

Геодинамика

Введение

В.С. Захаров

Предмет Геодинамики

Два подхода к определению геодинамики: «**кинематической**» и «**силовой**».

Сторонники **кинематического** подхода (в основном астрономы и геодезисты) считают, что центральным предметом исследований в геодинамике является изучение **основных кинематических** характеристик (смещений, скоростей, направленности и т. д.) движений земной поверхности в различных пространственно-временных масштабах их развития. Одна из первых геодинамических моделей – модель *кинематики плит*.

Сторонники **«силового»** подхода (в основном, геотектонисты и геофизики), полагают, что основной проблемой геодинамики является **установление механизмов** движений в различных геосферах.

Определение основной задачи геодинамики, объединяющее оба подхода (Тёркот, Шуберт, 1985; Turcotte, Schubert, 2014):
Геодинамика изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, и причины и механизмы таких движений и деформаций.
Иными словами, **геодинамика** — это область наук о Земле, рассматривающая геологические процессы с точки зрения действующих **сил и энергии**.

2

Геодинамика, геотектоника и физика Земли

Физика Земли рассматривает Землю как **физическое тело**, знакомит с методами изучения и современными представлениями о физике недр Земли, ее строении и эволюции. Физика Земли дает физические основы геотектоники и геодинамики.

Геотектоника занимается главным образом изучением того, **как построены** те или иные геологические структуры, а также **истории** движений, изменяющих эти структуры (в связи с развитием Земли в целом).

Геодинамика отвечает на вопросы: **как** и **почему** эти процессы происходят, как образуются структуры, какие **силы** при этом действуют, какая для этого необходима **энергия** и каково ее происхождение.

3

В.С. Захаров

Основные принципы геодинамики

- **Основными источниками** энергии геодинамических процессов служат:
  - тепловая энергия, аккумулированное в Земле с момента её образования,
  - энергия, выделяющаяся при плотностной дифференциации (формирование оболочек, рост внутреннего ядра),
  - энергия, выделяющаяся при распаде радиоактивных элементов.
- Земля остывает за счет **теплопотерь с поверхности** (тепловой поток). Характерное время остывания Земли (радиус R) только за счёт *теплопроводности* (при среднем значении коэффициента температуропроводности (термической диффузии) пород Земли $\chi = \lambda/(\rho \cdot C_p) \sim 10^{-6}$ м^2/с и :

$$\Delta t = (0.1 - 1) \cdot R^2/\chi \approx \mathbf{10^{11}–10^{12}\ лет >> возраст\ Земли.}$$

- Теплопроводность мантии **недостаточна**, чтобы объяснить наблюдаемое остывание Земли *кондуктивным* переноса тепла. Необходим **другой** эффективный механизм теплопереноса.
- **Конвективный теплоперенос -** единственный механизм, обеспечивающий эффективный перенос тепла из любой внутренней области Земли к поверхности за время, заметно меньшие возраста нашей планеты.
- При этом Земля устроена так (*строение, состав, реология*), что **конвекция** в ней **возможна**, хотя и протекает в разных оболочках (мантия, внешнее ядро) *по-разному*.

4

➢Достаточный запас энергии и свойства вещества позволяет Земле функционировать как «*термохимическая машина*».

Тепло из глубинных слоёв Земли выносится посредством **теплопроводности и конвекции** к верхним оболочкам — литосфере и коре.

➢**Поверхностным проявлением** этого процесса является наблюдаемая на Земле **тектоника**, в частности, движение литосферных плит и сопутствующие глобальные и региональные явления.

Формирование и развитие литосферы, взаимодействие литосферных плит друг с другом и с подстилающей мантией приводит к возникновению **большинства** геологических структур и явлений, включая вулканизм и сейсмический процесс, а также контролирует образование месторождений полезных ископаемых.

➢В геодинамике плодотворно используется **приближение сплошной среды**, которое важно для понимания широкого круга геологических проблем.

Это позволяет применить хорошо разработанные физико-математические методы теории упругих деформаций, течения вязкой жидкости, тепло- и массопереноса и т. п.

➢Современный уровень рассмотрения таких проблем предполагает **компьютерное и физическое моделирование**

5

Понятие о моделях Земли и методах их построения

Модель - в **широком смысле** - любой образ исследуемого объекта или явления, подобный ему в некоторых важных в данном случае аспектах (характеристиках). Набор этих аспектов **определяет выбор** модели.

В **узком смысле** под моделями Земли понимают распределение плотности, упругих модулей, скоростей сейсмических волн, вязкости, электропроводности и других характеристик в Земле.

Общие требования к моделям Земли

- соответствие глобальным параметрам (размеру, форме, массе, моменту инерции Земли);
- соответствие результатам интерпретации наблюдений объемных и поверхностных волн;
- соответствие значениям гравитационных моментов
- соответствие периодам собственных колебаний;
- учет данных по приливам, геотермии, лабораторным исследованиям упругих модулей, исследованиям при высоких давлениях, геохимии, геодезии и т.д.

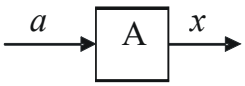
6

В.С. Захаров

Прямые и обратные задачи

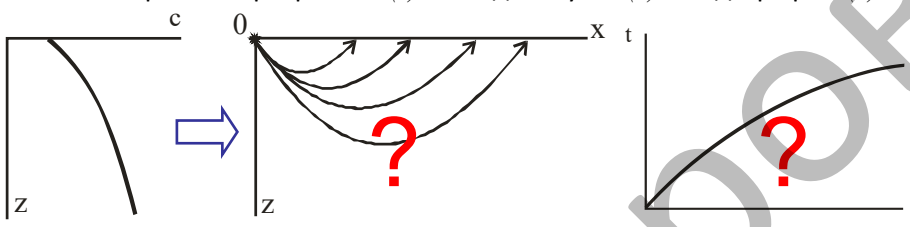
Непосредственные данные о глубинных слоях Земли (глубже 12.6 км) **отсутствуют**. Информация поступает из гравиметрических, магнитных, сейсмологических и т.п. исследований, для **интерпретации** которых необходимо решать **обратные задачи**.

Прямые задачи $x = Aa$



Пример:

известен скоростной разрез $c=c(z)$, находим лучи $z(x)$ и годограф $t=t(x)$

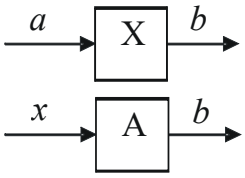


7

Обратные задачи

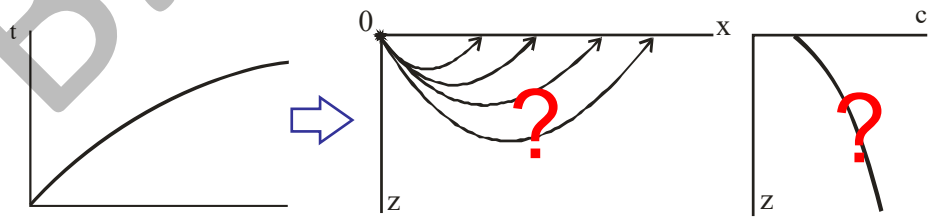
$b = Xa$

$b = Ax$



Пример: обращение годографа:

известен годограф $t=t(x)$, находим лучи $z(x)$ и скоростной разрез $c=c(z)$



Для обратных задач **решение не единственное** (вообще, их **бесконечно** много). Неоднозначность решения - особенность обратных задач.

Абсолютная точность модели **не может быть достигнута**. При построении моделей Земли мы всегда имеем дело с **усредненными** по некоторым областям величинами.

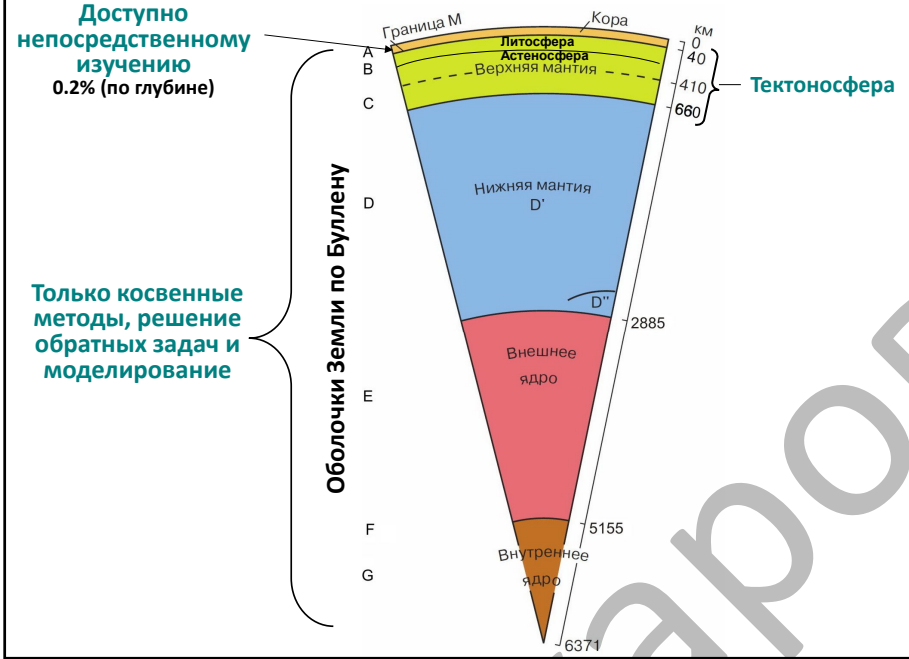
8

В.С. Захаров

Современная модель Земли

Доступно непосредственному изучению
0.2% (по глубине)

Только косвенные методы, решение обратных задач и моделирование



9

Методы геодинамики

Геодинамика **синтезирует** данные всех основных наук о Земле: геоморфологии, геологии, геотектоники, геофизики, геохимии, …

Источники информации и методы изучения геодинамических процессов

- Гравитационные наблюдения: наземные (измерения ускорения g и его аномалий) и космические (измерению глобального гравитационного поля и его временных вариаций (спутники GRACE и GOCE).
- Измерение вертикальных и горизонтальных смещений: **ГНСС** (GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Европейский союз), BEIDOU (Китай)), интерферометрия со сверхдлинной базой (**VLBI**), технология Interferometric synthetic aperture radar (**InSAR**).
- Изучение напряженного состояния литосферы и его вариаций во времени (положение и механизмы очагов землетрясений, трещиноватость и т.д.)
- Изучение океанского дна (глубина, возраст, осадки, состав,…).
- Геотермические наблюдения (геотермич. градиент, тепл. поток, теплоф. св-ва).
- Петро- палеомагнитные исследования
- Изучение электропроводности (магнитотеллурические и др. методы).
- Реологические исследования.
- Сейсмические наблюдения (сейсмический процесс, радиальные сейсмические модели, сейсмотомография, механизмы очагов землетрясений).
- Вулканологические, геохимические, петрофизические, радиоизотопные, тектонические и т.п. исследования.
- Численное геодинамическое моделирование.
- Тектонофизическое аналоговое моделирование.

10

В.С. Захаров

Основные разделы курса «Геодинамика»

- Основы тектоники литосферных плит
- Литосфера и астеносфера
- Реология верхних оболочек Земли
- Модели изостазии. Упругие свойства литосферы.
- Геодинамические приложения теории теплопроводности
- Основные геодинамические обстановки (спрединг, субдукция, коллизия)
- Движущие силы тектоники плит. Конвекция в мантии Земли
- Геодинамика и сейсмичность

11

Литература

основная литература:

1. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. В 2-х т. М.: Мир, 1985. 730 с.

дополнительная литература:

2. Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. Third ed. Cambridge: Cambridge University Press. 2014. 626 p.
3. Anderson D.L. New Theory of the Earth. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 384 p.
4. Artemieva I.M. Lithosphere: an interdisciplinary approach. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 773 p.
5. Fowler C.M.R. The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 685 p.
6. Schubert G., Turcotte D.L., Olson P. Mantle Convection in the Earth and Planets. Cambridge: Cambridge University Press. 2004. 940 p.
7. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, 2005. 560 с.
8. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М: Научный мир, 2004. 612 с .
9. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. В 2-х т. М.: Мир, 1969.
10. Реология. Теория и приложения. Под ред Ф.Эйриха. М.: Изд. иностр. лит., 1962. 824 с.
11. Karato S. Deformation of Earth Materials. An Introduction to the Rheology of Solid Earth. Cambridge: Cambridge University Press. 2008. 463 p.
12. Ranalli G. Rheology of the Earth. Second edition. CHAPMAN & HALL. 1995. 413 p.
13. Gerya T. V. Introduction to numerical geodynamic modelling. New York: Cambridge University Press. 2019. 472 p.

Презентации и материалы по курсу

https://geodynamic.ru

12

В.С. Захаров

План занятий (предварительный)

09.02.25	Введение. Основы ТП
16.02.25	Понятие о литосфере и астеносфере
02.03.25	Реология верхних оболочек Земли
16.03.25	Модели изостазии. Упругие свойства литосферы
23.03.25	Тепловой режим континентальной литосферы
30.03.25	Тепловой режим океанической литосферы
06.04.25	Геодинамика зон спрединга
13.04.25	Геодинамика зон субдукции и коллизии
20.04.25	Модели конвекции в мантии Земли
	Зачет (геологи)
27.04.25	
04.05.25	
11.05.25	Силы действующие на плиты
18.05.25	
май	**Зачет (физики)**

13

В.С. Захаров

План занятий (предварительный)

Дата	Тема
01.10.26	Введение. Строение Земли. Основы ТП
08.10.26	Понятие о литосфере и астеносфере
15.10.26	Понятие о литосфере и астеносфере / Реология
22.10.26	Реология Земли
29.10.26	Реология Земли
05.11.26	Модели изостазии. Упругие свойства литосферы
12.11.26	Упругие свойства литосферы
19.11.26	Тепловой режим континентальной литосферы
26.11.26	Тепловой режим океанической литосферы
03.12.26	Геодинамика зон субдукции
10.12.26	Геодинамика зон коллизии / Модели конвекции в мантии Земли
17.12.26	Модели конвекции в мантии Земли
	Силы действующие на плиты
	Зачет

14

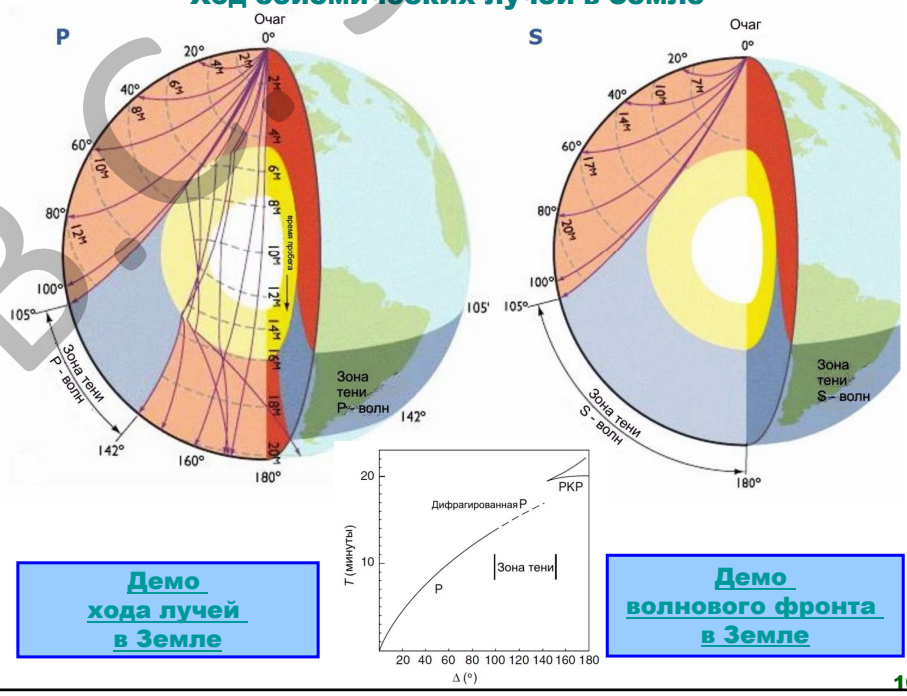
Внутреннее строение Земли

по сейсмическим (в основном) данным

(очень краткое повторение)

В.С. Захаров

Ход сейсмических лучей в Земле

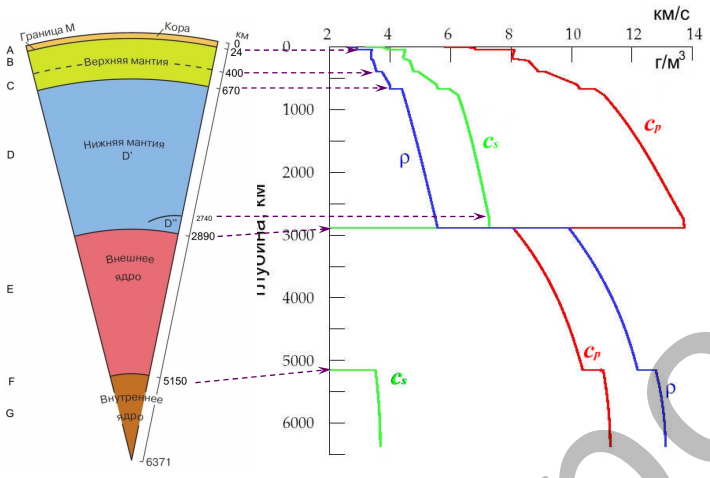


Демо хода лучей в Земле

Демо волнового фронта в Земле

16

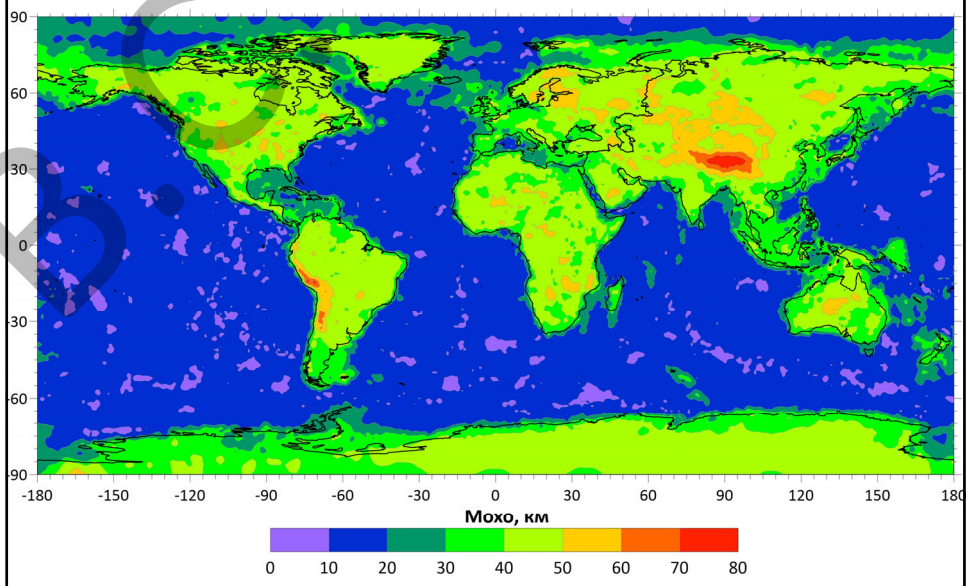
Скоростной разрез Земли по модели PREM



17

Кора

CRUST 1.0. Глобальная модель мощности коры 1°x1°

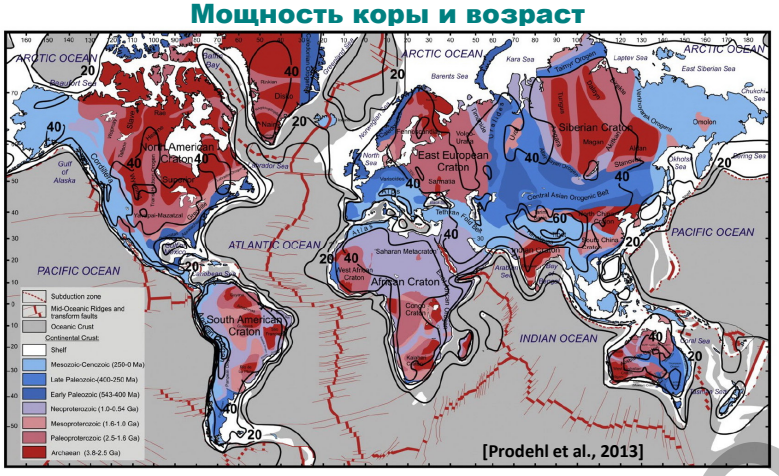


https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html

18

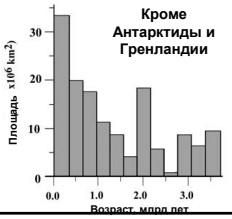
В.С. Захаров

Мощность коры и возраст



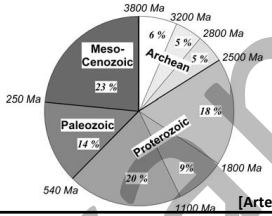
[Prodehl et al., 2013]

Площадь континентальной коры



Кроме Антарктиды и Гренландии

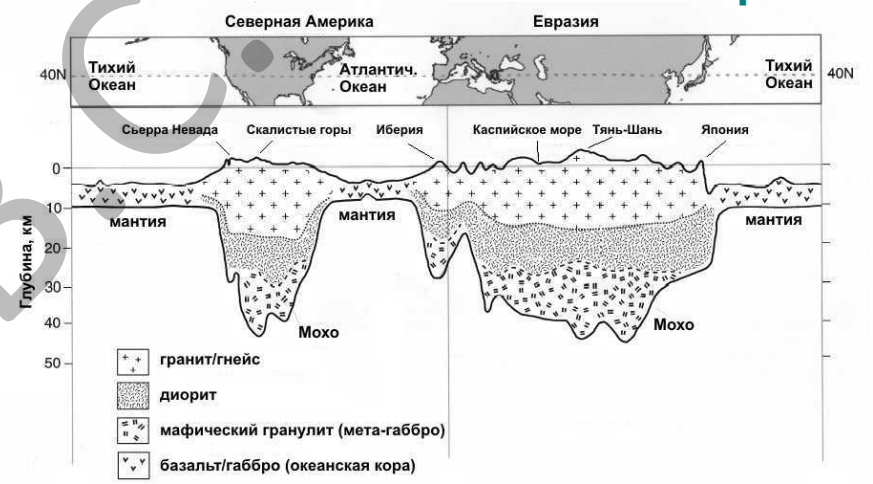
Объем континентальной коры



[Artemieva, 2011]

19

Сравнительная мощность континентальной и океанической коры



Разрез коры по 40° с.ш.

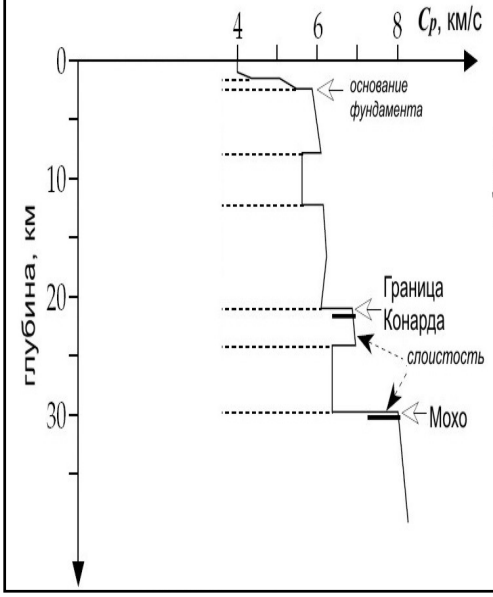
Вертикальный масштаб преувеличен в 100 раз

20

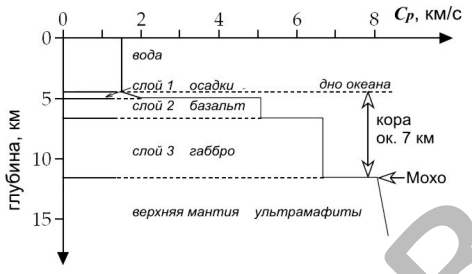
В.С. Захаров

Сейсмическая модель коры

Модель распределения скорости *P*-волн в континентальной коре с волноводом



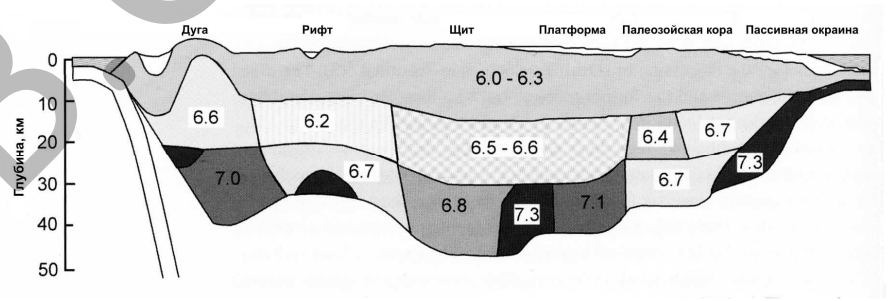
Петрологические и сейсмические данные для океанической коры



21

Континентальная кора

Обобщенный разрез континентальной коры. Показаны средние значения скоростей *P*-волн для различных в тектоническом отношении регионов



22

В.С. Захаров

Природа граница Мохо

Два возможных объяснения:

1. **Различный состав** вещества коры и мантии Земли ⇒ граница Мохоровичича **вещественная** («**химическая**»), а кора выделилась из мантии в процессе эволюции Земли.
2. **Различное состояние** вещества мантии ⇒ граница Мохоровичича **фазовая**, обусловленная фазовым переходом при p-T условиях на соответствующих глубинах.

Возможна и смешанная ситуация: в каких-то местах граница Мохоровичича **химическая**, в каких-то - **фазовая**.

Океаны

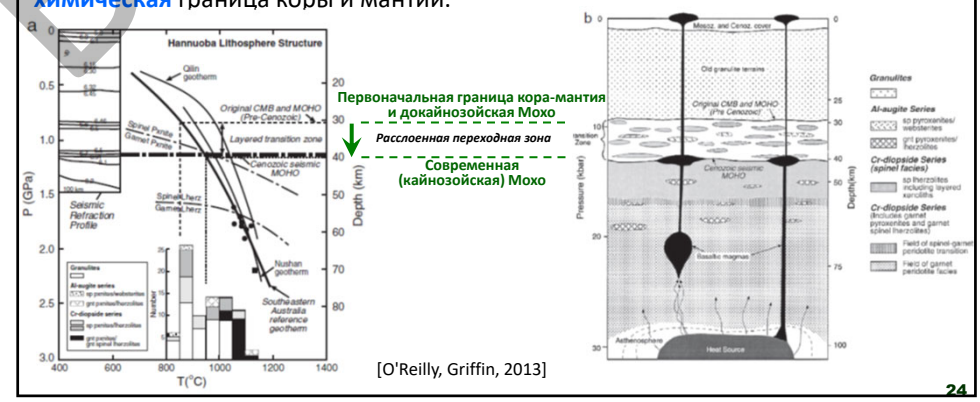
При давлениях, отвечающих границе Мохоровичича **под океанами**, никакие фазовые переходы с требуемыми параметрами невозможны ⇒ под океанами граница Мохоровичича **химическая**.

23

Континенты:

Граница Мохо	**расчетное** Δc_P, км/с	**наблюдаемое** $\Delta c_p(M)$, км/с
Фазовая	1.3 ÷ 1.8	1.4 - молодая тектоника
Химическая	0.9	1 - щиты и платформы

Положение границы коры и мантии, которое определяется по P-T условиям для ксенолитов, **на континентах зависит от тектонической обстановки.**
В **тектонически активных** (некратонных) регионах глубина может варьировать в диапазоне **5–20 км,** и может **изменять положение** с течением времени**.**
Сейсмическая граница Мохо **может** располагаться значительно **глубже, чем химическая** граница коры и мантии.



[O'Reilly, Griffin, 2013]

24

В.С. Захаров

Мантия

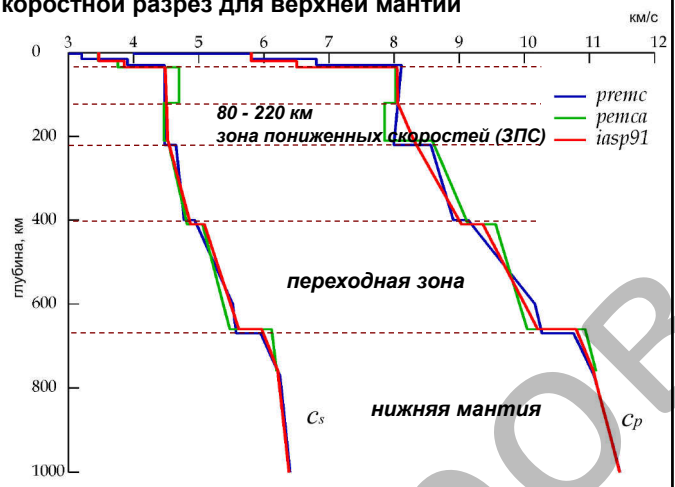
Скоростной разрез для верхней мантии

Мохо

граница $z \approx 220$ км
(граница Леман)

граница $z \approx 400$ (410) км
$\Delta c_P \approx 0.23$ км/с,
$\Delta c_S \approx 0.20$ км/с.

граница $z \approx 670$ (660) км
$\Delta c_P \approx 0.50$ км/с,
$\Delta c_S \approx 0.35$ км/с.

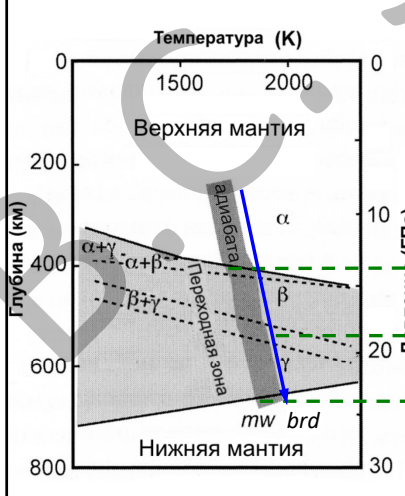


Зоны скачков в мантии:
мощность Δz ~ 30 км

PREM, IASP91– **разные** сейсмические модели Земли

25

Схема важнейших фазовых изменений в переходной зоне мантии



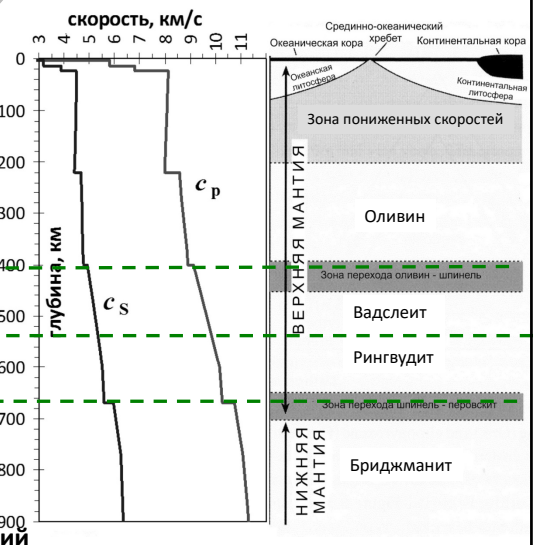


Диаграмма фазовых преобразований оливина:
оливин (α) → вадслеит (β) →
рингвуди (γ) →
бриджманит (*brd*) + магнезиовюстит (*mv*)

С зонами переходов соотносятся основные сейсмические границы на глубинах 410, (520), 660 км.
[McKenzie, 1983]

26

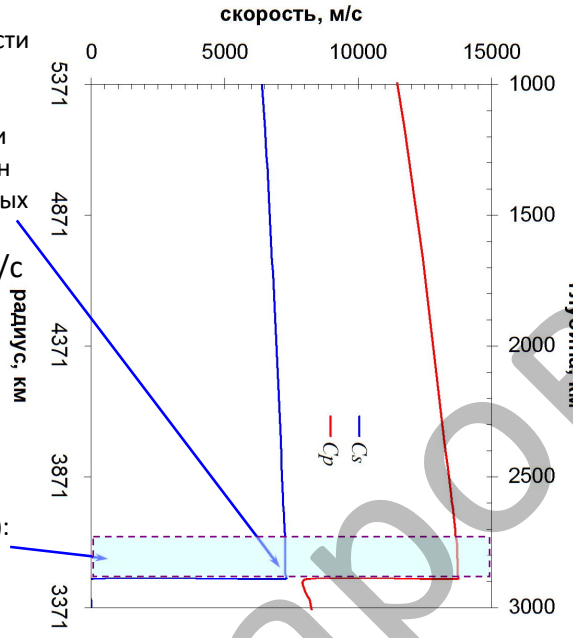
В.С. Захаров

Нижняя мантия

На глубинах z > 700 км скорости волн возрастают плавно и равномерно.

У **подошвы нижней** мантии скорости сейсмических волн достигают своих максимальных для Земли значений:

$c_P \sim 13.8$ км/с, $c_S \sim 7.3$ км/с



Слой D'' (2740 ÷ 2890 км): градиент скорости ≈0, (в некоторых зонах <0)

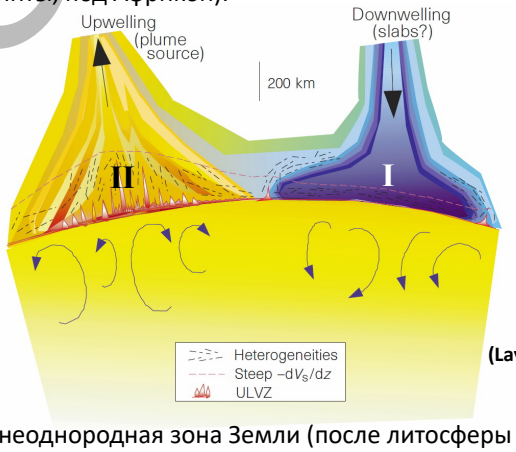
27

Слой D''

Два типа неоднородных структур

I палеосубдукционные блоки (в зонах Тихоокеанского кольца - под Аляской, Карибской плитой и Индийским океаном).

II зоны **формирования мантийных плюмов** (под центральной зоной Тихоокеанской плиты, под Африкой).



(Lay et al., 1998)

Зона D'' - вторая неоднородная зона Земли (после литосферы и верхней мантии). Структуры в слое D'' не глобальны по латерали, а имеют прерывистое строение.

28

В.С. Захаров

Ядро

Скоростной разрез c_p для ядра

Модель **PREM:**

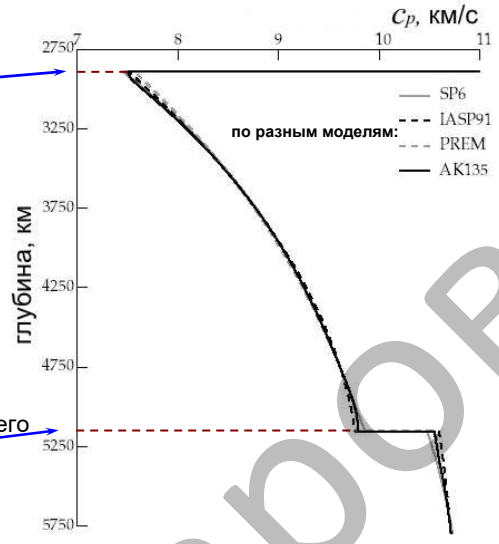
Глубина границы ядро-мантия

z = 2890 км,

Радиус внешнего ядра

R = 3481 км = 0.547R_E

Изменение скорости $\Delta c_p \approx$ – 6 км/с.



Внутреннее ядро

Глубина границы внутреннего и внешнего ядра z = 5150 км,

Радиус внутреннего ядра

R = 1221 км = 0.191R_E

c_p ~ 11 км/с, c_s ~ 3.5 км/с.

29



Основы тектоники литосферных плит

30

В.С. Захаров

Основные положения тектоники литосферных плит

1. Верхняя часть твердой Земли разделена на **две оболочки**, существенно различающиеся по своим реологическим свойствам (прочности, вязкости):
   на твердую (упруго-хрупкую) **литосферу** и более пластичную и подвижную **астеносферу**.
2. Литосфера **разделена на плиты** - крупные (7), средние (7), и малые. Основанием для подразделения служит анализ распределения поясов землетрясений и вулканизма, сейсмологические, геодезические, геофизические данные.
3. Плиты двигаются друг относительно друга и **взаимодействуют**. Характер границ плит и взаимодействия на них можно описать следующими типами:
   1) **Дивергентные** границы – на которых происходит раздвигание плит (рифтинг, спрединг). Они также называются **конструктивныеми**, так как в этих зонах формируется новая литосфера и кора.
   2) **Конвергентные** границы – на которых происходит схождение плит, причем обычно есть поддвиг одной плиты под другую. Их также называют **деструктивными** (погружающаяся плита «перерабатывается» в мантии). Для таких границ характерны:
   Субдукция океанической плиты под океаническую или континентальную, обдукция – ок. на конт. (офиолиты, покровы); коллизия – столкновение континентов.
   3) **Трансформные** границы – вдоль них происходит горизонтальное скольжение плит.
4. Горизонтальные перемещения больших и средних плит подчиняются **сферической геометрии** (теорема Эйлера: движение любого тела или точки на поверхности правильной сферы постоянного радиуса может быть представлено в виде вращения вокруг оси, проходящей через центр сферы).
5. Объем **поглощаемой** в зонах субдукции океанической коры равен объему коры, **порождающейся** в зонах спрединга. Объем Земли и ее радиус постоянны, именно постоянство радиуса обеспечивает достоверность плитно-тектонических палеореконструкций.
6. Основная причина движения плит - **мантийная конвекция**. Под СОХ располагаются восходящие ветви конвективных ячеек, под зонами субдукции и коллизии – нисходящие, а в промежутке – горизонтальные.

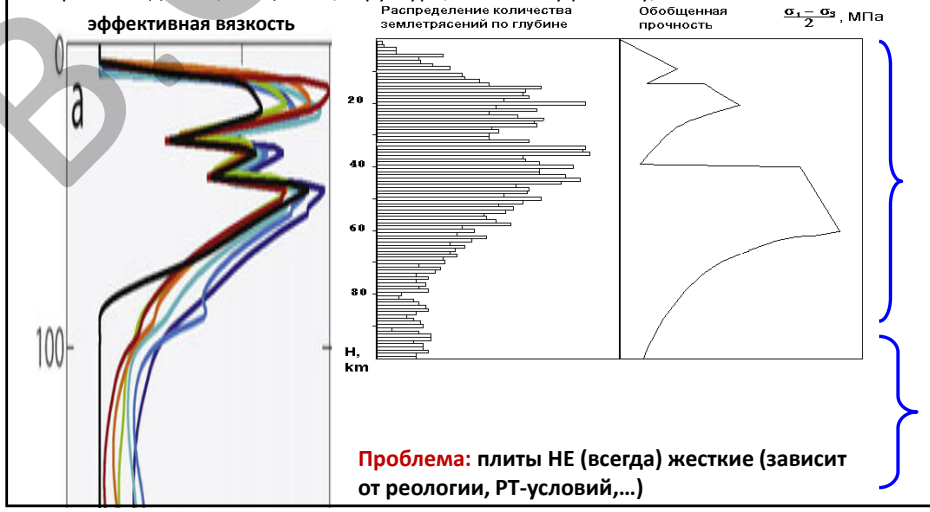
[Хаин, Ломизе, 2005]

31

1. Верхняя часть твердой Земли разделена на **две оболочки**,

существенно различающиеся по своим реологическим свойствам (прочности, вязкости) на твердую (упруго-хрупкую) **литосферу** и более пластичную и подвижную **астеносферу**.

Основа для выделения – сейсмические, реологические, геотермические, магнитотеллурические данные. Океаническая и континентальная литосфера различаются по происхождению, мощности, структуре, тепловому режиму,…



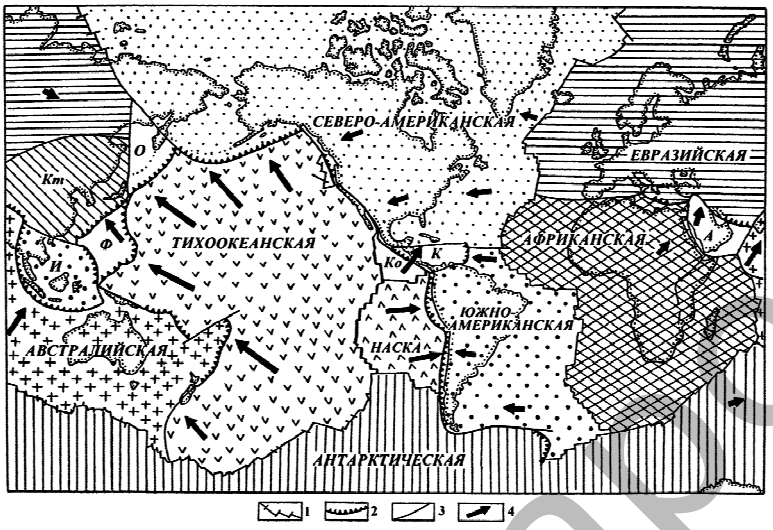
Проблема: плиты НЕ (всегда) жесткие (зависит от реологии, PT-условий,…)

32

В.С. Захаров

2. Литосфера подразделена на плиты

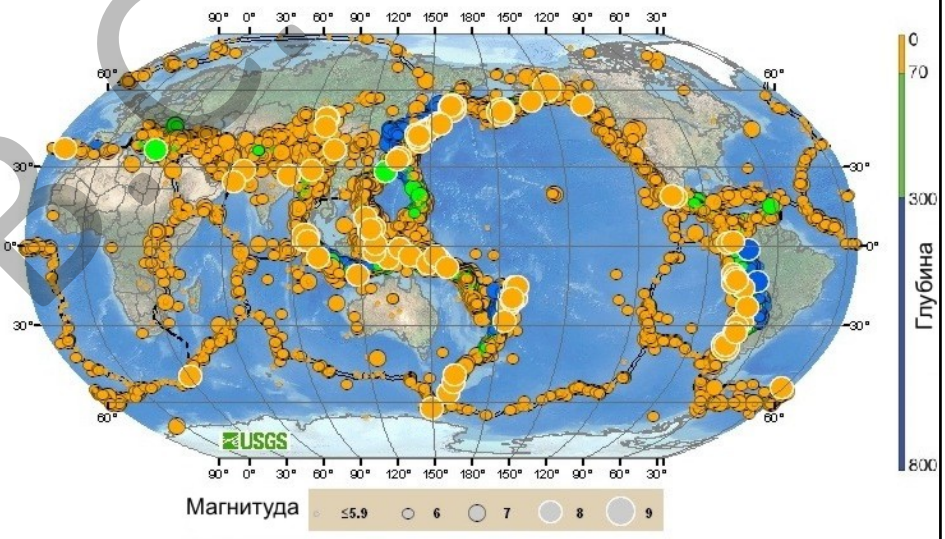
- крупные (7), средние (7), и малые. Основанием для подразделения служит анализ распределения поясов вулканизма и землетрясений, сейсмологические, геодезические, геофизические данные.



Хаин, Ломизе, 2005

33

Проявления границ литосферных плит в положении эпицентров землетрясений

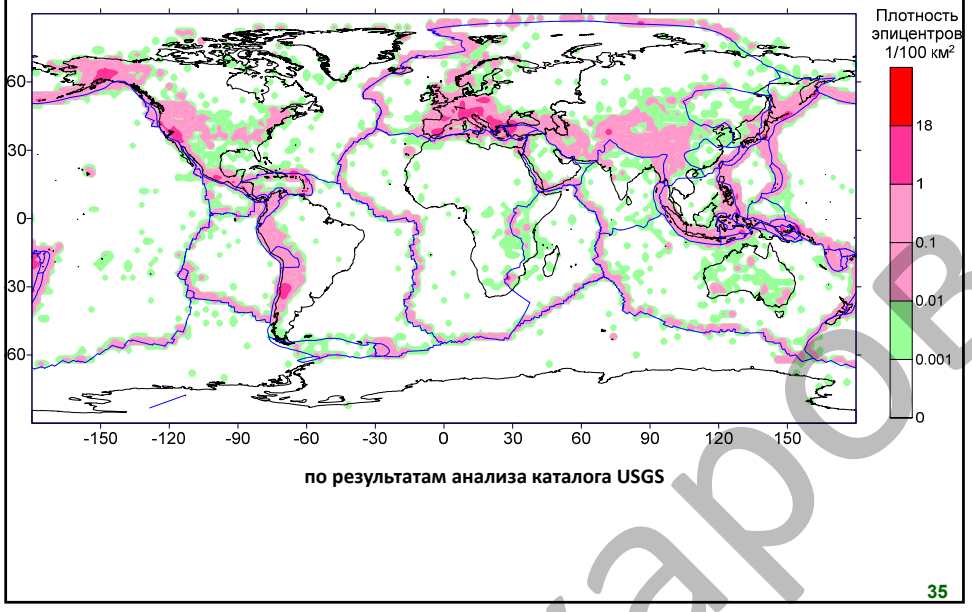


34

34

В.С. Захаров

Проявления границ литосферных плит в плотности эпицентров землетрясений

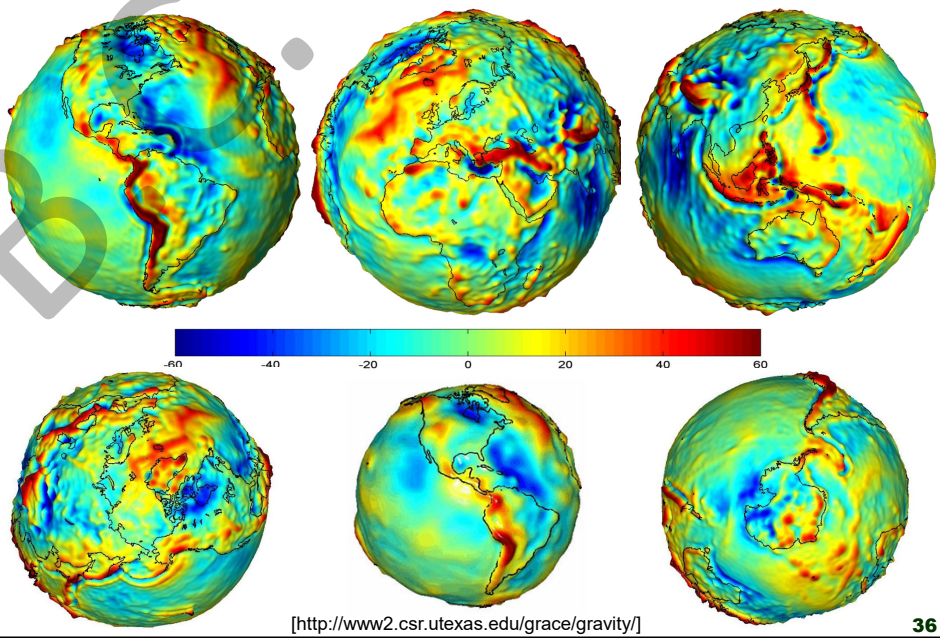


по результатам анализа каталога USGS

35

Гравитационные аномалии Земли

по GRACE Gravity Model 03 (2008 г.) с использованием 360 гармоник

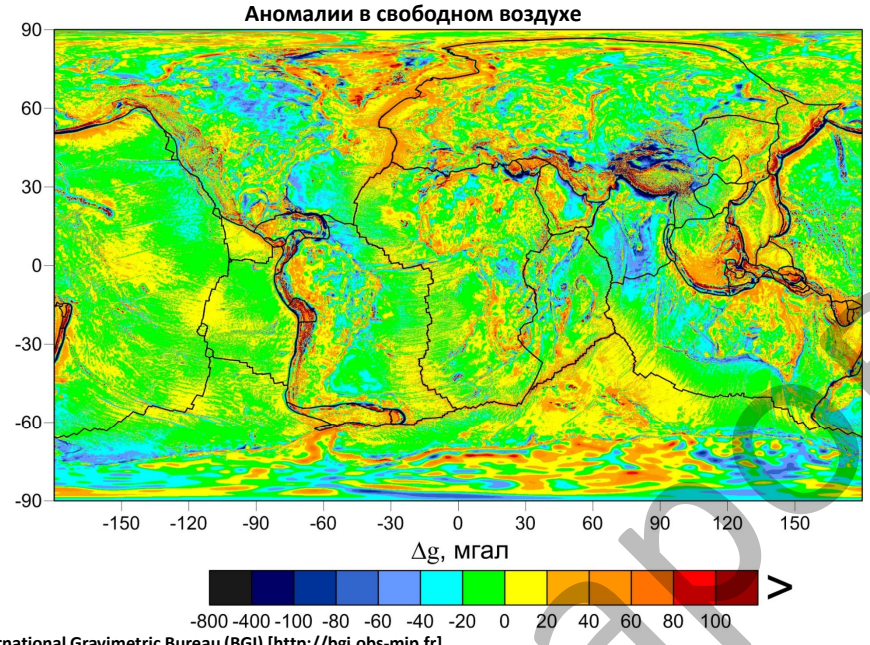


[http://www2.csr.utexas.edu/grace/gravity/]

36

В.С. Захаров

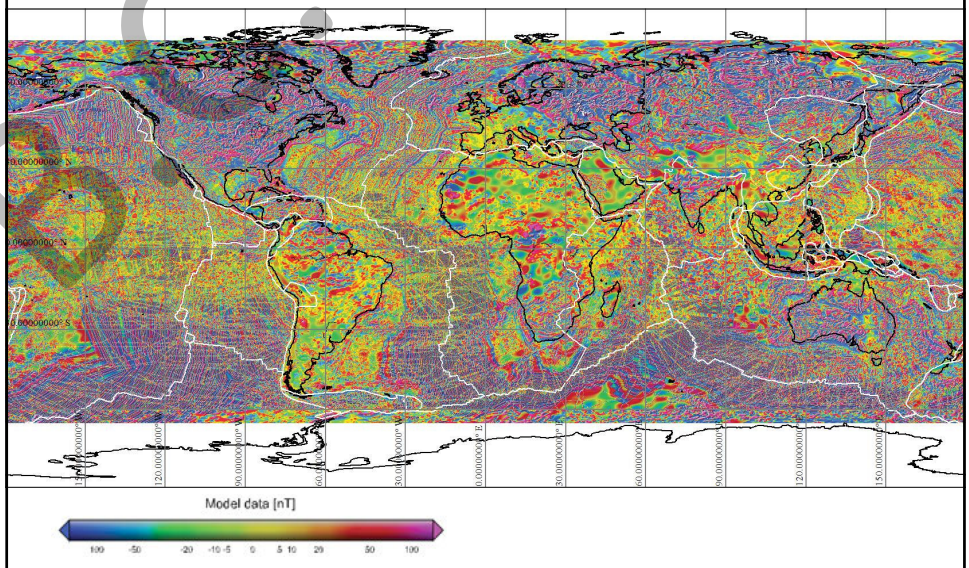
Проявления литосферных плит в гравитационных аномалиях



International Gravimetric Bureau (BGI) [http://bgi.obs-mip.fr]

37

Проявления литосферных плит в магнитных аномалиях

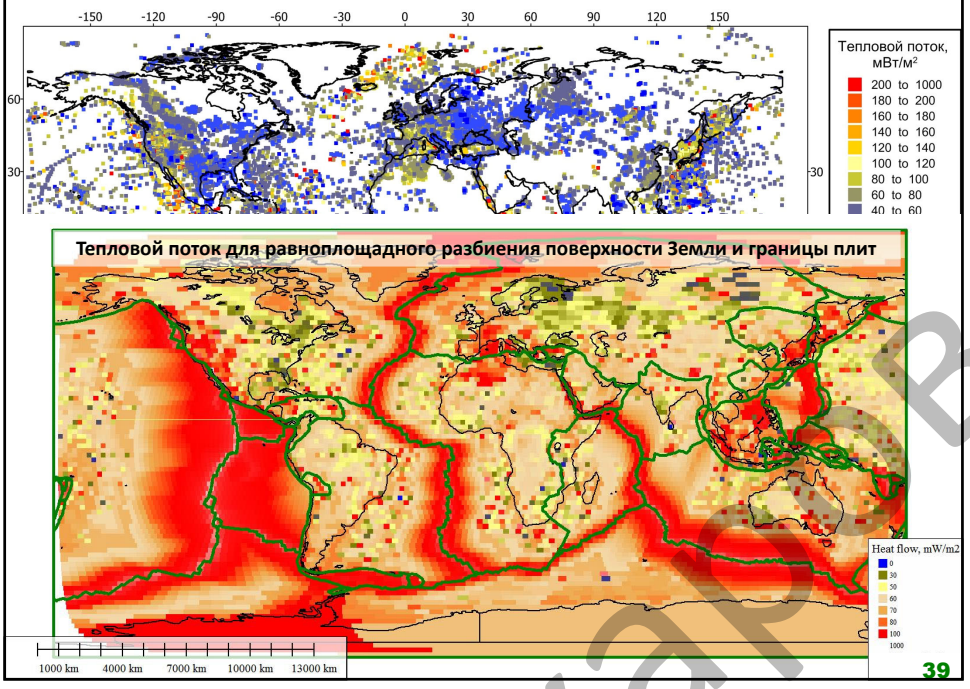


Данные с (http://www.geology.sdsu.edu)

38

Проф. В.С. Захаров

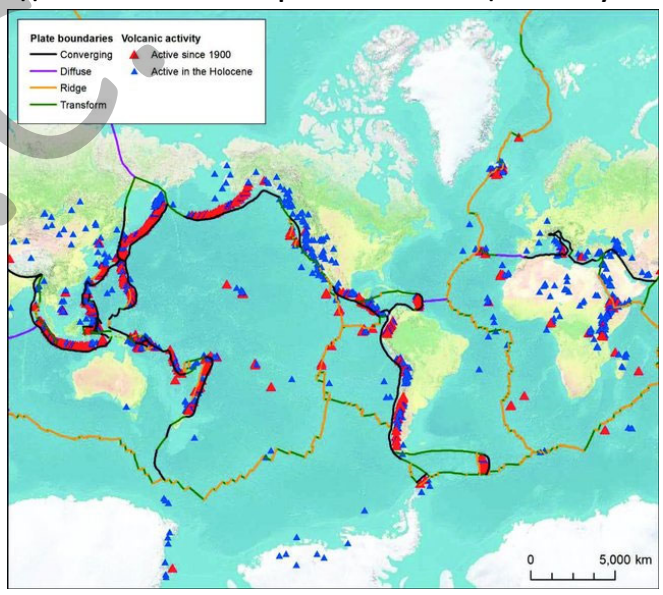
Результаты измерения теплового потока на поверхности Земли



39

Вулканизм

Распределение на Земле современных и голоценовых вулканов

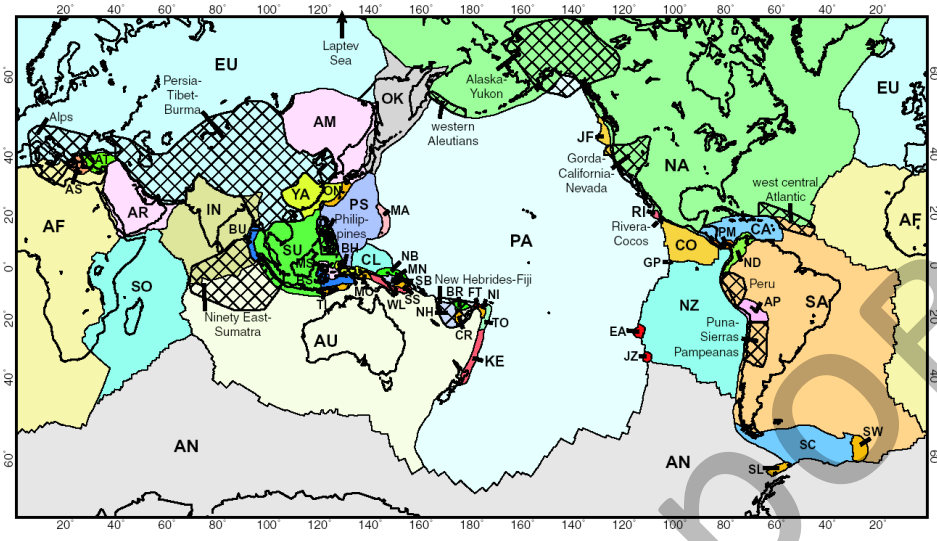


«Global Volcanic Hazards and Risk»

40

В.С. Захаров

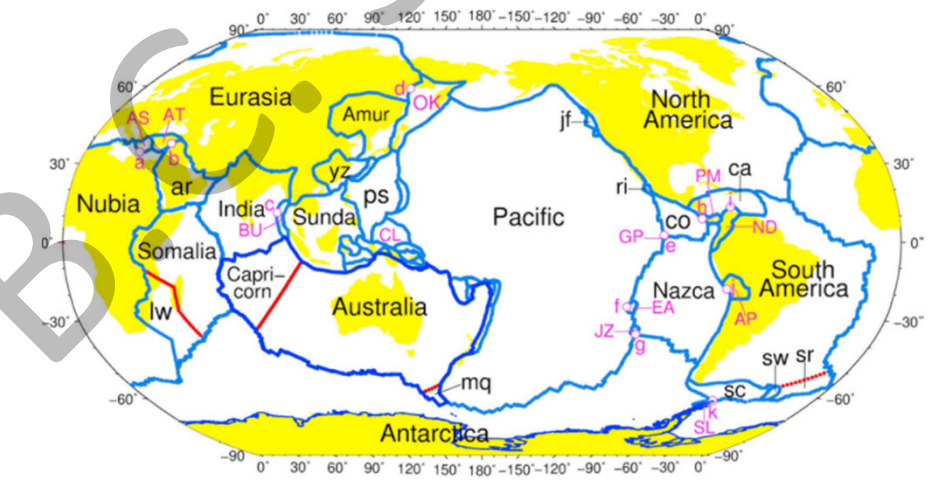
Сколько плит?



52-плитная модель **PB2002 [Bird, 2003]. Штриховкой показаны орогены**

41

Где предел ???



56-плитная модель **NNR-MORVEL56 [Argus et al., 2011].**

Проблемы:

- методика выделения плит достаточно сложна,
- границы не везде очевидны,
- критерий разделения на *крупные*, *средние* и *мелкие* не сформулирован,
- далеко не все плиты можно считать *жесткими* (выделяются области деформаций, орогены и т.п.)

42

В.С. Захаров

3. Плиты двигаются друг относительно друга и взаимодействуют.

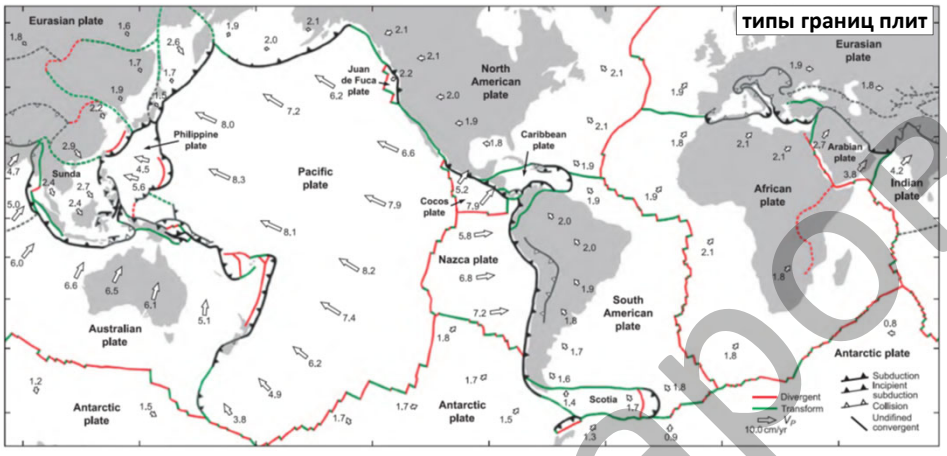
Характер взаимных перемещений и взаимодействий плит можно описать следующими типами границ:

1) **Дивергентные** (конструктивные) границы – на которых происходит раздвигание плит (спрединг, рифтинг). Они также называются конструктивные границы так как в этих зонах формируется новая литосфера и кора.

2) **Конвергентные** (деструктивные) границы – на которых происходит сдвижение плит, причем обычно есть поддвиг одной плиты под другую. Процессы на конвергентных границах:

Субдукция океанической плиты под океаническую или континентальную, **обдукция** – океанической на континентальную (офиолиты, покровы); **коллизия** – столкновение двух континентальных блоков

3) **Трансформные** границы – вдоль них происходит горизонтальное скольжение плит.

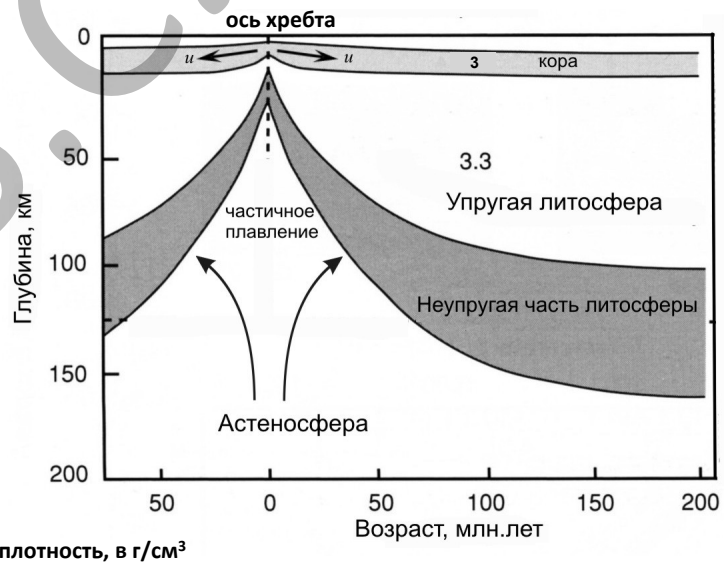


(по: [Duarte, Schellart, 2016], с изменениями)

44

Конструктивные границы плит. Срединно-океанические хребты (СОХ)

Схема конструктивной границы в районе срединно-океанического хребта



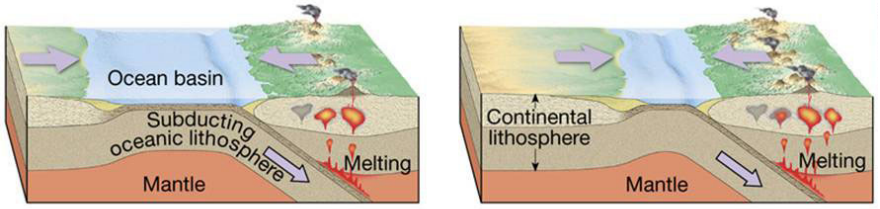
Числа – плотность, в г/см³

45

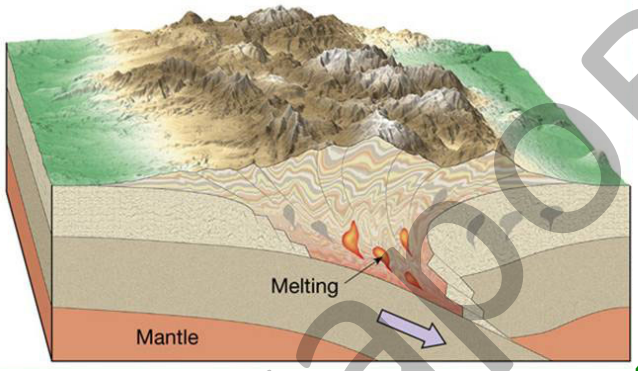
В.С.Захаров

Геодинамическая схема конвергенции

Субдукция



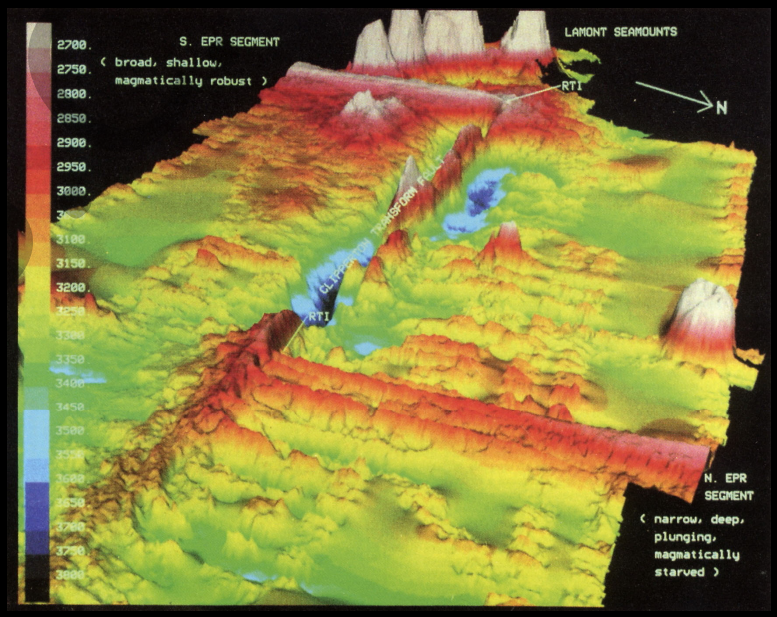
Коллизия



46

Трансформные разломы и тройные сочленения

Батиметрия трансформного разлома Восточно-Тихоокеанского хребта



по [Macdonald et al., 1998]

47

Проф. Захаров В.С.

Трансформные разломы

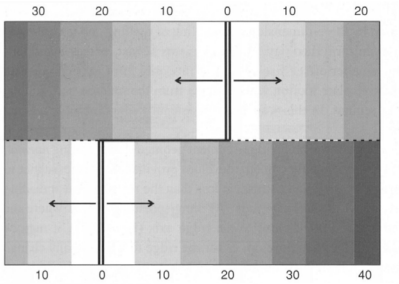
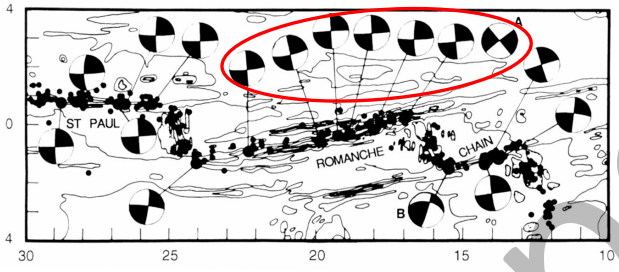


схема трансформного разлома, соединяющего два сегмента хребта, числами и цветом показан возраст коры



сейсмичность и механизмы очагов трансформных разломов Центральной Атлантики, по [Engeln et al., 1986]

Черное – растяжение, белое – сжатие

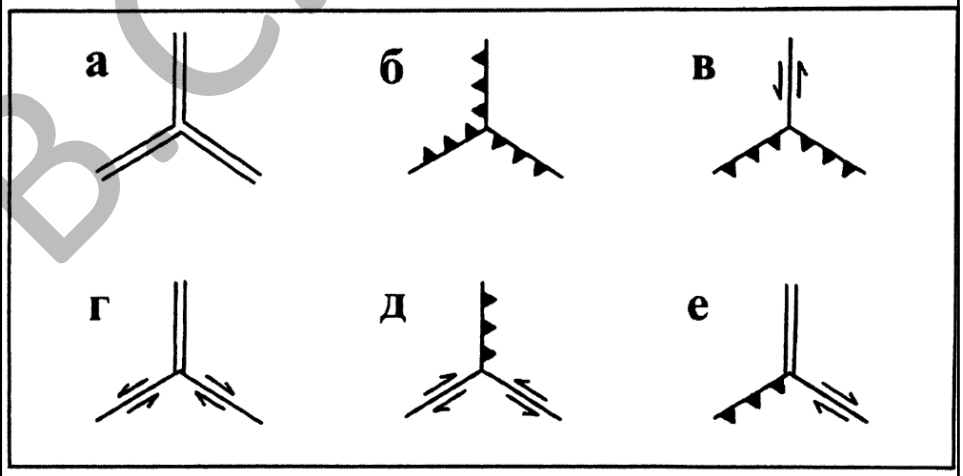
На участке между хребтами преимущественно сдвиговый механизм

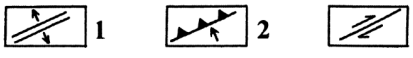
48

Тройные сочленения

- зона схождения **трех** границ плит

Основные типы тройных сочленений





хребет желоб трансформный разлом

49

В.С. Захаров

Границы плит – вид из космоса

Дивергентная: Красное море

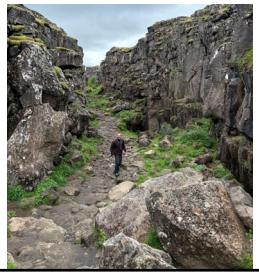


Конвергентная: Япония





Дивергентная: Исландия

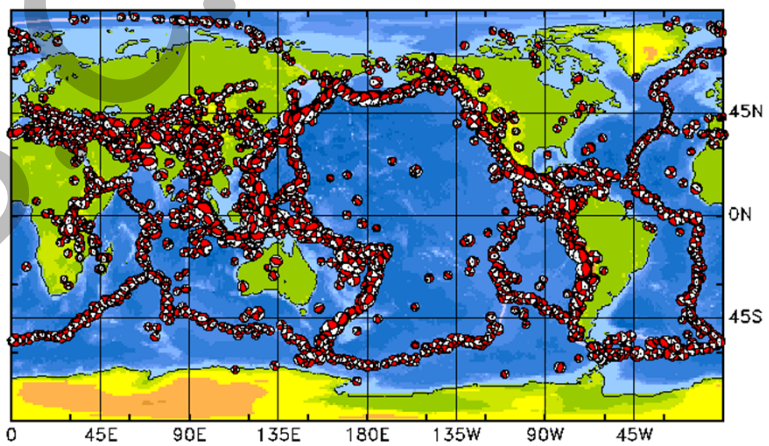


Трансформная: Новая Зеландия

50

Global Centroid-Moment-Tensor (CMT)

Механизм очагов землетрясений

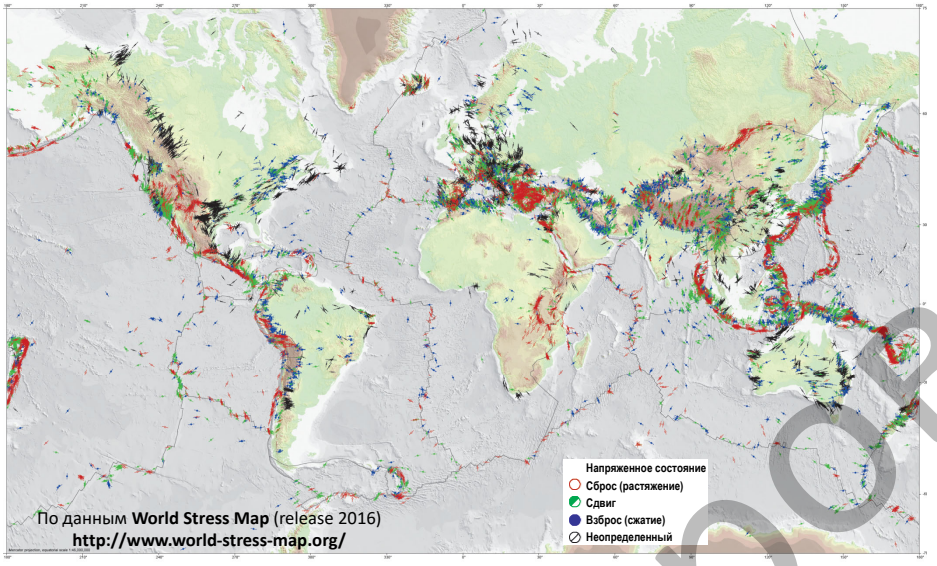


http://www.globalcmt.org/

51

В.С.Захаров

Напряженное состояние литосферы



Проблемы: Процессы на границах плит весьма сложны и не могут быть описаны в рамках взаимодействия (жестких) плит.

52

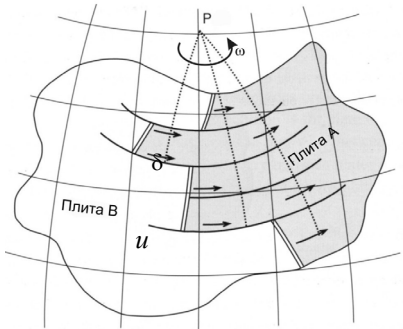
4. Горизонтальные перемещения плит подчиняются сферической геометрии

(теорема Эйлера: движение любого тела или точки на поверхности правильной сферы постоянного радиуса может быть представлено в виде вращения вокруг оси, проходящей через центр сферы)

$$u = \omega R \sin\delta,$$

где u – линейная скорость, ω – угловая скорость, R - радиус Земли, δ - угловая мера дуги большого круга между полюсом вращения P и выбранной точкой

Движение плиты A относительно плиты B.



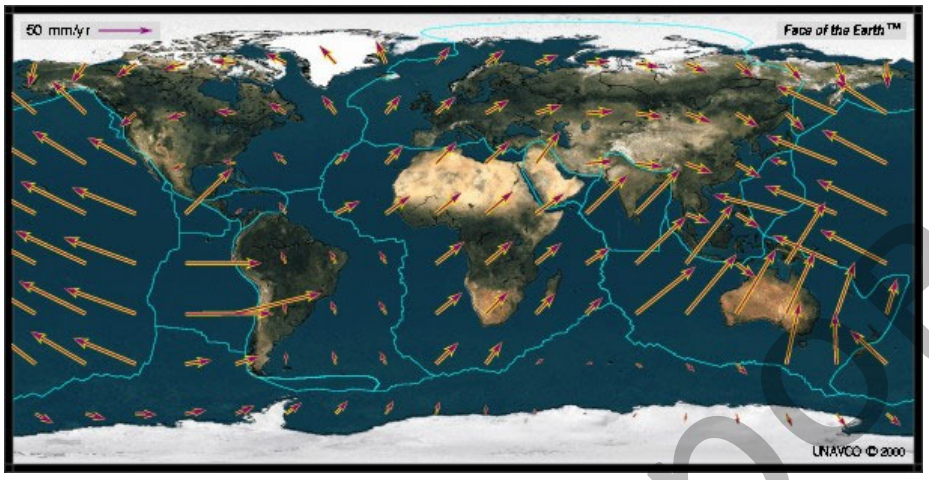
Движение можно рассматривать как вращение с угловой скоростью ω относительно полюса вращения P. Сдвоенные линии - отрезки хребта. Стрелками показано направление движения.

Проблема: Если плиты не (всегда) жёсткие, то такой подход не (всегда) адекватен. Реконструкции, построенные на основании вращения **жестких** плит могут быть не (вполне) верными.
Нужно переходить к моделированию деформируемого в-ва (совсем другой уровень сложности)

53

В.С. Захаров

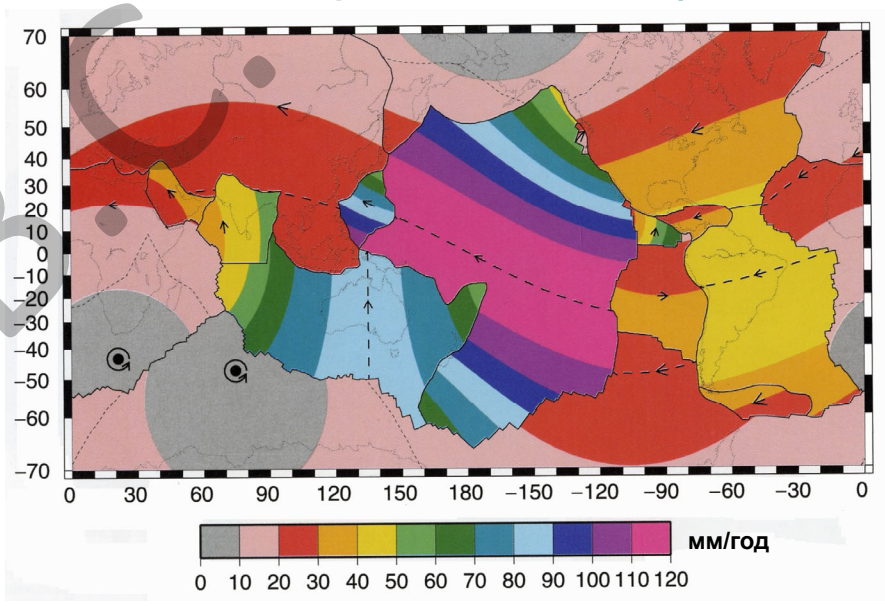
Скорости движения основных плит по модели NUVEL-1A-NNR



http://sps.unavco.org/crustal_motion

54

Скорости и направления абсолютного движения основных плит по модели HS3-NUVEL-1A в системе неподвижных горячих точек

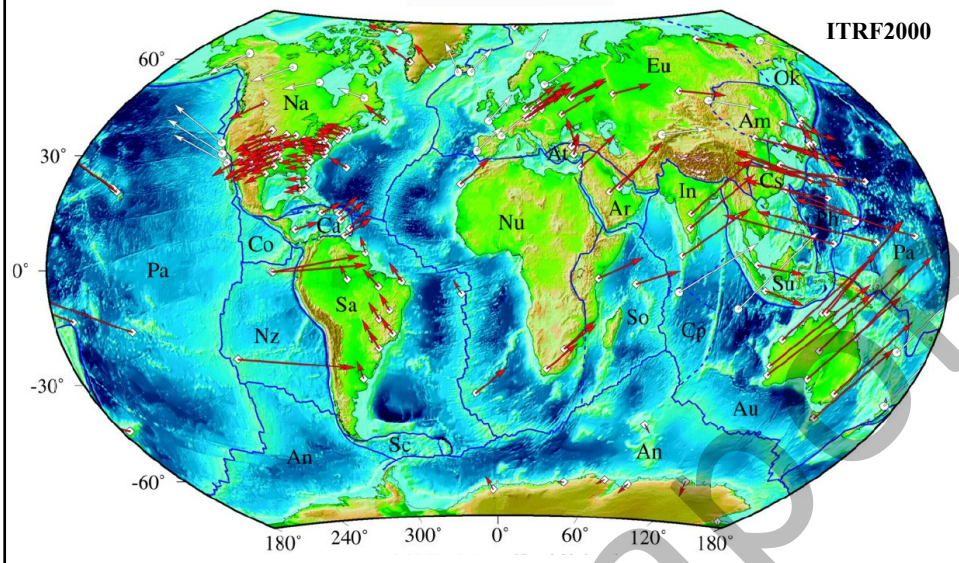


Пунктиром показаны «экваторы» для полюсов вращения. Черными кругами показаны полюсы для Африканской и Антарктической плит, расположенные внутри самих плит, по [Gripp, Gordon, 2002]

55

В.С. Захаров

Скорости смещений земной поверхности по данным GPS (Global Positional System)



56

Interferometric synthetic aperture radar (InSAR)

Интерферометрический радар с синтезированной апертурой
использует два или более радиолокационных изображения с синтезированной апертурой (SAR) для создания карт деформации поверхности или цифрового возвышения, используя различия в фазе волн, возвращающихся на спутник или самолет

Принцип

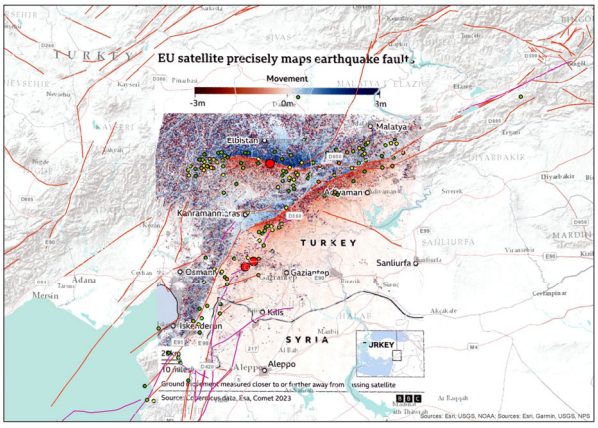
определения деформации земной поверхности с помощью радиолокационной интерферометрии (наложения снимков, сделанных при последовательных пролетах спутника)



[USGS, 2005]

Косейсмические смещения

связанные с двумя сильными землетрясениями, произошедшими в Турции 6.02.2023



по данным Advanced Rapid Imaging and Analysis (ARIA), http://aria.jpl.nasa.gov

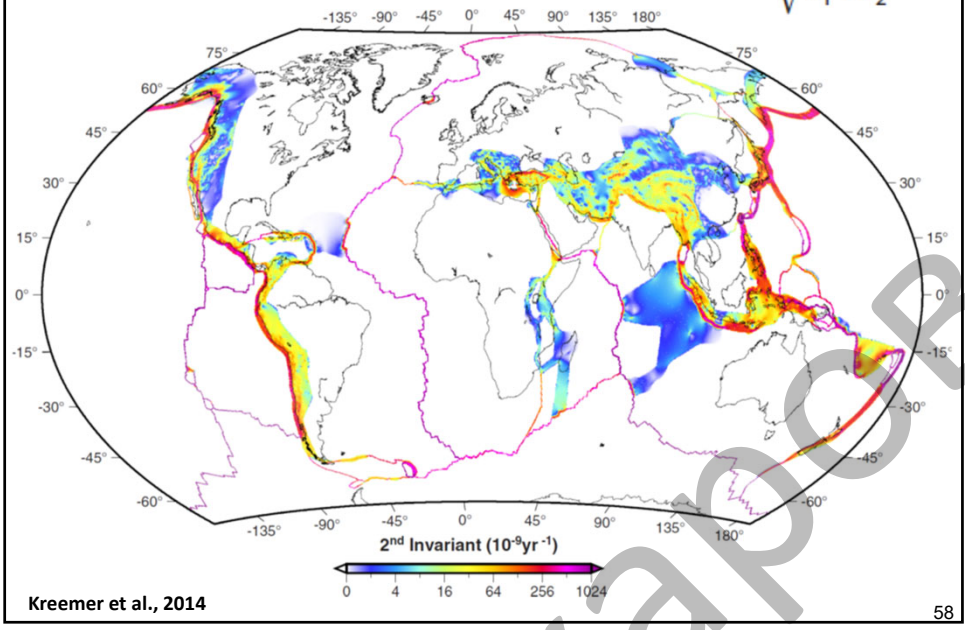
57

В.С. Захаров

Скорость деформации

второй инвариант тензора скорости деформации

$$\sqrt{\dot{\varepsilon}_1^2+\dot{\varepsilon}_2^2}$$

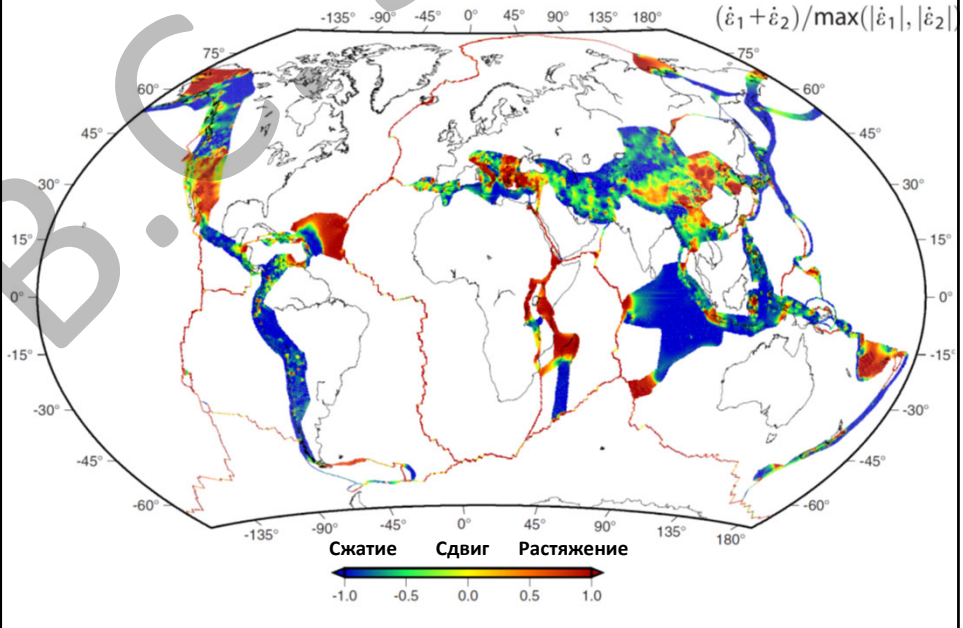


Kreemer et al., 2014

58

Тип деформации

$$(\dot{\varepsilon}_1+\dot{\varepsilon}_2)/\max(|\dot{\varepsilon}_1|,|\dot{\varepsilon}_2|)$$



Kreemer et al., 2014

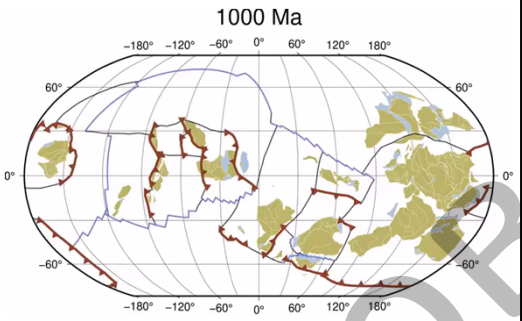
59

В.С. Захаров

5. Объем поглощаемой в зонах субдукции океанической коры равен объему коры, рождающейся в зонах спрединга.

Объем Земли и ее радиус **постоянны**, что (помимо прочего) обеспечивает достоверность плитно-тектонических палеореконструкций.



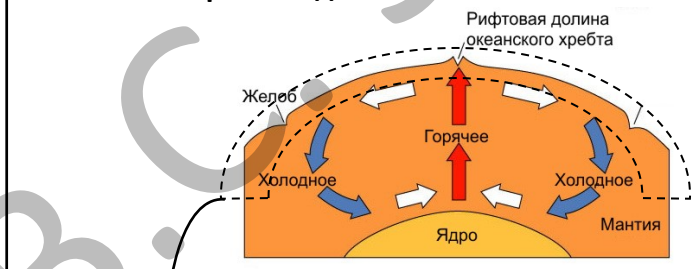


Animation of a full-plate tectonic model extended one billion years into the past

Merdith et al., 2021
https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103477

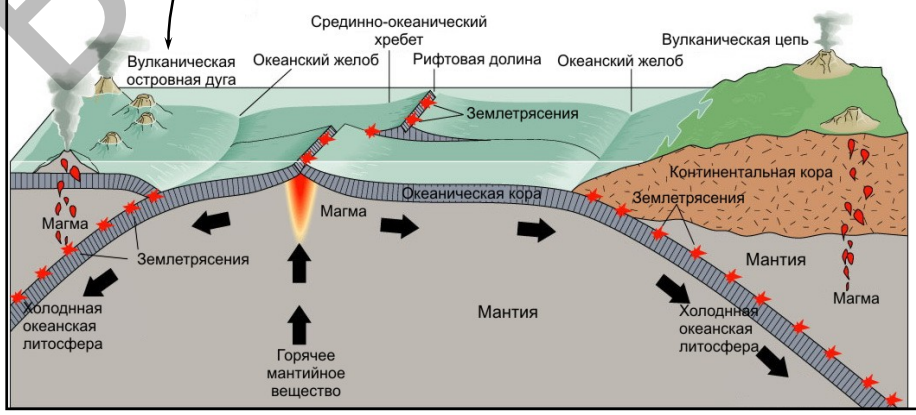
60

6. Основная причина движения плит - мантийная конвекция.



Под СОХ располагаются восходящие ветви конвективных ячеек, под зонами субдукций – нисходящие, а в промежутке – горизонтальные.

(однако все сложнее.....)

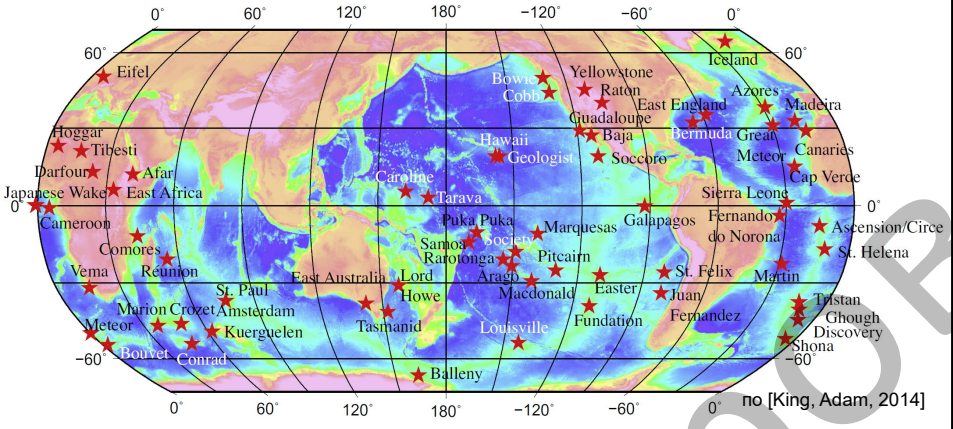


61

В.С. Захаров

Распределение горячих точек на поверхности Земли

Горячие точки – области проявления магматизма в отдельных **внутренних** районах литосферных плит

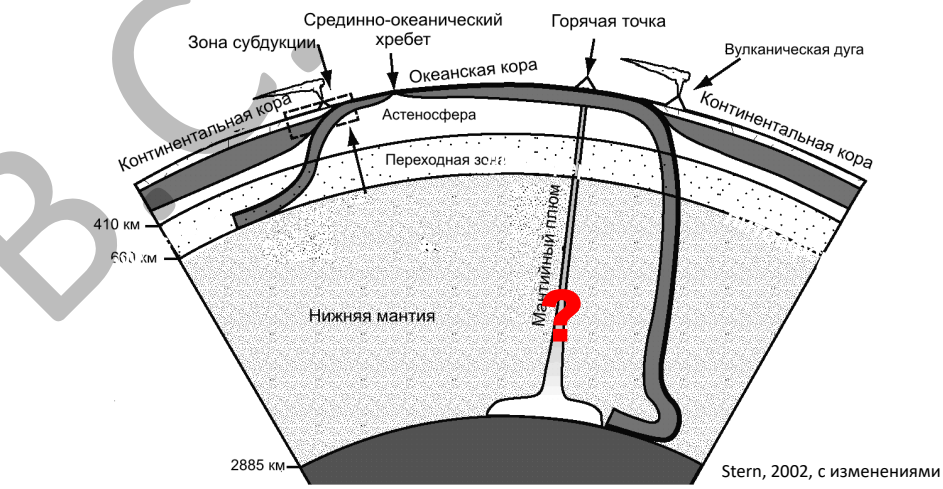


по [King, Adam, 2014]

Возможная причина – действие **мантийных плюмов**
(горячих мантийный потоков, поднимающихся независимо (?) от конвективных течений в мантии)

62

Схематическое изображение основных элементов тектоники плит и их взаимодействия в мантии



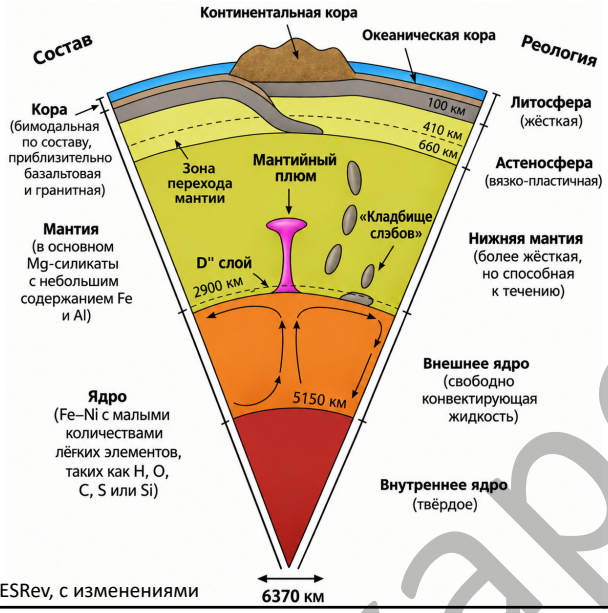
Stern, 2002, с изменениями

Проблемы: На современном уровне надо учитывать сложную реологию, деформирование «плит», их взаимодействия с мантией и другими оболочками. Сама «литосфера» – не просто жесткая оболочка, разбитая на «плиты»: она «рождается», развивается, «умирает» в процессе глобального развития Земли, взаимодействуя с другими элементами, влияет на них, и они на нее.
Нужно строить обновленную **самосогласованную систему глобальной геодинамики**/тектоники.

63

В.С. Захаров

Схематический разрез современной Земли, показывающий различия в составе (слева) и реологических свойствах (справа) между слоями.
Масштаб не соблюден

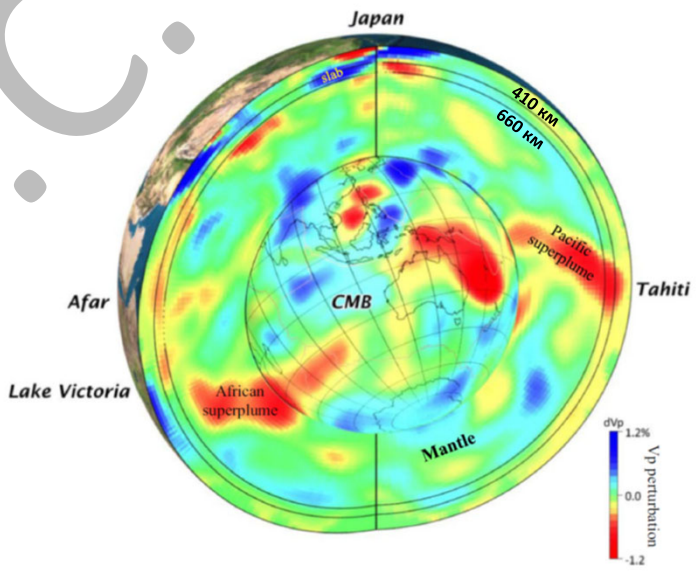


Palin et al. (2020), ESRev, с изменениями

64

3D модель неоднородностей в мантии

Сейсмическая томография: все сложнее



[Zhao, 2019]

65

В.С. Захаров

Резюме

- **Геодинамика** изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, и причины и механизмы таких движений и деформаций. Геодинамика рассматривает геологические процессы с точки зрения действующих сил и энергии.
- **Тектоника** литосферных **плит**, сформулированная более полувека назад, остаётся **основой** нашего понимания глобальной геодинамики.
- Её **основные положения** — разделение верхней оболочки Земли на литосферу и астеносферу, разделение литосферы на плиты, их движение и взаимодействие, а также связь с мантийной конвекцией — **подтверждаются** массой геофизических, геологических и геодезических данных.
- В XXI веке эта теория переживает **этап усложнения и детализации**. Переход **от упрощённых** моделей к описанию **реального** поведения вещества с учётом его сложной реологии, фазовых переходов, химической неоднородности и нестационарных процессов — главная задача современной геодинамики.
- Тектоника плит не отвергается, а **развивается и уточняется**, и это нормальный путь развития науки.

66

В.С. Захаров