



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕКТОНИКА

ФРОЛОВА  
НАТАЛЬЯ СЕРГЕЕВНА

---

ГЕОЛФАК МГУ

---

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН  
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ  
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ  
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.  
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ  
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ  
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,  
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,  
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ  
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА  
СТУДЕНТКУ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ  
**ЛЮБИЦКУЮ АЛЬБИНУ ВЛАДИСЛАВОВНУ**



---

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>Лекция 1. Объект моделирования. Значение моделирования.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Возможен ли эксперимент в тектонике?.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2. Объект в тектонике.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Условия структурообразования.....</b>	<b>5</b>

## Лекция 1. Объект моделирования. Значение моделирования

### 1.1. Возможен ли эксперимент в тектонике?

#### 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 подготовленных условиях. В отличие от теоретической физики, которая исследует математические модели природы, экспериментальная физика призвана исследовать **саму природу**.

Эксперимент в геологии, в отличие от других наук и областей, невозможен на месте («здесь и сейчас»). Мы можем провести определенный эксперимент «здесь и сейчас» при заданных нами условиях, но восстановить геологические процессы с их условиями в геологическом времени воссоздать мы не можем – исследовать *саму природу* невозможно.

Чем геологические объекты и то, что с ними происходит, отличаются от объектов и процессов, например, в физике? В первую очередь *масштабами и длительностью процессов*. Кроме того, геологическая среда очень *неоднородна*, достоверно нам неизвестны *условия деформации*, что создает дополнительные сложности при изучении.

Возникает подозрение, что проведение геологического эксперимента невозможно.

«Экспериментом...является научно поставленным опытом, наблюдением *исследуемого явления в точно учитываемых условиях*, позволяющих следить за ходом явления и воссоздавать его *при повторении этих условий*» - ни один из тезисов не относится к геологии.

#### Примеры простейших физических экспериментов

Считается (не доказано), что в 1589 году Галилео Галилей с Пизанской башни бросал предметы и наблюдал, через какое время они упадут, так как считалось, что тяжелые предметы падают быстрее легких, и ученый опроверг это предположение.

В физике на основании экспериментов можно построить теорию. Главным критерием жизнеспособности физической теории является проверка экспериментом. Физика решает прямые задачи, геология никогда не решает прямых задач.

### 1.2. Объект в тектонике

Для объектов в тектонике характерны:

- 1) Огромные размеры
- 2) Свойства геологической среды такие, как:

- **Неоднородность**
  - **Дискретность** (делимость на блоки). Геологическая среда **грубодискретна** – блоки имеют определенные относительные размеры. Невозможно найти участок (объем) породы с большим количеством мелких блоков. Какой бы объем среды не брался в рассмотрение, он будет состоять из 2-5 блоков. (если бы блоков было 50, мы бы говорили о квазиоднородной среде – доказано математически)
  - **Самоподобие** блоковой делимости (**квазифрактальность**)
  - Геосреда обладает свойством **самоорганизации** (например, после возникновения *квиважа*, возможность релаксации напряжений исчерпывается, происходит изгиб складки и этот механизм так же исчерпывается, что приводит к возникновению разрывов, организуется движение по блокам, и все это происходит при одном и том же напряженном состоянии)
- 3) На свойства среды влияет множество факторов (длительность процесса, давление, температура, давление флюида и. т.д.)

Отсюда можно сделать следующий вывод: *природные объекты с помощью эксперимента мы в тектонике исследовать не можем.*

### 1.3. Условия структурообразования

Движущие силы и обстановка структурообразования. Каковы они? Для того, чтобы образовалась та или иная деформационная структура, необходима определенная геодинамическая обстановка. Под *геодинамической обстановкой* понимается геодинамика в прямом смысле слова – рассматриваем *ориентировку напряжений*. Это является движущей силой. Отметим, что величина напряжения при деформациях играет не очень большую роль, поскольку определяющее значение имеет время. Чем больше времени занимает процесс, тем больше вязкость пород при их течении. *Величина деформации зависит от времени. Ошибочно считать*, что на участках большей деформации присутствовали бóльшие.

**Движущие силы и обстановка структурообразования** характеризуются:

- *характер напряженного состояния* (геодинамическая или механическая обстановка сжатия, растяжения, сдвига и т.п.)
- *характер приложения сил, граничные условия* – силы могут быть направленными, распределенными, внешними и внутренними
- *существование разной механической обстановки на разных структурных уровнях деформации* (разное напряженное состояние на разных уровнях), изменение обстановки с течением времени (примером является сдвиг – при общем напряженном состоянии возникают разрывы, происходит перестройка поля напряжений, и в отдельных локальных участках напряжение становится другим)

- *всестороннее давление* (деформация при высоком литостатическом давлении происходит иначе, чем при низком, у поверхности Земли – при поверхностных условиях происходят хрупкие деформации, с глубиной их вязкость возрастает\*)
- *температура* (при высоких температурах породы очень легко деформируются)
- *флюидная обстановка* (многие механизмы деформации связаны с участием флюида)
- *время*

\*Пластичность и вязкость отличаются тем, что пластичность проявляется при временных деформациях, поэтому, когда речь идет о процессах в недрах Земли, имеются ввиду вязкие деформации.

### Роль времени в геологии

*Огромная длительность геологического времени* – о ней можно судить только косвенно, и точно назвать длительность невозможно. Например, для складкообразования рассматривают возраст деформированных слоев и возраст перекрывающих их недеформированных толщ. Считается, что деформация происходила в данный промежуток времени – процесс складкообразования занимает от сотен тысяч до миллиона лет.

В геологии невозможно проводить эксперименты в реальном времени, как в других науках. При длительной деформации меняется поведение горных пород:

- горные породы могут вести себя как вязкие жидкости
- меняются механизмы деформации, начиная с механизма деформации кристаллов
- меняются параметры среды, например, предел прочности

Процессы совершаются в прошлом, соответственно, человек не может их наблюдать. Единственным доступным нам решением является *решение обратных задач*.

Кроме того, изучаемый процесс – единственный, он уже совершился, и мы не можем его повторить.

**Вывод:** воспроизвести обстановку структурообразования в эксперименте человек не может даже приблизительно. Воспроизвести деформационные процессы, когда-либо происходившие в природе, невозможно.

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

Из этой ситуации существует следующий выход: мы не можем воспроизвести дискретность среды – можем иметь дело с реальным объектом, но мы можем создать модель этого объекта.

Например, мы можем воспроизвести складчатую зону и на ее основе проводить эксперименты.

#### 1.4. О возможности эксперимента в тектонике

По этой теме известный тектонофизик Лукьянов А.В. написал большое количество статей.

«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 – создание модели (*представления об объекте*) (рис. 1.1). Эксперименты могут проводиться с различными по размеру объектами, но даже небольшие по размеру геологические объекты сложно устроены.

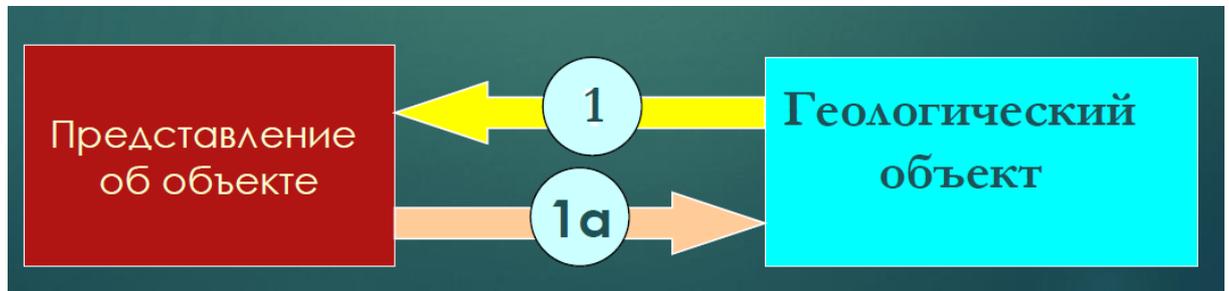


Рис. 1.1. Создание геологической модели

Геологический объект изучается при помощи совокупности всех возможных методов, благодаря чему складывается *представление об объекте*.

**Шаг 2.** *Построение теоретической модели* (правильной или неправильной) изучаемого явления. Постановка эксперимента на основании этой модели и исследование ее в различных условиях.

**Шаг 3.** Возврат к представлению об объекте, его усовершенствование. Повторение экспериментов.

**Шаг 4.** Возврат к исходному геологическому объекту. Повторение циклов (*по Лукьянову, 1989*).

При сложном строении геологических объектов и зон производится их упрощение до такой степени, чтобы это было возможно воспроизвести в эксперименте. При этом в модели необходимо сохранять те черты геологического объекта, что являются главными или определяющими. Результаты эксперимента могут противоречить теоретическим представлениям либо уточнять и дополнять их.

Что следует из этой особенности эксперимента в тектонике:

- Эксперимент имеет не только иллюстративное, но и познавательное значение – он позволяет совершенствовать наше представление об объекте. Во время моделирования мы отмечаем многие детали, о которых ранее не предполагали.
- Эксперименты мертвы, если они оторваны от непосредственного исследования геологических объектов, но существует два типа экспериментов, для которых нет необходимости сравнивать их с конкретными геологическими объектами.
- *Положительный и отрицательный результаты эксперимента имеют разное значение (Лукьянов, 1989).*

### **Как относиться к результатам экспериментов:**

Предположим, мы воспроизвели какую-либо структуру, провели эксперимент и получили результат, соответствующий ожиданиям. Но 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).

Отрицательный результат *является доказательством* того, что та физическая модель, которую мы построили, с теми параметрами, которые мы ввели, не работает. Получение отрицательного результата не является подтверждением того, что эксперимент был плохо организован, но доказывает, что выбранная модель не может быть использована.

Пример: ранее считалось, что складки могли образовываться путем ламинарного течения – слоистая толща разбивается на тонкие пластины, которые перемещаются и формируют слои. Но экспериментально доказано это никогда не было, что показывает, что данный механизм не работает. Другой пример – во многих метаморфических областях развиты единичные лежащие складки. Существовало мнение, что такие складки могут образовываться при сдвиге вдоль слоистости. Но эксперимент удался лишь тогда, когда в модель были добавлена неоднородность. Этот пример доказывает, что отрицательный результат эксперимента подтверждает неработающий механизм, но не неудачный эксперимент.

### **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 (стоит уточнить, что с надлежащей точностью получается это в редких случаях).

### **Важность эксперимента в тектонике**

Часто невозможно иными методами увидеть результат структурообразования в условиях того или иного деформационного процесса (кроме эксперимента мы можем использовать *теоретический метод* – теоретическая физика и механика, и *математическое моделирование*). Математическое моделирование начало развиваться гораздо позже, чем экспериментальный метод, поскольку геологическая среда очень сложная. Например, для сдвиговых зон, первые более-менее точные модели были получены около 10 лет назад.

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. Это очень важно, поскольку, например, до того, как начали проводить такие опыты по сдвигам, было известно лишь то, что в зоне сдвига образуются трещины отрыва (перпендикулярность и растяжения) и две системы сколов, что не соответствует сложности сдвиговых зон.

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.

### 1.5. Методы исследования тектонофизики

#### 1. Полевые наблюдения и измерения

Сложности метода заключается в следующем:

- Обнаженность редко позволяет наблюдать объект полностью
- Мы можем наблюдать только то, о чем нам уже известно
- Из полевых наблюдений невозможно вывести теорию

#### 2. Моделирование

Моделирование может быть теоретическим и физическим. Деформационный процесс в реально геологической среде очень сложен, поэтому математическое моделирование не может характеризовать среду целиком.

### 1.6. Два подхода к тектонофизическому моделированию

Моделирование происходит для того, чтобы понять, например, возможные пути миграции флюида – наиболее вероятная раскрытая трещиноватость. Как было сказано выше, при моделировании мы выбираем объект, строим его модель и проводим эксперимент с моделью. Но существует и другой вид моделирования – *абстрактное моделирование*.

При этом модель нагружается тем или иным способом, т.е. происходит исследование эффективности простых физических механизмов. Другими словами, используя тот или иной материал, мы задаем обстановку структурообразования (простые обстановки – сжатия, растяжения, сдвига, трансенсия и т.д.) и наблюдаем, какие образуются структуры. Впервые пользу такого моделирования подчеркнул Гутерман.

Геологическая среда самоорганизуется. Физика и механика не описывают тот факт, что возникают первые структурные неоднородности, меняются поля, поле напряжений становится сложным, появляются новые структуры, но при помощи моделирования мы можем проследить весь процесс изменений, и впоследствии сравнить его с природой.

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

*\*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.*

**Второй подход** представляет собой ответ на вопрос «Какой механизм обусловил формирование конкретной структуры или типа нарушения?». В этом случае мы имеем конкретный объект и задаем те условия, которые предполагаем (*субъективный характер исследования*). Кроме того, такие исследования носят *иллюстративный характер*, поскольку положительный результат – не доказательство, а иллюстрация.

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**

В этом случае мы изучаем готовую структуру при изменившихся условиях деформации. Пример: структуры, сформировавшиеся в новейшее время, подвергаются последующим деформациям – появляются новые пути миграции нефти и т.д.

### **Несколько ветвей физического моделирования:**

#### **1. Исследования физических свойств горных пород и модельных материалов**

Нам необходимо понимать, каким образом изменяются деформационные свойства при разных температурах, давлениях, флюидной обстановке и т.д. Установленные лабораторным путем параметры нуждаются в поправках.

Пример исследования свойств горных пород в условиях высоких температур и давления: в 70х годах в Новосибирске было исследовано поведение известняков и глин

при повышении температуры. Известно, что известняки – вязкие, крепкие породы, а глины легко деформируются. При повышении температур и давлений все становится наоборот: известняки начинают течь, глины становятся очень вязкими. И при изучении кливажа в полевых условиях был получен тот же результат. Наблюдается зона, в которой вязкость очень близка – при деформации толщи увеличивают свою мощность, а складки, образующиеся позже, довольно пологие.

Общепринято, что выделяются *тектонофации* – чем больше сжаты складки, тем больше была деформация. Но в данном случае все наоборот. Деформация больше была там, где складки пологие. Это подтверждает тот факт, что при моделировании (в частности, использовании метода тектонофаций) случаются ошибки, моделирование неочевидно, его нельзя проводить «в лоб», без знания процессов.

### 1. Воспроизведение геологических структур и механизмов их развития:

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

### 2. Моделирование физических процессов, происходящих в массивах горных пород и их деформаций

- Исследование полей напряжений в различных геологических структурах – такие же аналоговые эксперименты, но для измерения напряжений используются специальные датчики. Такие эксперименты проводились в Иркутске.
- Изучение акустической эмиссии, сопровождающей разрушение
- Изучение миграции флюидов в геологических структурах и т.д. (*Шерман, 1991*) – в настоящее время неизвестна методика проведения опыта

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 (пример Лукьянова)

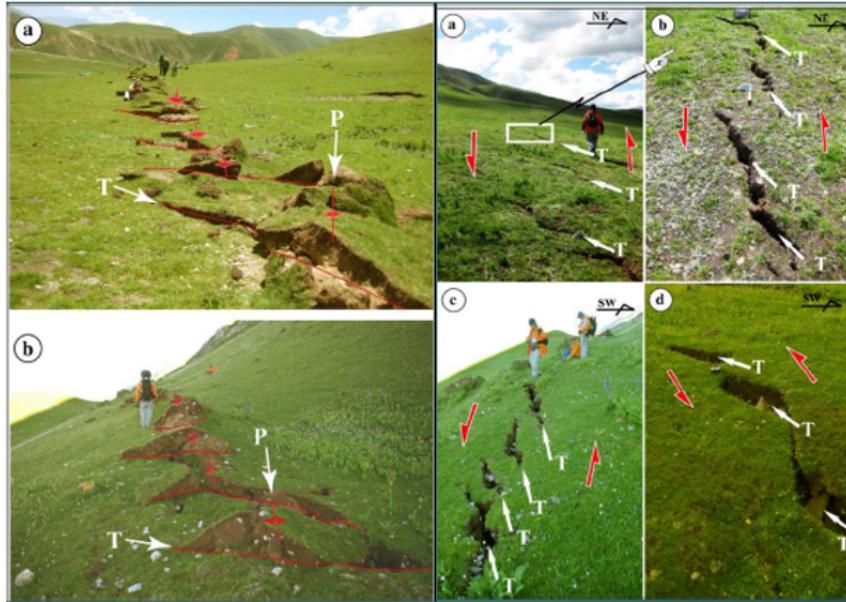


Рис. 1.2. Примеры сдвиговых структурных парагенезов, сформировавшихся на поверхности Земли в результате землетрясений. Структуры, сформировавшиеся во время землетрясения 2010 г на Центральном плато Тибета в неконсолидированных аллювиальных отложениях. Сдвиги состоят из ранних трещин отрыва (буква Т на фотографиях), впоследствии объединенных в единый разрыв.(G. Rao et al., 2011)

На рис. 1.2. представлено землетрясение в Китае, в ходе которого были образованы сдвиговые зоны и хрупкие деформации. Интерпретация данных зон была проведена в соответствии с представлениями тектонофизики о строении сдвиговых зон. Но при изучении данных сдвиговых зон можно отметить подтверждение того, что в рыхлых гранулированных породах сначала формируются трещины отрыва. Подобный пример представлен на рис. 1.3.

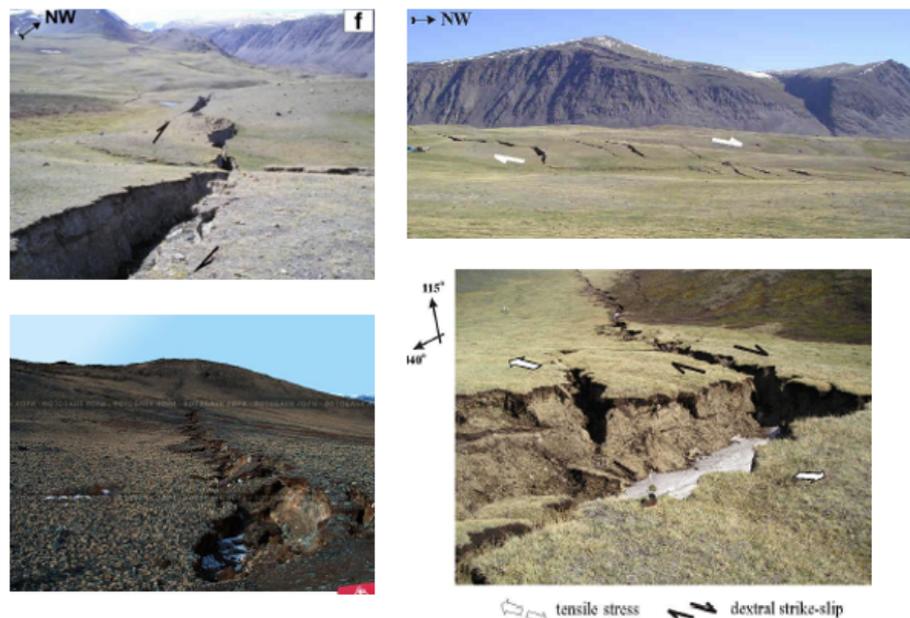


Рис. 1.3. Чуйское землетрясение 2003 г. (Lunina et al., 2008)

На рис. 1.4 представлено землетрясение в Новой Зеландии, и данные фото поразительно схожи с результатами экспериментов по сдвигам, которые проводятся на влажной глине. На фото можно наблюдать многие нюансы, которые видны не в каждом эксперименте.



Рис. 1.4. 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

Считается, что при изучении ледников можно обнаружить надвиговые процессы (рис 1.5). Изучая явления, связанные с современными ледниками, можно найти хорошие аналоги геологическим структурам, особенно тектоническим покровам и складчатости подводного оползания.

Сползающий ледник на Аляске можно сравнивать со складками подводного оползания. В данной ситуации мы можем наблюдать природный эксперимент.

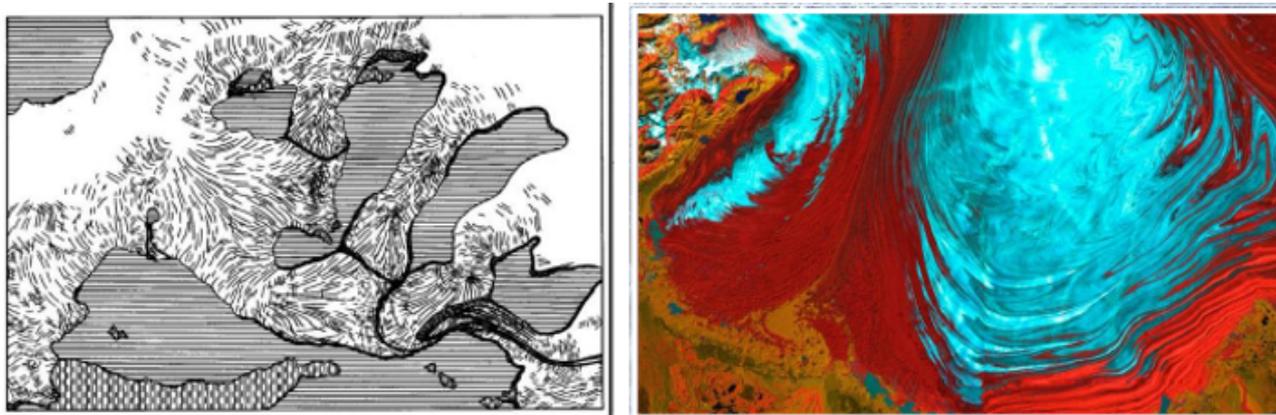


Рис. 1.5. Западная Гренландия, Лукьянов, 1989 (слева); Аляска (справа)

На рис. 1.6 представлен природный эксперимент, в котором наблюдалось сползание снега по крыше здания. В результате исследования были уточнены шарниры складок и объяснено, почему шарниры имеют разную ориентировку в теле слампа, и какую именно ориентировку они должны иметь.

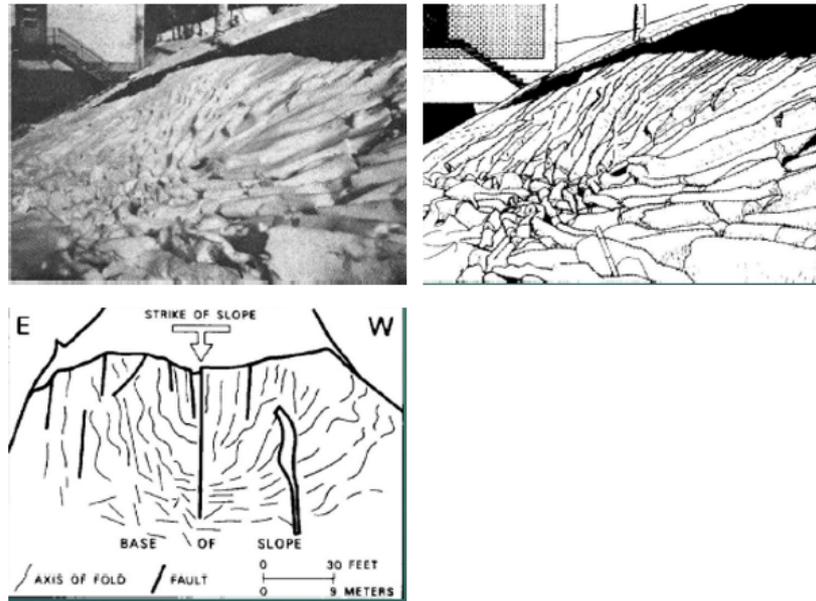


Рис. 1.6. «Снежный сламп» на крыше одной из построек кампуса. На основании этого природного аналогового эксперимента делаются выводы об ориентировке шарниров складок в подводных оползневых потоках. (Lajoie J., 1972)

## 2. Искусственный эксперимент

Искусственный эксперимент с горными породами в условиях высоких температур и давлений.

Пример – эксперимент по деформации горных пород в присутствии поверхностно-активных жидкостей (вода, глицерин и другие жидкости). При этом прочность пород может снизиться многократно. Это очень важно, поскольку существуют разрывы на глубине, а при повышении давления разрывы не должны образовываться (повышается давление флюида, которое снимает часть нагрузки, и наличие поверхностно-активных жидкостей скорее всего тоже играет большую роль) - *Эффект Ребиндера*.

Эффект Ребиндера: происходит адсорбция поровой воды на внутренних поверхностях пор, что приводит к уменьшению свободной энергии на границах фаз. Уменьшение поверхностной энергии приводит к понижению прочности.

В настоящее время такие эксперименты постоянно проводятся (не только с горными породами, но и другими кристаллическими веществами). Преимущества их в том, что часто это природные объекты; принципиальная важность – понимание роли флюидов в деформационных процессах земной коры.

Недостатки заключаются в следующем:

- Непродолжительное время испытаний
- Условия ограничены возможностями испытательных установок

- Физико-химические характеристики природного процесса нам известны неполно

### 3. Аналоговый эксперимент

Моделирование проводится 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).

**Аналоговое моделирование** - это моделирование нефизических процессов с помощью других, описывающихся теми же уравнениями. Таким образом, аналоговое моделирование может быть разным, полезно использовать полный термин – термофизическое аналоговое моделирование.

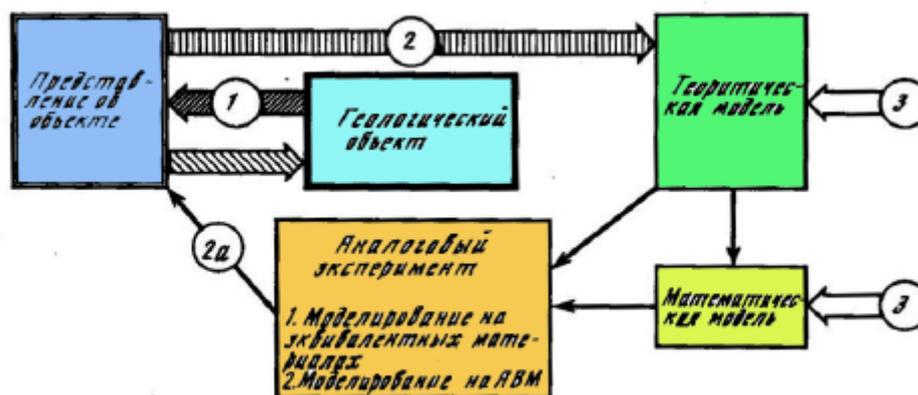


Рис. 1.7. Аналоговый эксперимент

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)

На рис. 1.7 представлена схема аналогового моделирования. После сбора сведений о геологическом объекте, происходит проработка представления об объекте. Далее создается теоретическая модель. На этом этапе также можно привлечь математическую модель (Лукьянов). После этого проводится аналоговый эксперимент – происходит проверка представления: совпадет ли с ним эксперимент. После этого шага мы возвращаемся к представлению (модели), меняем ее и снова проводим эксперимент. Количество таких итераций не ограничено.

## **Лекция 2. Принципы, техника и примеры аналогового физического моделирования. Условия подобия**

### **2.1. Примеры аналогового моделирования на эквивалентных материалах**

#### **Моделирование структур, возникающих при конвекции**

При подогреве снизу слоистых образцов из канифоли, нагретое, более легкое вещество, поднималось вверх, более холодное и тяжелое опускалось вниз, то есть происходил процесс конвекции. Сформировались крупные поднятия и опускания. Одновременно происходило сжатие и растяжение тонких слоев, и они деформировались, образуя на некоторых участках мелкие складки. Если деформация вызывается силой тяжести, то физическое подобие устанавливается автоматически.

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.

#### **Моделирование структур, возникающих в зоне сдвига**

**Материал** – «эквивалентный», т.е. такой, который за время моделирования в лаборатории деформируется так же, как горные породы за огромное геологическое время. Это влажная глина, силикон, песок и др.

В приведенных примерах был задан тот или иной механизм деформации. Изучались следствия этих физических механизмов. В таких экспериментах можно наблюдать развитие процесса формирования структур во времени, оценить параметры возникающих структур. Иными словами, решались прямые задачи. Обычно устойчиво повторяющиеся в таких моделях структуры сопоставляются с реальными объектами и отыскиваются аналоги с учетом наибольшего числа важнейших коррелирующихся параметров. На основании близких модельных аналогов выбирается гипотеза о механизме образования того или иного типа структур. Затем может моделироваться образование конкретных структур определенного типа с учетом их индивидуальных особенностей и истории развития. По мнению В.Г. Гутермана и А.В. Михайловой, именно такая последовательность тектонофизического моделирования представляется наиболее эффективной.

#### **Изучение напряженного и деформированного состояния конкретных регионов. Изучение напряженного состояния методом поляризационно-оптического моделирования (не относится к аналоговому моделированию)**

Результаты поляризационно-оптического моделирования напряженного состояния деструктивной зоны Байкальской рифтовой системы и их интерпретация.

Цветом показаны области концентрации касательных напряжений (по А.И. Мирошниченко, 2010).

## **Первые эксперименты. Развитие методологической базы. Техника моделирования.**

Уже в первой половине XIX в. делались первые попытки воспроизвести деформации горных пород на искусственных моделях, чтобы таким образом лучше понять, как они возникают. Но первоначально исследователи пытались получить лишь внешнее подобие формы структуры, не заботясь о том, какой материал используется для моделирования, т.е. воспроизведение самого процесса деформации, подобному природному, отодвигалось на второй план.

Эпизодически эксперименты по физическому моделированию природных структур продолжались и в течение последующих 100 лет, но опыты выполнялись без специальной теоретической и экспериментальной базы и служили, в основном, для иллюстрации той или иной тектонической идеи.

Только в первые десятилетия XX в. наметилась тенденция к разработке **теории физического подобия** применительно к тектоническому моделированию. К этому же времени относятся и первые эксперименты, в которых проявилось стремление сознательно следовать принципам физического подобия между моделью и природными тектоническими деформациями.

В качестве примера можно привести эксперименты Г. Клооса, Э. Клооса, В. Риделя и других.

Однако лишь в послевоенные годы моделирование стало занимать заметное место среди методов структурной геологии.

**Методологическая база** экспериментальной тектоники, прежде всего в виде элементов подобия, стала закладываться в 30-40 годы XX в. Начало систематическим экспериментально-тектоническим исследованиям в **нашей стране** положено в 1944г. В. В. Белоусовым, а оформление научного тектонофизического направления можно связать с появлением основополагающих идей М. В. Гзовского

**ПРИНЦИПЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ** (по М.В. Гзовскому):

Принцип подобия моделей реальным объектам. Результаты испытания моделей можно использовать при рассмотрении природных объектов только в том случае, если они подобны. Анализ подобия необходим при каждом испытании моделей.

Принцип избирательности моделей (селективности) относительно процессов, происходящих в природных объектах. Модели, подобные объектам в отношении изучаемых процессов, не должны и могут не быть подобными в отношении многих других второстепенных и не существенных для нас явлений.

Принцип отдельного изучения на моделях (сепарации) тех существенных факторов, которые в природных объектах действуют совместно. Для четкого

определения роли каждого фактора в исследуемом процессе модели нужно испытывать сериями, в каждой из которых следует последовательно изменять только один фактор, сохраняя действия остальных постоянными. После раздельного изучения нужно испытывать сложные модели, подверженные воздействию совокупности ранее исследованных факторов.

Принцип последовательных приближений (аппроксимации) к полному подобию моделей и природных объектов.... Степень подобия моделей в ходе исследования должна непрерывно повышаться.

Принцип статистической обоснованности заключений о результатах испытания моделей. Выводы, получаемые путем испытания моделей, являются чисто эмпирическими, поэтому их достоверность и точность должны оцениваться и проверяться статистически.

### **Принцип подобия моделей природным объектам**

Физические явления и объекты считаются подобными, если они обладают геометрическим подобием и при этом поля всех одноименных физических переменных соответственно подобны (полем физической величины называют совокупность ее значений во всех точках изучаемого пространства).

**Подобие полей физических переменных** заключается в том, что величина какой-либо переменной в любой точке одного объекта равна величине той же переменной в сходственной точке другого объекта, умноженной на постоянный коэффициент –множитель подобия

Сущность метода выявления условий подобия (по М.В. Гзовскому) -эти условия выводятся из дифференциальных или интегральных уравнений, описывающих поля физических переменных величин, характерных для изучаемого процесса

Основной задачей при установлении условий подобия должен быть выбор исходных уравнений, описывающих главные закономерности деформаций и разрушений горных пород

Общие закономерности деформирования и разрушения, экспериментально установленные для весьма различных материалов (в том числе некоторых горных пород) кладутся в основу теоретического вывода условий подобия при моделировании тектонических явлений

Однако в последнее время к базовым идеям традиционной механики деформируемого твердого тела добавились методы, подходы и идеи физической мезомеханики материалов и нелинейной динамики (нагружаемая среда рассматривается как нелинейная иерархически организованная динамическая система, эволюция которой осуществляется по законам нелинейной динамики)

### **Условия подобия:**

Пример (описан в Гончаров, Талицкий, Фролова Введение в тектонофизику, 2005):

*in*

$$C_i = C_l \times C_t \times C_p \times C_g; C_i =$$

*in*

Условие физического подобия при физическом моделировании медленных деформаций

Эта формула подходит, например, для моделирования длительного (сотни тысяч и миллионы лет) складкообразования.

Можно принять:

$$C_l \approx 10 \text{ см}/10 \text{ км} = 10^{-5}$$

$$C_t \approx 1 \text{ час}/10^6 \text{ лет} \approx 3,6 \times 10^3 \text{ сек}/(3 \times 10^7) \times 10^6 \text{ сек} \approx 10^{-10}$$

$$C_p \approx C_g \approx 1$$

Тогда по формуле (2.1.1) получим:

$$C_i \approx 10^{-15},$$

откуда, при  $n \approx 10^{18} \text{ Па}\cdot\text{с}$  (об этой оценке речь пойдет позже), получим вязкость модели:  $m \approx 10^3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Такой вязкостью обладают, например, жидкая глина и машинное масло. Вот это и может служить в качестве **эквивалентного материала**.

Главные параметры: 1. Размер структур. 2. Время их формирования. 3. Деформационные свойства среды их образования, в первую очередь вязкость и предел прочности. 4. Величина тектонических напряжений.

Для соблюдения условий подобия нужна оценка значений параметров процесса формирования природных структур.

Точнее всего можно оценить размер структур и вмещающих их геологических тел. Даже если в процессе деформации их размер существенно изменился, то разработан комплекс методов реконструкции первоначальных размеров. Одной из последних, наиболее совершенных разработок такого рода является методика, предложенная Ф.Л. Яковлевым [Яковлев, 1997, 2002, 2017].

Менее определенной является оценка *длительности* формирования структур. Например, для складчатости общего смятия обычно принимается оценка в *сотни тысяч и миллионы лет*, основанная на разнице в абсолютном возрасте осадочных толщ, разделенных угловым несогласием.

Однако нет никакой уверенности в том, что данный процесс не является значительно более, на один-два порядка, кратковременным.

Непросто обстоит дело с *вязкостью* и *пределом прочности* среды. О вязкости подвергающихся деформации больших объемов горных пород говорить не приходится. Геологическая среда является неоднородной и иерархически построенной. Во время деформационного процесса «работают» разные структурные уровни этой среды. Можно привести пример со складкообразованием.

В природных горных толщах вязкость и прочность изменяются с глубиной под влиянием соответствующего изменения температуры и давления, а также из-за влияния присутствующих в толщах флюидов. Это тоже вносит свою долю в неопределенность оценки этих параметров

Никакими лабораторными исследованиями «эффективную» вязкость природной деформируемой среды установить нельзя. То же относится и к прочности. (Вспомните также, что существует «мгновенная» и длительная прочность).

Например, оценка вязкости и прочности верхней мантии, основанная на оценке этих параметров у главного породообразующего минерала оливина является заведомо завышенной.

Хуже всего обстоит дело с оценкой величины природных *тектонических напряжений*. Эти оценки у разных авторов различаются на три и более порядков. *Все эти и другие аргументы приводят к весьма скептической оценке возможности точного соблюдения условий подобия*

$$C_{\square} = C_l \times C_t \times C_{\square} \times C_g$$

$\tau_s / \rho g h = \text{const}$ , где  $\tau_s$  – предел прочности на сдвиг,  $\rho$  – плотность слоя,

$h$  – толщина слоя,  $g$  – ускорение свободного падения

[Shemenda, 1983]

Условие подобия для моделирования разрывной (сдвиговой) деформации

### **Невозможность соблюдения условий подобия**

Техническая и принципиальная невозможность задания в модели адекватной – фрактальной, грубодискретной, самоорганизованной–структуры среды

Нет сведений о размере тектонических сил и скорости деформации. Не знаем параметров природной среды. Кроме того, такие фундаментальные свойства как вязкость и прочность в применении к большим деформируемым объемам горных пород оказываются неоднозначными.

Невозможность по объективным и субъективным причинам соблюсти граничные условия.

Невозможно учесть отношения между деформирующими тектоническими напряжениями и литостатической нагрузкой (пример со сколами Риделя).

Автоматическое выполнение условий подобия во многих случаях физического моделирования (по М.А. Гончарову).

В ситуации неопределенности оценок главных параметров природного структурообразования остаются две возможности.

Во-первых, стремление к получению чисто *качественного* результата моделирования, без претензий на *количественную* оценку параметров процесса структурообразования.

Во-вторых, принятие, в первом приближении, постулата о том, что, особенно в простейших случаях физического моделирования, условия подобия выполняются автоматически, независимо от выбора эквивалентного материала [Белоусов, Гончаров, 1991, см. также *Гончаров, Талицкий, Фролова* Введение в тектонофизику, 2005].

**Ситуация, когда можно не учитывать силу тяжести и использовать закон вязкого течения:**

Если мы проводим физическое моделирование для исследования структур, формирующихся в результате больших необратимых деформаций (медленно протекающий процесс), то по мнению М.А. Гончарова и Ю.Л. Ребецкого, для установления условий подобия нужно использовать закон вязкого течения:

$$\sigma = 2\eta \dot{\epsilon}$$

проведя некоторые преобразования (какие именно, можно посмотреть в *Гончаров, Талицкий, Фролова, 2005*) можно получить интегральную форму этого закона

$$\sigma = \sigma_0 / 2 \ln k.$$

Из этого уравнения можно вывести условие подобия для длительных пластических (в широком смысле этого слова) деформаций

$$C_1 \sigma = C_2 \sigma_0 \cdot C_3 t$$

Подобрав эквивалентный материал с вязкостью  $\eta = m$ , мы посредством напряжения  $m$  за время  $tm$  получили требуемую величину деформации  $k$ . Если теперь, например, использовать другой материал с вязкостью, скажем, на порядок (в 10 раз) выше, то для получения той же величины деформации  $k$  потребуется, в соответствии с (1), в 10 раз большее время. Это означает, что условие подобия (3) все равно соблюдается. Следовательно, мы можем использовать материал любой вязкости, т.к. условие подобия соблюдается автоматически.

### О пользе аналогового моделирования

- Существование непреодолимых сложностей и противоречий

- От модели требуется отражение некоторых исходных закономерностей деформаций и разрушения тел. Мы должны решать задач не в абсолютной, а в относительной форме

*Пример с формированием трещин – общие закономерности и развитие зон деструкции*

Возможность решать не только простые, но и весьма сложные вопросы. Однако мы должны точно формулировать вопрос, который мы ставим перед данной моделью и создавать модель специально для ответа на него

С помощью экспериментов можно проверять, могут или нет работать наши модели изучаемых объектов

*Пример складок скалывания или формирования складчатости общего смятия под действием только силы тяжести*

В результате проведения многих тысяч экспериментов были получены результаты, которые хорошо воспроизводили тектонические структуры и были полезны для понимания процесса их развития. Часто иными способами сделать это было невозможно. Наглядность результатов. Стимулирование мысли исследователя

О пользе аналогового моделирования

- Существование непреодолимых сложностей и противоречий
- От модели требуется отражение некоторых исходных закономерностей деформаций и разрушения тел. Мы должны решать задач не в абсолютной, а в относительной форме

*Пример с формированием трещин – общие закономерности и развитие зон деструкции*

- Возможность решать не только простые, но и весьма сложные вопросы. Однако мы должны точно формулировать вопрос, который мы ставим перед данной моделью и создавать модель специально для ответа на него
- С помощью экспериментов можно проверять, могут или нет работать наши модели изучаемых объектов

*Пример складок скалывания или формирования складчатости общего смятия под действием только силы тяжести*

- В результате проведения многих тысяч экспериментов были получены результаты, которые хорошо воспроизводили тектонические структуры и были полезны для понимания процесса их развития. Часто иными способами сделать это было невозможно
- Наглядность результатов. Стимулирование мысли исследователя



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
МГУ ИМЕНИ  
М.В. ЛОМОНОСОВА

*teach-in*  
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ