



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 1

Объект моделирования

Значение моделирования



# Возможен ли эксперимент в тектонике

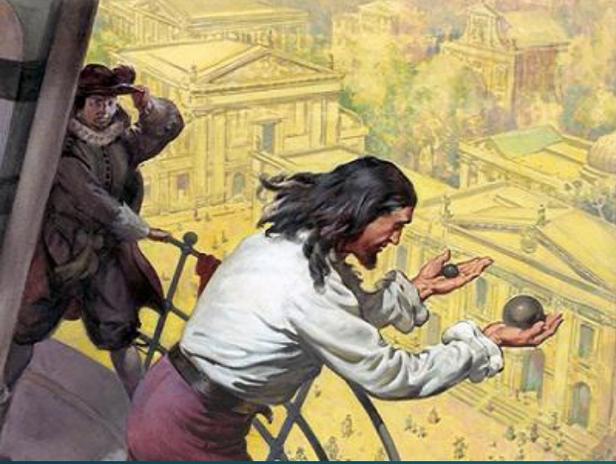
ЧТО ТАКОЕ ВООБЩЕ ЭКСПЕРИМЕНТ?

ЧЕМ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ И ТО, ЧТО С НИМИ ПРОИСХОДИТ, ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ  
ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ, НАПРИМЕР, В ФИЗИКЕ?

# Эксперимент в различных науках

- ▶ Физика, Химия, Биология, Техника
- ▶ Объекты, с которыми совершаются эксперименты
- ▶ Свойства этих объектов
- ▶ Условия и время протекания моделируемых процессов

**Экспериментальная физика** — способ познания природы, заключающийся в изучении природных явлений в специально приготовленных условиях. В отличие от теоретической физики, которая исследует математические модели природы, экспериментальная физика призвана исследовать **саму природу**.



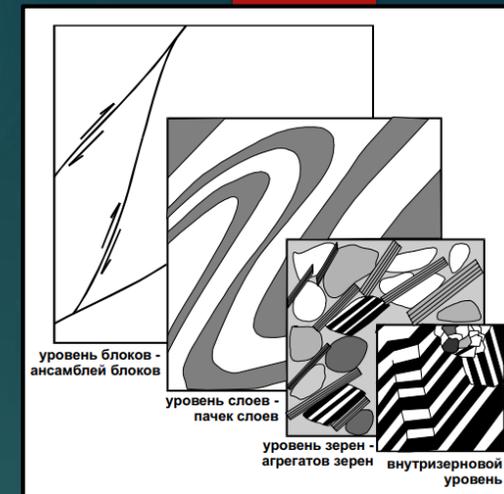
- ▶ «Эксперимент...является научно поставленным опытом, наблюдением исследуемого явления в **точно учитываемых условиях**, позволяющих следить за ходом явления и воссоздавать его при **повторении этих условий**»
- ▶ Примеры простейших физических экспериментов
- ▶ На основании экспериментов можно построить теорию
- ▶ Главным критерием жизнеспособности физической теории является проверка экспериментом

# Объект в тектонике

- ▶ Что такое объект в тектонике
- ▶ Какими свойствами он обладает
- ▶ Можем ли мы исследовать его экспериментально

# Объект в тектонике

- ▶ Огромные размеры объектов
- ▶ Свойства геологической среды
  - ✓ Неоднородность
  - ✓ Дискретность (делимость на блоки). Геологическая среда грубодискретна
  - ✓ Самоподобие блоковой делимости (квазифрактальность)
  - ✓ Геосреда обладает свойством самоорганизации
- ▶ На свойства среды влияет множество факторов (длительность процесса, давление, температура, давление флюида и.т.д.)

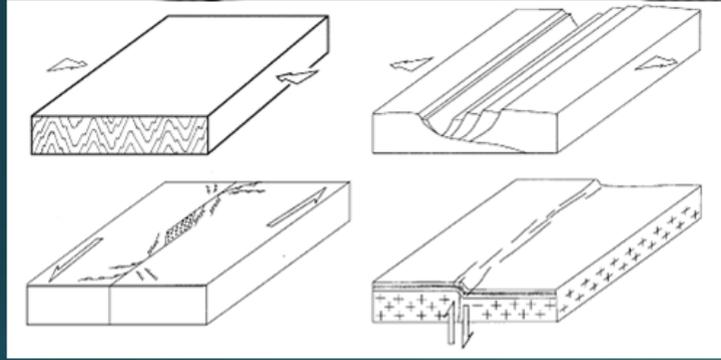


Природные объекты с помощью эксперимента мы  
в тектонике исследовать не можем

# Условия структурообразования

- ▶ Движущие силы и обстановка структурообразования. Каковы они?
- ▶ Можем ли мы воспроизвести их экспериментально?
- ▶ Роль времени в физике и геологии

# Движущие силы и обстановка структурообразования



- Характер напряженного состояния (геодинамическая или механическая обстановка сжатия, растяжения, сдвига и т.п.)
  - Характер приложения сил, граничные условия
  - Существование разной механической обстановки на разных структурных уровнях деформации, изменение обстановки с течением времени
- 
- Всестороннее давление (деформация при высоком литостатическом давлении происходит иначе, чем при низком, у поверхности Земли)
  - Температура (при высоких температурах породы очень легко деформируются)
  - Флюидная обстановка (многие механизмы деформации связаны с участием флюида)
  - Время

# Роль времени в геологии

Огромная длительность геологического времени

Не можем проводить эксперименты в реальном времени

При длительной деформации меняется поведение горных пород

- горные породы могут вести себя как вязкие жидкости

- меняются механизмы деформации

- меняются параметры среды, например, предел прочности

Процессы совершаются в прошлом. Мы не можем их наблюдать

Изучаемый процесс – единственный, он уже совершился и мы не можем его повторить

Воспроизвести обстановку структурообразования мы в эксперименте не можем

Воспроизвести деформационные процессы, когда-либо происходившие в природе невозможно!



**Вывод:** эксперимент в тектонике  
невозможен, если его понимать так, как  
понимается эксперимент в физике и других  
науках

▶ Есть ли выход из этой ситуации?

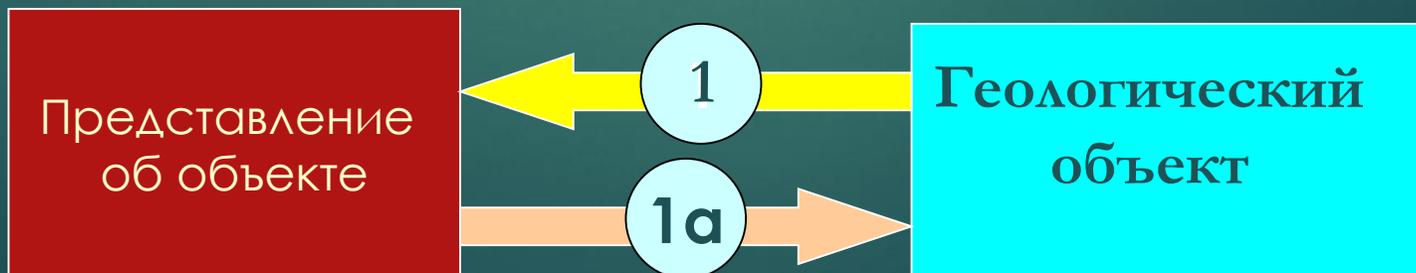
Как вы думаете, какой?

# О возможности эксперимента в тектонике

- ▶ Необходимость подмены объекта исследования

«Вместо того, чтобы производить эксперимент с тем геологическим явлением, которое мы изучаем, мы должны производить эксперимент с чем-то совершенно другим, с **моделью** этого явления» (Лукьянов, 1989)

- ▶ Шаг 1. Главный цикл геологических исследований



(по Лукьянов, 1989)

- 
- ▶ Шаг 2. Строим теоретическую модель (правильную или неправильную) изучаемого явления. Ставим эксперимент на основании этой модели и исследуем ее в разных условиях.
  - ▶ Шаг 3. Возврат к представлению об объекте, усовершенствование. Повторение экспериментов
  - ▶ Шаг 4. Возврат к исходному геологическому объекту
  - ▶ Повторение циклов (по Лукьянов, 1989)

# Что следует из этой особенности эксперимента в тектонике?



- ▶ Эксперимент имеет не только иллюстративное, но и познавательное значение – он позволяет совершенствовать наше представление об объекте
- ▶ Эксперименты мертвы, если они оторваны от непосредственного исследования геологических объектов
- ▶ Положительный и отрицательный результаты эксперимента имеют разное значение (Лукьянов, 1989).

# Как относиться к результатам экспериментов?

- ▶ Положительный результат эксперимента не может служить доказательством того, что в природе происходит именно так, как в эксперименте (результаты эксперимента соответствуют именно той и только той модели, которая построена и экспериментально изучена).

Важность этого утверждения.

- ▶ Отрицательный результат является доказательством того, что та физическая модель, которую мы построили, с теми параметрами, которые мы ввели, не работает.

## Оценка параметров и решение обратной задачи

Варьируя параметры, которые вводились в исследуемую модель, мы можем оценить ту область вариаций, в которой эта модель работает. Мы также можем отделить ее от той области, где данная модель не работает.

Это позволяет решать обратную задачу - оценивать те параметры природных объектов, которые мы не знаем.

# Цели тектонофизического моделирования

- ▶ **Решение фундаментальных задач геотектоники** (исследование механизмов тектогенеза)
  - ✓ Проблемы геотектоники – различные взгляды на причины и особенности геотектонических процессов
  - ✓ Необходимость исследования эффективности различных механизмов

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

- ▶ **Прикладное значение исследования механизма формирования структур**

Если на основании ограниченного числа полевых наблюдений установлен тип структуры с известным механизмом формирования, то тем самым установлены и основные закономерности ее строения, напряженного и деформированного состояния. Это знание не освобождает от необходимости геолого-геофизических исследований конкретных структур, но позволяет получить нужную информацию при меньших затратах труда и средств. (Гутерман, 1987)

# Важность эксперимента в Тектонике

- ▶ Часто невозможно иными методами увидеть результат структурообразования в условиях того или иного деформационного процесса.
- ▶ Главным **преимуществом** этого метода является то, что с его помощью можно наблюдать сам процесс деформации, его историю, устанавливать его стадии, что невозможно сделать иными методами.
- ▶ Выделяя стадии развития данного процесса деформации, мы можем среди тектонических структур найти такие, которые соответствуют этим отдельным стадиям, находящимся как бы в застывшем виде.
- ▶ Помимо освещения хода развития той или иной деформации во времени, моделирование дает представление и о влиянии на ход деформации некоторых *важных факторов*, изменение которых находится в пределах возможности экспериментатора

# Методы исследования тектонофизики

- ▶ Полевые наблюдения и измерения.

Трудности и проблемы

- ▶ Моделирование

Теоретическое

Физическое

Сложность развития деформационного процесса в реальной геологической среде. Роль физического моделирования.

# Два подхода к тектонофизическому моделированию

- **Исследование эффективности простых физических механизмов. Другими словами, какие тектонические явления могут быть вызваны тем или иным конкретным механизмом?**

Изучая тектонические следствия простых, часто очевидных, физических механизмов, можно свести к минимуму гипотетический элемент в исследованиях. Эвристический\* характер исследований\*

- **Поиск ответа на вопрос - какой механизм обусловил формирование конкретной структуры или типа нарушения.**

Традиционная постановка проблемы. Субъективизм исследования. Иллюстративный характер результатов

Только после того, как эффективность ряда механизмов выяснена, целесообразно вернуться к традиционной постановке задачи при моделировании конкретных структур с их индивидуальными особенностями строения и развития (Гутерман, 1987)

- **Изучение сформированных структур при их дальнейшей деформации**

*\*имеющий отношение к поиску или открытию (греческий глагол *heurisken* – «находить» – происходит от существительного *heuris* – «чутье»). Например, эвристической называют гипотезу, претендующую не столько на решение проблемы, сколько на ее иную, более удачную постановку: она не предлагает решения, но помогает в его поиске.*

# Несколько ветвей физического моделирования

## ▶ Исследования физических свойств горных пород и модельных материалов

Установленные лабораторным путем параметры нуждаются в поправках

## ▶ Воспроизведение геологических структур и механизмов их развития

- Опыты с деформацией материалов при комнатной температуре, атмосферном давлении и одностороннем дополнительном нагружении (не всегда). Это аналоговое моделирование и оно преобладает
- Исследования деформаций горных пород при высоких значениях давления и температуры (проблема «пространства»). Об этом речь пойдет позже.

## ▶ Моделирование физических процессов, происходящих в массивах горных пород и их деформации

- Исследование полей напряжений в различных геологических структурах
- Изучение акустической эмиссии, сопровождающей разрушение
- Изучение миграции флюидов в геологических структурах и т.д.

*(Шерман, 1991)*



Аналоговое  
физическое  
моделирование

Как экспериментально воспроизвести геологические структуры?

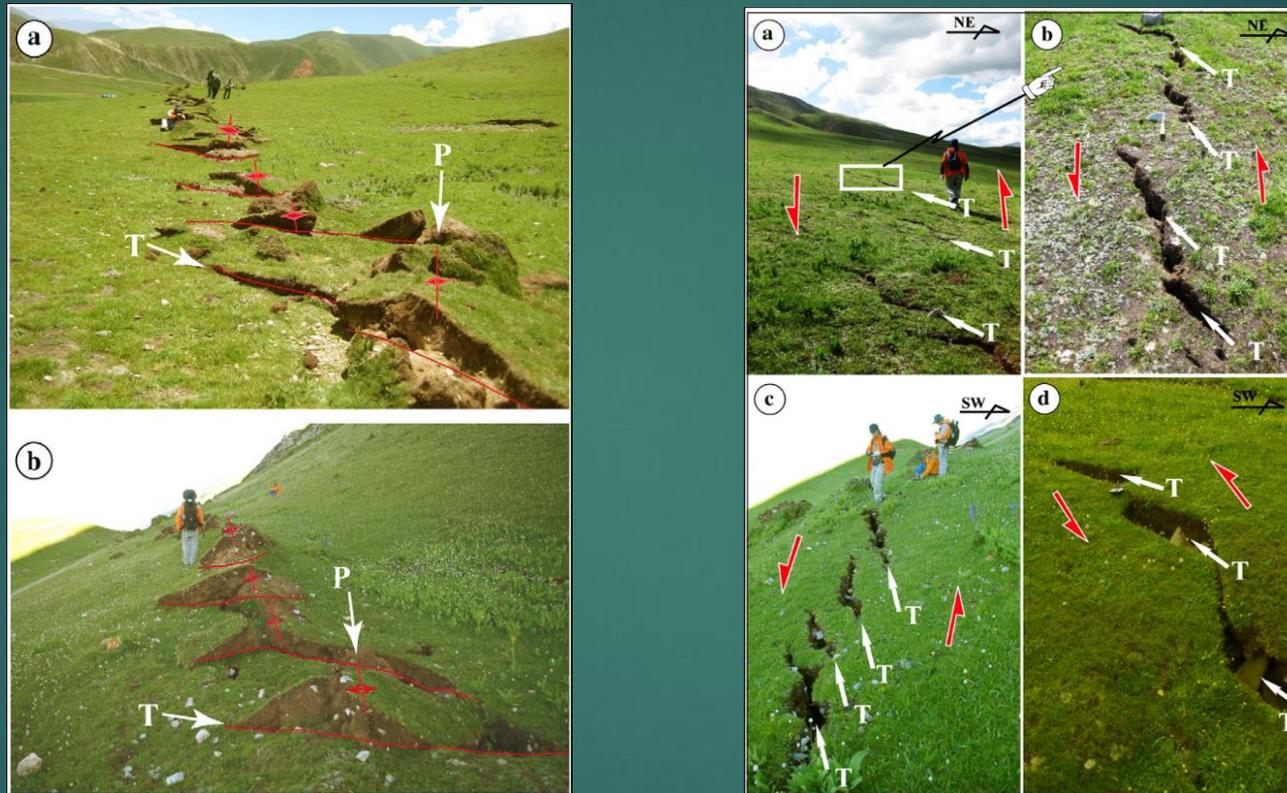
# Три типа экспериментов

## 1. Природный эксперимент

Изучается некоторое природное явление, которое, как нам кажется, аналогично тому природному объекту, который требует объяснения и понимания

- ▶ Первый пример – изучение деформаций, происходящих при современных землетрясениях для понимания особенностей разрывной тектоники
- ▶ Второй пример – изучение движения ледников

# Примеры сдвиговых структурных парагенезов, сформировавшихся на поверхности Земли в результате землетрясений



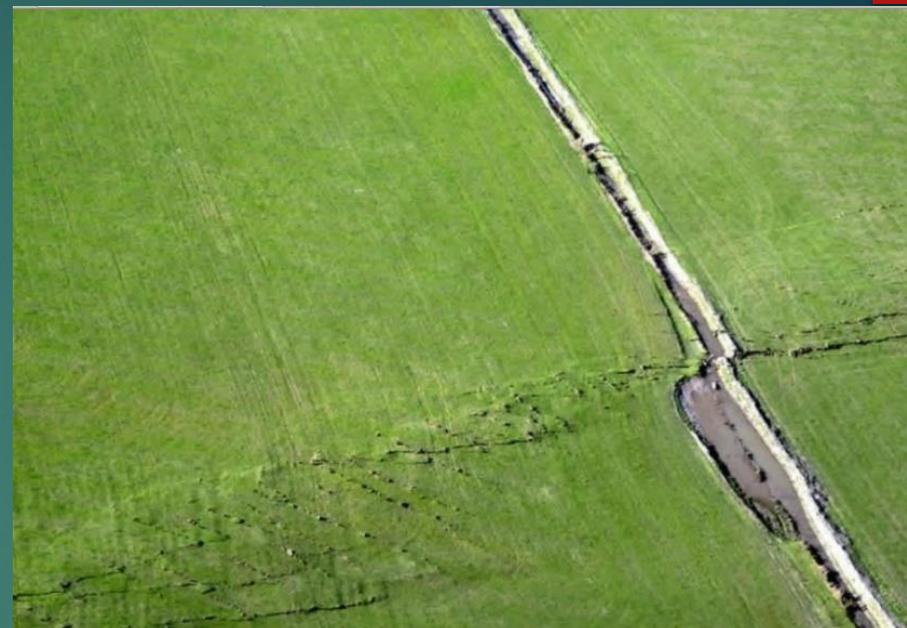
Структуры, сформировавшиеся во время землетрясения 2010 г на Центральном плато Тибета в неконсолидированных аллювиальных отложениях. Сдвиги состоят из ранних трещин отрыва (буква Т на фотографиях), впоследствии объединенных в единый разрыв. (G. Rao et al., 2011)



Сейсморазрыв на водоразделе Елангаш-Ирбисту. Чуйское землетрясение (2003 г.)  
 © Алексей Еманов / Фотобанк Лори  
 lori.ru/398056



Чуйское землетрясение 2003 г.  
 (Lunina et al, 2008)

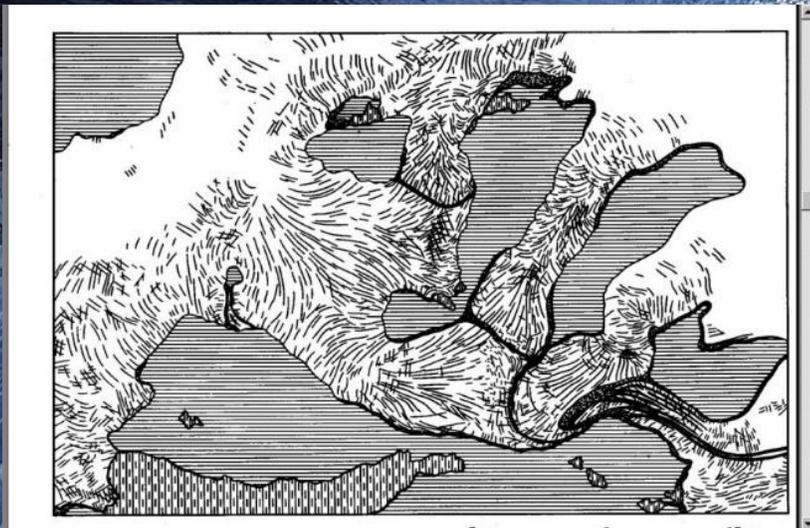


*Землетрясение в Новой Зеландии 8 сентября 2010 г*

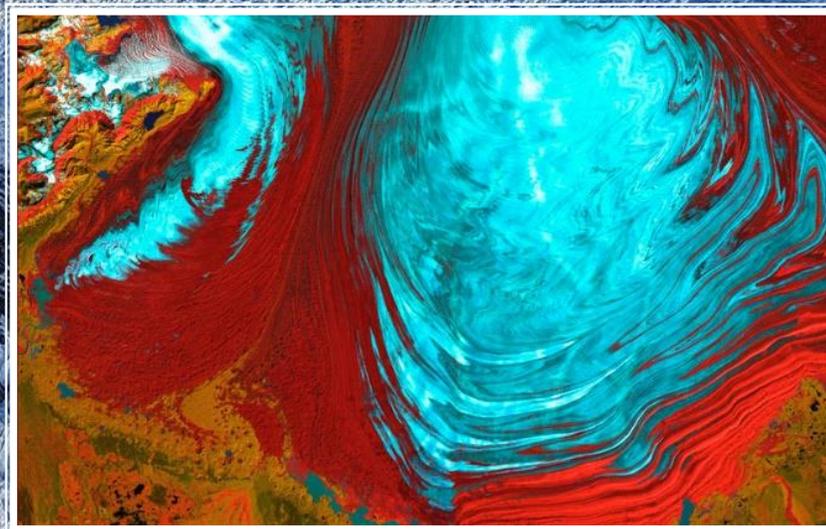
<http://www.krasfun.ru/2010/09/sdvig-zemnoj-kory/>

Хорошо видны сколы Риделя R и R'

# Изучение движения ледников



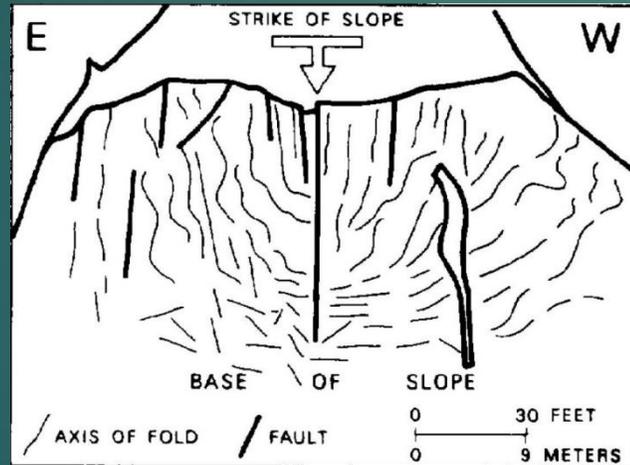
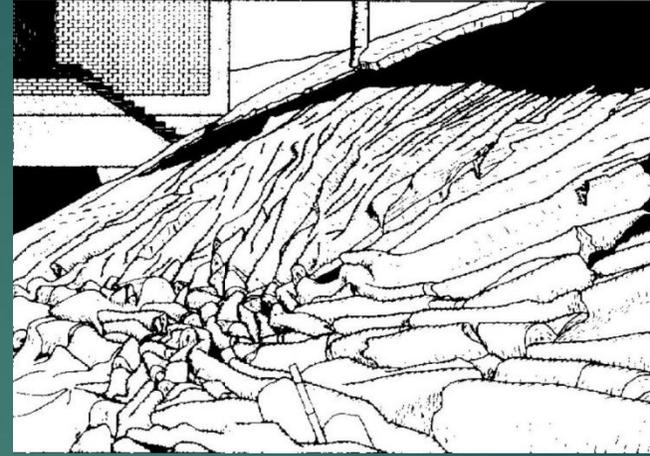
*Западная Гренландия  
(Лукьянов, 1989)*



*Аляска  
(Интернет-ресурс)*

Изучая явления, связанные с современными ледниками, можно найти хорошие аналоги геологическим структурам, особенно тектоническим покровам и складчатости подводного оползания

Опасность прямой интерпретации  
природного эксперимента



«Снежный сламп» на крыше одной из построек кампуса. На основании этого природного аналогового эксперимента делаются выводы об ориентировке шарниров складок в подводных оползневых потоках. (Lajoie J., 1972)

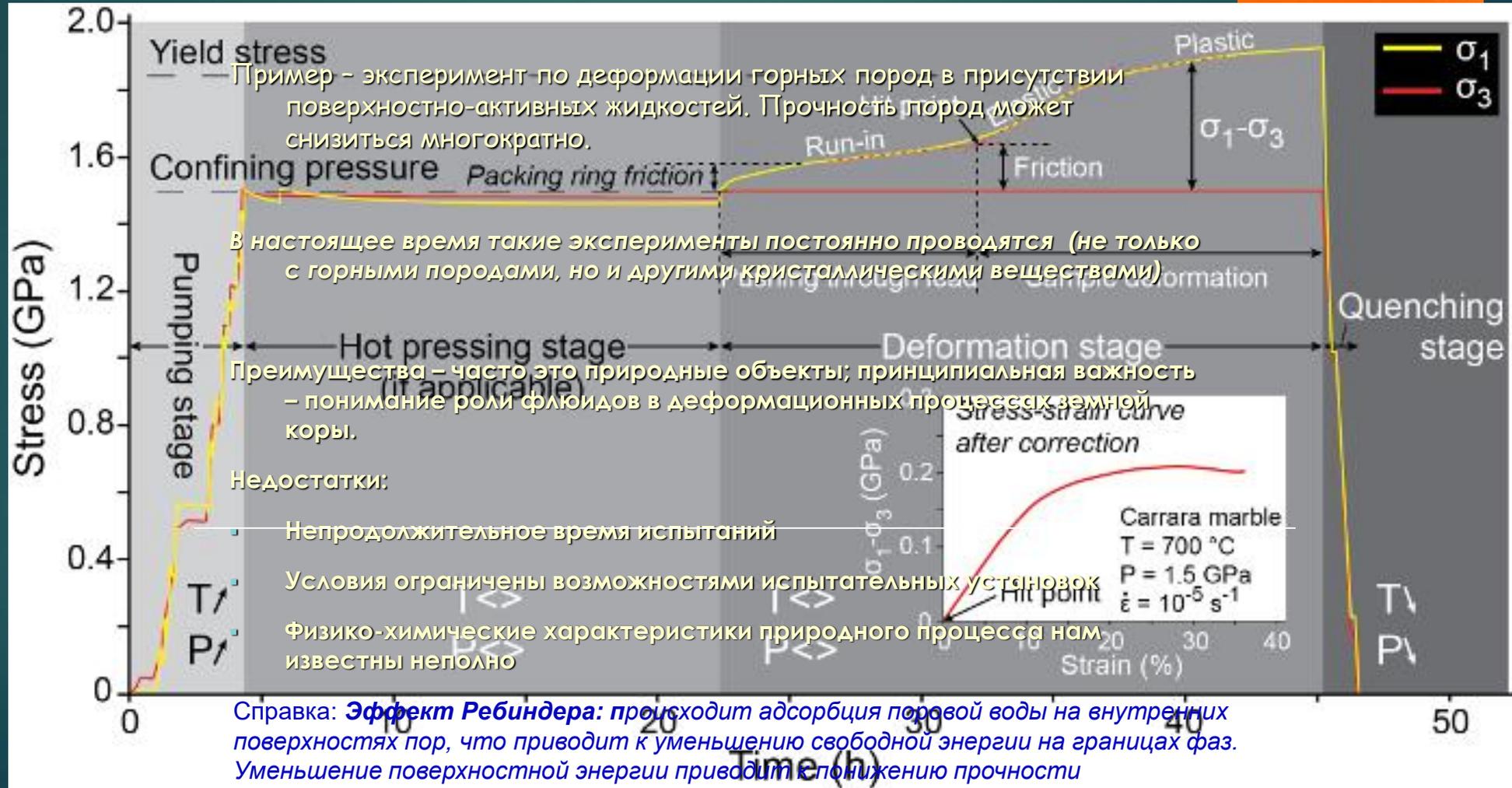
## 2. Искусственный эксперимент

Эксперименты с горными породами  
в условиях высоких давлений и температур

И. В. ЛУЧИЦКИЙ, В. И. ГРОИНА, Г. Д. УШАКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТЫ  
ПО ДЕФОРМАЦИИ  
ГОРНЫХ ПОРОД

В УСТАНОВКЕ  
ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ  
И ТЕМПЕРАТУР

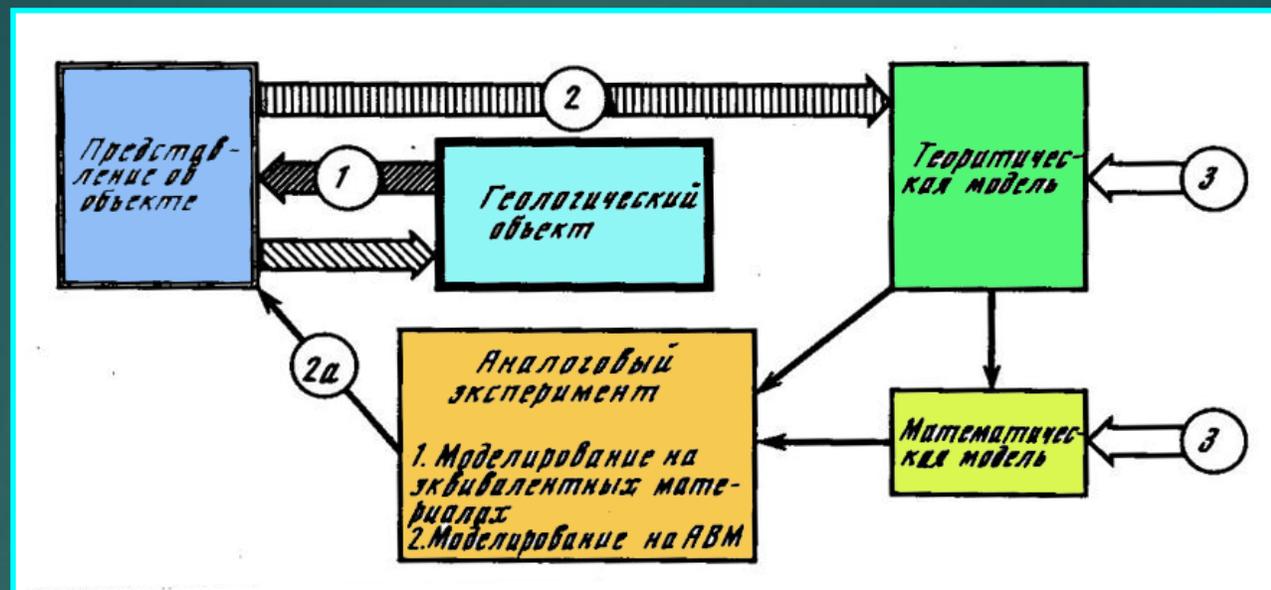


### 3. Аналоговый эксперимент

- Моделирование на эквивалентных материалах (физическое аналоговое моделирование):

*в искусственных условиях с искусственными материалами проводится эксперимент, результаты которого распространяются на представление о природном объекте*

- Моделирование на аналоговых вычислительных машинах (на этом мы останавливаться не будем)



## Аналоговый эксперимент

1 – исследование природного объекта; 2 – построение модели; 2а – результаты эксперимента, проведенного в условиях, в некоторой степени подобных природным объектам; 3 – данные физики, математики и некоторых других наук

(Лукьянов, 1989)

