

# 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:

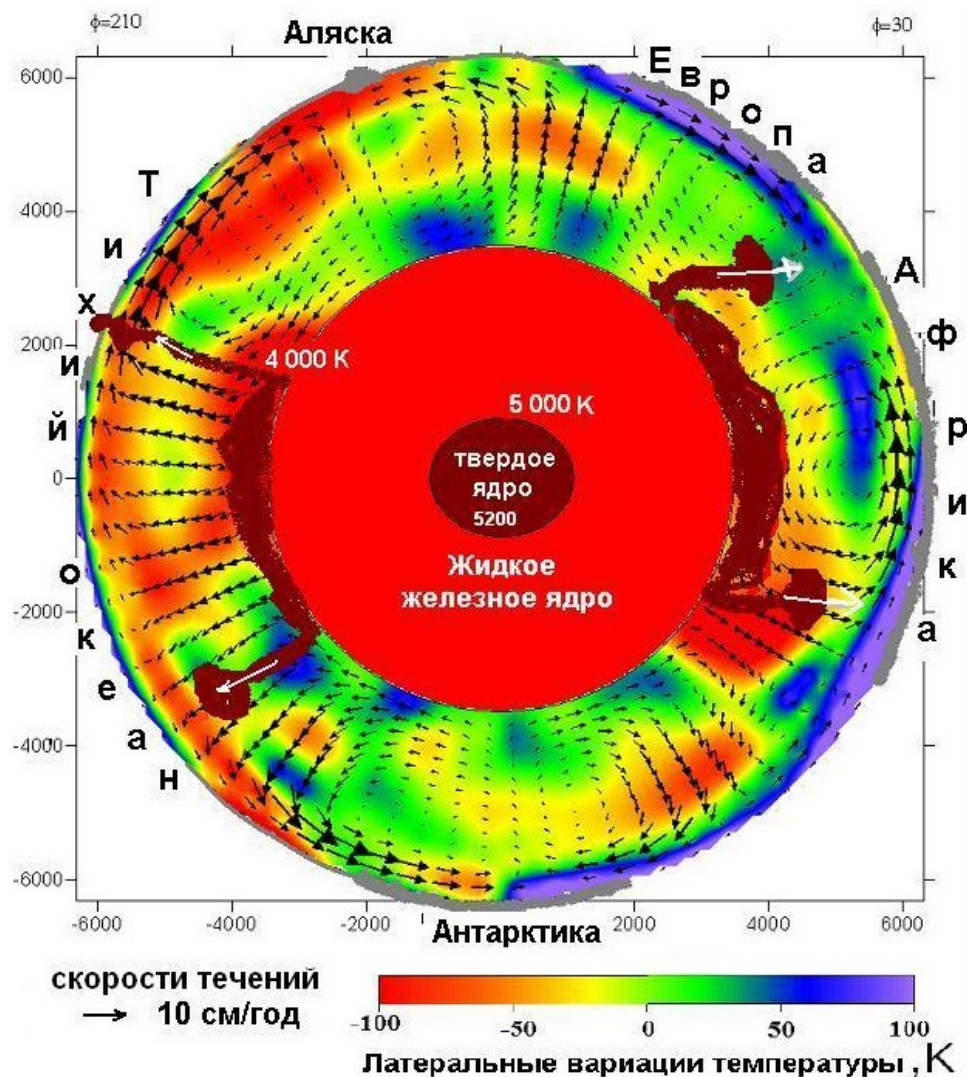
Земля = жидкое железное ядро + твердая каменная упругая мантия.

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 (10см/год)

Ядро 1мм/с (10км/год)

6 порядков

**Лат. перепады температуры**

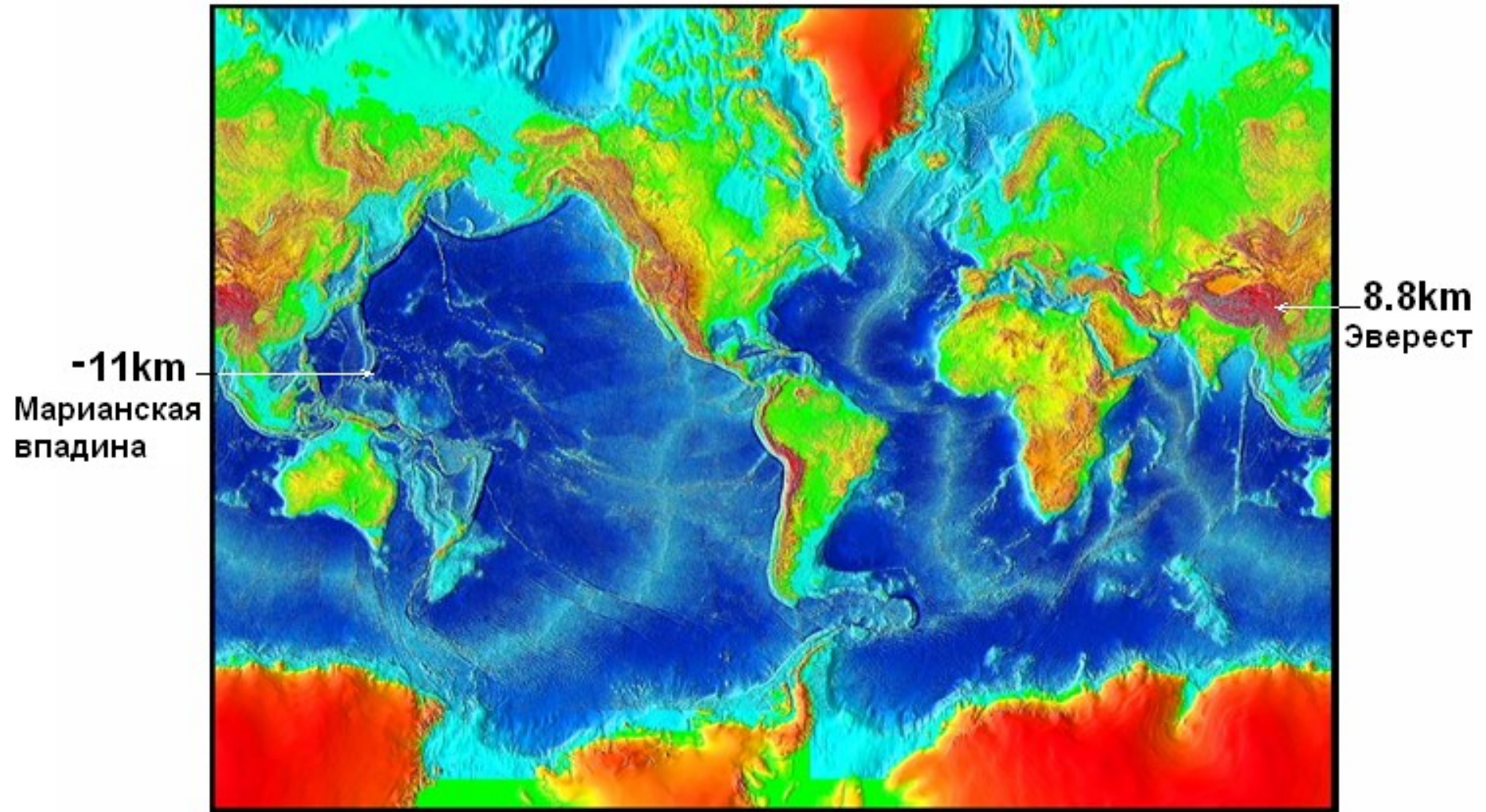
Мантия 500К

Ядро 0.0001К

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

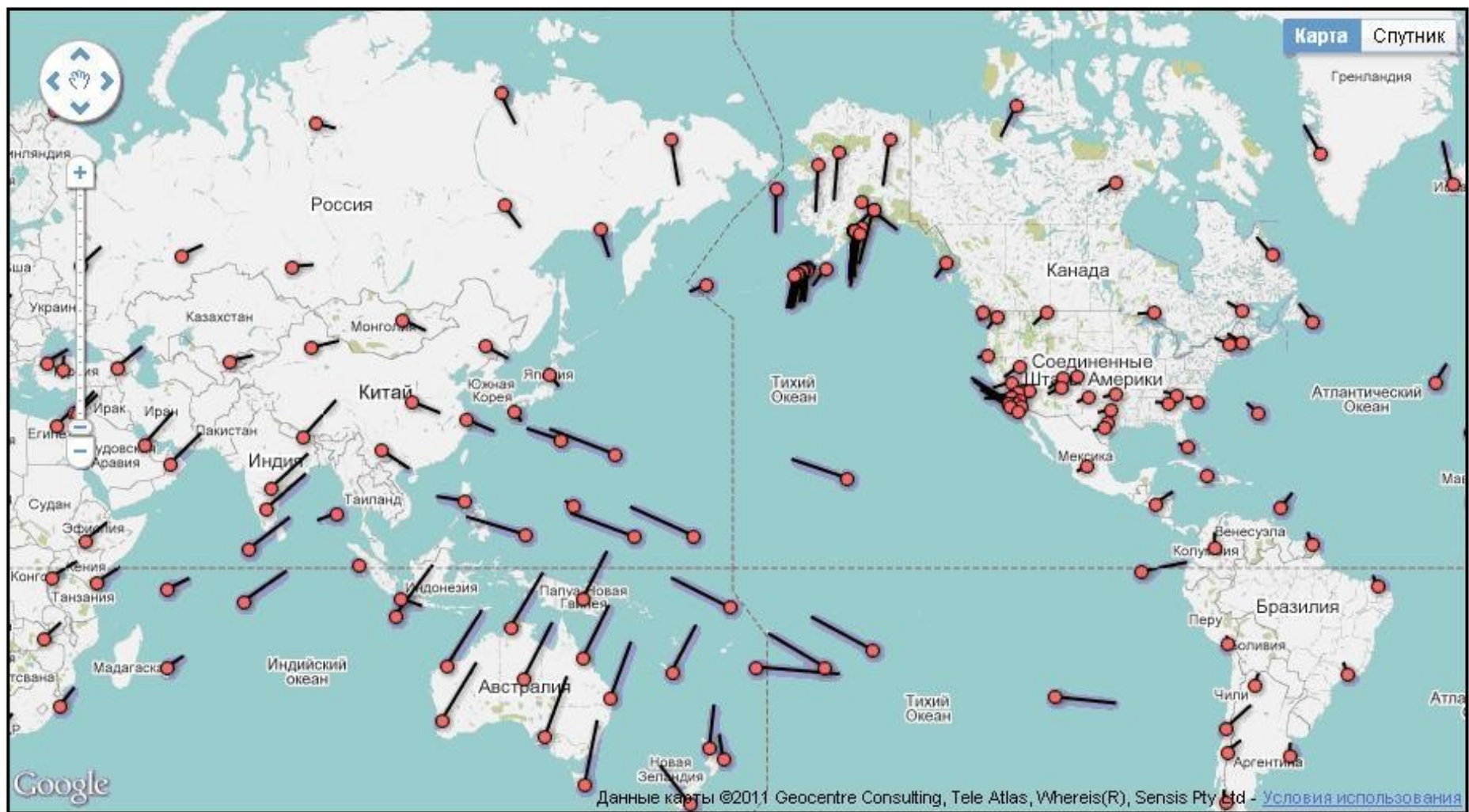
Трубицын, 2010

# Рельеф Земли



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





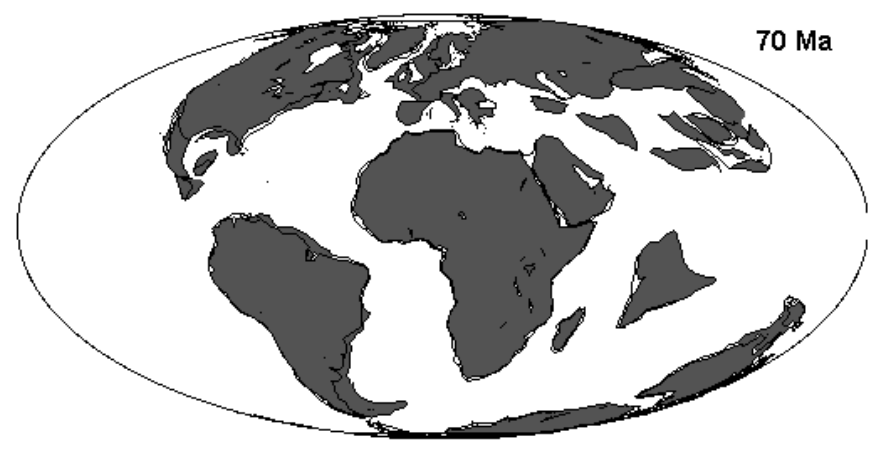
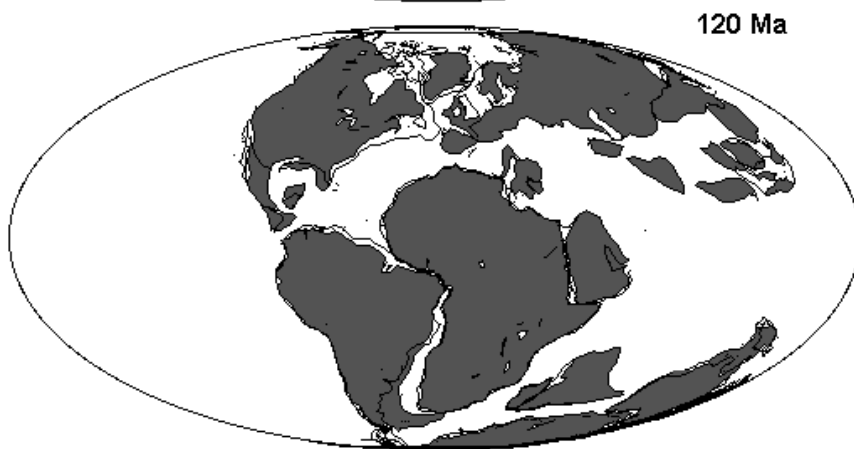
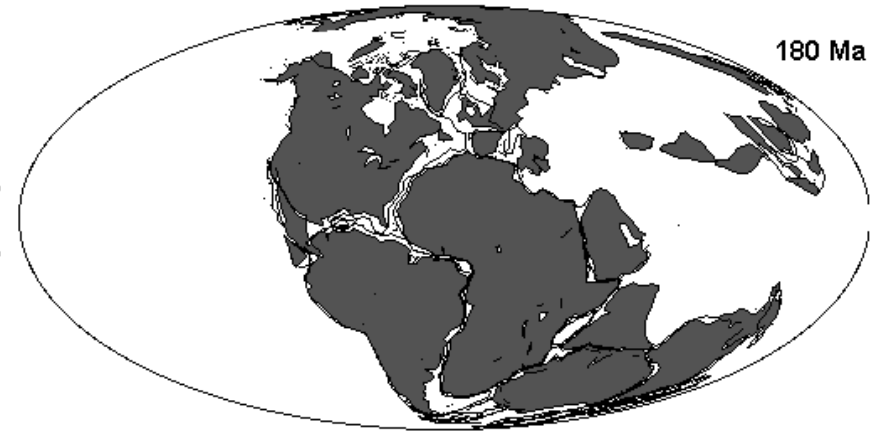
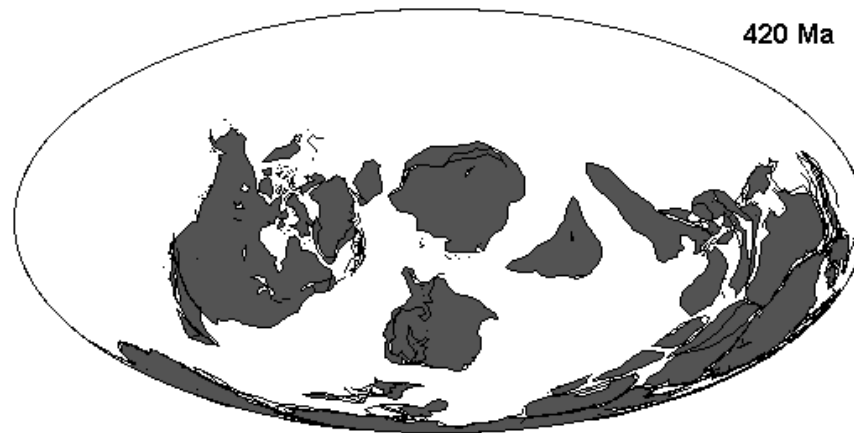
**Скорости перемещения точек поверхности по данным спутников GPS**

$$V_{\text{макс}} = 10 \text{ см/год} = 3 \text{ мм/с}$$

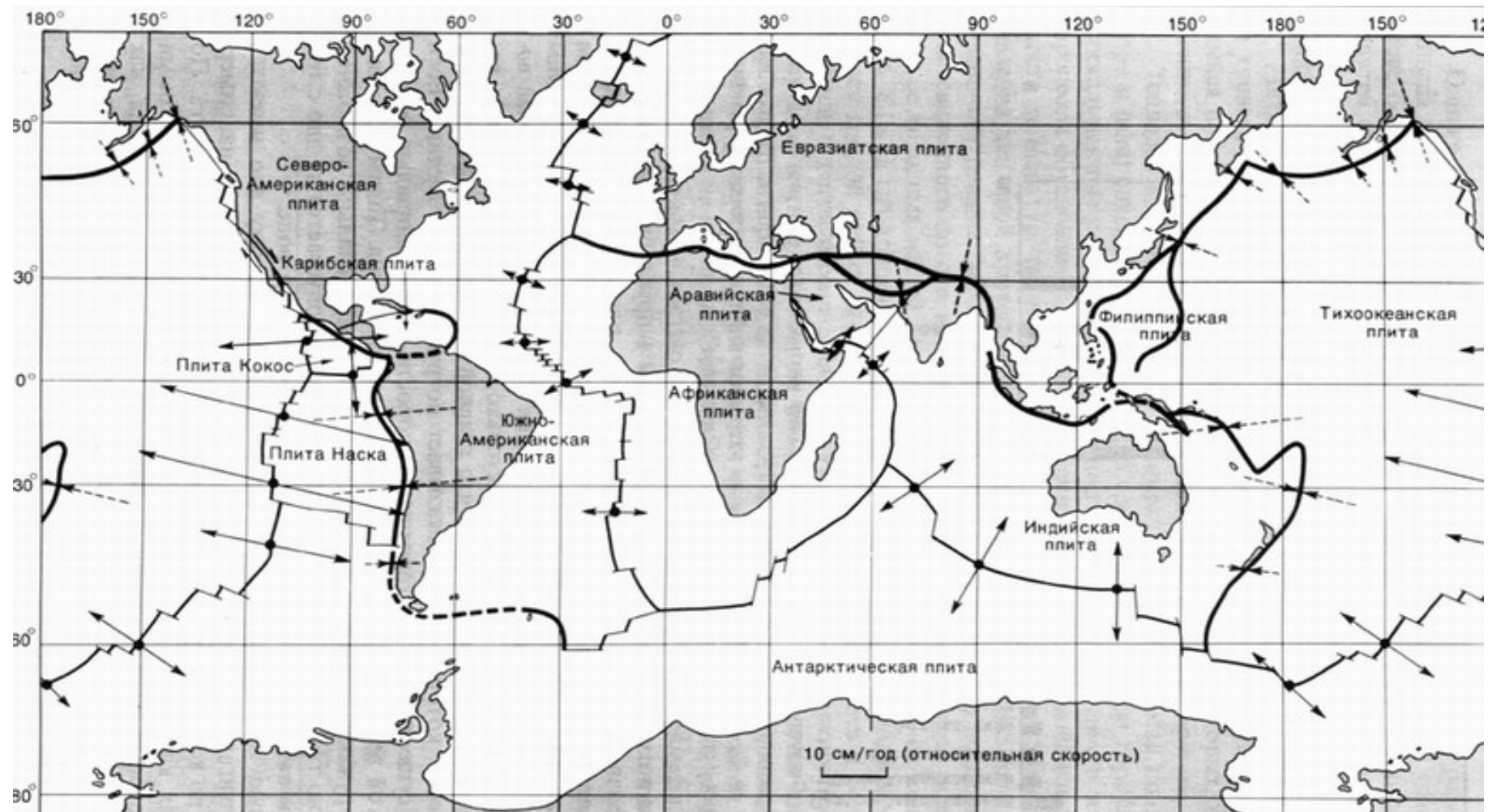


# ДРЕЙФ КОНТИНЕНТОВ (Вегенер, 1912-2000)

## Геологическая реконструкция положения континентов



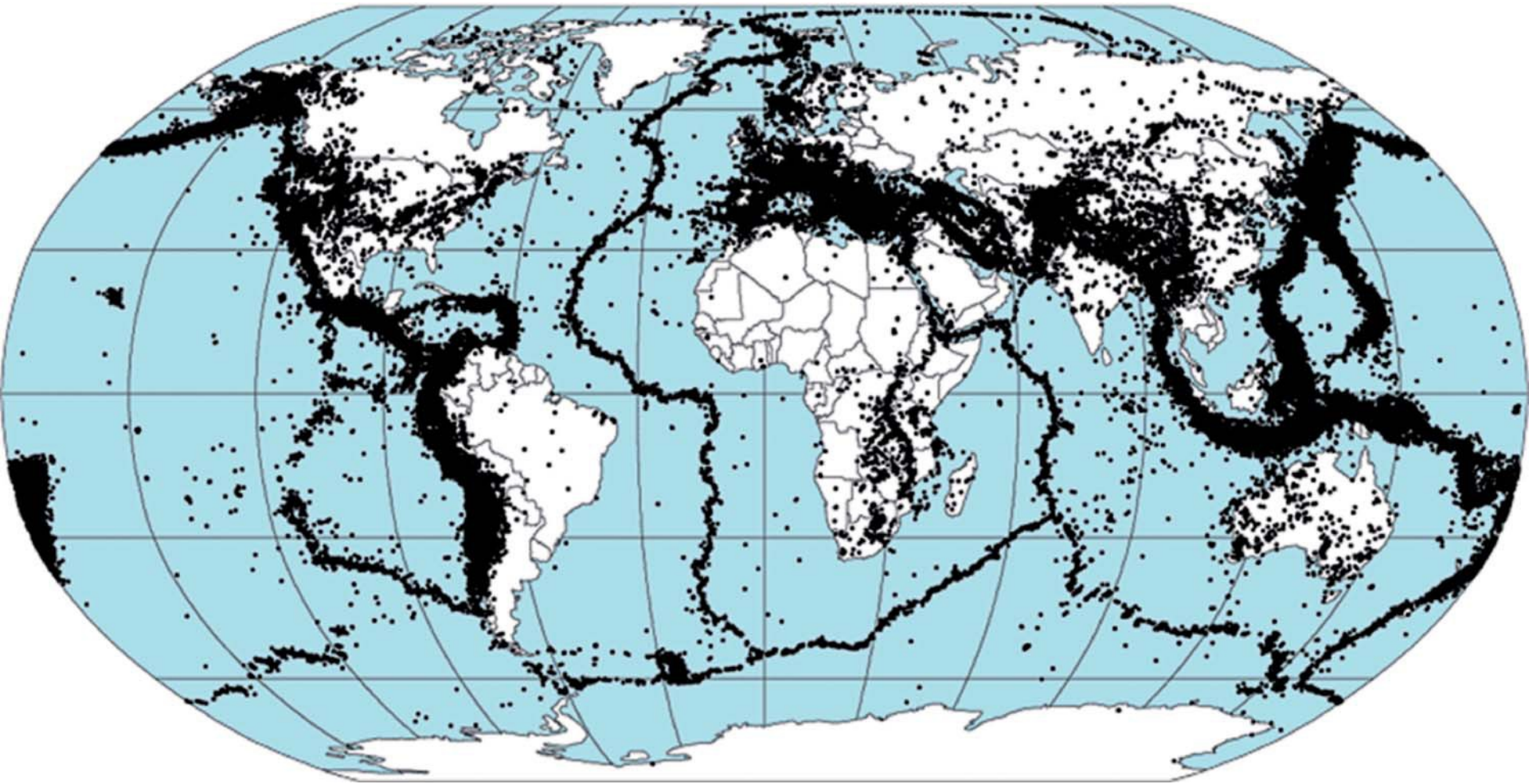
# ЛИТОСФЕРНЫЕ ПЛИТЫ (континенты с прилегающим дном океана)



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

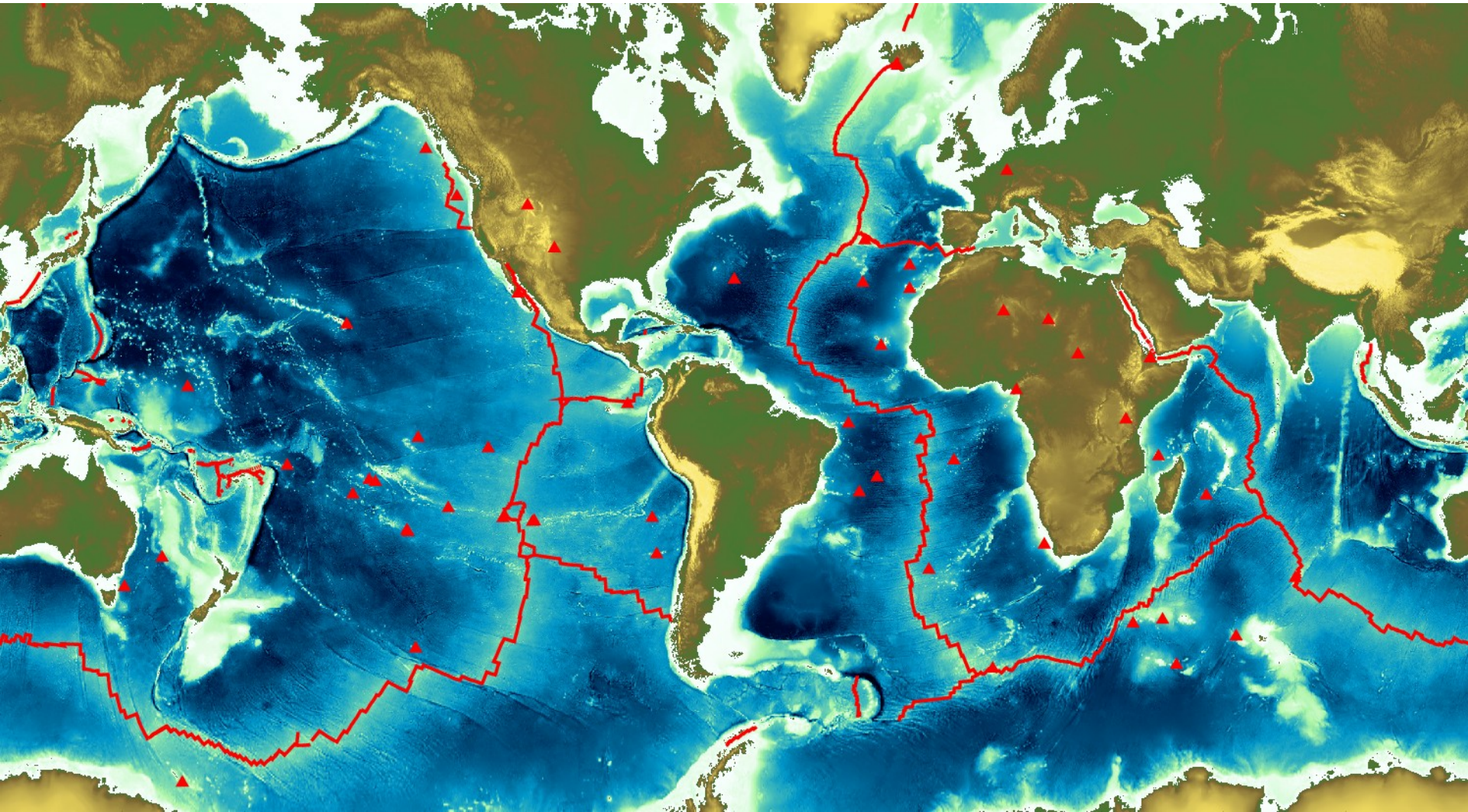
при вертикальном и горизонтальном зацеплении



Эпицентры землетрясений



# ВУЛКАНЫ (2 типа: поверхностные и глубинные)



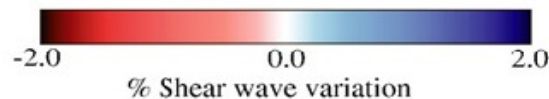
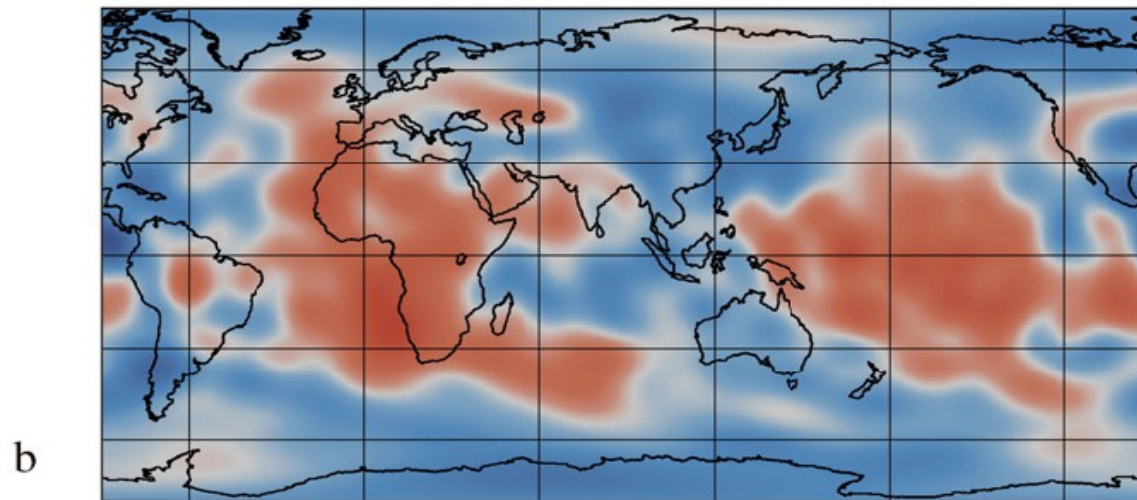
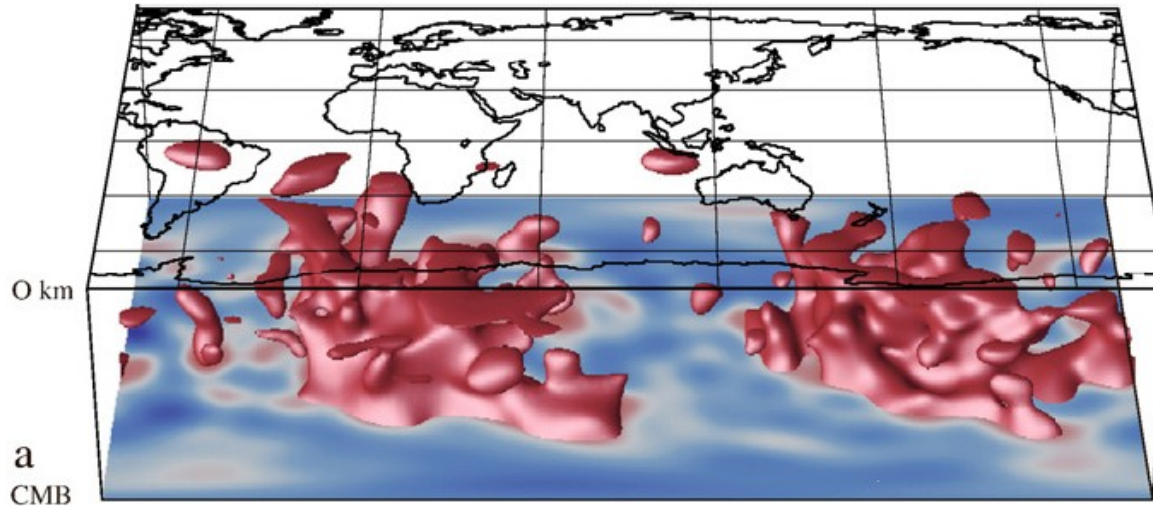
**Океанические хребты – сплошные линейные цепи поверхностных вулканов**  
(разделяют плиты и не совпадают с континентами)

**Горячие точки -сильнейшие действующие одиночные вулканы**  
(не зависимы 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

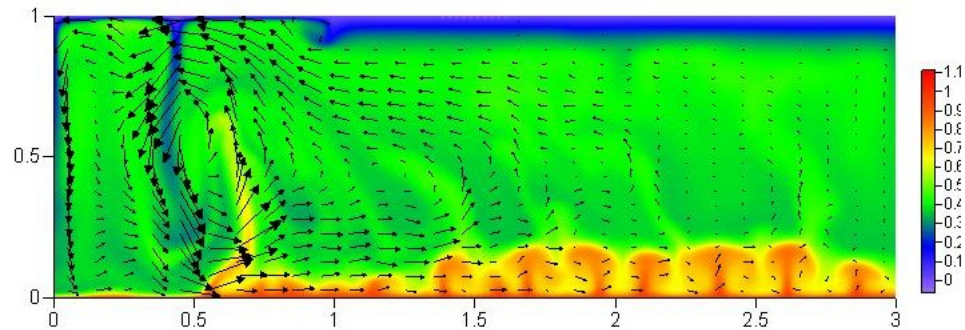
Единая теория взаимодействия глобального вулканизма, литосферных плит и плавающих континентов.

Гидродинамическая модель вязкой смеси с плавающими твердыми телами



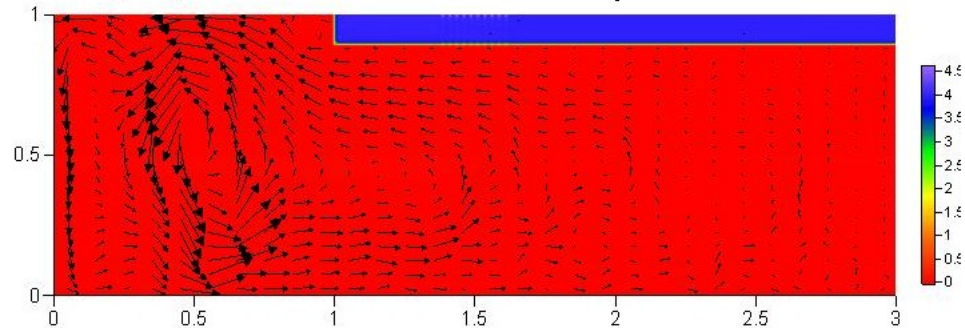
Континент влияет на конвекцию, течения деформируют осадок,  
на периферии возникают плюмы - вулканы

Температура



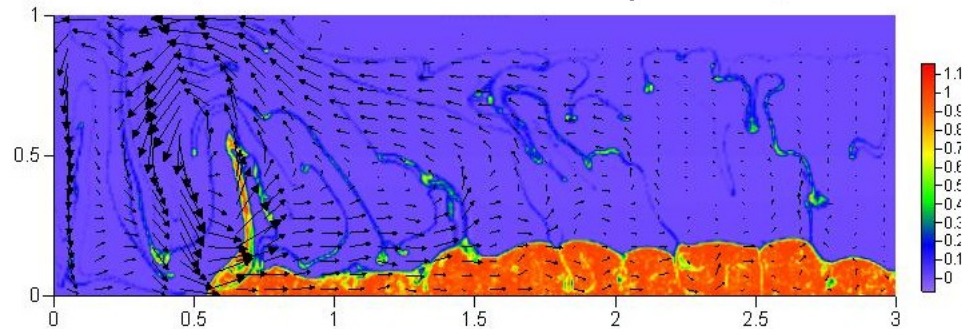
Вязкость

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)

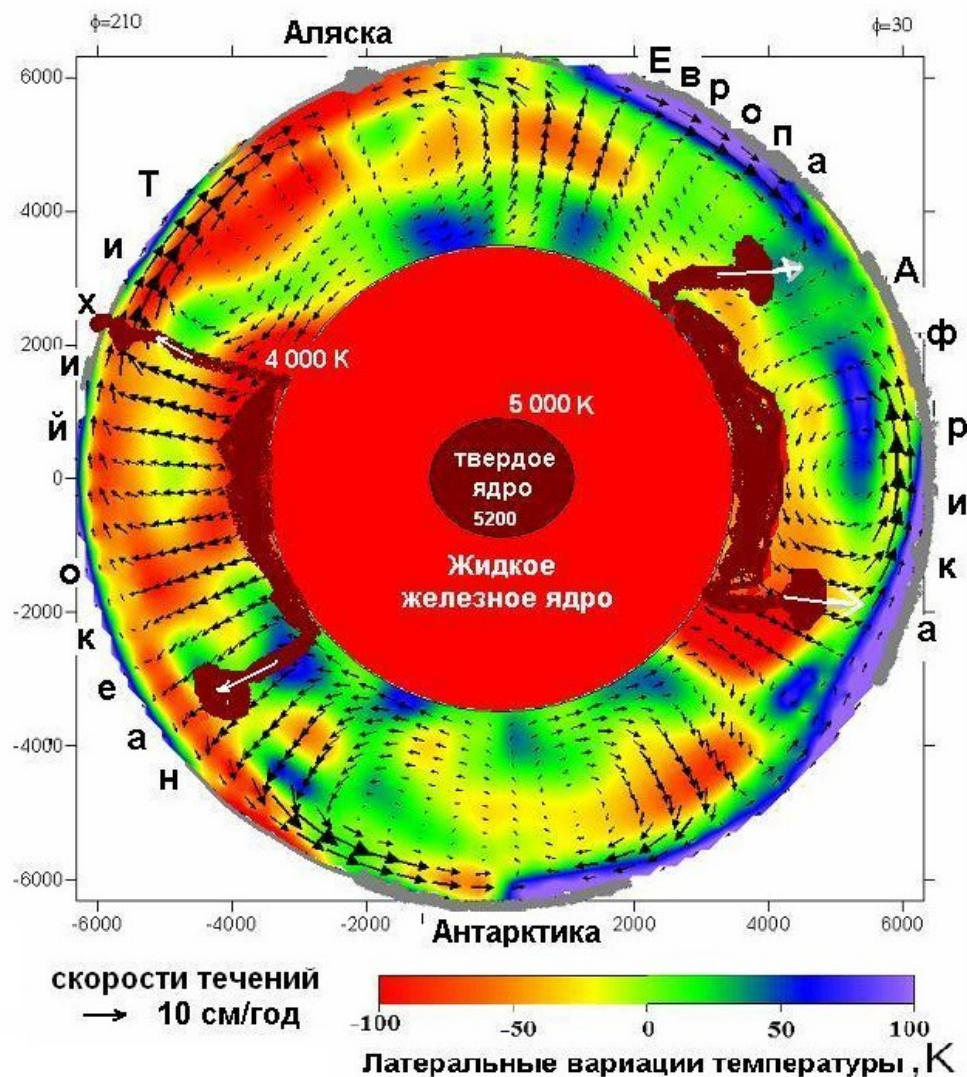
**2010-2012 -Численные эксперименты, воспроизводящие общемантийную конвекцию под жесткой литосферой с расколами на систему плит, погружающихся в мантию.**

(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 (10см/год)

Ядро 1мм/с (10км/год)

6 порядков

**Лат. перепады температуры**

Мантия 500К

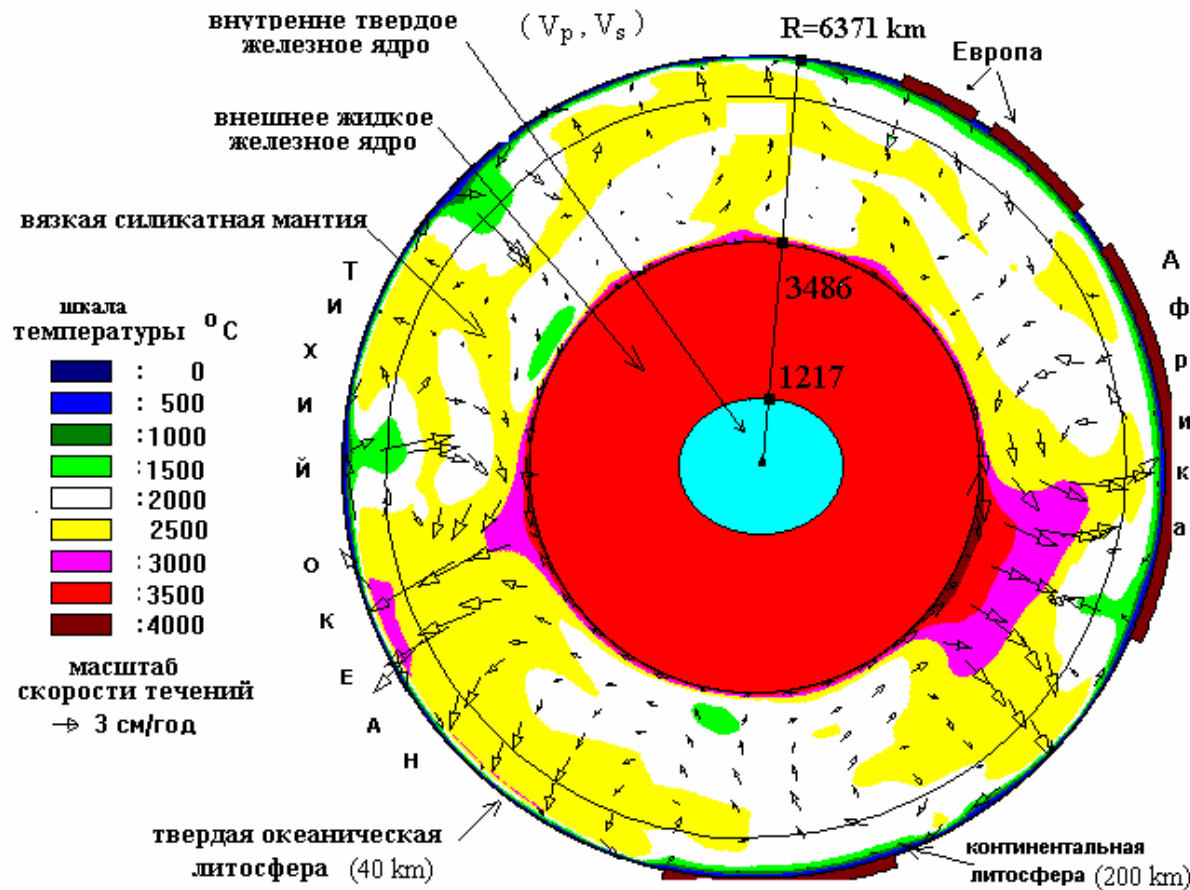
Ядро 0.0001К

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)



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

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

$$\text{Nu} = q/q_{\kappa} = 25$$

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

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

$$q_{\text{рад. коры}} = 15\%$$

$$q_{\text{затв. ядра}} = 10\%$$

$$q_{\text{рад. мантии}} = 50\%$$

$$q_{\text{остывание}} = 25\%$$

$$T_{\text{пл. железа}} = 3500^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{пл. силикатов}} = 5000^{\circ}\text{C}$$

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

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

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

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

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

$$q_{\text{сп}} = 1370 = 370 + 1000$$

**1.**

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

# ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ В МАНТИИ С ПЛАВАЮЩИМИ КОНТИНЕНТАМИ

## Уравнения конвекции в вязкой мантии

$$\rho_0 \mathbf{D}\mathbf{V}/dt = -\partial p/\partial \mathbf{x}_i + \partial S_{ij}/\partial \mathbf{x}_j + \rho_0(1-\alpha T)g\delta_{i3}$$

-Навье-Стокса,

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

перенос тепла,

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

перенос массы

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

тензор вязких напряжений.

## Уравнения для твердого плавающего континента:

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

- движение вдоль локальной оси x,

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

- движение вдоль локальной оси y,

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

- 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

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

Граничные условия на всей погруженной в мантию поверхности континента:

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{u}_i, \quad T = T_c, \quad \partial T/\partial \mathbf{n} = \partial T_c/\partial \mathbf{n}$$

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

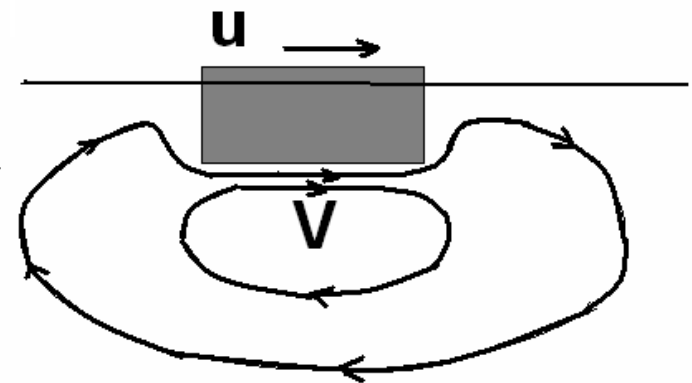
Форма, размеры и число континентов находятся по специальной подпрограмме на каждом временном шаге по тензору вязких напряжений на поверхности континентов при известной реологии.

## ТЕПЛОВАЯ КОНВЕКЦИЯ

Эксперимент Benard, 1901

Теория Rayleigh, 1916

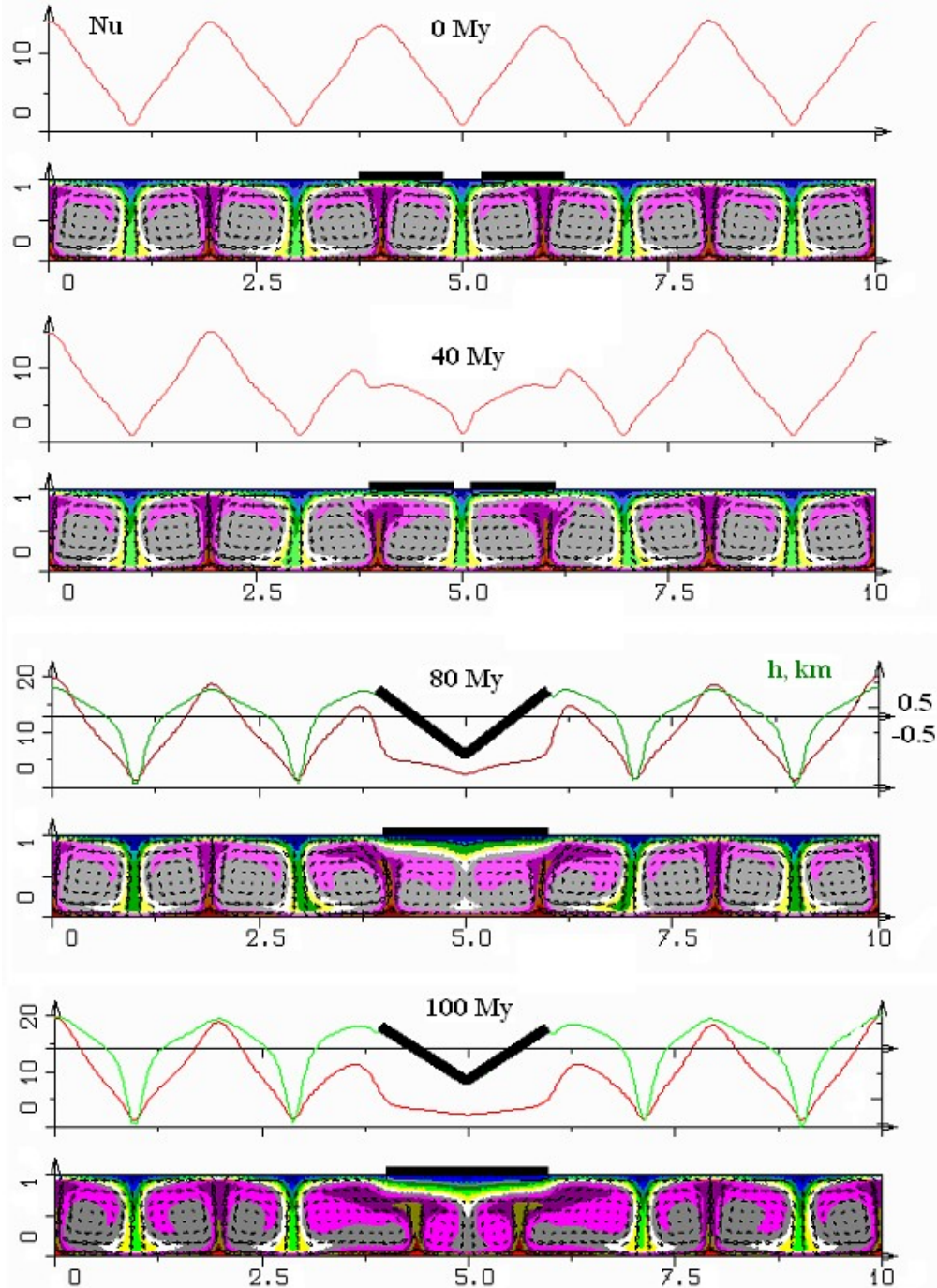
КОНВЕКЦИЯ Трубицын, 2000  
с плавающими телами Физика Земли, №9



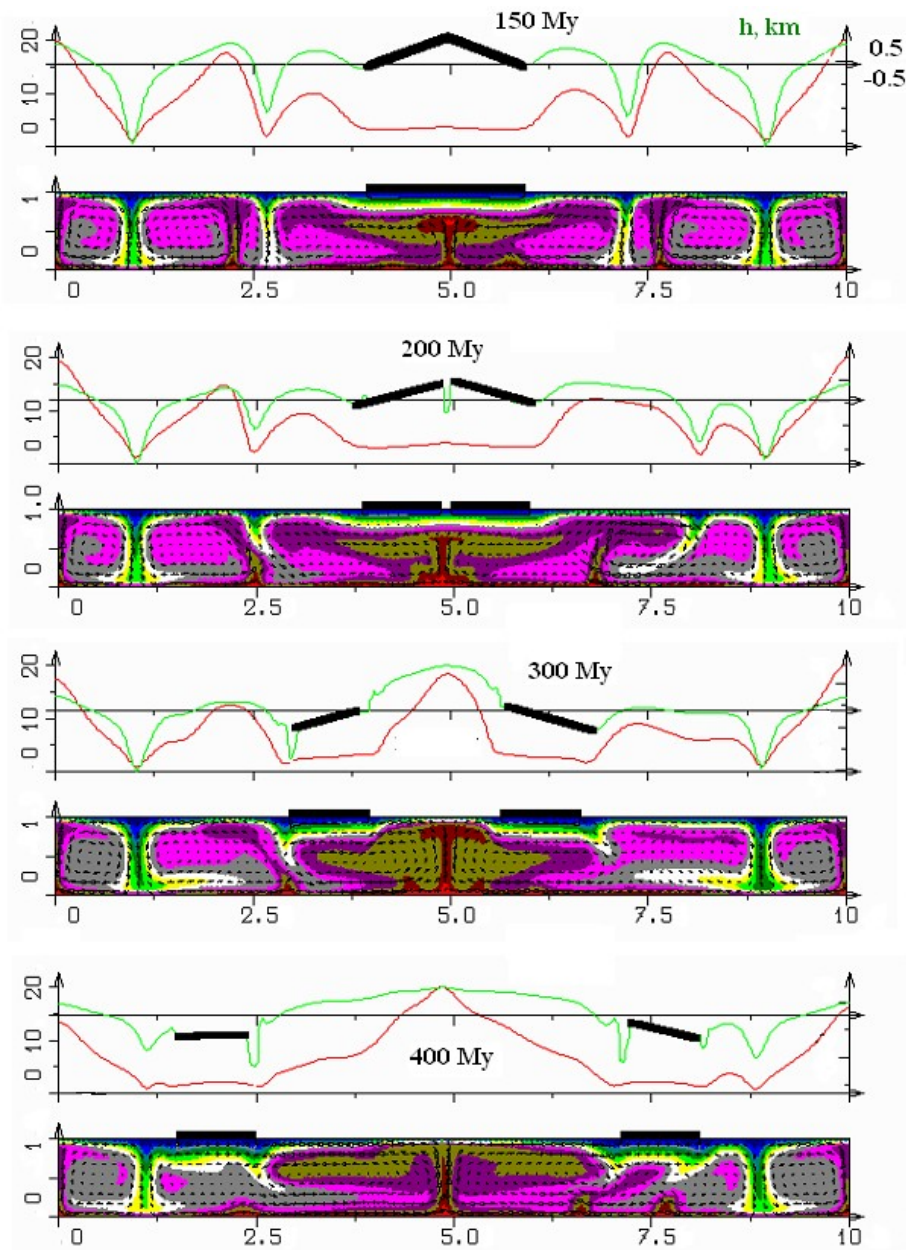


# ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОЙ КОНВЕКЦИИ с учетом теплового и механического взаимодействия с плавающими континентами

## 1. ОБЪЕДИНЕНИЕ, суперконтинент



## 2. РАСПАД суперконтинента



Эксперимент

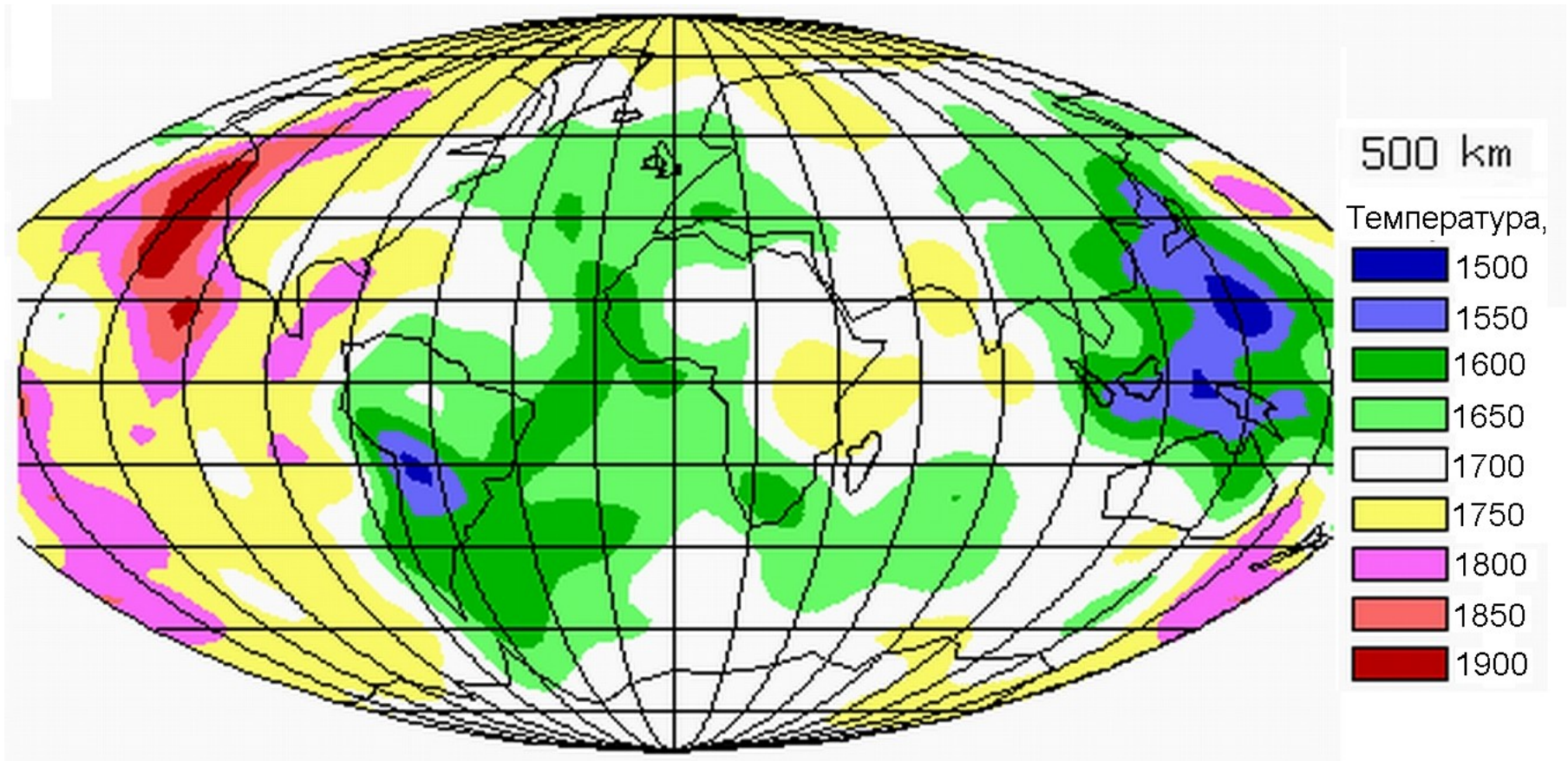
Zhang J., A. Libchaber, 2000.

Phys.Rev. Lett, V. 84, 4361



# СФЕРИЧЕСКАЯ ЗЕМЛЯ

## Сейсмическая томография мантии современной Земли



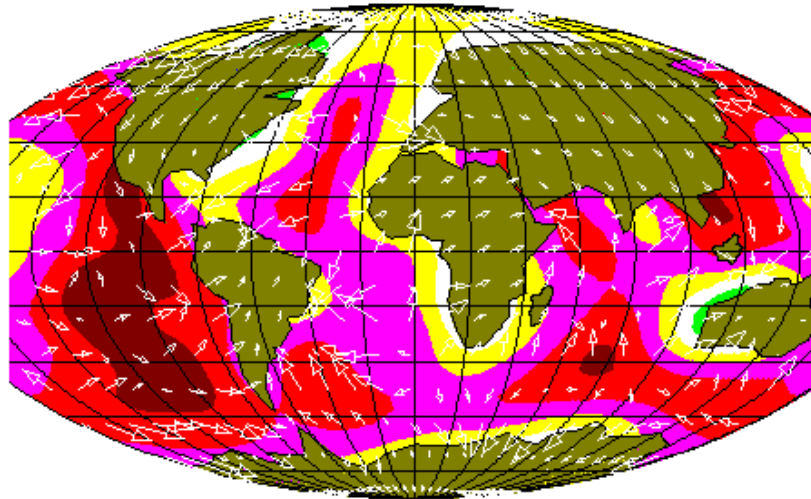
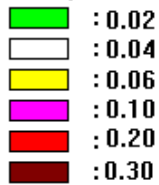
Два гигантских нисходящих потока, засасывающих литосферные плиты в мантию



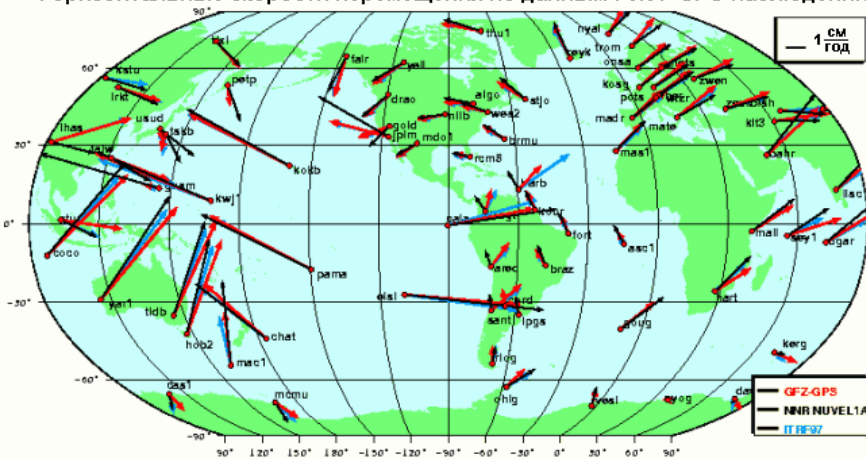
Рассчитанный тепловой поток, выходящий из мантии,  
и скорости перемещения континентов и дна океанов

скорости движения  
дна океанов и  
континентов  
—> 2 см/год

тепловой поток,  
Вт/м<sup>2</sup>

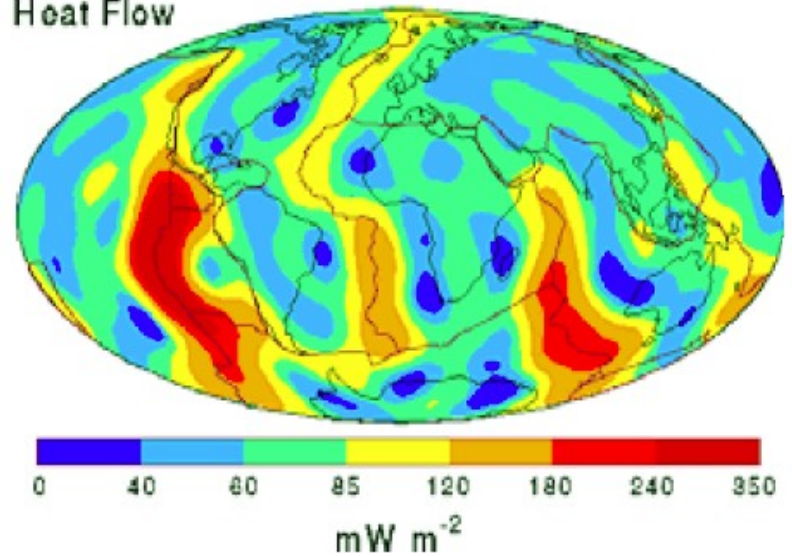


Горизонтальные скорости перемещения по данным 7 лет GPS-наблюдений



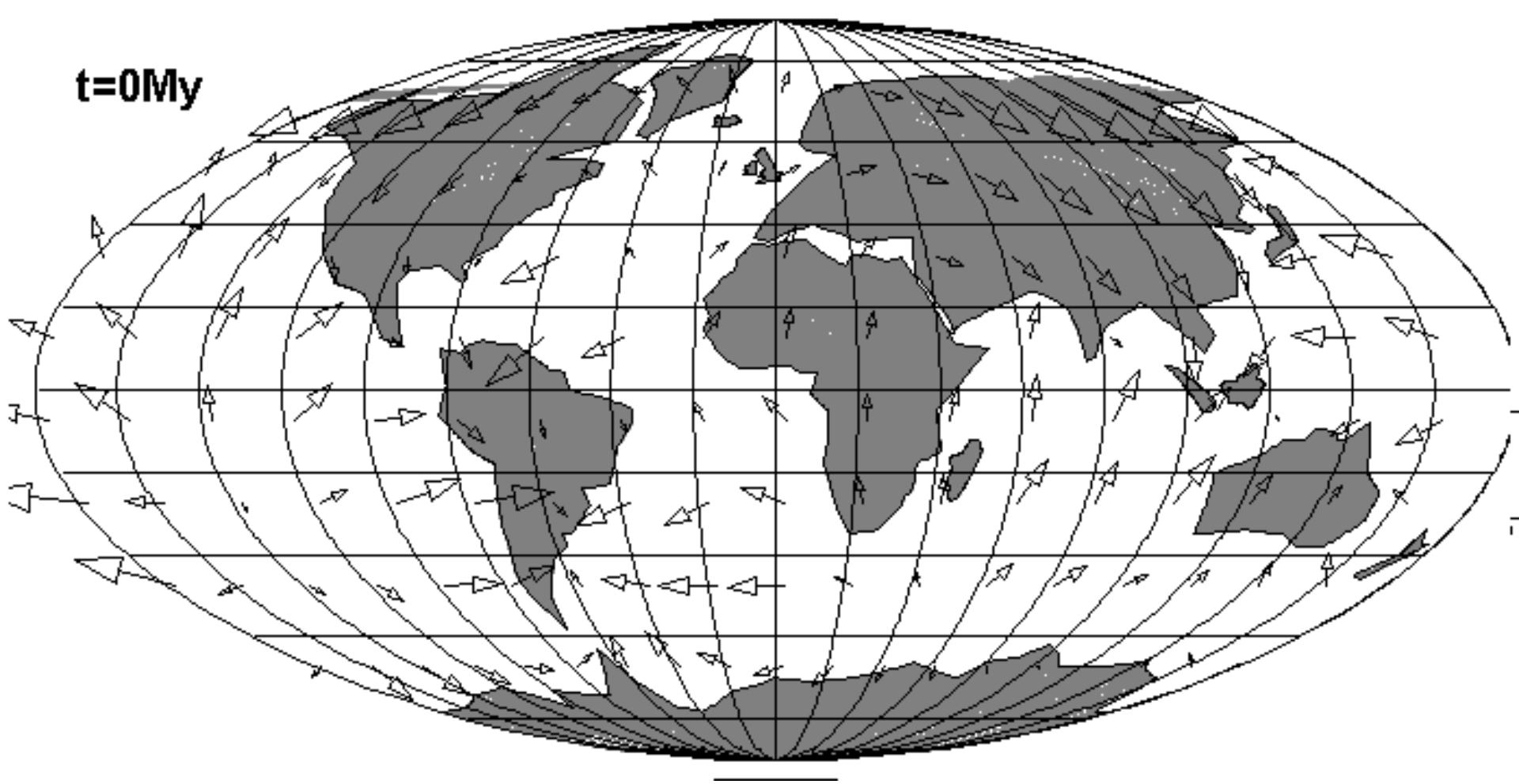
GPS-данные 1993 - 2000 гг.

Heat Flow

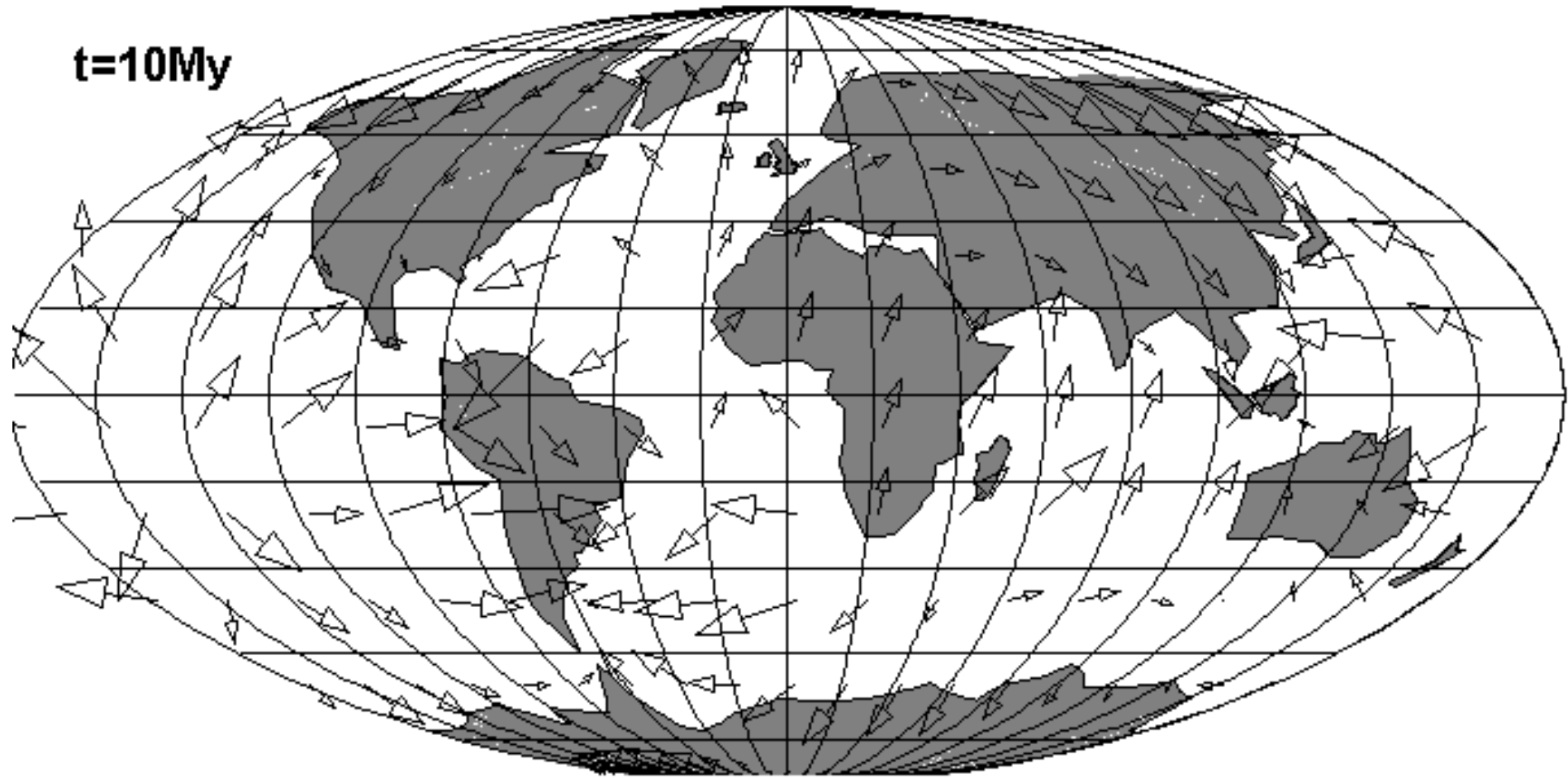


N.H. Pollack S.J. Hurter, J.R. Johnson. Reviews of Geophysics, Vol. 31, 1993.

**t=0My**

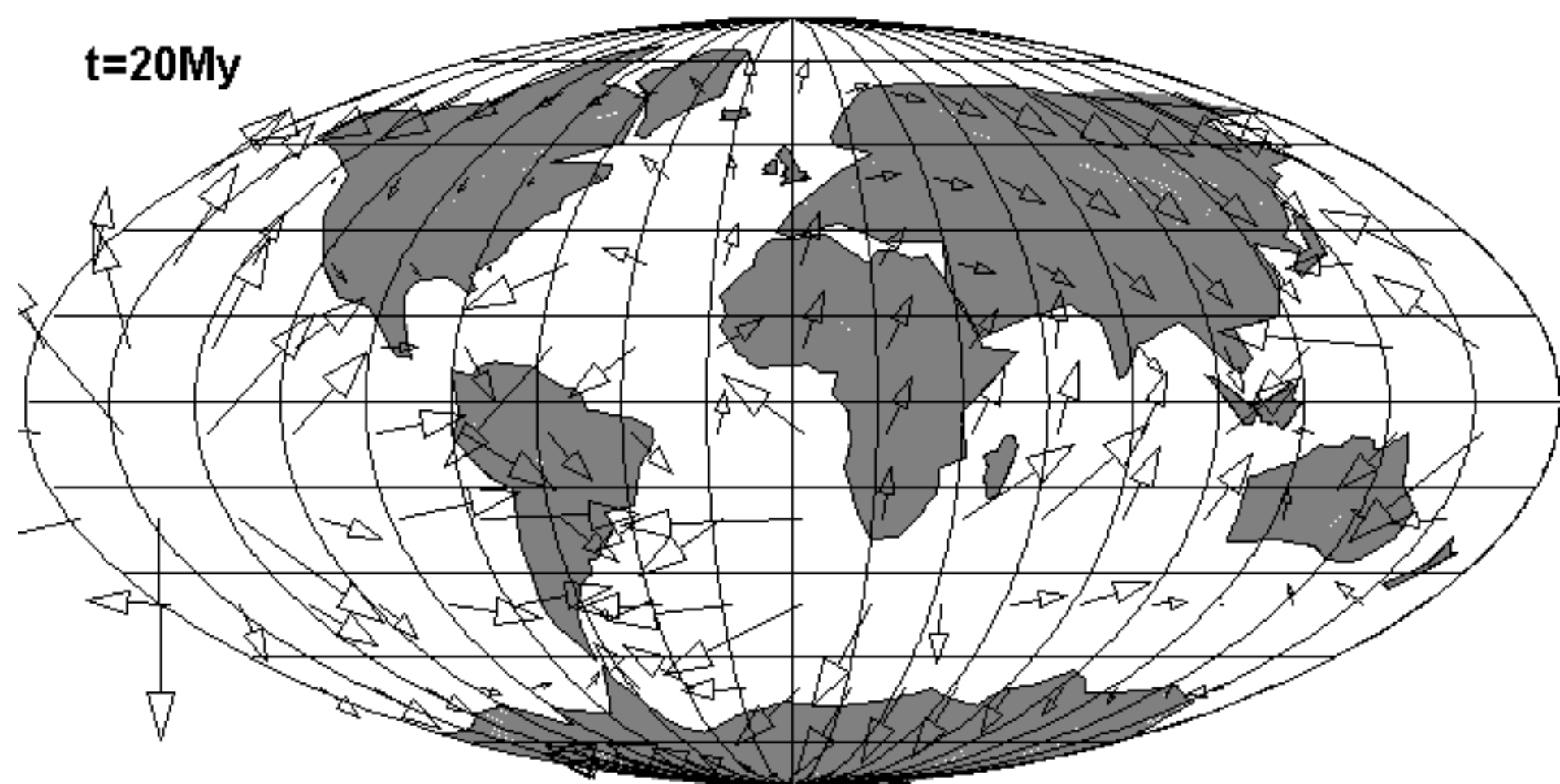


**t=10My**



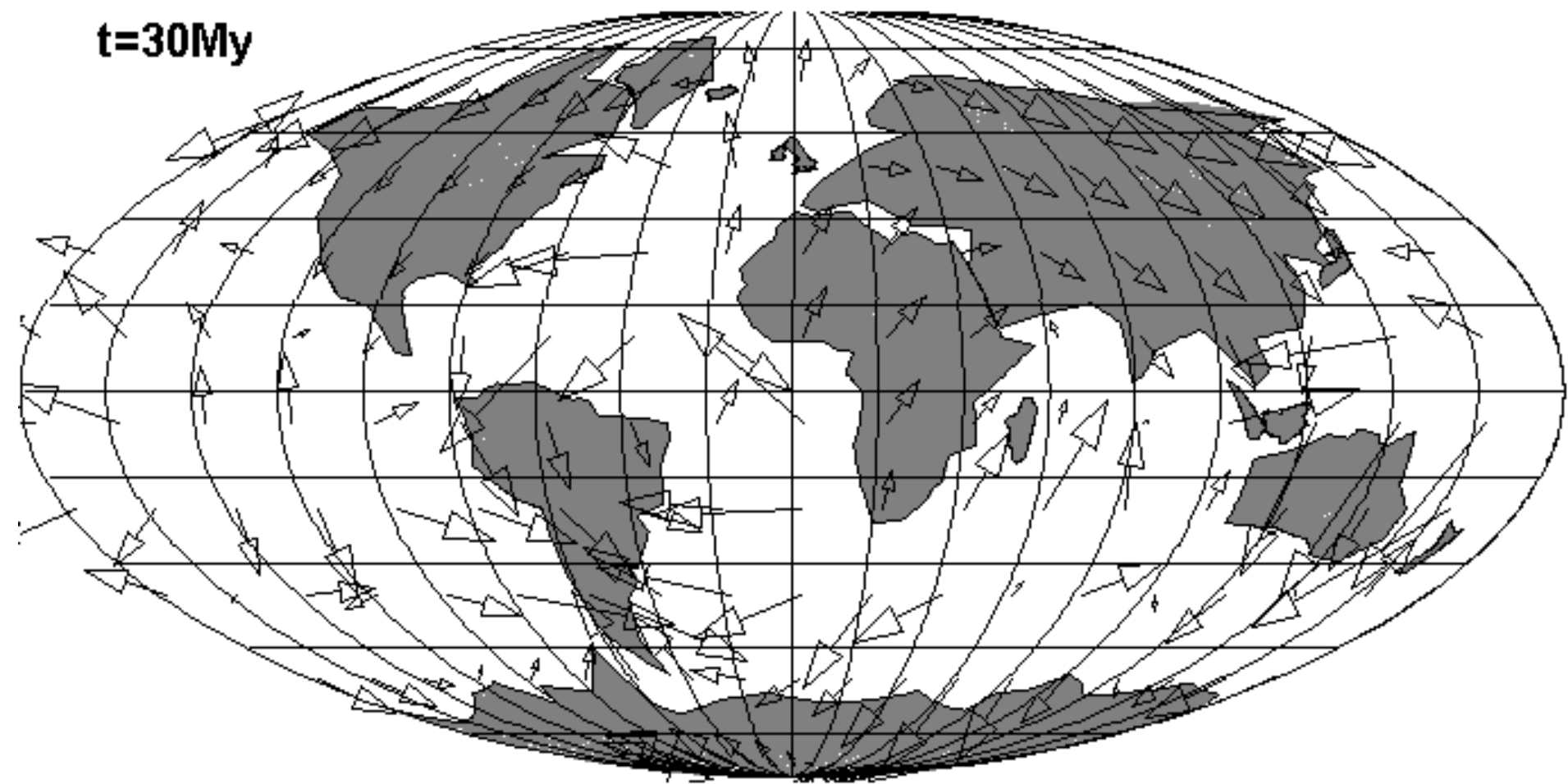


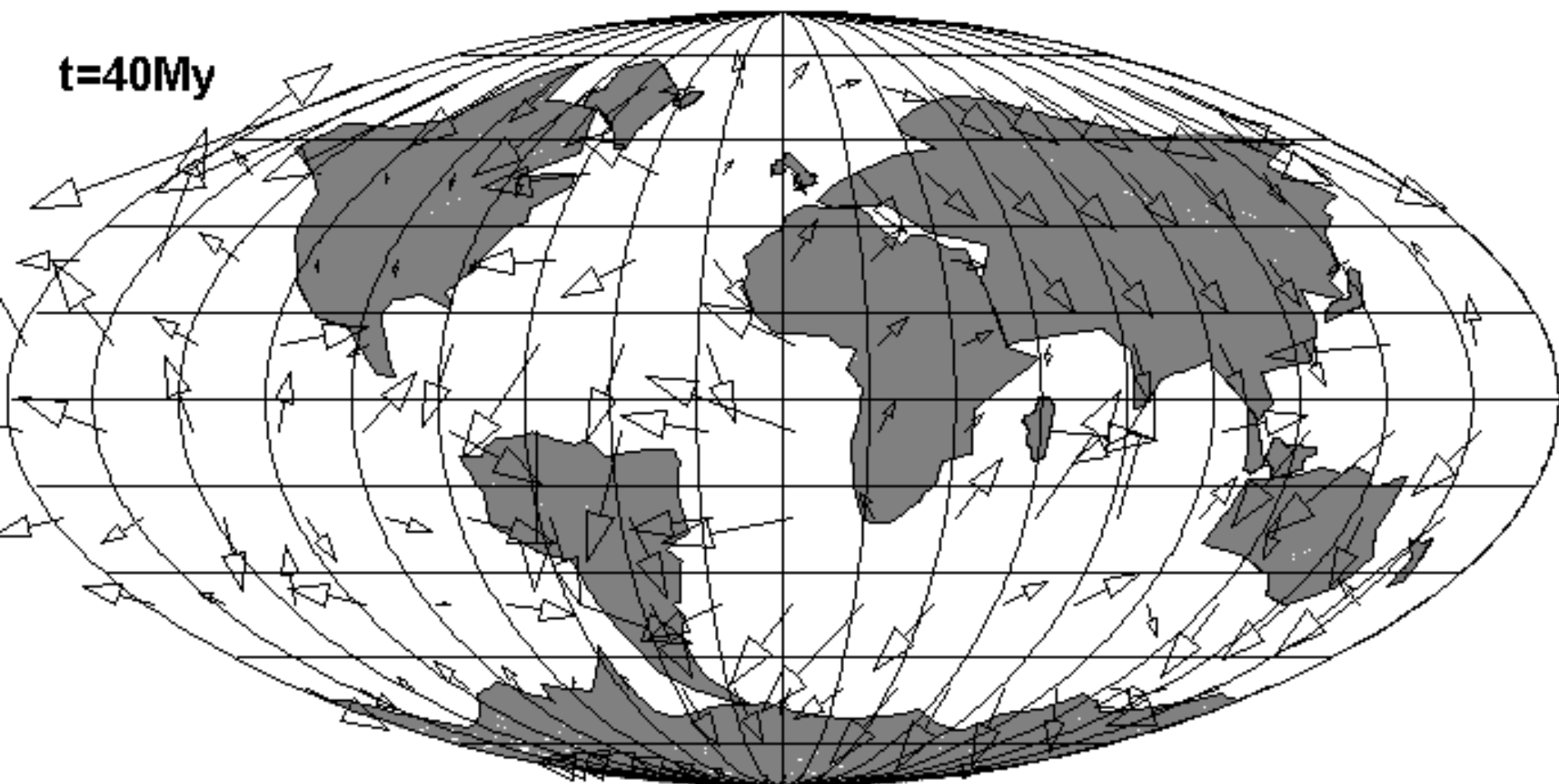
**t=20My**



**Япония соединяется с Евразией**

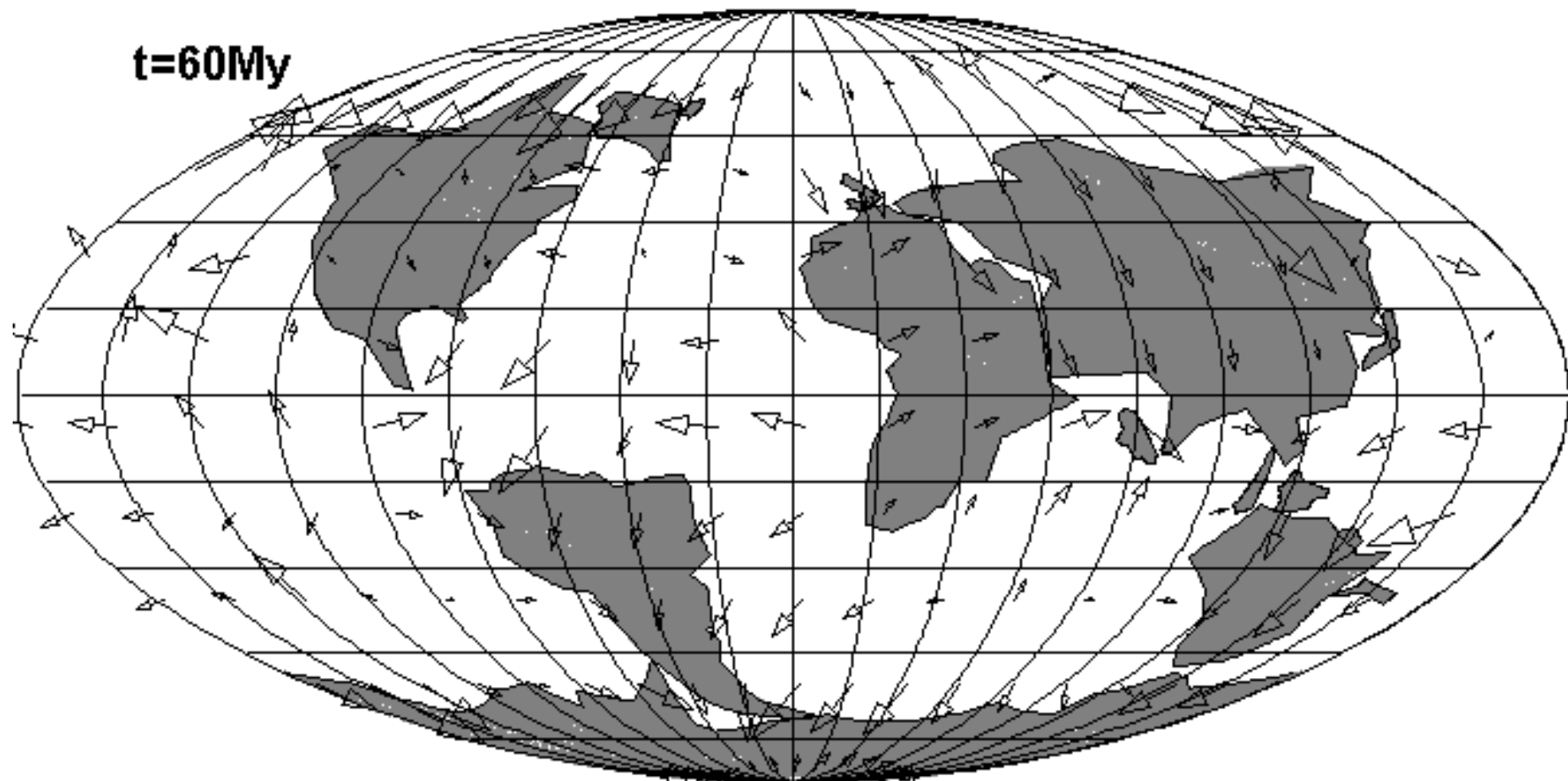
**t=30My**





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

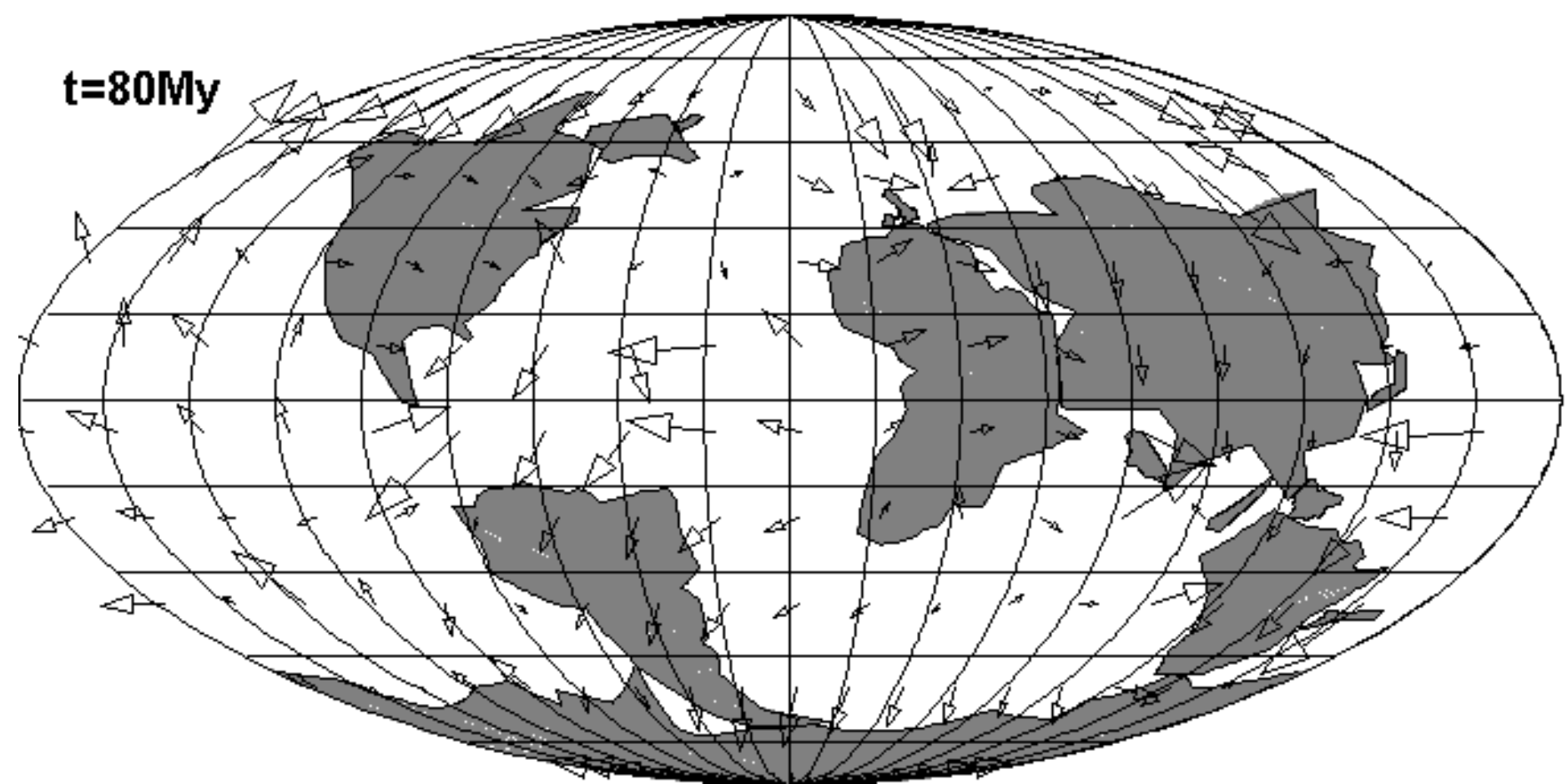


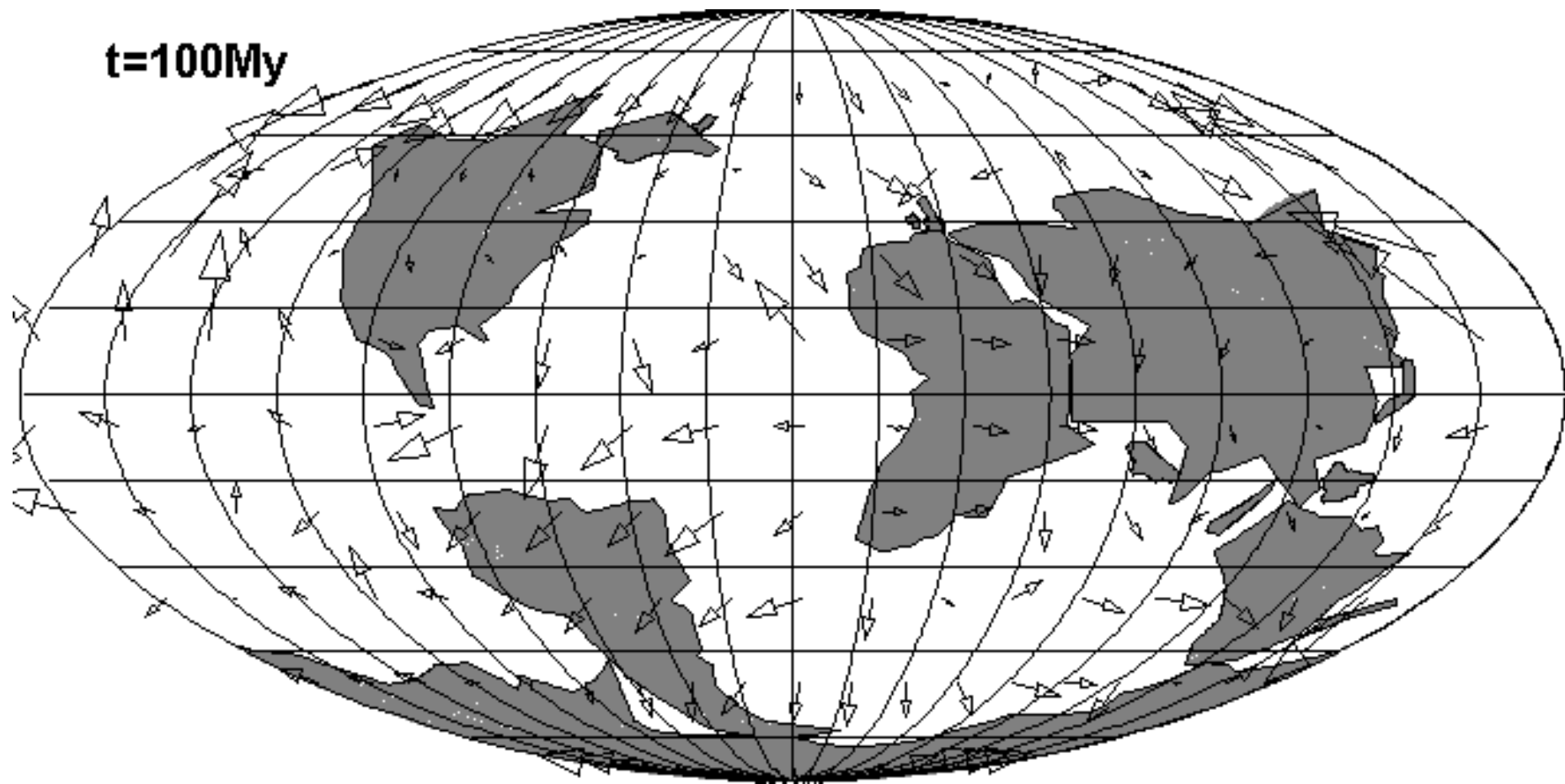


**Мадагаскар приближается к Индии**

**Возникает мост между Евразией и Австралией**

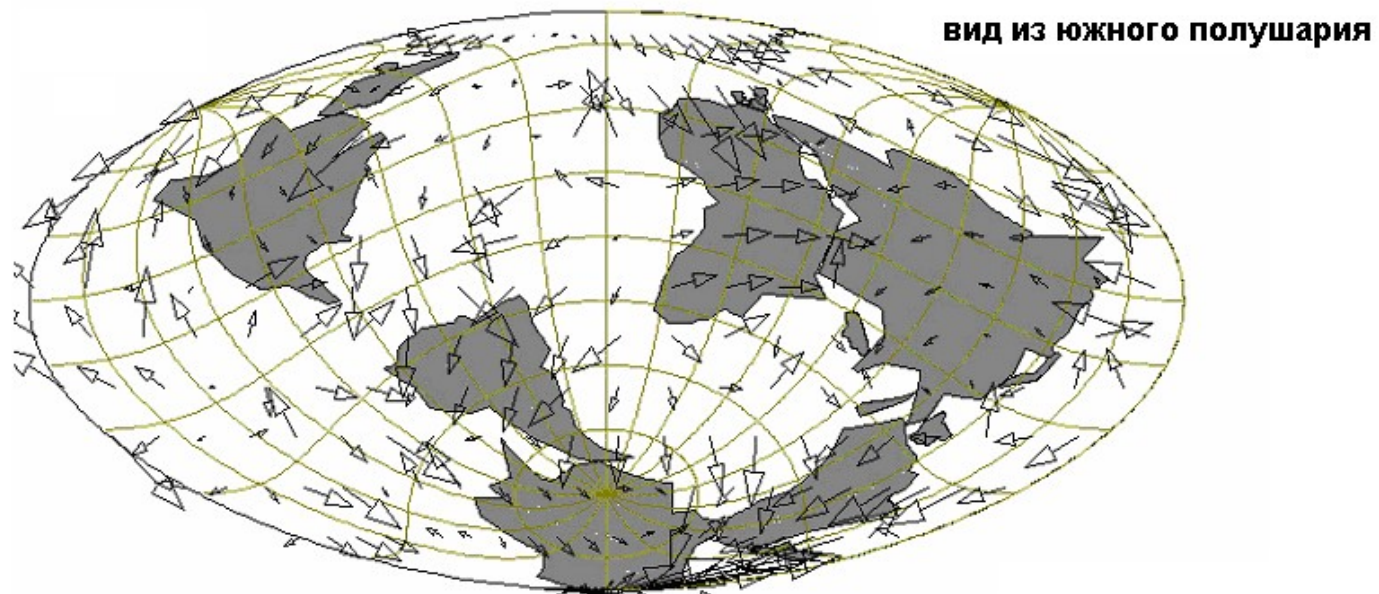
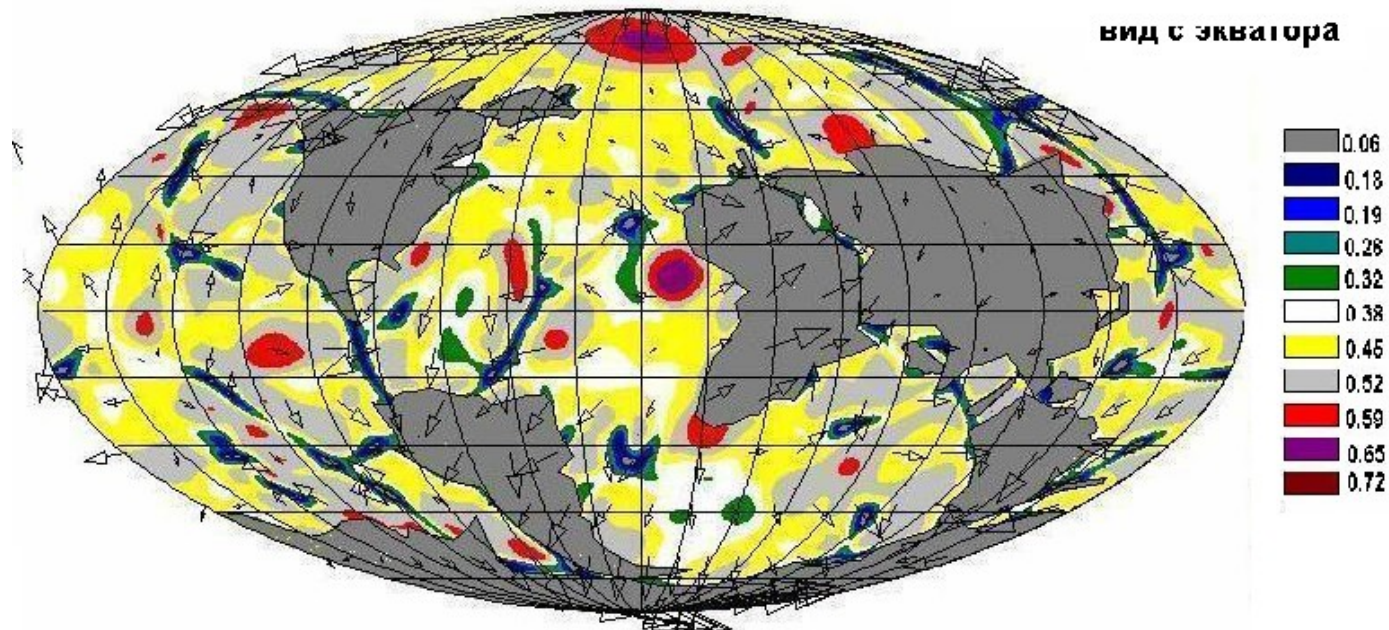
**t=80My**



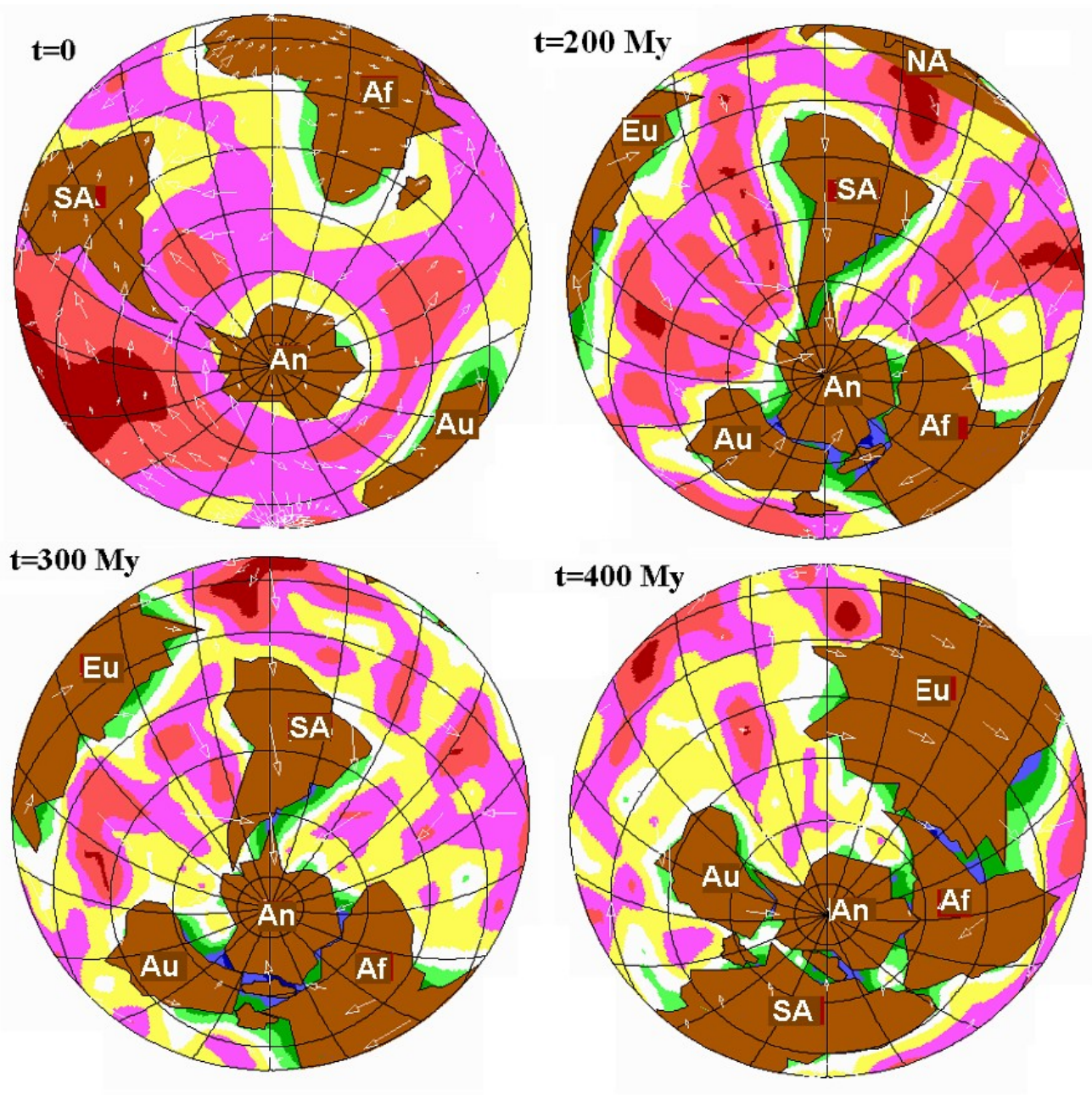


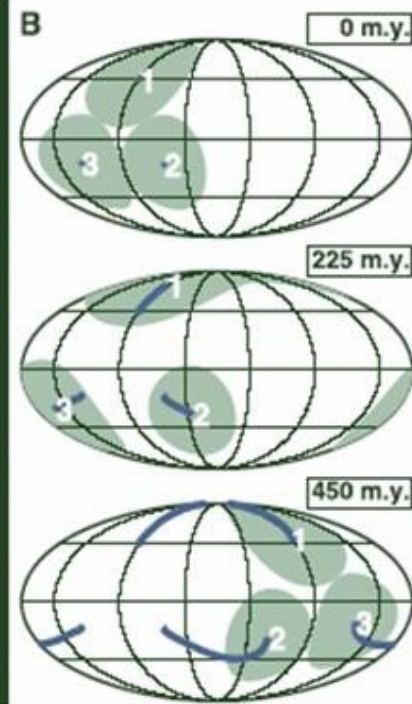
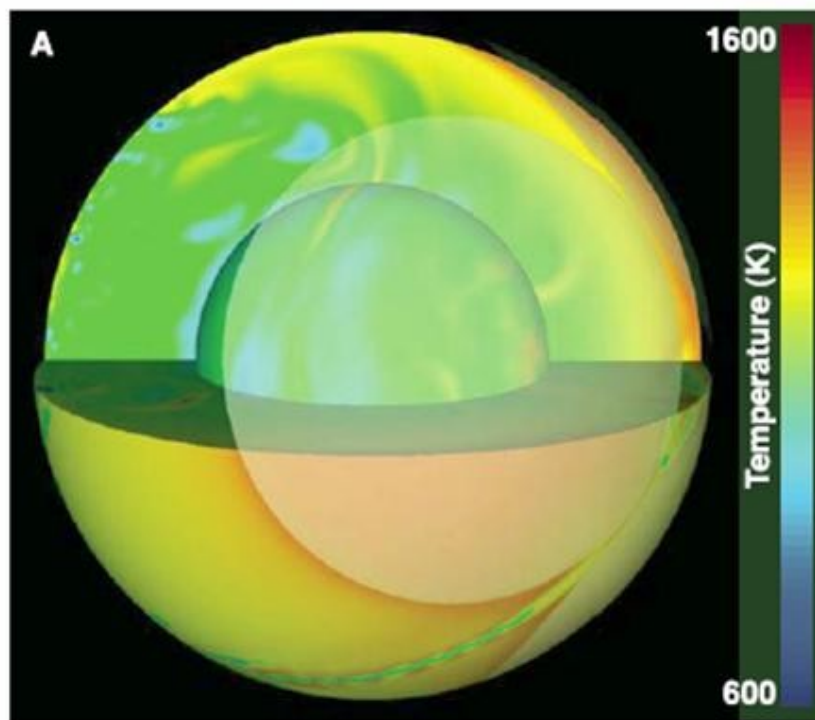
**Ю. Америка поворачивается для плотного соединения с Антарктидой**

# Земля через 100 млн. лет









## 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**

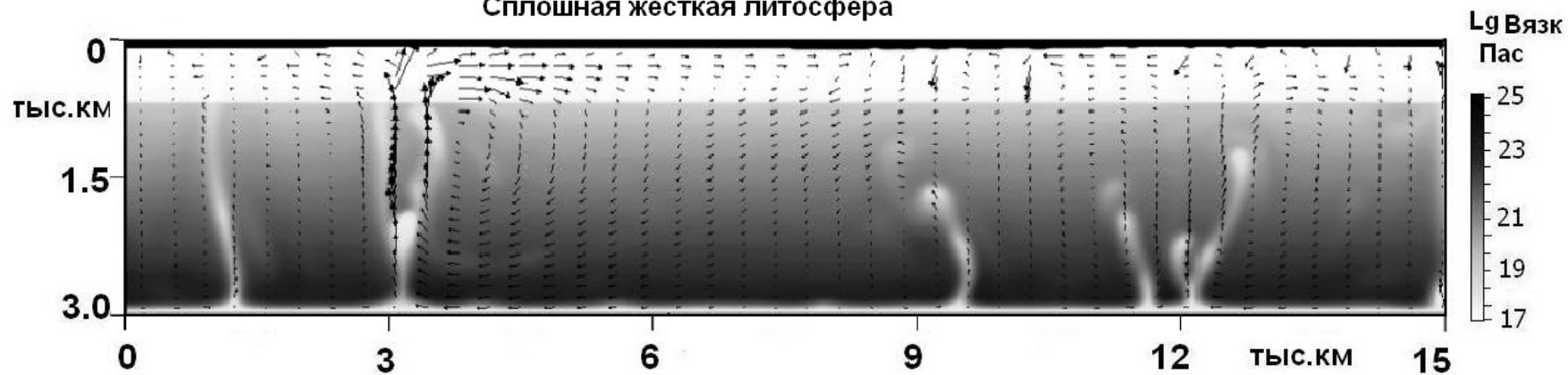
This work builds on the parameter study of Phillips and Bunge (2005), focusing on the extension to multiple continents. Colliding continents generate equal and opposite repulsive forces, preventing overlap and approximating perfect rigidity (Trubitsyn and Rykov, 2001). Our continents do not stick upon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

**Абстрактная модель, континенты - круглые диски без столкновений**

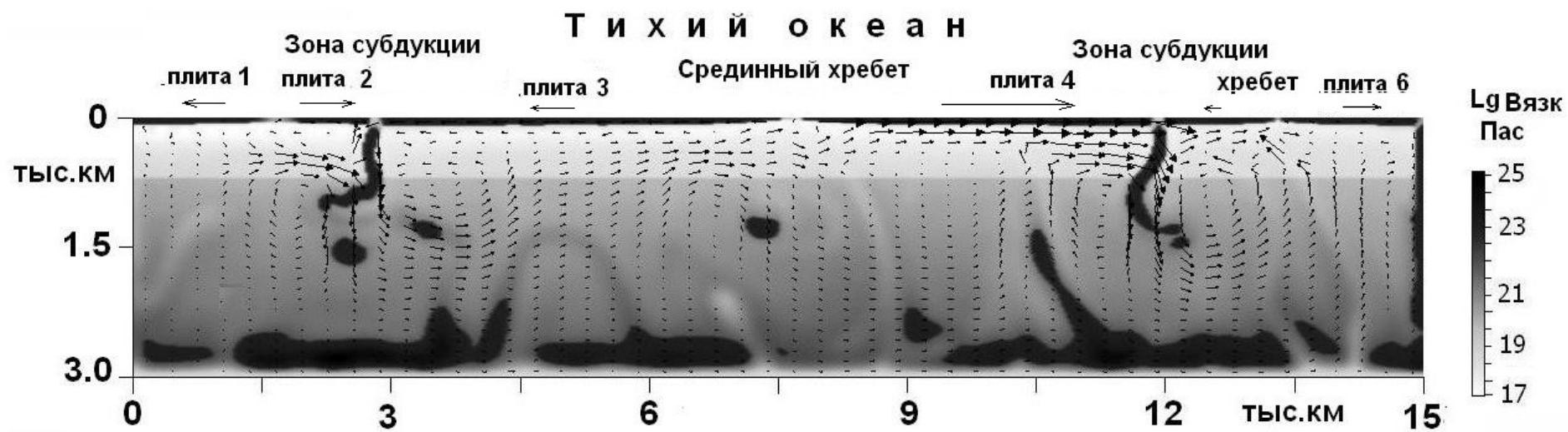
**2.**

**ТЕКТОНИКА  
ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ**

Сплошная жесткая литосфера

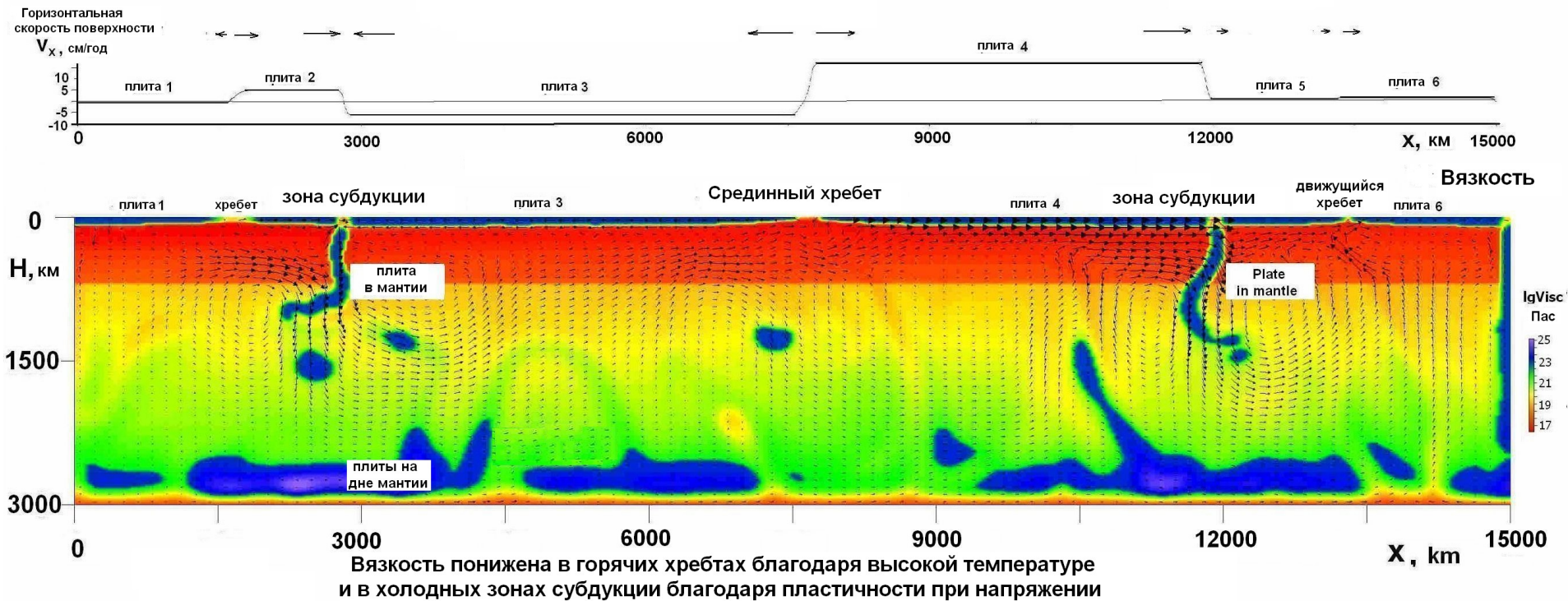






Численный эксперимент (Трубицын, ДАН, 2010, № 1, 5)

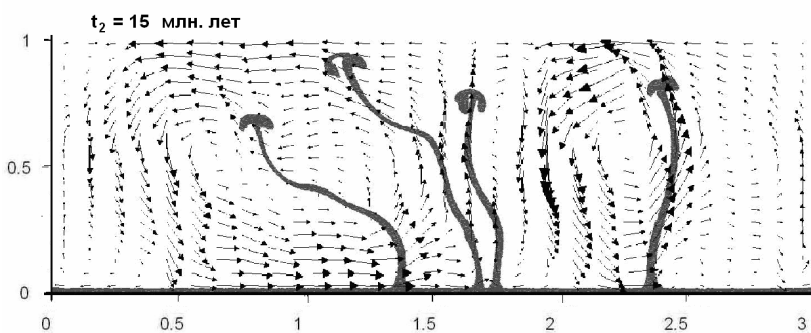
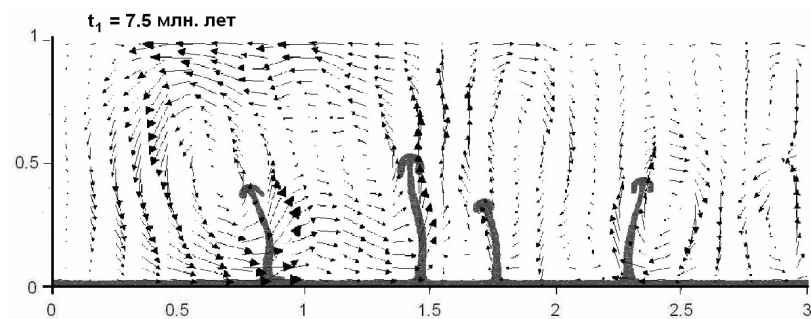
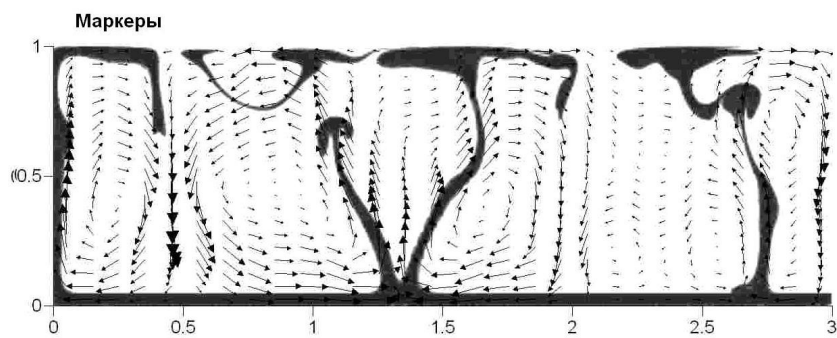
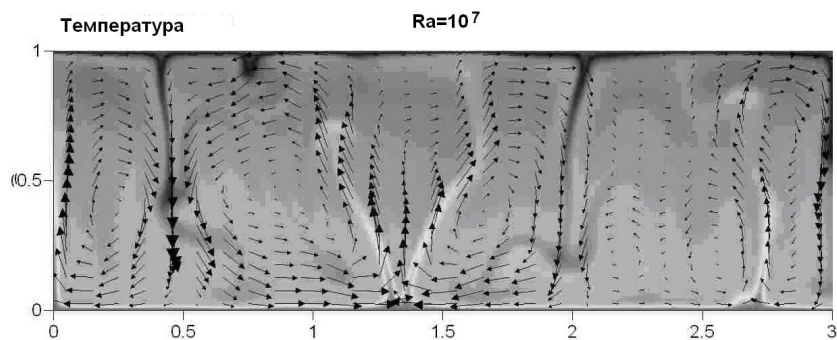
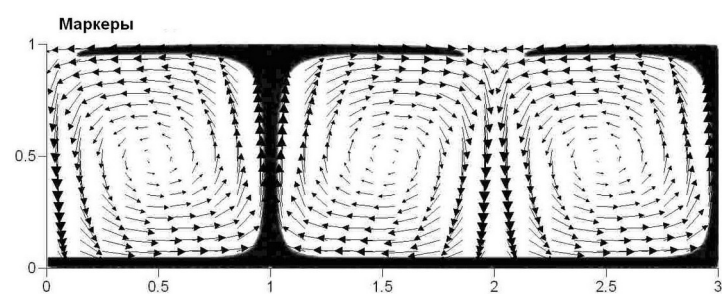
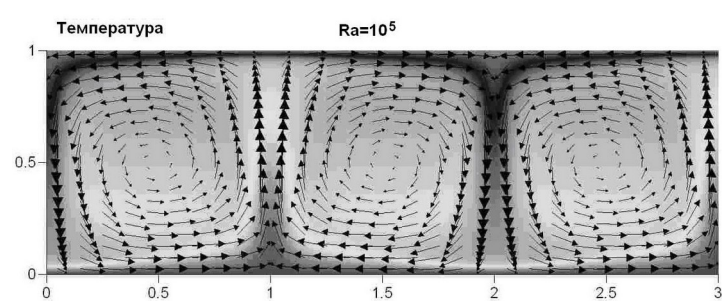
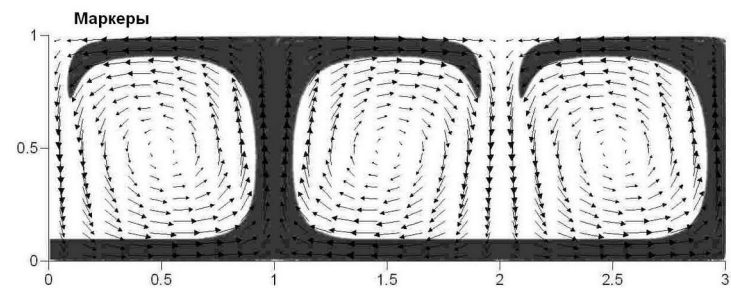
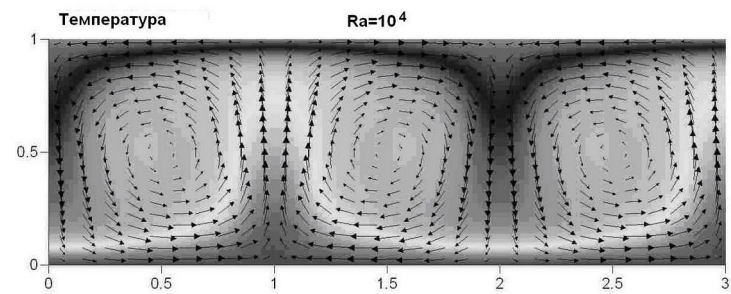
В нагреваемом слое оливина возникает конвекция, воспроизводящая тектонику плит типа Тихого океана



**3.**

**ТЕКТОНИКА**

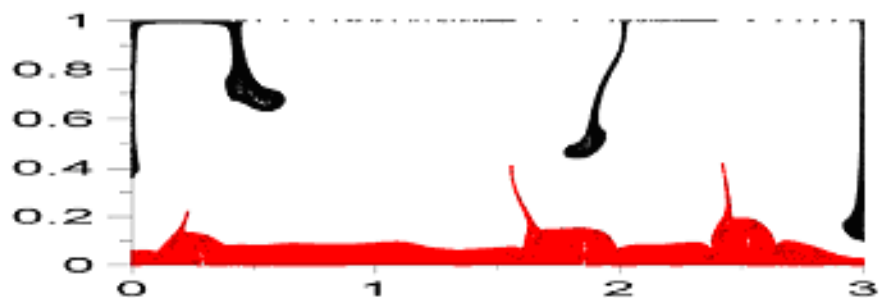
**МАНТИЙНЫХ ПЛЮМОВ**



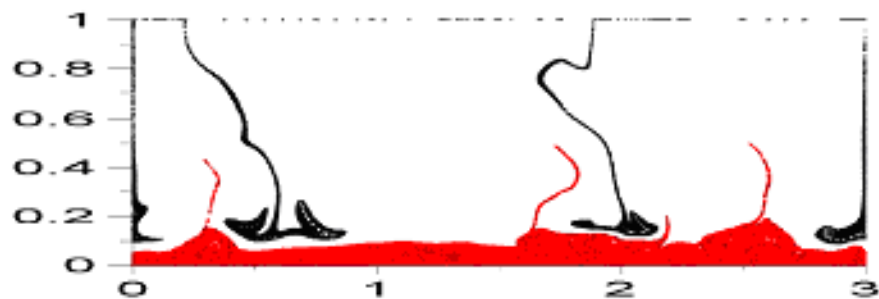




$t=0$



$t=50\text{My}$



$t=150\text{My}$

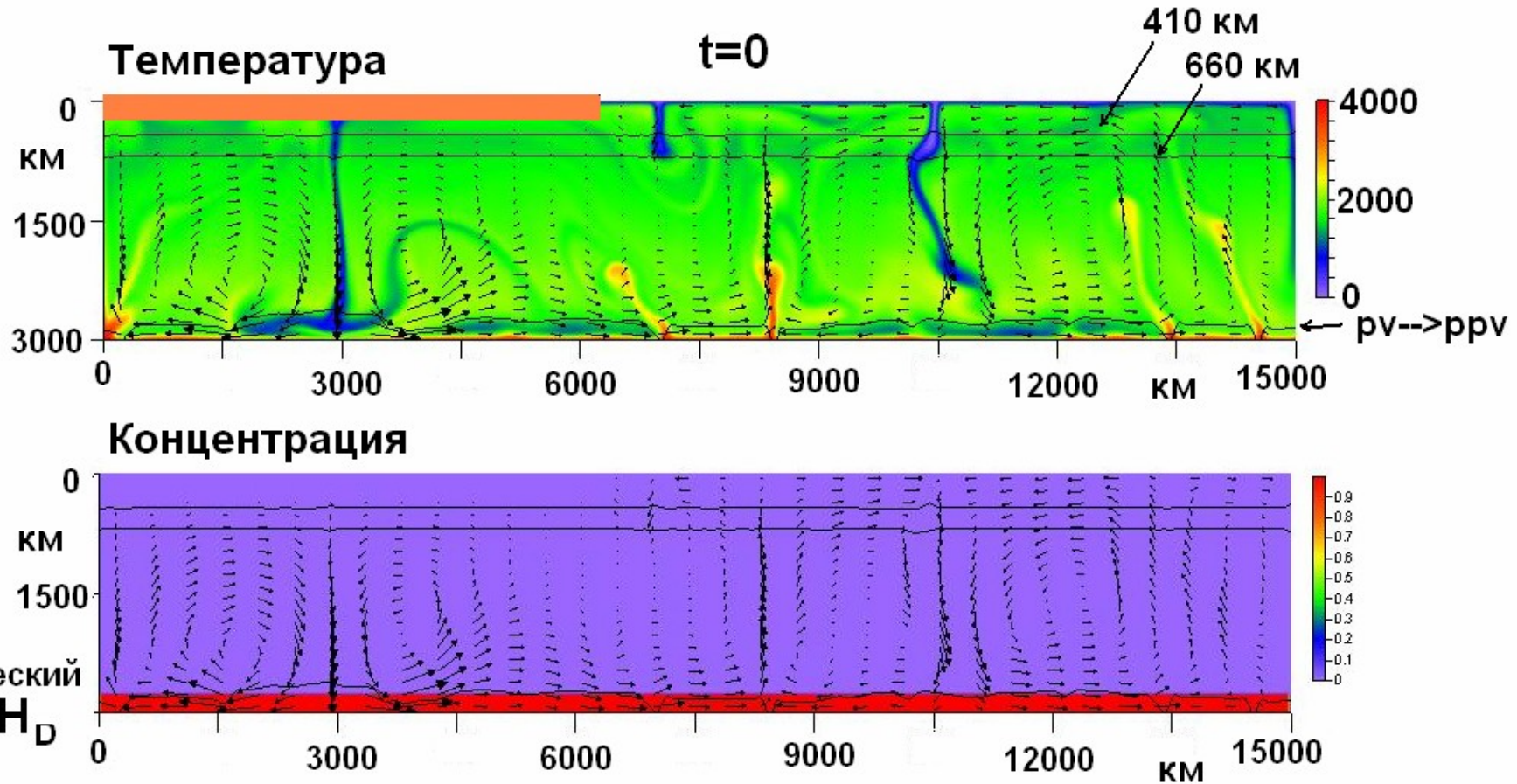


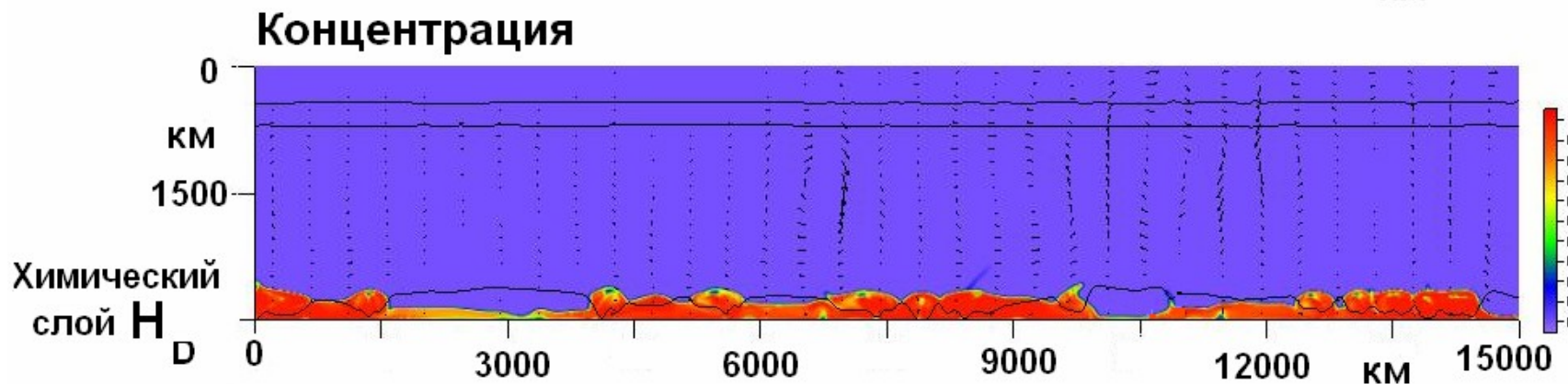
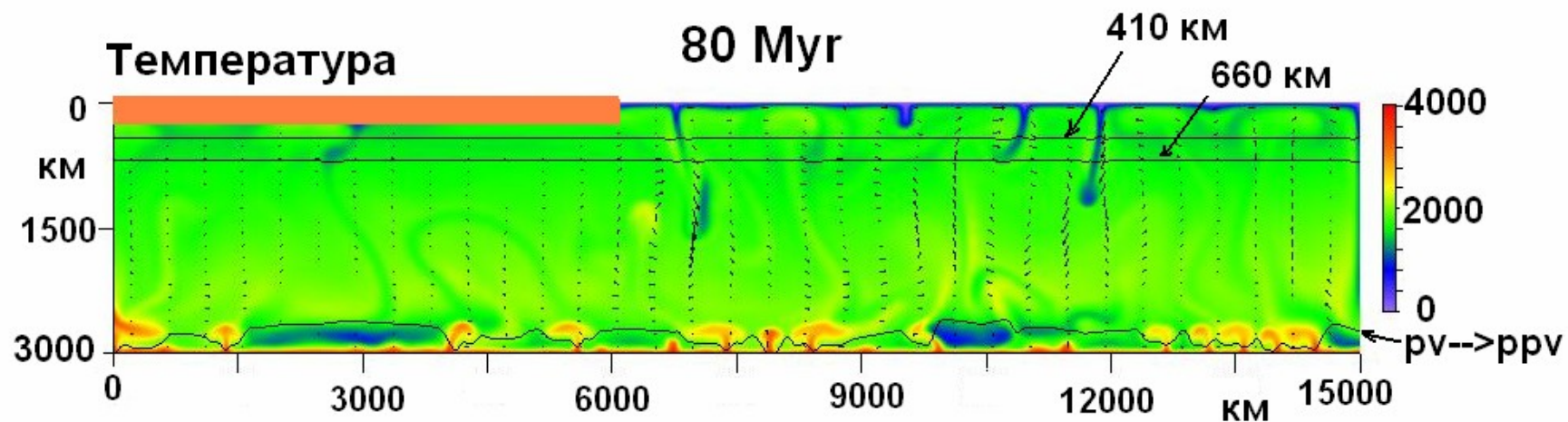
$t=500\text{My}$

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







$t=160 \text{ Myr}$

Температура

410 км

660 км

4000

2000

0

pv-->ppv

0  
км

1500

Горячий  
слой

$H_T$

0

3000

6000

9000

12000

км

15000

Концентрация

0  
км

1500

Химический  
слой

$H_D$

0

3000

6000

9000

12000

км

15000

1  
0.9  
0.8  
0.7  
0.6  
0.5  
0.4  
0.3  
0.2  
0.1  
0

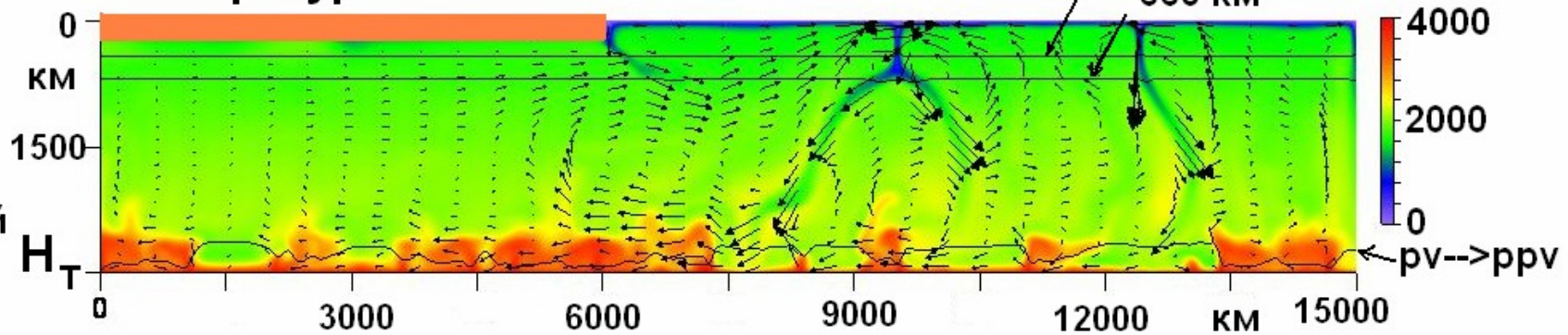


Температура

$t=240 \text{ Myr}$

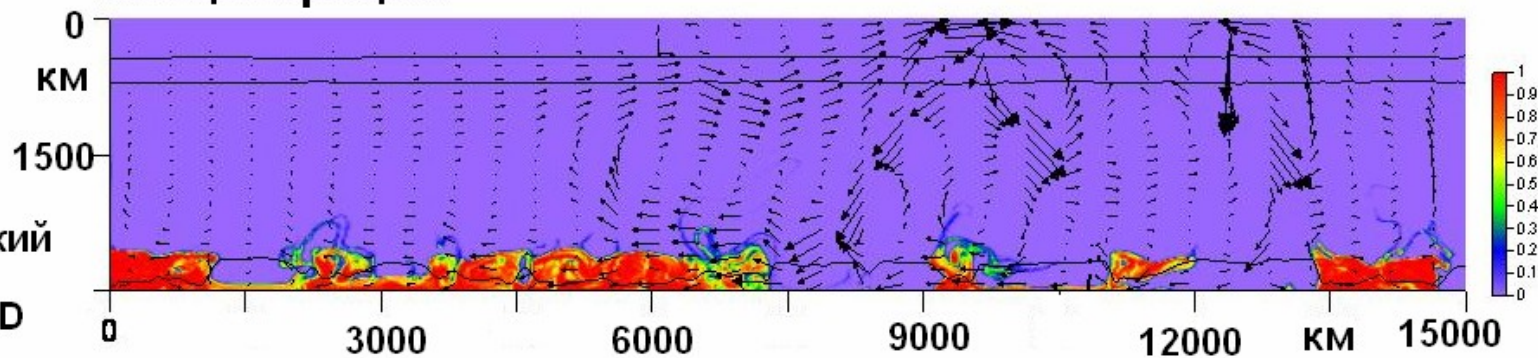
410 км

660 км



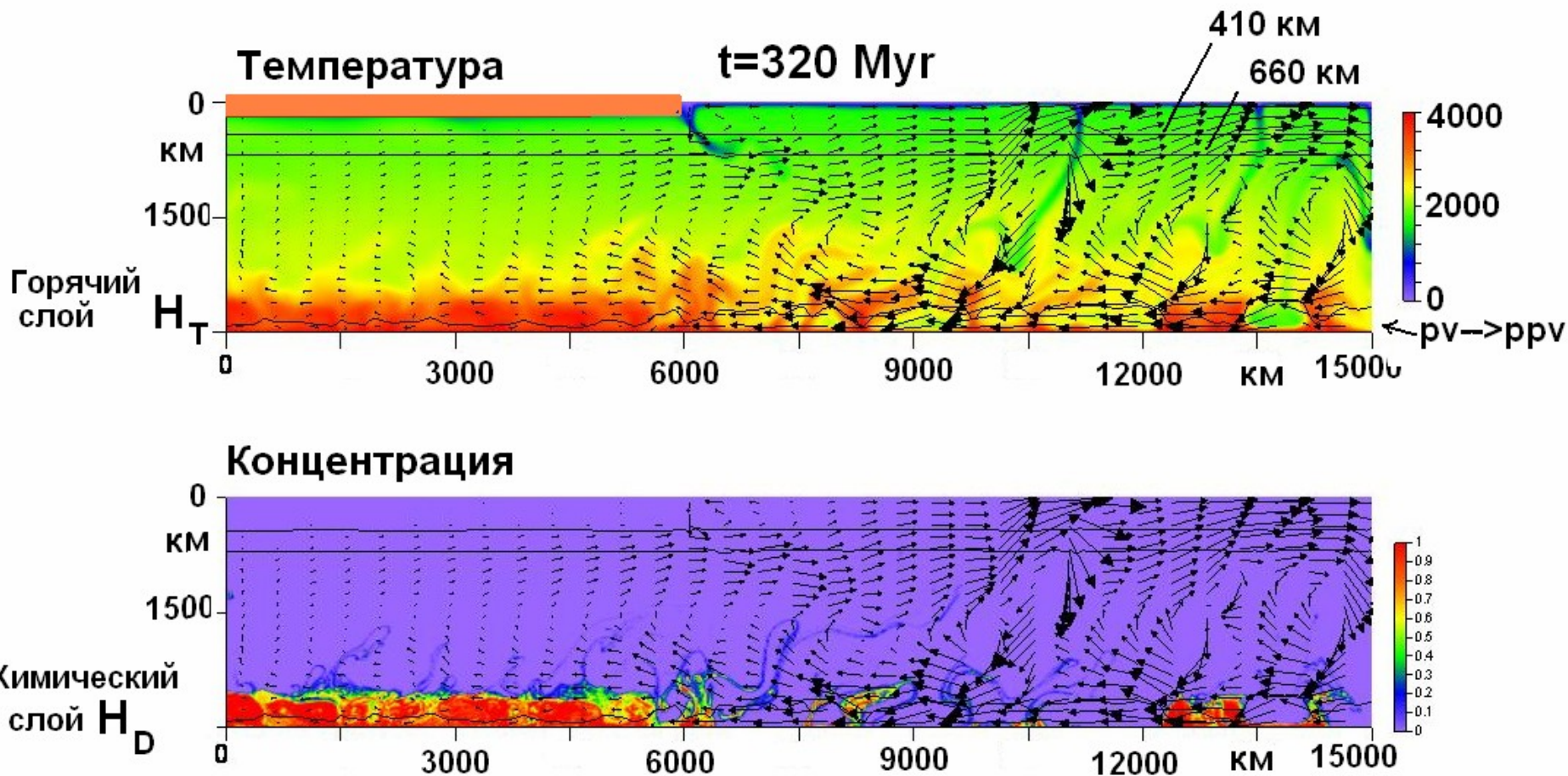
Концентрация

Химический  
слой  $H_D$



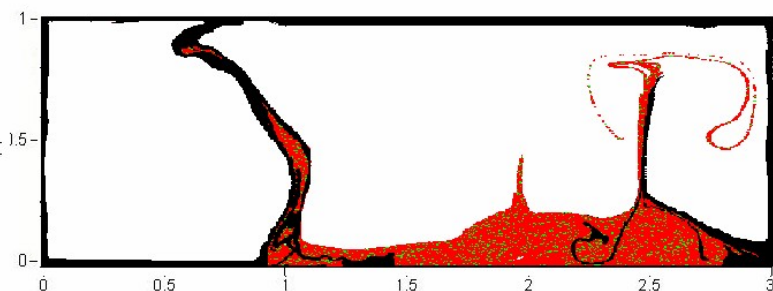
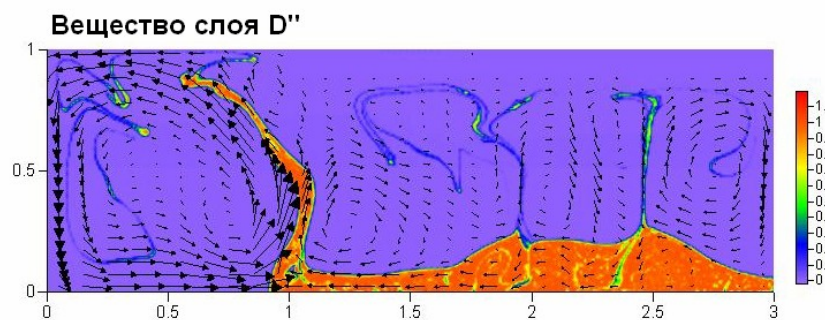
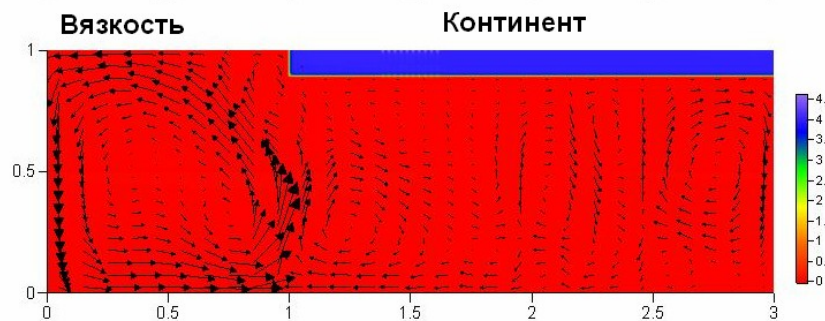
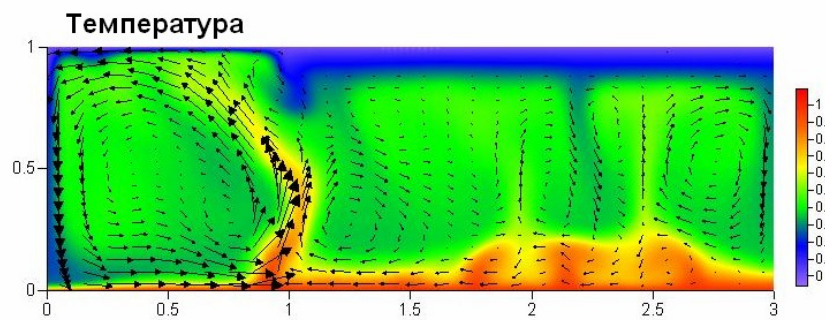
# ВЫВОД по результатам моделирования

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



(Трубицын, 2011)





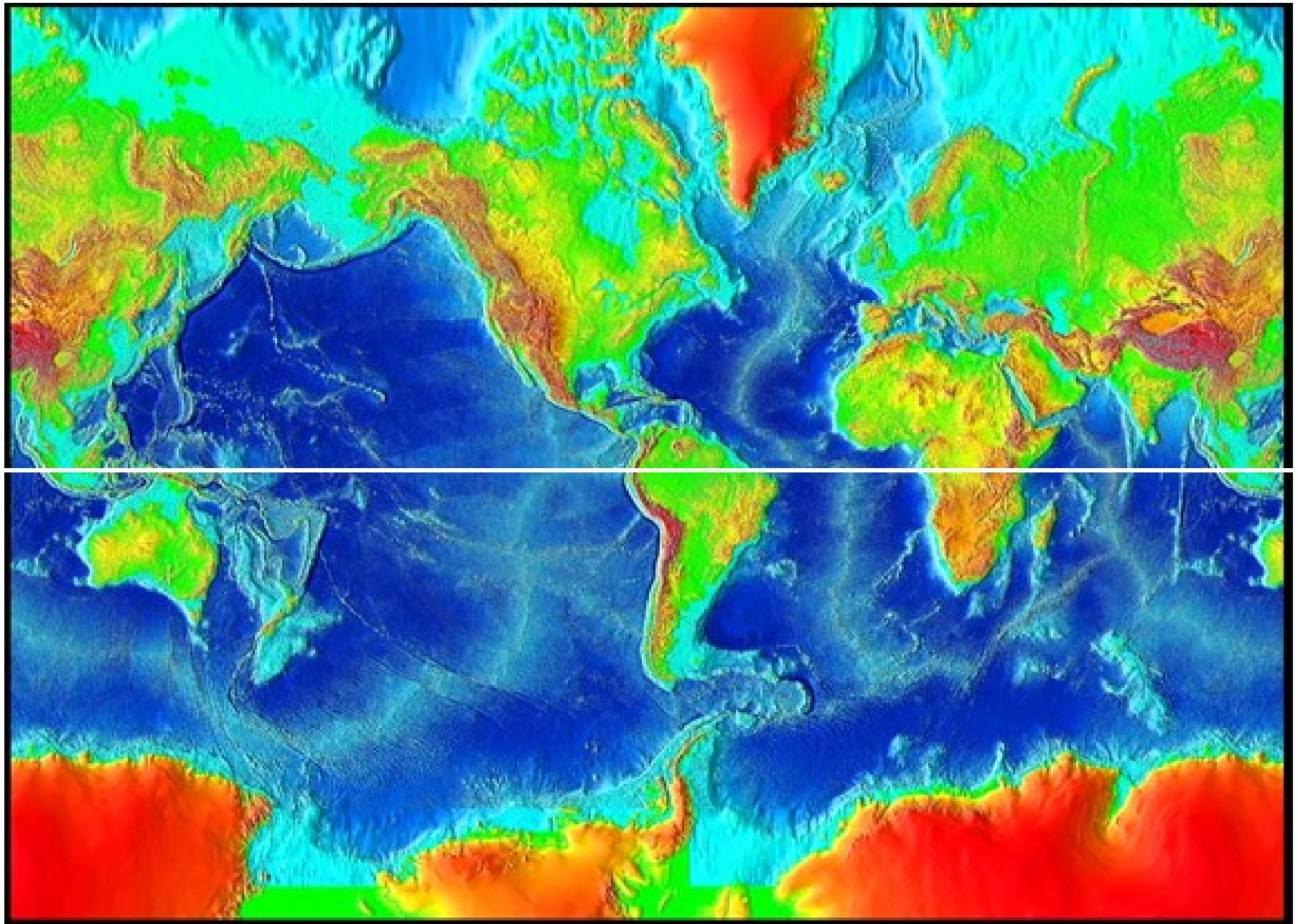
Черные маркеры - вещество океанических плит  
Бордовые маркеры - вещество слоя D''

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

**ВЫВОД по результатам  
моделирования**

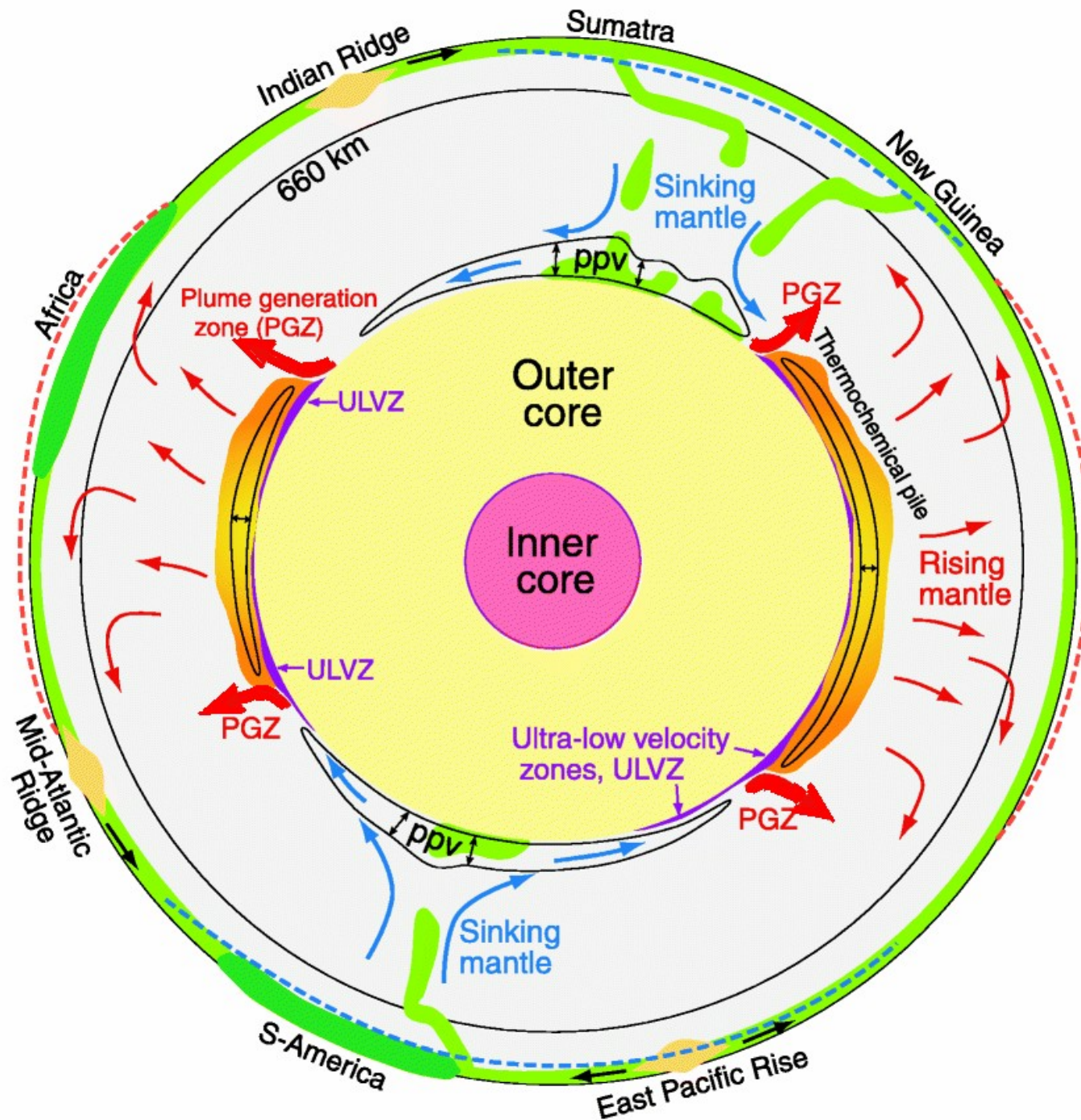
**Плюмы возникают на  
вершине ближайщей горы  
скопления вещества слоя D''**

Трубицын, 2012

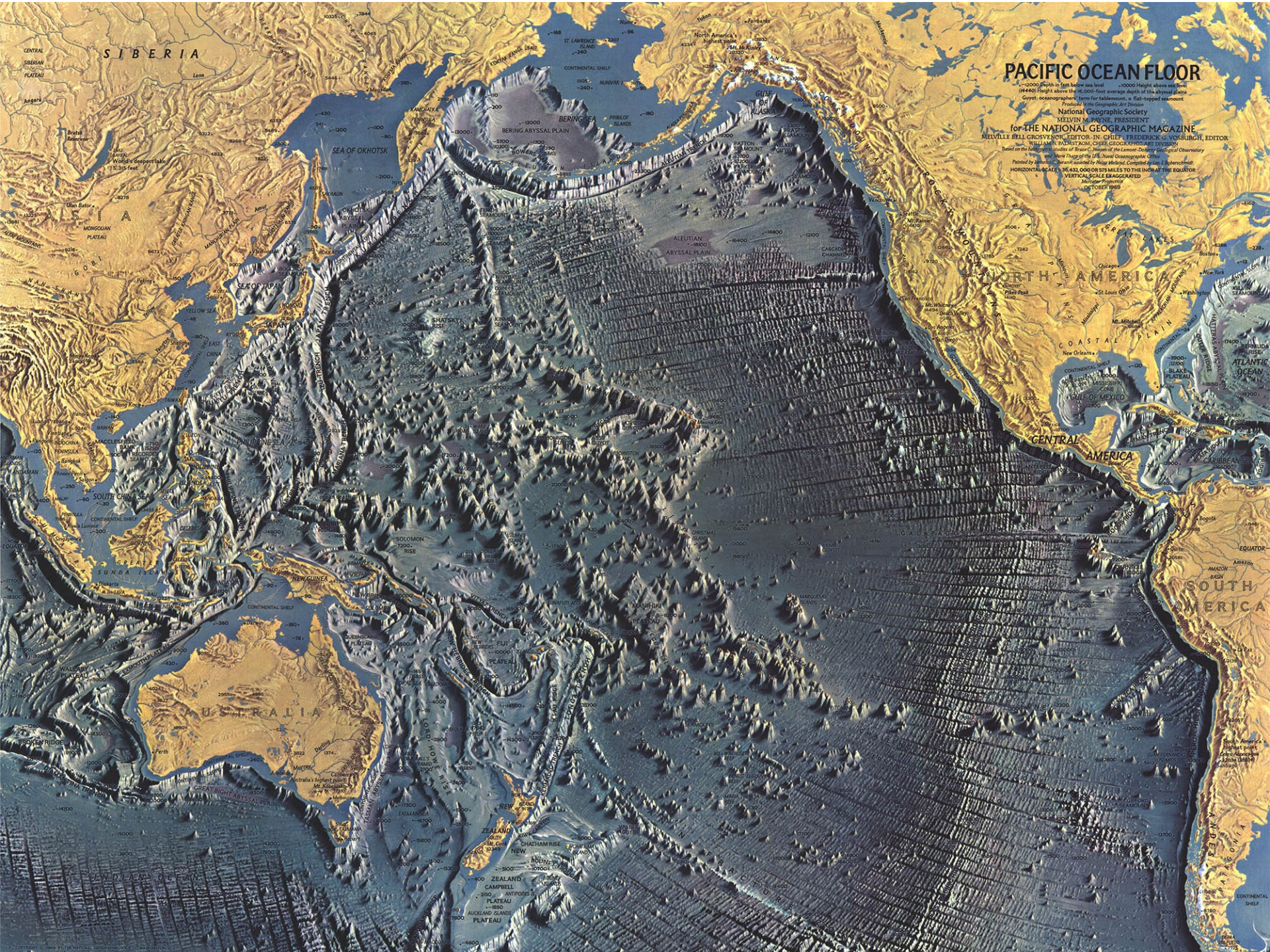




**Глобальная  
тектоническая  
схема  
взаимодействия  
литосферных  
плит и  
мантийных  
плюмов**







# PACIFIC OCEAN FLOOR

—20000 fathoms (36,580 feet) below sea level —10000 fathoms (18,290 feet) below sea level  
(14,440 fathoms) height above the 16,000-foot average depth of the abyssal plain

Geographical names in parentheses are for the same place as the name in parentheses  
Geographical names in parentheses are for the same place as the name in parentheses

National Geographic Society  
for THE NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINE

MELVILLE BELL GILBERTSON, EDITOR IN CHIEF, THE NATIONAL GEOGRAPHIC MAGAZINE  
WILLIAM H. BARTON, CHIEF, GEOGRAPHIC DIVISION

Based on the bathymetric studies of Bruce C. Heezen of the Lamont Geological Observatory  
and the work of the U.S. Navy Hydrographic Office

Printed by permission of the U.S. Navy Hydrographic Office  
HORIZONTAL SCALE: 1 INCH REPRESENTS 100 MILES AT THE EQUATOR  
VERTICAL SCALE: EXAGGERATED  
Copyright © 1963 by the National Geographic Society





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

[http://images.yandex.ru/yandsearch?noreask=1&lr=213&ed=1&text=%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%82%D1%8B%20%D0%B4%D0%BD%D0%B0%20%D0%A2%D0%B8%D1%85%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BE%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D0%B0&p=9&img\\_url=img0.liveinternet.ru%2Fimages%2Fattach%2Fc%2F1%2F45%2F751%2F45751629\\_weltmeerer\\_map.jpg&rpt=simage](http://images.yandex.ru/yandsearch?noreask=1&lr=213&ed=1&text=%D0%9A%D0%B0%D1%80%D1%82%D1%8B%20%D0%B4%D0%BD%D0%B0%20%D0%A2%D0%B8%D1%85%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BE%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D0%B0&p=9&img_url=img0.liveinternet.ru%2Fimages%2Fattach%2Fc%2F1%2F45%2F751%2F45751629_weltmeerer_map.jpg&rpt=simage)

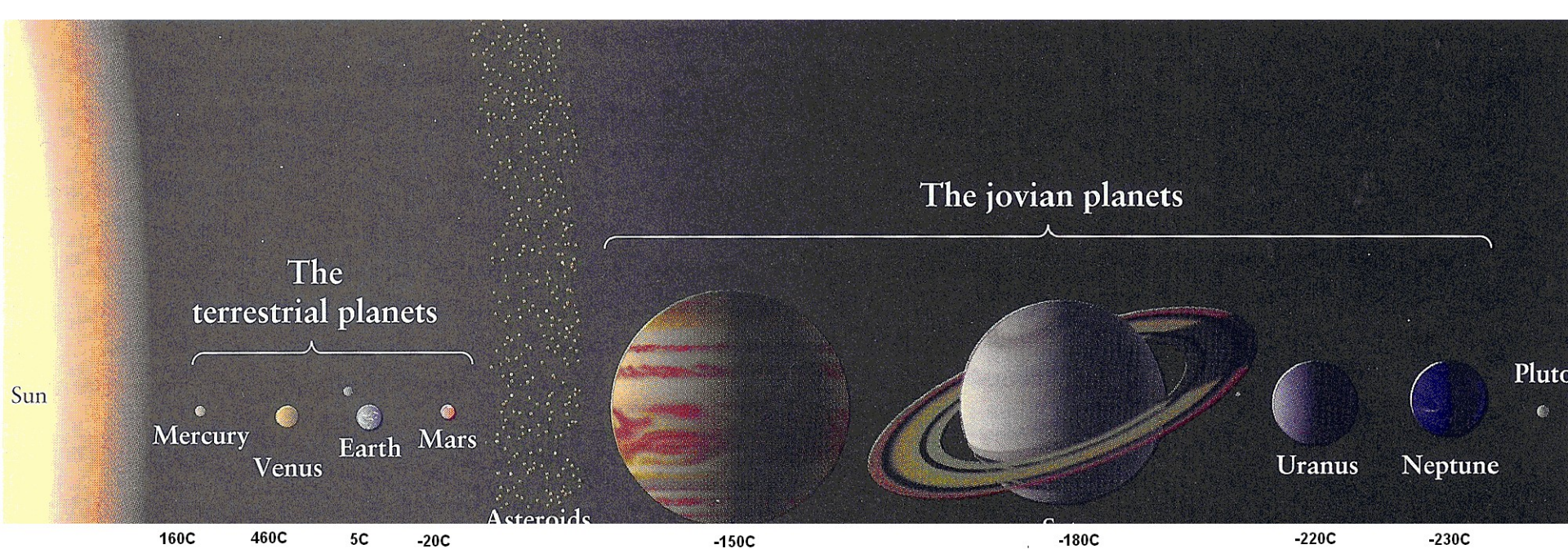
**Горы = вулканы+складки**





4.57 млрд. лет

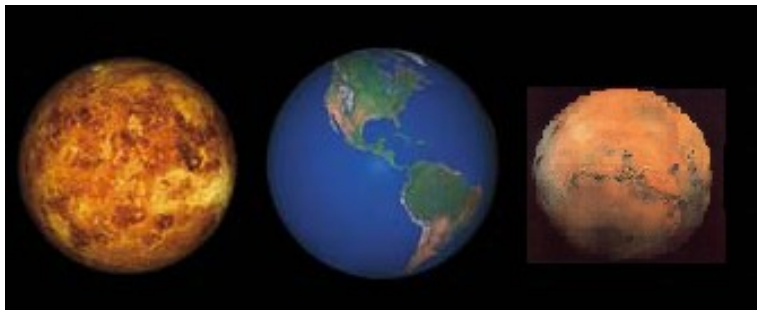




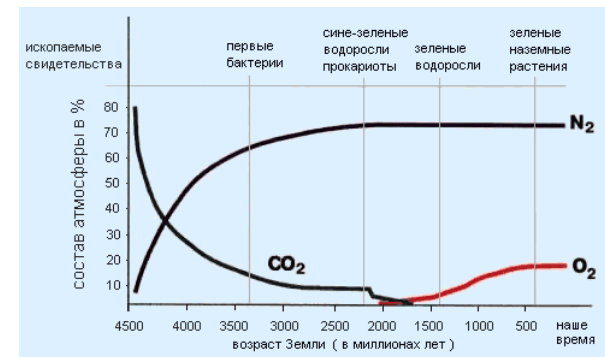
**Железо+ силикаты**  
твердые каменные

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

**Тепло и гравитация Солнца + внутреннее тепло**



# История Земли (млрд. лет в прошлое)





# Процессы в мантии Земли

звекция под жесткой литосферой, расколотой на плиты. Они рождаются при застывании магмы в океанических хребтах зонах субдукции. На стыках плит - землетрясения. Легкие континенты плавают на мантии. На дне мантии гигантские (400 км) очаги горячего утяжеленного вещества. Там зарождаются плюмы (горячие грибовидные струи), создающие крупнейшие вулканы.



верхность в срединно-океанических хребтах.

но 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.

родинамическая теория, воспроизводящая всю совокупность глобальных процессов в мантии Земли  
а Земли. 2000, 2006, 2010, 2012

