

# Строение и гидродинамика горячих недр Земли

04.03.2012

Единая теория взаимодействия глобального вулканизма,  
литосферных плит и плавающих континентов  
на основе гидродинамики вязкой смеси с плавающими твердыми телами

В.П.Трубицын, Физика Земли, 2000, 2006, 2010, 2012

До 1965 по сейсмическим данным:

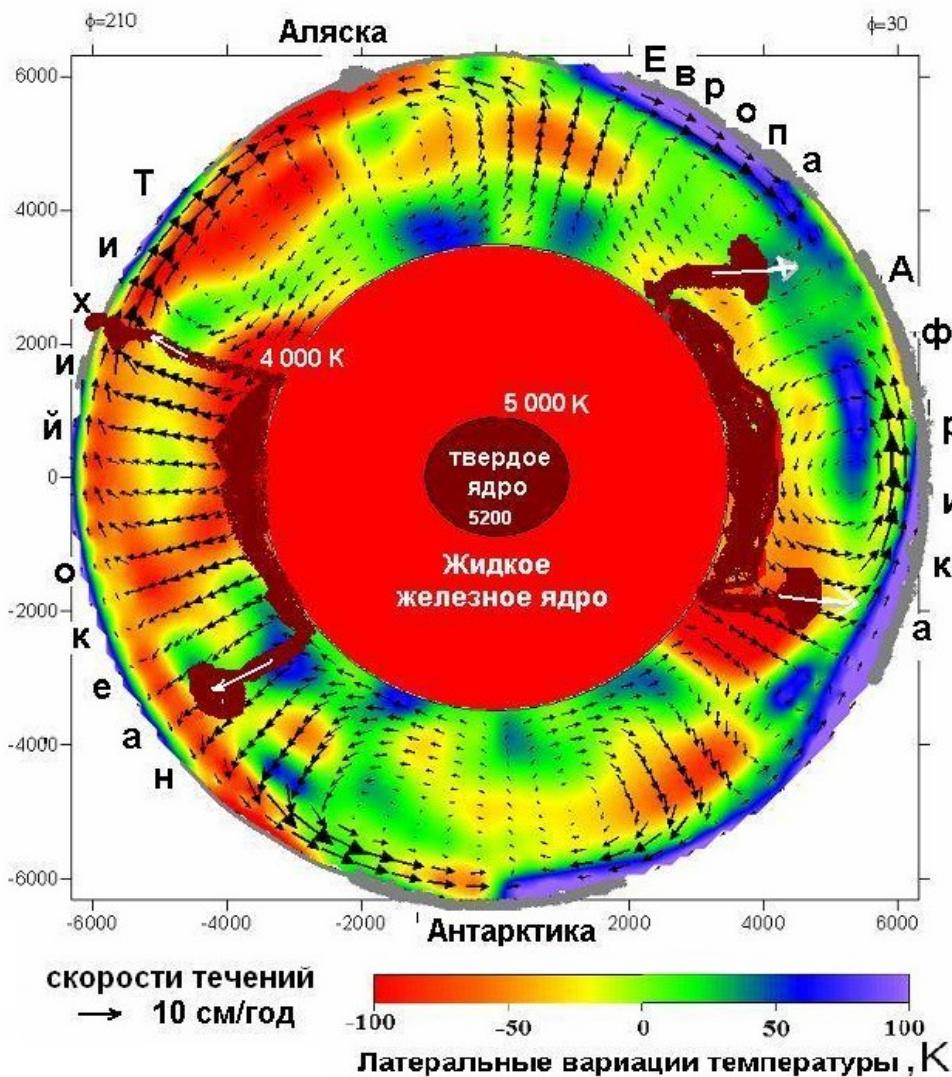
Земля = жидкое железное ядро + твердая каменная упругая мантия.

Реология медленных процессов:

Вязкая горячая мантия  $T > 0.5T_m$ , горячий камень медленно течет без порога прочности.

Холодная жесткая кора  $h < 20\text{ km}$  хрупко разрушается при прочности 100мПа

# Температура и скорости течений в горячей вязкой каменной мантии



Lg вязкости Пас

Мантия 21

Ядро диф=-2, турб=5

Вн. ядро 15

Скорости течений

Мантия 1 нм/с (10 см/год)

Ядро 1мм/с (10 км/год)

6 порядков

Лат. перепады температуры

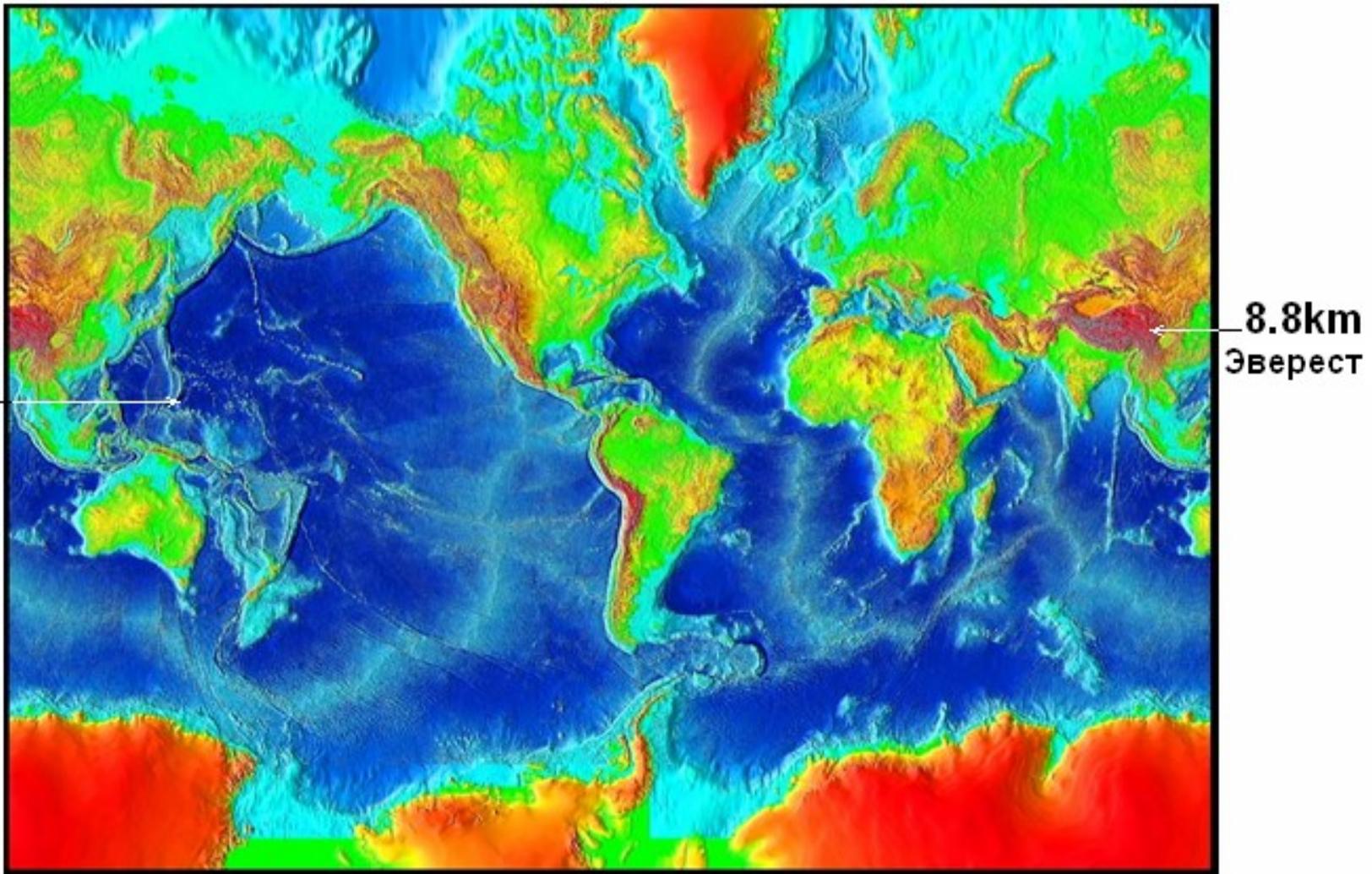
Мантия 500К

Ядро 0.0001К

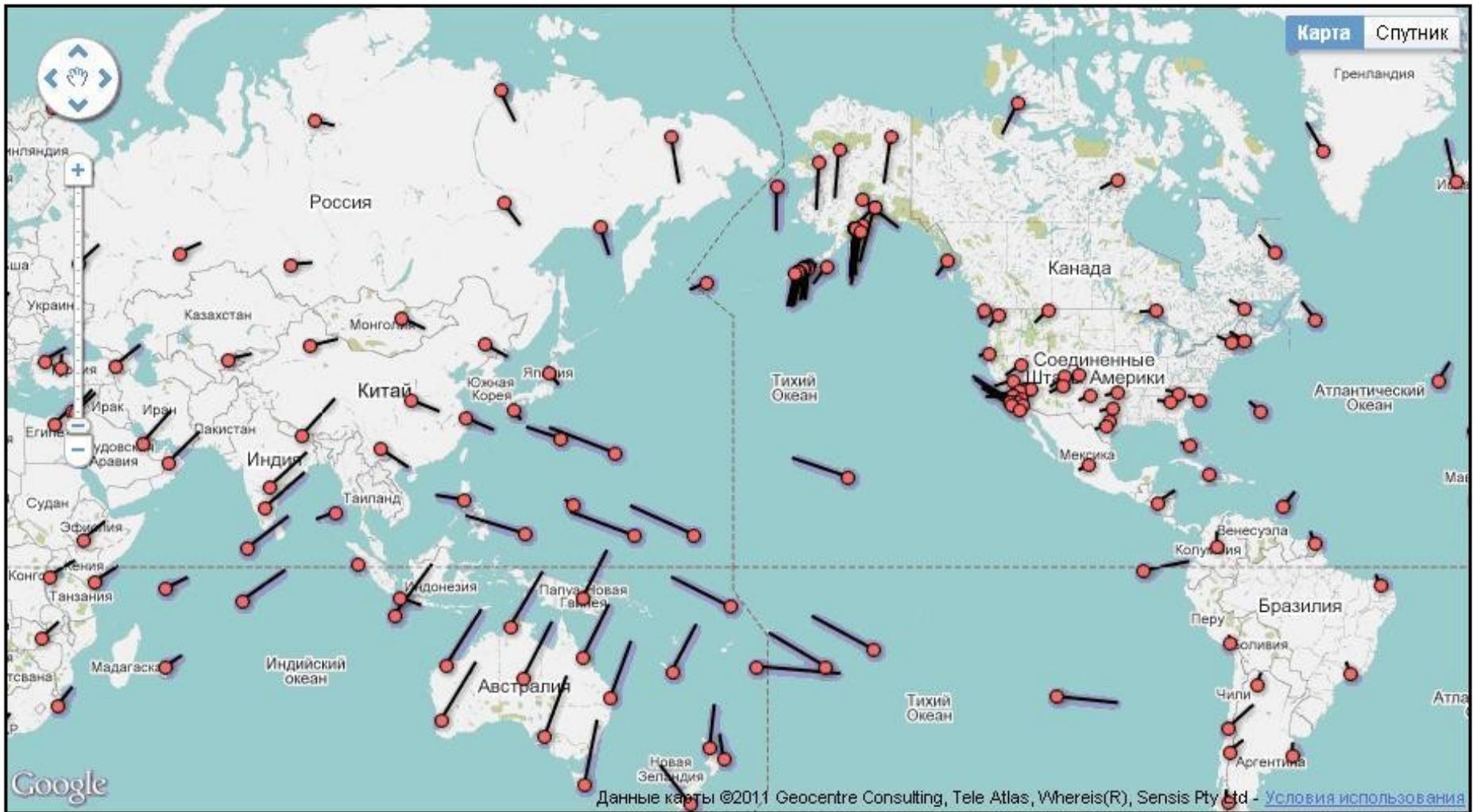
На дне мантии коричневым цветом показаны скопления горячего тяжелого вещества. С их периферии поднимаются плюмы, образующие крупнейшие вулканы

Трубицын, 2010

# Рельеф Земли



**Океаны не** просто **впадины**, заполненные водой.  $h_{ev}=4\text{км}$  Линейный хребет  $h=2\text{км}$  – глобальная трещина – рождение базальтовой коры дна, глубоководные **впадины – погружение** дна 6км (макс 11км), вторая выплавка- рождение гранитной коры континентов. Горные системы 8.8

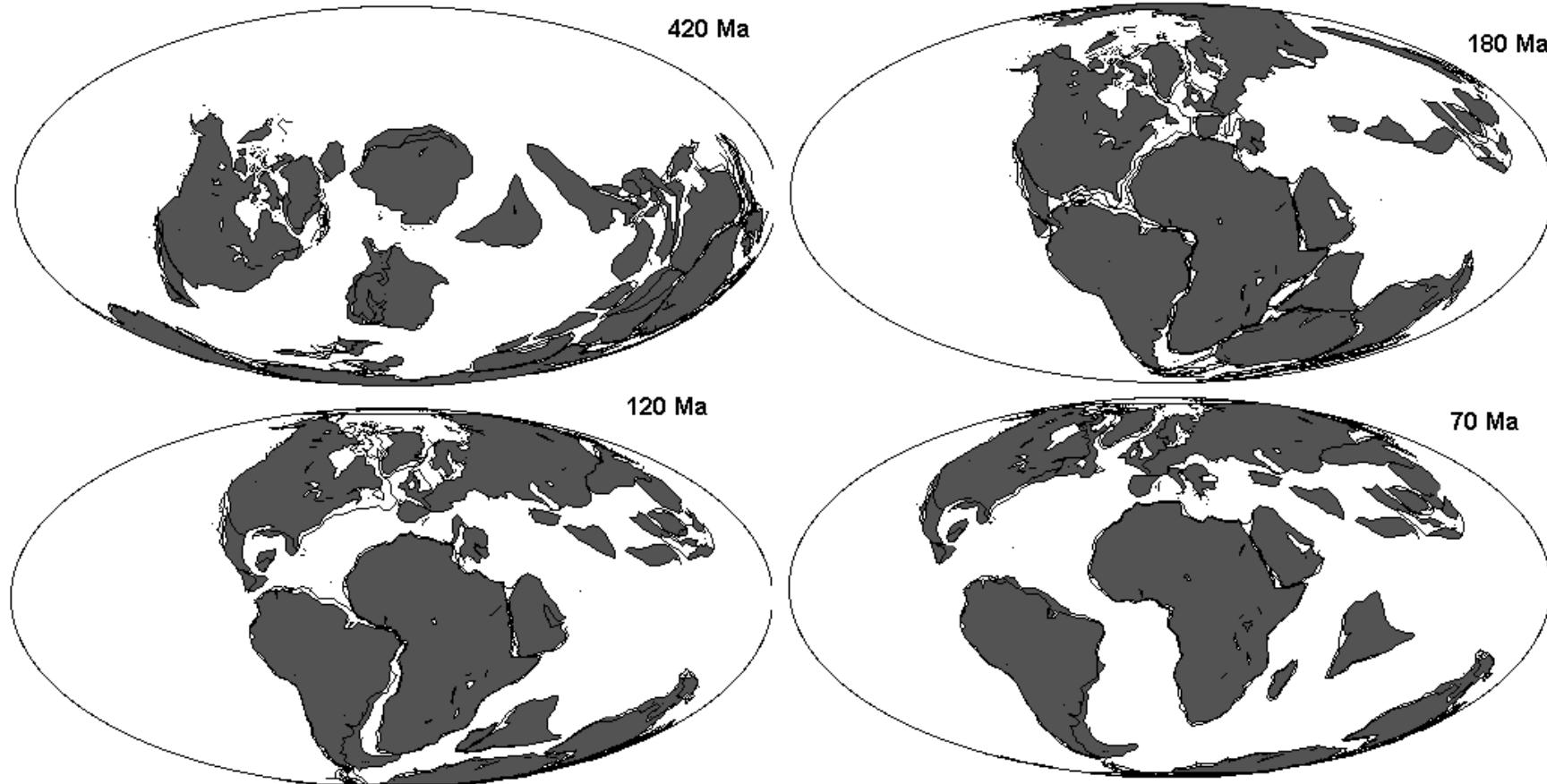


Скорости перемещения точек поверхности по данным спутников GPS

$$V_{\max} = 10 \text{ см/год} = 3 \text{ нм/с}$$

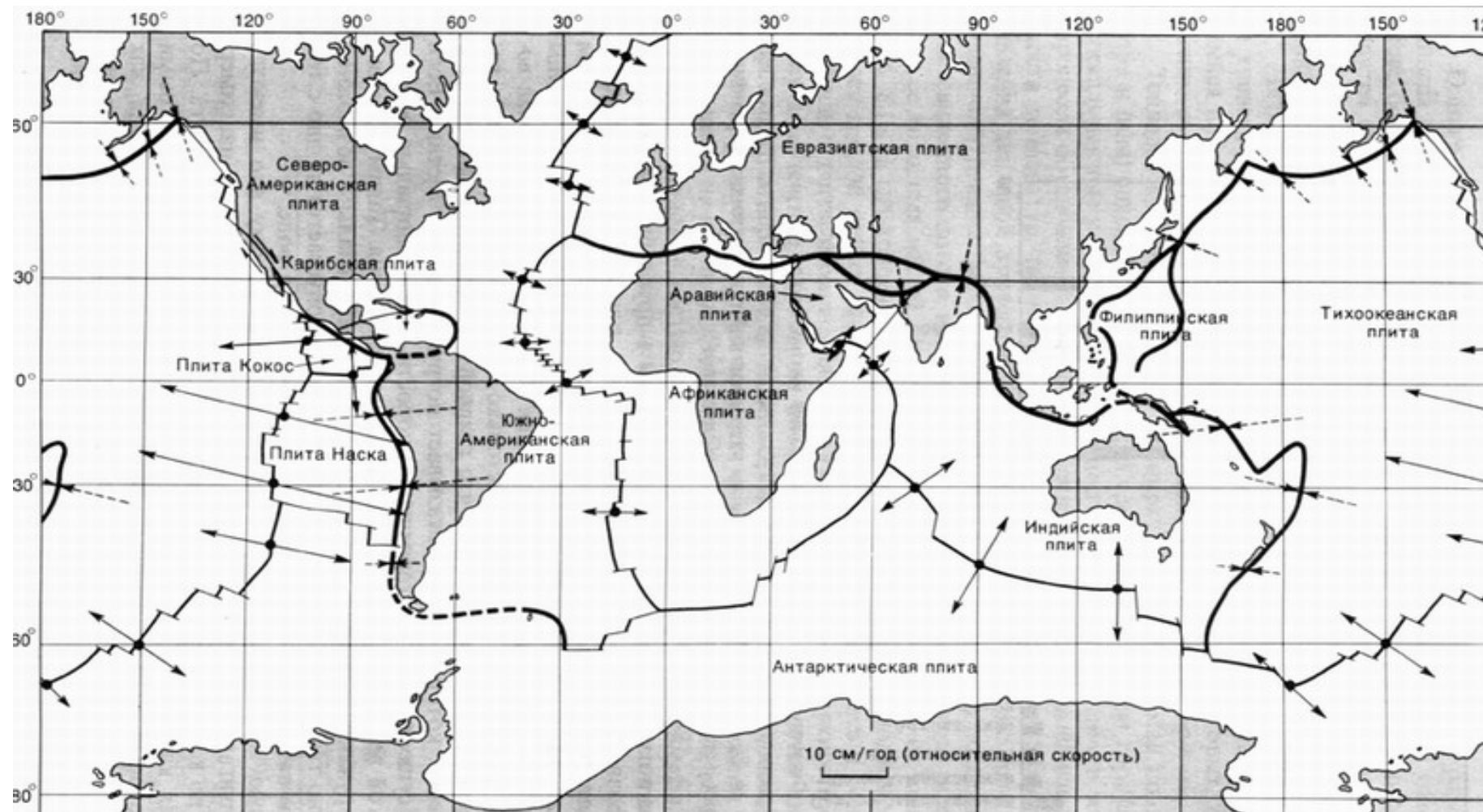
# ДРЕЙФ КОНТИНЕНТОВ (Вегенер, 1912-2000)

## Геологическая реконструкция положения континентов



# ЛИТОСФЕРНЫЕ ПЛИТЫ

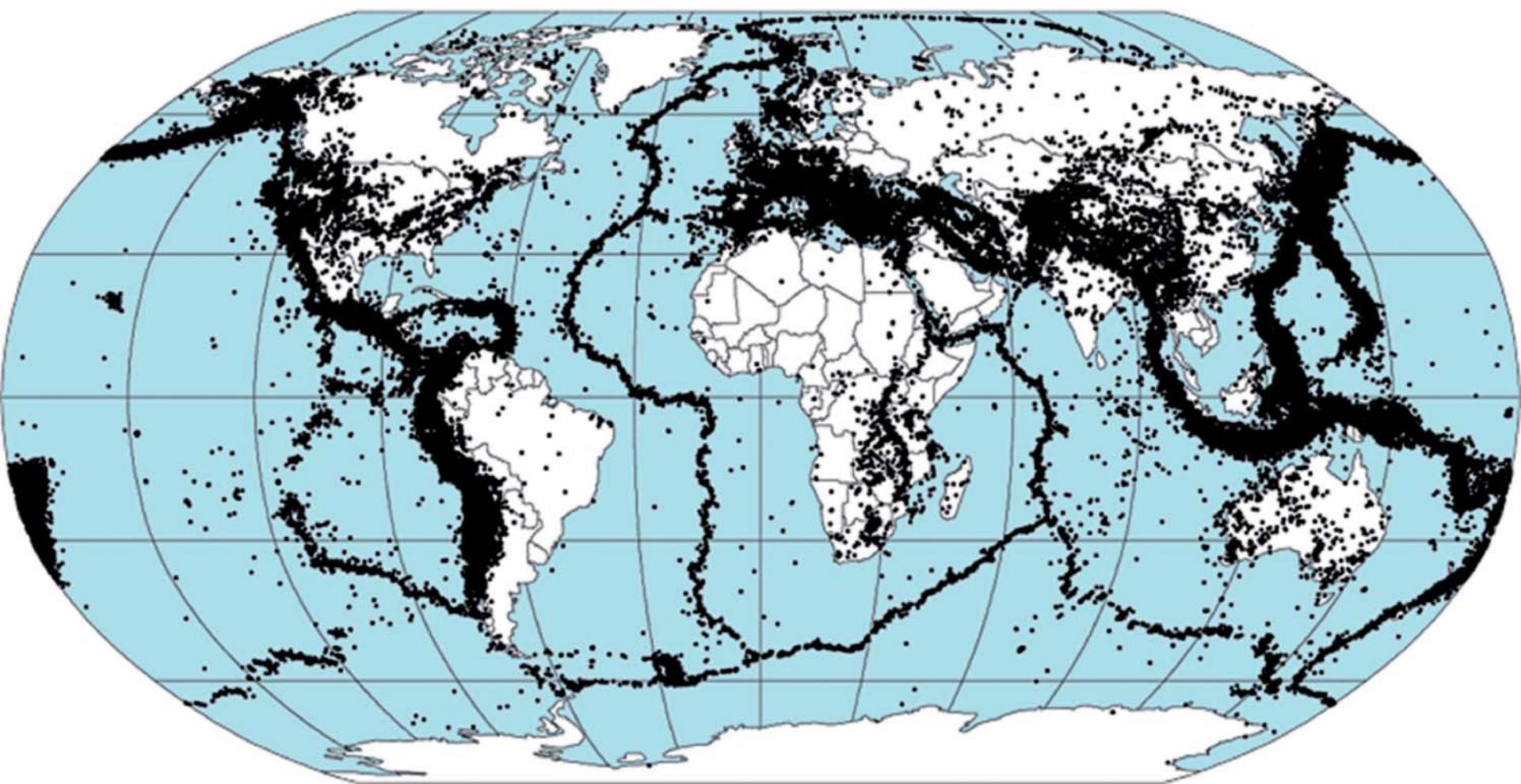
(континенты с прилегающим дном океана)



На Марсе и Венере сплошная сухая высокопрочная литосфера без плит.  
Глобальные катастрофы на Венере (взрыв при перегреве под сплошной жесткой оболочкой)

# Землетрясения на стыках плит

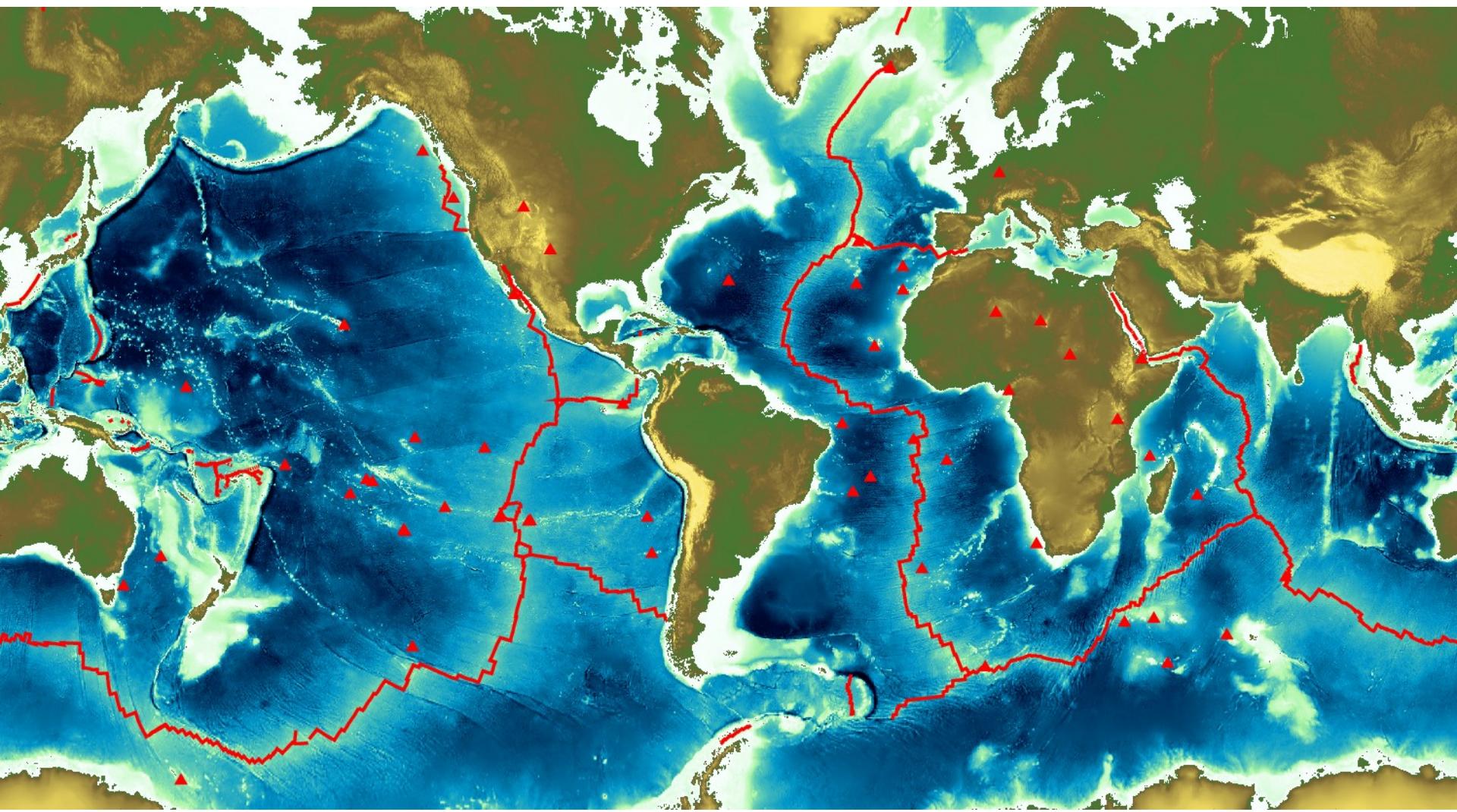
при вертикальном и горизонтальном зацеплении



Эпицентры землетрясений

# ВУЛКАНЫ

(2 типа: поверхностные и глубинные )

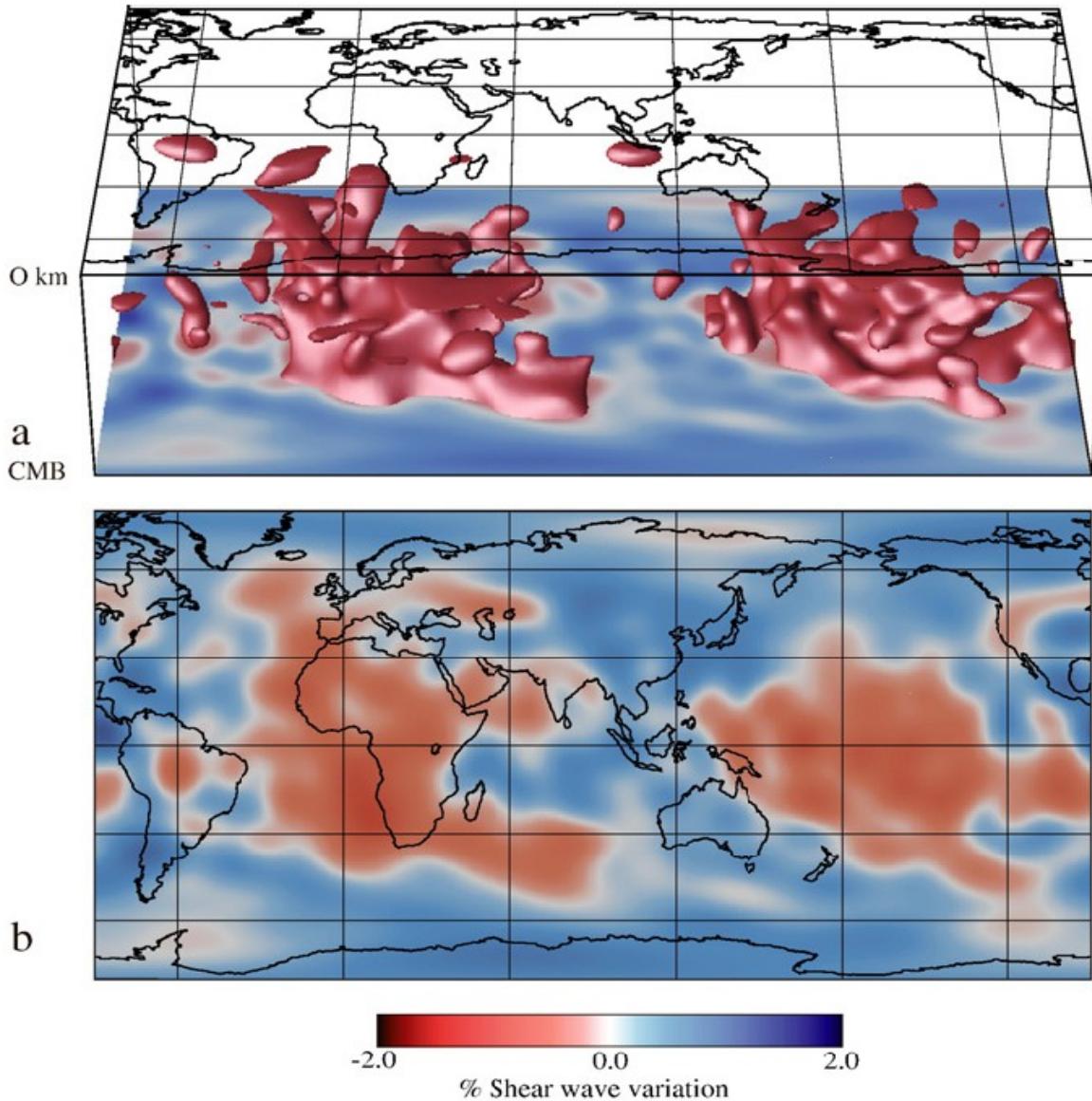


**Океанические хребты – сплошные линейные цепи поверхностных вулканов  
(разделяют плиты и не совпадают с континентами)**

**Горячие точки -сильнейшие действующие одиночные вулканы  
(не зависмы от плит, концентрируются вокруг Африки и Тихого океана)**

# ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

## Томография по поперечным волнам



Shear-wave velocity heterogeneity for the tomographic model S20RTS (**Ritsema et al., 1999, 2004**) shown (a) as an isosurface in cross-sectional view through the mantle and (b) in map view at 2750 km depth. Both views reveal a lower mantle dominated by the large low shear-wave velocity anomalies beneath Africa and the Pacific. Present-day tectonic plate boundaries are superimposed on each plot. **Bull et al. 2009**

# **Причина геодинамических процессов**

## **тепловая конвекция в мантии**

### **Основные проблемы:**

- 1) Силы, движущие континенты ?**
- 2) Механизм раскола литосферы ?**
- 3) Зарождение глубинных вулканов ?**

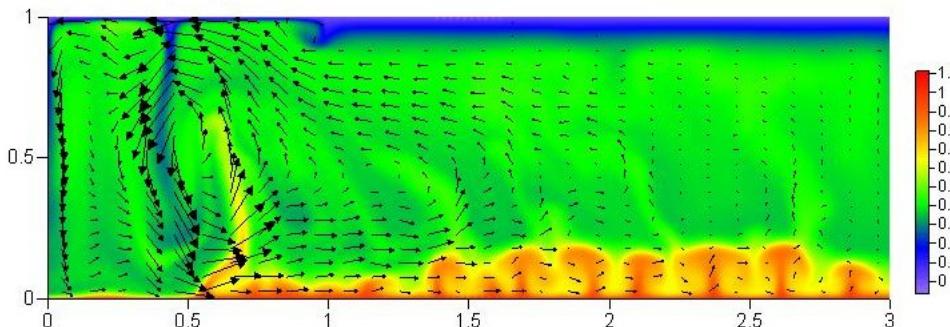
### **Решение**

Единая теория взаимодействия глобального вулканизма, литосферных плит и плавающих континентов.

Гидродинамическая модель вязкой смеси с плавающими твердыми телами

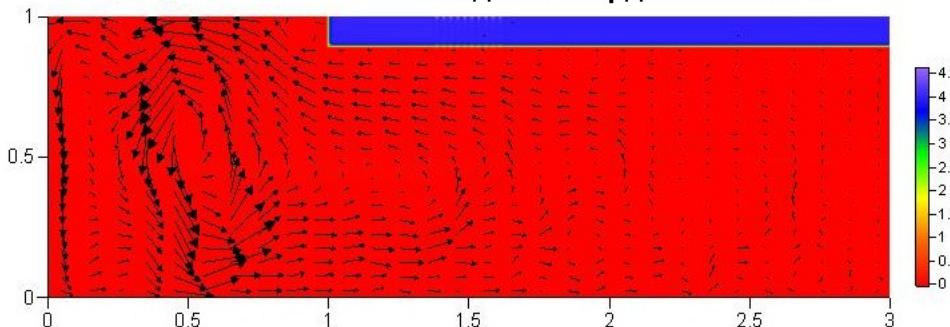
Континент влияет на конвекцию, течения деформируют осадок,  
на периферии возникают плюмы - вулканы

Температура



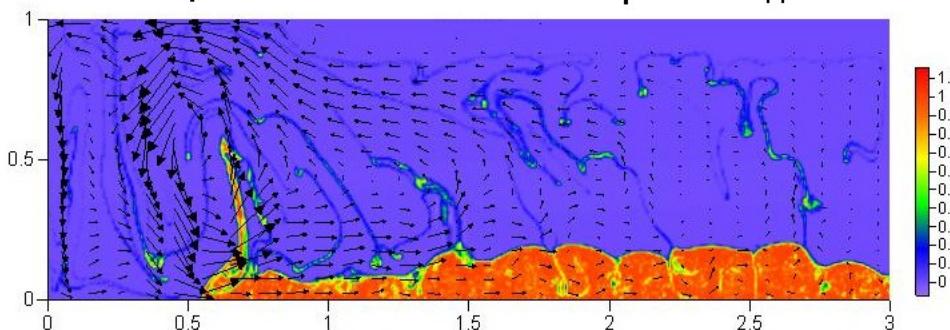
Вязкость

холодный твердый континент



Концентрация

тяжелый горячий осадок



# История

1913 – Перемещение континентов  
(Wegener)

1945 - Тепловая конвекция в мантии (Holmes)

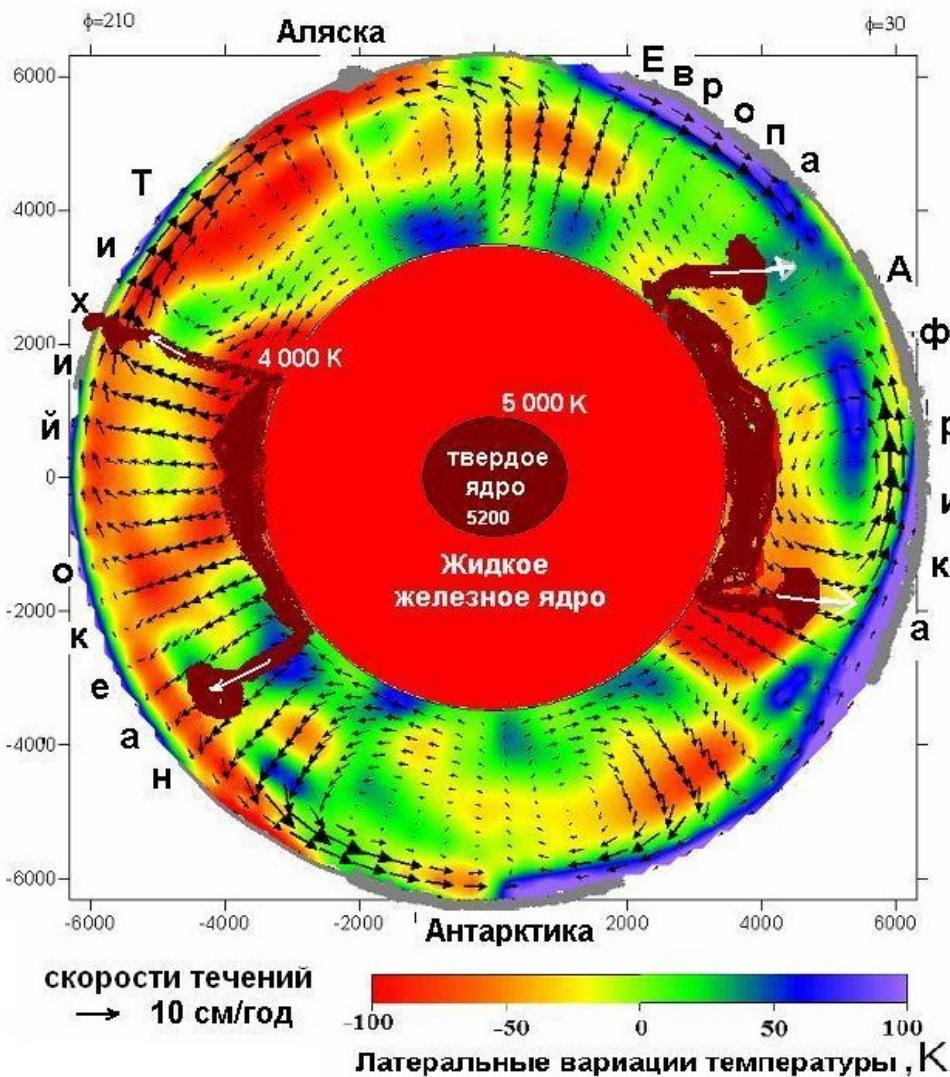
1960-1965 - Данные наблюдений дна океанов, теория конвекции в мантии, кинематическая теория тектоники литосферных плит  
(Ditz, VcKehzie, LePishon, Morgan и др.)

2000 -Теория дрейфа континентов (Трубицын)

2010-2012 -Численные эксперименты, воспроизводящие общемантийную конвекцию под жесткой литосферой с расколами на систему плит, погружающихся в мантию.  
(Tackley, Трубицын)

2011-2012 - Модели зарождения плюмов горячих точек вокруг горячих скоплений, эволюция плюмов, структура конвекции с плюмами в нижней мантии и с плитами в верхней мантии.  
(Lay, Torsvik, Трубицын и др.)

# Температура и скорости течений в горячей вязкой каменной мантии



Lg вязкости Пас

Мантия 21

Ядро диф=-2, турб=5

Вн. ядро 15

Скорости течений

Мантия 1 нм/с (10 см/год)

Ядро 1мм/с (10 км/год)

6 порядков

Лат. перепады температуры

Мантия 500К

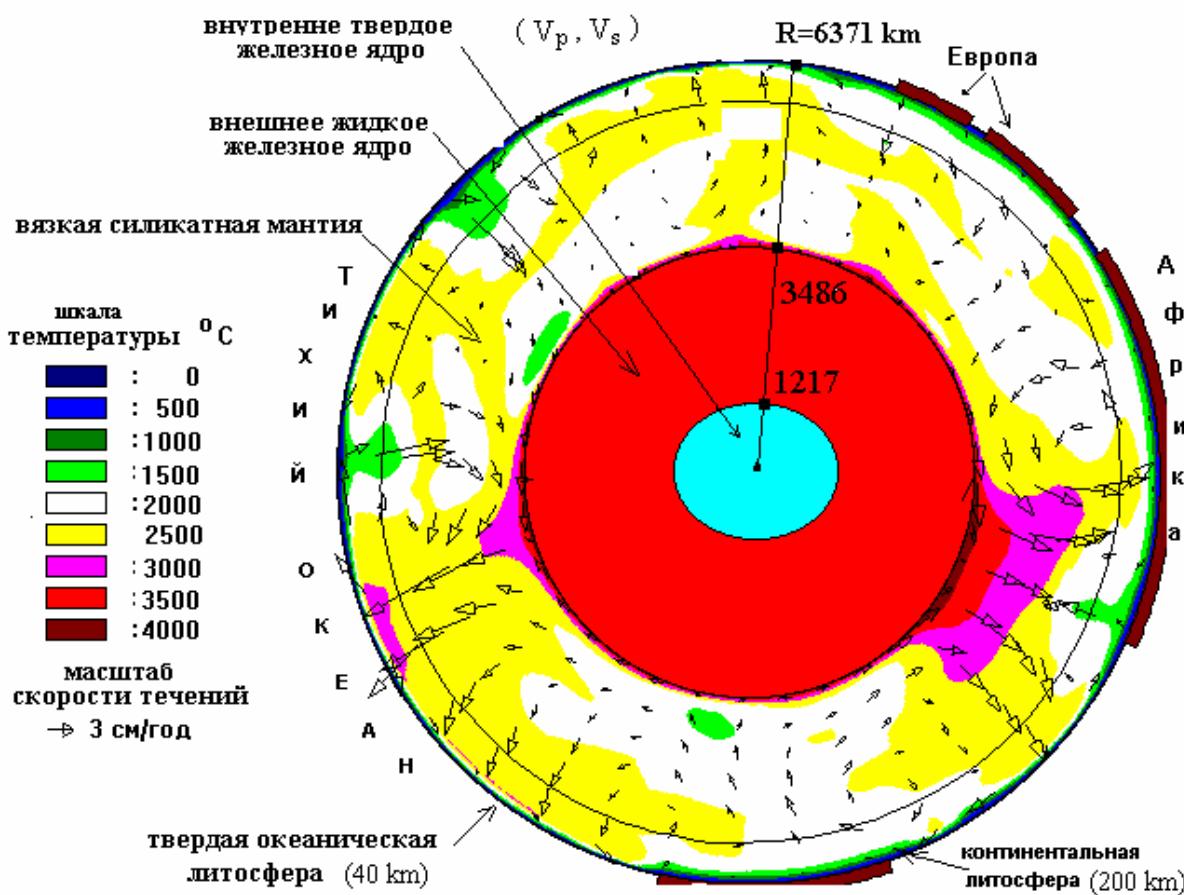
Ядро 0.0001К

На дне мантии коричневым цветом показаны скопления горячего тяжелого вещества. С их периферии поднимаются плюмы, образующие крупнейшие вулканы

Трубицын, 2010

# Трехмерная сферическая модель Земли

(Трубицын, Физика Земли, 2000)



$$q = 0.10 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{конд}} = K T / H = 3 \text{ W/mK} 4000 \text{ K} / 3000 \text{ km} = 0.004 \text{ W/m}^2$$

$$Nu = q / q_k = 25$$

$$V = 8(k/H)Nu^2 = 5 \text{ cm/y}$$

$$q_c = 400 \quad q_{\text{тех}} = 0.03$$

$q_{\text{рад. коры}} = 15\%$
$q_{\text{затв. ядра}} = 10\%$
$q_{\text{рад. мантии}} = 50\%$
$q_{\text{остывание}} = 25\%$
$T_{\text{пл. железа}} = 3500^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{пл. силикатов}} = 5000^{\circ}\text{C}$

$$V = V(r, \theta, \phi)$$

$$V_s = \sqrt{\mu / \rho}$$

$$d \ln \rho / d \ln V = 0.25$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha T)$$

$$T = T(r, \theta, \phi)$$

$$q_{\text{сп}} = 1370 = 370 + 1000$$

**1.**

# **ТЕОРИЯ И МОДЕЛИ КОНВЕКЦИИ С ПЛАВАЮЩИМИ КОНТИНЕНТАМИ**

# ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В МАНТИИ С ПЛАВАЮЩИМИ КОНТИНЕНТАМИ

## Уравнения конвекции в вязкой мантии

$$\rho_0 D\mathbf{V}/dt = -\partial p/\partial \mathbf{x}_i + \partial S_{ij}/\partial \mathbf{x}_j + \rho_0(1-\alpha T)g\delta_{iz}$$

-Навье-Стокса,

$$\rho_0 c_p (\partial T / \partial t + \mathbf{V} \nabla T) = \partial (k \partial T / \partial \mathbf{x}_i) \partial \mathbf{x}_i + \mathbf{H}$$

перенос тепла,

$$\partial \rho / \partial t + \partial (\rho \mathbf{V}_i) / \partial \mathbf{x}_i = 0$$

перенос массы

$$S_{ij} = \eta (\partial \mathbf{V}_i / \partial \mathbf{x}_j + \partial \mathbf{V}_j / \partial \mathbf{x}_i)$$

тензор вязких напряжений.

## Уравнения для твердого плавающего континента:

$$M du_0 / dt = \iint (-p \delta_{1j} + S_{1j}) n_j df$$

- движение вдоль локальной оси x,

$$M dv_0 / dt = \iint (-p \delta_{2j} + S_{2j}) n_j df$$

- движение вдоль локальной оси y,

$$I_{33} d\omega_3 / dt = \iint \epsilon_{ij3} (x_i - x_{0i}) (-p \delta_{jk} + S_{jk}) n_k df,$$

- вращение вокруг локальной вертикальной оси,

$$dx_c / dt = u_0, \quad dy_c / dt = v_0, \quad d\phi / dt = \omega_3$$

- кинематические соотношения.

## Уравнение переноса тепла в движущемся континенте

$$\rho c_p (\partial T_c / \partial t + \mathbf{u}_0 \nabla T) = \partial (k \partial T_c / \partial \mathbf{x}_i) \partial \mathbf{x}_i + \mathbf{H}_c$$

Границные условия на всей погруженной в мантию поверхности континента:

$$V_i = u_i, \quad T = T_c, \quad \partial T / \partial \mathbf{n} = \partial T_c / \partial \mathbf{n}$$

Неизвестные:  $V_i$  - скорость вязких течений,  $p$  - давление,  $S_{ij}$  - тензор вязких напряжений,  $T$  и  $T_c$  -

Температура в мантии и в континенте,  $\mathbf{u}_0 = (u_0, v_0)$  - скорость и  $x_c, y_c$ ,  $z_c$  - координаты центра тяжести

континента,  $\omega_3$  - его угловая скорость и  $\phi$  - угол поворота. (5 ур. кон.+4 ур. дв. кон.+3 кин. ур.)

Форма, размеры и число континентов находятся по специальной подпрограмме на каждом временном шаге по тензору вязких напряжений на поверхности континентов при известной реологии.

## ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ

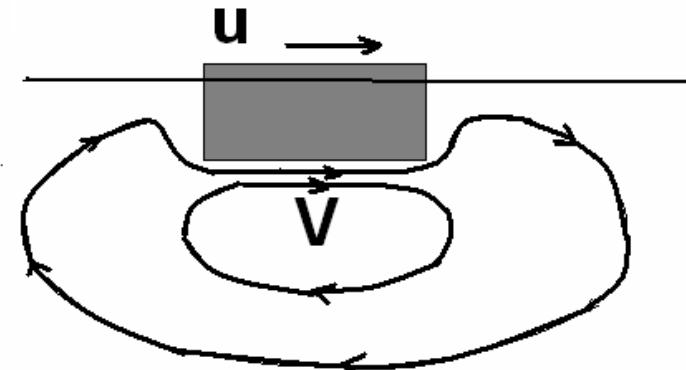
Эксперимент Benard, 1901

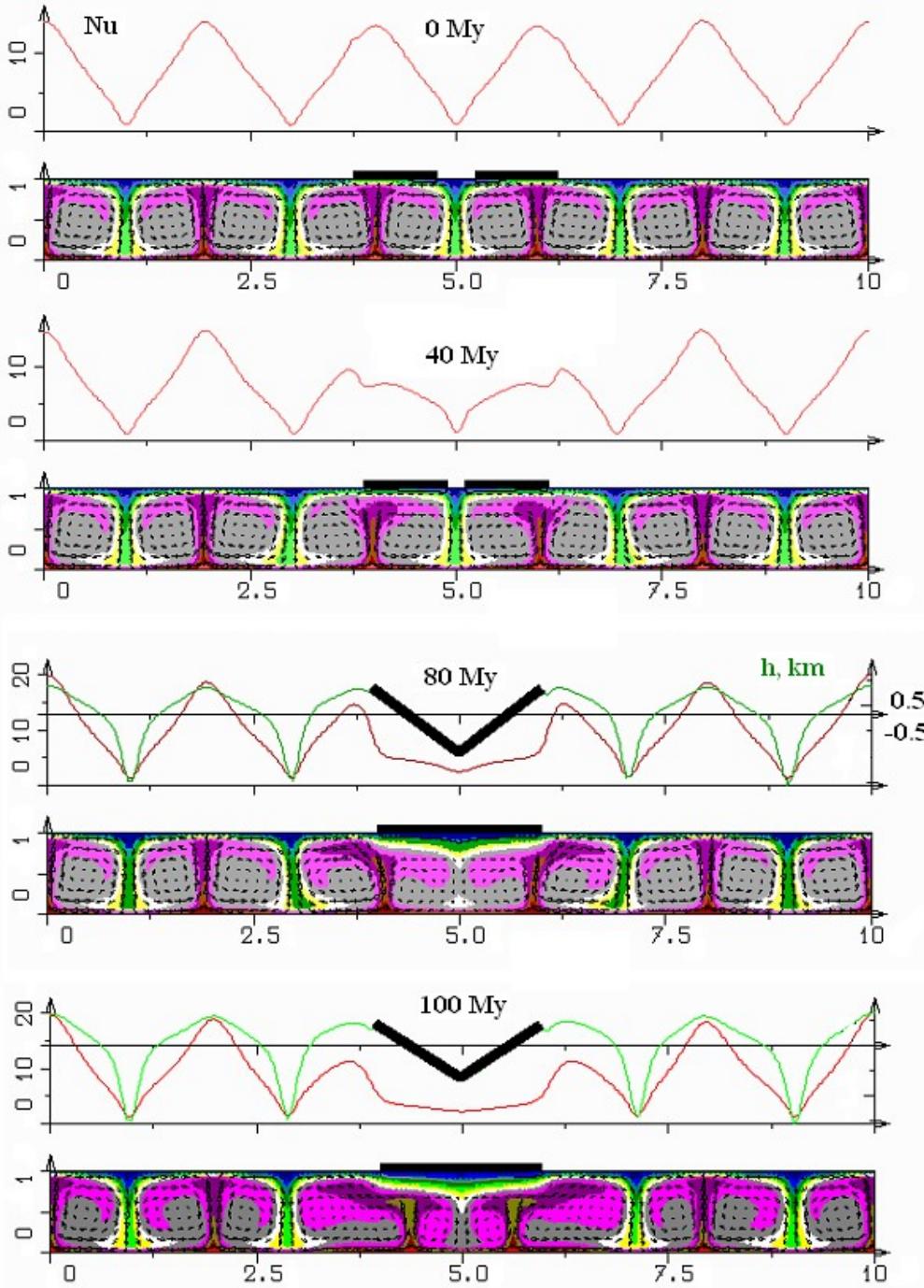
Теория Rayleigh, 1916

## КОНВЕКЦИЯ

с плавающими телами

Трубицын, 2000  
Физика Земли, №9



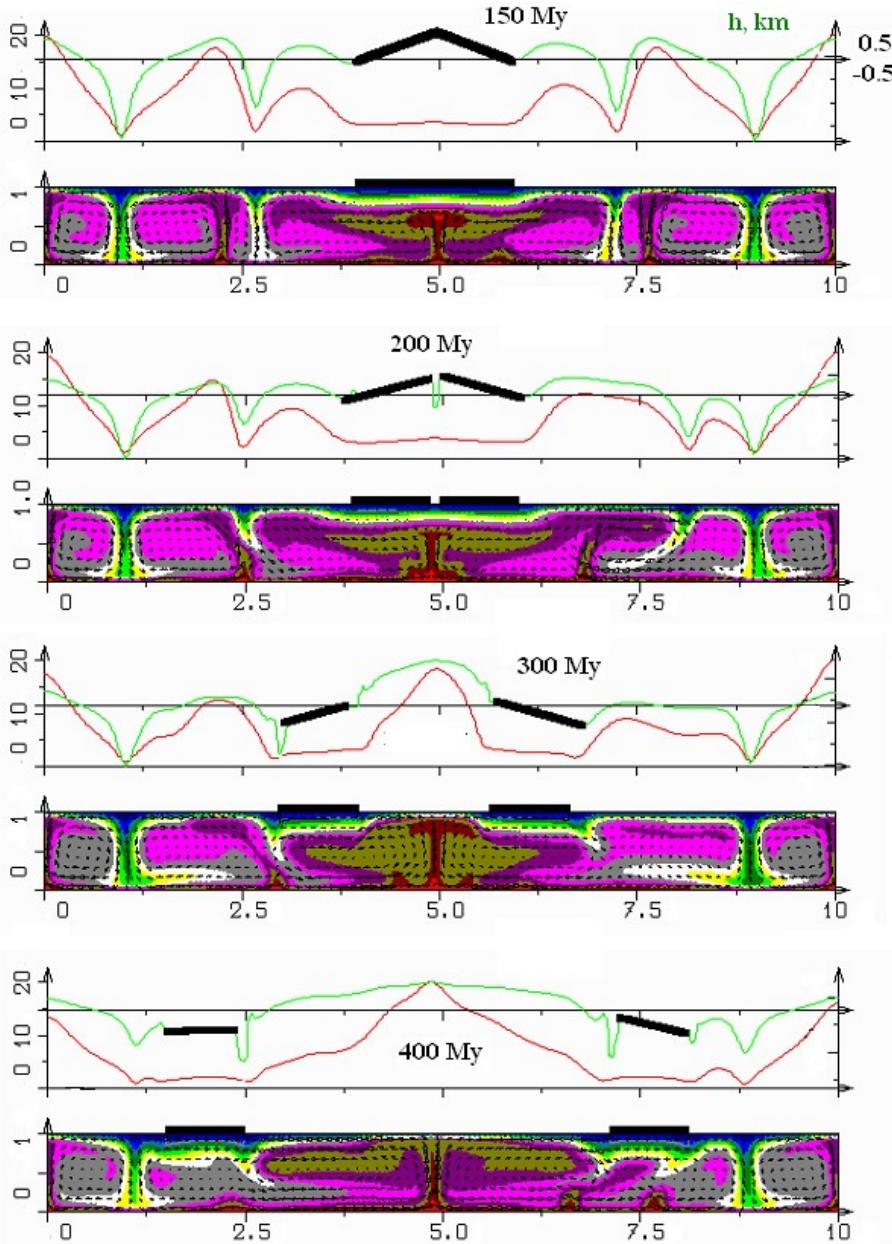


# ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ

с учетом  
теплового и  
механического  
взаимодействия с  
плавающими  
континентами

## 1. ОБЪЕДИНЕНИЕ, суперконтинент

## 2. РАСПАД суперконтинента



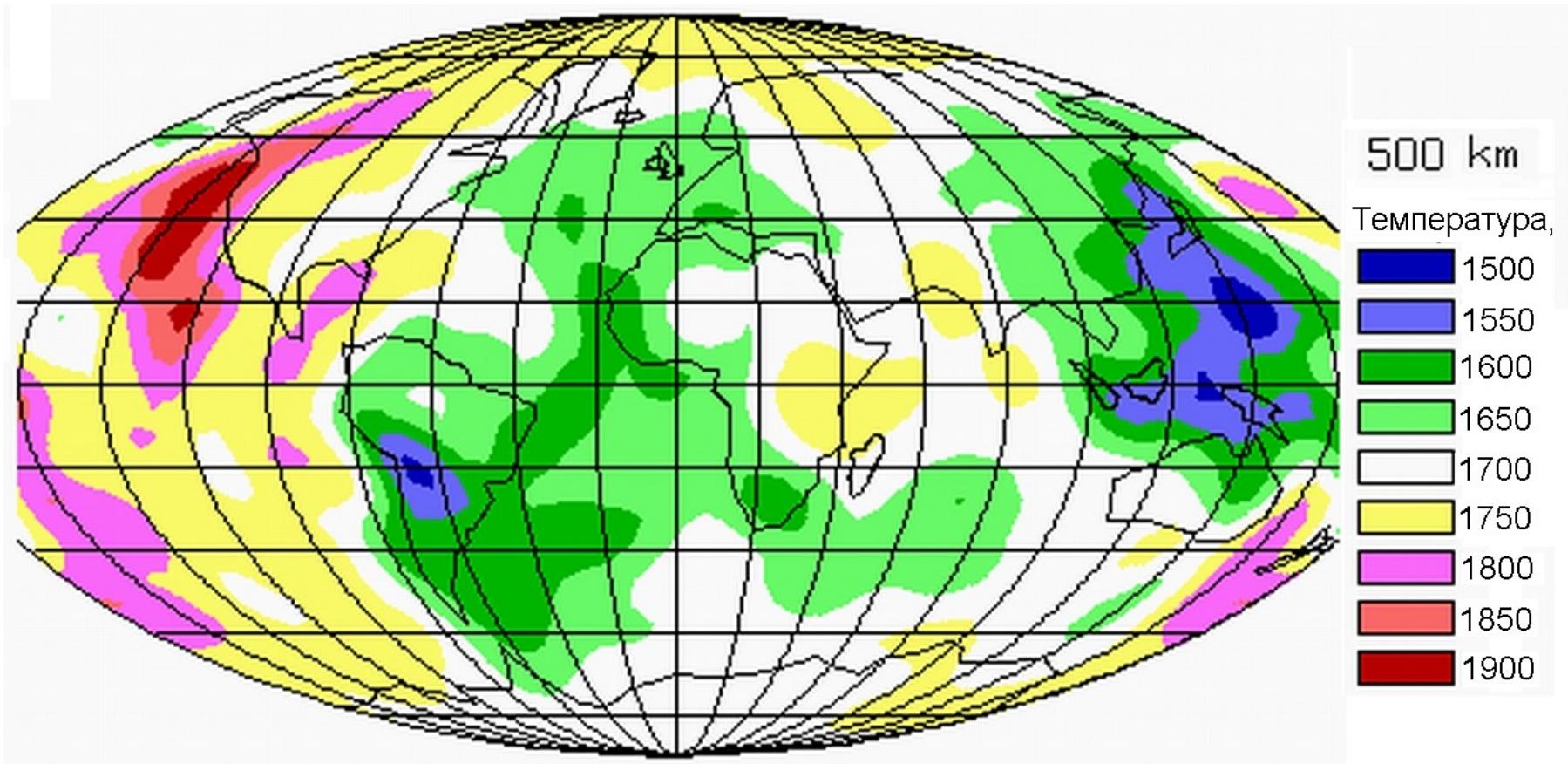
Эксперимент

Zhang J., A. Libchaber, 2000.

Phys. Rev. Lett, V. 84, 4361

# СФЕРИЧЕСКАЯ ЗЕМЛЯ

Сейсмическая томография мантии современной Земли



Два гигантских нисходящих потока, засасывающих литосферные плиты в мантию

**Рассчитанный тепловой поток, выходящий из мантии,  
и скорости перемещения континентов и дна океанов**

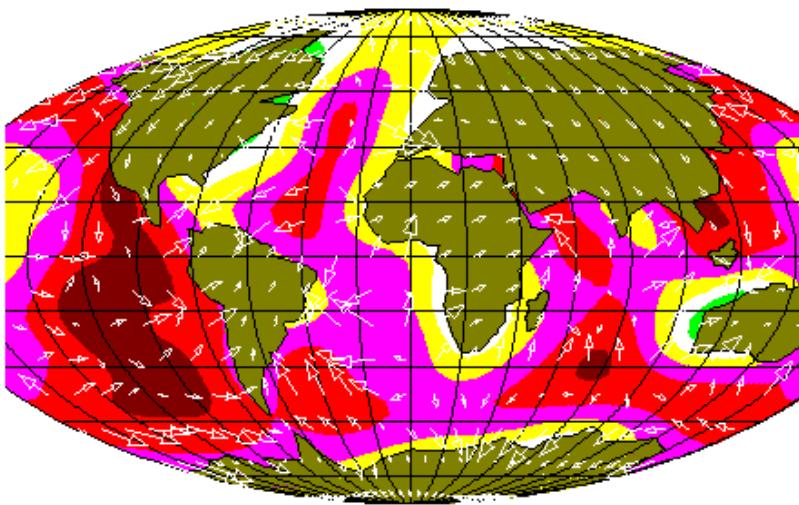
скорости движения

дна океанов и  
континентов

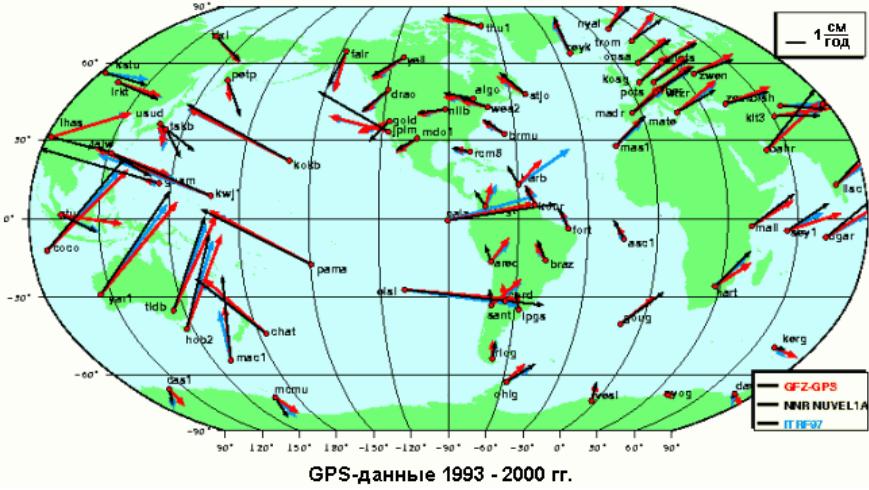
→ 2 см/год

тепловой поток,  
вт/м<sup>2</sup>

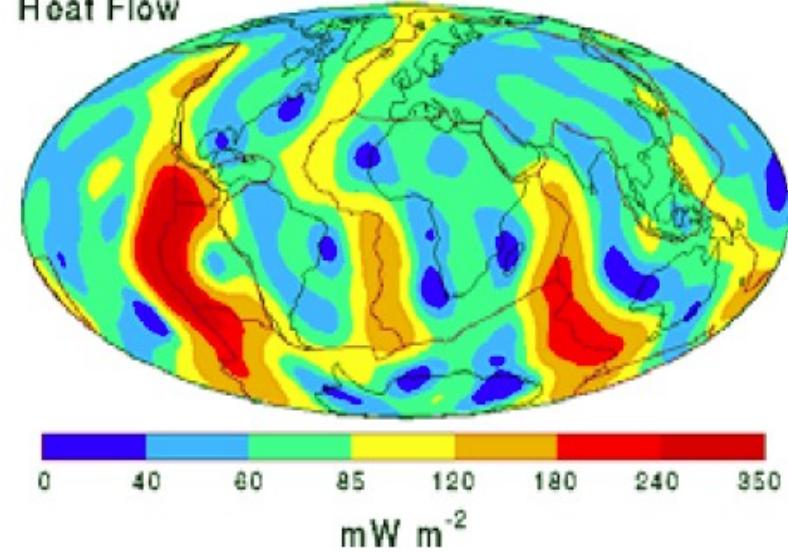
- : 0.02
- : 0.04
- : 0.06
- : 0.10
- : 0.20
- : 0.30



**Горизонтальные скорости перемещения по данным 7 лет GPS-наблюдений**

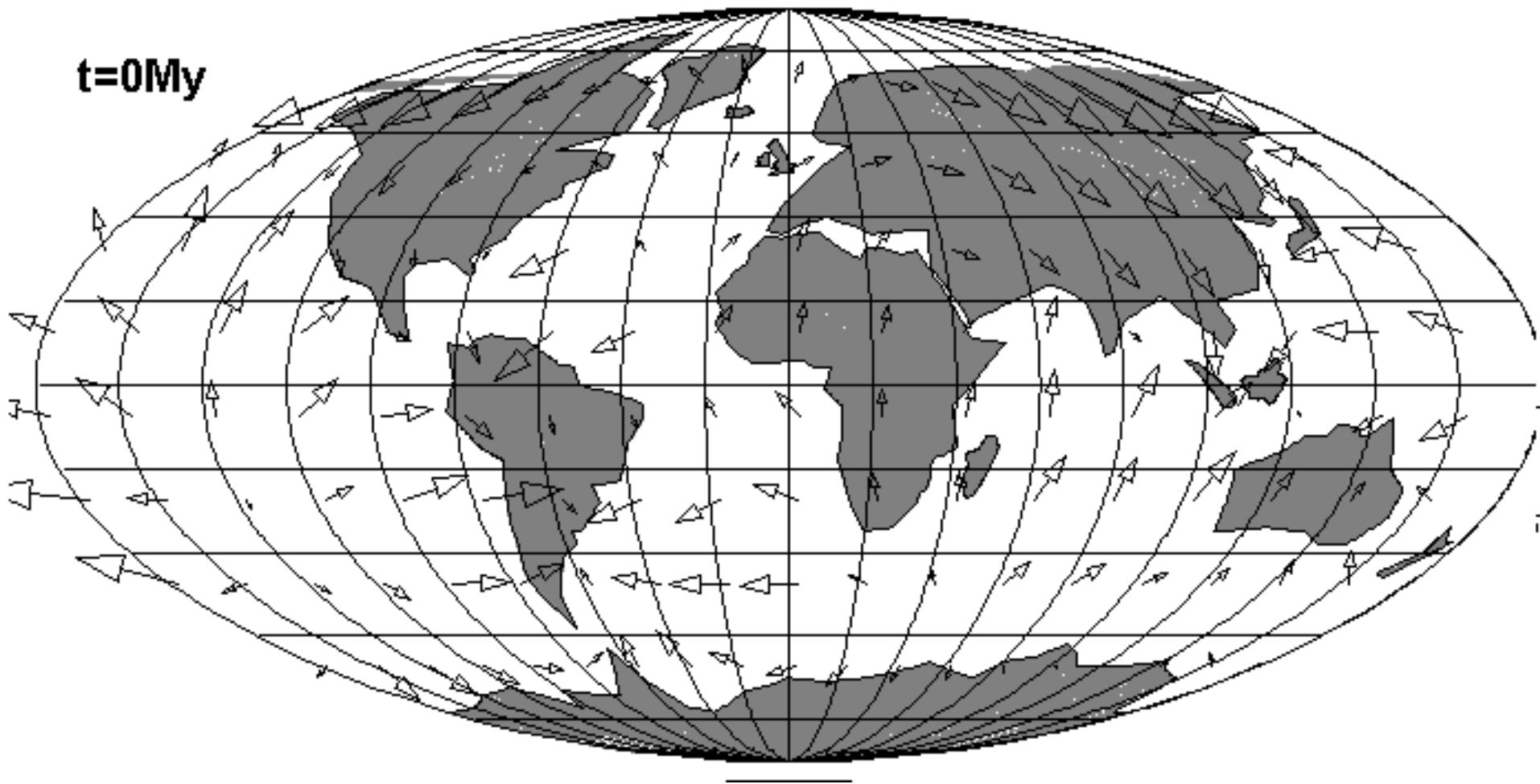


**Heat Flow**

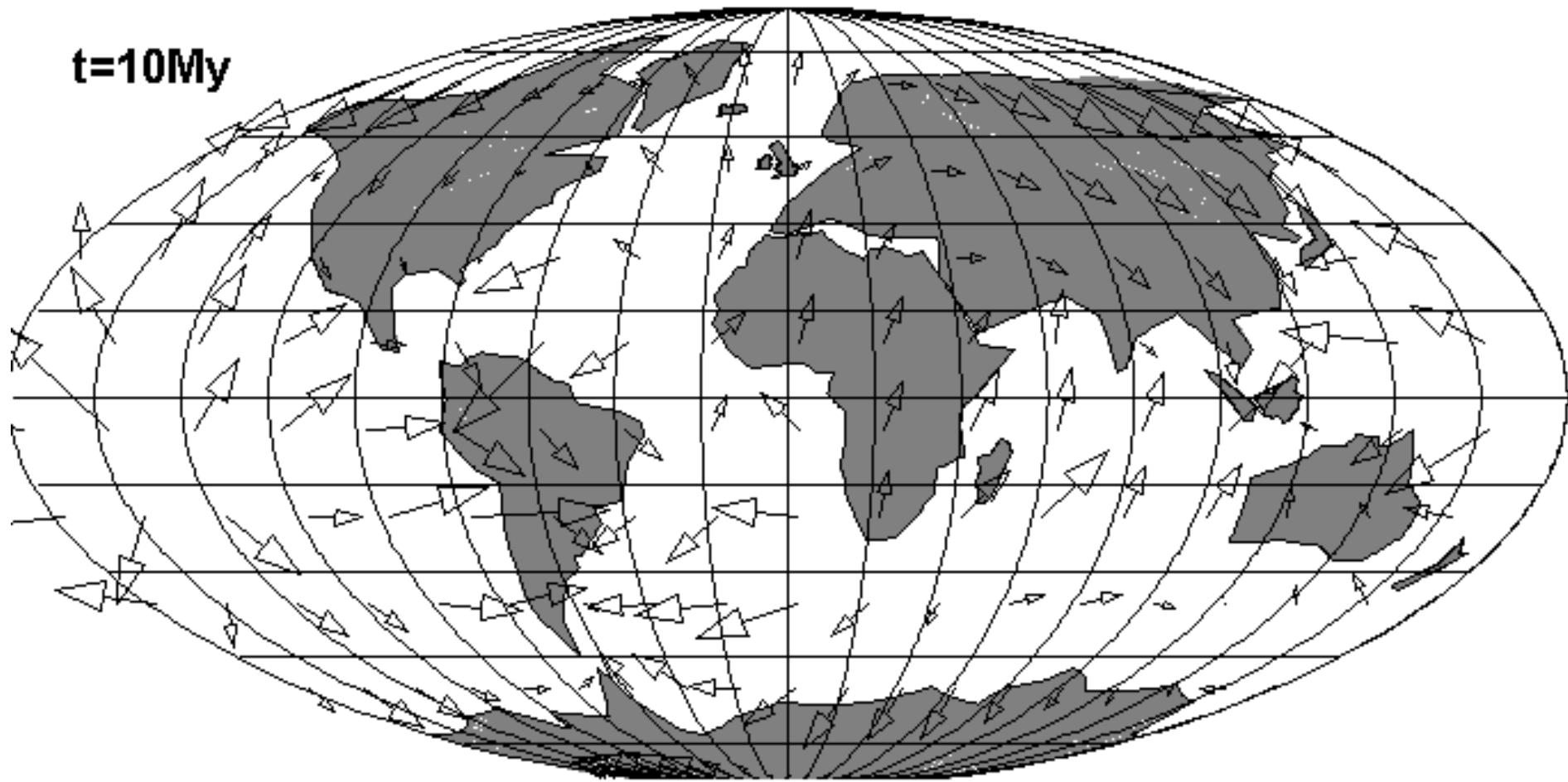


N.H. Pollack S.J. Hurter, J.R. Johnson. Reviews of Geophysics, Vol. 31, 1993.

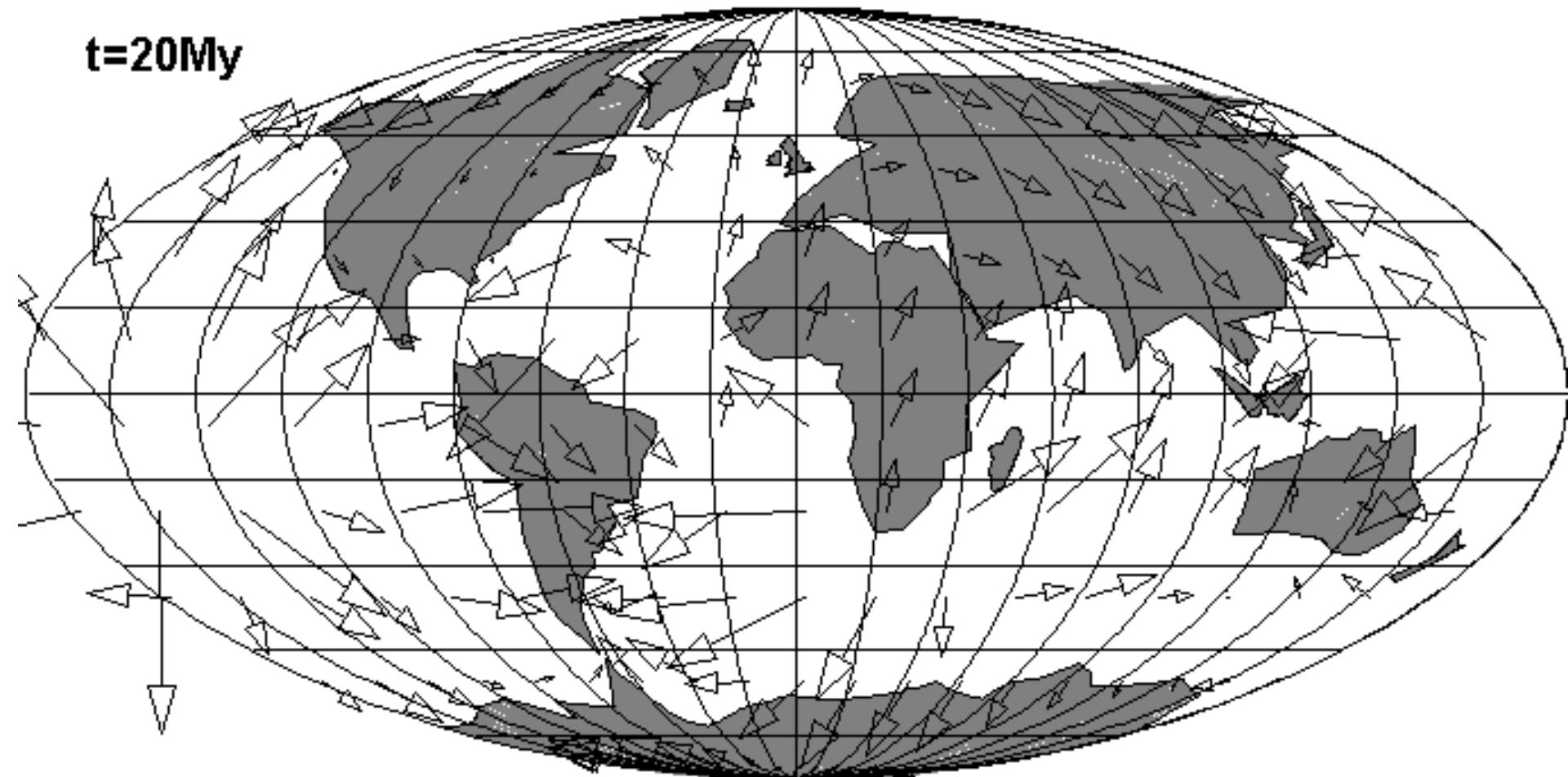
**t=0My**



$t=10\text{My}$

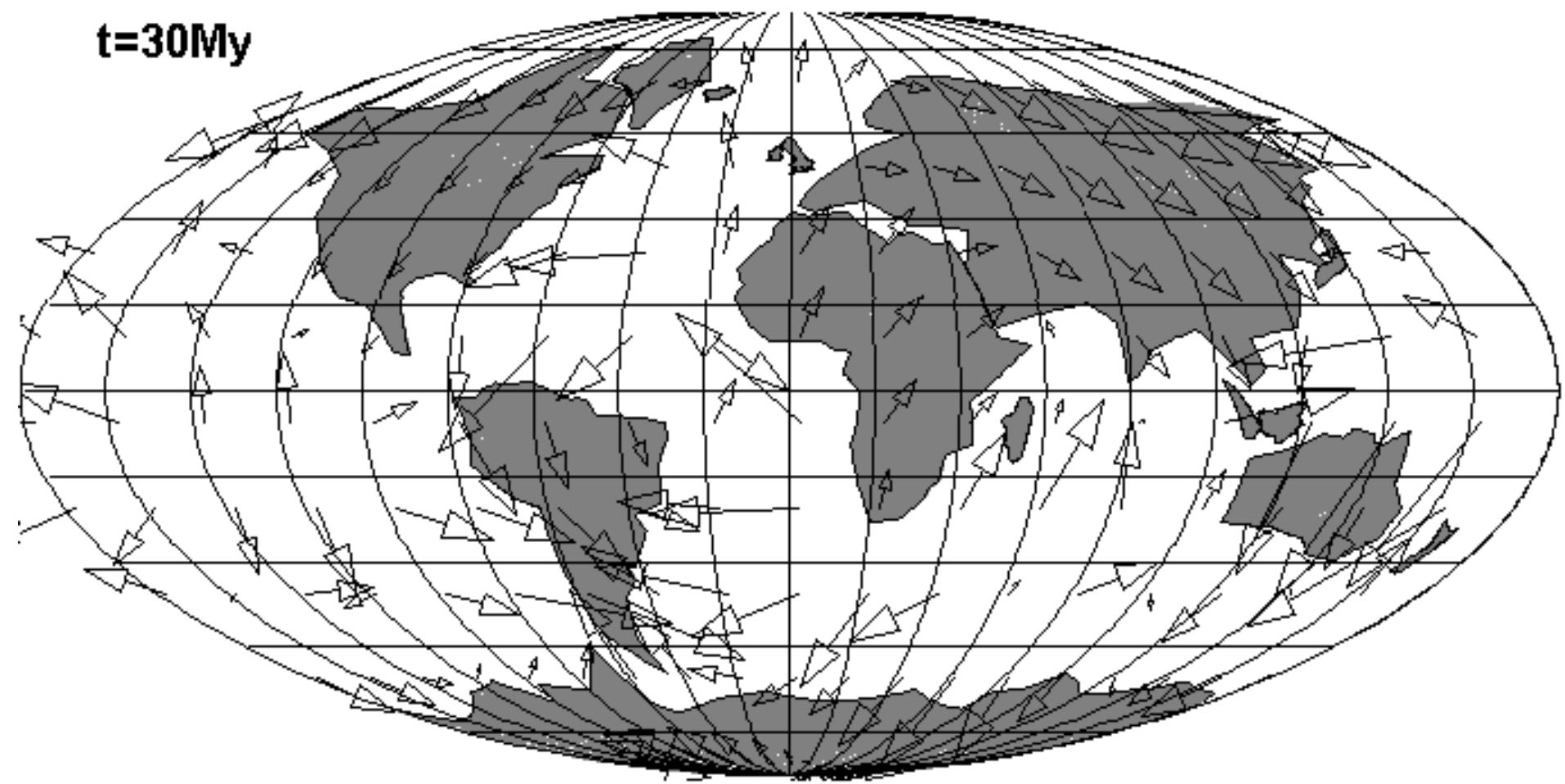


$t=20\text{My}$

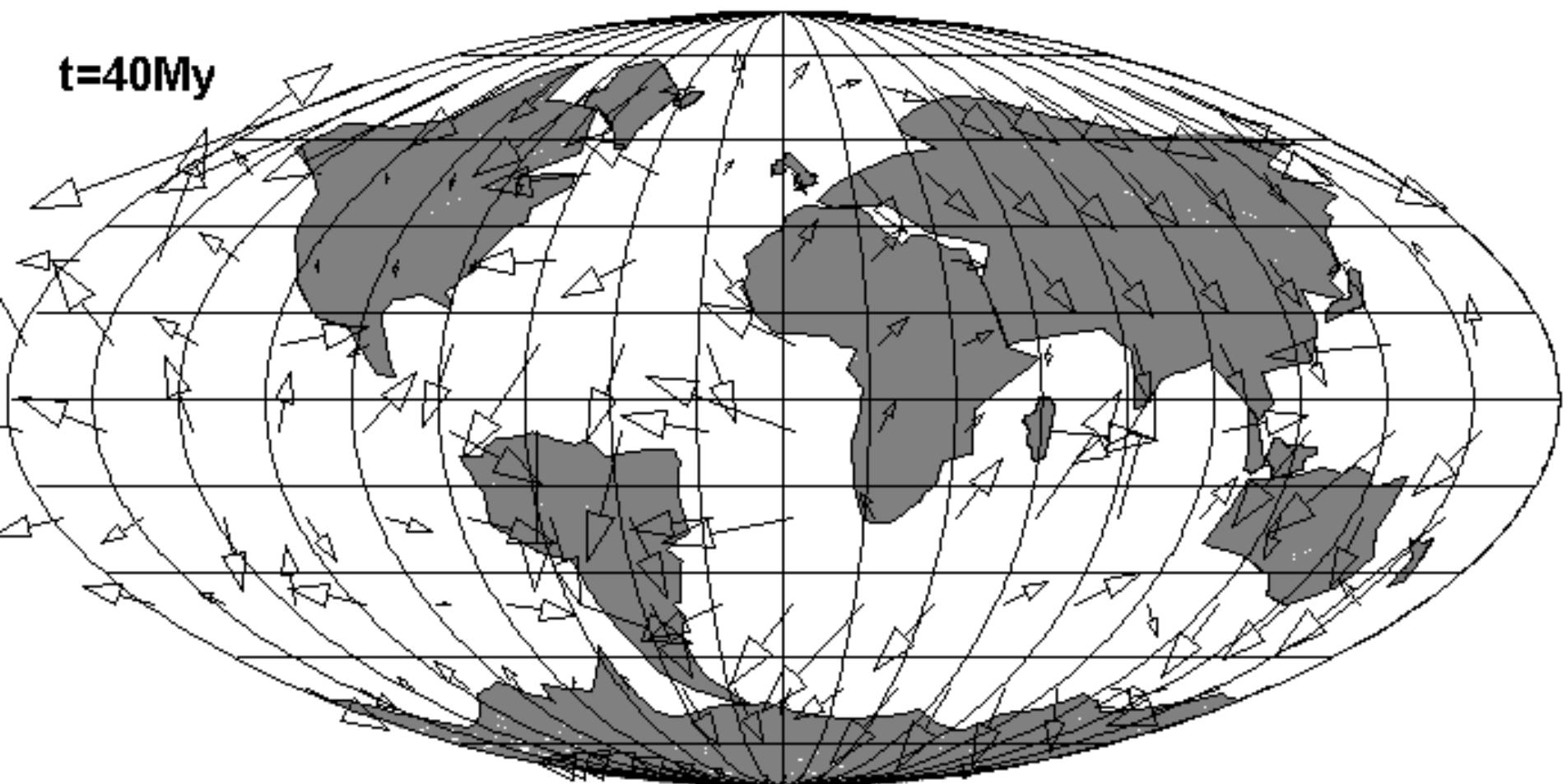


**Япония соединяется с Евразией**

**$t=30\text{My}$**

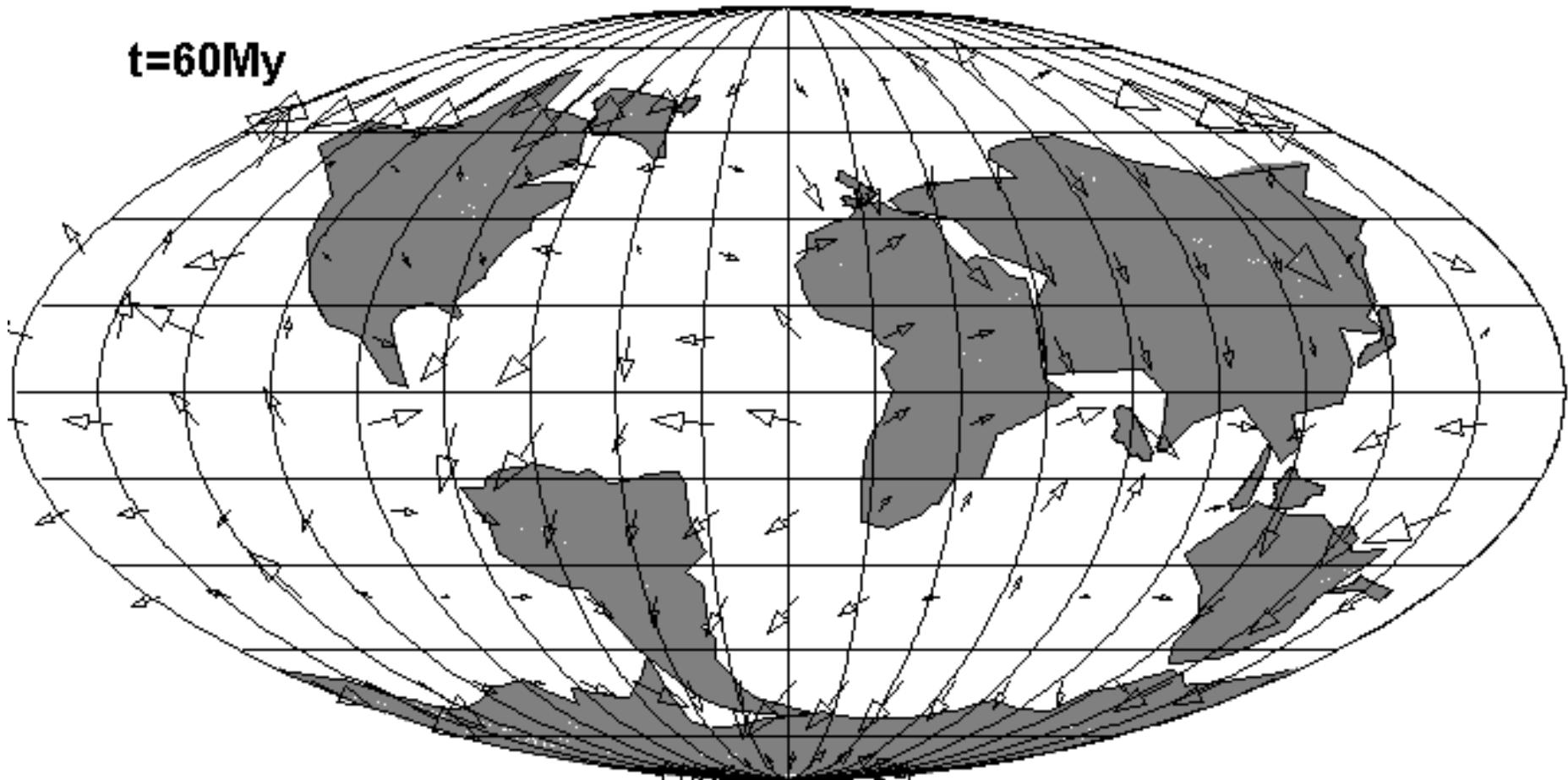


**t=40My**



**Мадагаскар отходит от Африки,  
Ю. Америка сталкивается с Антарктидой**

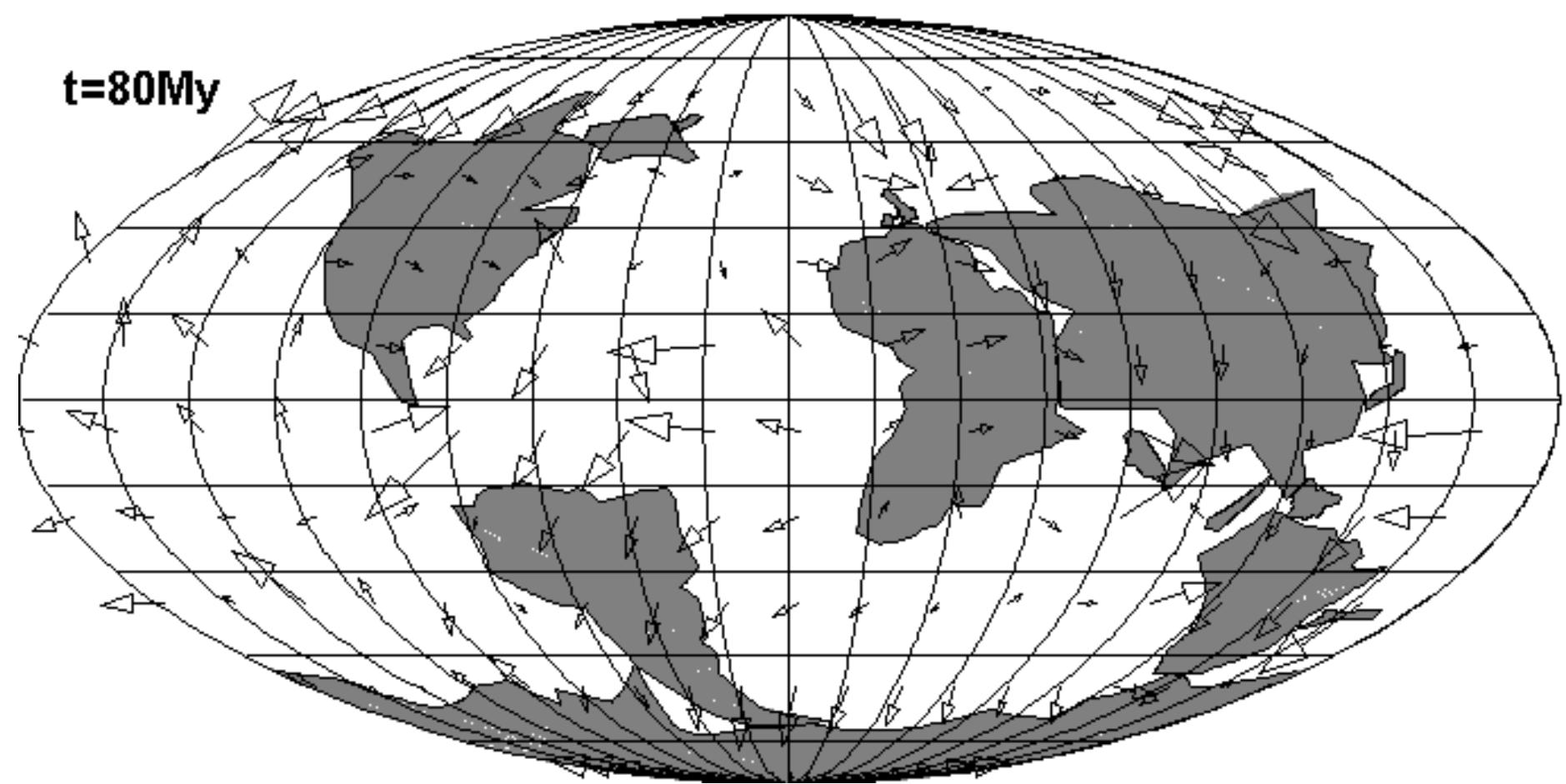
**t=60My**



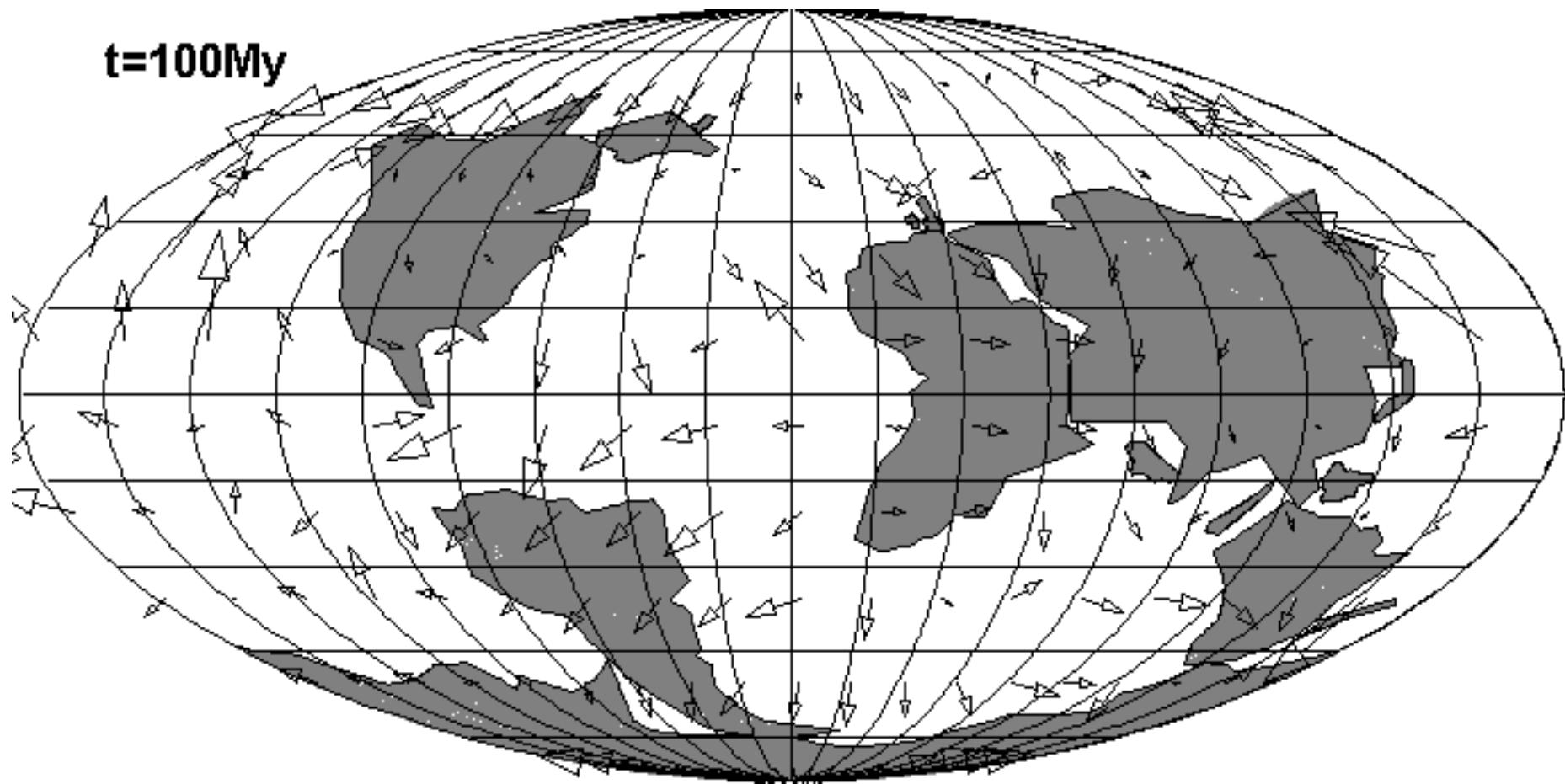
**Мадагаскар приближается к Индии**

**Возникает мост между Евразией и Австралией**

**t=80My**



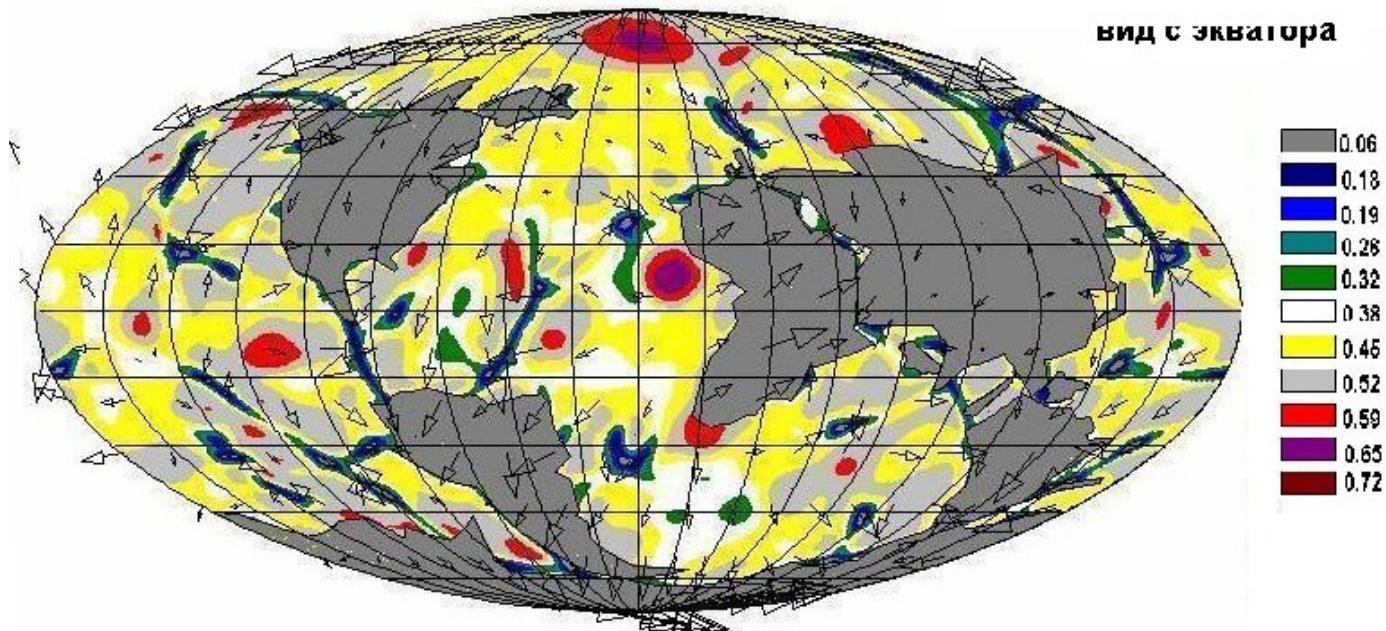
$t=100\text{My}$



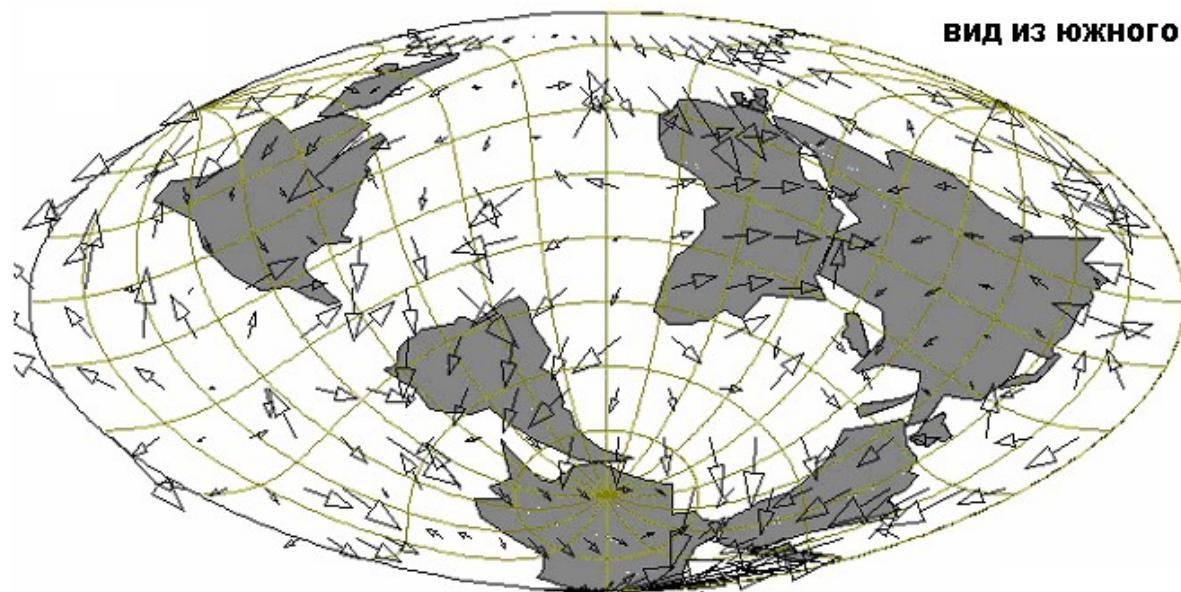
**Ю. Америка поворачивается для плотного соединения с Антарктидой**

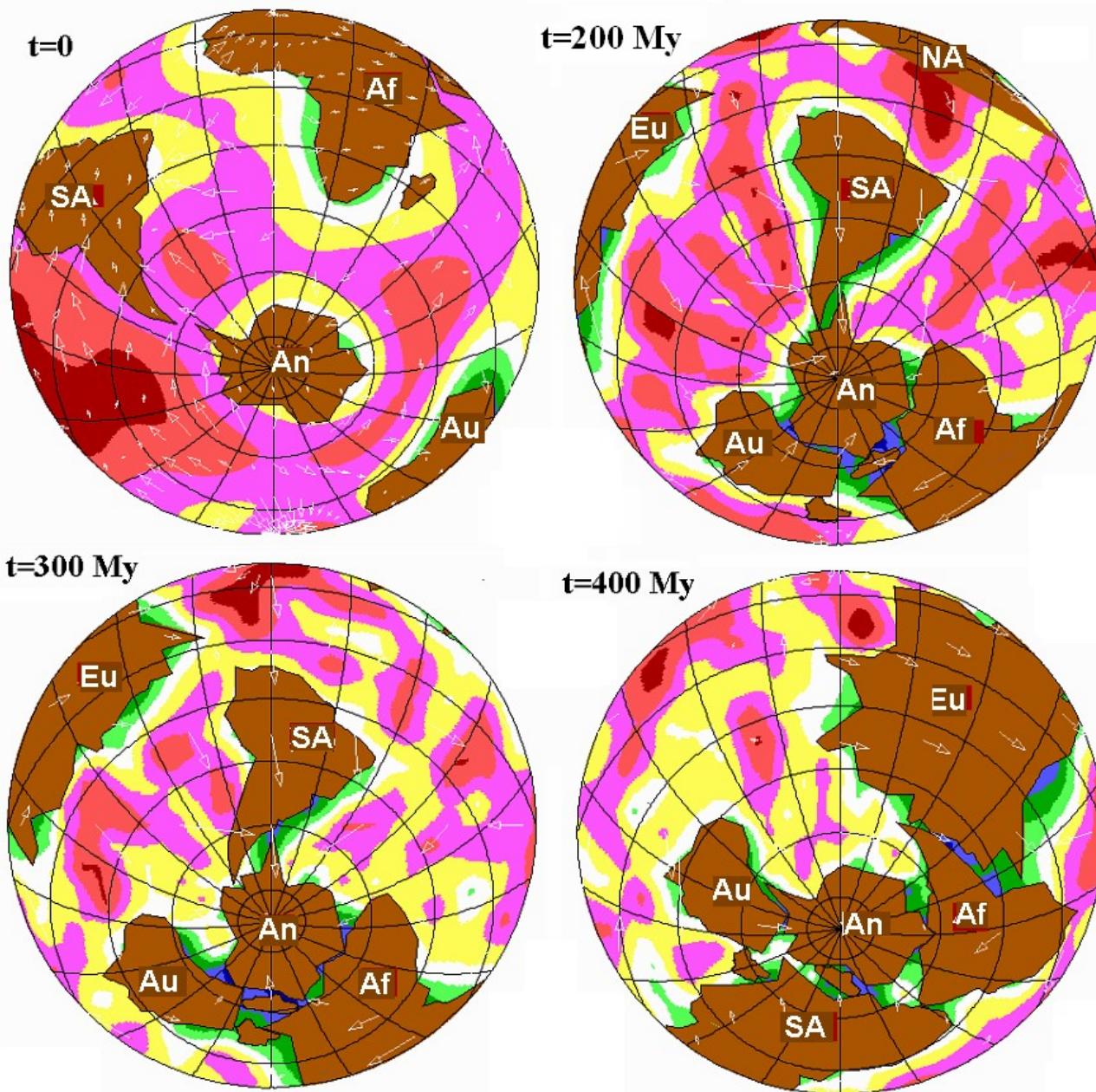
# Земля через 100 млн. лет

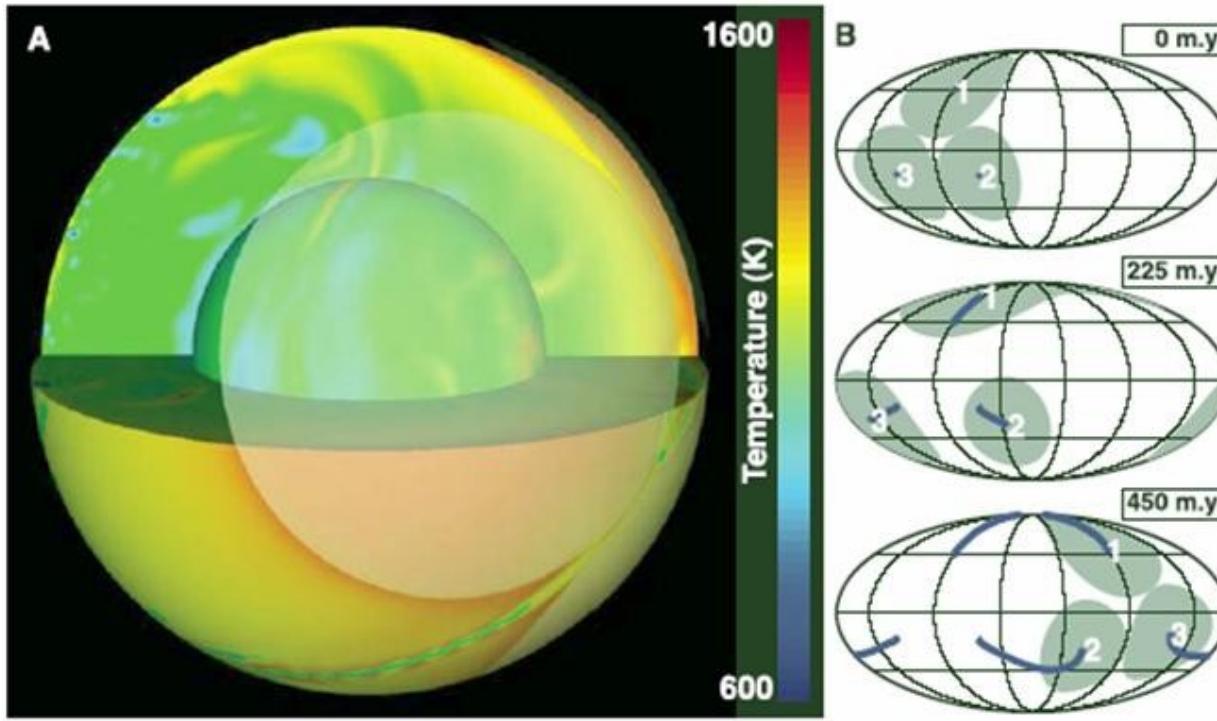
вид с экватора



вид из южного полушария







## Supercontinent cycles disrupted by strong mantle plumes

Benjamin R. Phillips

Earth and Environmental Sciences Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

Hans-Peter Bunge

Department of Earth and Environmental Sciences, Ludwig Maximilians University, Munich, D-80333 Munich, Germany

**GEOLOGY, September 2007**

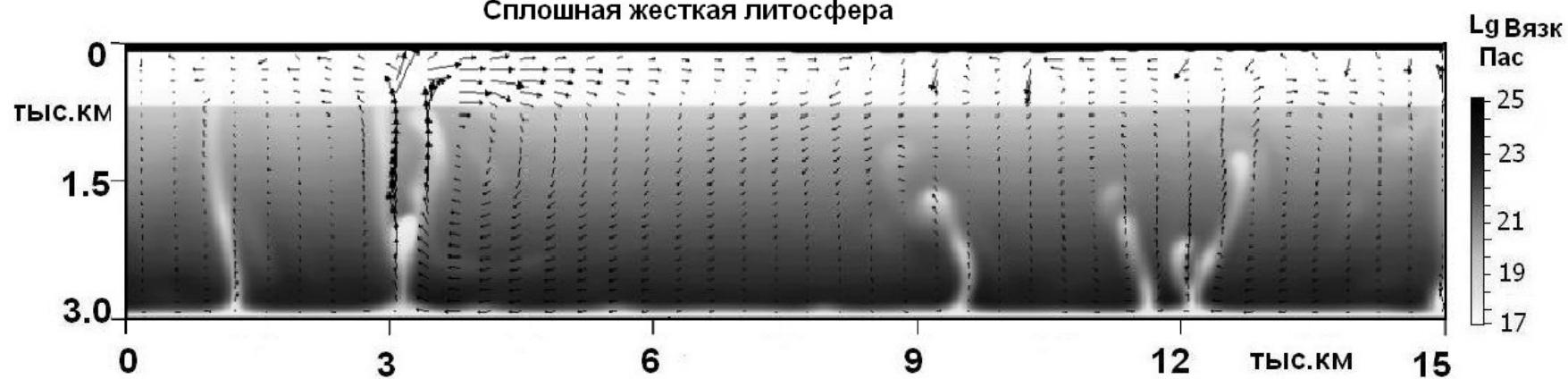
This work builds on the parameter study of Phillips and Bunge (2005), focusing on the extension to multiple continents. Colliding continents generate equal and opposite repulsive forces, preventing overlap and approximating perfect rigidity (Trubitsyn and Rykov, 2001). Our continents do not stick upon collision and are free to move independently throughout model evolution. Time scales for continental dispersal deter-

Абстрактная модель, континенты - круглые диски без столкновений

**2.**

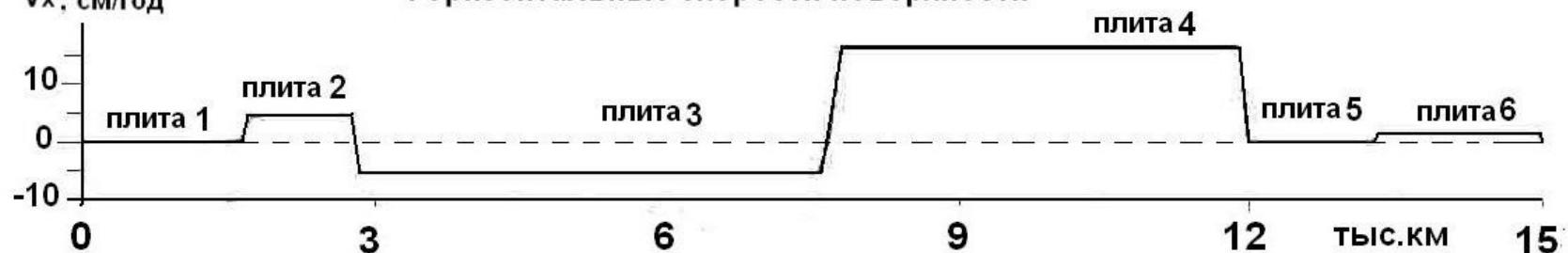
**ТЕКТОНИКА  
ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ**

### Сплошная жесткая литосфера

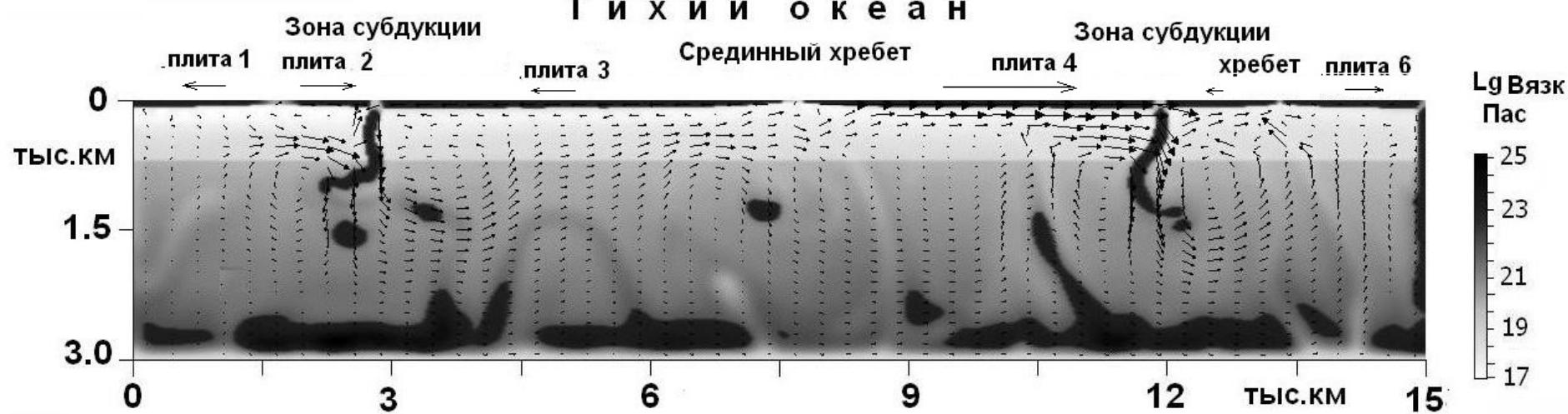


$V_x$ , см/год

### Горизонтальные скорости поверхности

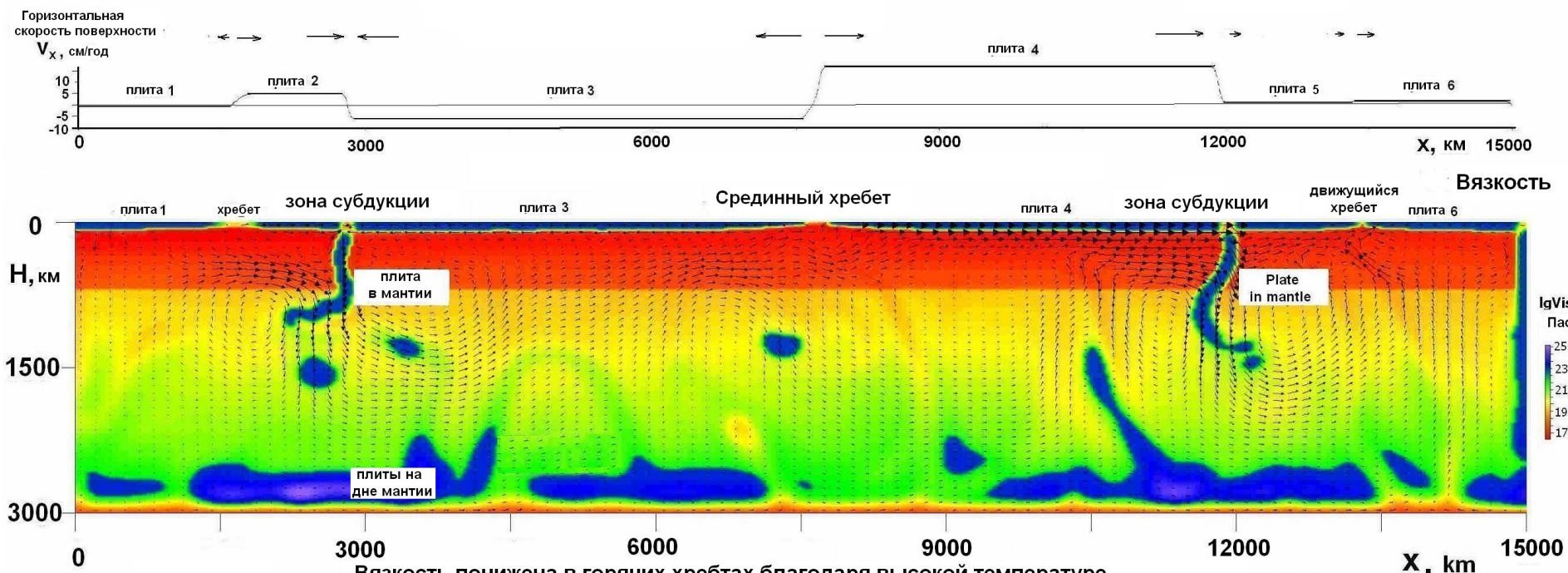


### Тихий океан



Численный эксперимент (Трубицын, ДАН, 2010, № 1, 5)

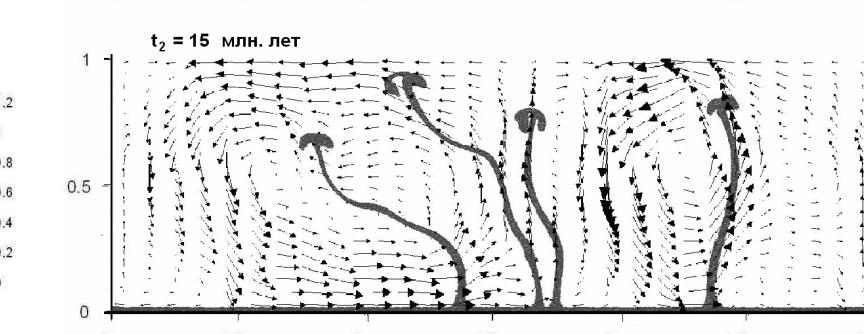
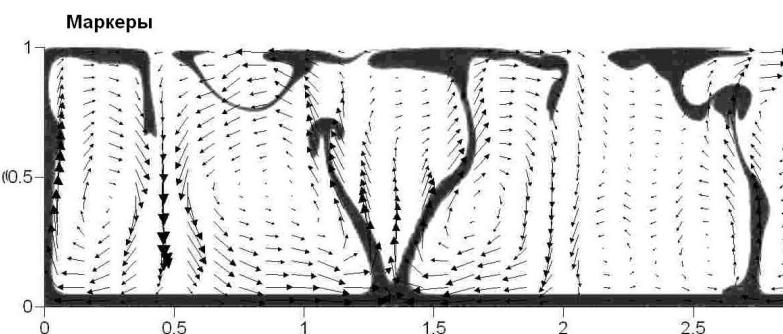
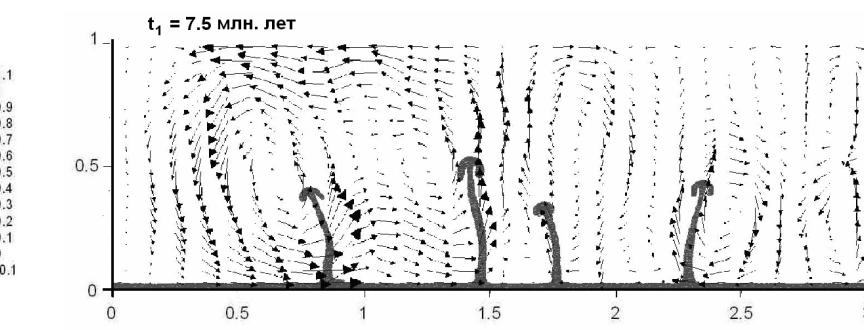
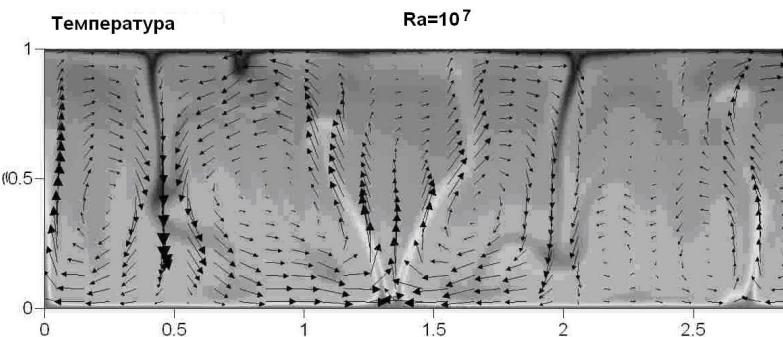
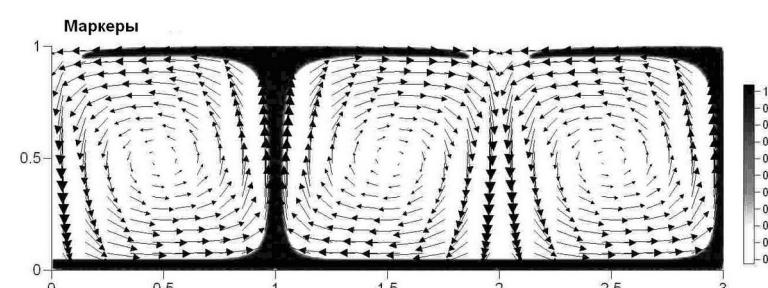
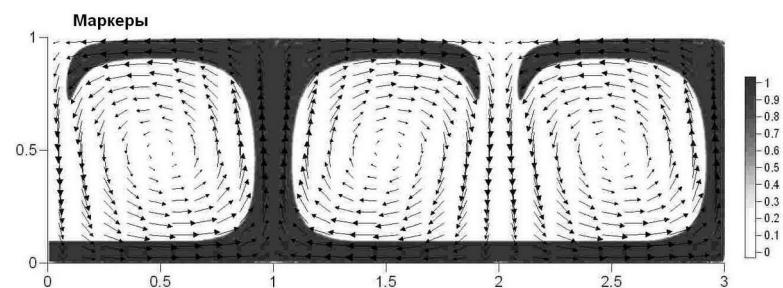
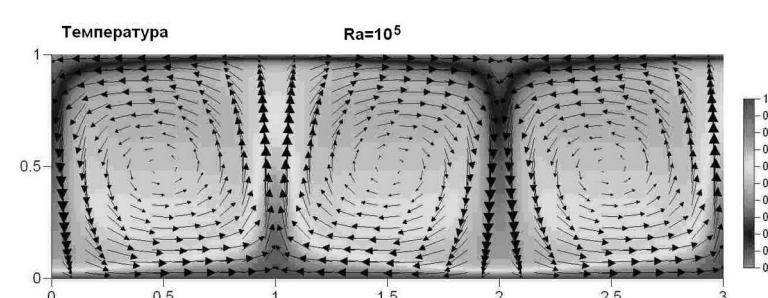
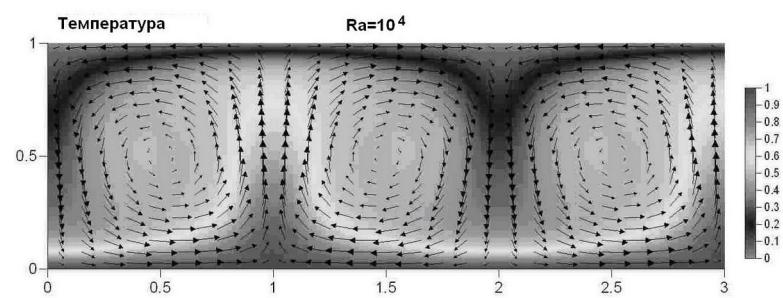
В нагреваемом слое оливина возникает конвекция, воспроизводящая тектонику плит типа Тихого океана

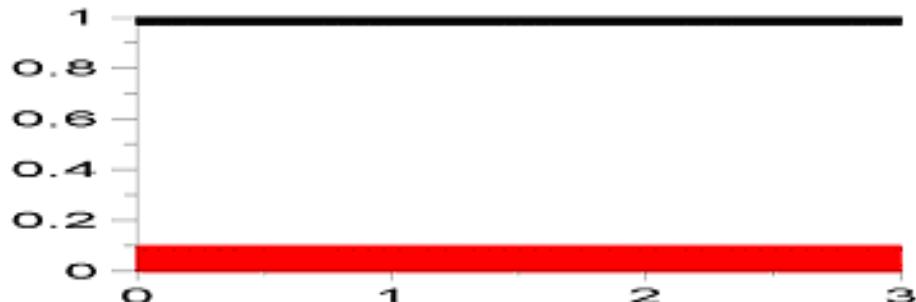


Вязкость понижена в горячих хребтах благодаря высокой температуре и в холодных зонах субдукции благодаря пластиичности при напряжении

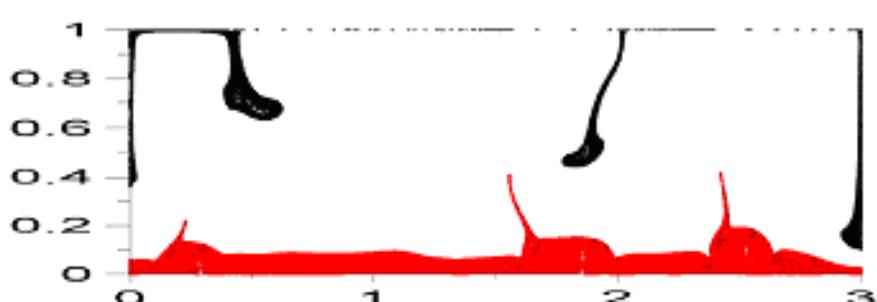
3.

# ТЕКТОНИКА МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ

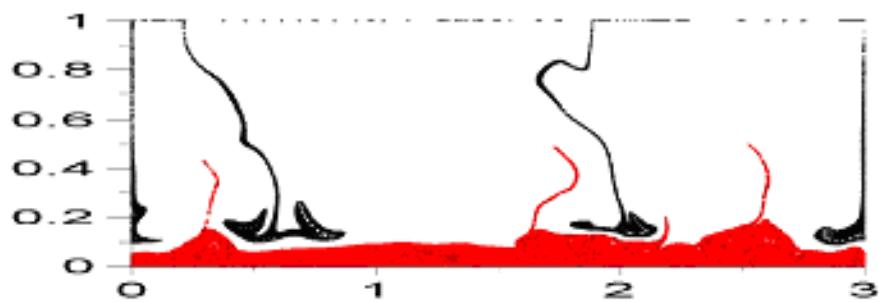




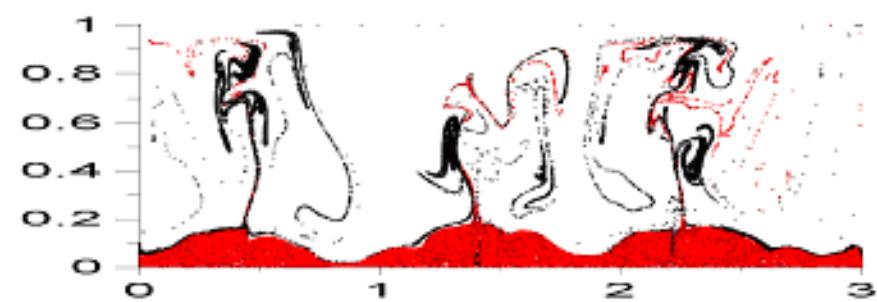
$t=0$



$t=50\text{My}$



$t=150\text{My}$

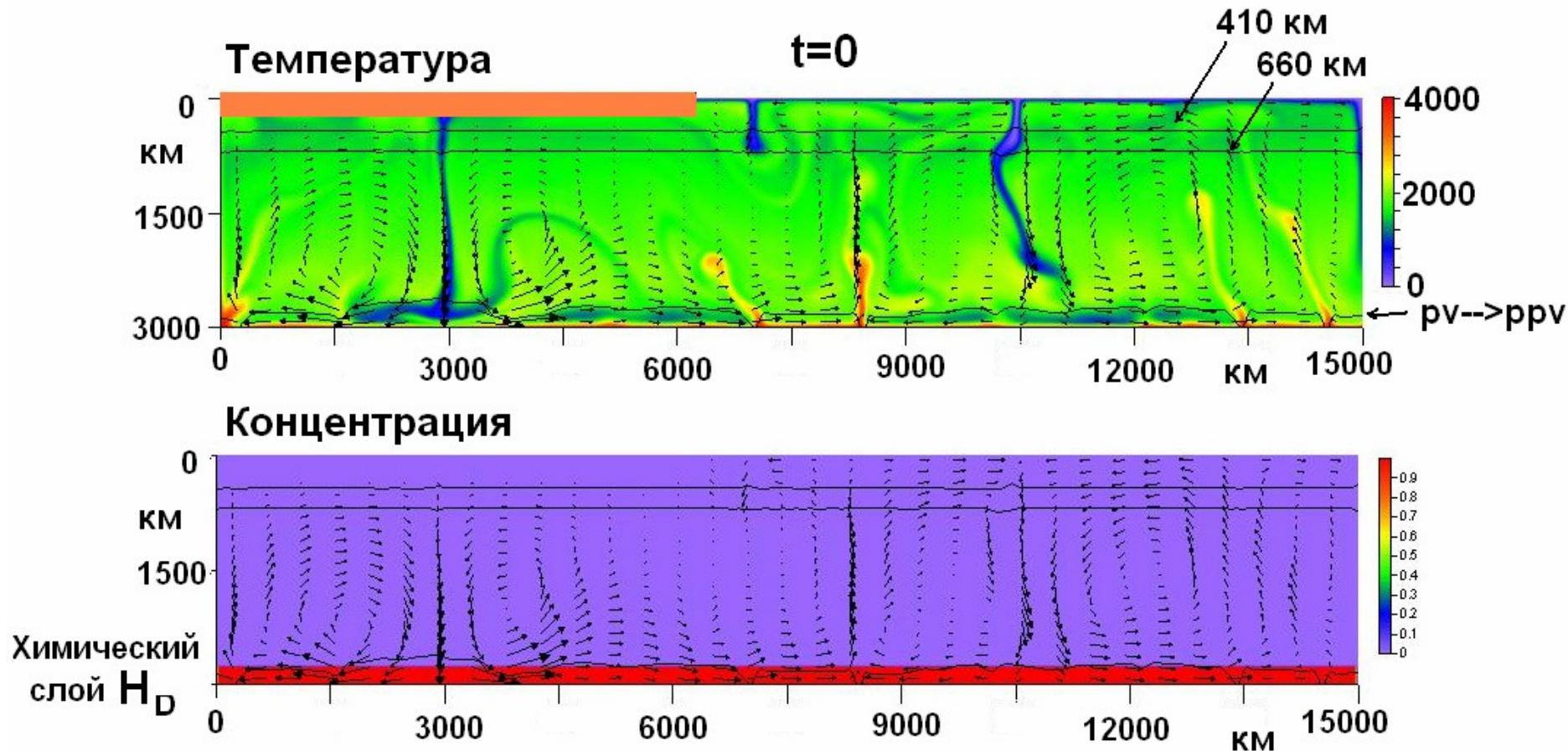


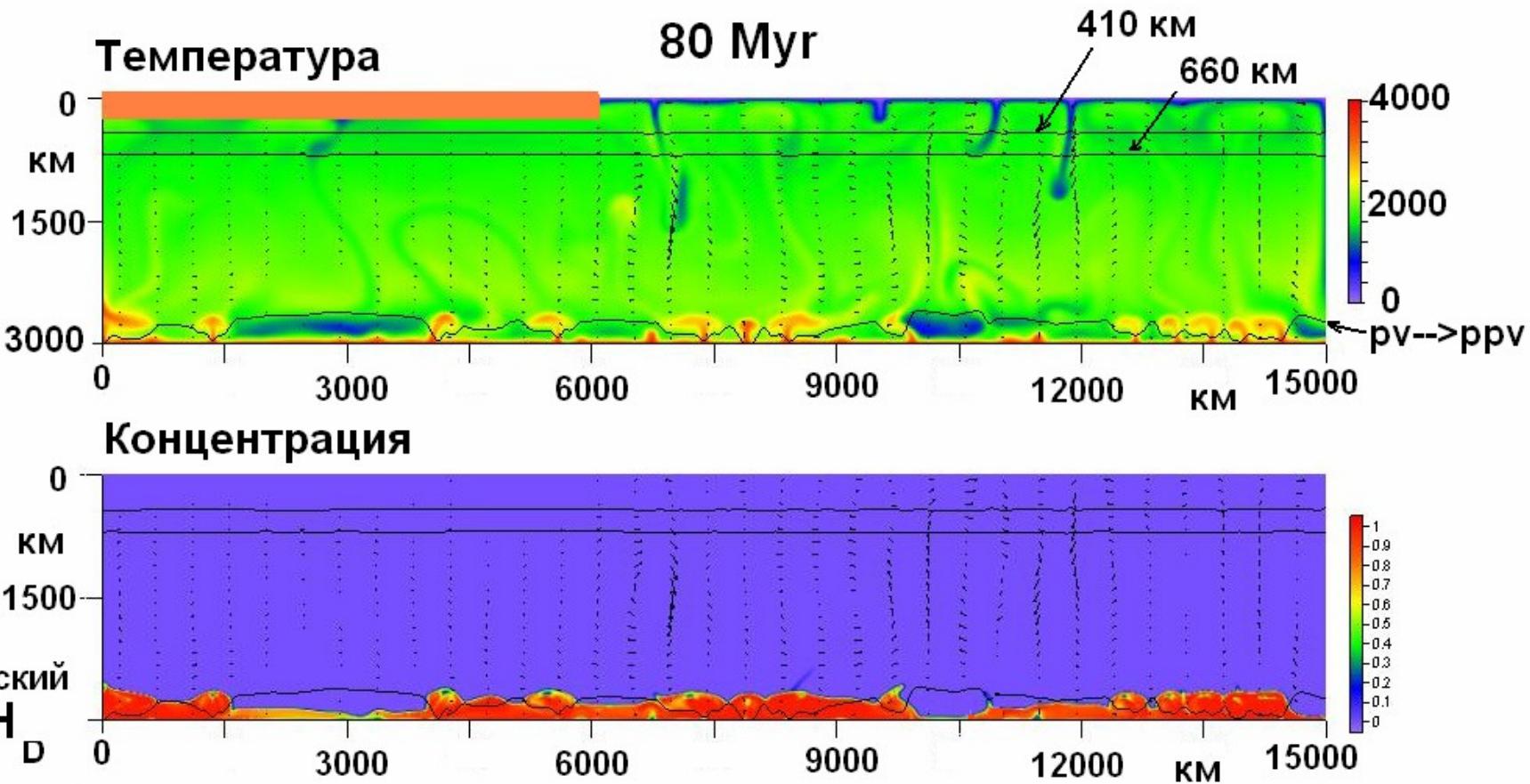
$t=500\text{My}$

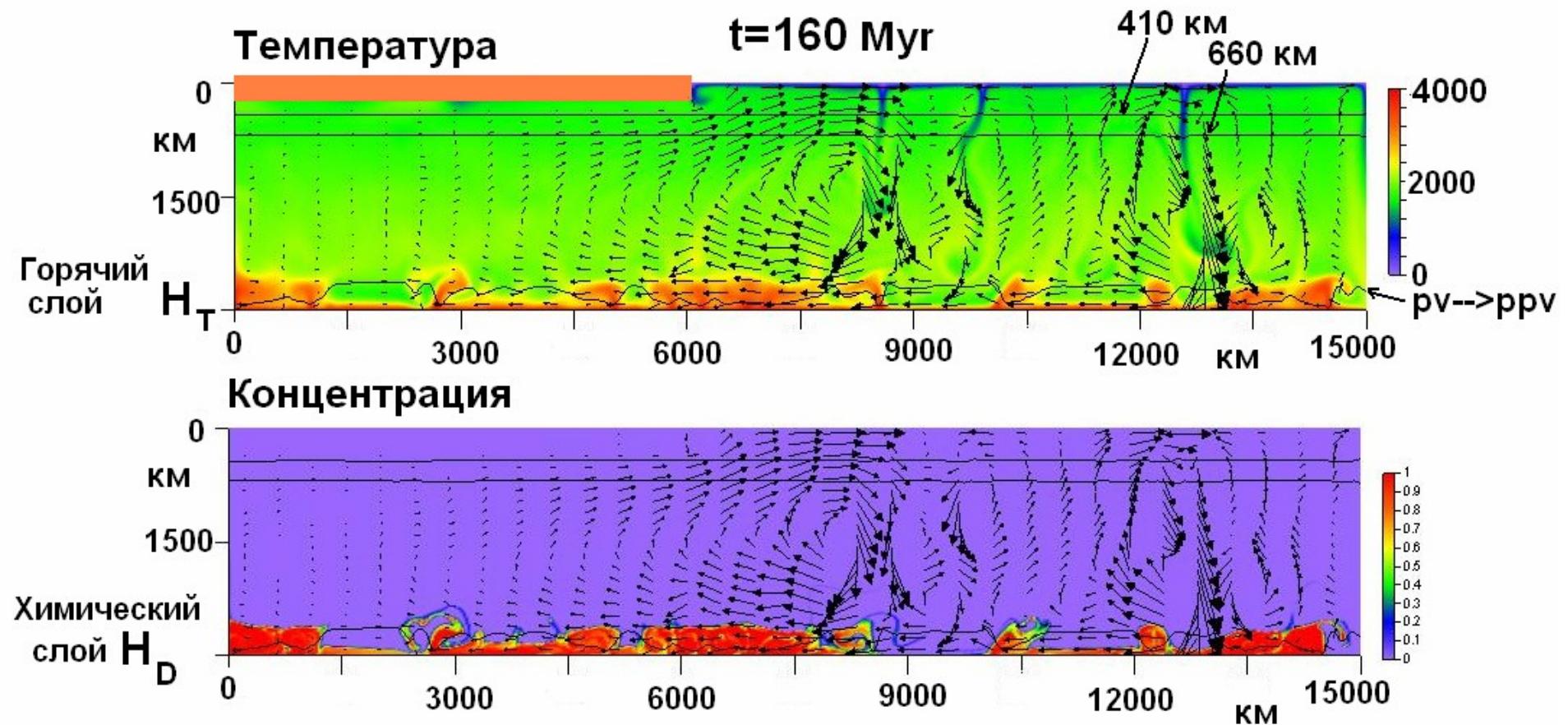
Трубицын В.П. ДАН, 2010, т. 435, №5

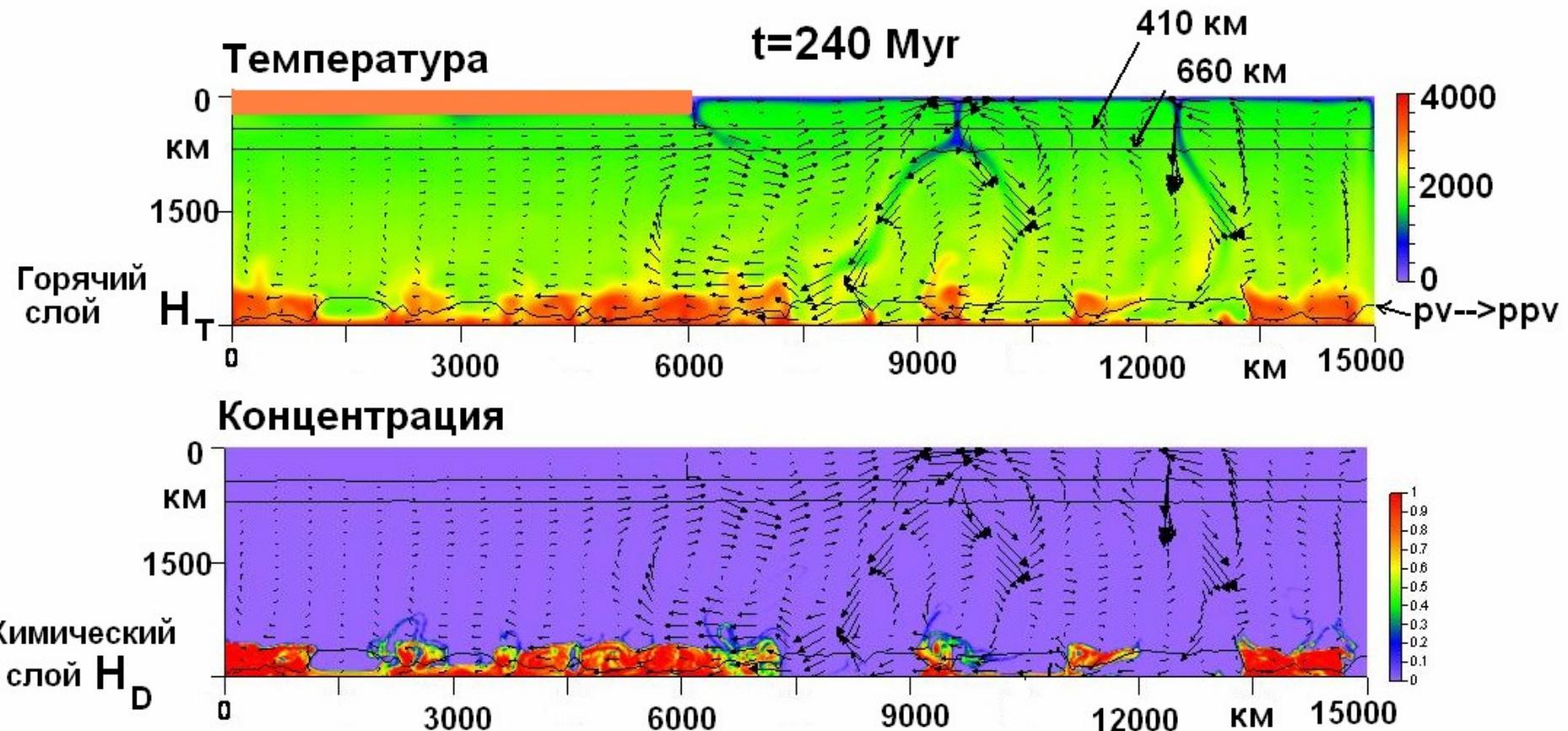
# Деформация слоя D” под влиянием суперконтинента

Начальное состояние: развитая конвекция, в мантию помещается ровный слой D” толщиной 200км со скачком плотности 2.5% и суперконтинент



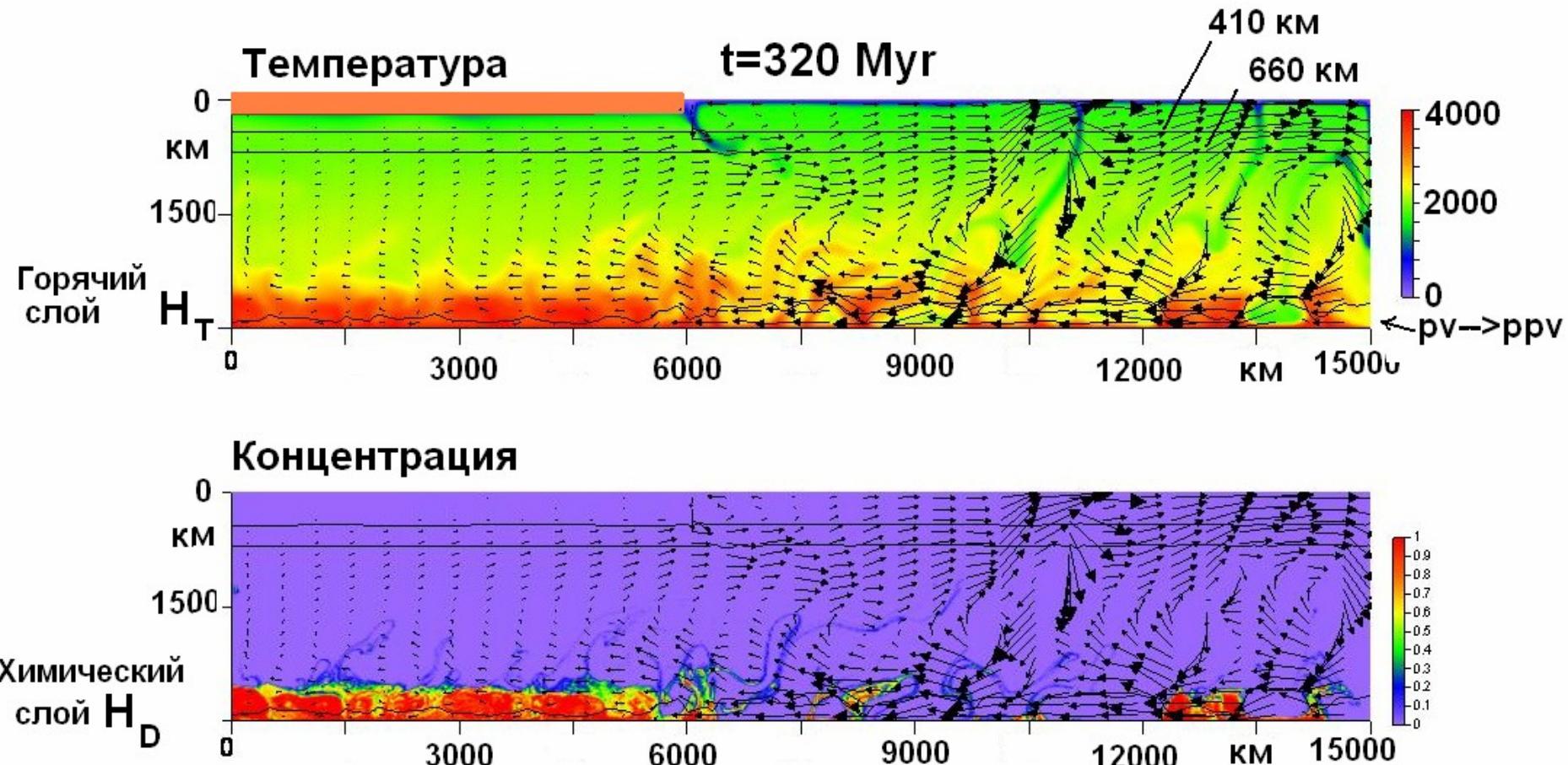


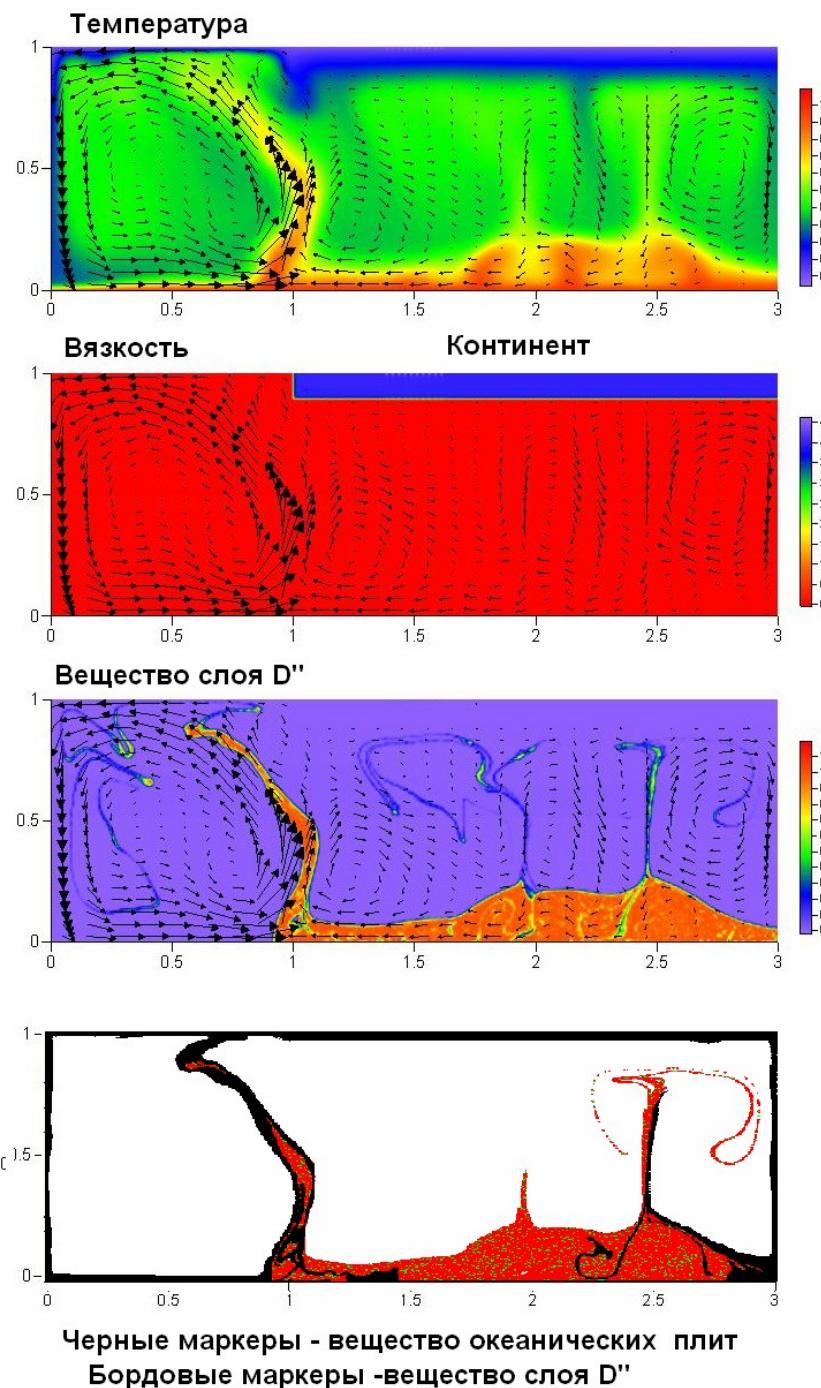




# ВЫВОД по результатам моделирования

Слой D" деформирован  
мантийными течениями. горячие (500-1000K)  
**тяжелые скопления - горы высотой 400-600км**



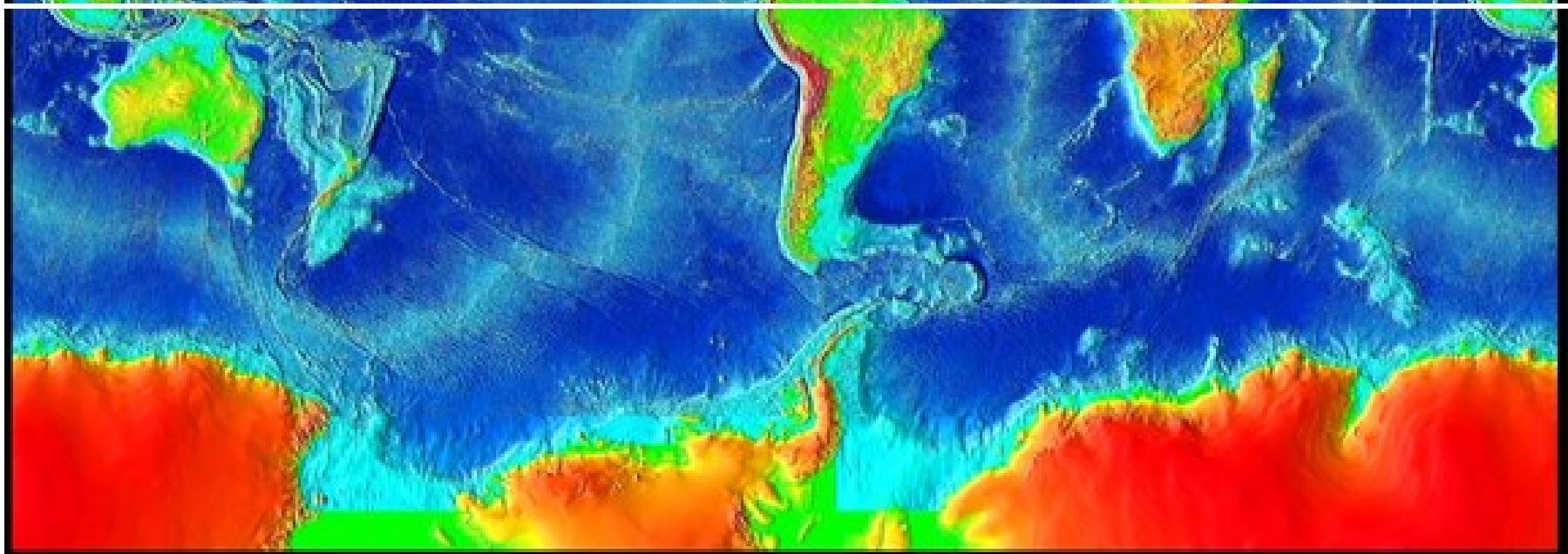
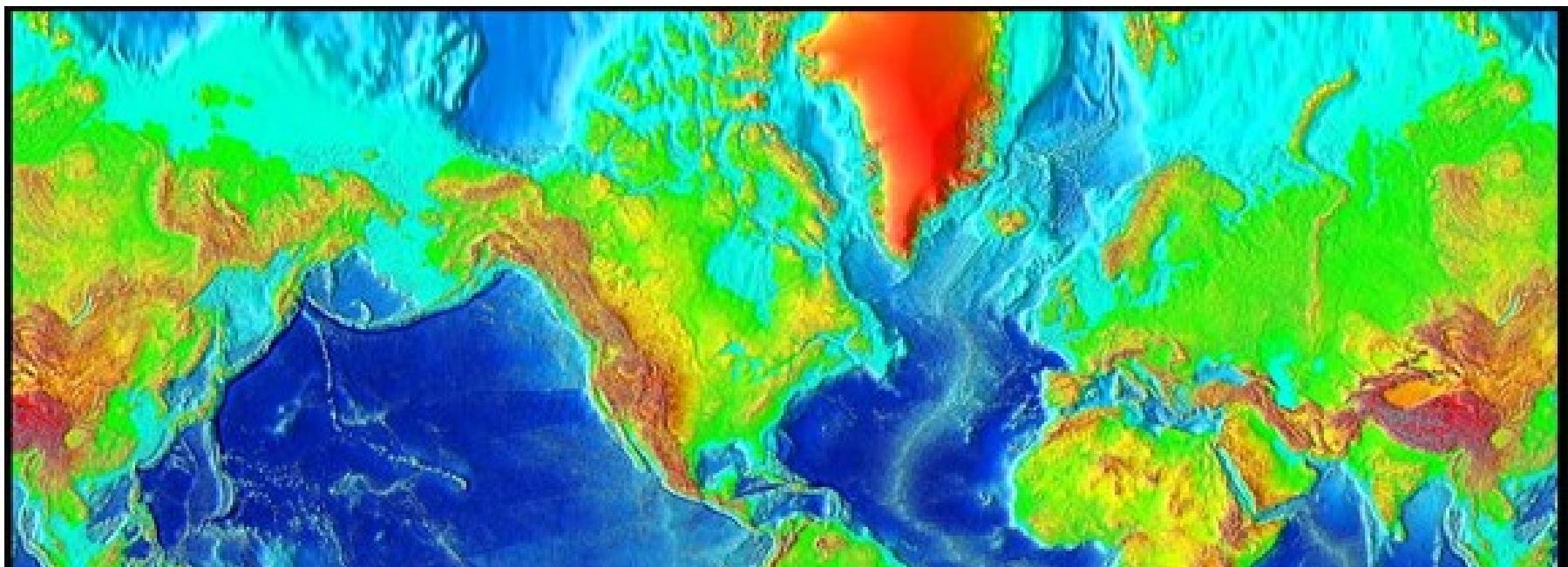


# **Численная модель конвекции с рециркуляцией океанической коры и тяжелым слоем.**

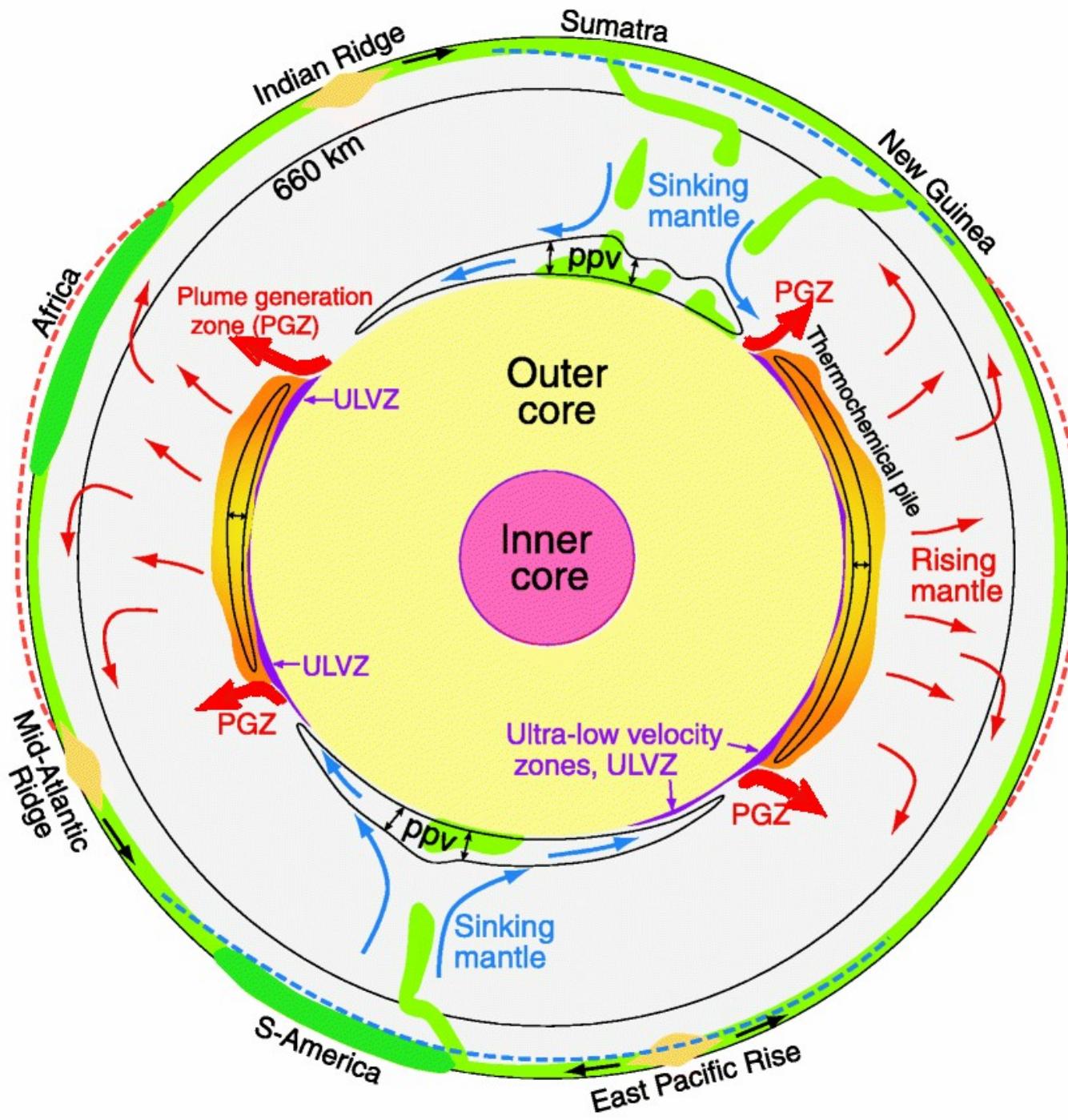
# ВЫВОД по результатам моделирования

## Плюмы возникают на вершине ближайшей горы скопления вещества слоя D”

Трубицын, 2012



# Глобальная тектоническая схема взаимодействия литосферных плит и мантийных плюмов







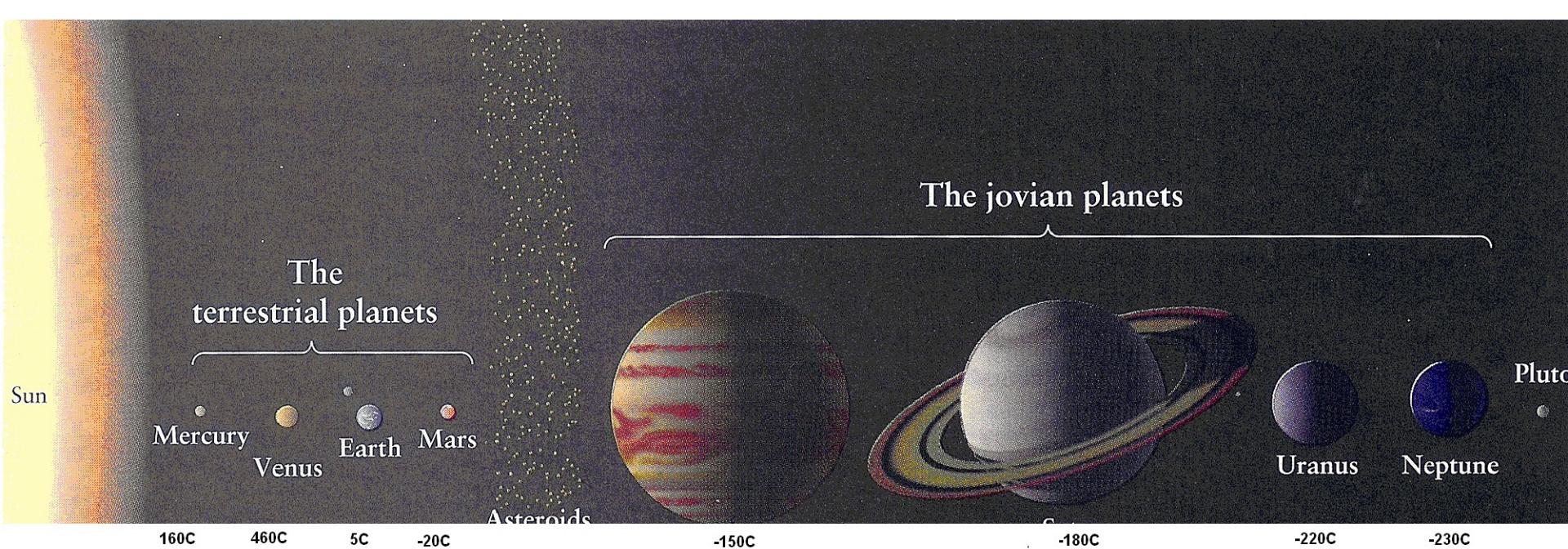
<http://ariom.ru/forum/p1433304.html&sid=dc0ea8f7721e86fde8ff10588982a7df>

[http://images.yandex.ru/yandsearch?no\\_rask=1&lr=213&ed=1&text=%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%82%D1%8B%D0%BD%D0%80%D0%A2%D0%8B%D1%85%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D0%80&p=9&img\\_url=img0.liveinternet.ru%2Fimages%2Fattach%2Fc%2F1%2F45%2F751%2F45751629\\_weltmeere\\_map.jpg&rpt=simage](http://images.yandex.ru/yandsearch?no_rask=1&lr=213&ed=1&text=%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%82%D1%8B%D0%BD%D0%80%D0%A2%D0%8B%D1%85%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%BD%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D0%80&p=9&img_url=img0.liveinternet.ru%2Fimages%2Fattach%2Fc%2F1%2F45%2F751%2F45751629_weltmeere_map.jpg&rpt=simage)

## **Горы = вулканы+складки**



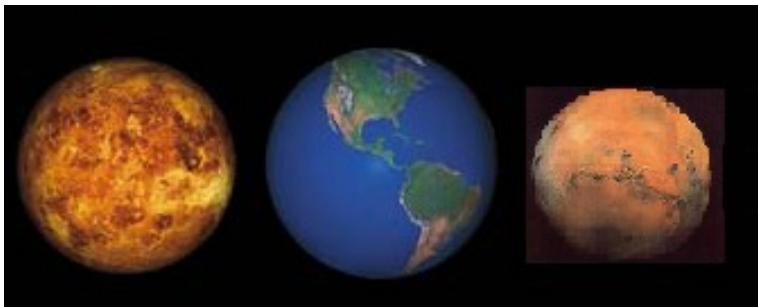
**4.57 млрд. лет**



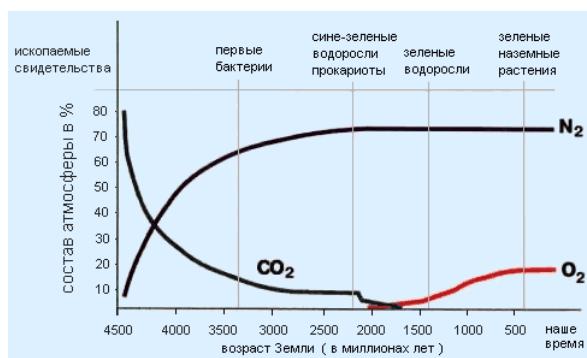
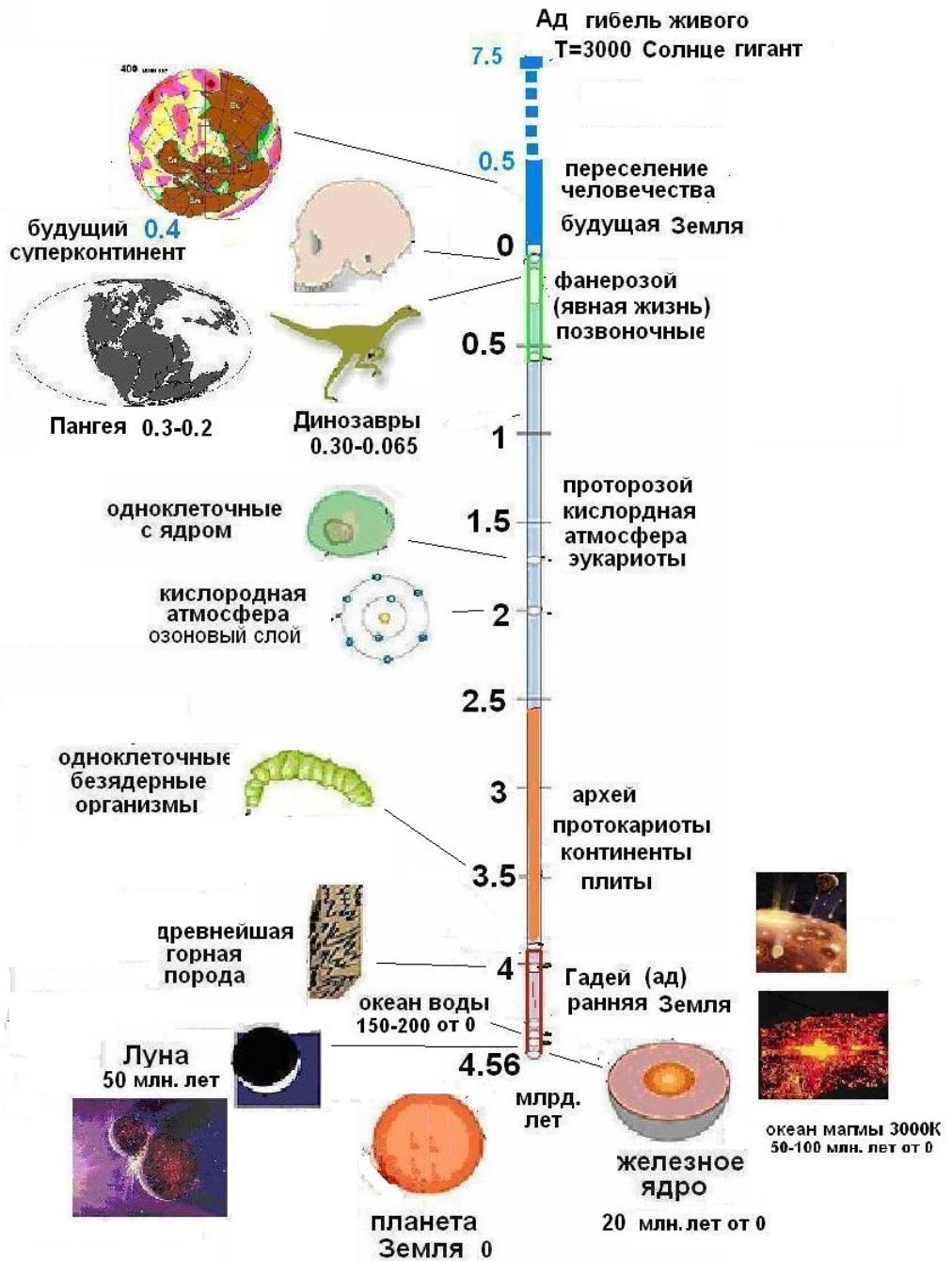
**Железо+ силикаты**  
твердые каменные

**Тепло и гравитация Солнца + внутреннее тепло**

**Водород+гелий+вода+аммиак+метан**  
твердые ледяные до 1966  
газо-жидкие: Трубицын, 1966; Трубицын, Жарков, 1970: "ПИОНЕР", 1972



## **История Земли** (млрд. лет в прошлое)



## Процессы в мантии Земли

векция под жесткой литосферой, расколотой на плиты. Они рождаются при застывании магмы в океанических хребтах субдукции. На стыках плит - землетрясения. Легкие континенты плавают на мантии. На дне мантии гигантские (40 км) горячего утяжеленного вещества. Там зарождаются плюмы (горячие грибовидные струи), создающие крупнейшие вулканы.



варке каши) вещество находится в движении верхность в срединно-океанических хребтах.

о океана упирается в Евразию и в С. и Ю. Америку то в мантию. Благодаря трению на стыке дна и континентов происходят крупнейшие

2. Расходясь в разные стороны и остывая, оно образует дно океанов. В атлантическом океане движущееся дно упирается в Африку и Ю.Америку и раздвигает их.
4. На дне мантии под Тихим океаном и под Африкой имеются два скопления тяжелого горячего вещества. На их краях возникают восходящие плюмы. Они создают крупнейшие вулканы.

**Геодинамическая теория, воспроизводящая всю совокупность глобальных процессов в мантии Земли**  
а Земли, 2000, 2006, 2010, 2012

