

# Динамическая вулканология

для студентов и аспирантов механико-математического и геологического факультетов МГУ.

Весенний семестр  
9 февраля – 27 апреля 2010 года

Итог – зачет для 4-го курса, экзамен для магистрантов

Курс из 11 лекций читают:

- Павел Юрьевич Плечов
- Олег Эдуардович Мельник
- Алексей Алексеевич Бармин



Страница курса в Интернете:  
[http://wiki.web.ru/wiki/Геологический\\_факультет\\_МГУ:Вулканология](http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Вулканология)

The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window displaying the GeoWiki page for 'Геологический факультет МГУ:Вулканология'. The browser's address bar shows the URL [http://wiki.web.ru/wiki/Геологический\\_факультет\\_МГУ:Вулканология](http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Вулканология). The page header features the title 'Все о Геологии' and the logo 'Геовикипедия wiki.web.ru'. A search bar is present with the text 'по геол. сайтам' and a 'Найти!' button. The main content area is titled 'Геологический факультет МГУ:Вулканология' and includes the following text: 'Материал из GeoWiki - открытой энциклопедии по наукам о Земле.', 'Курс "Вулканология" читается с 2009 г. на геологическом факультете МГУ для студентов, магистрантов и аспирантов геологического и механико-математического факультетов МГУ.', 'Лекторы: Плечов Павел Юрьевич, д.г.-м.н., профессор; Мельник Олег Эдуардович, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН; Бармин Алексей Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор.', 'Отчетность: зачет для 413 гр. геологического факультета МГУ, экзамен для магистрантов геологического и механико-математического факультетов МГУ.', 'Вопросы к зачету и экзамену по курсу', 'Лекции проходят в аудитории 826 Главного Здания МГУ по вторникам с 14:30 по 16:05', and 'План лекций по курсу «Вулканология» на весенний семестр 2010 г.' followed by two numbered lecture topics. The left sidebar contains navigation links such as 'Главная страница', 'Тематический каталог', and 'Библиотека GeoWiki'. The bottom of the browser window shows navigation controls like 'Следующее', 'Предыдущее', and 'Учить регистр'.

# Лекция 1 – главные темы

- Предмет вулканологии и динамической вулканологии
- История вулканологии
- Глубинное строение Земли (кора, мантия, ядро, литосфера и астеносфера, континентальные и океанические плиты)
- Источники тепла, возможность мантийной конвекции.
- Связь землетрясений и извержений
- Геодинамические обстановки (океан: срединно-океанические хребты, океанические плато, океанические острова; континенты: рифтовые зоны, большие магматические провинции; переход океан-континент: островные дуги, задуговые бассейны, активные континентальные окраины).
- Распределение зон вулканизма по геодинамическим обстановкам.
- Главные стимулы изучения вулканов



# Вулканология – объекты

- Объектами вулканологии являются вулканоматматические системы, вулканические извержения и последствия извержений



Изучается строение вулканов, закономерности распространения, параметры очагов, причины извержений, влияние извержений на климат и многие другие вопросы.

# Лучше увидеть, чем ...

1. Подборка извержений на главном острове Гавайи – Hawaii Big Island ...
  2. Начало извержения – video.mp4
  3. Извержение вулкана Маунт Сент-Хеленс 1980, 18 мая – St\_Helens.mp4
  4. Извержение вулкана Унзен 1991 г. - Unzen.mp4
- Использованы фрагменты видео сайта [www.vidoemo.com](http://www.vidoemo.com)



# Методы динамической вулканологии

- Визуальный и инструментальный мониторинг
- Интерпретация геофизических данных
- Изучение деформаций поверхности
- Петрологическое изучение продуктов извержения
- Геохимия и изотопная геология
- Исследование гидротермальных систем
- Исследование вулканических газов
- Стратиграфический анализ и тефрохронология
- Изучение реологии магмы
- Изучение кинетики процессов в магме
- Термодинамическое моделирование
- Математическое моделирование



# История вулканологии – этап наблюдений

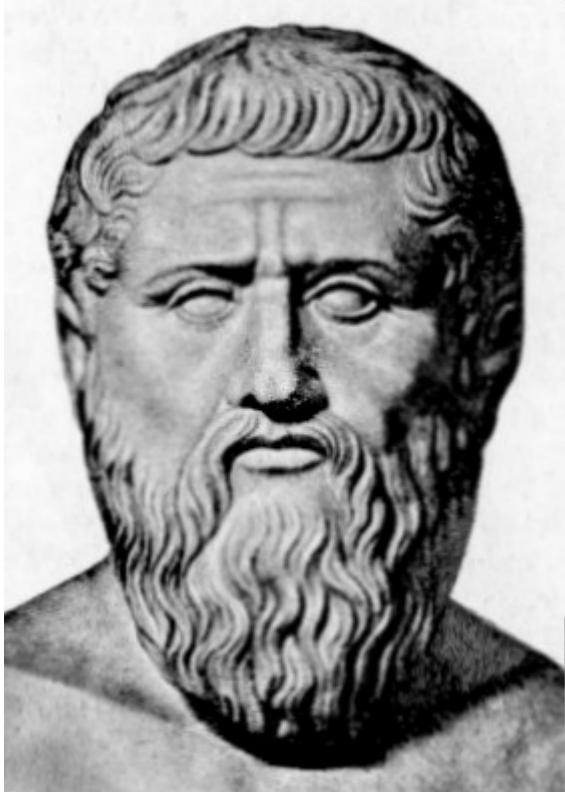


Наскальный рисунок в Çatalhöyük (Анатолия, Турция) – первая карта и первое изображение вулкана, неолит, 6.2 тыс. до н.э.

# Диалоги Платона



Фрески в  
Акротири,  
минойская  
культура



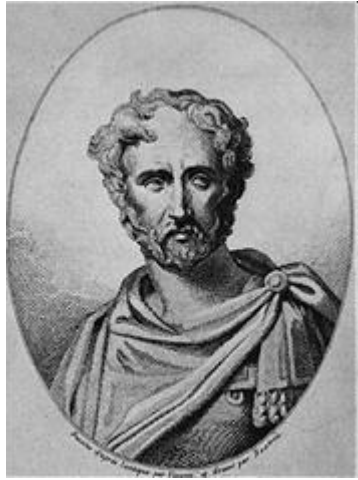
Платон  
(428/427–348/347 до н.э.)



Санторини

Упомянул извержение типа Кракатау, произошедшее в 1600-1630 г до н.э. и вызвавшее цунами в Средиземном море. Современные вулканологи оценили объем в 39-60 км<sup>3</sup> DRE (в 3-4 раза больше Кракатау), высоту эруптивной колонны в 30-35 км.





Плиний Старший  
(23 –79, 25 авг.)



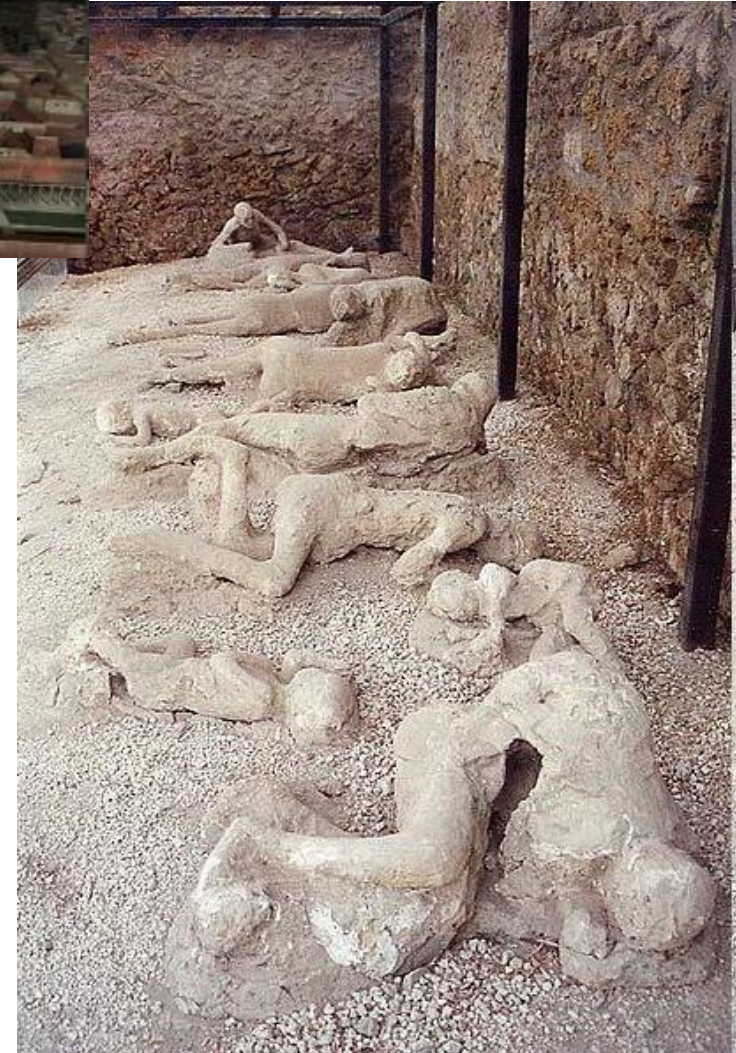
Плиний Младший  
(61/63 –ок. 113 )  
Два письма Тациту



# Извержение Везувия, 24-25 авг. 79 г.



Карл Брюлов «Последний день Помпеи»





# Первые вулканологи



С.П.Крашенинников  
(1711-1755)



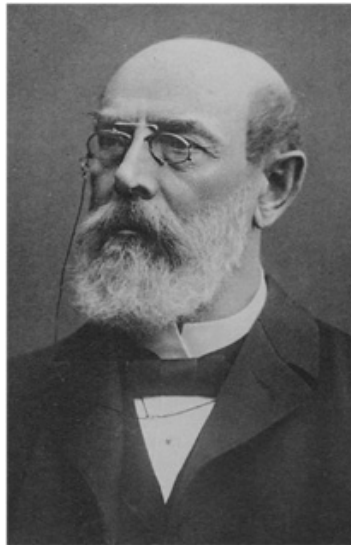
Sir William Hamilton  
(1730-1803)



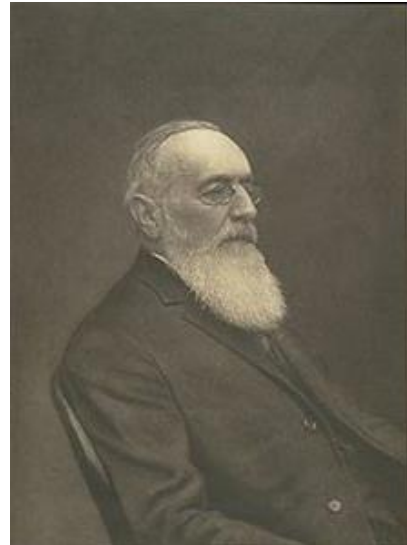
James Dana  
(1813-1895)



Henry Sorby  
(1826-1908)



Г. Розенбуш  
(1836-1914)



А.Лакруа  
(1863-1948)

Практически каждый геолог XVIII-XIX века посещал и описывал вулканы и вулканические породы.

Этот период характеризуется переходом от мистических к научным представлениям о природе вулканов. Среди первых вулканологов преобладали петрографы



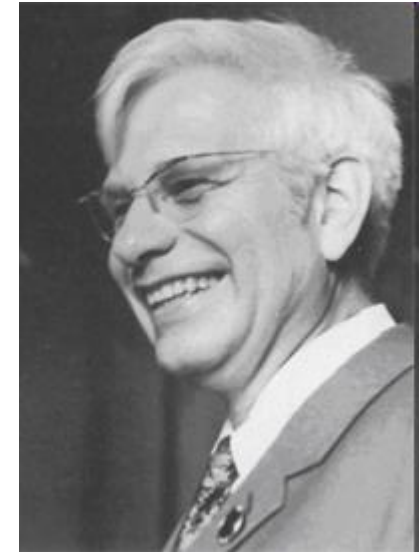
Гарун Тазиев  
(1914-1998)



Александр Николаевич  
Заварицкий (1884-1952)



Владимир Иванович  
Влодавец (1893-1993)



Георгий Степанович  
Горшков (1921-1975)



Хисаши Куно  
(1910-1969)



Борис Иванович Пийп  
(1906-1966)



Татьяна Ивановна  
Фролова (1922-2007)



Олег Назарович  
Волынец (1937-1998)





Харальдур  
Сигурдссон



Том Симкин



Сетси Накада



Иван Васильевич  
Мелекесцев



Джон  
Эйхельбергер



Стив Спаркс



Юрий Борисович  
Слезин



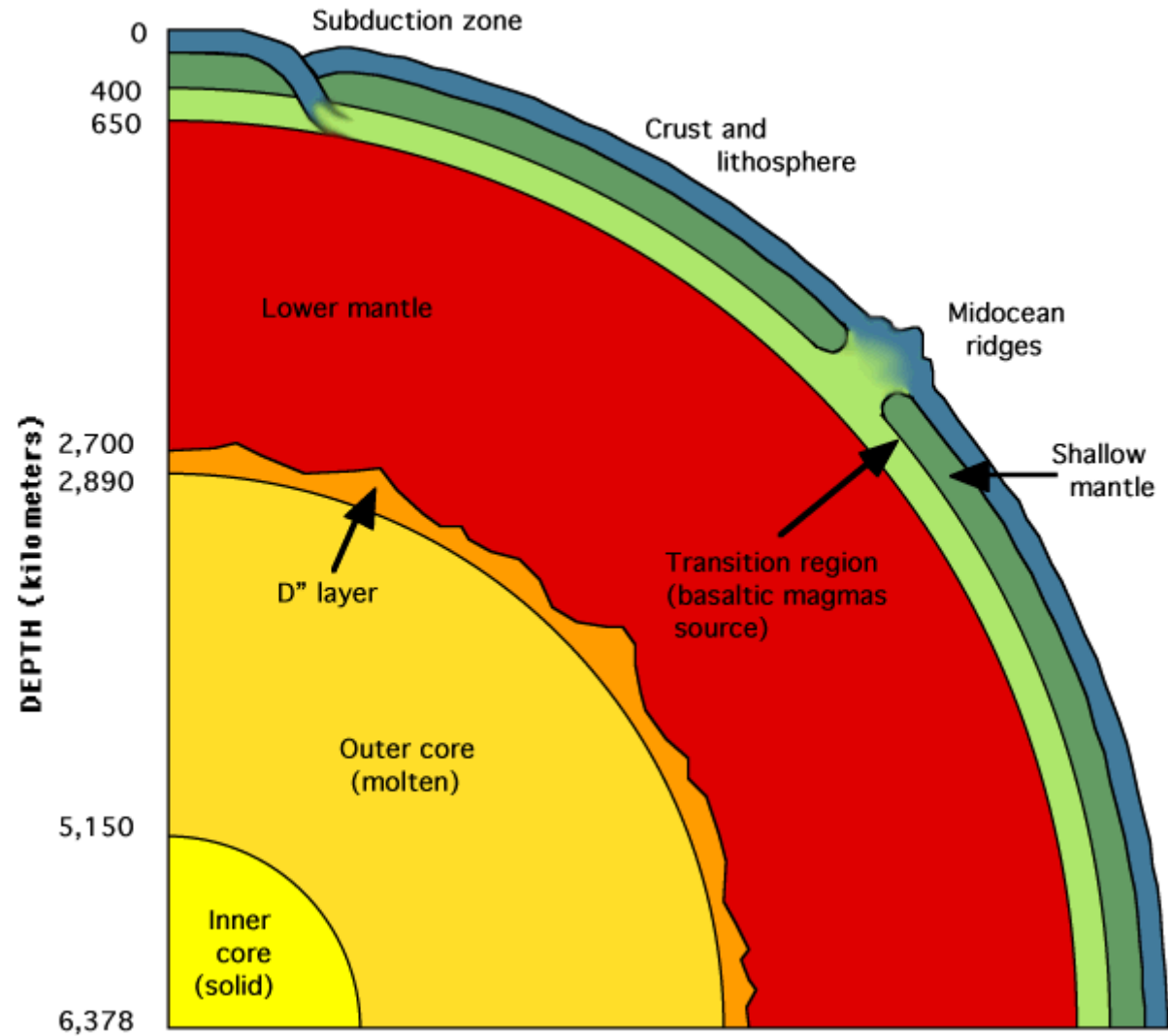
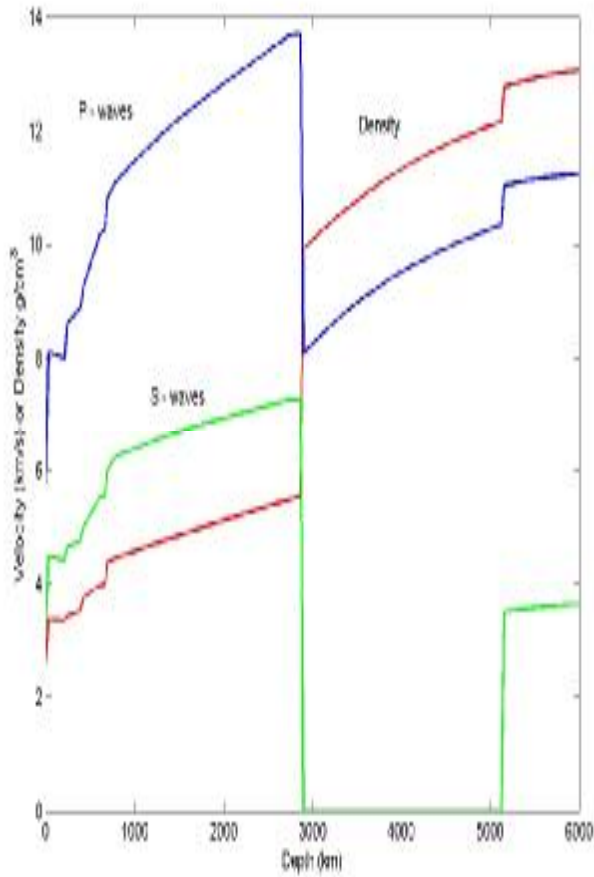
Место для Вашей  
фотографии



Давайте возьмем и рассмотрим внутреннее строение Земли



# Сейсмическая модель строения Земли





# Примерные реперные цифры

- Земная кора (мощность меняется) 0 - 70 км (ср. -24)
- литосферная мантия 24 - 80 км
- Астеносфера 80 - 220 км
- Верхняя мантия 220 - 400 км
- 400 - 670 км
- **Мантия**
- 670 - 770 км
- Нижняя мантия 770 - 2740 км D'
- 2740 - 2890 км D''
- Внешнее ядро 2890 - 5150 км
- Внутреннее ядро 5150 - 6370 км



Альфред Вегенер  
(1880-1930)

**Geologische Vereinigung.**  
**Die Entstehung der Kontinente<sup>1)</sup>.**  
Von Dr. **Alfred Wegener** (Marburg i. H.).  
Mit 3 Textfiguren.  
(Vortrag gehalten auf der Hauptversammlung zu Frankfurt a. M. am 6. I. 1912.)

**I. Vorbemerkung.**

Im folgenden soll ein erster Versuch gemacht werden, die Grossformen der Erdrinde, d. h. die Kontinentaltafeln und die ozeanischen Becken, durch ein einziges umfassendes Prinzip genetisch zu deuten. nämlich das der hori-

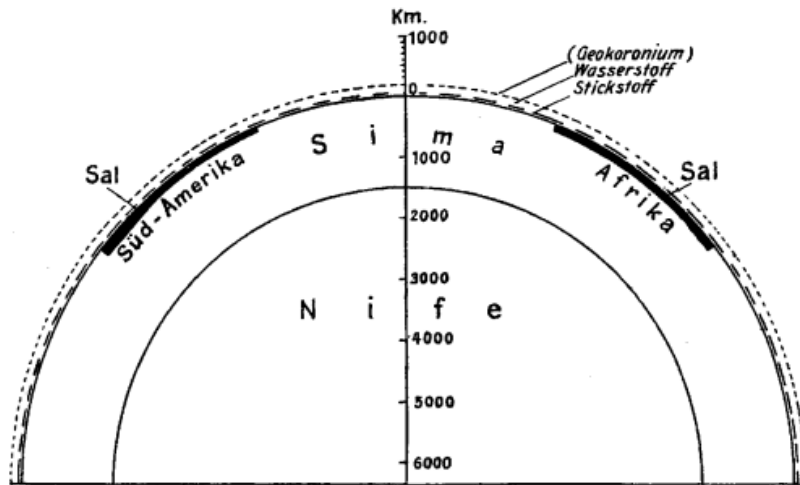
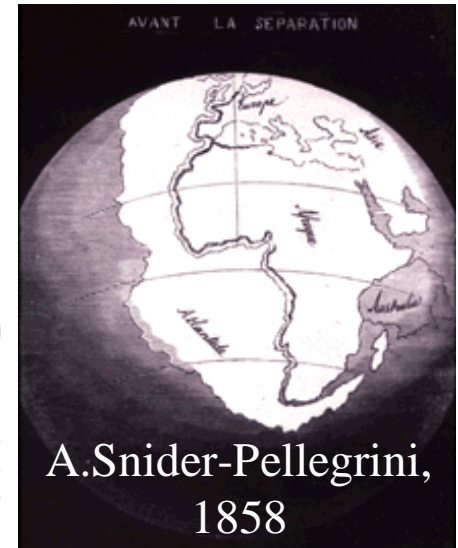
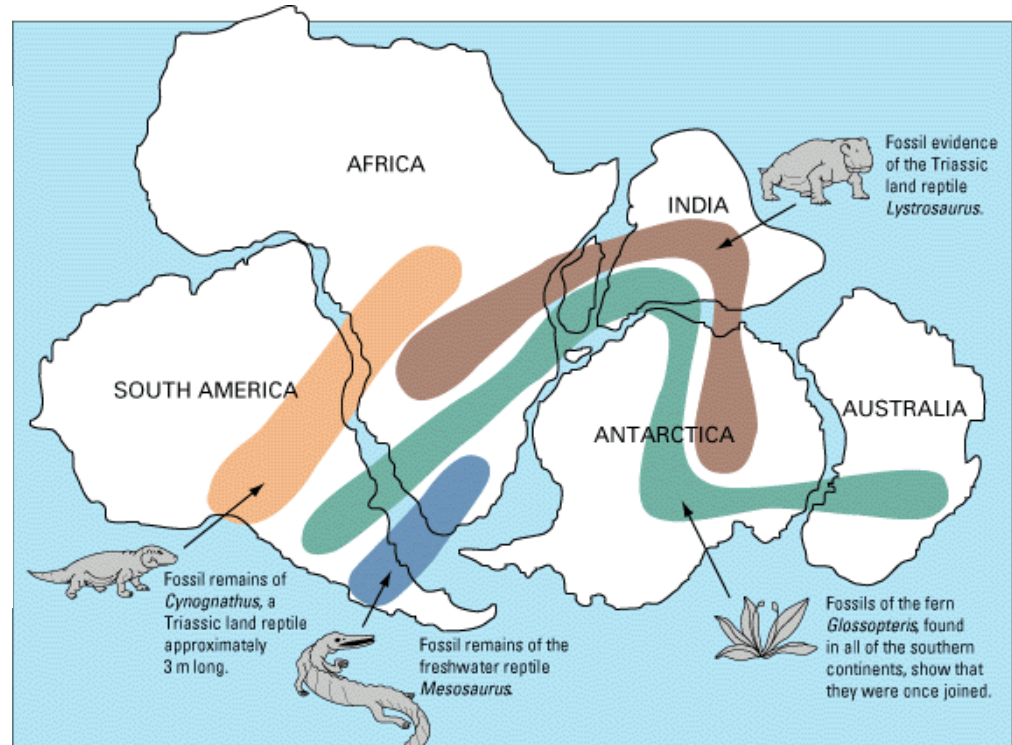


Рисунок А.Вегенера,  
демонстрирующий дрейф континентов

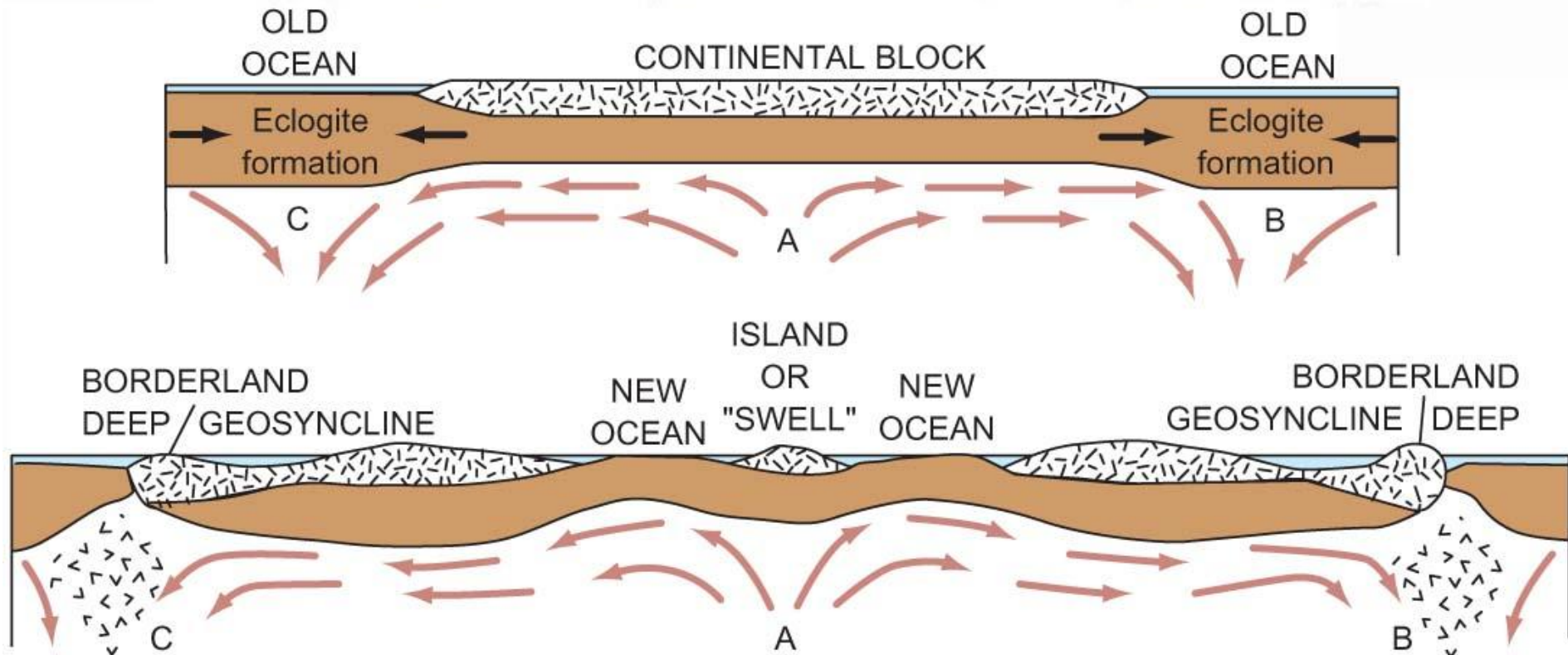


Аргументы существования Гондваны  
200 млн.лет назад



Arthur Holmes  
в 1928 предположил  
существование  
мантйной конвекции  
как причину дрейфа континентов

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.





# Источники тепла и остывание Земли

- Тепло за счет радиоактивного распада -  $2 \cdot 10^{13}$  W.  
от времени полураспада  $Q \sim (t)^{1/2}$

времена полураспада для природных изотопов:

$$^{238}\text{U} = 4,498 \cdot 10^9$$

$$^{232}\text{Th} = 1,389 \cdot 10^{10}$$

$$^{40}\text{K} = 1.250 \cdot 10^9$$

- Гравитационная энергия за счет перераспределения масс
- Приливная энергия за счет взаимодействия с Солнцем и Луной

- Суммарная тепловая потеря –  $4.4 \cdot 10^{13}$  W.

Исходя из этого баланса Земля должна остывать на 1 градус в миллион лет

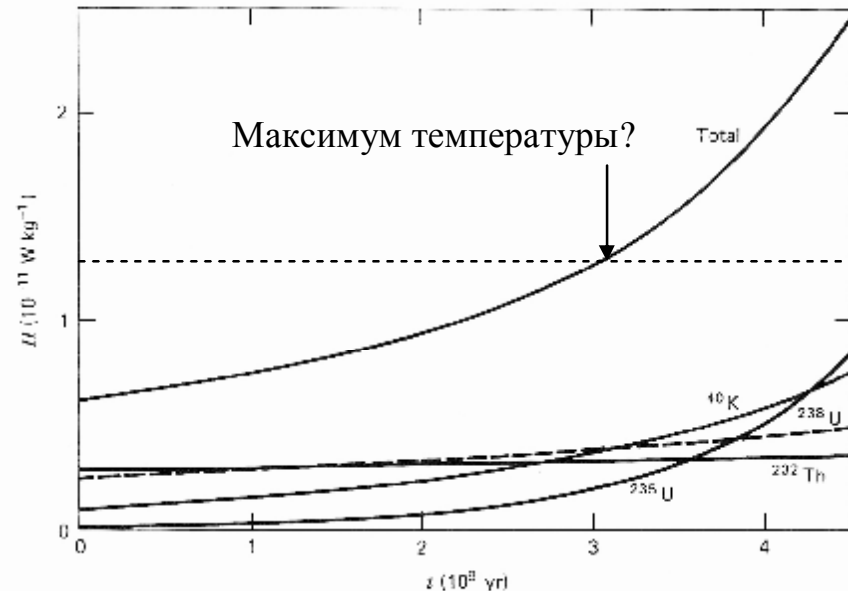
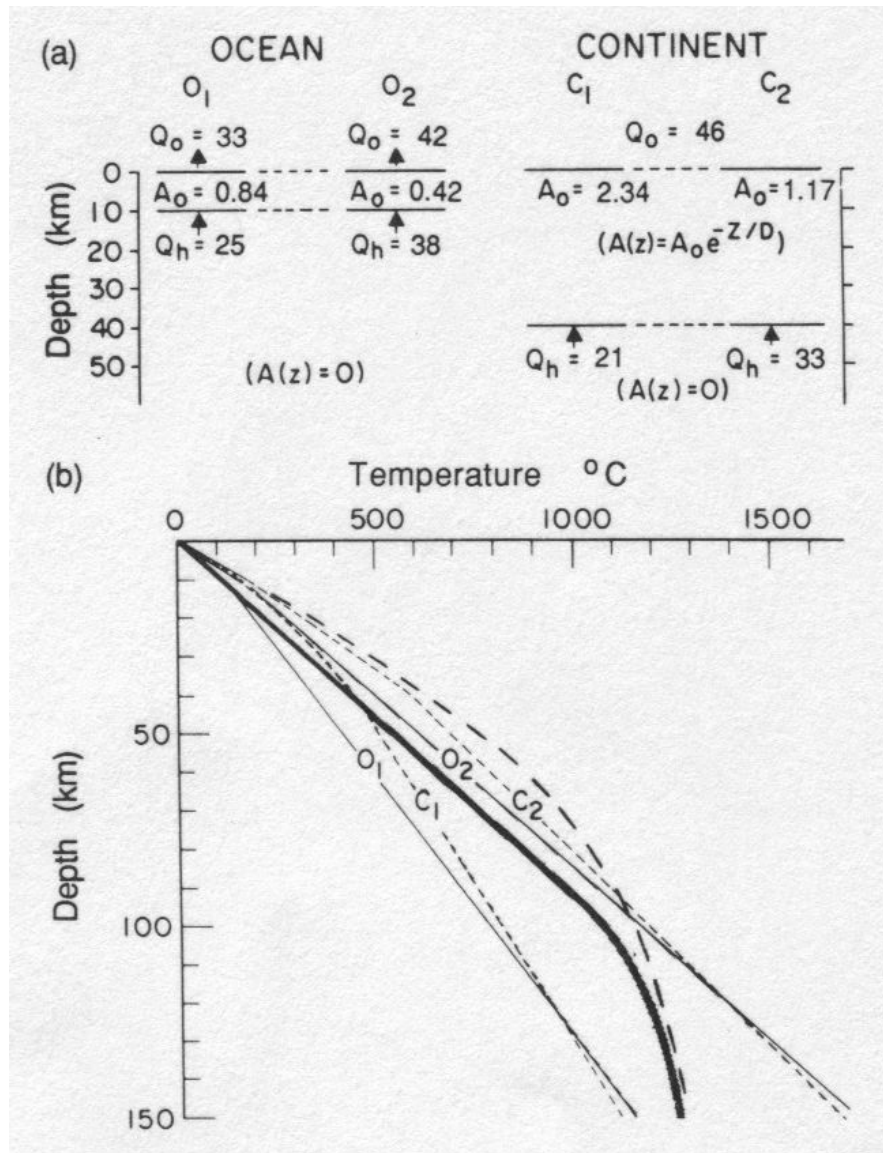


Figure 4-4 Mean mantle heat production rates due to the decay of the radioactive isotopes  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , and  $^{40}\text{K}$  as functions of time measured back from the present.

# Тепловой поток и геотерма



$$\frac{d^2 T}{dz^2} = -\frac{A}{k}$$

$$T(z) = -(A/2k) z^2 + (Q_0/k) z + T_0$$

$A$  – тепло, выделяемое внутри вещества

$k$  – коэффициент теплоемкости


$Z$  – глубина

$Q_0$  – тепловой поток на поверхности

$T_0$  – температура на поверхности



# ВОЗМОЖНОСТЬ КОНВЕКЦИИ

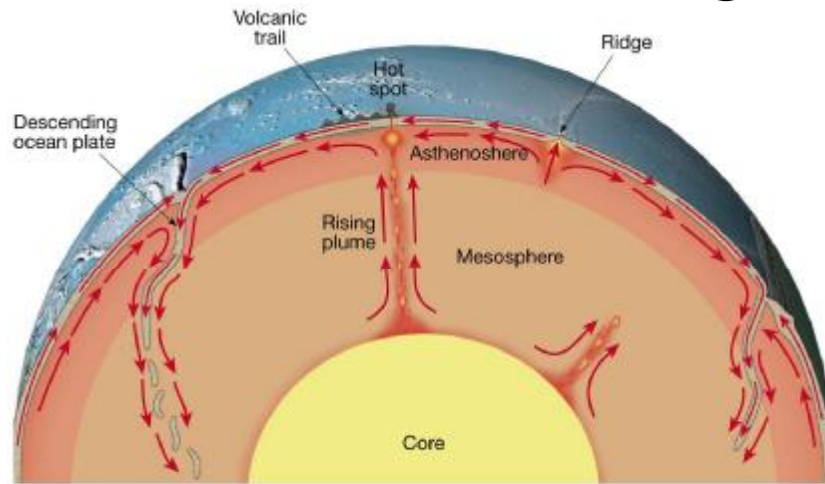

$$Ra = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu\alpha}$$

- \* Ra = число Релея
- \* g = ускорение свободного падения
- \* d = характеристический размер области жидкости
- \*  $\Delta T$  = разность температур между стенками жидкости
- \*  $\nu$  = кинематическая вязкость жидкости
- \*  $\alpha$  = температуропроводность жидкости
- \*  $\beta$  = коэффициент теплового расширения жидкости

- *Критическое число Релея лежит в пределах 678-2772 в зависимости от граничных условий.*
- Для верхнемантийной конвекции  $Ra = \sim 10^6$
- Для конвекции всей мантии  $Ra = \sim 10^7$

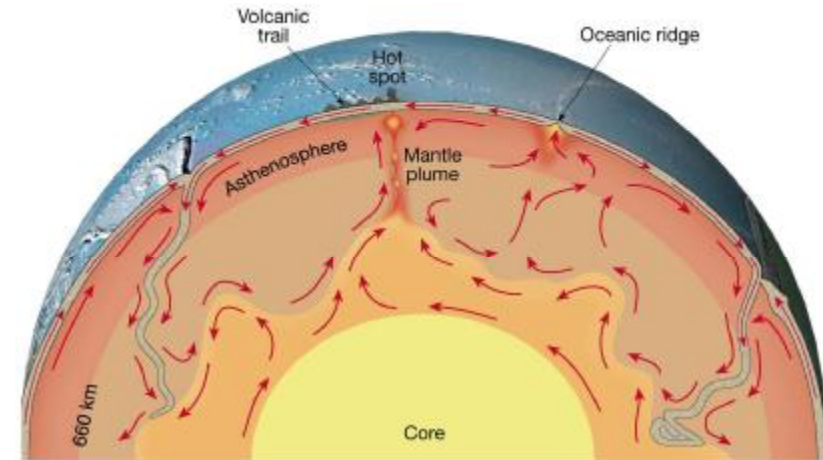
Если существует выделение тепла внутри слоя, то  $Ra = g\alpha A * d^5 / k\nu$ , то есть число Рэлея будет еще больше

# Три возможных сценария конвекции



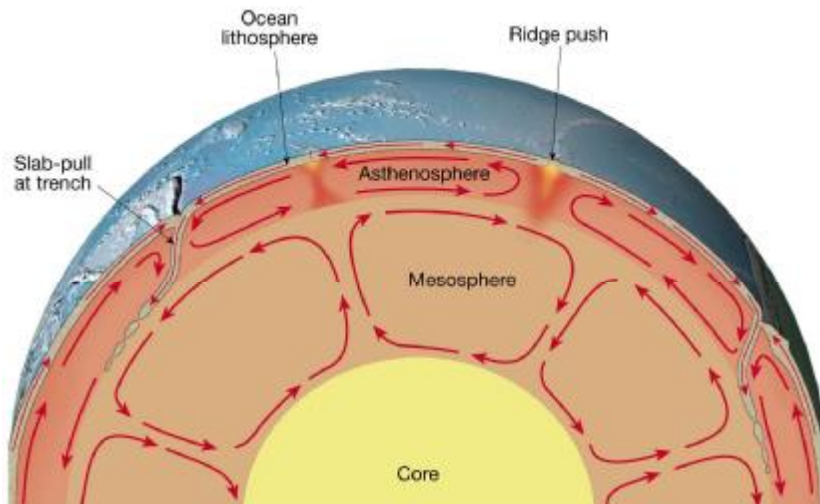
B. Whole-mantle convection

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.



C. Deep-layer model

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.



A. Layering at 660 kilometers

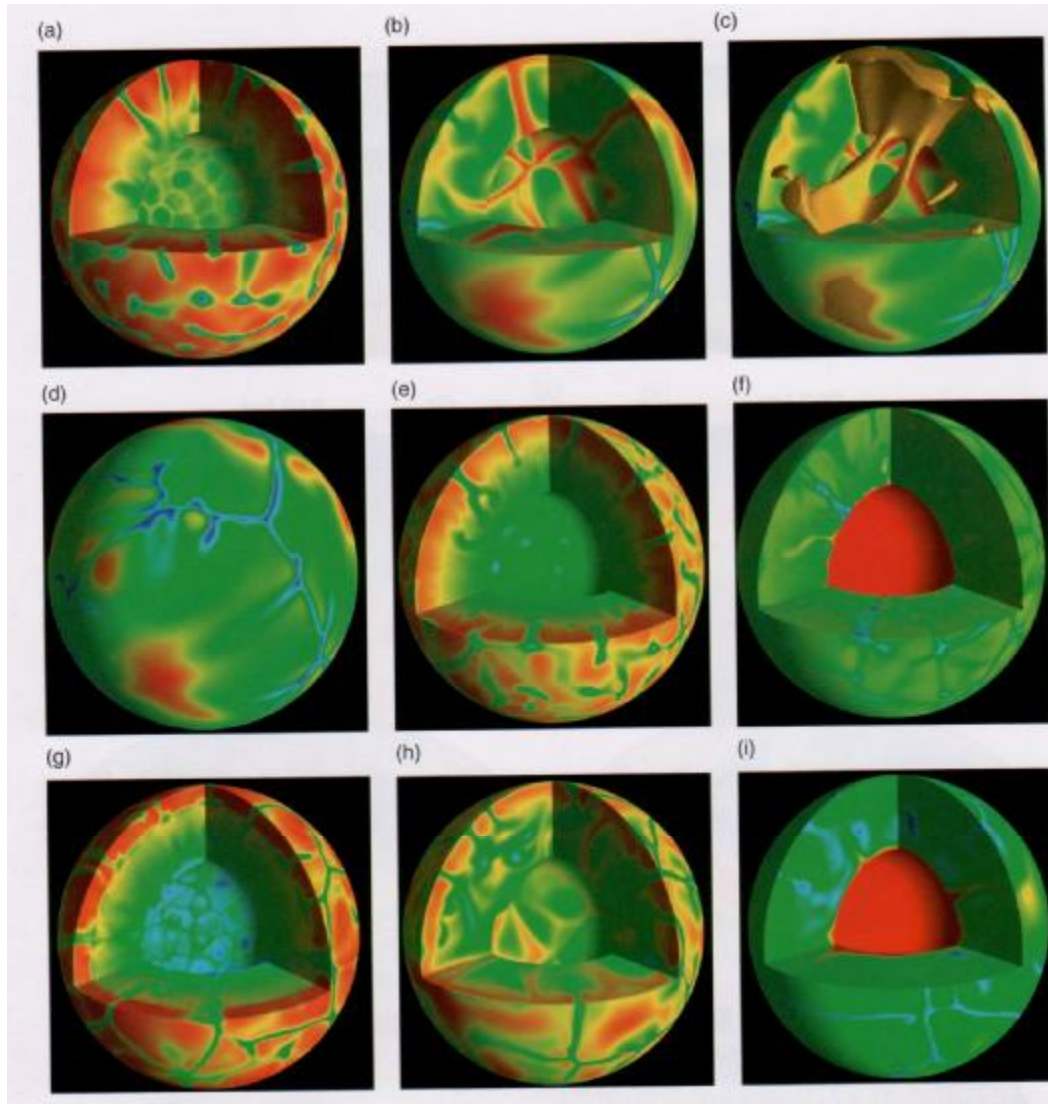
Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Проверочные наблюдения:

- 1) Сейсмические данные и тепловые потоки
- 2) Размеры ячеек и вулканизм
- 3) Изменение вулканизма во времени, дрейф континентов и складчатость



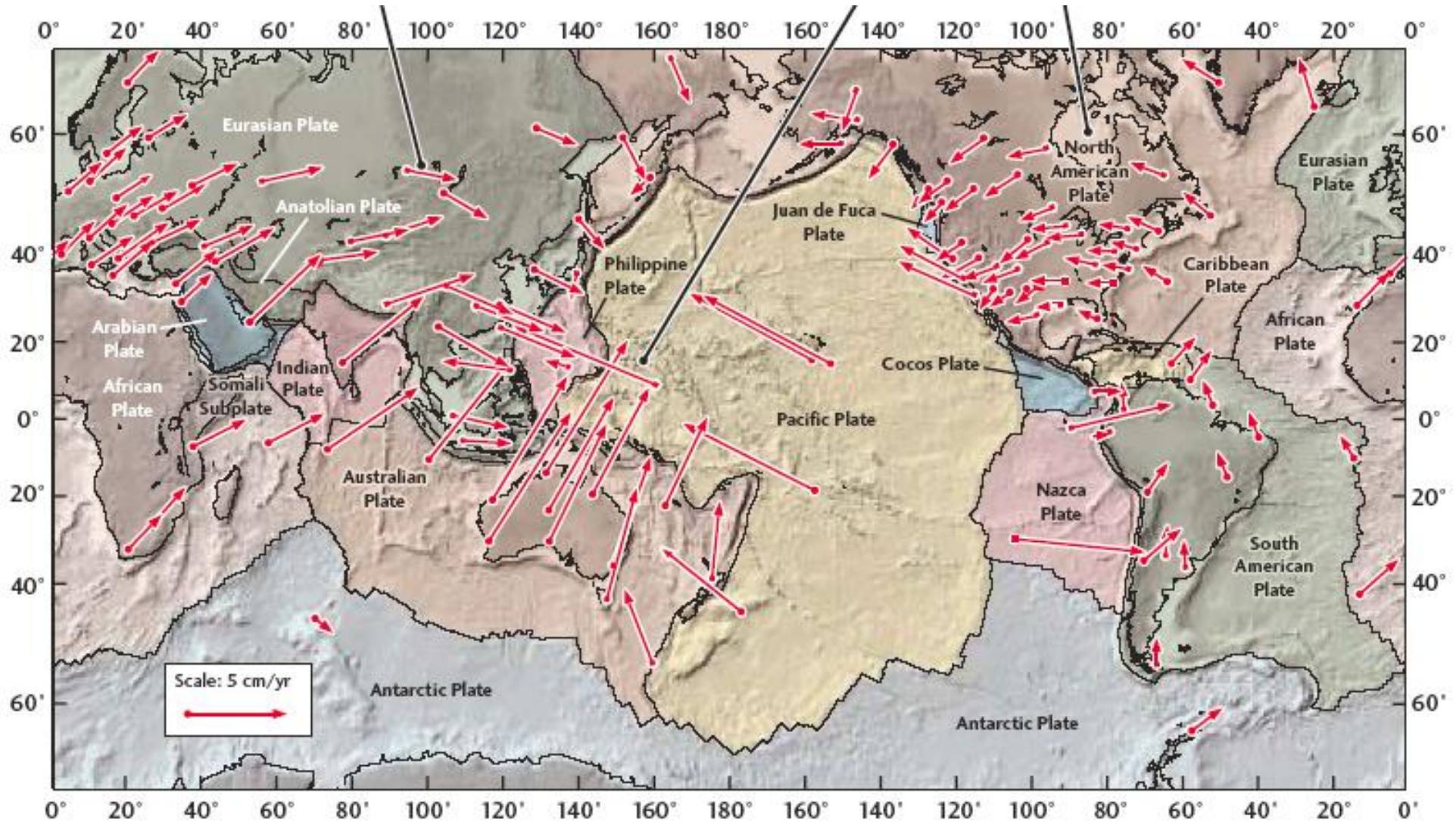
## Результаты моделирования конвекции с различными граничными условиями



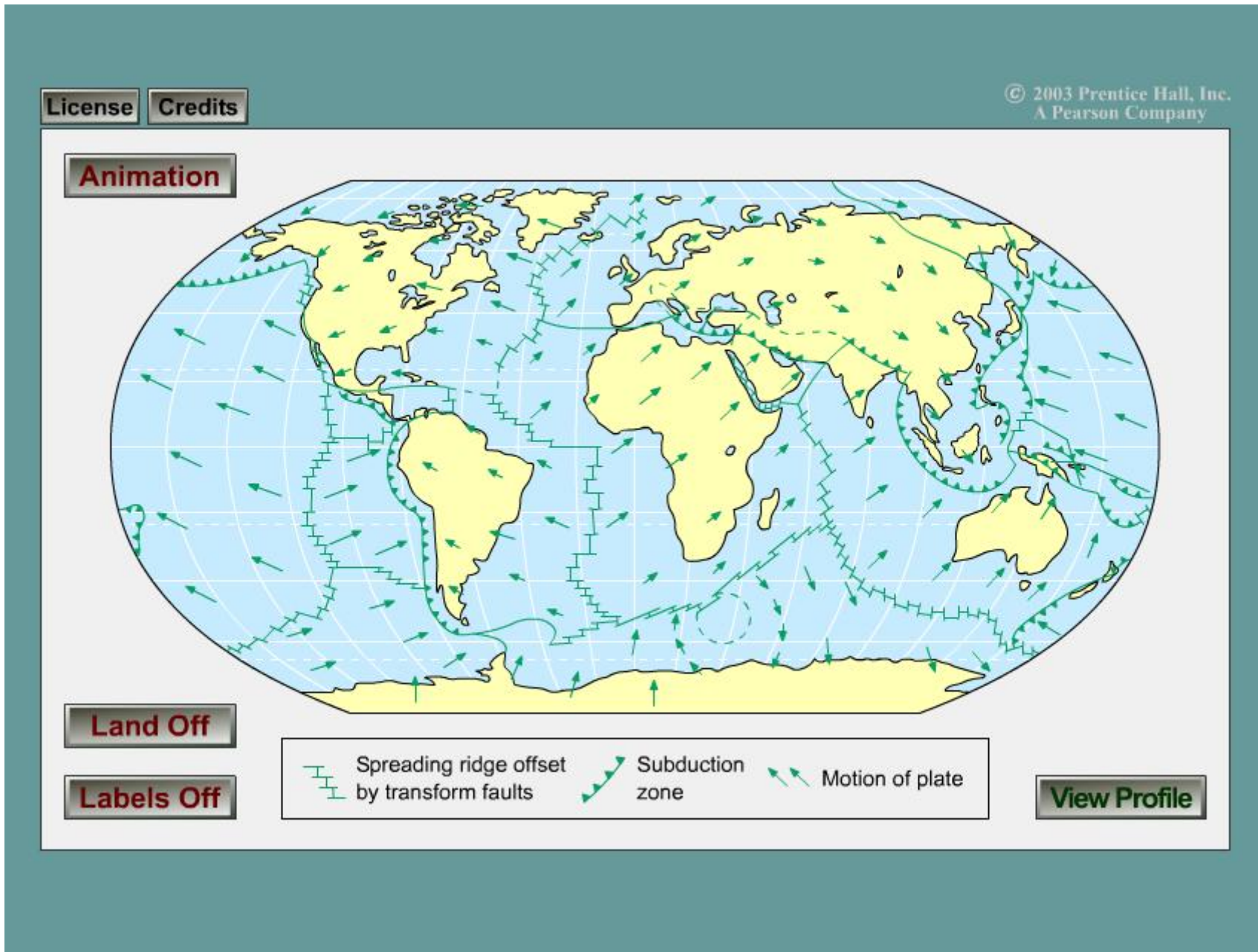
- a)  $Ra=4 \times 10^7$ , const  $\nu$
- b) Более вязкая нижняя мантия
- c) то же, что b.
- d) вид поверхности для b.
- e)  $Ra=10^8$ , const  $\nu$ .
- f) 38% тепла из ядра.
- g) с учетом фазового перехода на глубине 670 км.
- h) то же, с более вязкой нижней мантией.
- i) 38% тепла из ядра.

Lupei Zhu, 2007

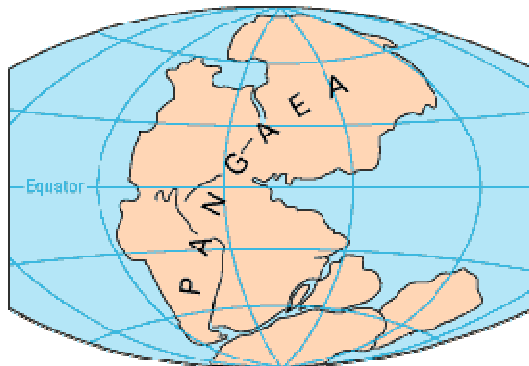
# Схема современного движения тектонических плит







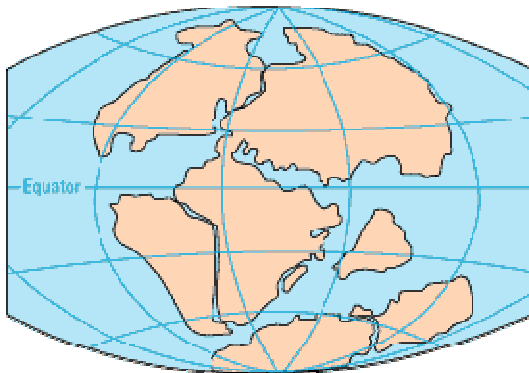




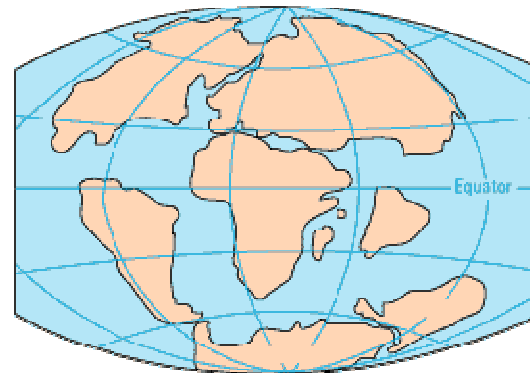
**PERMIAN**  
225 million years ago



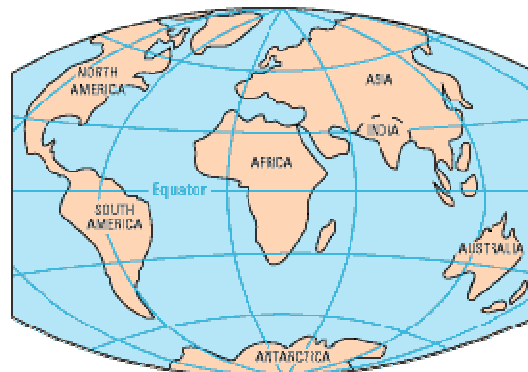
**TRIASSIC**  
200 million years ago



**JURASSIC**  
135 million years ago



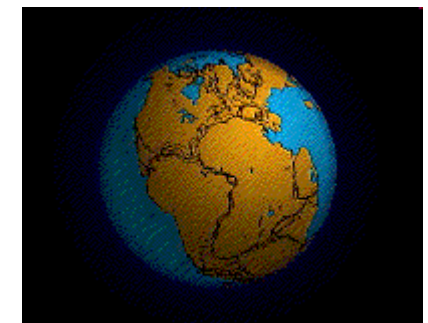
**CRETACEOUS**  
65 million years ago



**PRESENT DAY**

### Суперконтиненты:

- Ур – 3 млрд. л.н.  
(Rogers, 2002)
- Кенорленд – 2.7 млрд. л.н.  
(Williams et al., 1991)
- Нуна (Коламбия) – 1.8-1.5 млрд. л.н.  
(Rogers & Santosh, 2002)
- Родиния – 1.1-0.7 млрд. л.н.  
(Dalziel, 1991)
- Паннотия – 600-540 млн. л.н.  
(Dalziel, 1997)
- Пангея – 250 млн. л.н.  
(Wegener, 1920)



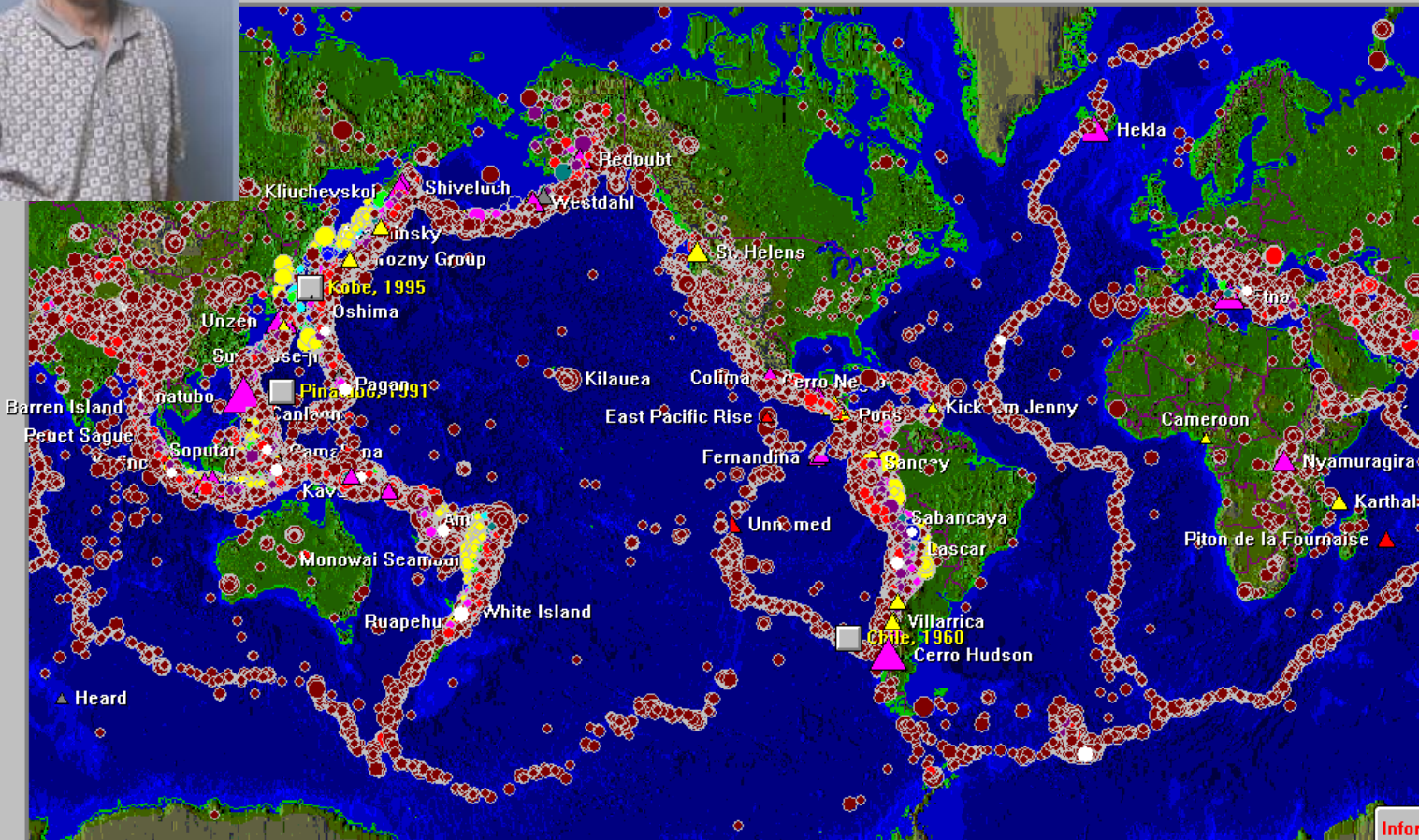
# Связь землетрясений и извержений



Alan L. Jones,  
Purdue University

Скачать программу:  
<http://bingweb.binghamton.edu/~ajones/>

World Earthquakes & Volcanic Eruptions, 1960 to present



**Key**

**Earthquakes**  
57906

Magnitude	Depth(km)
4	0
5	100
6	200
7	300
8	400
9	500

**Eruptions**  
405

Magnitude	Type
1	Not erupting
2	Lava
3	Explosive
4	Both
5	Unknown
6	
7	

Play Rew. **1992 Jun 23** F.Fwd Repeat Pause Fast! EQ Cutoff 3.0 Eruption Cutoff 1

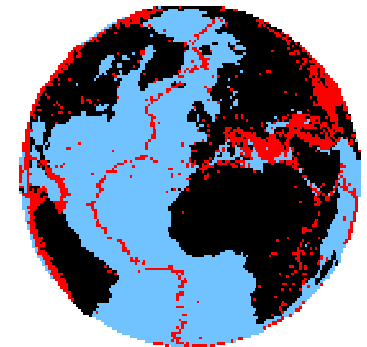
Back 1959 Dec 31 2009 Feb 04 Step Step

Earthquakes  
 Eruptions

Plates

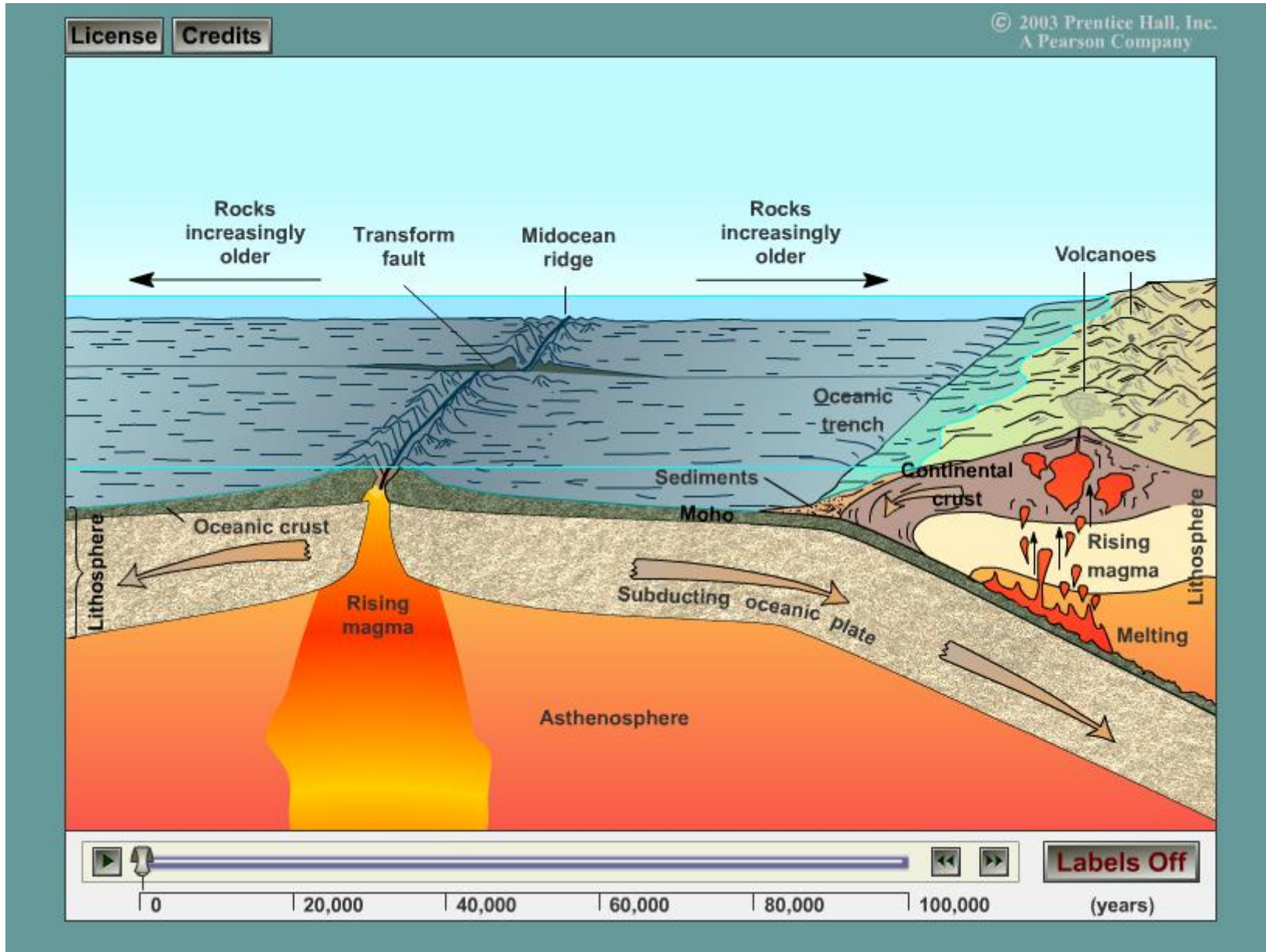
# Связь землетрясений и извержений

- Землетрясения и вулканизм приурочены к границам тектонических плит
- Не выявлено пространственно-временной связи между крупными землетрясениями и извержениями
- Мелкофокусные землетрясения являются предвестниками извержений



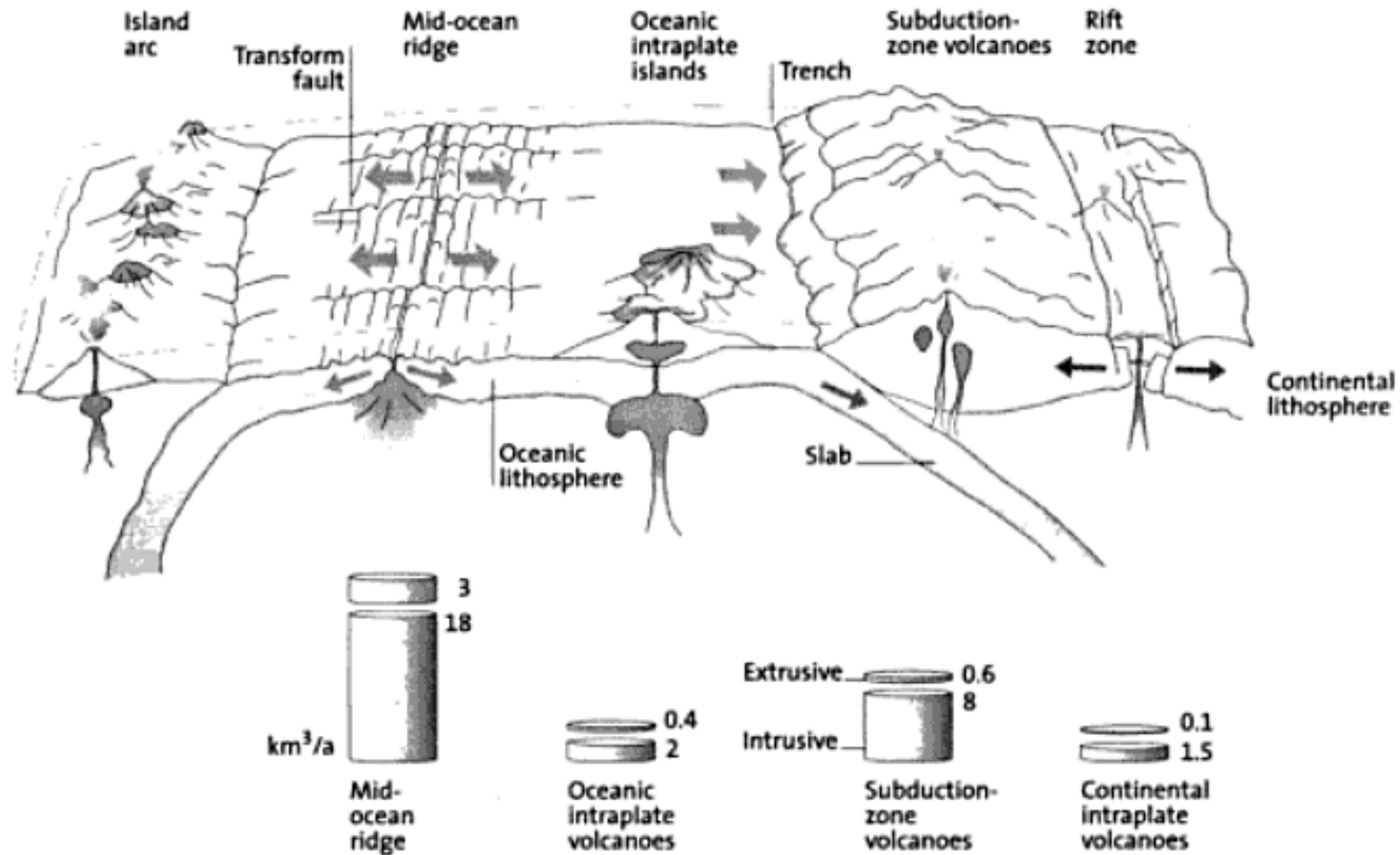


## Движение океанической плиты от рифтовой зоны к континентальной окраине



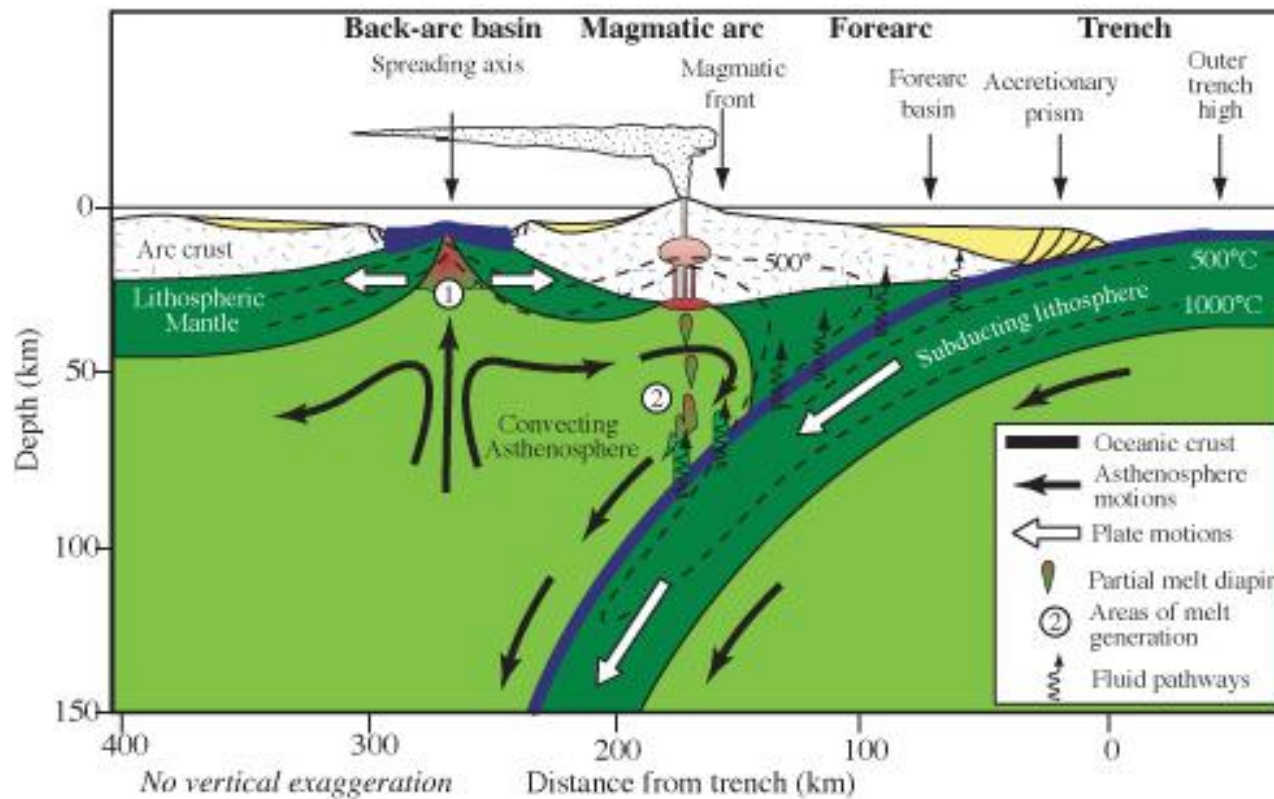
Мощность океанических плит 80-100 км, они включают в себя кору и литосферную мантию

# Усложнение до 4 типов позиций вулканов



Shminke, 2004

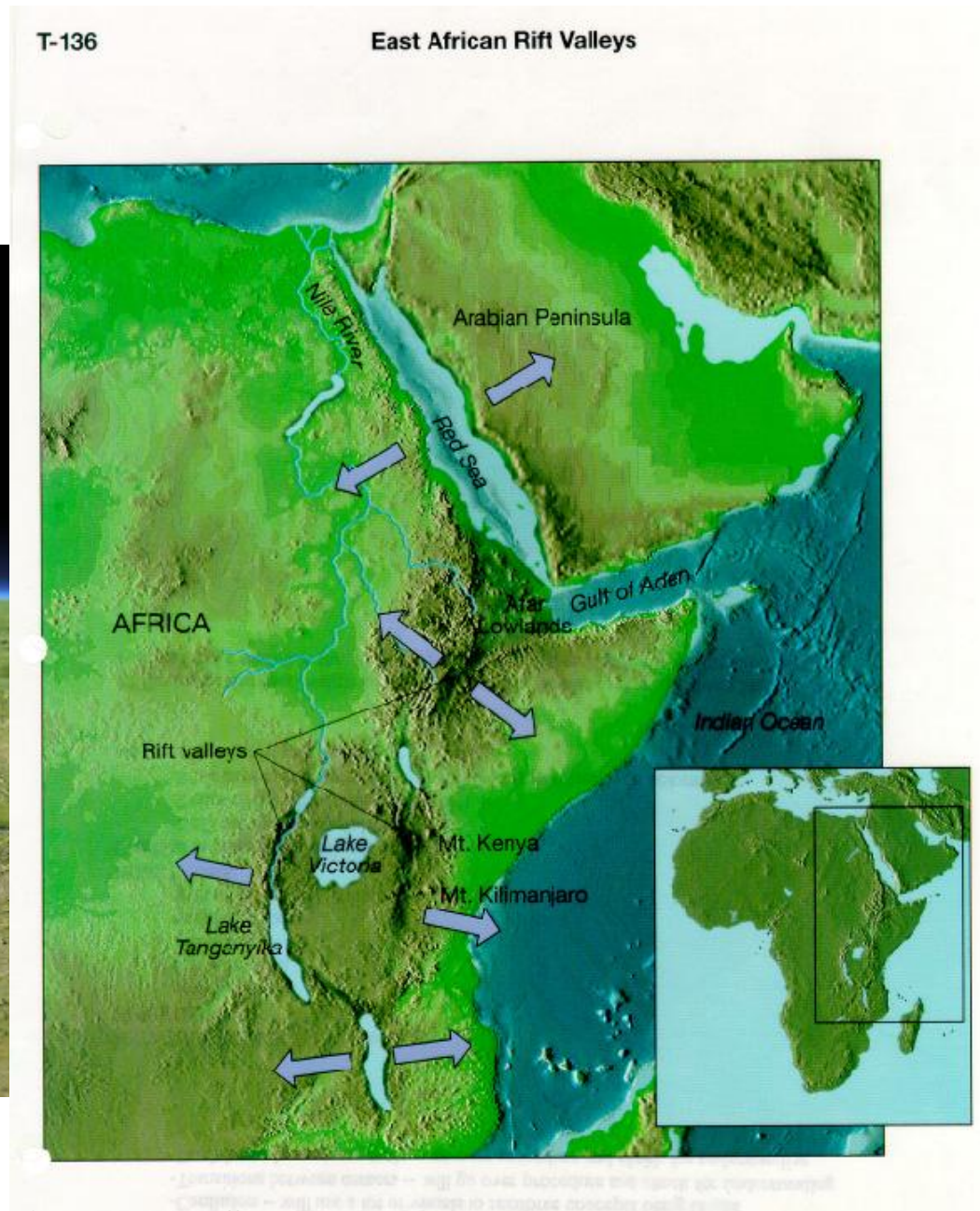
# Пять типов обстановок островодужного вулканизма



- Вулканические дуги
- Задуговые бассейны
- Островодужный рифтинг
- Преддуговой вулканизм
- Постостроводужный вулканизм



# Континентальные рифты



# Сколько выделять обстановок современного вулканизма?

Срединно-океанические хребты:

- \* Медленный спрединг
- \* Быстрый спрединг

Горячие точки:

Courtillot et al., **Three distinct types** of hotspots in the Earth's mantle, 2003

Островодужный вулканизм:

Как минимум 5 типов

Континентальные рифты:

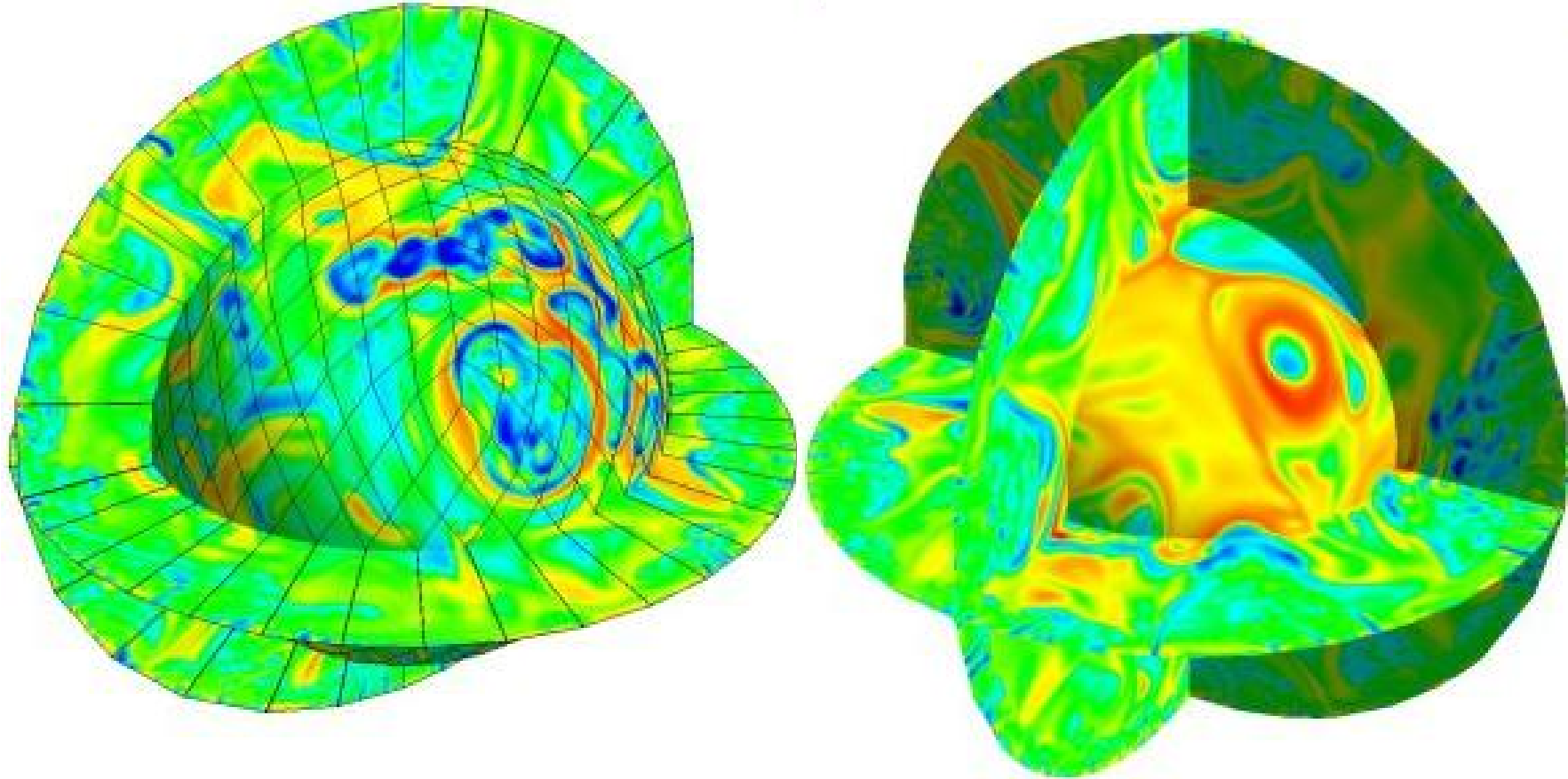
- \* Африканский тип
- \* Байкало-монгольский тип

Подводные горы

Тройные точки и комбинированные типы:

Сколько объектов – столько и типов

# Моделирование гетерогенности мантии по сейсмическим данным

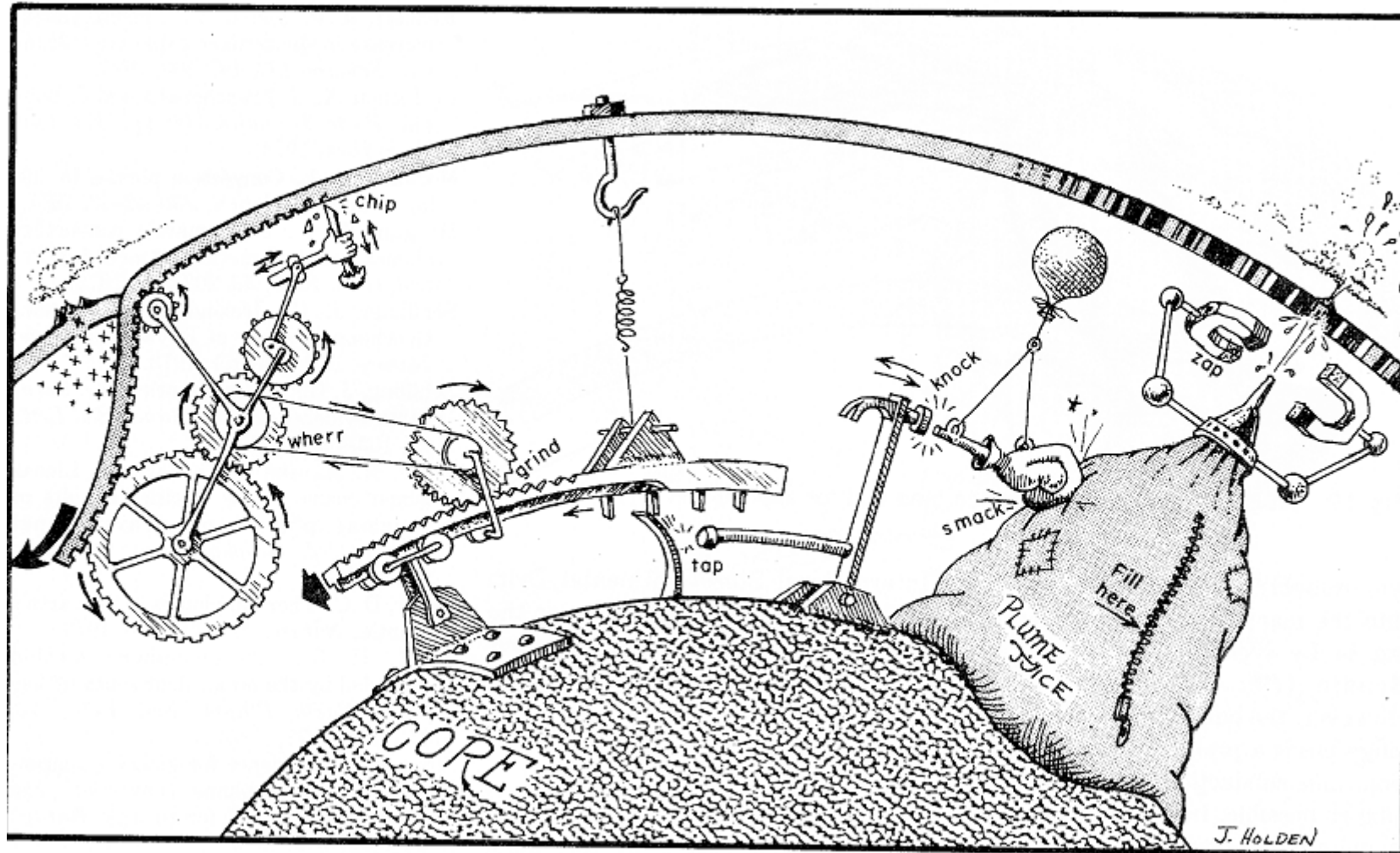


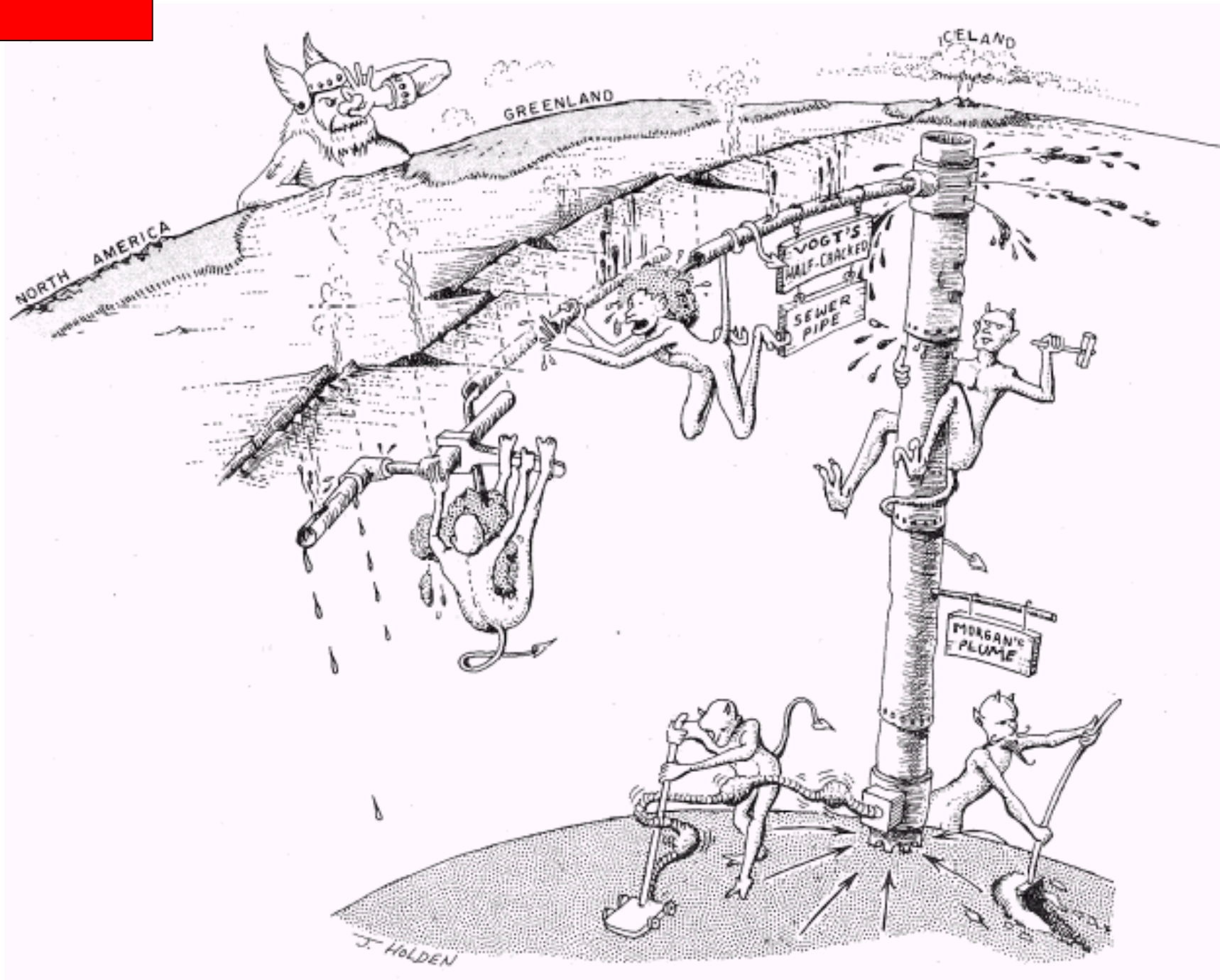
Ливерпульский университет, MantleVis (2001-2002)



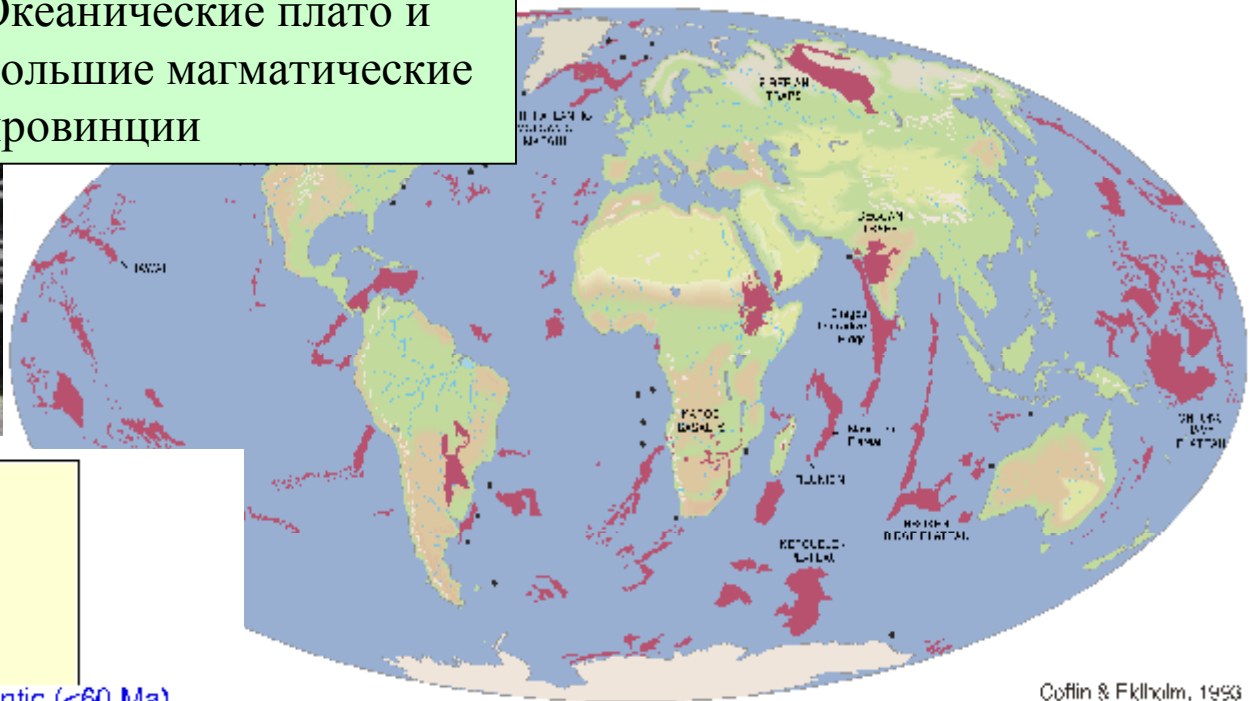
# Общая взаимосвязь различных обстановок современного вулканизма

Holden, J.C. & P.R. Vogt,  
EOS Trans. AGU, 56,  
573-580, 1977.

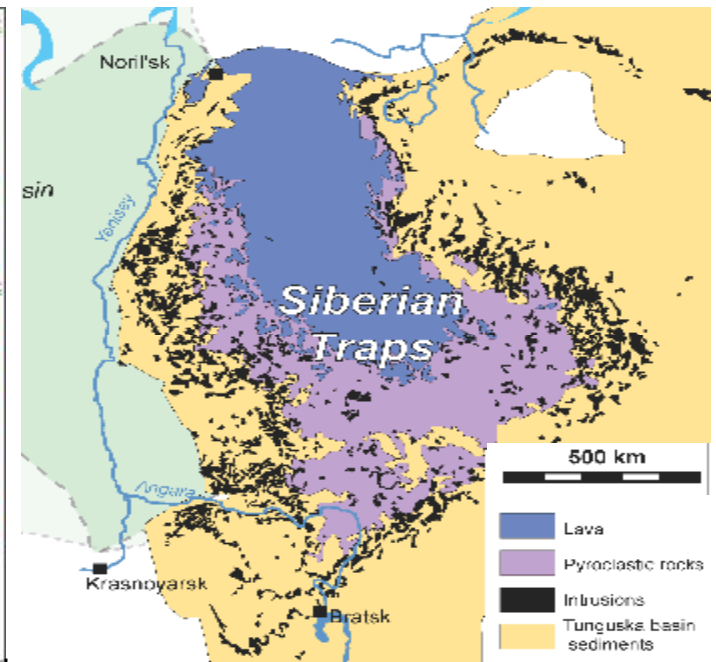
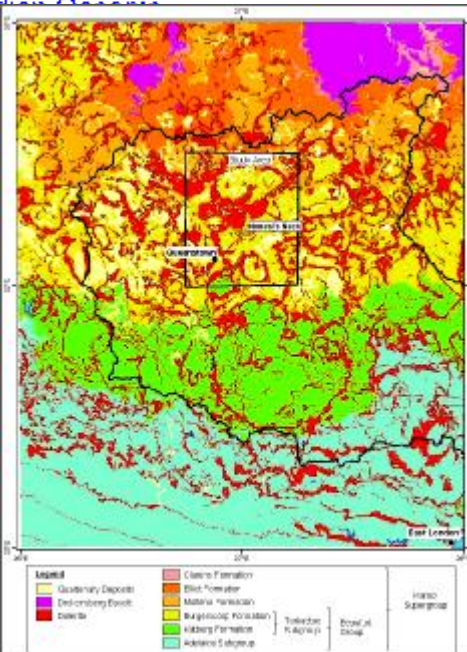
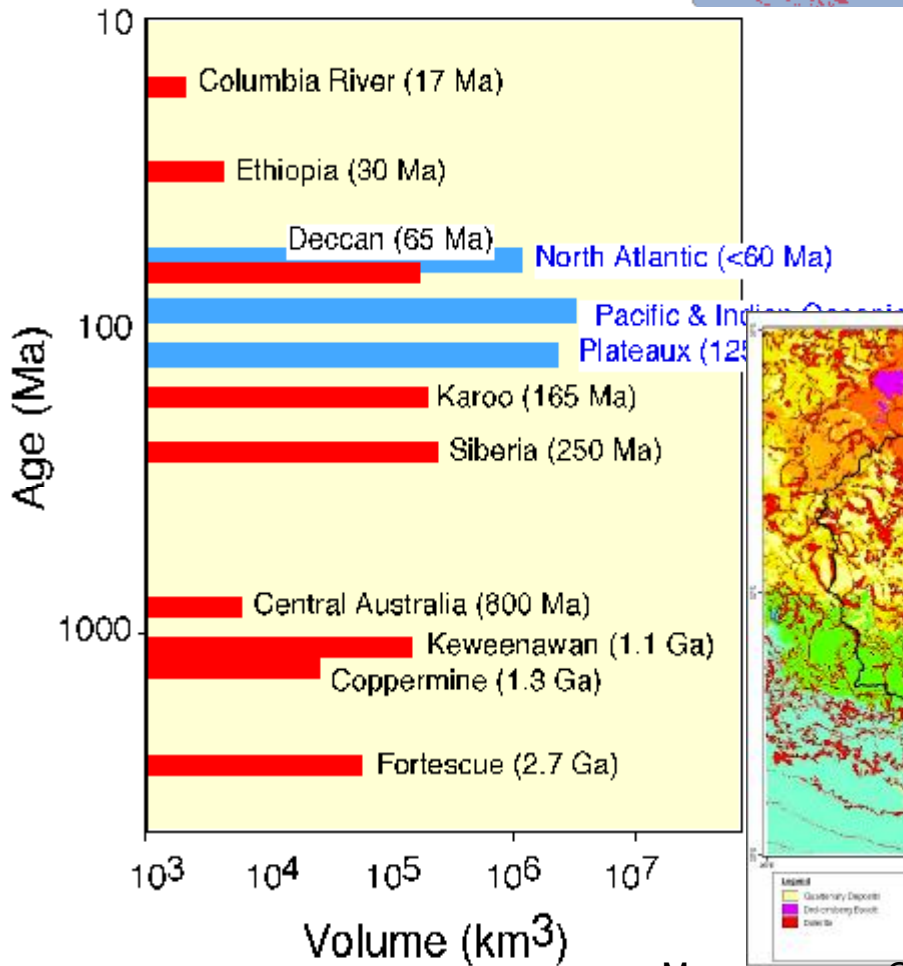




Океанические плато и  
большие магматические  
провинции



Coffin & Fklholm, 1993

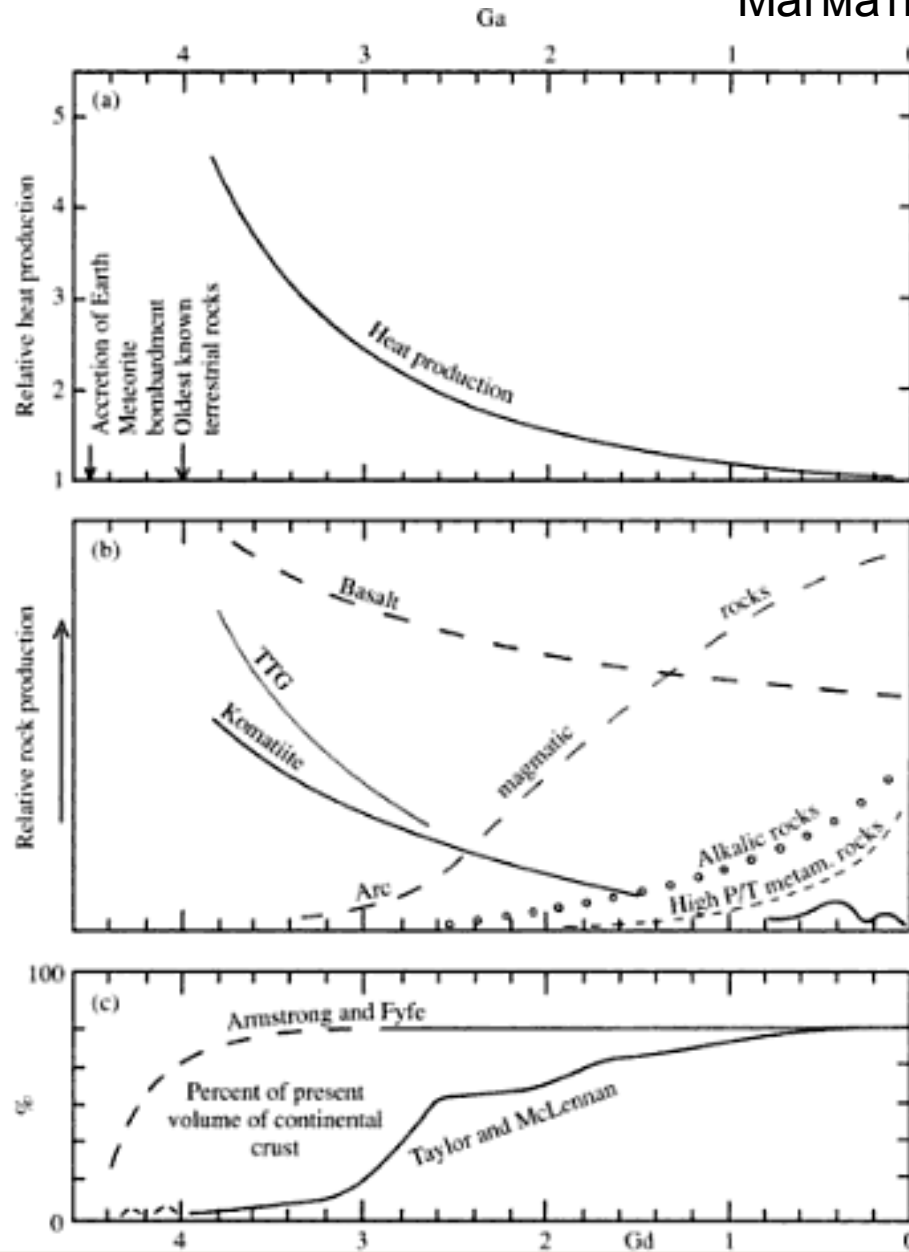




## Магматические серии и эволюция Земли

### Igneous and Metamorphic Petrology

Myron G. Best, 2003



А) Теплоотдача Земли по Windley, 1995

Б) Схематическое соотношение продуктивности (или степени сохранности) некоторых важнейших типов магматических формаций. Коматииты приведены по deWitt, Ashwall, 1997

С) Рост континентов по различным моделям

Время, млрд. лет

# Вулканическая опасность

- Начиная с конца XVII века вулканические извержения унесли более 222 тыс. жизней
- Из них островодужные андезитовые вулканы – 210 тыс. жизней (209722)

<u>жертвы</u>	<u>вулкан</u>	<u>страна</u>	<u>год</u>	
>2 млн.	Huaynarputina	Перу	1600	Тоба – 74 тыс. л.н. 99% населения (60 млн)?
92,000	Mount Tambora	Индонезия	1815	
36,000	Krakatoa	Индонезия	1883	Санторини 1650 до н.э. – ?
29,000	Mount Pelée	Мартиника	1902	
23,000	Nevado del Ruiz	Колумбия	1985	Йеллоустон 640 тыс л.н. - ?
18,000	Mount Vesuvius	Италия	1631	
15,000	Mount Unzen	Япония	1792	
10,000	Mount Kelut	Индонезия	1586	
9,350	Laki	Исландия	1783	
6,000	Santa Maria	Гватемала	1902	
5,115	Mount Kelut	Индонезия	1919	

**Tanguy et al., 1998**

**Плотность населения ~600 чел/км<sup>2</sup>**

Сатоши Ногучи





Неаполь

**Средняя плотность ~8200 чел/км<sup>2</sup>**

scotrecase Боскотреказе  
Boscoteraile Боскореале

Терциньо Terzigno

Roggiomarino Поджомарино

Сан-Джованни-Везувияно

© 2010 Europa Technologies  
© 2010 Tele Atlas

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

Дата приобретения фотографий: 13 Сен 2007

40°47'46.65" С 14°32'34.57" В высота рельефа 26 м

©2009 GO

Высота камеры



# Подведем первые итоги

- Изучение природы и характера вулканизма требует комплексного подхода, применения многих методов различных наук. Основными методами вулканологии являются геологические и петрологические исследования и методы математического моделирования.
- На Земле наблюдается огромное разнообразие проявлений вулканизма, связанного с разнообразными геотектоническими обстановками.