

Шкала магнитуд

(существует несколько вариантов!)

Понятие магнитуды введено Чарльзом Рихтером в 1935 г.

Первоначальная шкала Рихтера для близких землетрясений <600км

$$M_L = \lg A_{\max}$$

A_{\max} - макс. ампл. колебаний в мкм по записи стандартного короткопериодного ($T=0.8$ с) сейсмографа на эпицентральной расстоянии 100 км

Для удаленных землетрясений (>2000 км) введена телесеismicкая магнитудная шкала для поверхностных волн с периодом $T=18-22$ с

$$M_S = \lg(A / T) + 1.66 \lg D + 3.3$$

D – эпицентральное расстояние в градусах

Шкала магнитуд

(существует несколько вариантов!)

Для глубоких толчков, которые не порождают поверхностных волн, Бено Гутенберг предложил унифицированную магнитуду для эпицентральных расстояний 600-2000 км, определяемую по амплитуде объемных (обычно продольных) волн

$$m_b = \lg(A / T) + Q(D, h)$$

$Q(D, h)$ – поправка, зависящая от эпицентрального расстояния D и глубины фокуса h

Магнитуда, определяемая по сейсмическому моменту M_0 [Н м]

$$M_w = \frac{\lg M_0}{1.5} - 6.07$$

Энергия землетрясения

эмпирическая зависимость Гутенберга-Рихтера

$$\lg E[\text{Дж}] = 4.8 + 1.5 M_S$$

M_S	$E, \text{Дж}$
6	6×10^{13}
7	2×10^{15}
8	6×10^{16}
9	2×10^{18}

Мегатонная бомба
 $\sim 5 \times 10^{15}$ Дж

За год выделяется
сейсмическая энергия
 $\sim 10^{18}$ Дж ($\sim 10^{-3}$ теплового
потока из недр Земли)

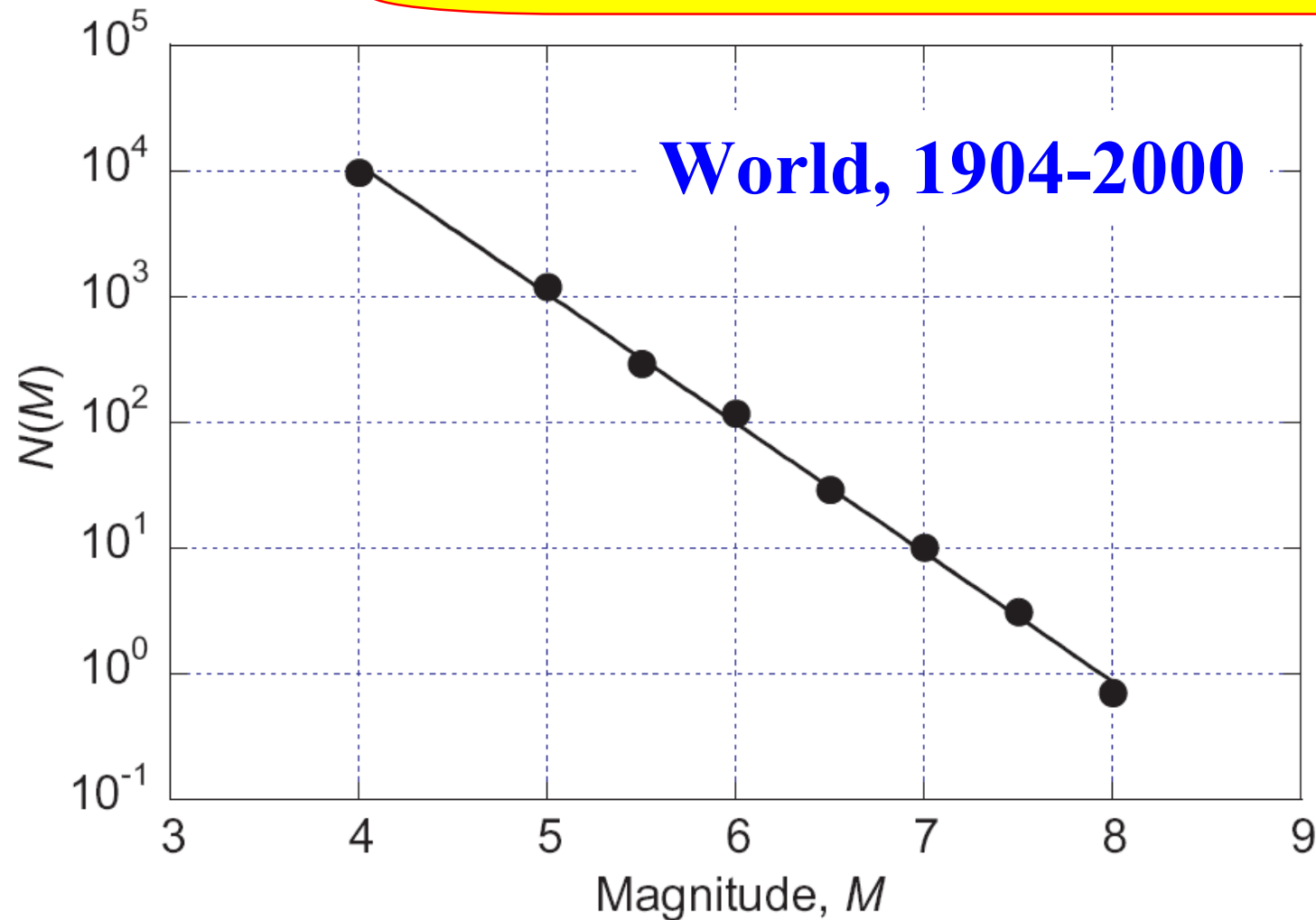
К сейсмическим волнам переходит 1-10%
энергии землетрясения

Как часто происходят землетрясения ?

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ	МАГНИТУДА	СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СОБЫТИЙ В ГОД
Мега-событие	≥ 9.0	0.04 ?
Катастрофическое	8.0 – 8.9	1
Разрушительное	7.0 – 7.9	17
Сильное	6.0 – 6.9	134
Умеренное	5.0 – 5.9	1319
Слабое	4.0 – 4.9	около 13 тыс.
Незначительное	3.0 – 3.9	около 130 тыс.
Очень слабое	2.0 – 2.9	около 1300 тыс.

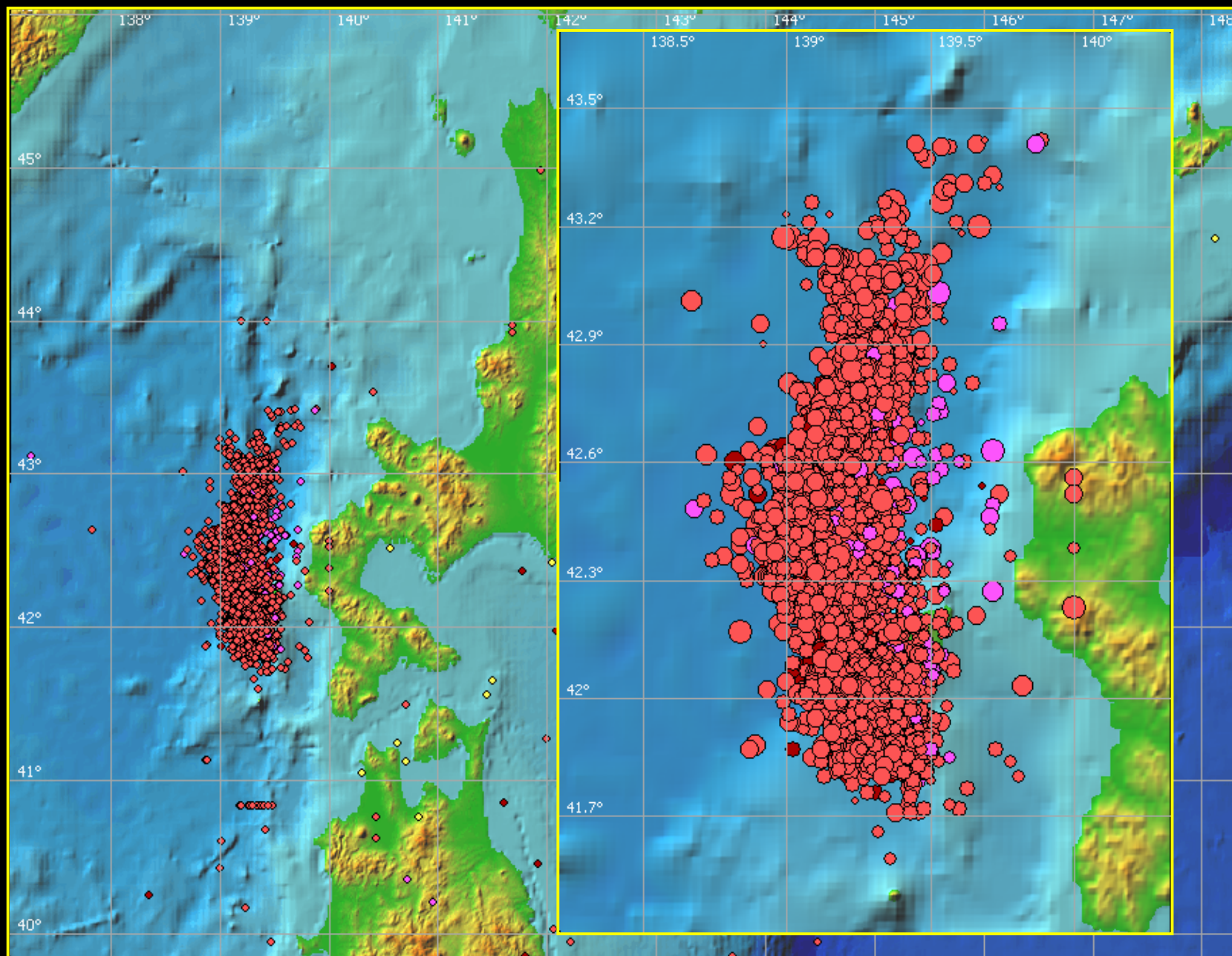
$$\log N(> M) = A - B \cdot M \quad B \approx 1$$

Закон Гутенберга – Рихтера

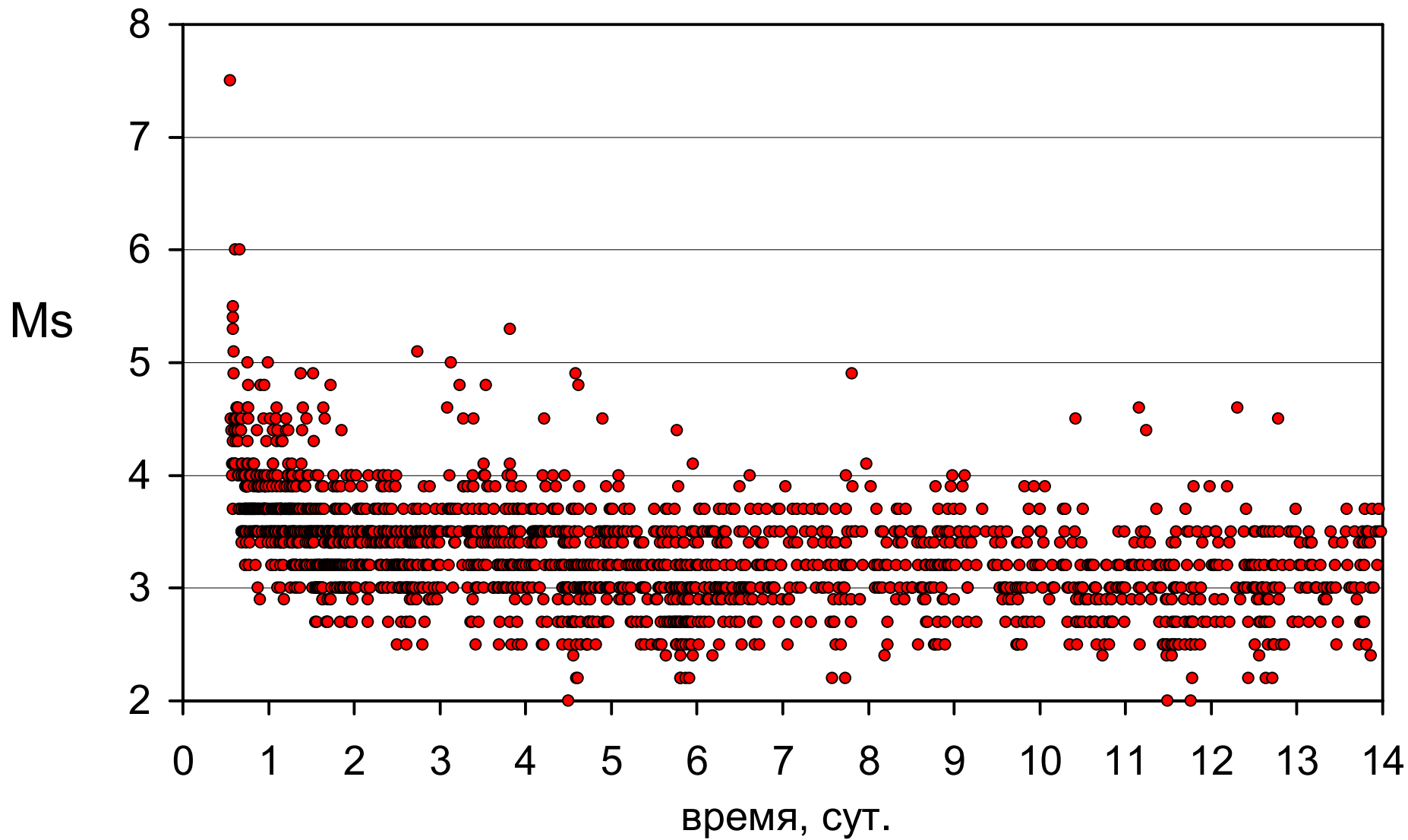


[Kanamori & Brodsky 2004]

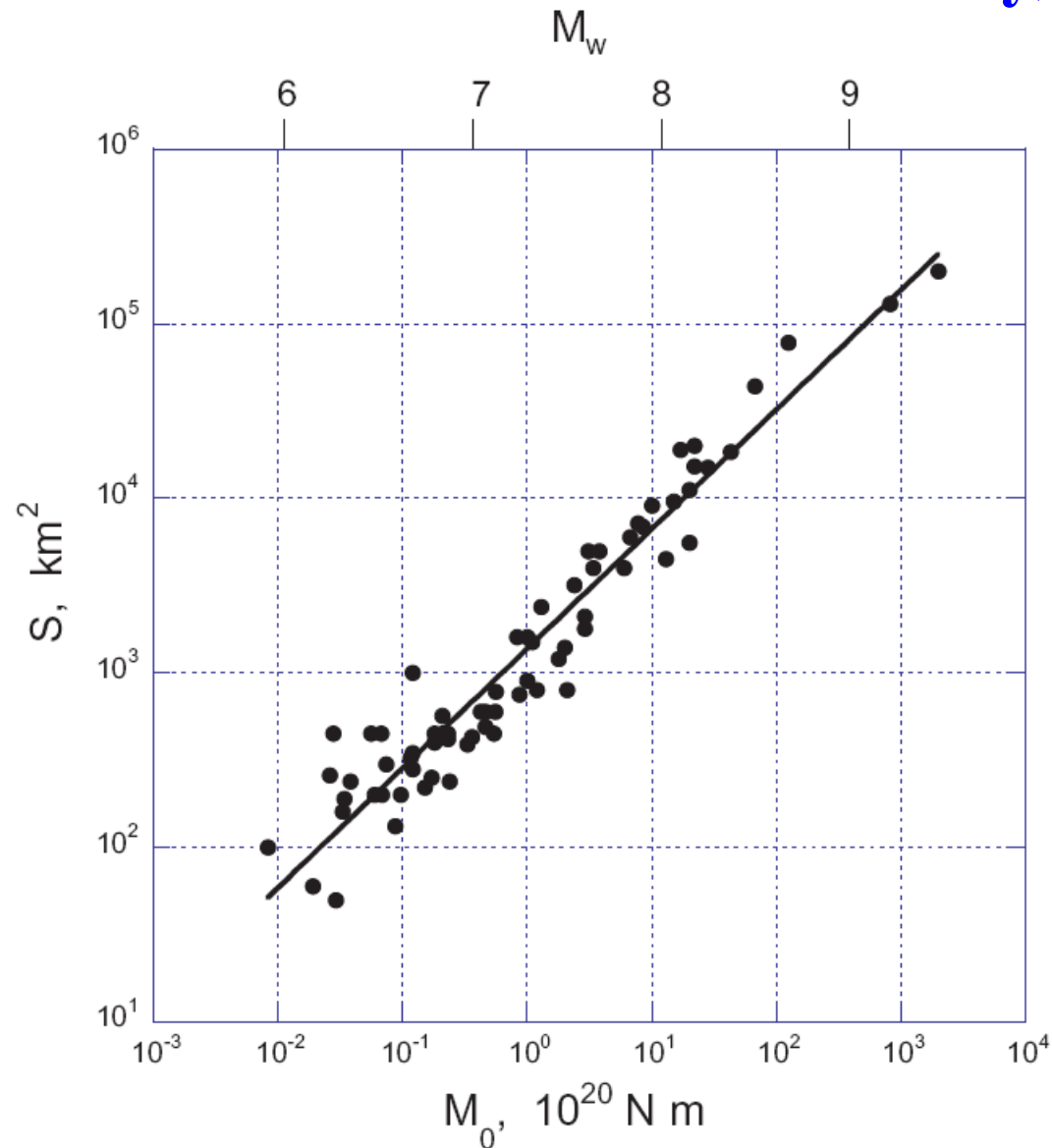
Афтершоки землетрясения (Окушири, 1993)



Афтершоки землетрясения (Окушири, 1993)

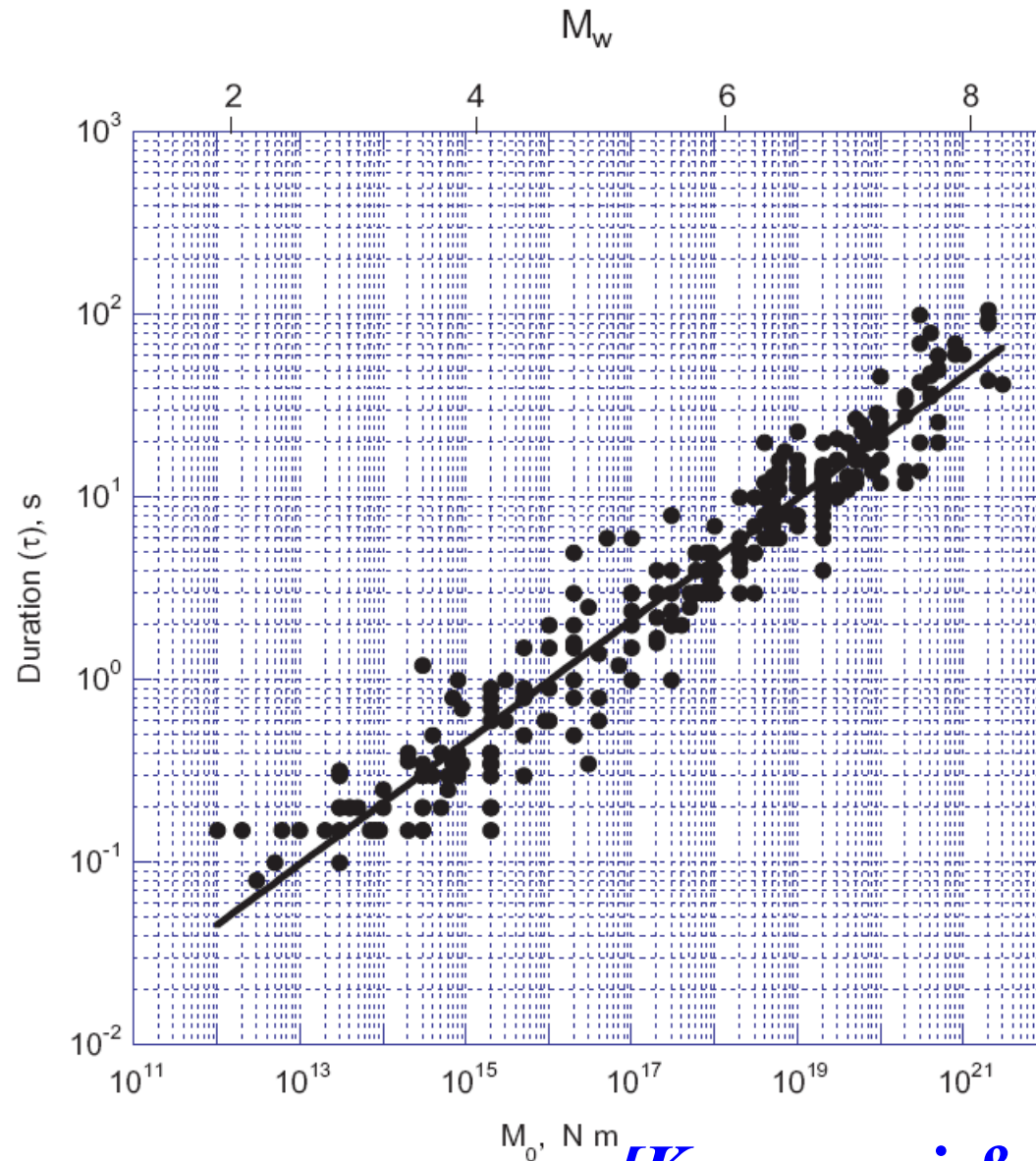


Площадь площадки разрыва как функция сейсмического момента/магнитуды



[Kanamori & Brodsky 2004]

Продолжительность вспарывания разрыва как функция сейсмического момента/магнитуды



[Kanamori & Brodsky 2004]

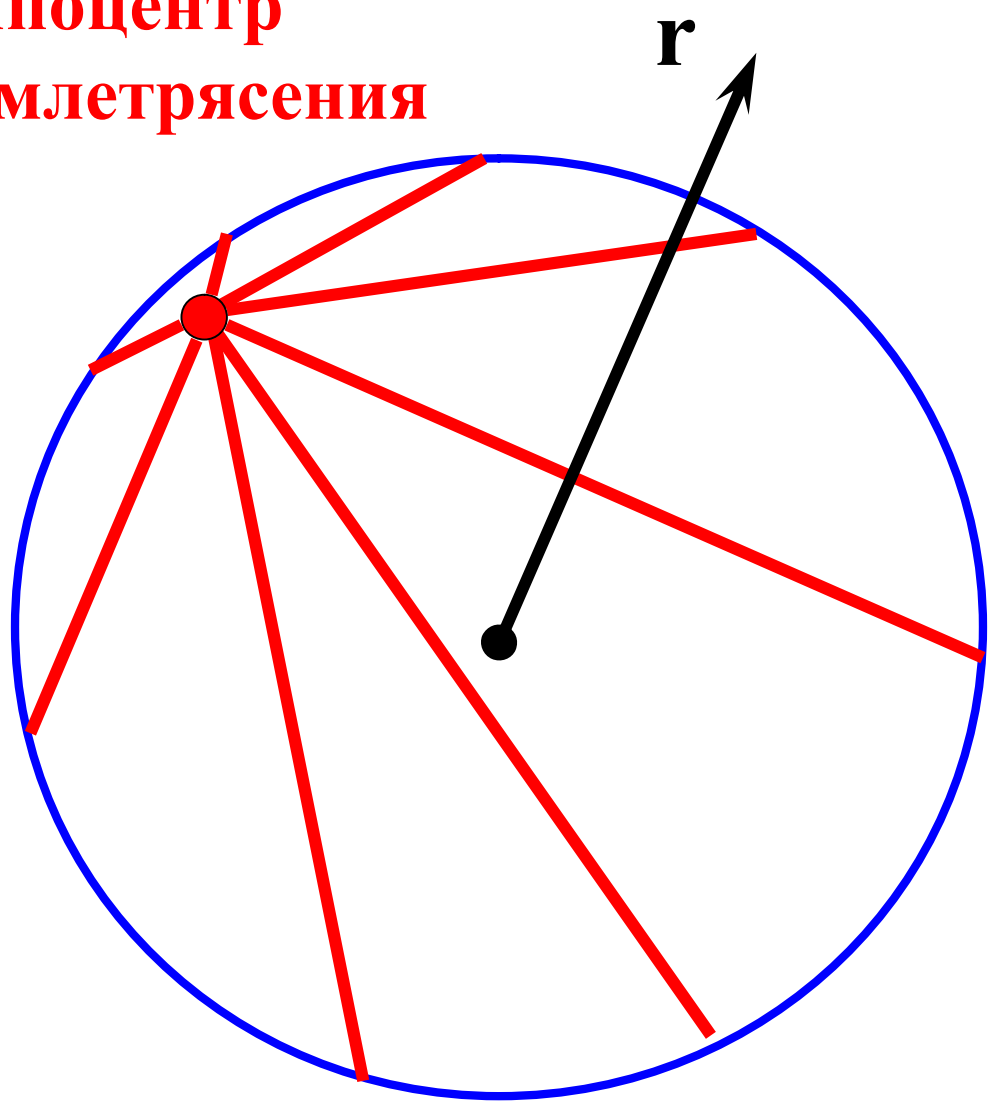
**Внутреннее
строение Земли
по сейсмическим
данным**

**«Всякое землетрясение можно
уподобить фонарю, который
зажигается на короткое время и
освещает нам внутренности
Земли, позволяя тем самым
Сравнительно что там происходит»
Кольском п-ове (Б.Б.Голицын, 1912)**

12 262 м



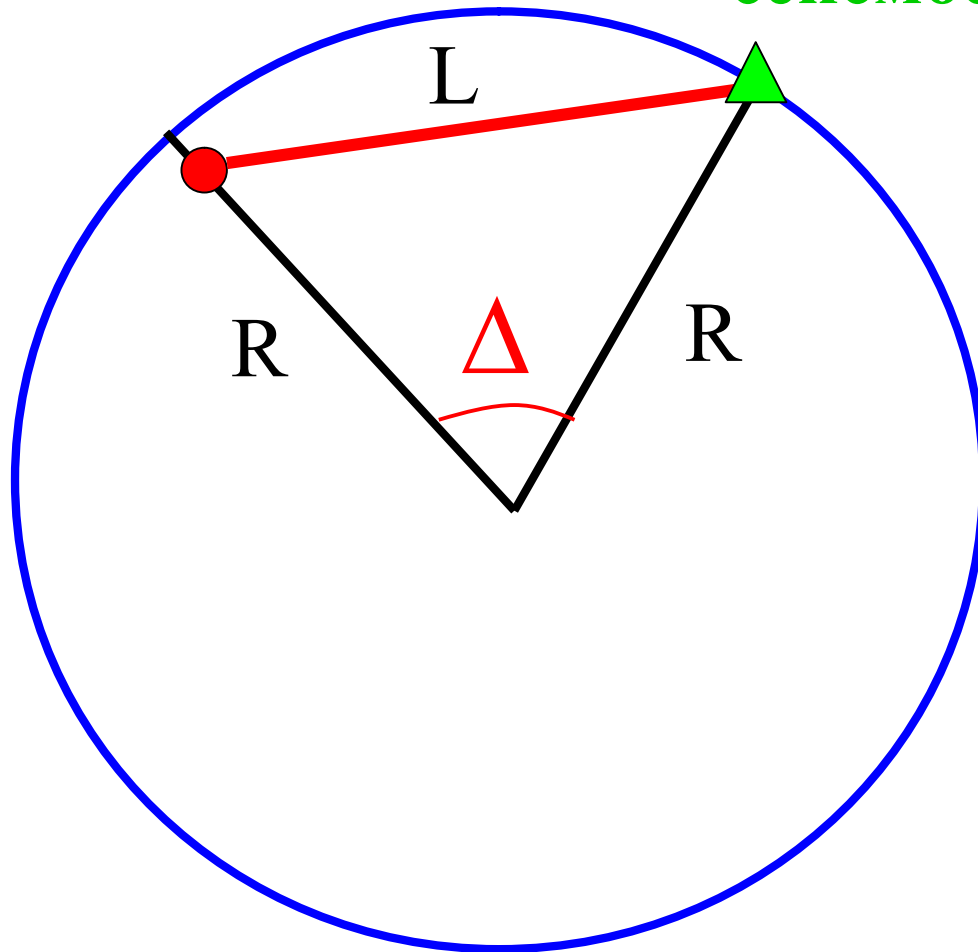
гипоцентр
землетрясения



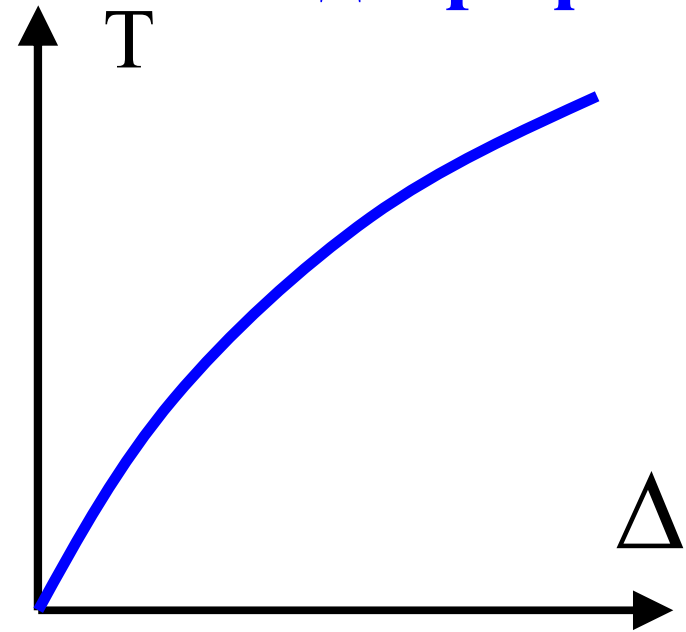
$$c = \text{const} \neq c(r)$$

**гипоцентр
землетрясения**

сейсмостанция



Годограф

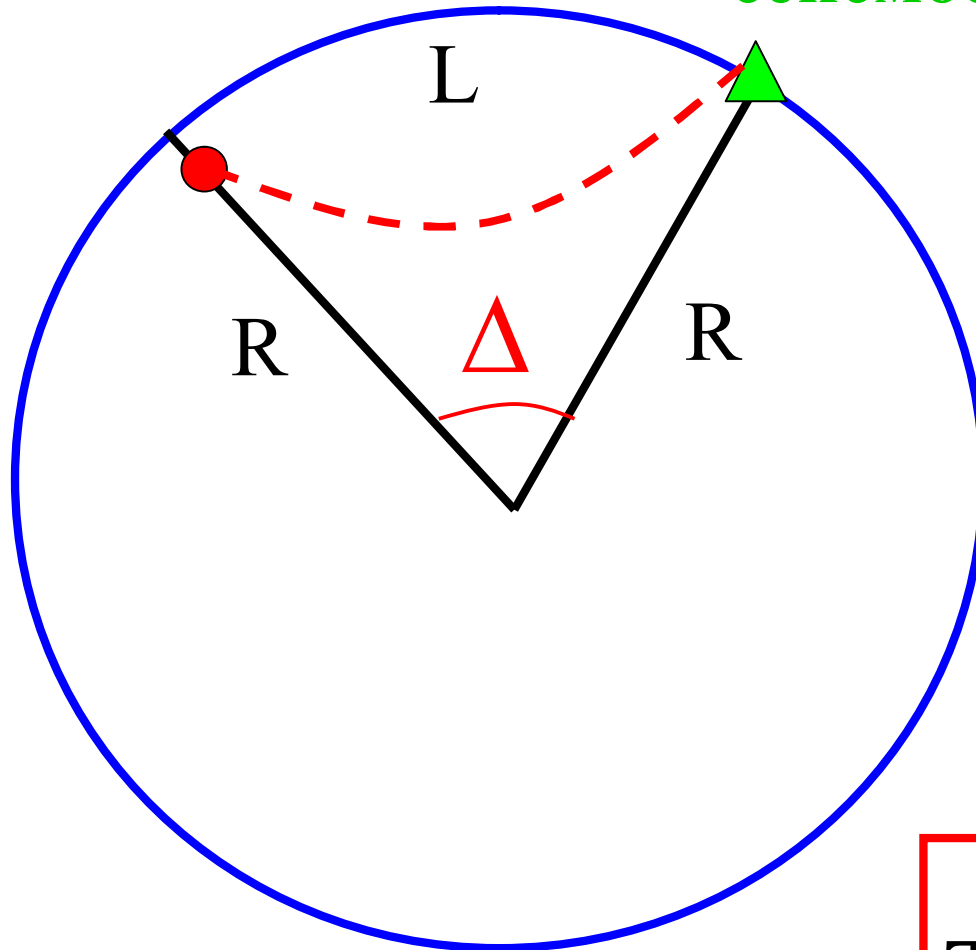


$$c = \text{const} \neq c(r)$$

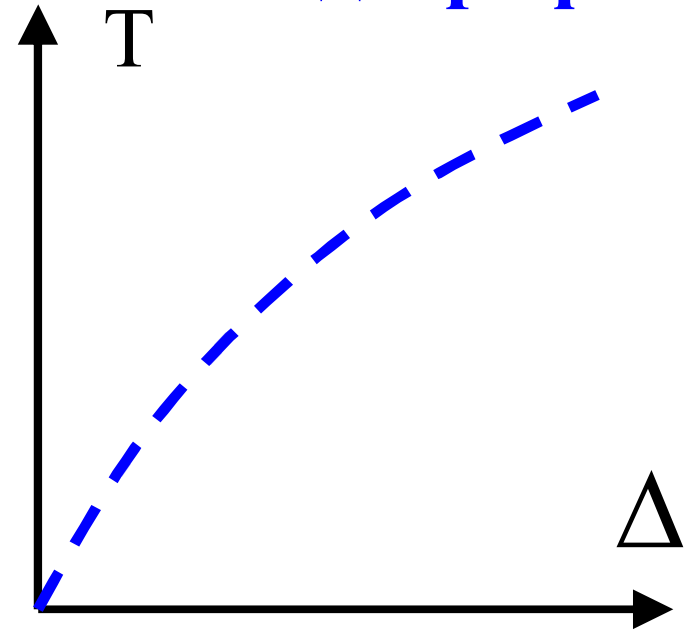
$$T = \frac{L(\Delta)}{c}$$

**гипоцентр
землетрясения**

сейсмостанция



Годограф



$$c = c(r)$$

$$T = \int \frac{dL}{c(r)}$$

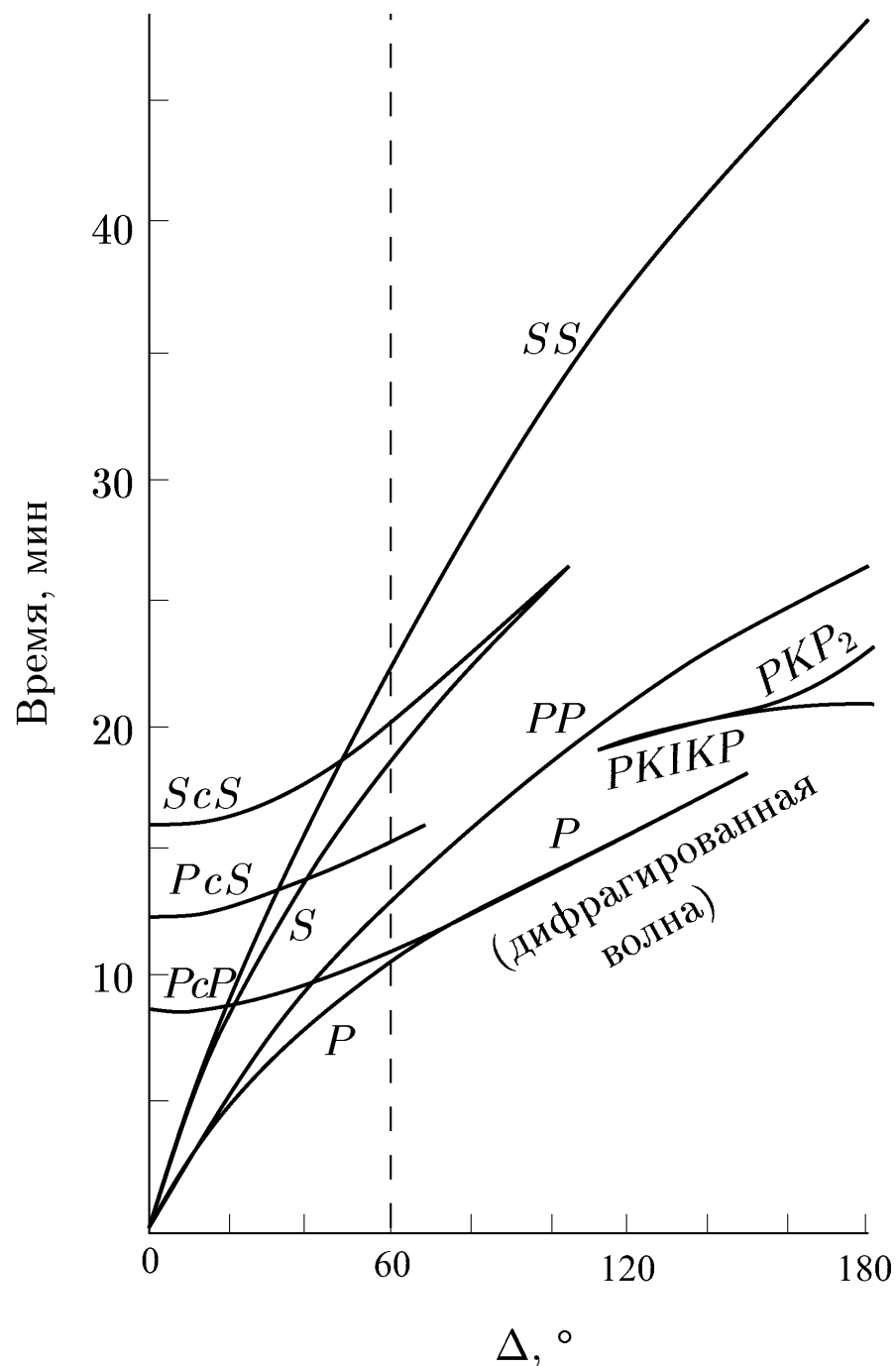
Годографы

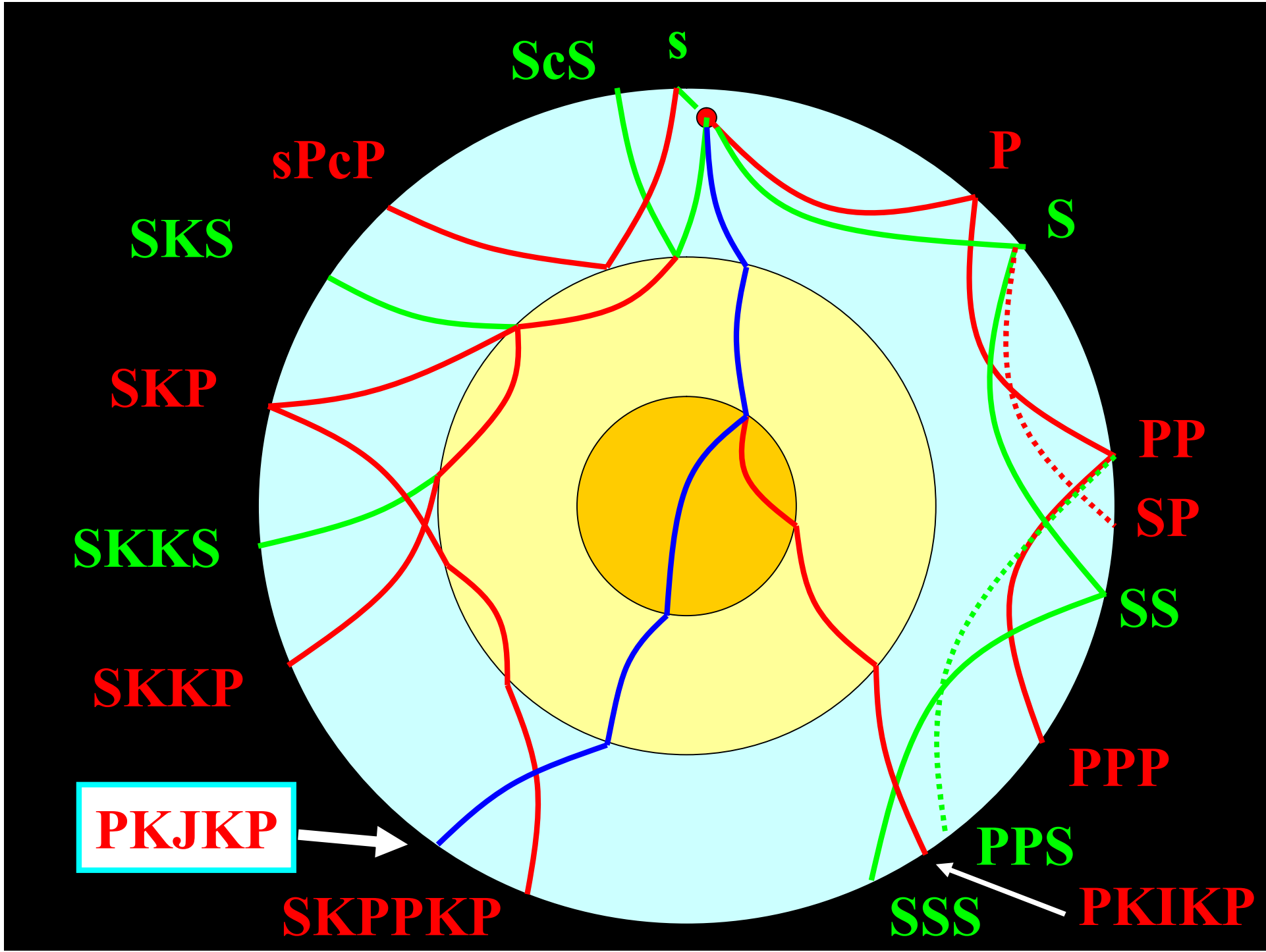
с – отражение от внешнего ядра

К – прохождение через внешнее ядро

і – отражение вверх от внутреннего ядра

I, J – пути волн P и S во внутреннем твердом ядре





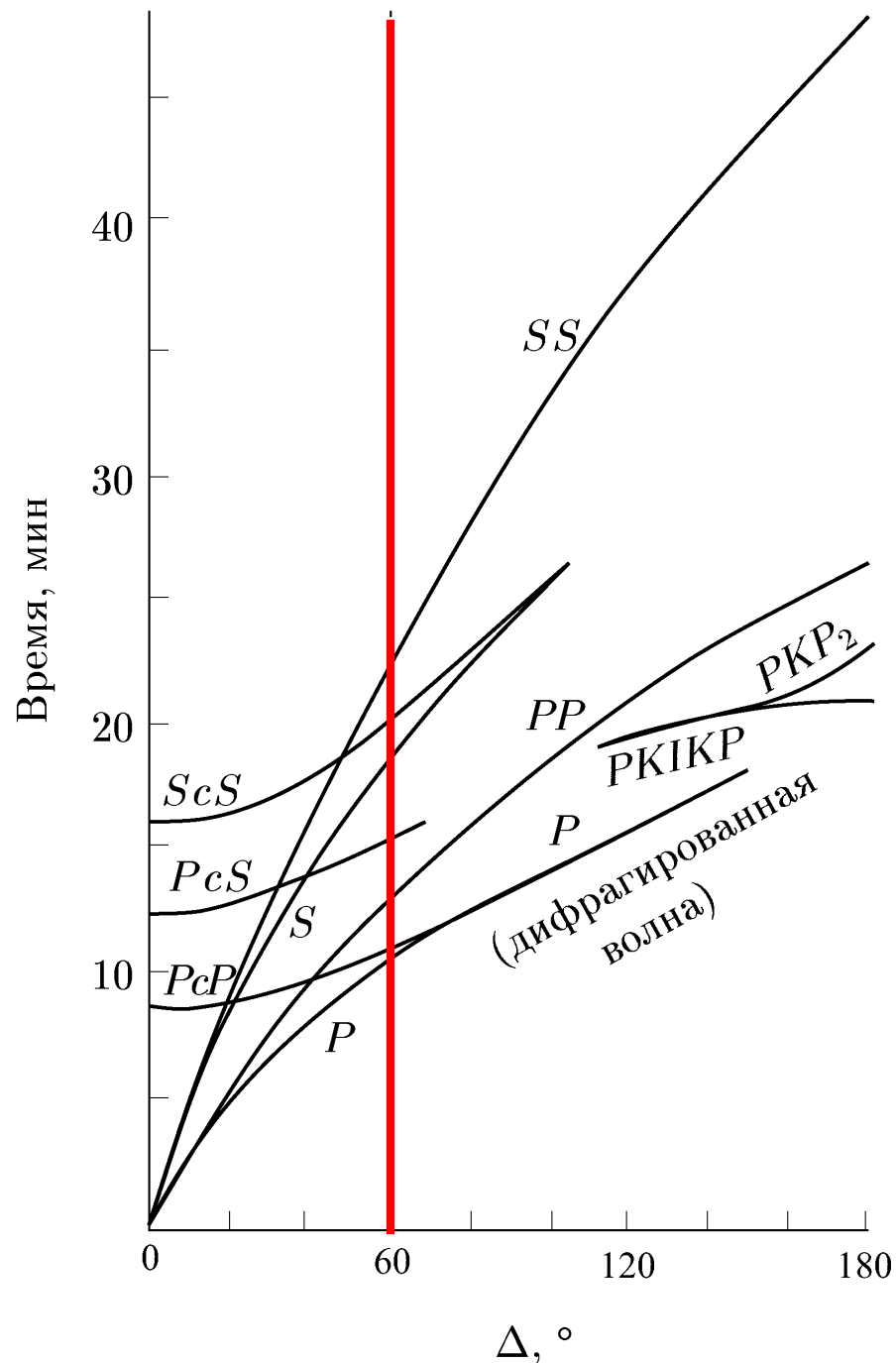
Годографы

с – отражение от внешнего ядра

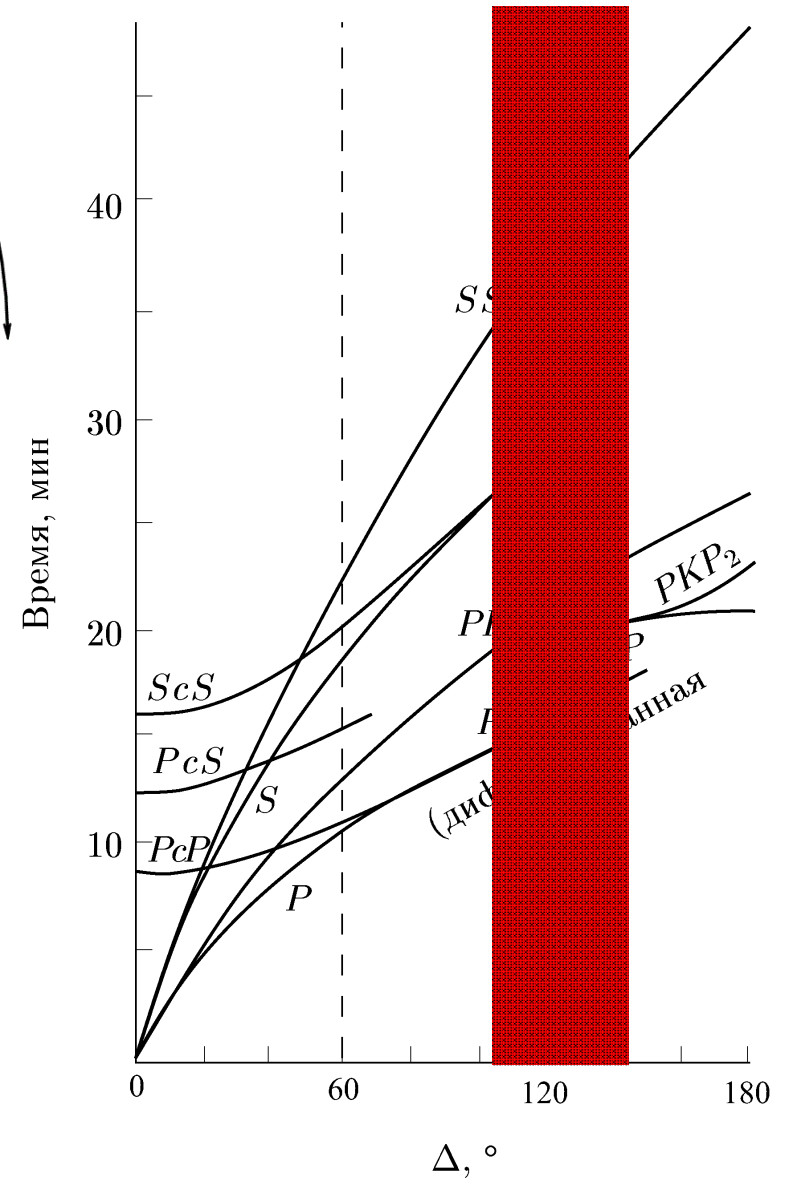
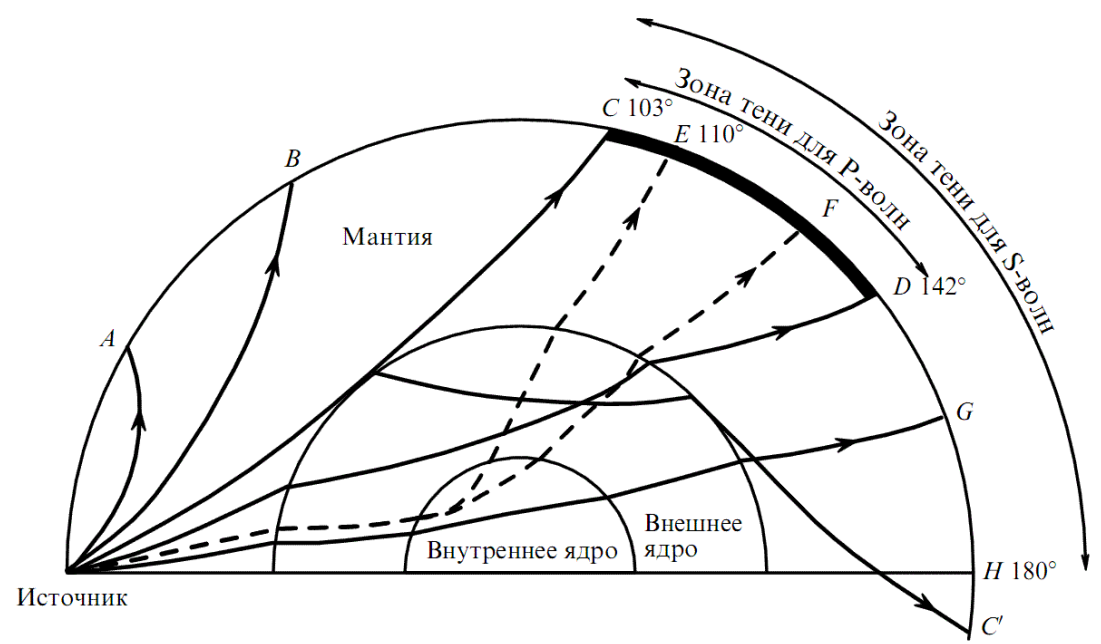
К – прохождение через внешнее ядро

і – отражение вверх от внутреннего ядра

I, J – пути волн P и S во внутреннем твердом ядре

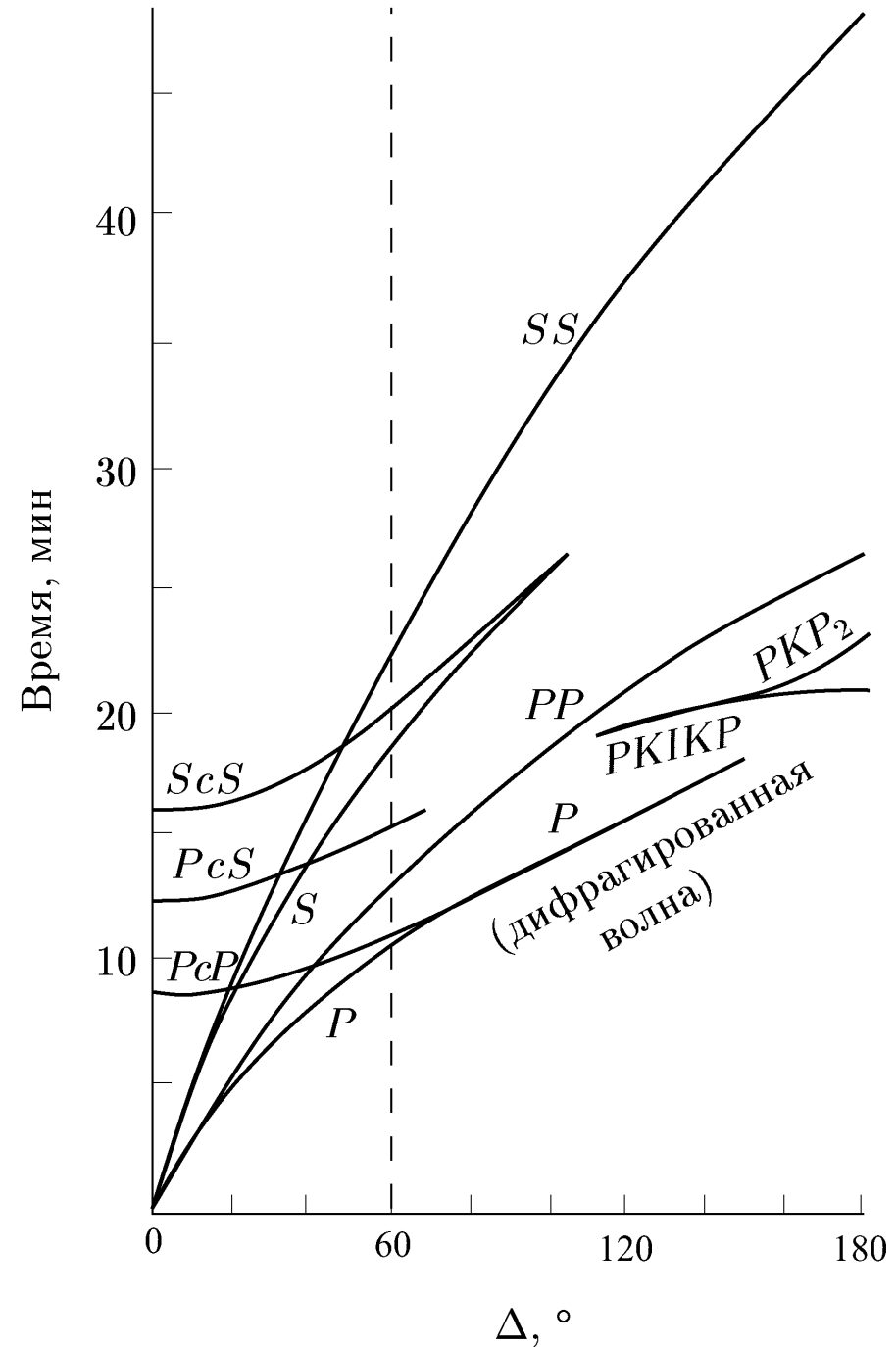


Зона тени для Р волн



Годографы

Исходные
данные для
построения
скоростного
разреза



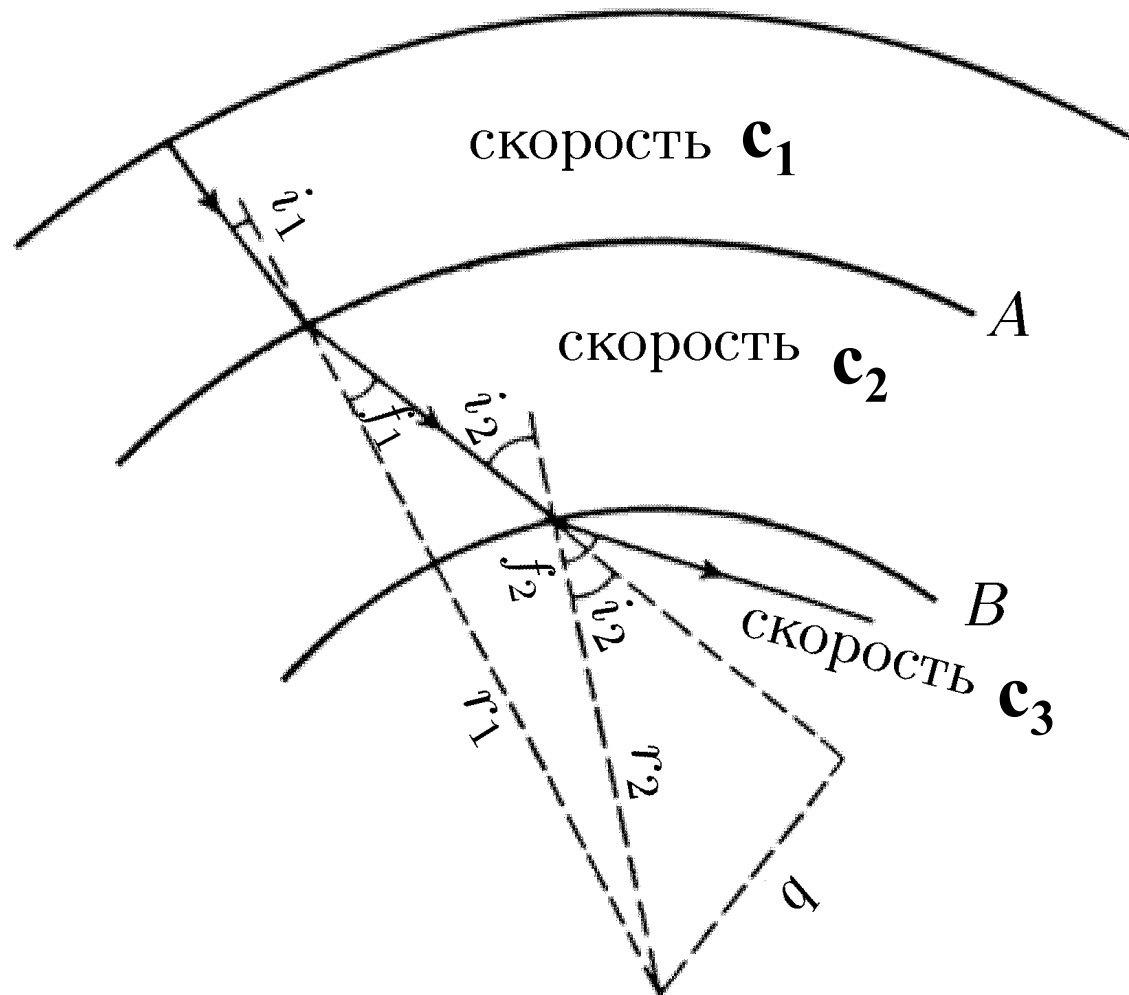
Переход от годографа к скоростному разрезу

Закон
Снеллиуса

$$\frac{\sin i}{c} = \text{const}$$

НО

$$f_1 \neq i_2$$



Переход от годографа к скоростному разрезу

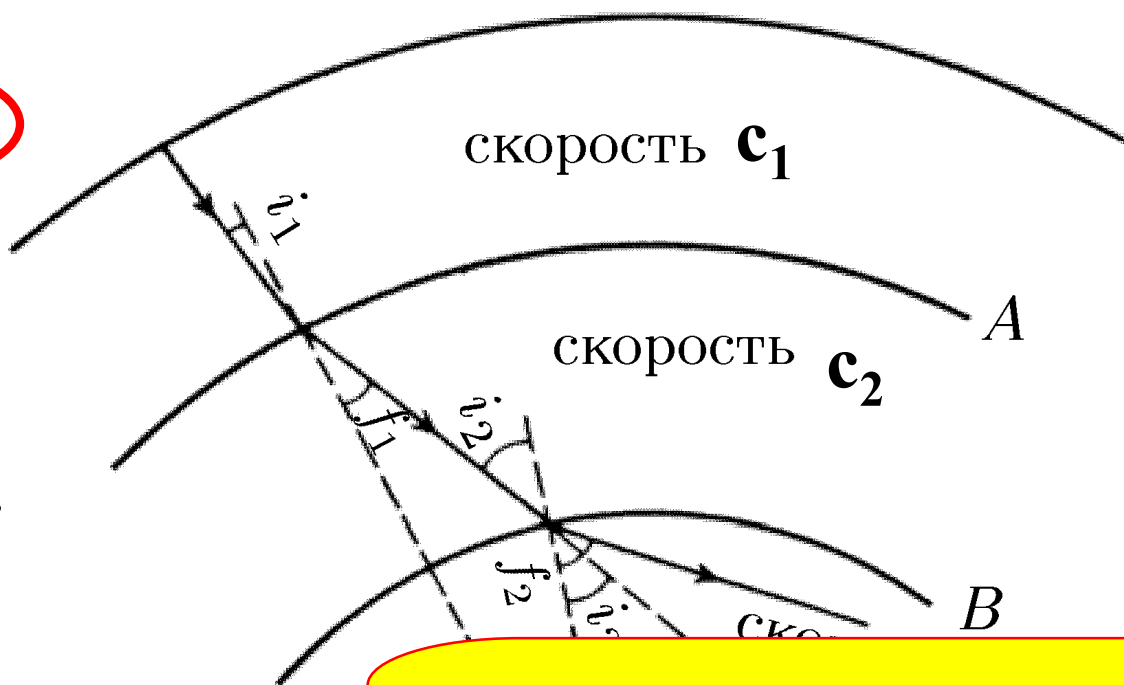
$$\frac{\sin i_1}{c_1} = \frac{\sin f_1}{c_2}$$

$$\frac{\sin i_2}{c_2} = \frac{\sin f_2}{c_3}$$

$$r_1 \sin f_1 = r_2 \sin i_2 = q$$

$$r_1 \frac{\sin i_1}{c_1} = r_2 \frac{\sin i_2}{c_2}$$

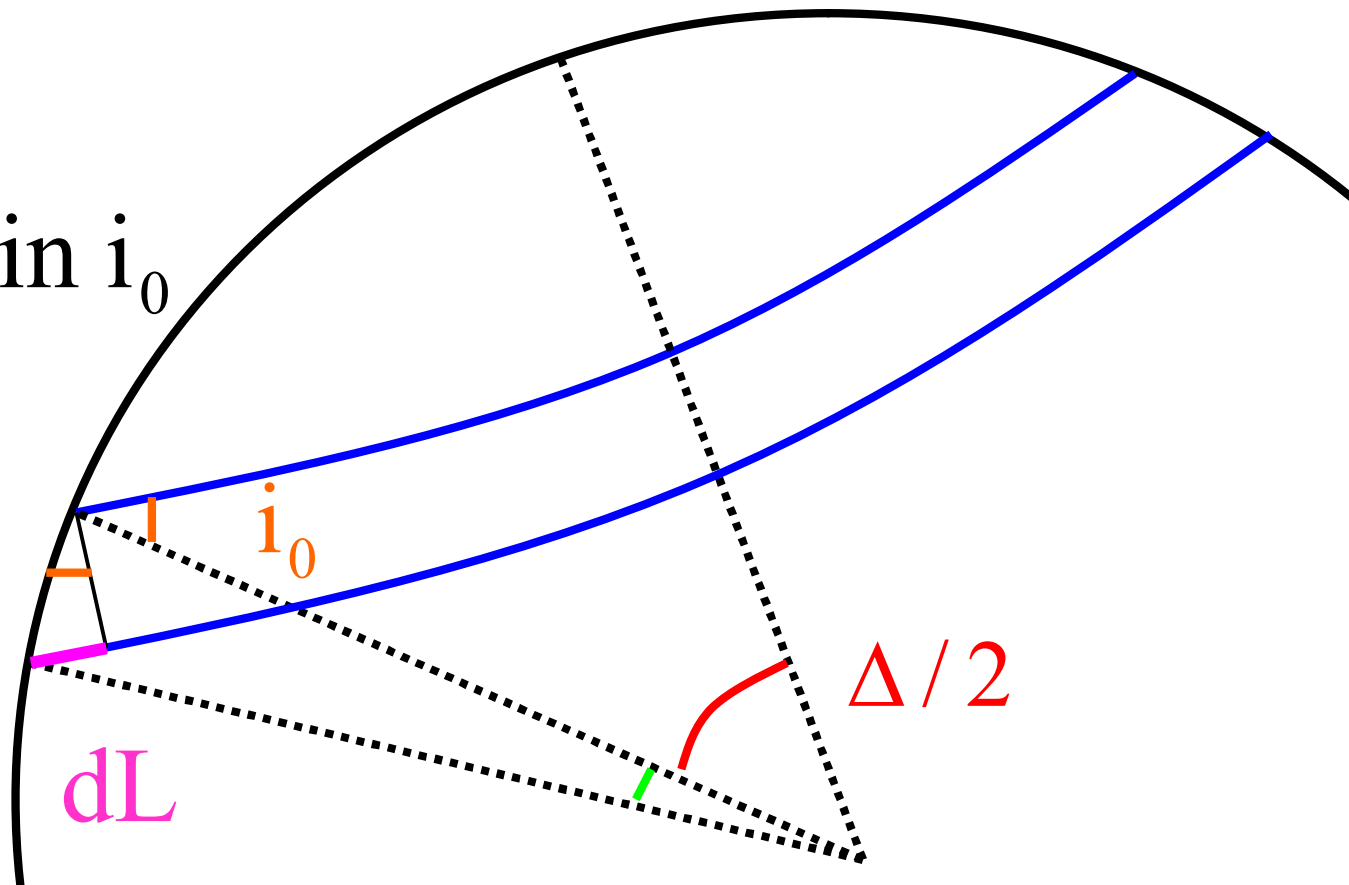
$$r \frac{\sin i}{c} = \text{const}$$



**параметр
сейсмического луча**

$$dT = \frac{2 dL}{c_0}$$

$$dL = \frac{d\Delta}{2} r_0 \sin i_0$$



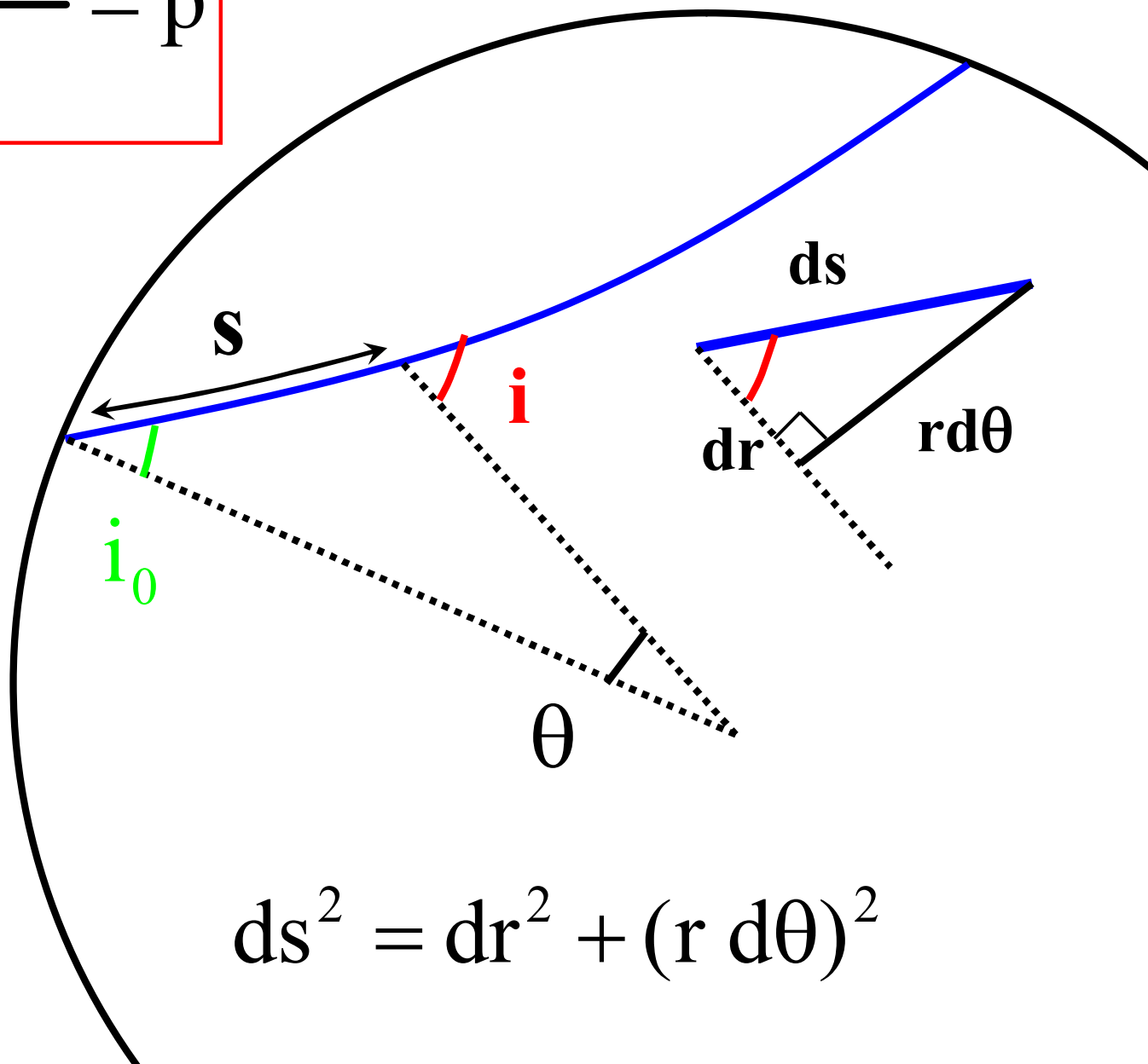
$$\frac{dT}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin i_0}{c_0} = p$$

$$\frac{dT}{d\Delta} = \frac{r_0 \sin i_0}{c_0} = p$$

$$p = \frac{r \sin i}{c}$$

$$\sin i = \frac{r d\theta}{ds}$$

$$p = \frac{r}{c} \frac{r d\theta}{ds}$$



$$ds^2 = dr^2 + (r d\theta)^2$$

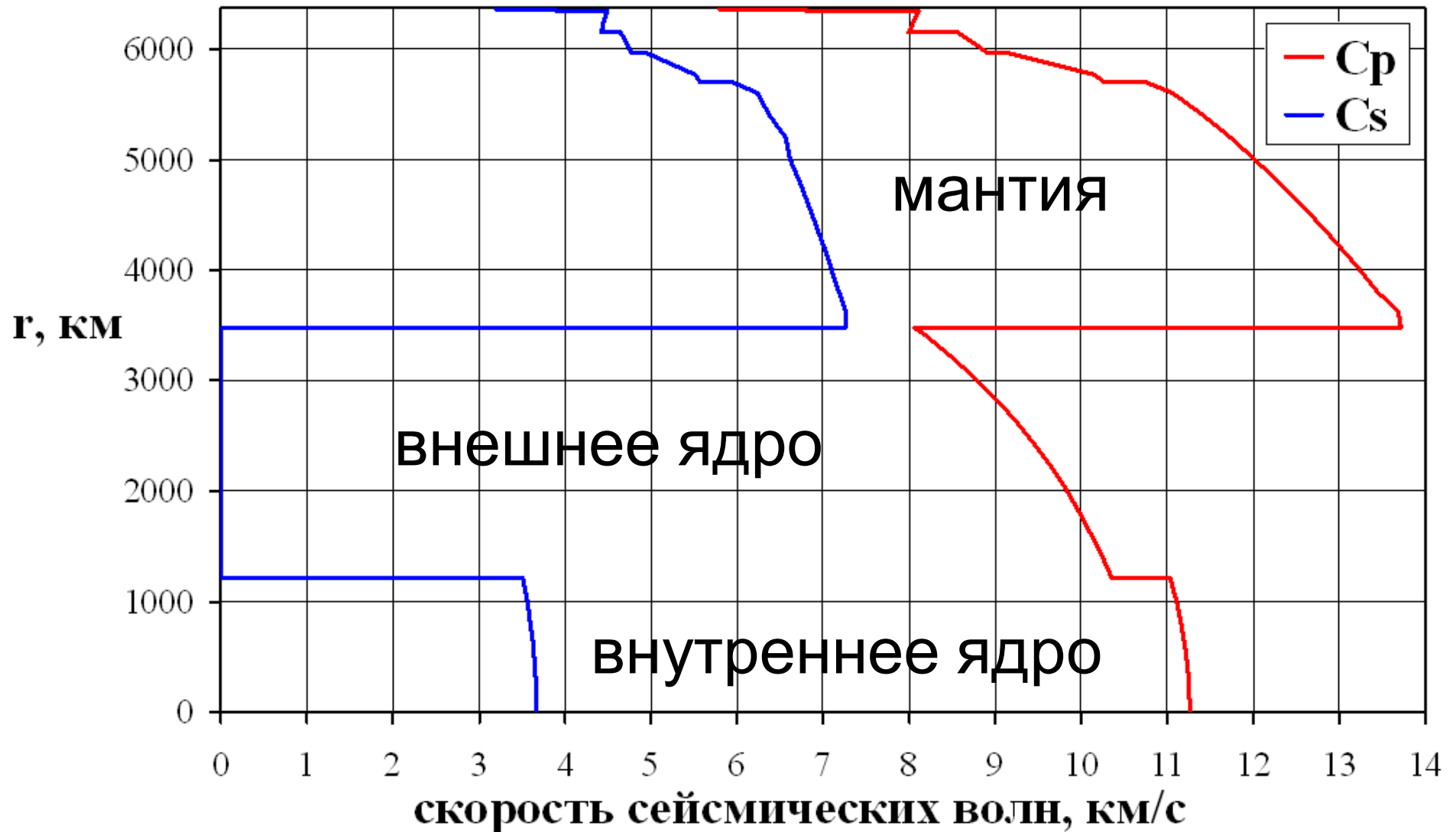
$$p = \frac{r}{c} \frac{d\theta}{ds} \quad ds^2 = dr^2 + (r d\theta)^2$$

$$\frac{d\theta}{dr} = \frac{p}{r} \frac{1}{\sqrt{[r/c(r)]^2 - p^2}}$$

$$\frac{\Delta}{2} = \int_{r_{\min}}^{r_0} \frac{p dr}{r \sqrt{[r/c(r)]^2 - p^2}}$$

Скоростной разрез

The Preliminary Reference Earth Model (PREM) after
Dziewonski & Anderson 1981



Скоростной раз

The Preliminary Reference Earth Model

Dziewonski & Anderson

Наиболее резкая граница
раздела в недрах Земли
открыта Бено Гутенбергом
(1914 г)



Внутреннее ядро

Внутреннее

Внутреннее твердое
ядро открыто
датским сейсмологом
Инге Леманн (1936 г)

Скорость сейсмических волн, км/с

P
S

4000

4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

Скоростной разрез

The Preliminary Reference Earth Model (PREM) after

Dziewonski & Anderson 1981

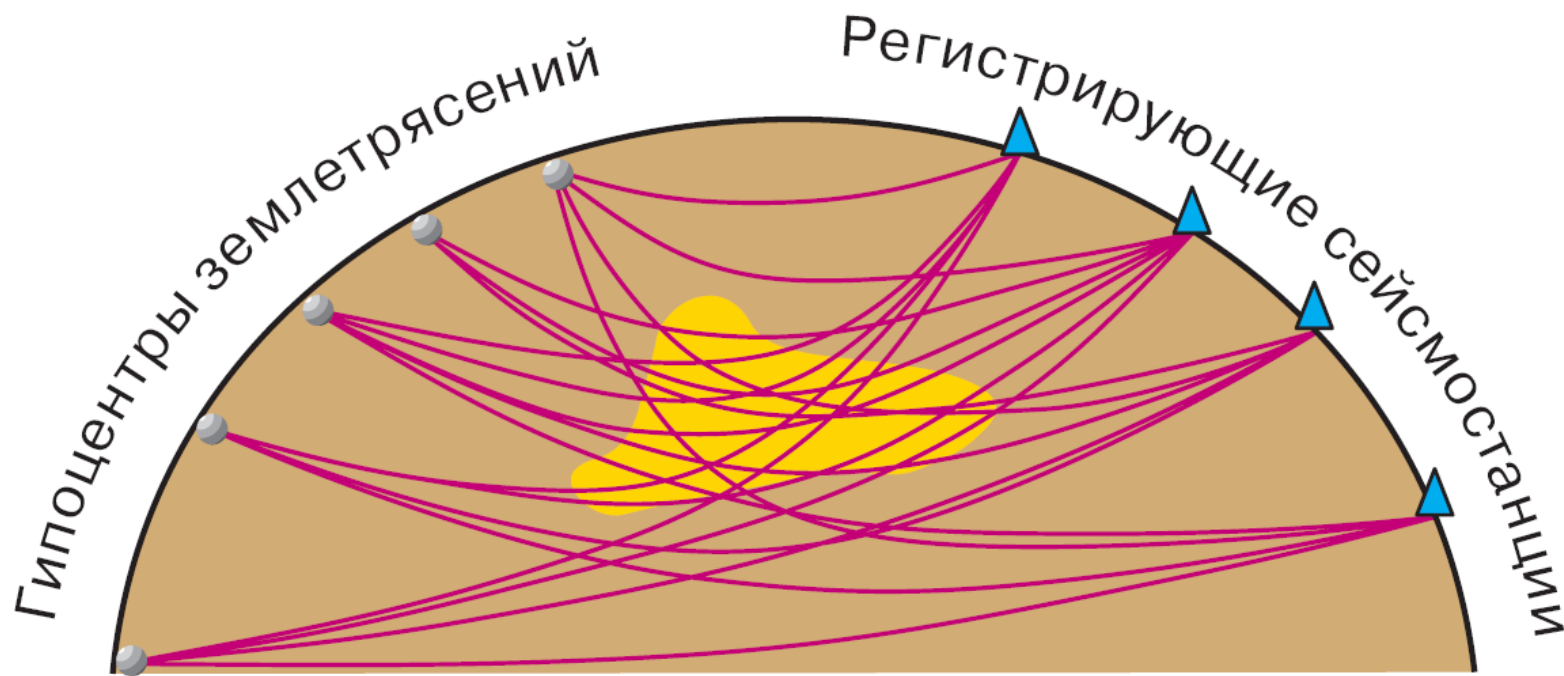


Модели внутреннего строения Земли

(усредненные распределения с глубиной различных физических параметров)

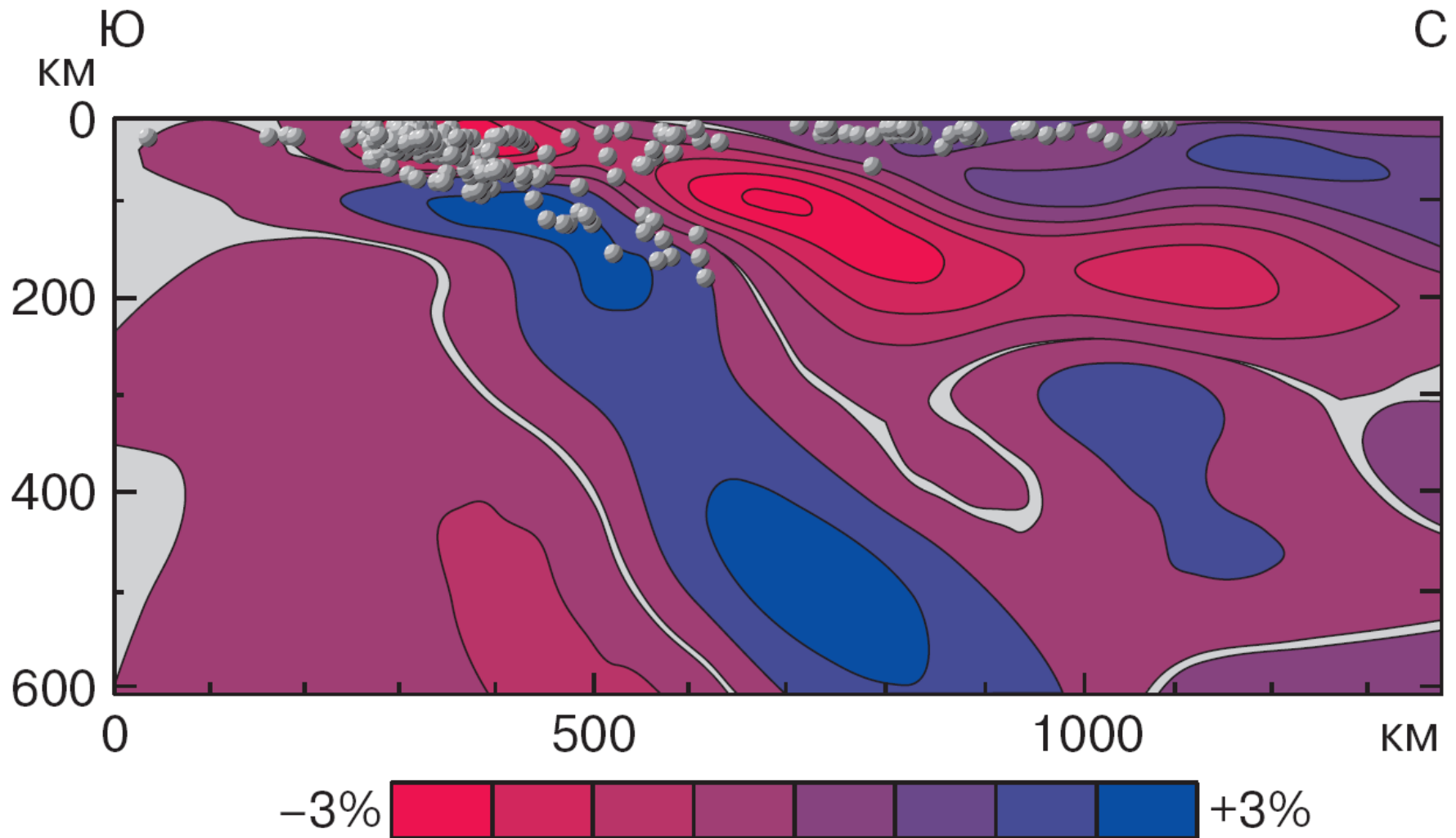
- ❑ Модель Буллена (1959-1969)
- ❑ PREM (Preliminary Reference Earth Model, 1981)

Скорости сейсмических волн
могут отличаться от
стандартных значений в
пределах 5%

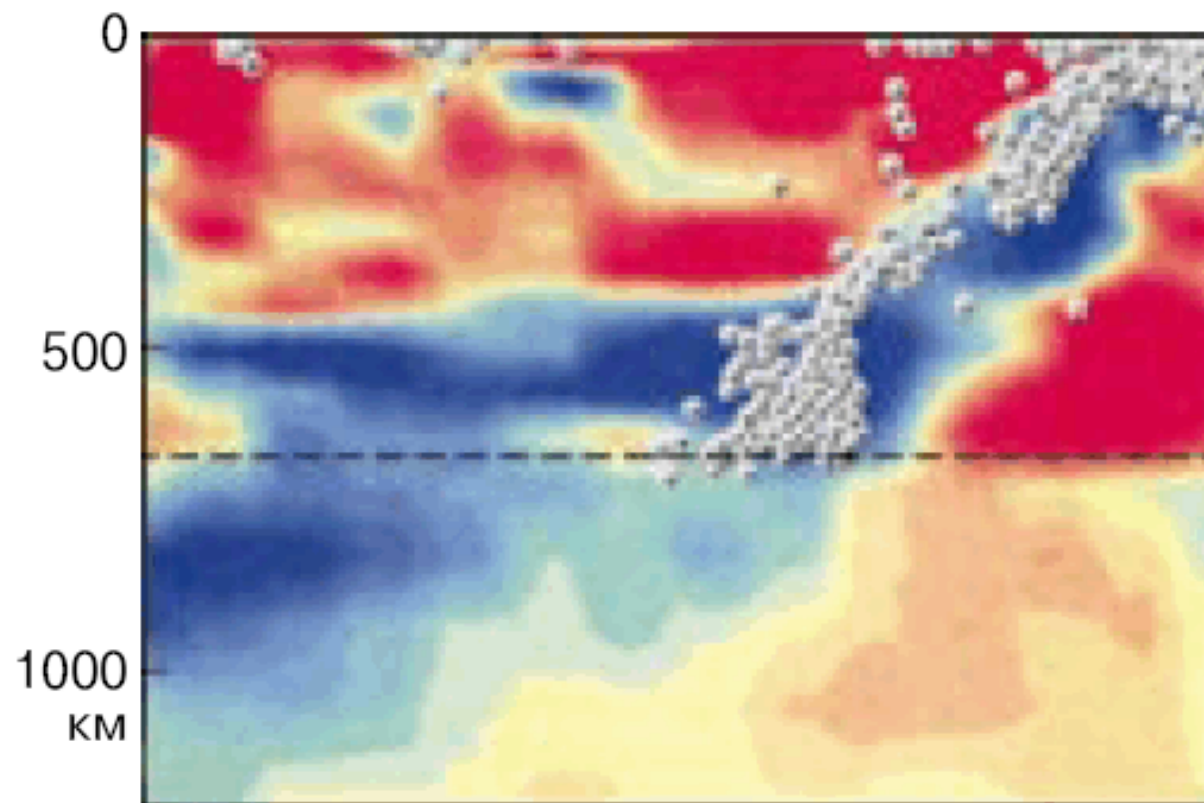


**«быстрые»
или
холодные
области**

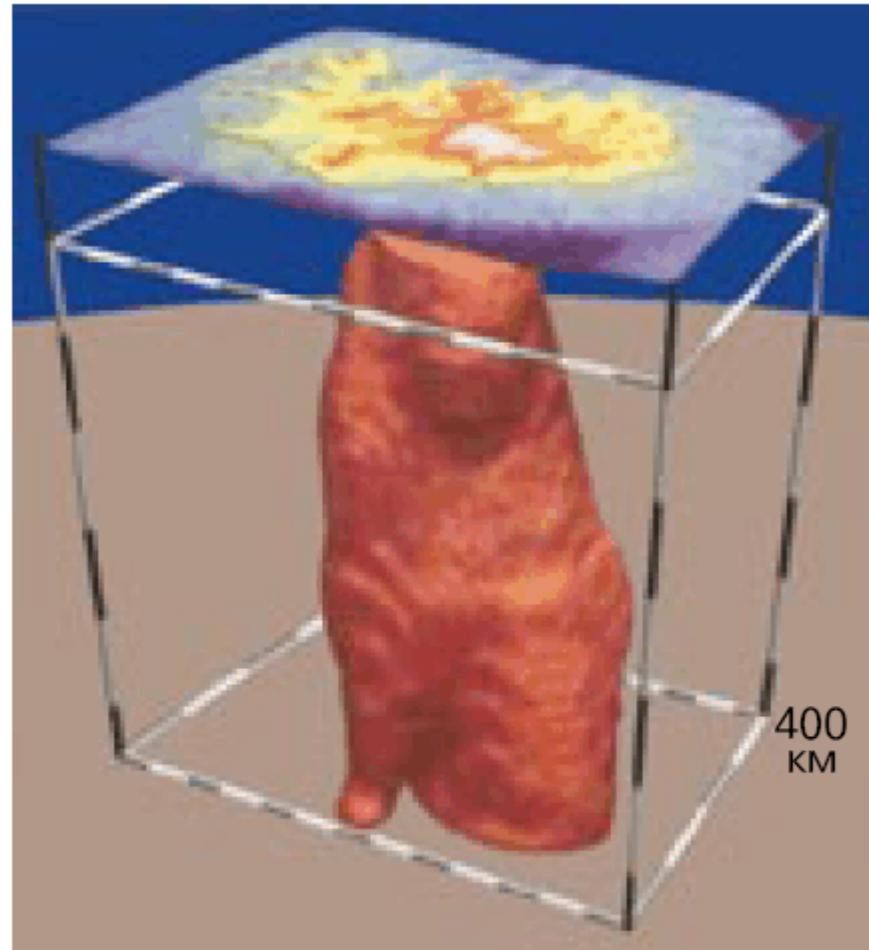
**«медленные»
или
горячие
области**



Томографический профиль через Эллинский желоб, о-в Крит и Эгейское море. Черные кружки – гипоцентры землетрясений. Синим цветом показана пластина погружающейся холодной (“быстрой”) мантии, красным изображена “медленная” мантия (по данным Спэкмена В., 1989)

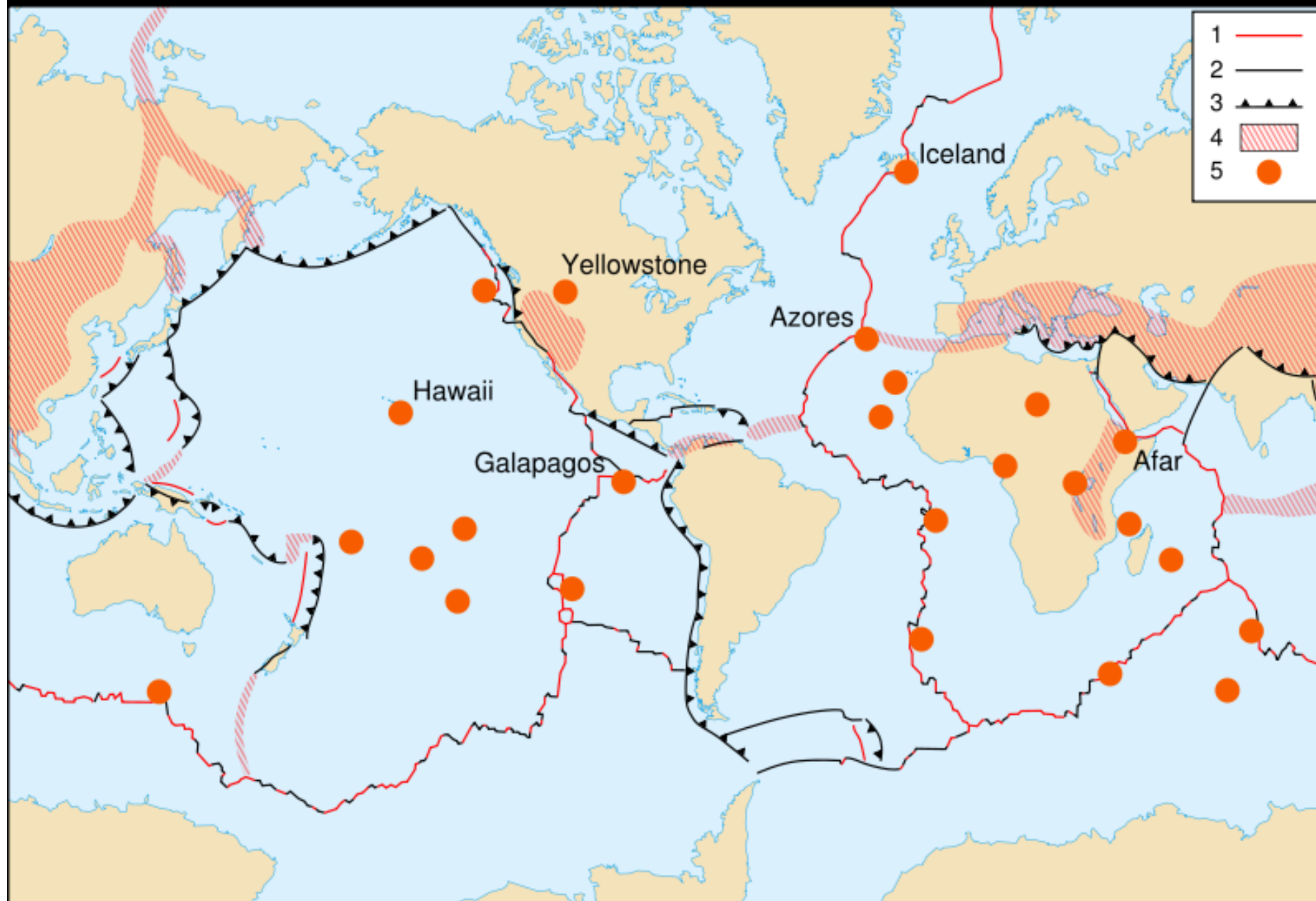


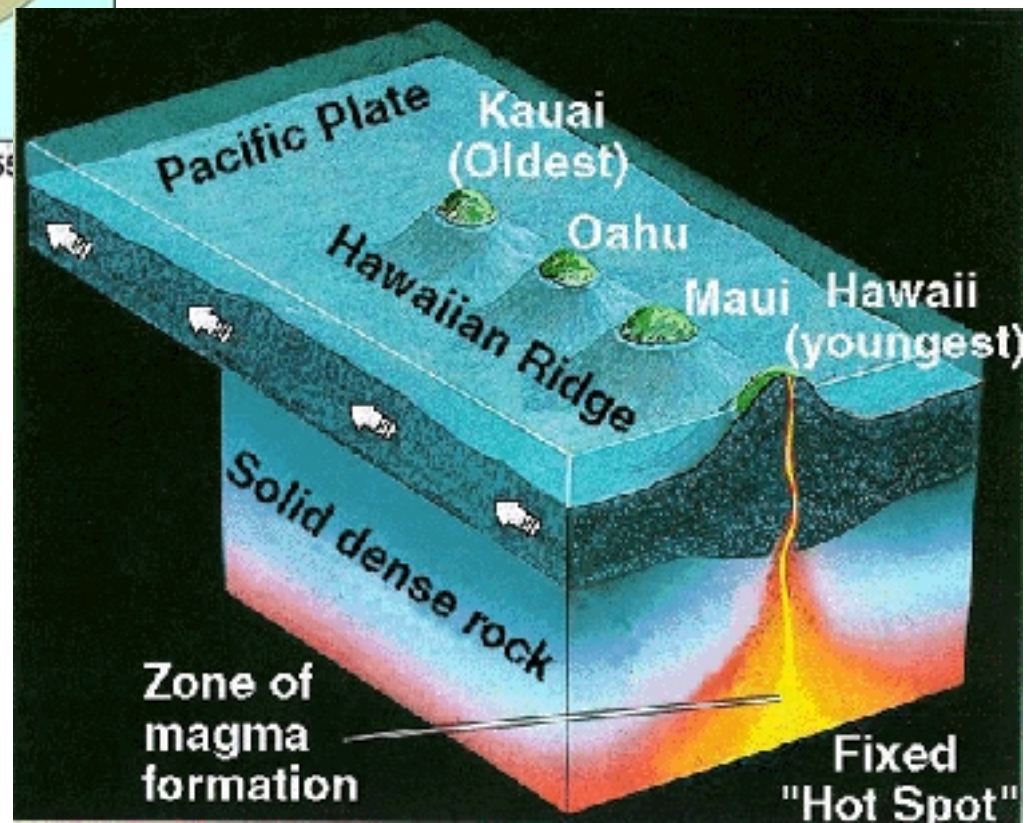
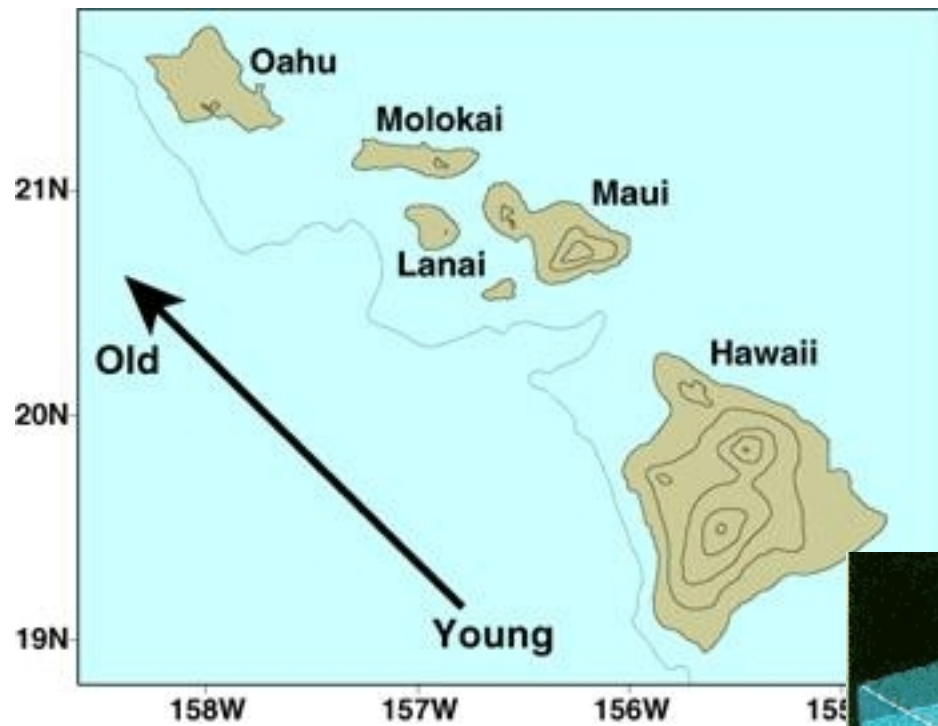
Остров Фиджи – Дуга Тонга. Томографический профиль (по Вижваарду Х., Спэкмену В., Энгдалю Е., 1998). Хорошо видна холодная темно-синяя (“быстрая”) пластина океанической плиты, погружающейся сначала до границы верхней и нижней мантии (~670 км), а далее как бы скользящей по ней и пересекающей ее. Красные участки – область горячей (“медленной”) мантии. Черные кружки – гипоцентры землетрясений



Столб или плюм горячей (“медленной”) мантии под Исландией до глубин 400 км (по данным Вольфа К. и др., 1997)

Горячие точки / Hot Spots





Распределение плотности, ускорения силы тяжести и давления в недрах Земли

$$c_P(r) = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad c_S(r) = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$$\frac{K(r)}{\rho(r)} = c_P^2 - \frac{4}{3}c_S^2$$

Задача неразрешима?

$$\rho(r) = ? \quad K(r) = ? \quad \mu(r) = ?$$

Предположение (1): плотность возрастает с глубиной только вследствие сжатия

$$K = \frac{\text{сжимающее напряжение}}{\text{объемная деформация}} = - \frac{\Delta p}{\Delta V / V} = \frac{\Delta p}{\Delta \rho / \rho}$$

$$\frac{K}{\rho} = \frac{\Delta p}{\Delta \rho} \quad \left(\frac{K}{\rho} = c_P^2 - \frac{4}{3} c_S^2 \right)$$

закон гидростатики

$$\Delta p = \rho(r) g(r) \Delta r$$

Предположение (2):

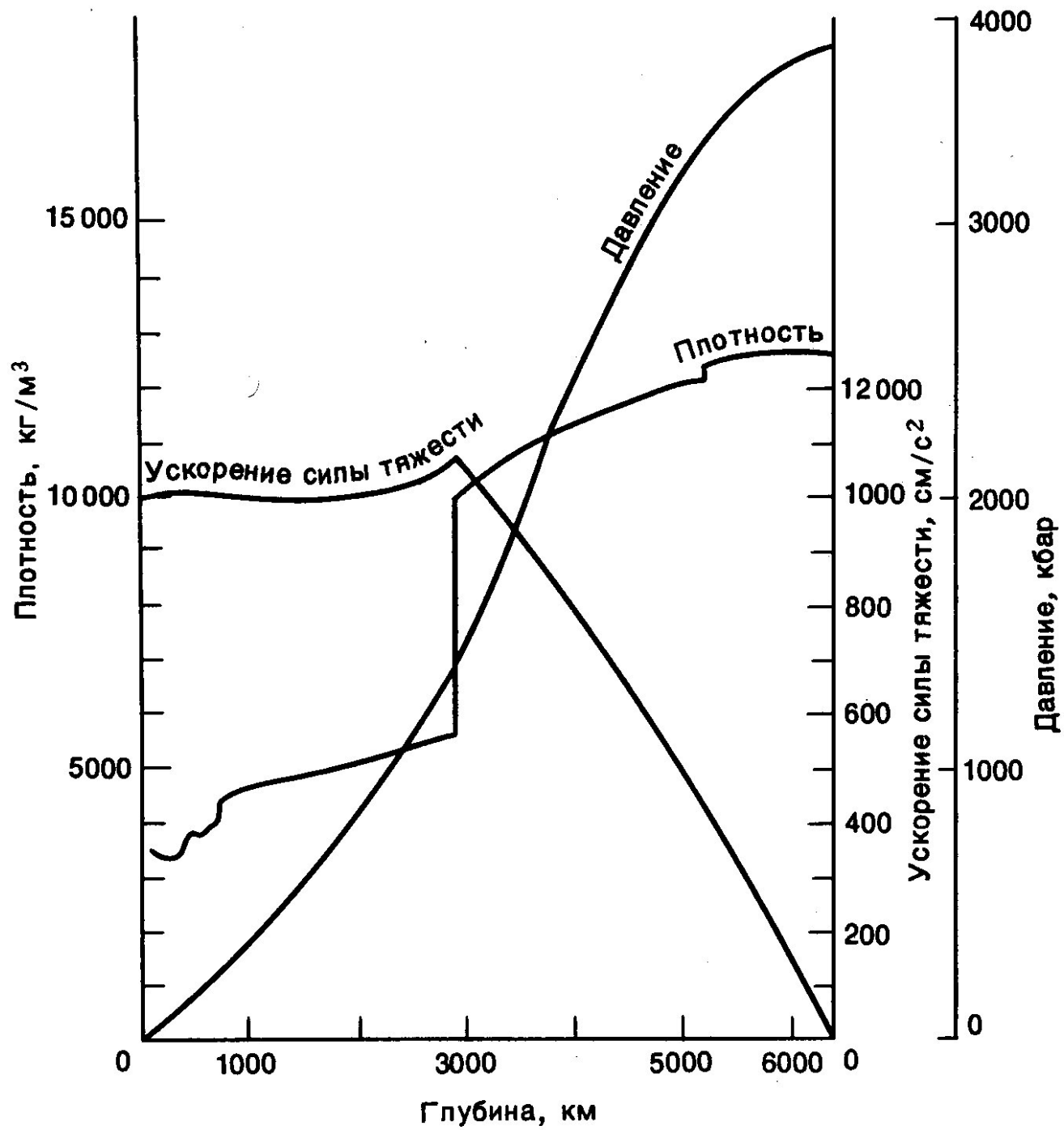
$$K_{\text{изотермич.}} = K_{\text{адиабатич.}}$$

Уравнение Вильямсона-Адамса

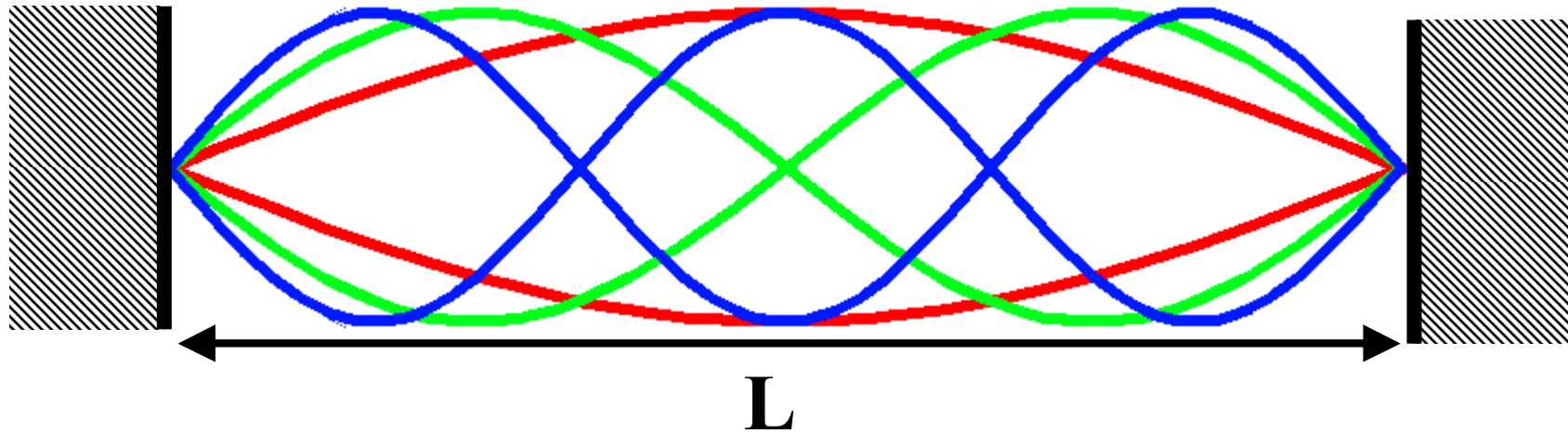
$$\Delta p = \frac{\rho(r) g(r)}{c_P^2 - \frac{4}{3} c_S^2} \Delta r$$

Предположение (3):

неизменность состава и состояния вещества



Собственные колебания Земли



$$\frac{\lambda}{2} = L$$

$$2 \frac{\lambda}{2} = L$$

$$3 \frac{\lambda}{2} = L$$

$$\lambda = cT$$

$$n \frac{\lambda}{2} = L$$

$$n \frac{cT_n}{2} = L$$

$$T_n = \frac{2L}{nc}$$

$$n = 1, 2, 3 \dots$$

спектр колебаний дискретный

Собственные колебания Земли

- ❑ Впервые обнаружены после Камчатского землетрясения 5.11.1952
- ❑ После Чилийского землетрясения 22.05.1960 собственные колебания регистрировались более 10 суток

Съезд Международной ассоциации сейсмологов, Хельсинки, 1960 г

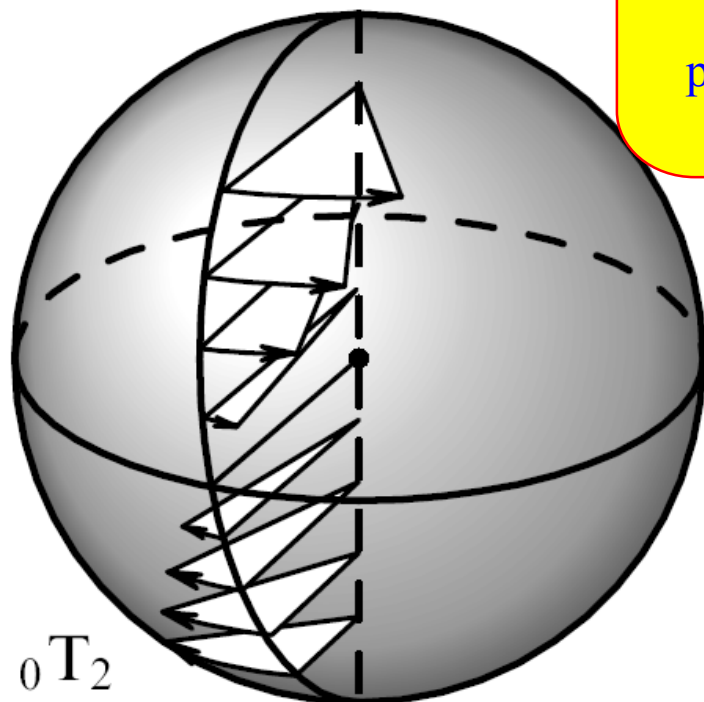
Группа Бенъоффа
(сейсмометристы)

Группа Сливтера
(гравиметристы)

Выявили длиннопериодные колебания (54 - 8 мин.)

Некоторые моды по данным гравиметристов отсутствовали!

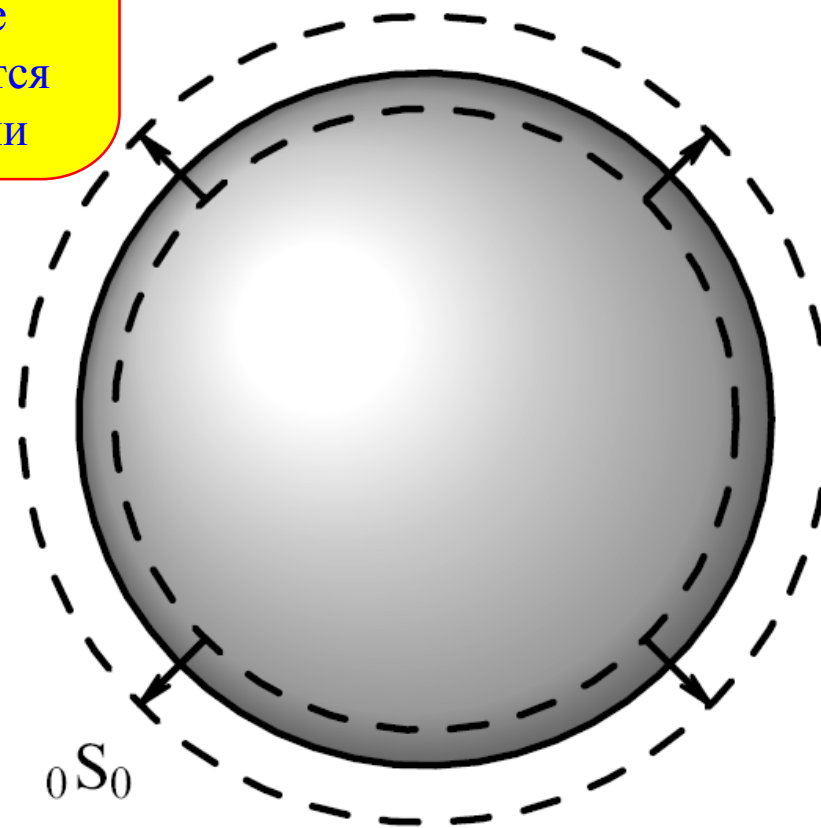
Крутильные (вектор смещения перпендикулярен радиусу сферы)



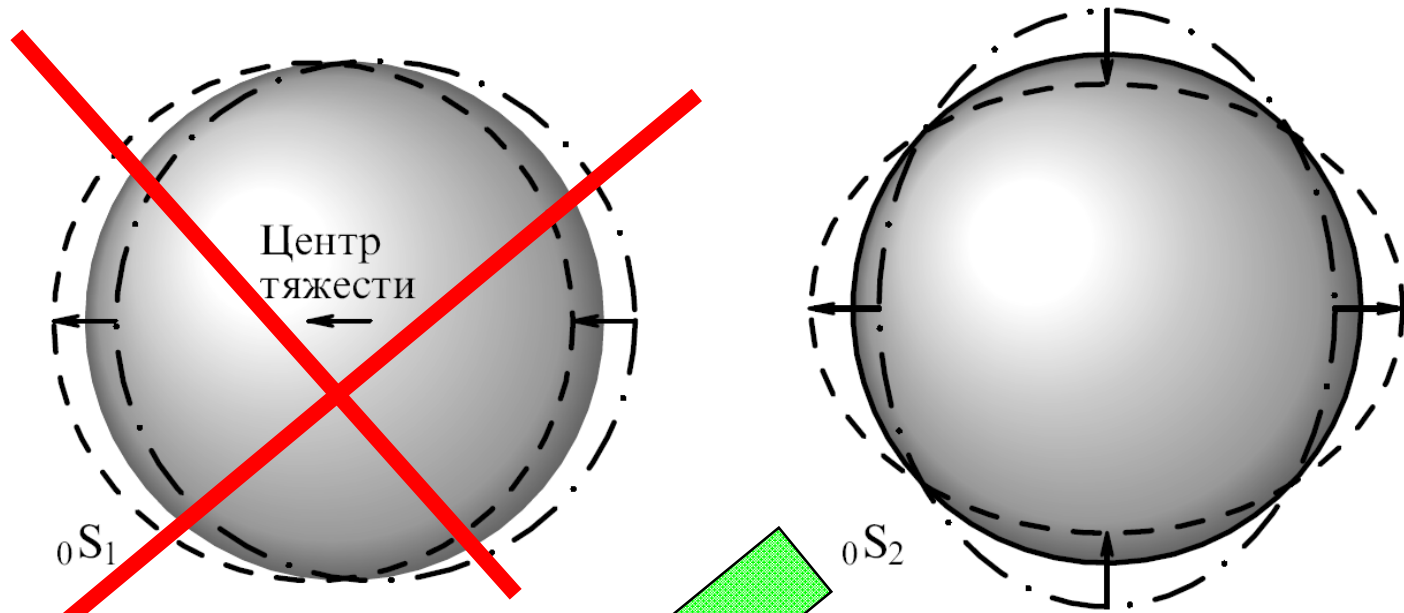
Противоположные полусферы
закручиваются в разные
стороны

Не связаны с
изменением
объема и формы
планеты; не
регистрируются
гравиметрами

Сфероидальные (вектор смещения имеет радиальную и азимутальную компоненты)



Расширение и сжатие



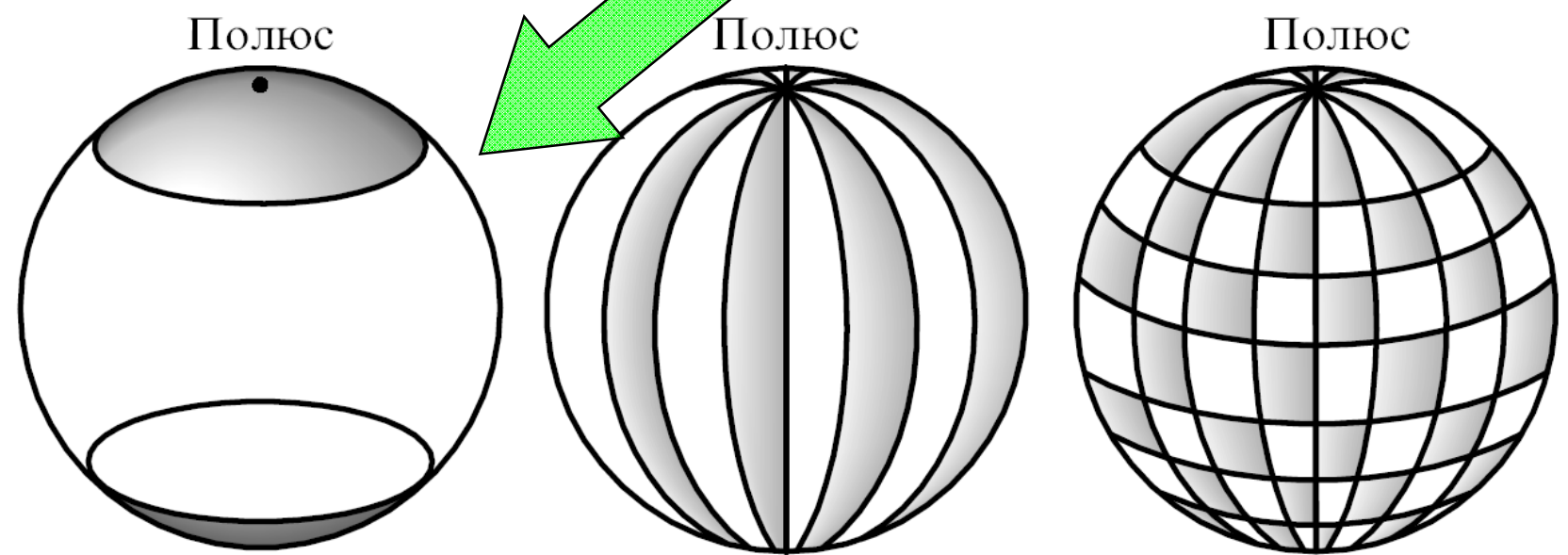
$0S_1$

Центр
тяжести

$0S_2$

Смещение центра тяжести

От вытянутого к
сплюснутому состоянию



Полюс

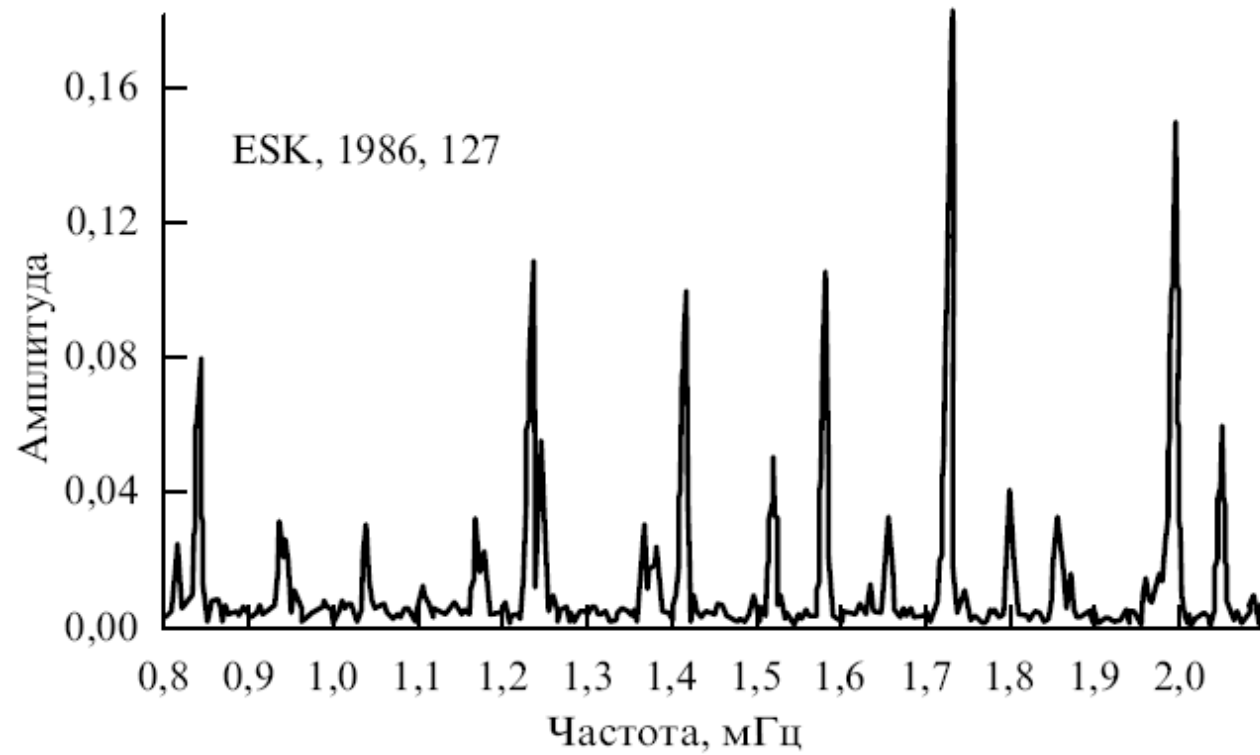
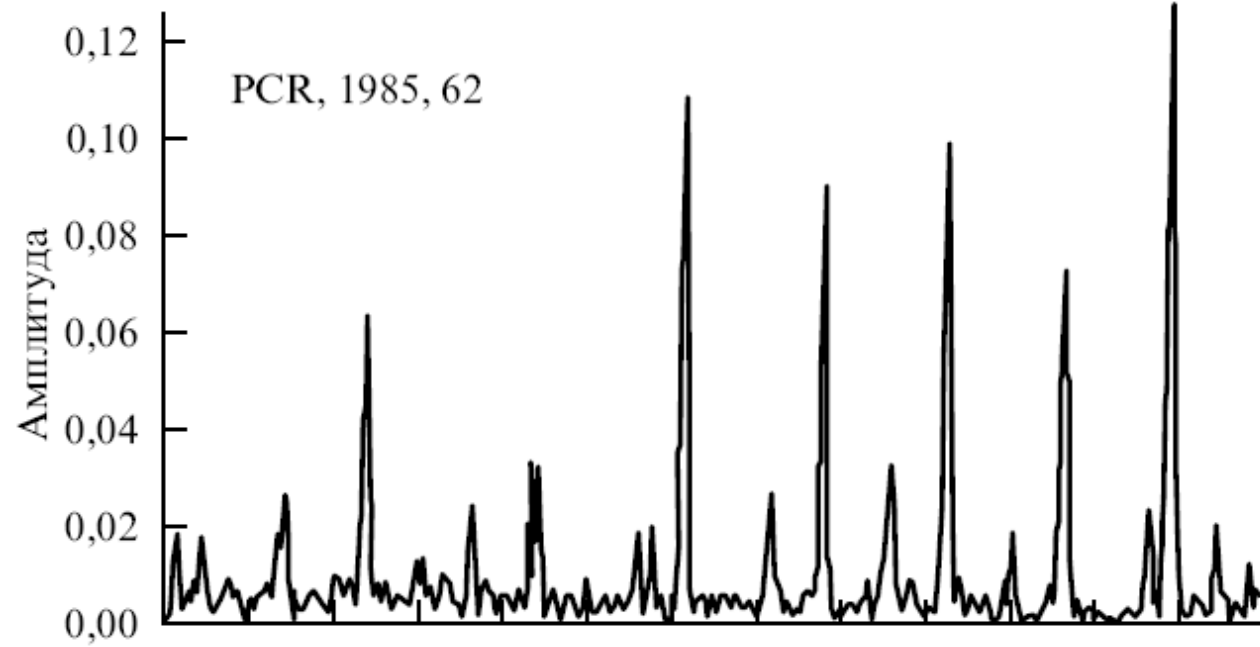
Полюс

Полюс

Зональная сферическая
гармоника

Секторная (телесная)
гармоника

Сложные тессеральные
гармоники





Сфероидальные колебания		Тороидальные (крутильные) колебания	
Тип	Период, мин	Тип	Период, мин
${}_0S_0$	20,46	${}_0T_2$	43,94
${}_0S_2$	53,83	${}_0T_3$	28,37
${}_0S_3$	35,56	${}_0T_4$	21,72
${}_0S_4$	25,76	${}_0T_{10}$	10,31
${}_0S_{10}$	9,67	${}_0T_{20}$	5,993
${}_0S_{20}$	5,792	${}_0T_{40}$	3,333
${}_0S_{40}$	3,538		

