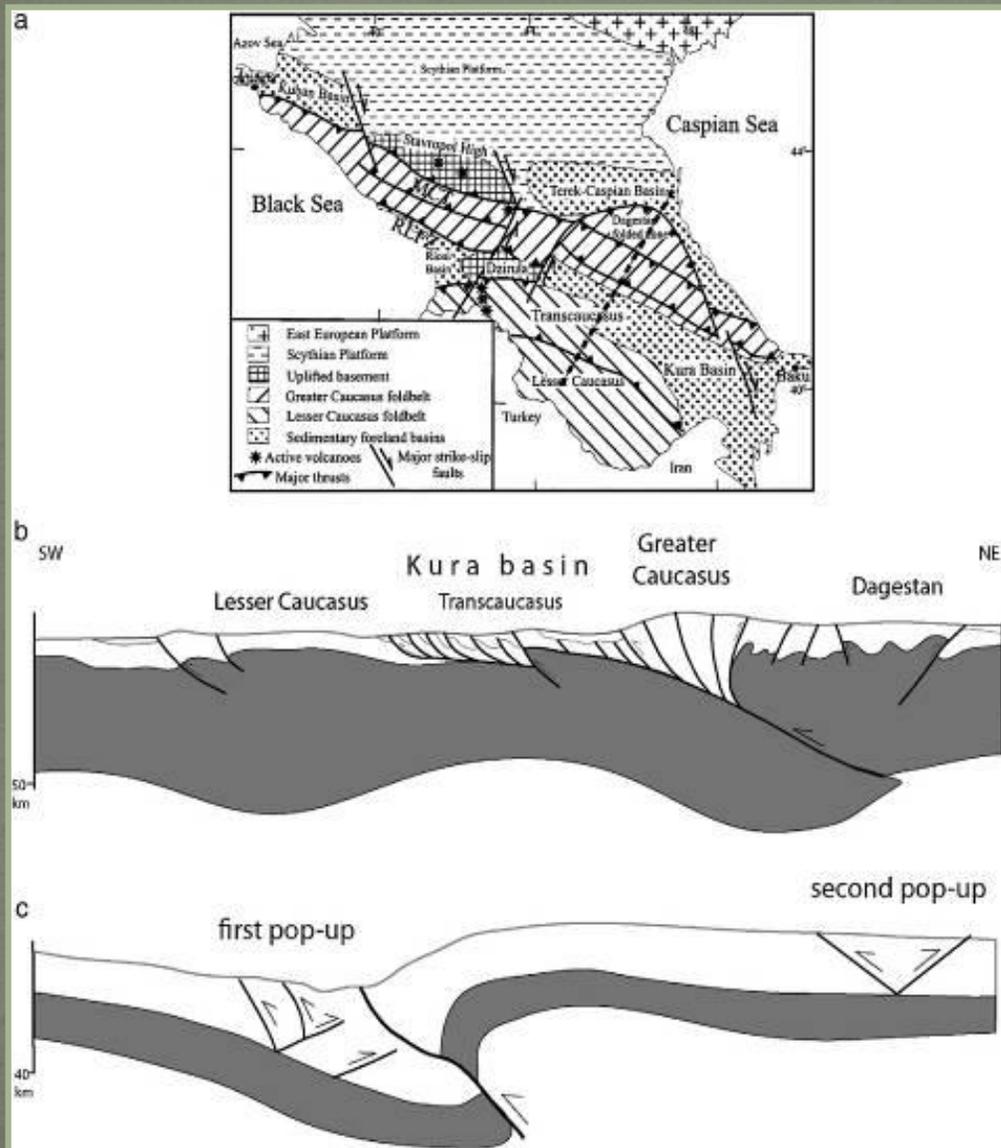
# Сопоставление результатов экспериментов и моделей природных складчато-покровных сооружений



а - интерпретация сейсмического разреза ECORS через Пиренеи (по Rour et al., 1989 с изменениями);

с - интерпретация сейсмического разреза ECORS через Пиренеи по Муньос (1992)

б и д – эскизы экспериментов 4 и 5 для сравнения

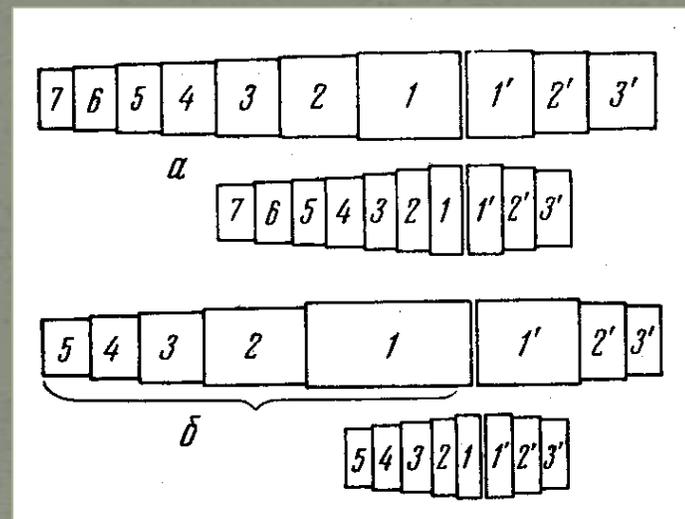
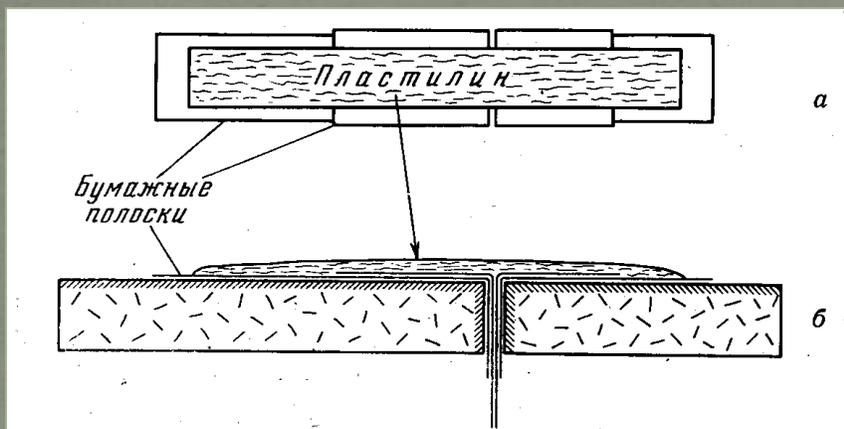


а – тектоническая карта Кавказа по Ruppel and McNutt (1990);  
 б – интерпретация разреза через земную кору по Philip et al.(1989);  
 с – упрощенное изображение эксперимента 2.

# Моделирование альпинотипных складчато-покровных сооружений В.Н. Лариным и С.В. Руженцевым (1975)

Предпосылки: широкое развитие покровов-складок, усложнение структуры и величины деформации к осевым частям

Идея – укорочение ширины основания сооружения



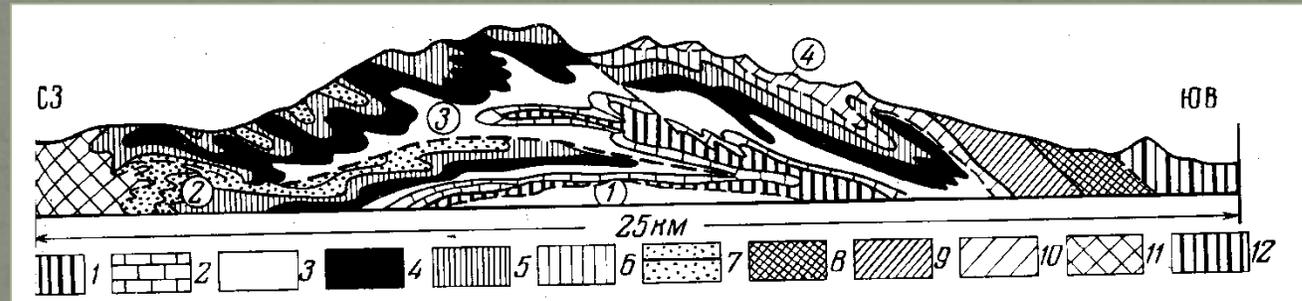
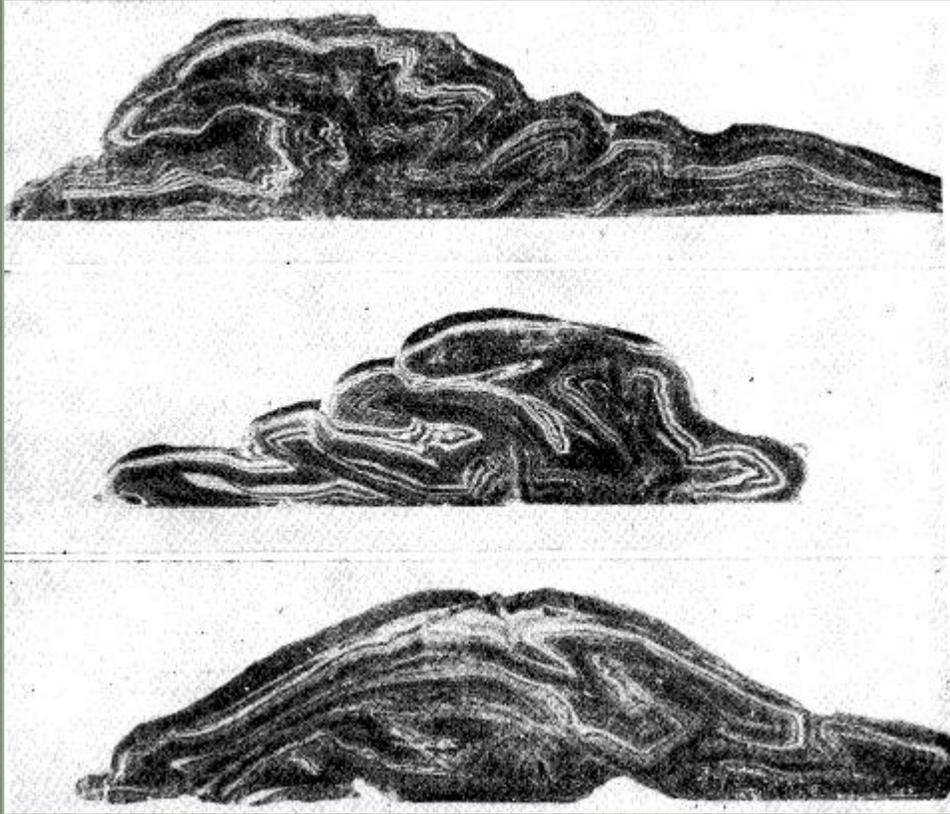
Принципиальное строение исходной модели. Справа – реализация укорочения (бумажные полоски, на которых лежал образец, поочередно, согласно указанным номерам, протаскивались в щель). Слоистый пластилин подогревался снизу. Этим достигалось неравномерное снижение его вязкости

# Результаты моделирования и сравнение с природными аналогами



Модель кавказского типа

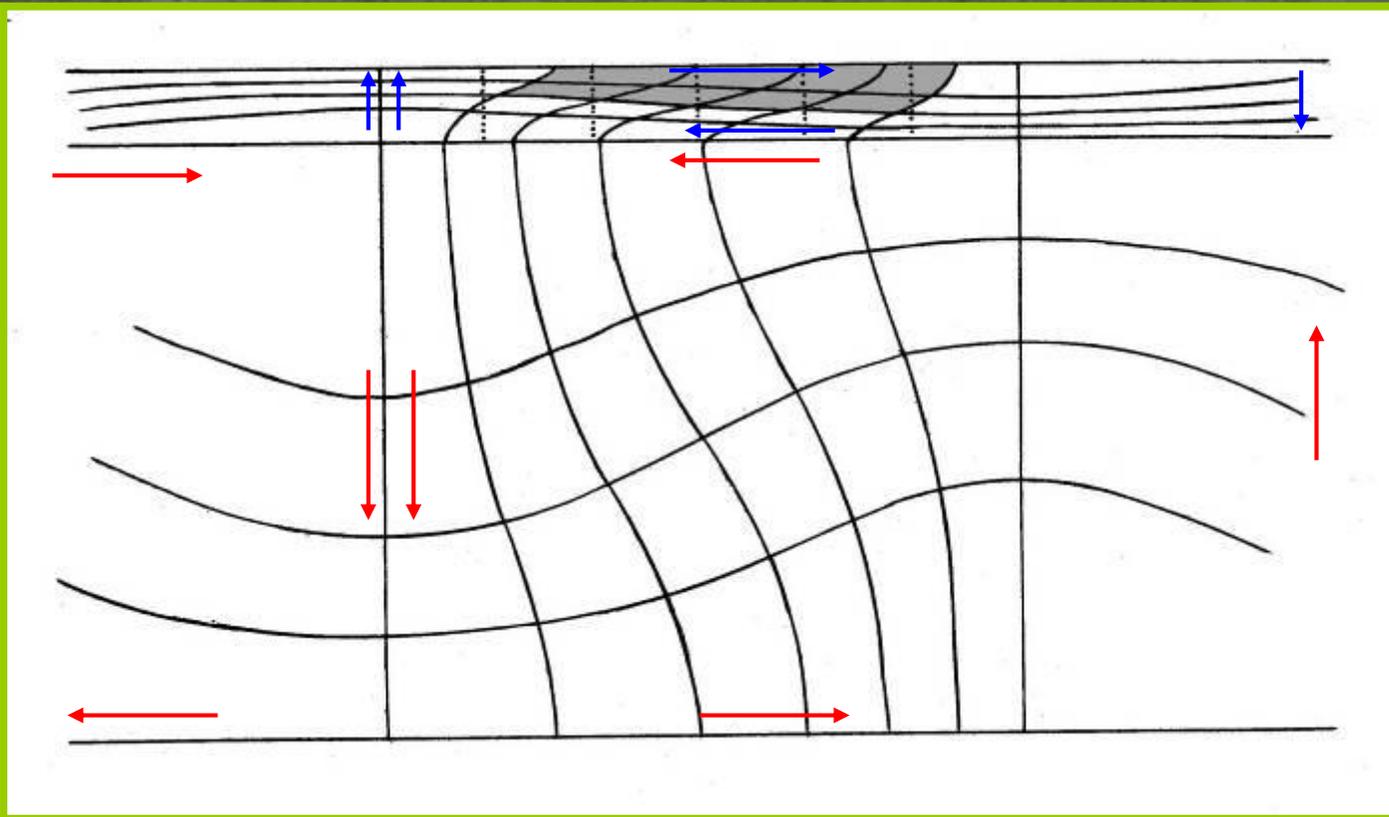
# Модель альпийского типа



Геологический разрез через массив Вильдхорн (Альпы)  
(по Lugeon)

## Анализ работы В.Н. Ларина с нашей точки зрения

- Сделан шаг к представлению о конвективном характере движений
- Перемещение нижних частей первоначально осадочных толщ к оси сооружения, подъем масс из осевой зоны, перемещение верхних частей от осевой зоны – все это часть конвективной ячейки (верхней)
- Причиной движений нижней части толщ В.Н. Ларин считает «заплывание депрессионной воронки в астеносфере в связи с формированием «зоны заглатывания». Фактически, описаны две ветви нижней конвективной ячейки.
- Таким образом, мы понимаем, что речь идет о том, что мы назвали бы двухъярусной конвекцией (по М.А. Гончарову)

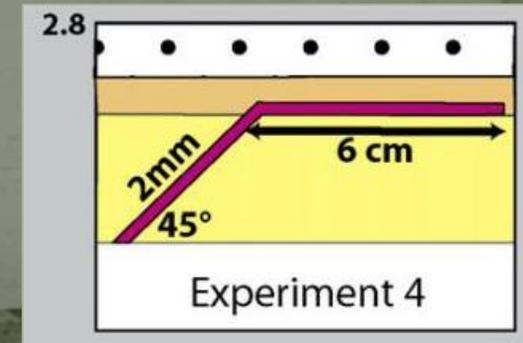
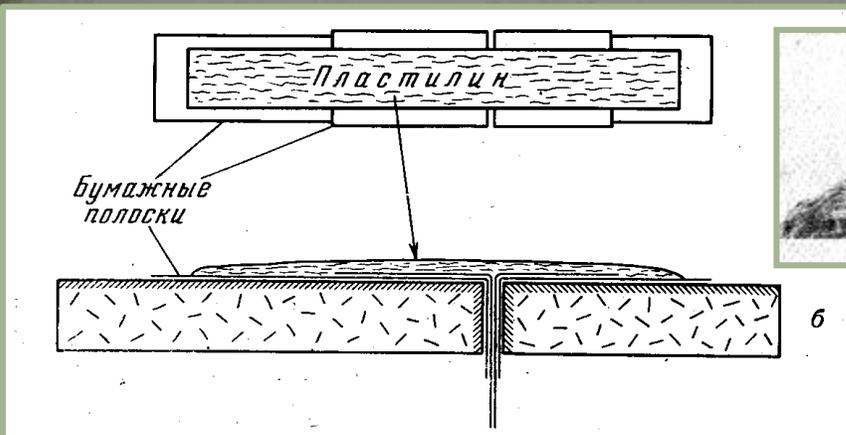
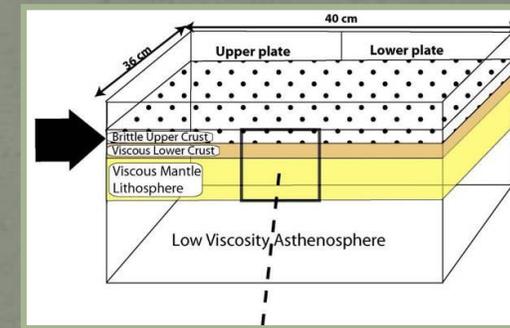
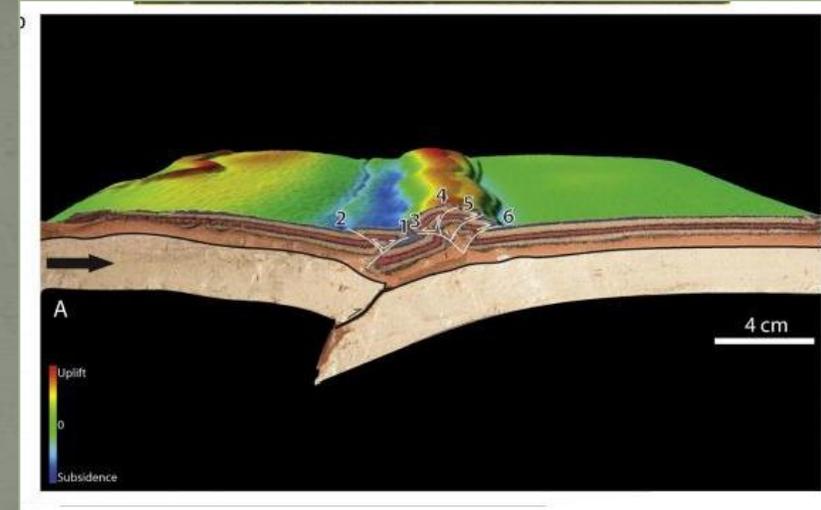
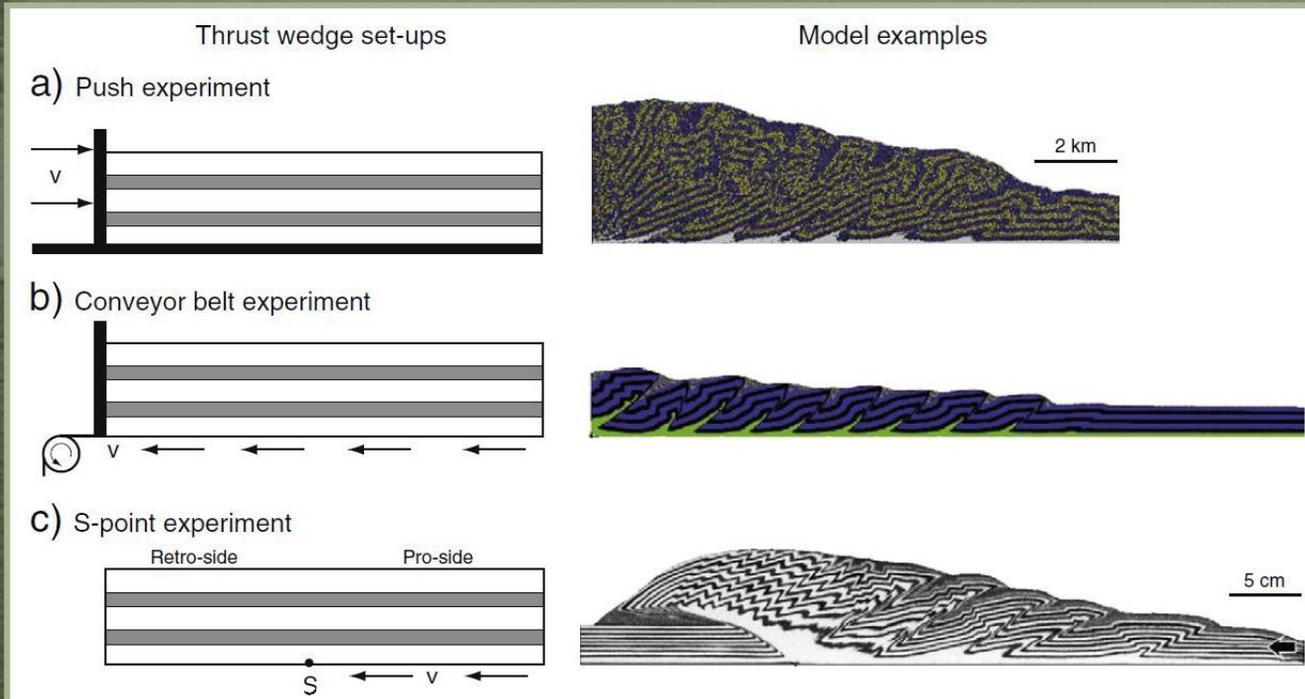


Простейшая численная модель двухъярусной компенсационной организации тектонического течения в тектоносфере. Искривленные линии первоначально образовывали ортогональную сетку; первичное вертикальное положение линий этой сетки в верхнем ярусе показано пунктиром; серым цветом показана область возможного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

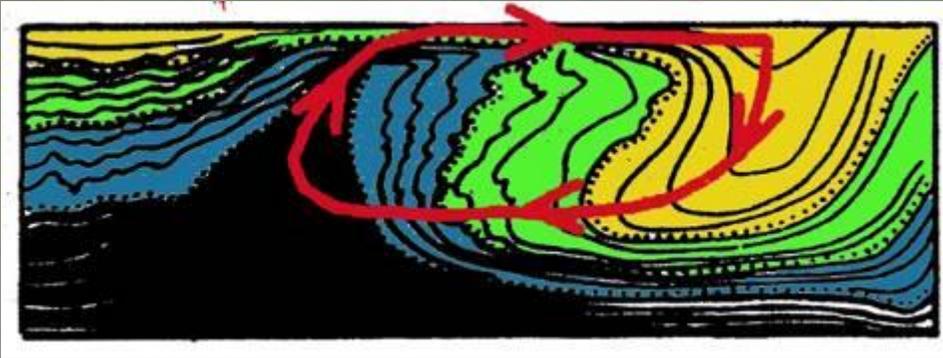
Справа – принципиальная схема двухъярусной конвекции в геосфере астеносфера+литосфера



# Типы экспериментов по моделированию покровно-складчатых сооружений

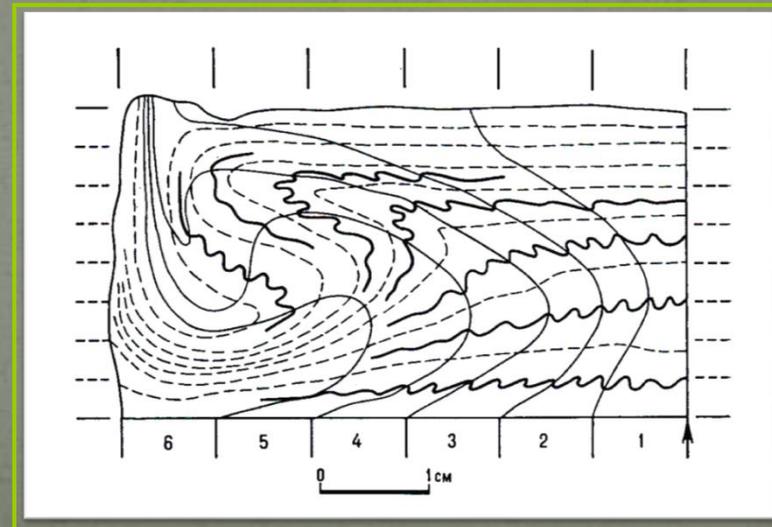


# Структурообразование в условиях конвекции. Инверсия плотности вызвана тепловым импульсом



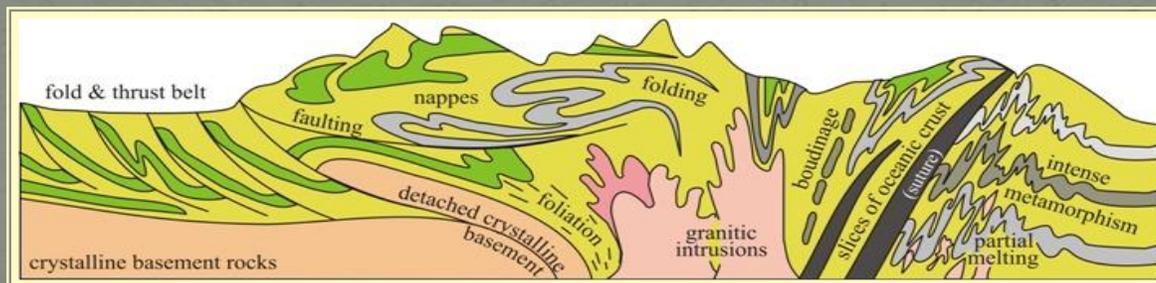
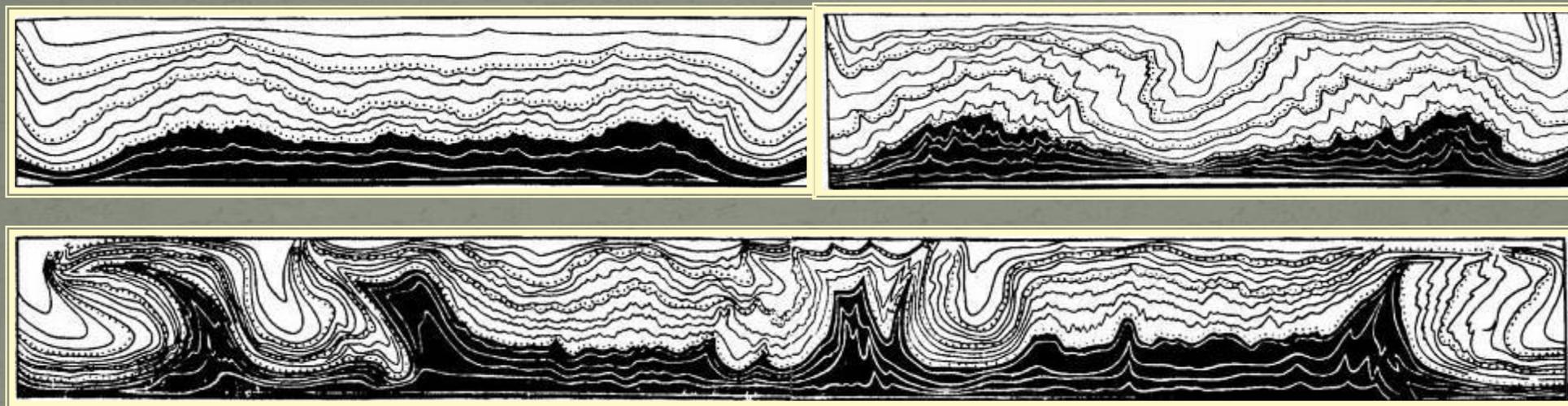
Модель воспроизведения мантийного диапира предполагает наличие компенсирующего резко асимметричного прогиба, имитирующего глубоководный желоб наверху и зону субдукции на глубине [Гончаров, 2006]. Согласно модели, происходит опускание вещества в зону субдукции, тем самым возникает аномалия силы тяжести.

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



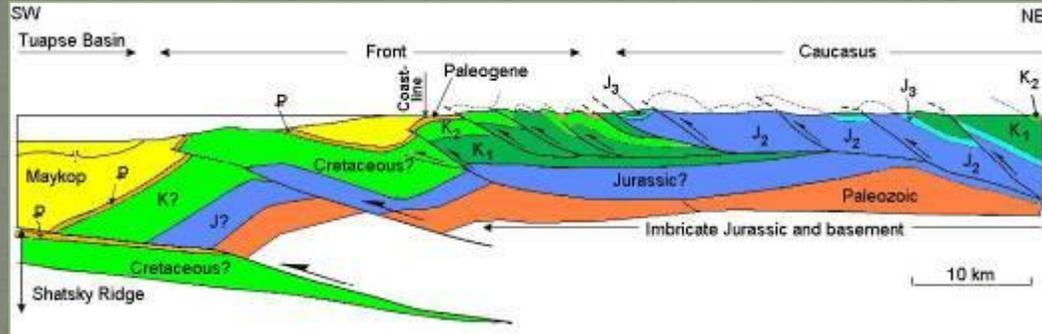
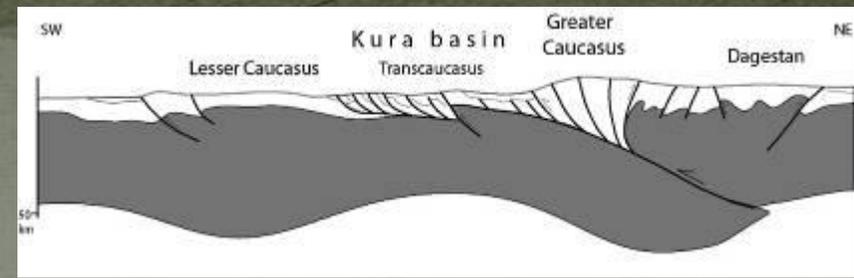
Продольные и поперечные разрезы через модель, имитирующую широкую складчатую зону, состоящую из крупных линейных форм и осложняющей их мелкой складчатости. Возникла в результате конвективного процесса в образцах из слоистой канифоли при подогреве снизу

*(по М.А. Гончарову и Ю.А. Горелову)*

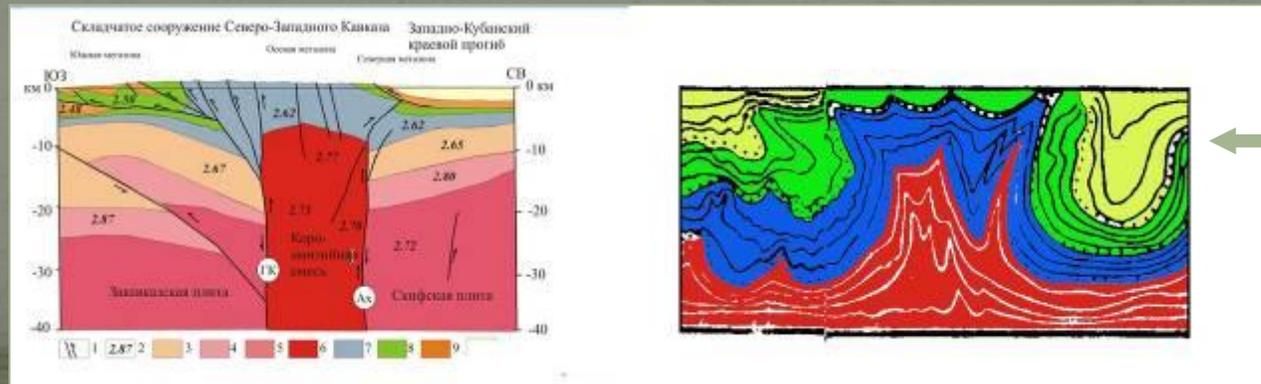
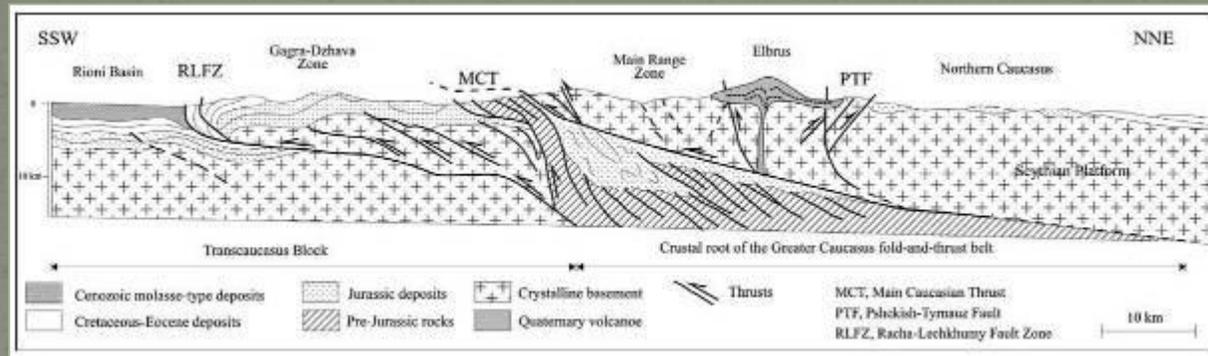


Упрощенная модель складчатого сооружения, основанная на обобщении геологических данных

# Различные модели Большого Кавказа, основанные на полевых и геофизических данных



Сверху вниз:  
 Philip et al., 1982  
 Robinson et al, 1996;  
 Дотдугев, 1987;  
 Маринин, Расцветаев, 2008



Интерпретация модели А. Маринина и Л.М. Расцветаева М.А. Гончаровым

1



2



3

