

# Тектонофизика и структурная геология

*М.А. Гончаров*

Геологический факультет  
Московского государственного университета (МГУ),  
Москва, Россия  
*m.a.gonch@mail.ru*

# **Предметы тектонофизики и структурной геологии**

**Тектонофизика** – раздел **геологии**, но в некоторой мере также одна из ветвей **физики**, в первую очередь классической механики.

**Классическая механика:**

**статика** – равновесие тел;

**кинематика** – геометрическое свойство движения тел без рассмотрения его причин;

**динамика** – движение тел уже без отрыва от его причин.

Структурная геология – своеобразная «геологическая статика», описание и классификация специфических объектов геологии – *структурных форм* и их сочетаний (*структурных парагенезов*) – **современной структуры** посредством полевых наблюдений.

Тектонофизика – «геологическая кинематика и динамика» – выявление *механизма формирования и эволюции* структурных форм и их парагенезов с помощью физического и компьютерного моделирования и теоретического анализа.

# **Соподчинение тектонофизики и структурной геологии**

Тектонофизика не может развиваться без структурной геологии.

Структурная геология – это базис тектонофизики (аналогия, например, элементарная математика – высшая математика).

Однако на этом аналогия заканчивается. Элементарная математика вполне «обходится» без высшей математики.

А структурная геология вынуждена привлекать тектонофизику.

Пример – balanced cross-sections, основанный на представлении о компенсационной организации тектонического течения.

Все учебники не только по структурной геологии, но и по общей геологии содержат элементы тектонофизики.

Пример – учебник «Структурная геология» *В.В. Белоусова* [1971, 1981, 1986], одного из основателей отечественной тектонофизики.

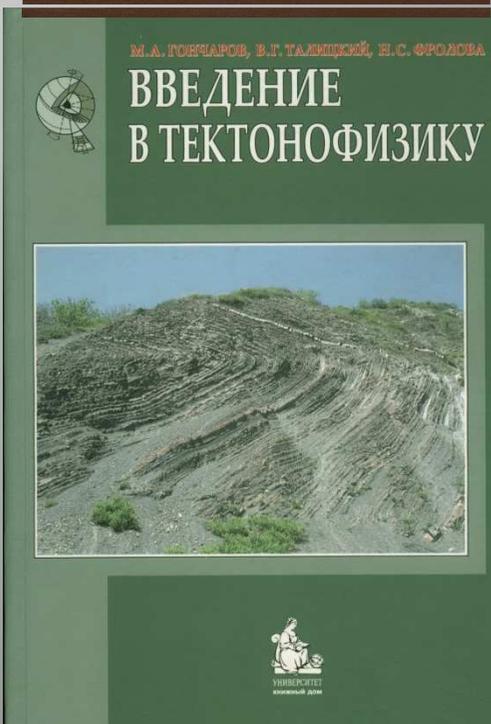
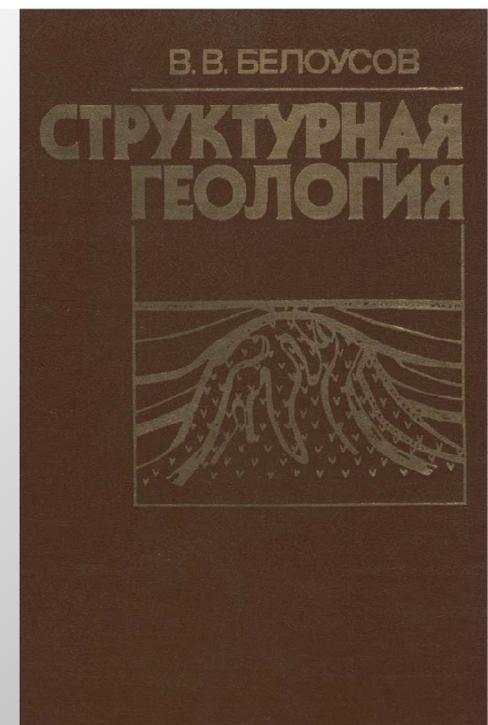
Специальные главы этого учебника длительное время – одно из немногих пособий по тектонофизике.

Разработанный *В.В. Белоусовым* еще в 1973 году курс для преподавания тектонофизики на Геологическом факультете МГУ так и назывался – «Специальные главы структурной геологии».

И только в 1987 году он был переименован в «Физические основы структурной геологии».

С 1998 года, уже после кончины *В.В. Белоусова*, он был модернизирован под названием «Тектонофизика».

И только в 2005 году на его основе был создан первый отечественный учебник по тектонофизике, удостоенный в следующем году премии им. Н.С. Шатского Президиума РАН.



**Триада**  
**«объект – процесс – причина»**

Такая триада – практически во всех формулах **физики**.

Пример:  $F = m \cdot a$

В тектонофизике:

**Объект** – литосфера (теперь с мантией) или ее отдельные участки,  
ее структура (область структурной геологии)  
и ее деформационные свойства – область тектонофизики.

**Процесс** – тектоническое течение и его компоненты  
(поступательное перемещение, вращение и деформация элементарных объемов геологической среды) –  
область тектонофизики.

**Причина** – силы и напряжения – также область тектонофизики.

В классической механике изучение этой триады: объект → процесс → причина.

Пример – небесная механика:

сначала Кеплер (*кинематический* закон обращения планет вокруг Солнца),  
и только потом Ньютон (закон всемирного тяготения – *причина*).

*Такой* метод познания можно квалифицировать как *индуктивный*:  
от частного к общему,  
от более известного процесса к менее известной причине.

Однако в физике твердого тела изучение названной триады обычно ведется в ином порядке:  
объект → причина → процесс.

Здесь *причина* – сила («нагрузка»), приложенная к телу, а *процесс* – деформация этого тела.

Это *дедуктивный* метод, от более известной причины к менее известному процессу.

**Тектонофизика** первоначально создавалась на базе физики твердого тела  
[Гзовский, 1975].

Однако, опираясь на данные структурной геологии (**статику**),  
она выводит из них **кинематику** (ориентировку главных осей деформации, реже величину деформации),  
и только затем **динамику** (ориентировку главных осей напряжений  
и, в единичных случаях, величину напряжений).

Ориентировка главных осей напряжений и величина напряжений ни в **механике**, ни в **тектонофизике**  
не определяются непосредственно, а только по ориентировке и величине производимых ими деформаций.

Если ориентировка оси максимального сжатия устанавливается  
просто по биссектрисе острого угла между двумя сопряженными трещинами скалывания,  
то даже в этом случае по умолчанию предполагается,  
что исследуемый элементарный объем испытал **малую деформацию**,  
главные оси которой в первом приближении были параллельны главным осям **напряжений**.

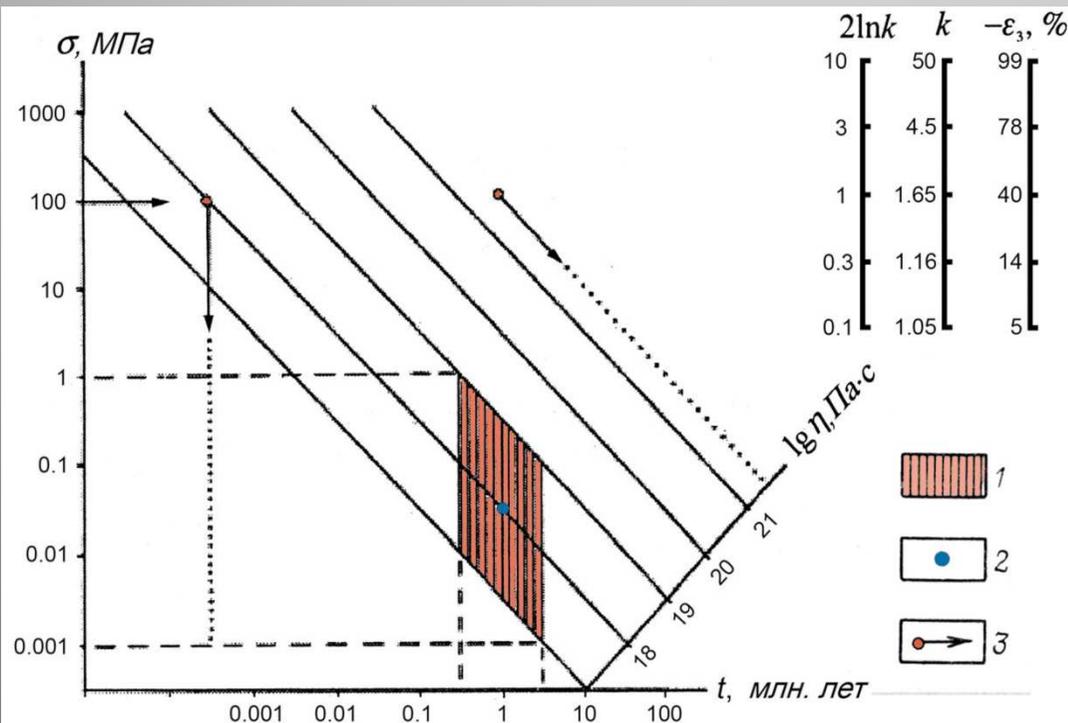
(В случае *большой* деформации такое предположение верно для деформации укорочения-удлинения  
и неверно в случае деформации простого сдвига.)

Весьма опасным представляется кажущийся «легкий» путь от **объекта** непосредственно к действующим **силам**.

Например, если складчатость находится в зоне коллизии или субдукции, то весьма часто считается достаточным для объяснения ее генезиса нарисовать на разрезе стрелки, обозначающие действующие силы.

Однако при более детальном анализе выясняется, что пропущенное в этом случае звено триады познания – **деформация** объекта – свидетельствует против скороспелого решения о действующих силах.

Например, либо силы, предусмотренные концепцией тектоники литосферных плит, оказываются непомерно большими для формирования складчатости, либо количественная реконструкция складчатой деформации региона противоречит «простому» предположению о роли субдукции как причине процесса [Яковлев, 2009].



[Гончаров, 1985]

**Фундаментальные свойства  
геологической среды:  
область структурной геологии  
и геотектоники**

Главная проблема тектонофизики 21-го века – это создание собственной теоретической базы, которая, не игнорируя и в нужной мере используя законы физики, в то же время была бы основана на свойствах именно геологической среды, с учетом весьма длительного времени протекания процессов в этой среде.

Геологическую сплошную среду характеризуют пять ее *фундаментальных* свойств:

- 1) **Непрерывность** геологической среды.
- 2) **Расслоенность** геологической среды на отдельные геосферы, толщи, пачки слоев и слои, различающиеся по их деформационным («тектонофизическим») свойствам.
- 3) **Иерархия** геосфер, толщ, пачек и слоев.
- 4) **Разрывно-пластическая** реакция геологической среды на нагружение.
- 5) **Твердо-жидкий** состав геологической среды.

Перечисленные пять фундаментальных **свойств** геологической среды определяют пять аспектов ее тектонофизической и геодинамической **организации**.

# Фундаментальные аспекты организации тектонического течения, происходящего в геологической среде: область тектонофизики и геодинамики

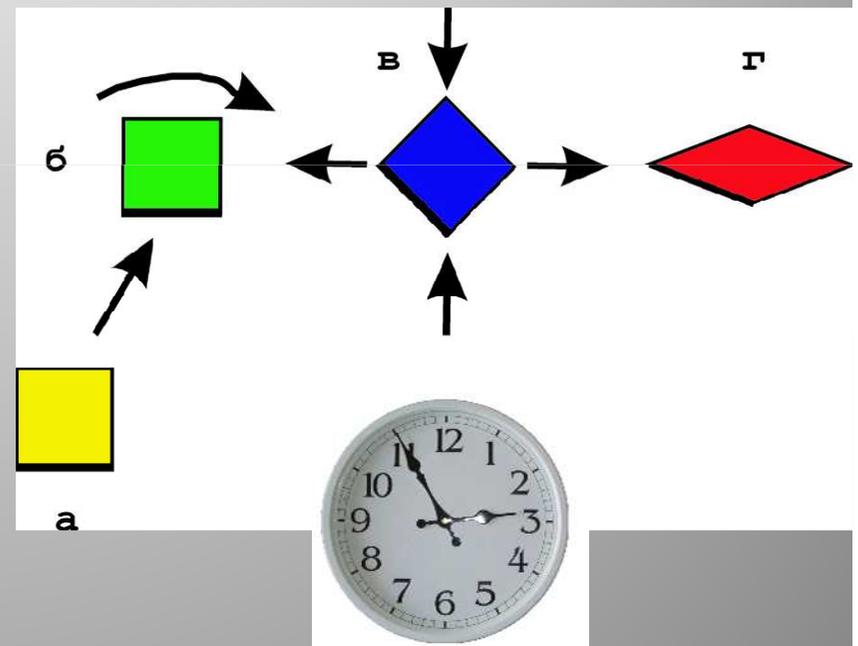
Пять фундаментальных свойств геологической среды  
(«геологическая **статика**»)  
определяют пять аспектов организации тектонического течения  
(«геологическая **кинематика** и **динамика**»)

## Термин «течение» в механике сплошных сред

Введен *О. Коши* и восходит к античным временам.

Это сочетание  
поступательного перемещения (*translation*),  
вращения (*rotation*)  
и деформации (*strain*)  
элементарных объемов  
сплошной среды  
в координатах Эйлера,  
привязанных к некоторой  
неподвижной точке пространства.

Простейший пример из механики –  
течение реки относительно  
неподвижного берега.

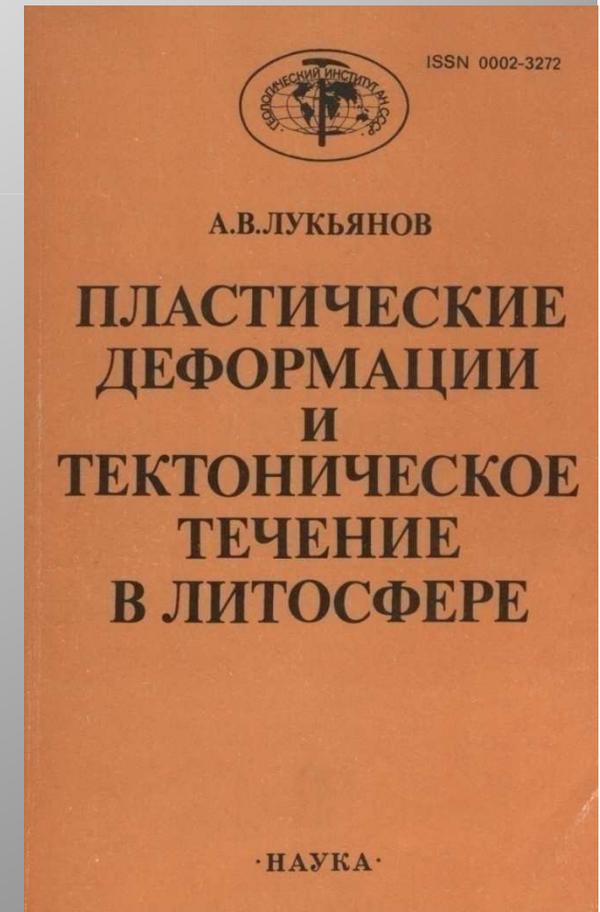


Отличие вращения от деформации –  
разное направление вращения  
материальных отрезков.

К такому пониманию термина  
«тектоническое течение»  
впервые призвал А.В. Лукьянов в своей статье

*Лукьянов А.В. Пластические деформации и тектоническое течение горных пород литосферы // Тектоническая расслоенность литосферы. М.: Наука, 1980*

В более полном виде  
это изложено в его монографии



Это представление А.В. Лукьянова,  
которое я полностью разделяю,  
расширяет рамки понятия о течении,  
которое часто отождествляется  
с пластической деформацией  
по достижении средой  
«предела текучести»  
в координатах Лагранжа, привязанных  
к деформируемому телу.

Говоря максимально кратко,  
течение –  
это вращение и деформация  
множества элементарных объемов  
среды  
в процессе их перемещения.

Компоненты  
вращения и деформации  
как производные  
поля течения

$$\alpha(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial s_z}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial s_x}{\partial \mathbf{z}} \right)$$

Компоненты скоростей  
вращения и деформации  
как производные  
поля скоростей течения

$$\omega(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial v_x}{\partial \mathbf{z}} \right)$$

$$\varepsilon_{xx}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -\varepsilon_{zz}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{\partial s_x}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{\partial s_z}{\partial \mathbf{z}}$$

$$\varepsilon'_{xx}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = -\varepsilon'_{zz}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{\partial v_x}{\partial \mathbf{x}} = -\frac{\partial v_z}{\partial \mathbf{z}}$$

$$\varepsilon_{xz}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial s_x}{\partial \mathbf{z}} + \frac{\partial s_z}{\partial \mathbf{x}} \right)$$

$$\varepsilon'_{xz}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial \mathbf{z}} + \frac{\partial v_z}{\partial \mathbf{x}} \right)$$

В настоящее время,  
в связи с развитием представлений  
о *конвективном* характере  
тектонических движений и деформаций  
в геосферах разного ранга,  
такой подход  
к трактовке термина  
«тектоническое течение»  
имеет несомненное преимущество, поскольку  
при конвекции вещество  
не просто «течет»,  
испытывая пластическую деформацию,  
а «течет в определенном направлении».

Представление  
о трех компонентах тектонического  
течения позволяет строго разграничить  
понятия

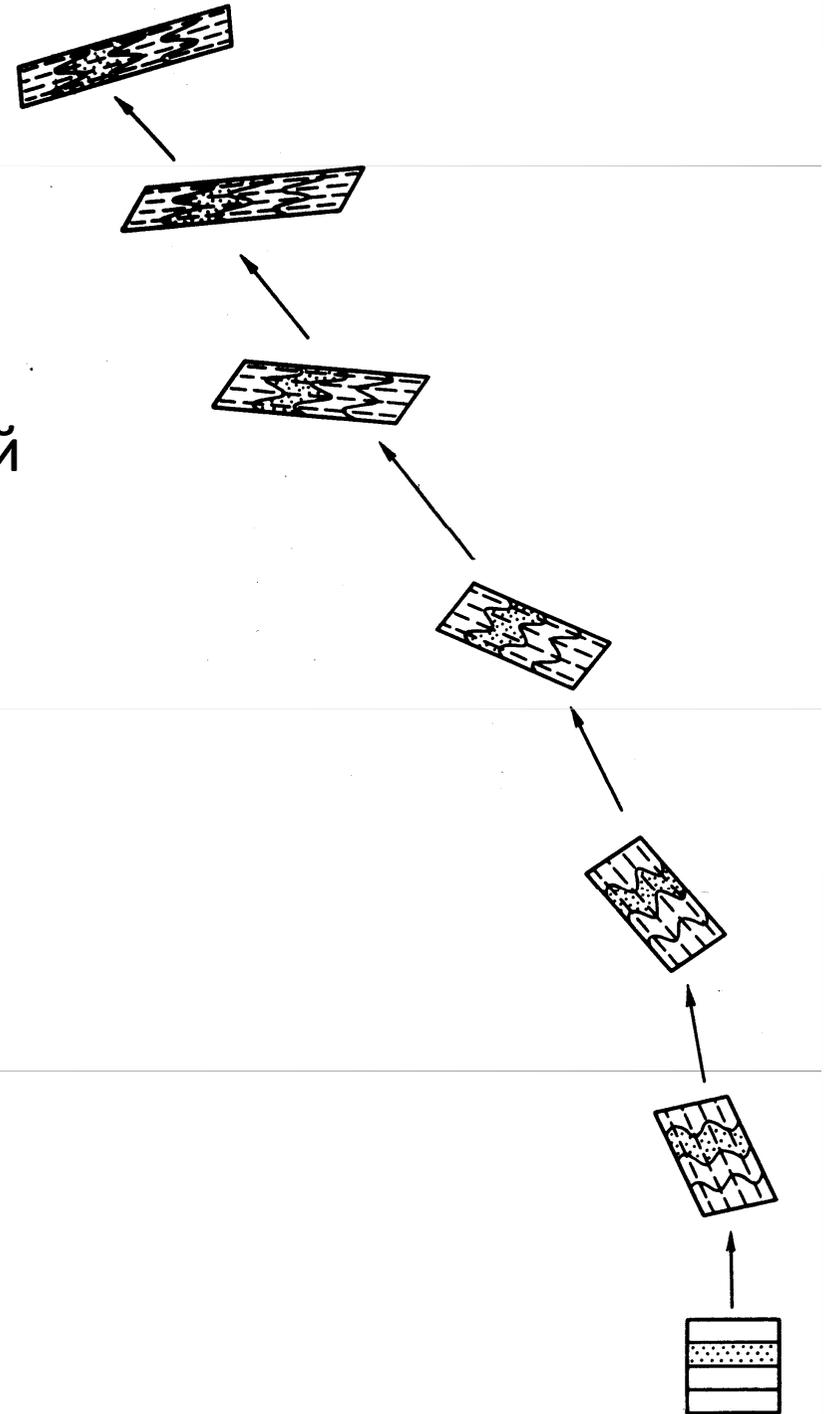
«тектоническое движение»  
и «тектоническая деформация»,  
которые сплошь и рядом  
воспринимаются как синонимы.

Например, при *складкообразовании*:

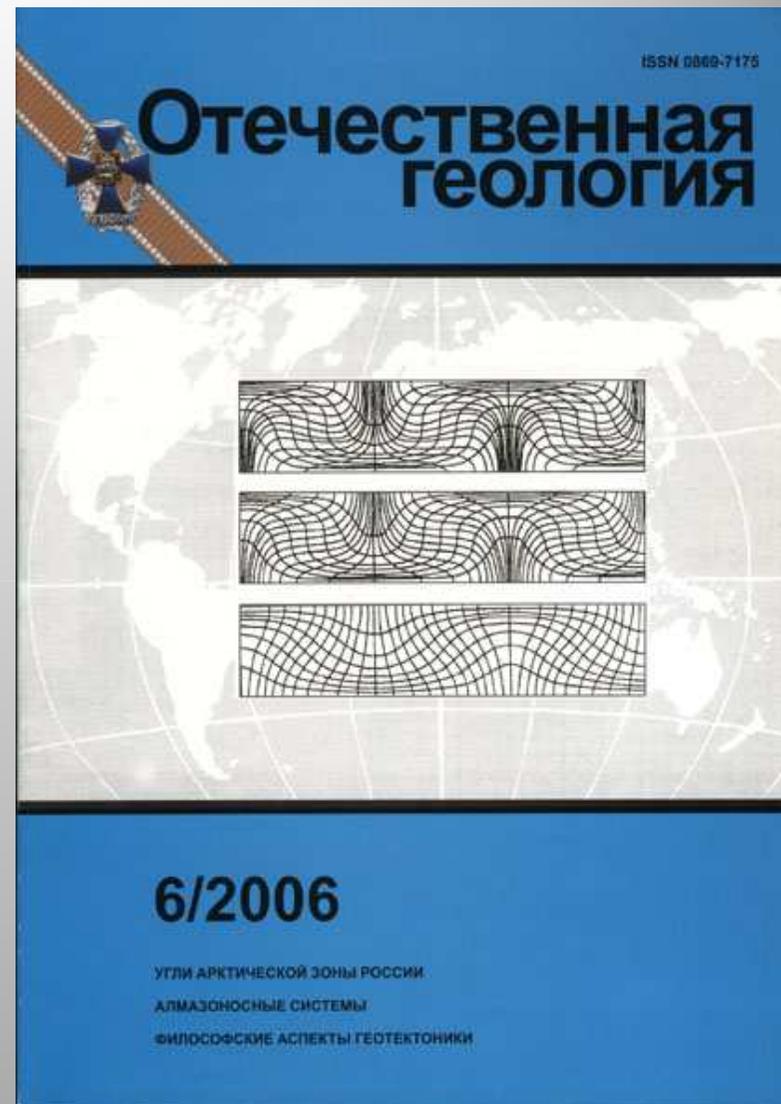
формируются складки  
в результате  
горизонтального укорочения слоистой  
толщи (*деформация*);

одновременно  
этот слоистый массив  
движется как целое вверх  
и подвергается денудации  
(*поступательное перемещение*);

одновременно  
он поворачивается,  
и складки получают наклон,  
т.е. вергенцию  
(*вращение*).



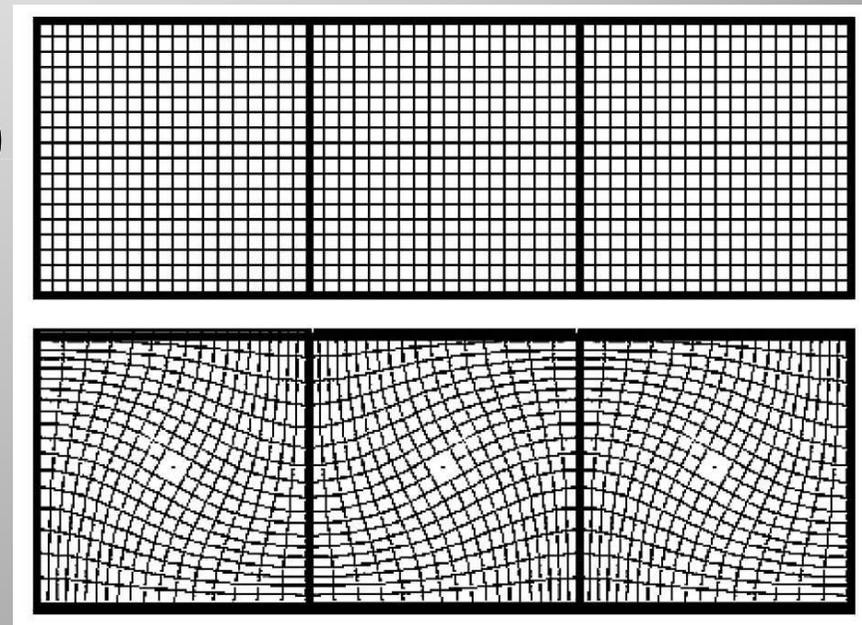
Приведенный пример  
основан на  
простейшей математической  
модели конвекции,  
опубликованной автором  
еще в 1976 году,  
которая фигурирует далее  
и не потеряла  
своей актуальности и ныне: недавно  
она изображена  
на обложке  
одного из номеров журнала.



# Роль компоненты **вращения** состоит в *минимизации* энергии.

При валиковой конвекции в центре ячейки имеет место как бы «жесткое» (без деформации) вращение элементарных объемов даже в случае жидкой среды.

Нечто подобное можно наблюдать при вращении частиц чая в центре чашки.

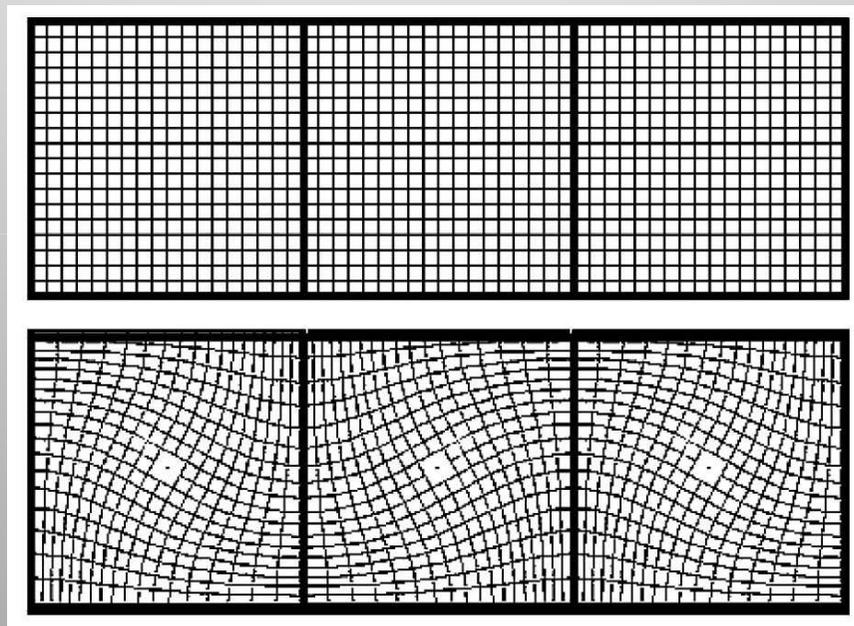


*Турбулентные* завихрения  
в потоке жидкости  
представляют собой «вращательную»  
энергосберегающую добавку  
к сдвиговому  
*ламинарному* течению.

Это означает,  
что природа «изобрела»  
энергосберегающее «колесо» задолго  
до появления человека.

В отличие от  
*поступательного перемещения*  
и *деформации*,  
роль компоненты вращения  
в тектоническом течении  
изучена явно недостаточно.

Интенсивно прогрессирует компьютерное моделирование в геодинамике. Оно позволяет наглядно представить тектоническое течение как сочетание поступательного перемещения, вращения и деформации элементарных объемов геологической сплошной среды в координатах Эйлера.



Простейшая компьютерная модель конвекции

Такая трактовка термина  
«тектоническое течение»  
позволяет выделить  
пять видов *организации*  
тектонического течения

Все эти виды обусловлены  
пятью *фундаментальными* свойствами  
геологической среды

# Раздел I

## Компенсационная организация тектонического течения и универсальность конвективного процесса

Первое и главное свойство  
геологической среды  
- непрерывность



Компенсационная организация  
тектонического течения  
– это фактически течение конвективного типа.

Конвективная геодинамика содержит два аспекта,  
которые можно условно назвать «внешним» и «внутренним».

**«Внешний» аспект –**  
это оценка эффективности конвективной *теплопередачи*  
и описание тех *движений* сплошной среды,  
которые эту теплопередачу обеспечивают.

Начало положено А. Бенаром и Дж. У Рэлеем.

Три фундаментальных уравнения, описывающих конвективный процесс  
– уравнение Навье-Стокса, уравнение передачи тепла  
и уравнение неразрывности (для геологов лучше «непрерывности»).

Критические числа Рэлея, определяющие форму конвекции –  
валиковая, купольная, ламинарная, турбулентная.  
И многое другое.

**Солидная теоретическая база.**

## «Внутренний» аспект

– это оценка тех *деформаций* среды, которые происходят при конвекции.

Энергия, затраченная на деформацию  
и затем перешедшая в тепло,  
на много порядков меньше энергии,  
затраченной на саму конвекцию  
[Ландау, Лившиц, 1954].

Поэтому физиков это не интересует,  
и этот аспект разработан чрезвычайно слабо.

Каркасом всех законов и закономерностей, открытых в естественных науках, являются различные постоянные величины (константы) и «законы сохранения».

Число  $\pi$ , гравитационная постоянная, сохранение массы и энергии –некоторые примеры.

Среди фундаментальных уравнений конвективной гидродинамики:  
уравнение движения Навье-Стокса,  
общее уравнение переноса тепла  
и **уравнение непрерывности**

Это последнее уравнение, выражающее закон сохранения массы, также относится к категории констант.

Компенсационная организация **течения**  
математически выражается  
в **уравнении непрерывности**  
(для простейшего случая двумерного течения):

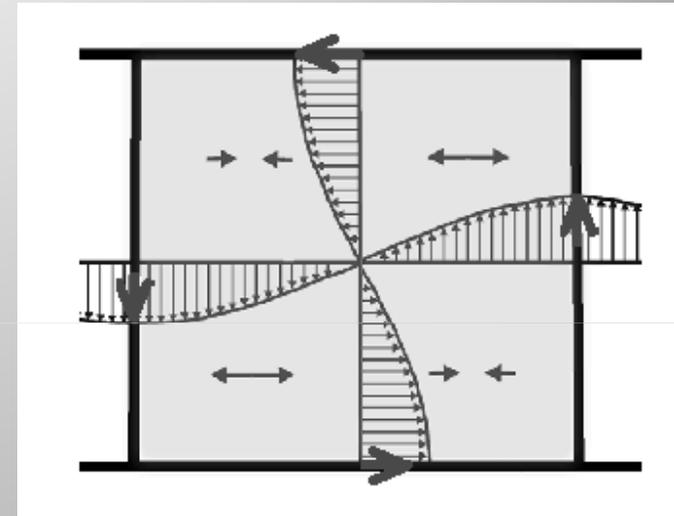
$$\operatorname{div} \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \varepsilon'_{xx} + \varepsilon'_{zz} = 0$$

Решение этого уравнения для простейшего случая  
с учетом периодичности поднятий и опусканий:

$$v_x = -A \cos(\pi/h)x \cdot \sin(\pi/h)z;$$

$$v_z = A \sin(\pi/h)x \cdot \cos(\pi/h)z.$$

Это — поле скоростей **поступательной**  
компоненты  
тектонического **течения**  
при его компенсационной организации  
в простейшем случае квадратной в разрезе ячейки  
( $h$  — мощность конвектирующей геосферы).



Для определения поля скоростей **деформационной** компоненты тектонического **течения** воспользуемся известным уравнением механики сплошной среды:

$$\varepsilon'_{xx}(x, z) = -\varepsilon'_{zz}(x, z) = \partial v_x / \partial x = -\partial v_z / \partial z.$$

Применив его к нашему полю скоростей **поступательной** компоненты тектонического **течения**:

$$\begin{aligned} v_x &= -A \cos(\pi/h)x \cdot \sin(\pi/h)z; \\ v_z &= A \sin(\pi/h)x \cdot \cos(\pi/h)z, \end{aligned}$$

получим:

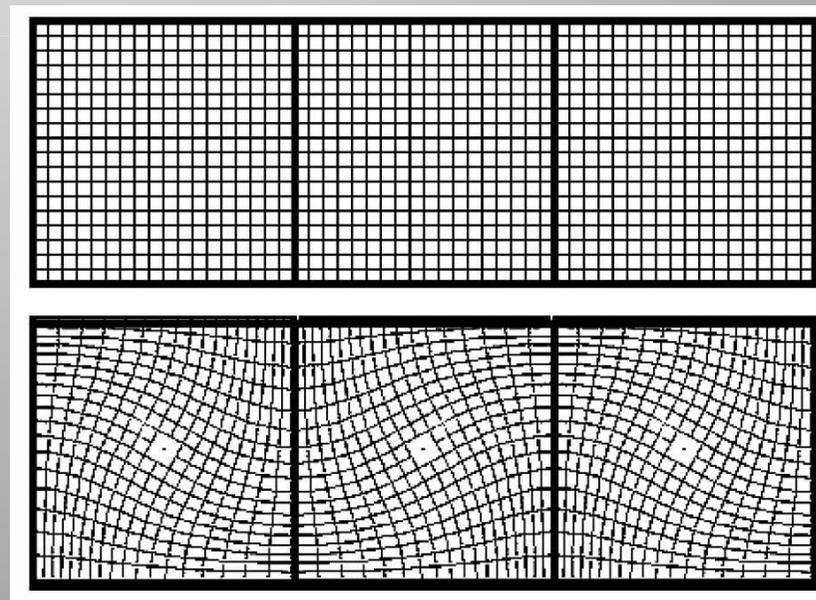
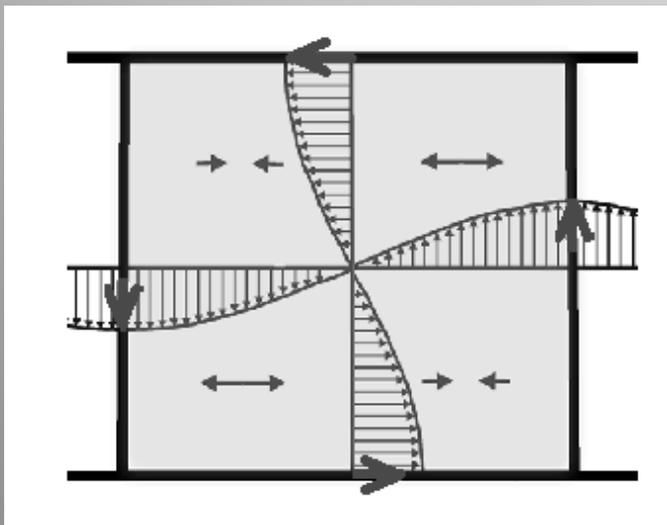
$$\varepsilon'_{xx}(x, z) = -\varepsilon'_{zz}(x, z) = A(\pi/h) \sin(\pi/h)x \cdot \sin(\pi/h)z.$$

Это — поле скоростей **деформационной** компоненты (удлинения-укорочения вдоль соответствующих осей) тектонического **течения** при его компенсационной организации в простейшем случае.

## Компенсационная взаимозависимость трех компонент тектонического течения

Простота и периодичность тригонометрических функций, описывающих конвективное течение, дает возможность, исследуя их на экстремальные значения, выяснить, что максимум **поступательного** перемещения совпадает с нулевым минимумом **деформации**, и наоборот, а максимум **вращения** совпадает с нулевыми минимумами двух других компонент.

$$v_x = -A \cos(\pi/h)x \cdot \sin(\pi/h)z;$$
$$v_z = A \sin(\pi/h)x \cdot \cos(\pi/h)z,$$



Простейшая математическая модель валиковой конвекции

Принцип:

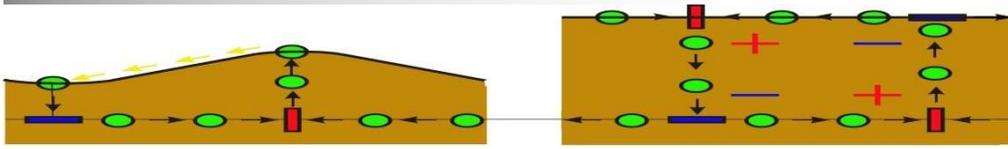
все другие виды организации  
тектонического течения  
имеют своим базисом  
предыдущие виды

# Раздел II

## Многоярусная организация тектонического течения

Второе свойство  
геологической среды  
- расслоенность на геосферы и толщи

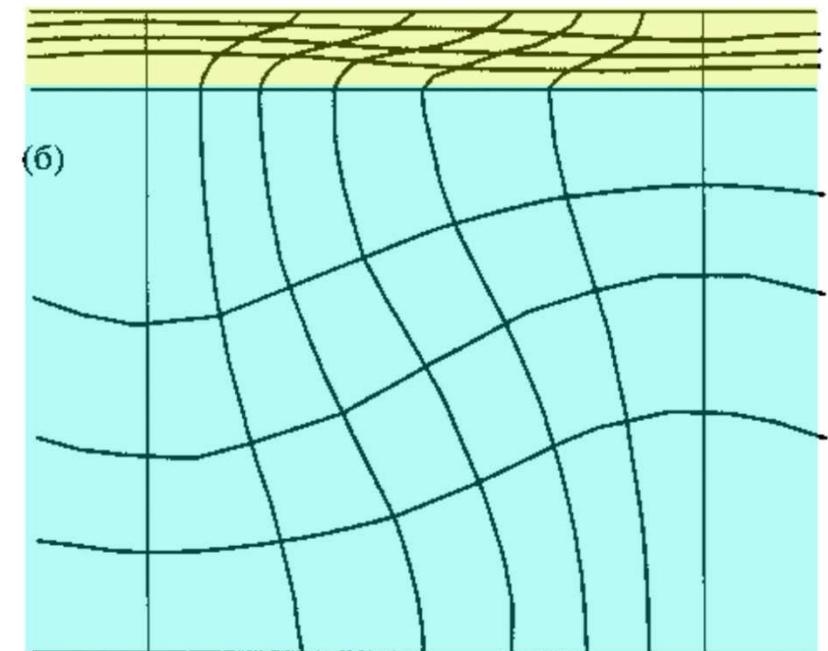
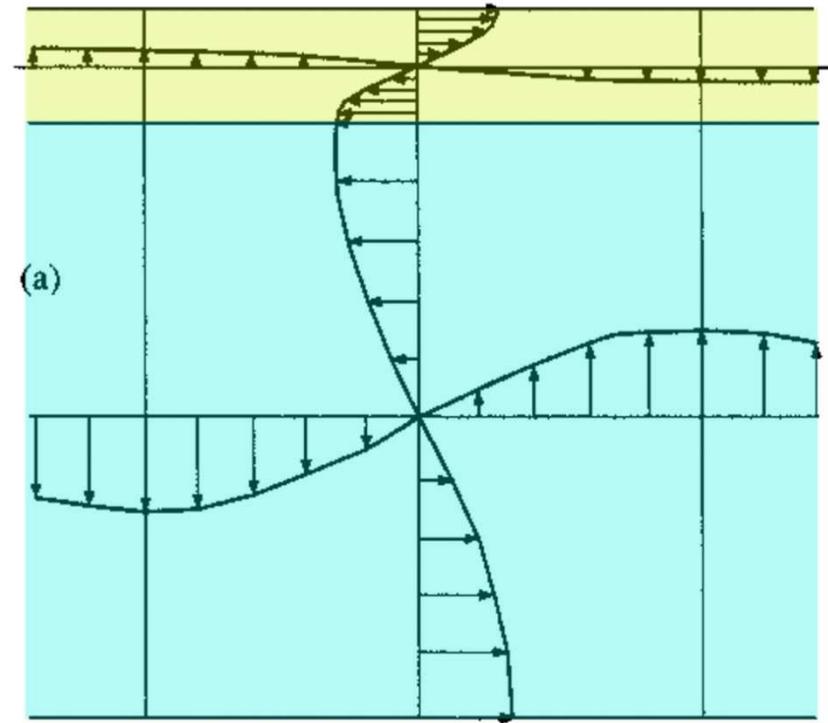
Базис - компенсационная организация  
тектонического течения



Поле скоростей  
двухъярусной конвекции,  
в верхнем ярусе вынужденной

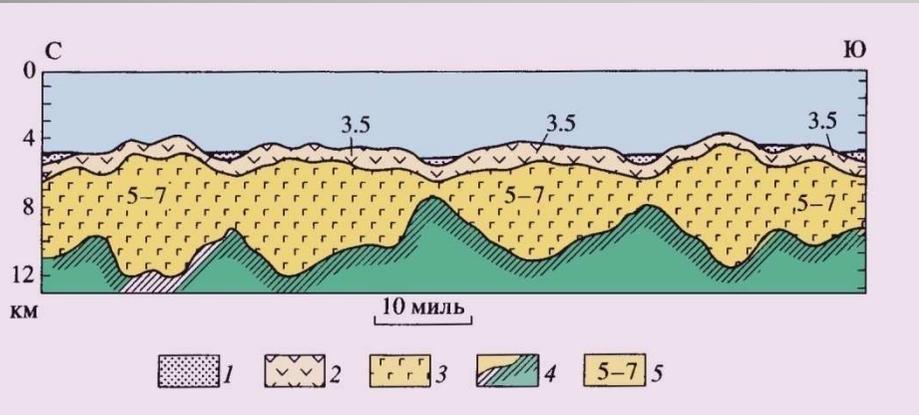
Формирование корней поднятий  
и антикорней впадин  
при двухъярусной конвекции

Изостатическое уравновешивание поднятия  
его «корнем»,  
а впадины – «антикорнем».

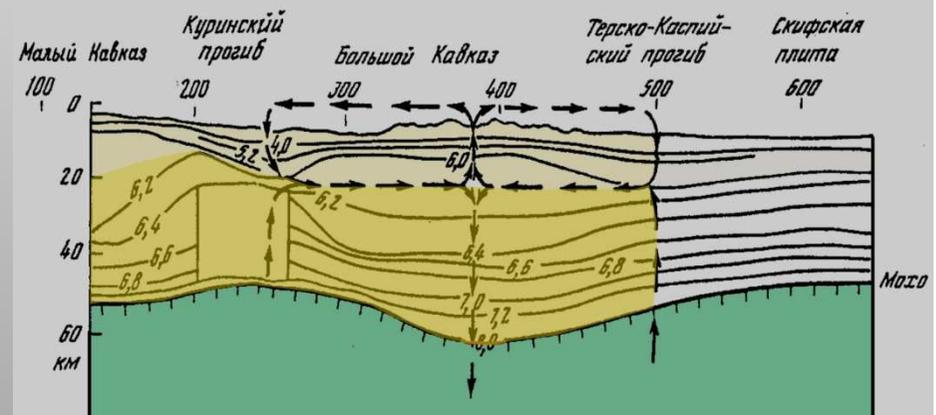


Повышенная у поперечных поднятий  
и пониженная у поперечных впадин  
мощность коры в СОХ.

Это характерно  
и для продольных поднятий и впадин  
в орогенных поясах.



По Ю.Н. Разницину [2004]



По Н.И. Павленковой [1982]

Наиболее вероятной причиной является  
**валиковая** конвекция  
в геосфере астеносфера+литосфера.

Наличие коры, более легкой, чем подстилающая мантия, вынуждает  
валиковую конвекцию,  
для соблюдения изостатического равновесия,  
быть **двухъярусной**,  
в результате чего  
над «антикорнями» формируются впадины,  
а над «корнями» — поднятия.

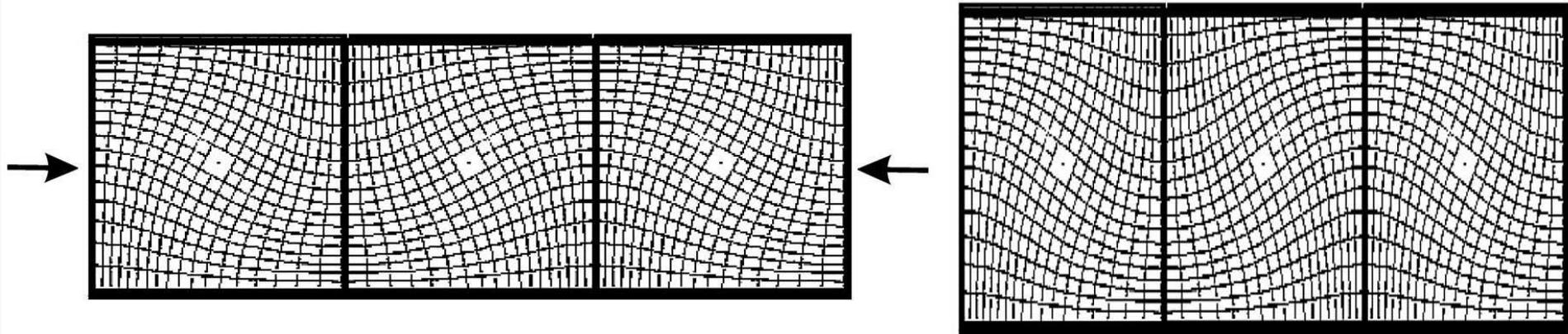
# Раздел III

## Иерархическая организация тектонического течения

Третье свойство  
геологической среды  
- иерархия геосфер и толщ

Базис - компенсационная и многоярусная  
организация тектонического течения

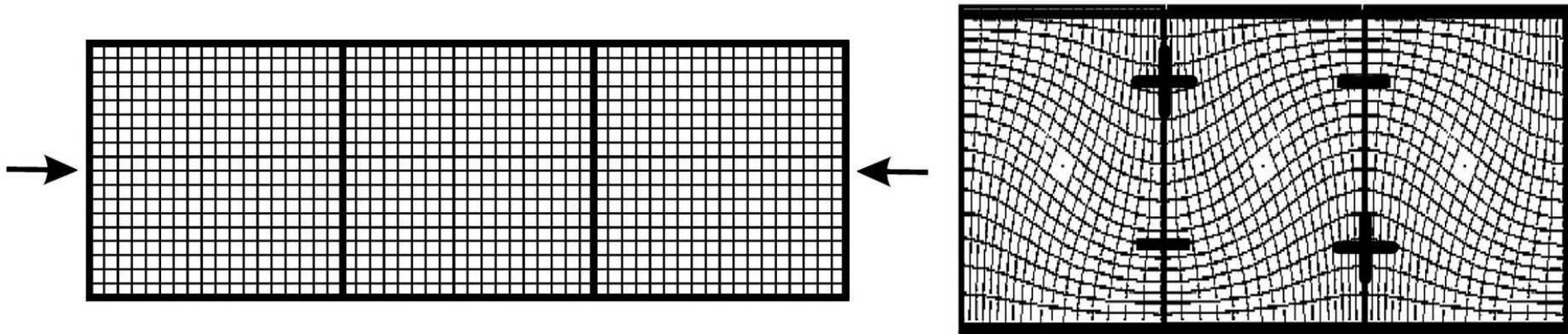
# Однородная деформация 1-го ранга



Если валиковая конвекция в горизонтальном слое происходит при дополнительном боковом сжатии, то три крупные квадратные конвективные ячейки (своеобразная крупная «квадратная сетка»), деформируются *одинаково*.

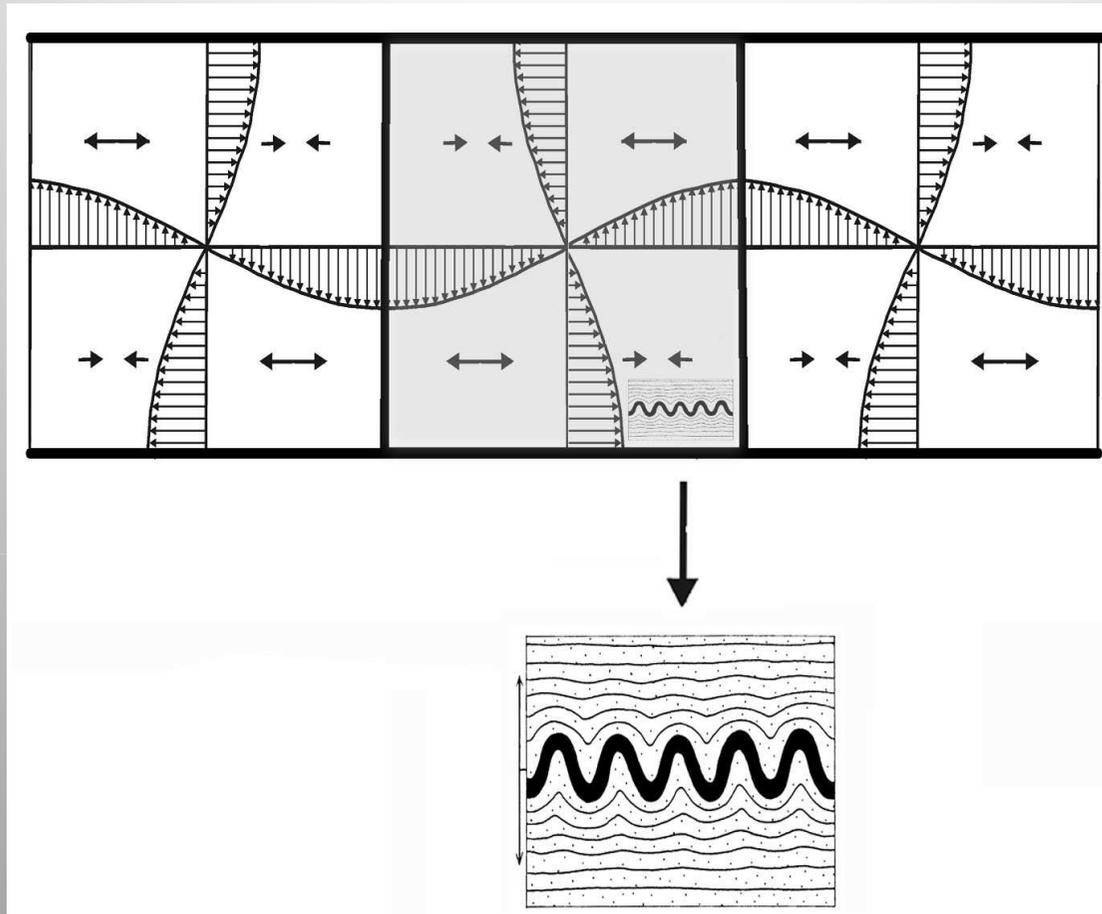
Поэтому деформацию горизонтального укорочения слоя можно считать однородной.

# Неоднородная компенсационная деформация 1-го ранга

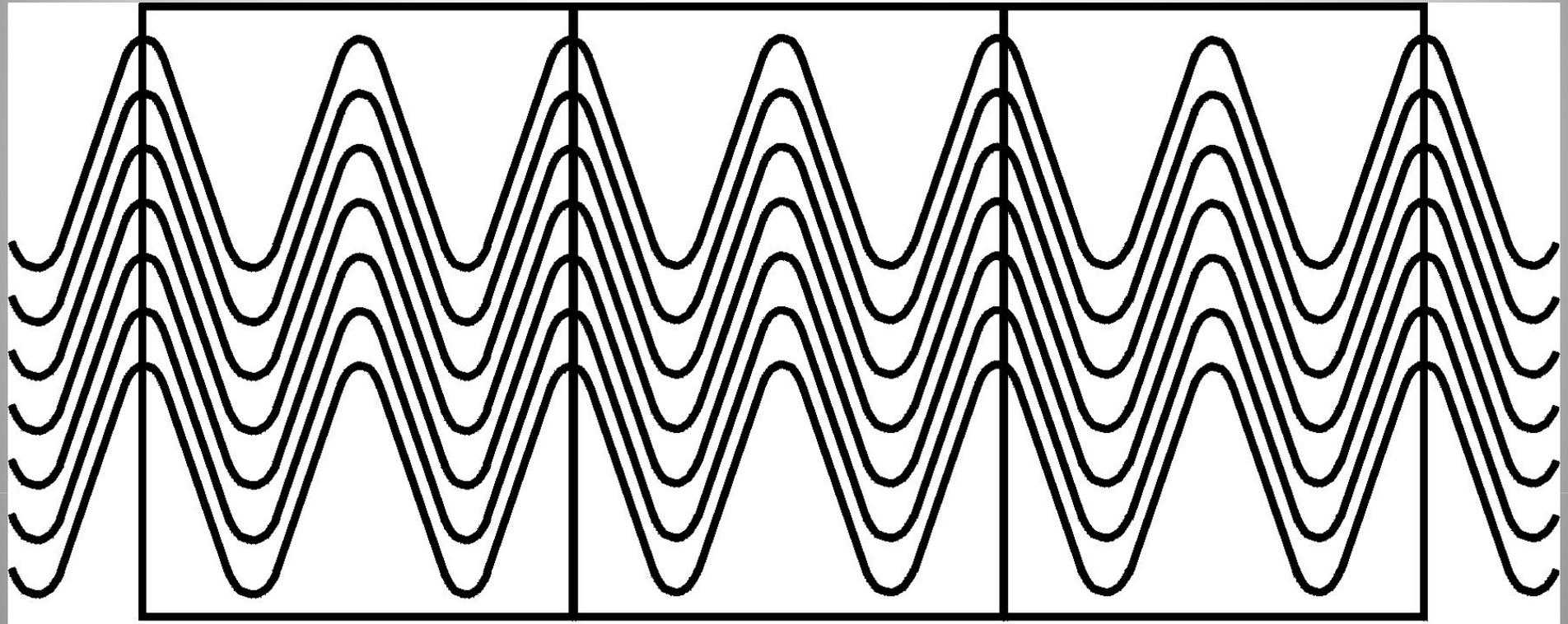


Внутри каждой ячейки деформация резко неоднородна:  
в нижней части восходящего конвективного потока  
и в верхней части нисходящего потока  
господствует обстановка горизонтального сжатия (+),  
а в двух остальных частях ячейки (в шахматном порядке)  
– обстановка горизонтального растяжения (-).  
Эти деформации противоположного знака  
взаимно *компенсируют* друг друга,  
как по горизонтали, так и по вертикали,  
обеспечивая сохранение прямоугольной формы периметра ячейки.

## Однородная деформация 2-го ранга



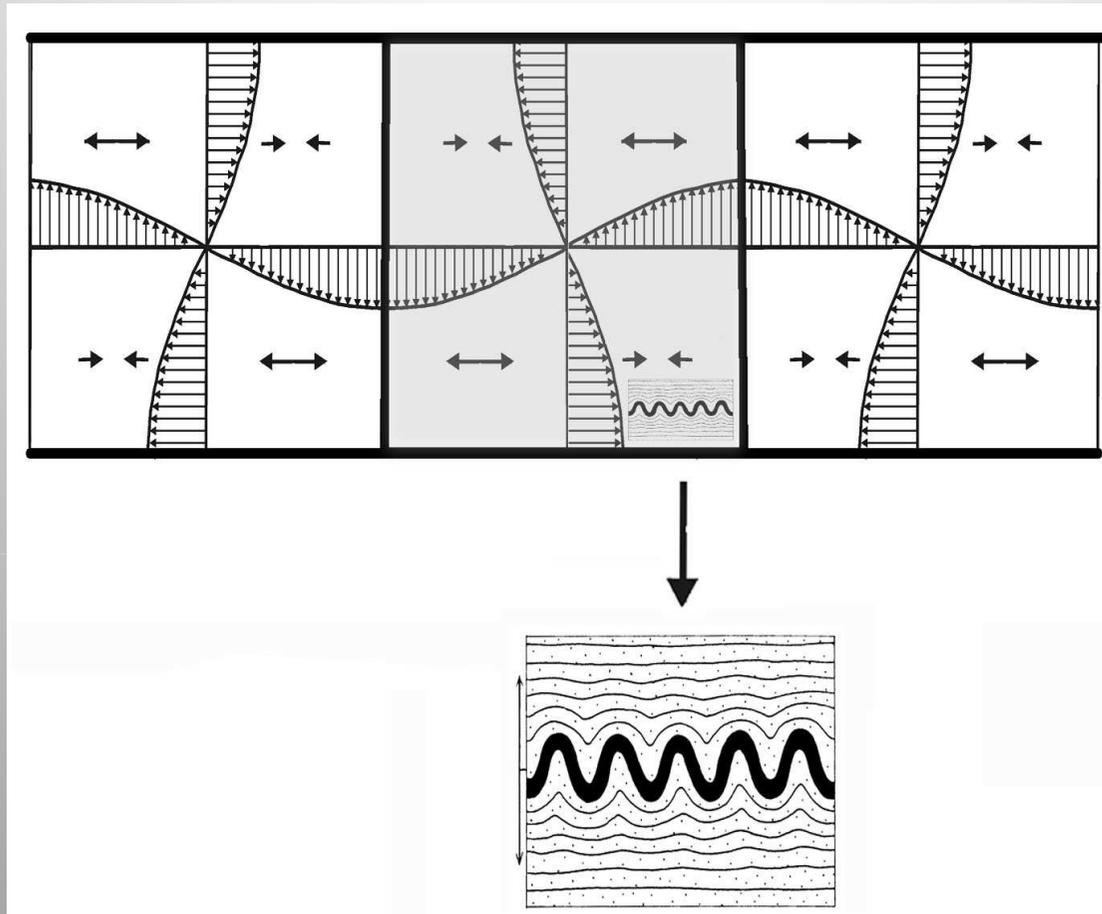
Если в ячейках область горизонтального сжатия представлена слоистой средой, то в результате деформации возникает складчатость.



Эту деформацию можно считать однородной постольку, поскольку примерно одинакова величина горизонтального укорочения в пределах всех возникших складок.

Таким образом,  
«иерархическое чередование»  
однородных  
и компенсационно-неоднородных  
деформаций  
является признаком  
**иерархической организации**  
тектонического течения

# Триада система-ячейка-домен



Домен  $n$ -го ранга  
одновременно является системой  
 $(n+1)$ -го ранга

В Земле существует **иерархия** геосфер и толщ.

Мантия (с корой) как часть всей Земли в целом.

Верхняя мантия (с корой) как часть мантии (с корой).

Геосфера астеносфера+литосфера как часть верхней мантии (с корой).

Осадочный чехол как часть земной коры.

Отдельные осадочные толщи как части чехла.

Отдельные пачки как части толщи.

Отдельные слои как части пачки.

**В качестве следствия –  
иерархическая организация тектонического течения.**

# Геодинамика иерархически соподчиненных геосфер

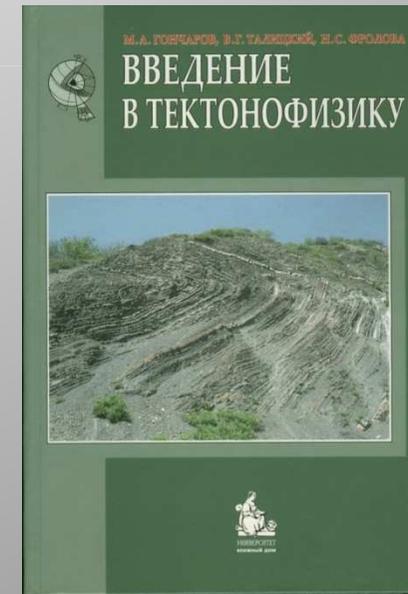
Геодинамика иерархически соподчиненных геосфер

Ранг ГС	Геосфера, $h$ (км)	Ареал	Процессы, структуры	Ранг ГЦ, $t$ , Ма	$h/t$ , см/год
ГС-0	Вся Земля 6370	Повсеместно	Меридиональная компонента дрейфа континентов, связанная в новейшее время с поднятием Антарктиды и опусканием Арктики	Цикл меридионального дрейфа, 1600	0,18
ГС-1	Вся мантия 2900	Повсеместно	Созидание и распад суперконтинентов	Циклы Вилсона, 800	0,36
ГС-2	Верхняя мантия 660÷670	Под океанами	Субдукция, коллизия, спрединг	Циклы Бертрана, 175	0,38
ГС-3	Астеносфера + литосфера	В зонах повышенного теплопотока (субдукции, коллизии, спрединга)	Двухъярусная конвекция:		
	ГС-3а 300÷400		В зонах субдукции и коллизии – мантийные диапиры, впадины над ними, дугообразные желоба и зоны Беньофа или центробежно-вергентные складчато-покровные сооружения на периферии	?	?
	ГС-3б 100÷220		В зонах коллизии – системы линейных продольных поднятий с “корнями” и впадин с “антикорнями”	Циклы Штилле, 30	0,53
	ГС-3в 50÷100		В зонах спрединга – системы линейных поперечных поднятий с “корнями” и впадин с “антикорнями”	?	?
ГС-4	Осадочный чехол 5÷15	В зонах коллизии	Термофлюидная конвекция. Региональный метаморфизм. Антиклинории и синклинории, складки	Фазы складчатости, 1÷3	~ 0,50

**Примечание.** ГС – геодинамические системы. ГЦ – геодинамические циклы; циклы Вилсона, Бертрана и Штилле – по В.Е. Хаину[2000].  $h$  – мощность геосферы;  $t$  – длительность цикла; Ма – млн. лет.

Господствующая ныне парадигма – концепция тектоники литосферных плит – занимает в приведенной схеме свое строго обозначенное место – это геодинамическая система 2-го ранга (ГС-2) [Goncharov, 2011].

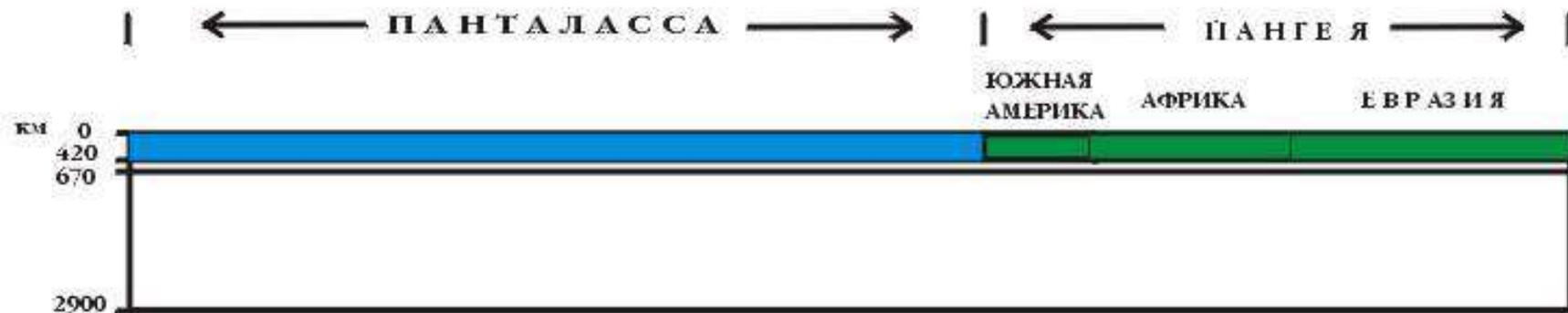
А трактуемая многими авторами, в качестве конкурента этой концепции, «тектоника плюмов» также фигурирует в нашей схеме как геодинамическая система 1-го ранга (ГС-1).



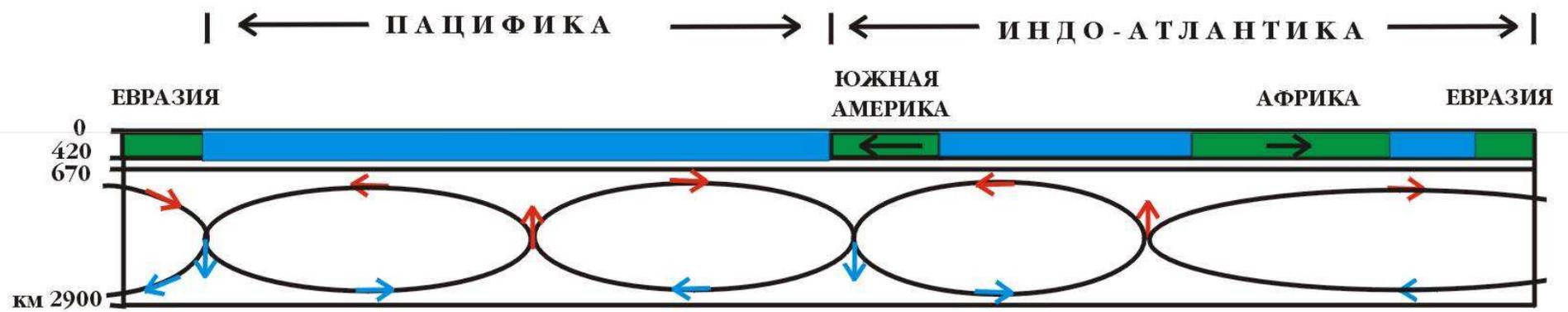
Главы 9-11

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТРЕХ РАНГОВ

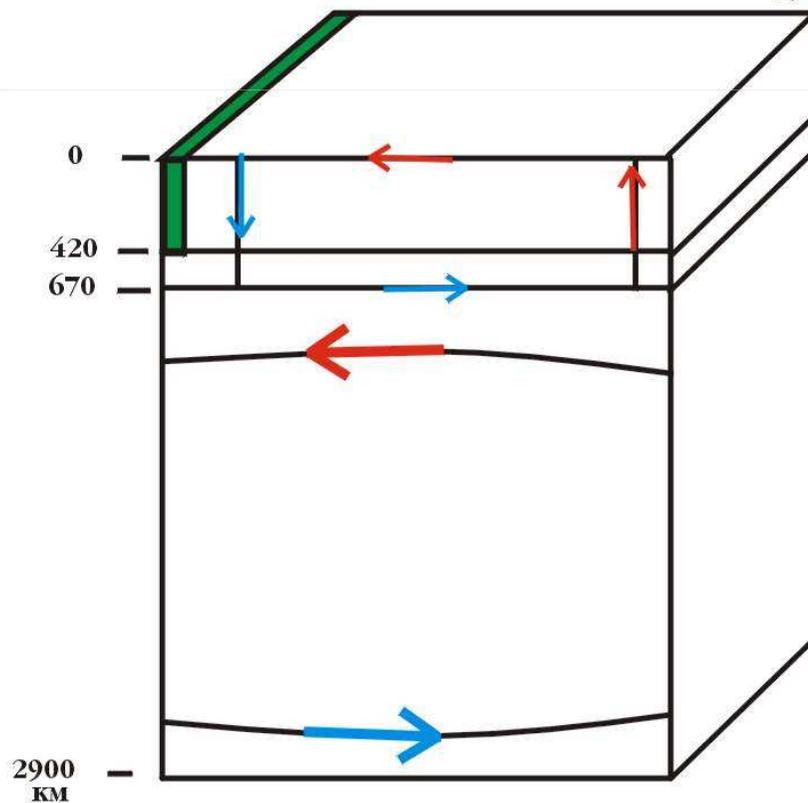
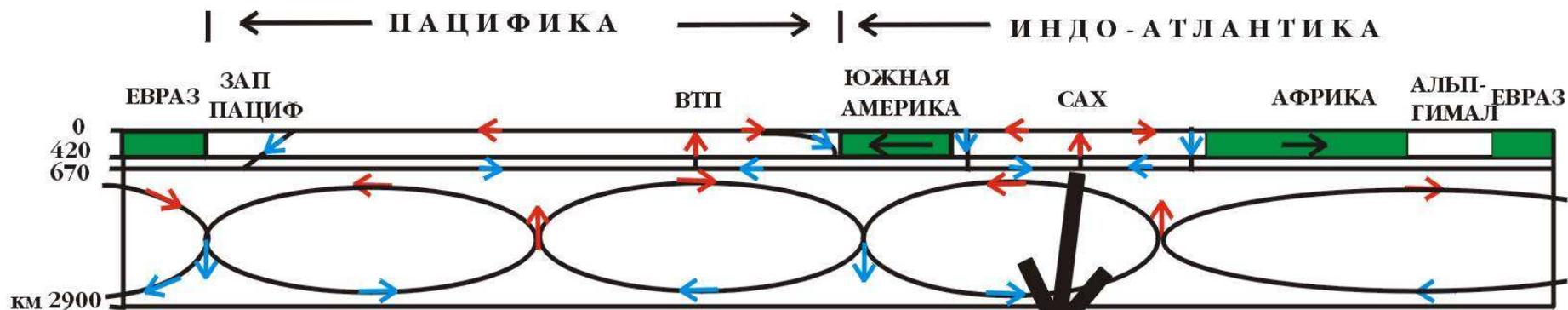
## ПЕРЕД РАСПАДОМ ПАНГЕИ



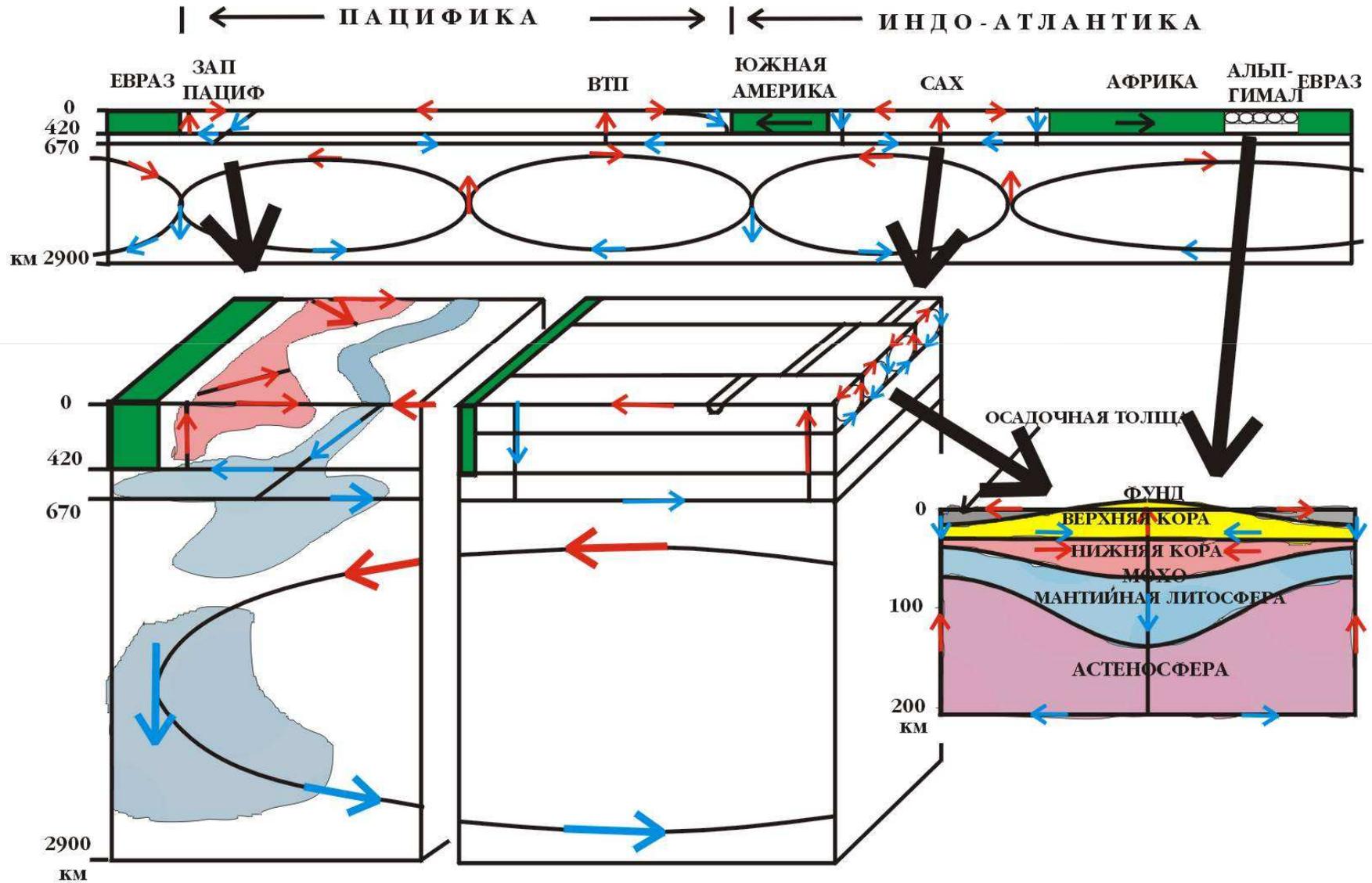
# КОНВЕКЦИЯ 1-ГО РАНГА ВО ВСЕЙ МАНТИИ



# ВКЛЮЧЕНИЕ КОНВЕКЦИИ 2-ГО РАНГА В ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ПОД ОКЕАНАМИ



# ВКЛЮЧЕНИЕ КОНВЕКЦИИ 3-ГО РАНГА В АСТЕНО-ЛИТОСФЕРЕ В ЗОНАХ СПРЕДИНГА, СУБДУКЦИИ И КОЛЛИЗИИ



# Раздел IV

## Разрывно-пластическая организация тектонического течения

Четвертое свойство  
геологической среды  
– разрывно-пластическая реакция  
на нагружение

Базис – компенсационная и иерархическая  
организация тектонического течения

Пластическая деформация тела имеет два аспекта:  
*факт* деформации и *механизм* деформации.

Факт деформации – это изменение формы тела, т. е. изменение конфигурации его *внешних* границ. При этом, по определению, сплошность тела не нарушается.

Механизм деформации – это совокупность всех перемещений вещества *внутри* тела, обеспечивающая изменение его формы. Чем «грубее» эти перемещения, т. е. чем больше размер перемещаемых частей тела, тем меньше оснований говорить о сохранении сплошности тела.

Однако все это не означает,  
что следует отказаться от представления  
о сохранении сплошности тела  
при его пластической деформации.

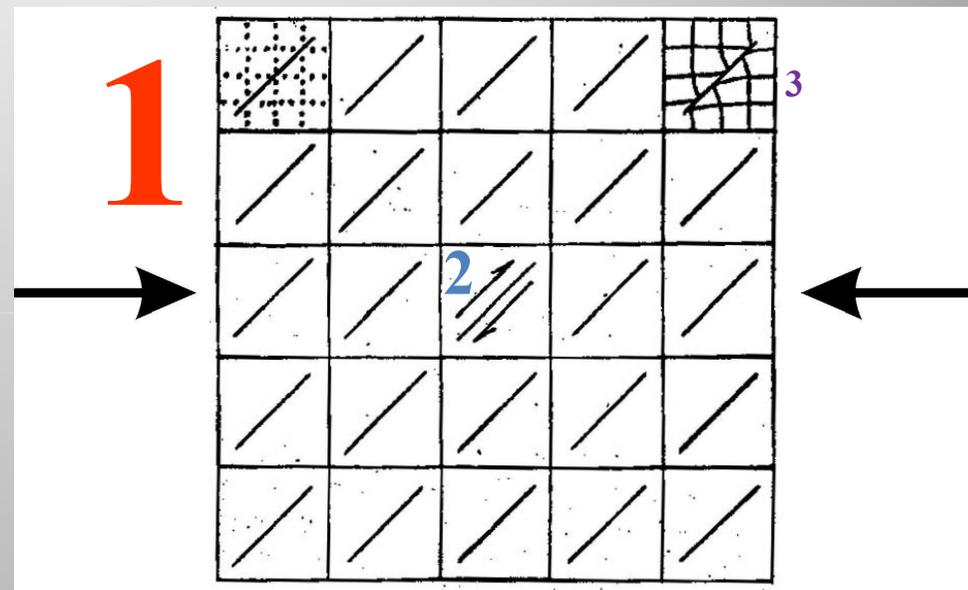
Нельзя говорить о деформации *вообще*:  
всегда следует сопоставлять два ее параметра – размер  
самого деформируемого тела ( $L$ )  
и размер ( $l$ ) тех поверхностей,  
вдоль которых осуществляется  
взаимное перемещение отдельных частей тела.

Возможны три варианта  
соотношения этих параметров.

1.  $L \gg l$ . Разрывные нарушения выступают в качестве *механизма* пластической деформации. Таким нарушением сплошности тела (крупного квадрата) можно пренебречь.

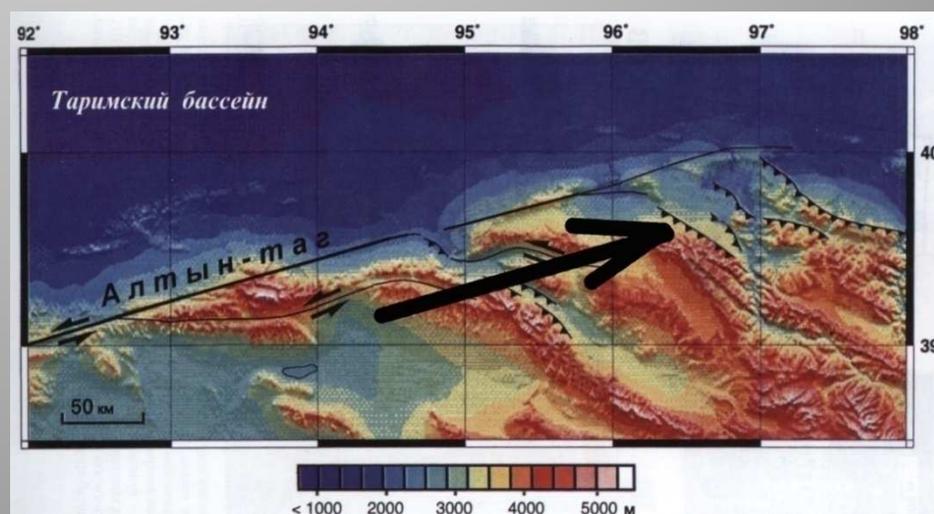
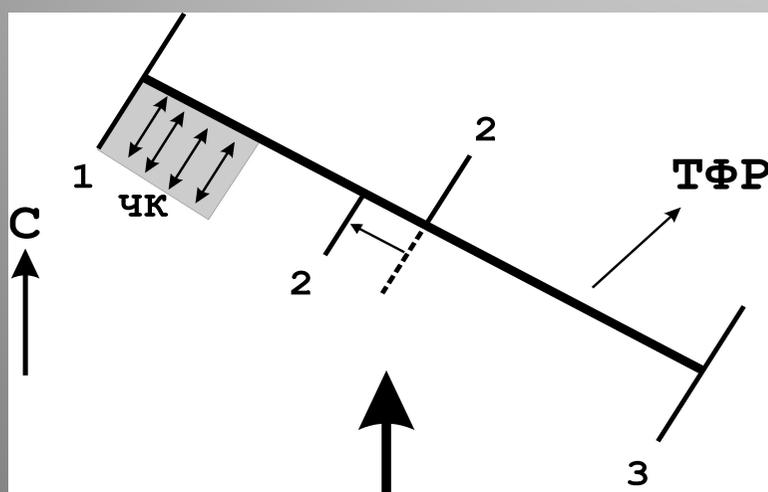
2.  $L \sim l$ . Разрывное нарушение сплошности тела (любого из средних квадратов) выступает в качестве *альтернативы* пластической деформации.

3.  $L \ll l$ . Разрывное нарушение выступает в качестве *координатора* пластической деформации более мелких объемов (мелких квадратов) на его окончаниях. Такая деформация *компенсирует* убывание амплитуды разрывного нарушения вплоть до нуля.



# Возникновение системы крупных хребтов-складок на окончаниях крупных сдвигов

Об этих явлениях много писал А.В. Лукьянов  
в связи с его принципом  
«совместимости деформаций»  
при тектоническом течении.



Для такого «трехвариантного» сочетания пластической и разрывной деформации также характерно «иерархическое чередование»:

- 1) однородная деформация в телах  $L \gg l$ ,
- 2) резко неоднородная – в более мелких составляющих их телах  $L \sim l$ ,
- 3) снова относительно однородная в еще более мелких телах  $L \ll l$ .

При этом *максимум* деформации имеет место в зоне динамического влияния разлома, разрыва или трещины при отсутствии деформации в разделяемых ими блоках, с обеспечением *умеренной* деформации более крупного тела, составленного из этих блоков.

Как и в рассмотренном выше случае пластической деформации, отсутствие деформации в блоках *компенсируется* значительной деформацией в межблоковом пространстве.

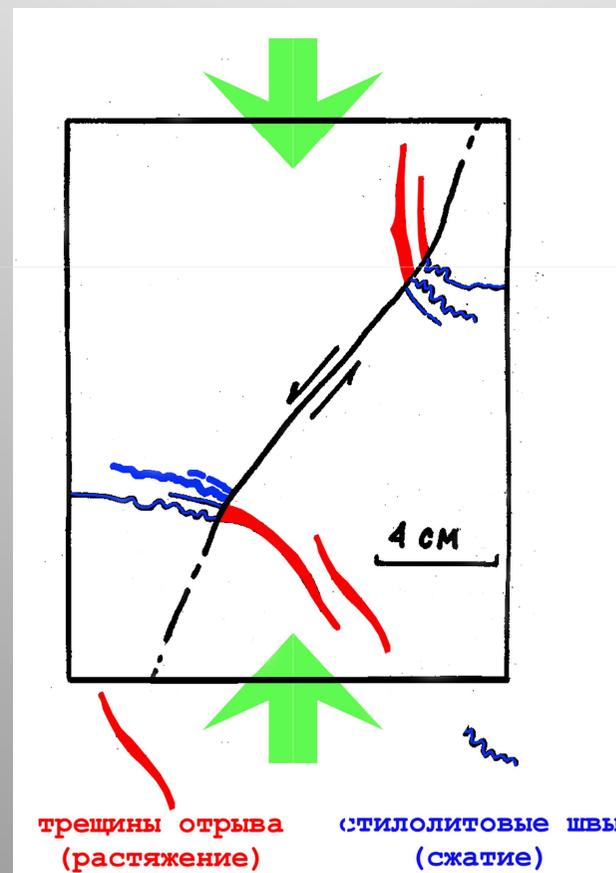
# Раздел V

## Твердо-жидкая организация тектонического течения

Пятое свойство  
геологической среды  
- твердо-жидкий состав

Базис - компенсационная, иерархическая  
и разрывно-пластическая организация  
тектонического течения

# Сочетание компенсационной, иерархической, разрывно-пластической и твердо-жидкой организации тектонического течения



Из книги А. Николя (1992)

Перечисленные пять аспектов организации тектонического течения находятся в тесной взаимосвязи, и выявление этой взаимосвязи является наиболее перспективным направлением дальнейшего развития как тектонофизики, так и геодинамики.

**Соотношение  
структурной геологии  
с геотектоникой,  
а тектонофизики  
с геодинamikой**

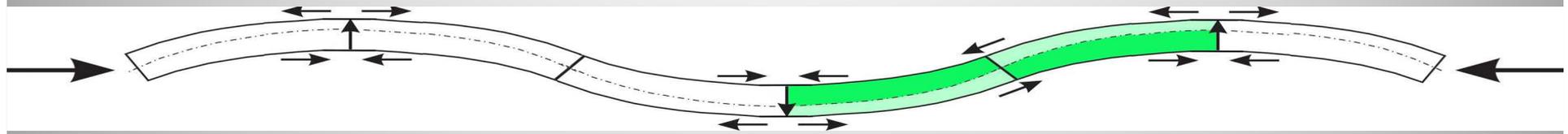
Качественное различие названных дисциплин не только по **масштабу** изучаемых ими объектов, но и по **характеру** процессов, порождающих эти объекты.

**Геодинамика** имеет дело с **конвективными** процессами.

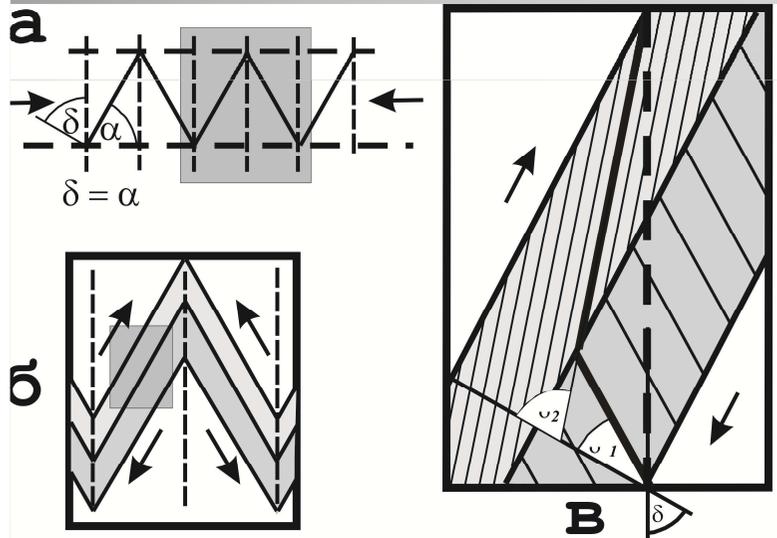
**Тектонофизика** описывает, как правило, «**не-конвективные**» процессы.

Однако и в этих процессах присутствуют элементы **компенсационной** организации.

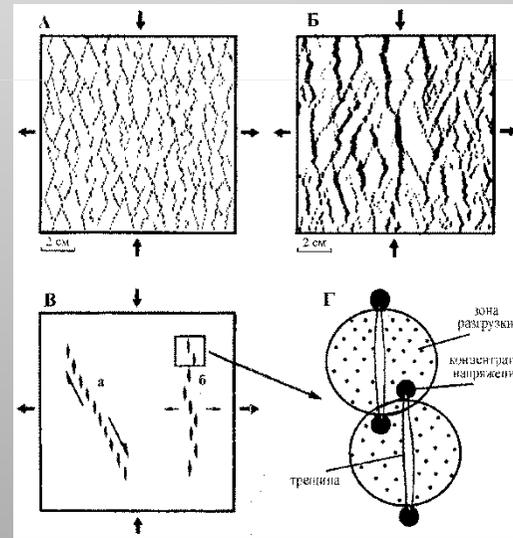
# Простейшие примеры компенсационной организации



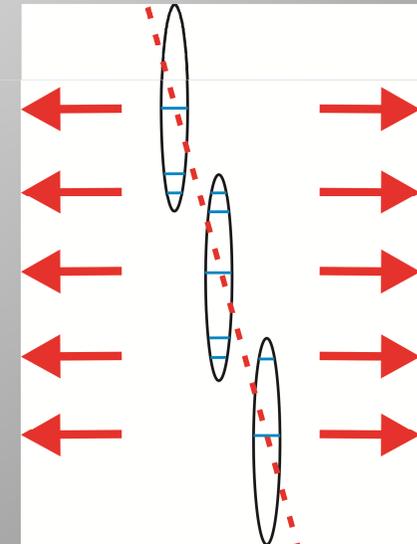
Изгиб единичного слоя в складку.

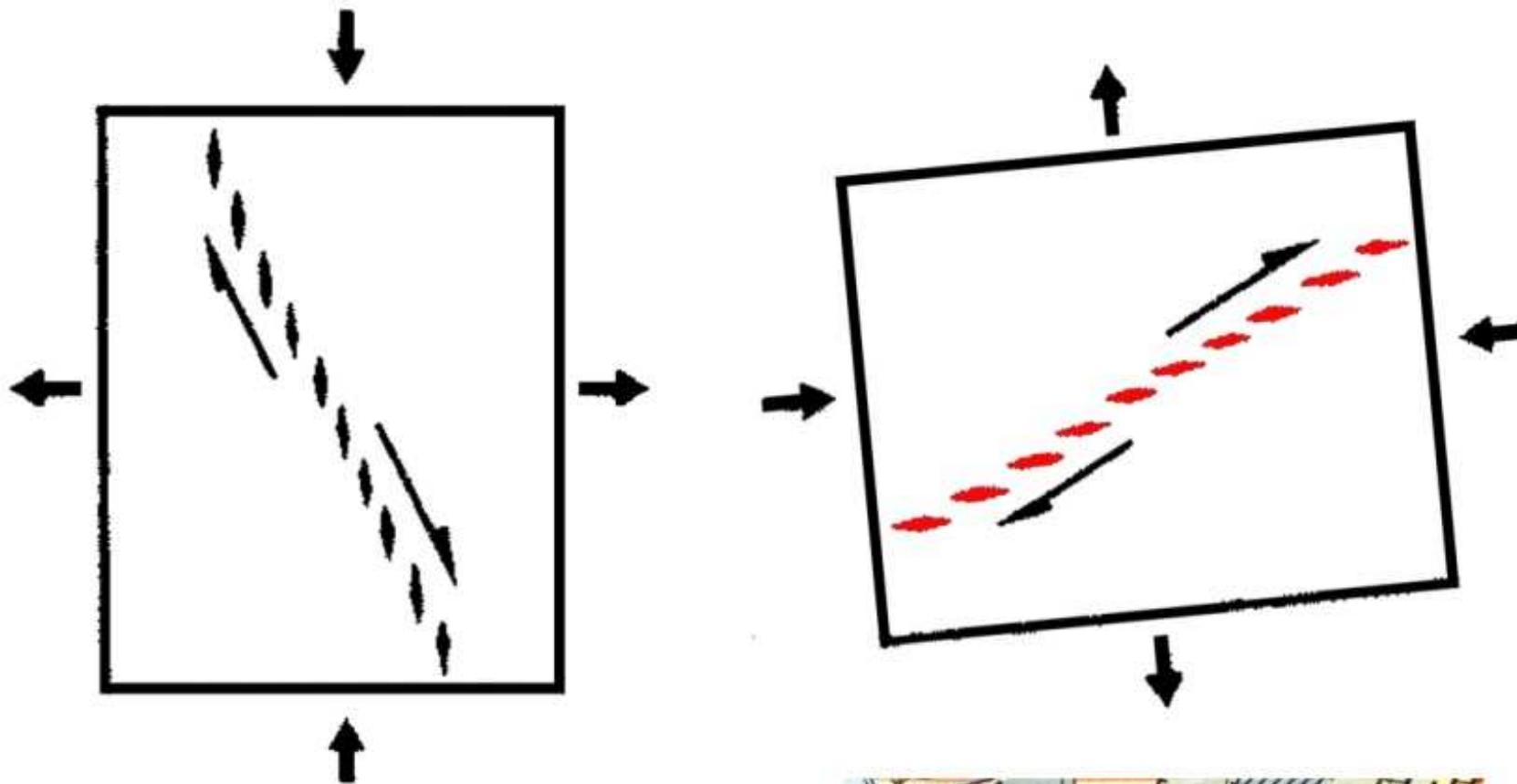


«Хорда» кливажа

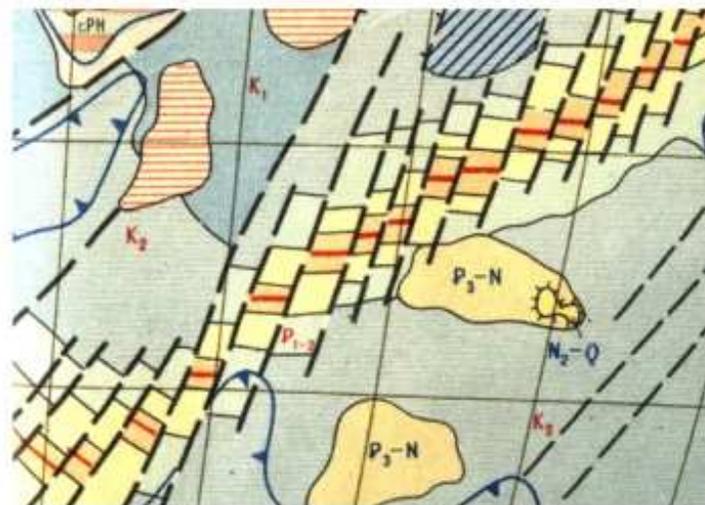


Кулисы трещин отрыва  
[В.Г. Талицкий, 2005]





Кулисы рифтовых долин  
в Юго-западном Индийском хребте  
[*Tectonic map...*, 1982]



# Заключение

Главная проблема тектонофизики 21-го века – это создание собственной теоретической и понятийной базы, которая, не игнорируя и в нужной мере используя законы физики, в то же время была бы основана на свойствах именно геологической среды, с учетом ее иерархической организации и весьма длительного времени протекания процессов в этой среде.

Одним из элементов этой базы может послужить описанные выше *виды организации тектонического течения* и разработка соответствующих принципов их компьютерного моделирования и критериев подобия для их физического моделирования.

**Благодарю за внимание!**