

# Геофизика 2024

## Физика твердой Земли

Смирнов Владимир Борисович  
Заведующий кафедрой физики Земли

[vs60@mail.ru](mailto:vs60@mail.ru)

Лекция № 2

# Физика (твёрдой) Земли

- Сейсмология и строение Земли
  - Основной инструмент исследования строения Земли
  - Физическая (механическая) модель Земли
- Очаг землетрясения и сейсмичность Земли
  - Землетрясение с точки зрения физики
  - Проблема прогноза землетрясений
- Гравитационное поле и фигура Земли
  - Сила тяжести – основная движущая сила
  - Форма Земли
- Геотермия и энергия процессов в Земле
  - Основная энергетика Земли
- Магнитное поле Земли
  - Магнитогидродинамика в ядре Земли
  - «Измеритель» движений литосферы в геологическом масштабе времени

# Специальная литература

<https://cloud.mail.ru/public/Siqd/idTNMdBBR>

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>

- Жарков В. Н. Внутреннее строение Земли и планет. - М.: Наука и образование, 2013. 413 с.
- Захаров В.С., Смирнов В.Б. Физика Земли. М. 2016. 327 с.
- Захаров В.С., Смирнов В.Б. Строение и физика Земли. Вводный курс. Долгопрудный. 2018. 218 с.

Список учеников академика Л.Д.Ландау, сдавших ему теорминимум, составленный им самим

|                    |        |                           |                 |
|--------------------|--------|---------------------------|-----------------|
| 1. Каппанесц       | 33 д   | 22 Балашич                | 54 к            |
| 2. Лифшиц          | 34 д   | 23 Веден                  | 55 к            |
| 3. Ахизер          | 35 (ж) | 24 Микелел                | 55              |
| 4. Пацорану        | 35 жк  | 25 Пителески              | 55 к            |
| 5. Мисса           | 35     | 26 Сандел                 | 55 к            |
| 6. Левин           | 37 жк  | 27 <sup>+</sup> Бехаревич | 55 к            |
| 7. Берестовский    | 39 д   | 28 Шлатик                 | 56 к            |
| 8. Смордицкий      | 40 д   | 29 Болот                  | 57 к            |
| 9. Халатников      | 41 д   | 30 Шаповал                | 58              |
| 10. Хуцшвици       | д      | 31 Фальковский            | 59              |
| 11. Тер-Мартirosян | 47 д   | 32 Арарат                 | 59              |
| 12. Абрикосов      | 47 д   | 33 Козранский             | 59              |
| 13. Цорфе          | 49 д   | 34 Руснов.                | 59              |
| 14. Жарков         | 50 к   | 35 Маринов                | 60              |
| 15. Липидус        | 50 к   | 36 Берков                 | 60              |
| 16. Суздаков       | 51 к   | 37 Мелик-Беркудари        | 60              |
| 17. Калан          | 51 к.  | 38 Моккаско               | 61              |
| 18. Черный         | 52 к.  | 39 Шпатович               | 61              |
| 19. Корсков        | 53 д   | 40 Будко                  | 61              |
| 20. Деминский      | 53 к   | 41 Манско                 | 61              |
| 21. Архипов        | 54 к   | 42 Маткин                 | 61              |
|                    |        | 43 Корнацков              | 61 <sup>Р</sup> |

# Сейсмология

σεισμός — *землетрясение*

λόγος — *учение*

- «Структурная» сейсмология
  - строение Земли, модели Земли
- «Очаговая» сейсмология
  - очаг землетрясения, сейсмическая опасность, прогноз землетрясений

# «Структурная» сейсмология

- Арсенал сейсмологических методов исследования строения Земли
- Строение Земли по сейсмическим данным
- Механические модели Земли

# Сейсмические волны

## Типы сейсмических (упругих) волн

**объемные**

**продольные  
P (primary)**

**поперечные  
S (secondary)**

**недиспергирующие**

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

$\mu$  – модуль сдвига

$K$  – модуль всестороннего сжатия

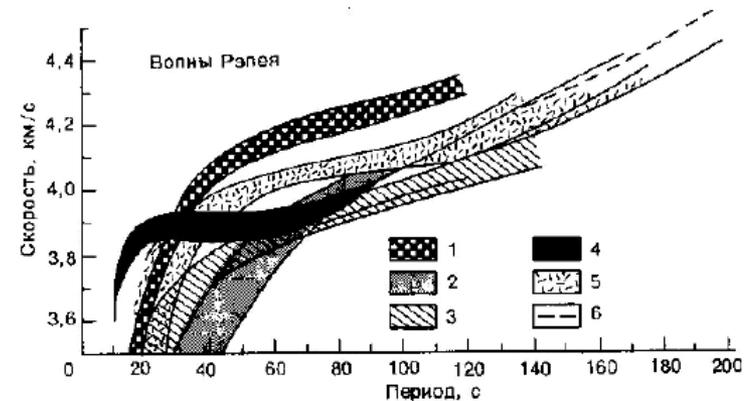
$$c_P > c_S$$

**поверхностные**

**волны  
Рэля**

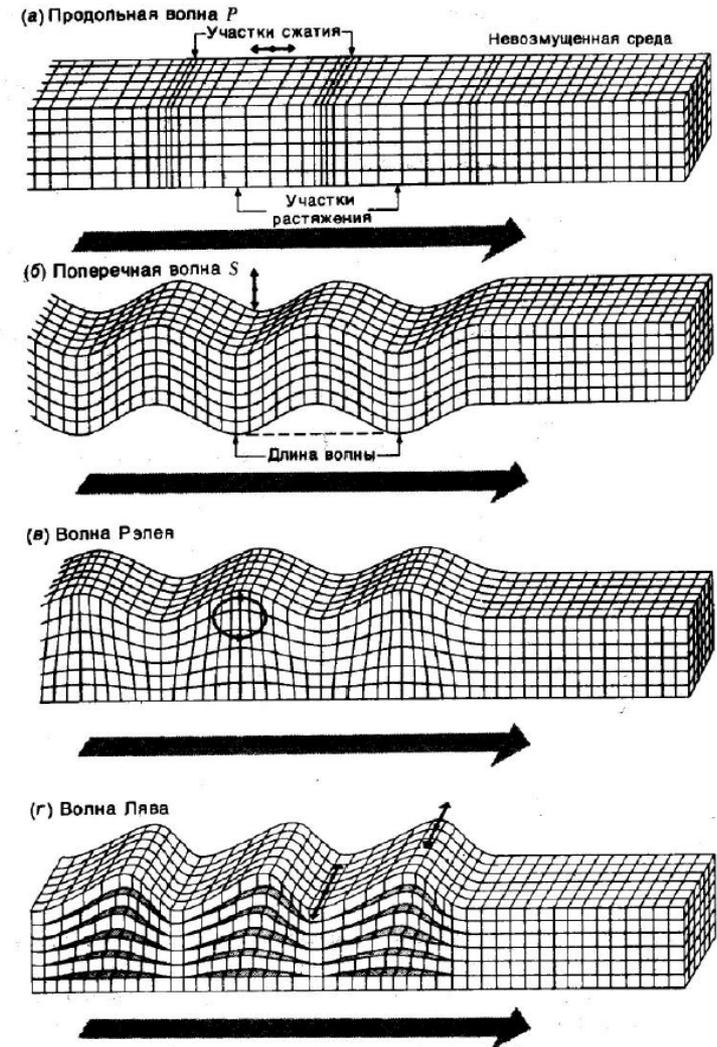
**волны  
Лява**

**диспергирующие**



# Поляризация сейсмических волн

- Волны  $p$  – линейная продольная
- Волны  $s$  – линейная поперечная
- Волны Рэлея  $R$  – эллиптическая в вертикальной плоскости
- Волны Лява  $L$  – линейная поперечная в горизонтальной плоскости



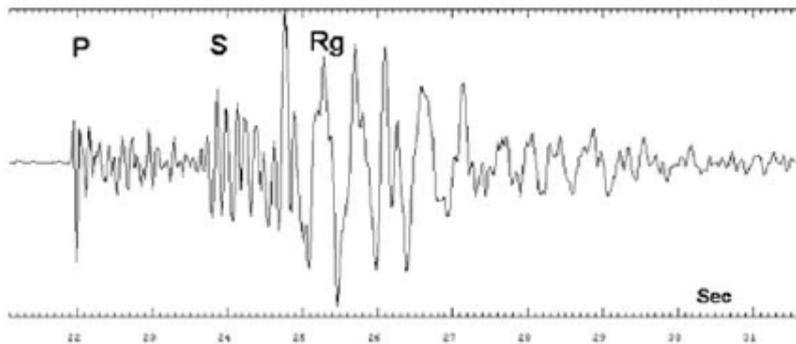
# Prima и Secunda

$$c_p(z) = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} \quad c_s(z) = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$$c_p > c_s$$

Для горных пород:

$$c_p \cong \sqrt{3}c_s = 1.7c_s$$



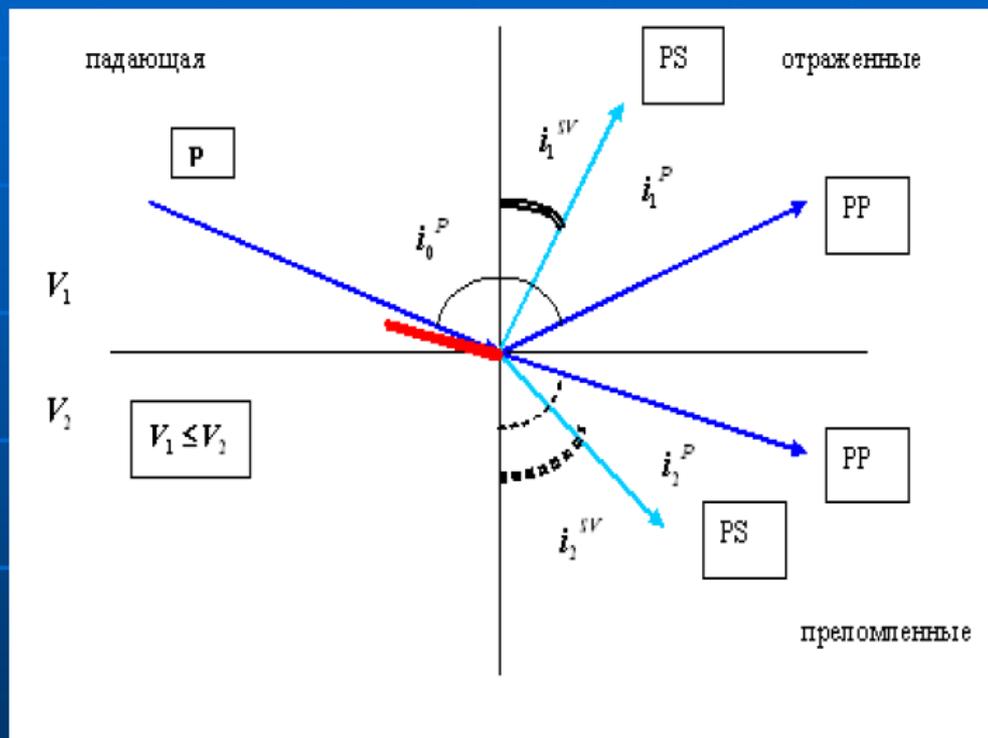
Обозначения: **p** и **s** – Манчестер, 1911



# Скорости сейсмических волн

| Порода   | Глубина<br>(км) | $K$ (ГПа) | $\mu$ (ГПа) | $\rho$ (г/см <sup>3</sup> ) | $V_p$ (км/с) | $V_s$ (км/с) |
|----------|-----------------|-----------|-------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| Вода     | 0               | 2,1       | 0           | 1,02                        | 1,45         | 0            |
| Осадки   | 3               | 2-52      | 0-26        | 2,6                         | 1,45-5,8     | 3,2          |
| Граниты  | 15              | 52-75     | 26-44       | 2,6-2,9                     | 5,8-6,8      | 3,2-3,9      |
| Базальты | 25              | 75-131    | 44-68       | 2,9-3,4                     | 6,8-8,1      | 3,9-4,5      |

# Сейсмические лучи



Закон Снеллиуса:

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

Угол падения равен  
углу отражения

$$i_0^P = i_1^P$$

Критический угол

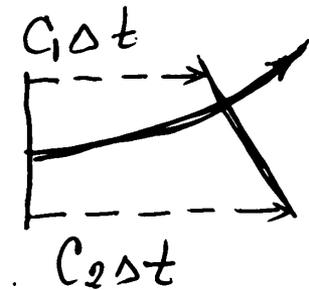
$$i_{\text{крит}} = \arcsin \frac{V_1}{V_2}$$

$$\frac{\sin i_0^P}{V_1} = \frac{\sin i_1^P}{V_1} = \frac{\sin i_2^P}{V_2};$$

# Градиентная среда: $c=c(z)$

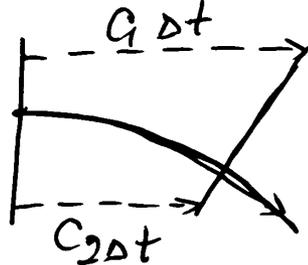
## Искривление лучей

$$\frac{dc}{dz} > 0$$



$$c_2 > c_1$$

$$\frac{dc}{dz} < 0$$

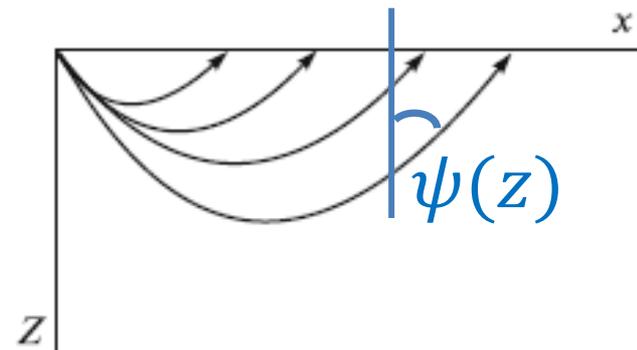


$$c_2 < c_1$$

Кривизна луча:

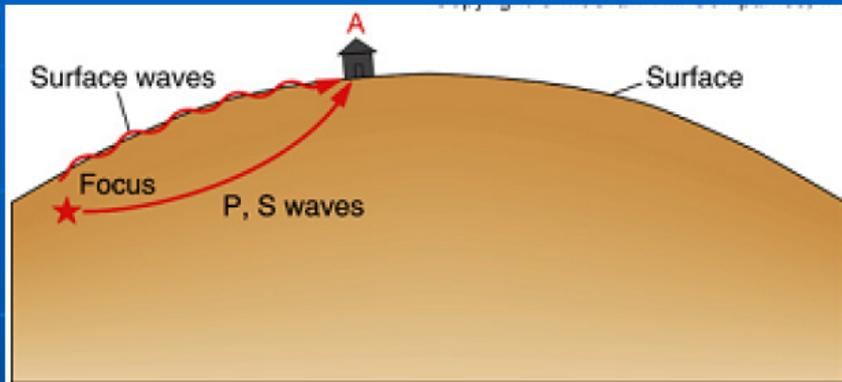
$$k = -p \frac{dc}{dz}$$

## Уравнение луча

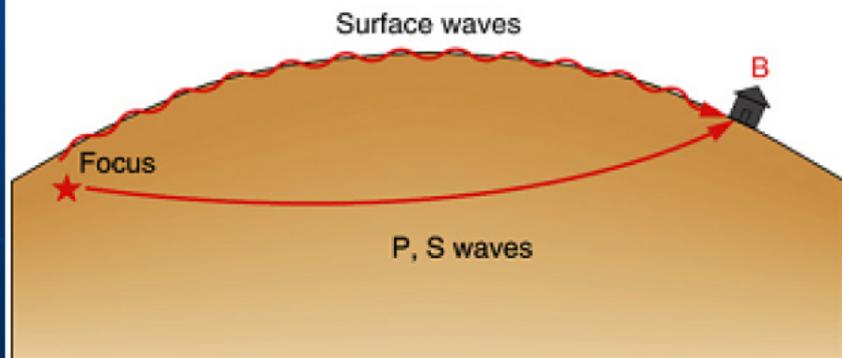


$$\frac{\sin \Psi(z)}{c(z)} = p = \text{const}$$

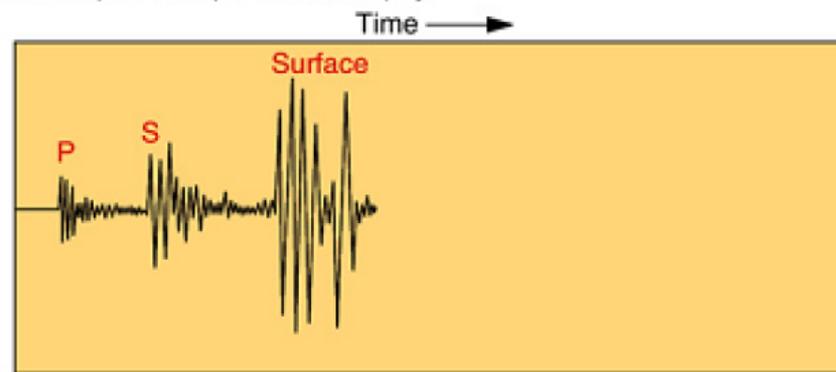
# Время пробега волны и расстояние вдоль поверхности



**A** Station near focus

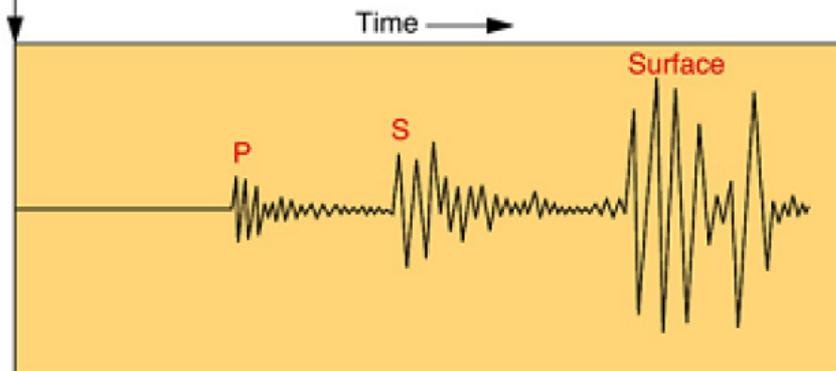


**B** Station far from focus



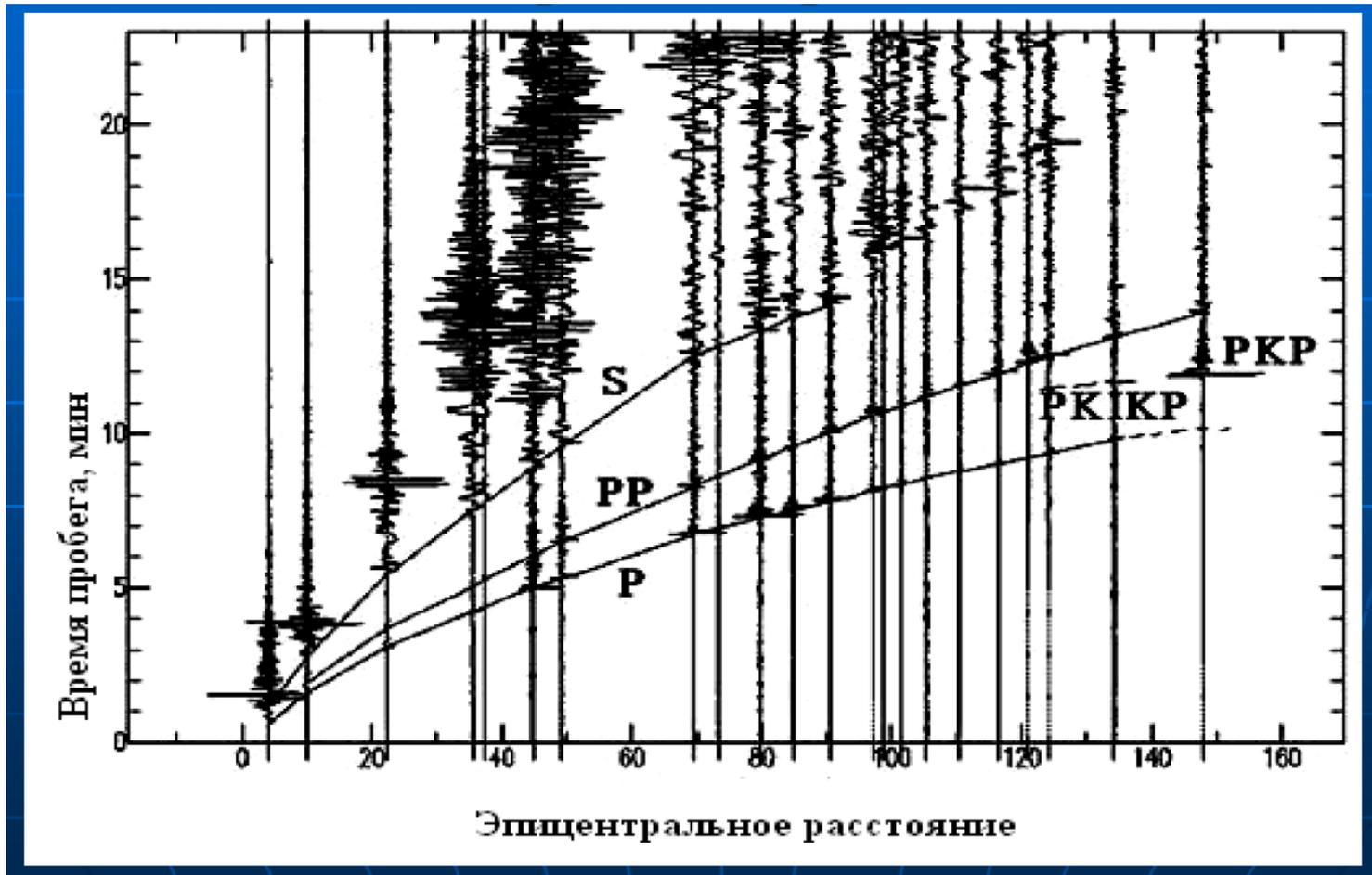
Seismogram from station A

Time of earthquake



Seismogram from station B

# Время пробега сейсмических волн





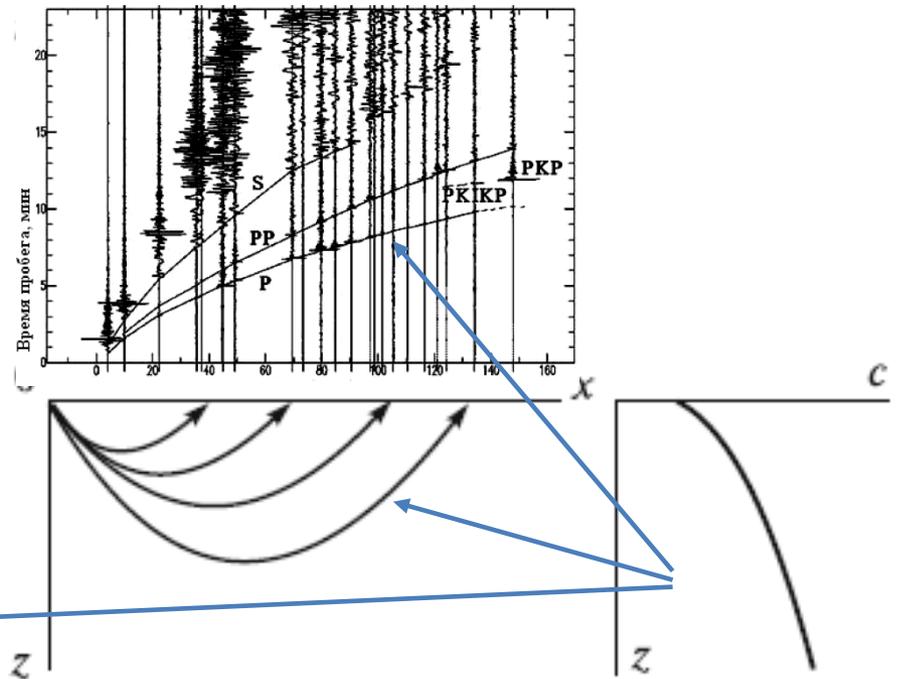
# Сейсмический годограф: теория (прямая кинематическая задача сейсмологии)

- Сейсмический годограф: зависимость времени пробега волны от эпицентрального расстояния

Уравнение годографа

$$\begin{cases} x(p) = 2 \int_0^{z_m} \frac{dz}{\sqrt{\frac{1}{c^2} - p^2}} \\ t(p) = 2p \int_0^{z_m} \frac{dz}{c^2 \sqrt{\frac{1}{c^2} - p^2}} \end{cases}$$

( $z_m$  - глубина проникновения луча)



а) **Годограф** может быть **рассчитан**, если известен сейсмический разрез  $c=c(z)$

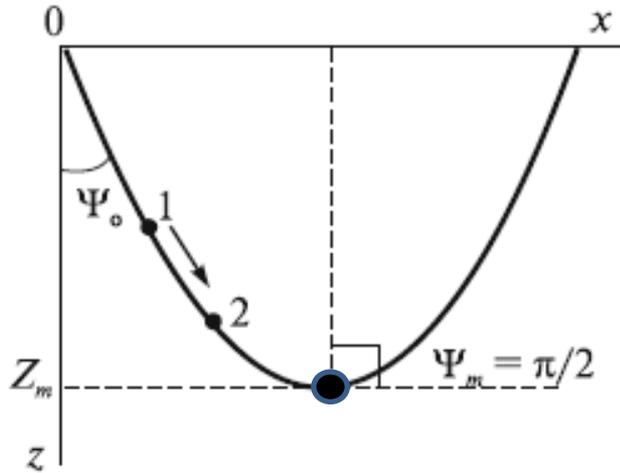
б) **Годограф** может быть **измерен**, если имеется сеть сейсмических станций

# Две замечательные формулы теории сейсмического луча

$$\frac{1}{c(z_m)} = p$$

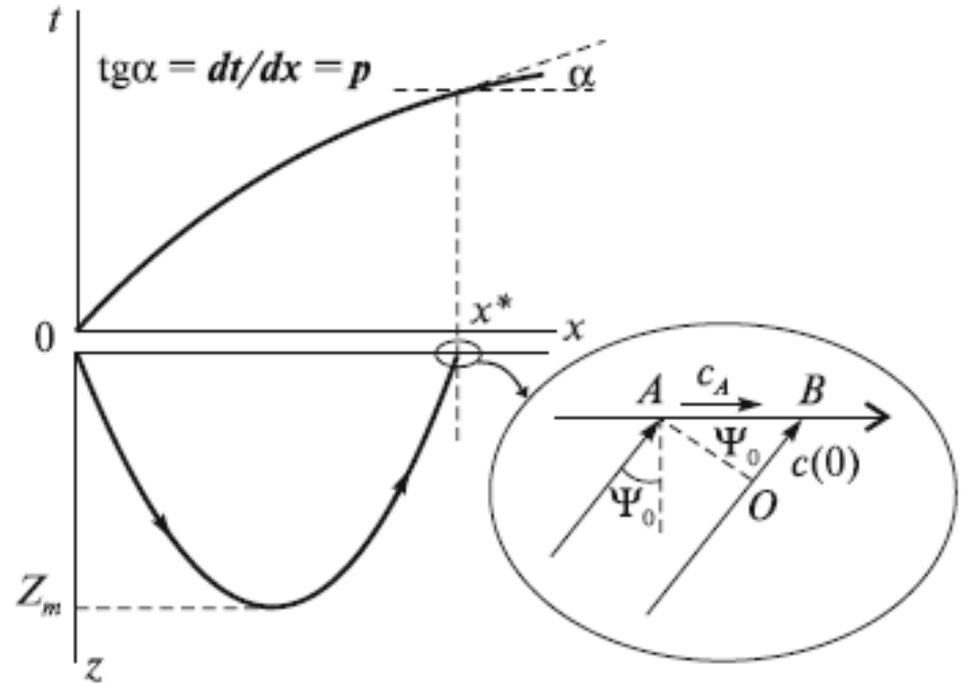
Формула Бендорфа:

$$\frac{dt}{dx} = p$$



$$\frac{\sin \Psi(z_m)}{c(z_m)} = p$$

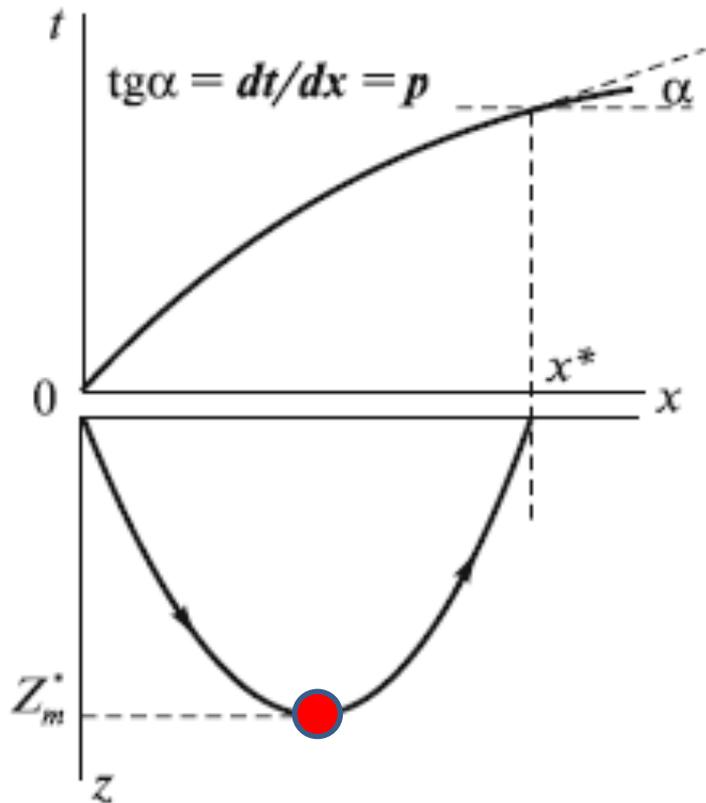
$$\Psi(z_m) = \frac{\pi}{2}$$



$$\frac{C_A \Delta t}{c(0) \Delta t} = \frac{AB}{OB} = \frac{1}{\sin \Psi_0} \Rightarrow \frac{dt}{dx} = \frac{1}{C_A} = \frac{\sin \Psi_0}{c(0)} = p$$

# «Обращение» годографа: формула Герглотца-Вихерта (1907)

Известен (измерен) годограф  $t=t(x)$ . Найти сейсмический разрез  $c=c(z)$ .

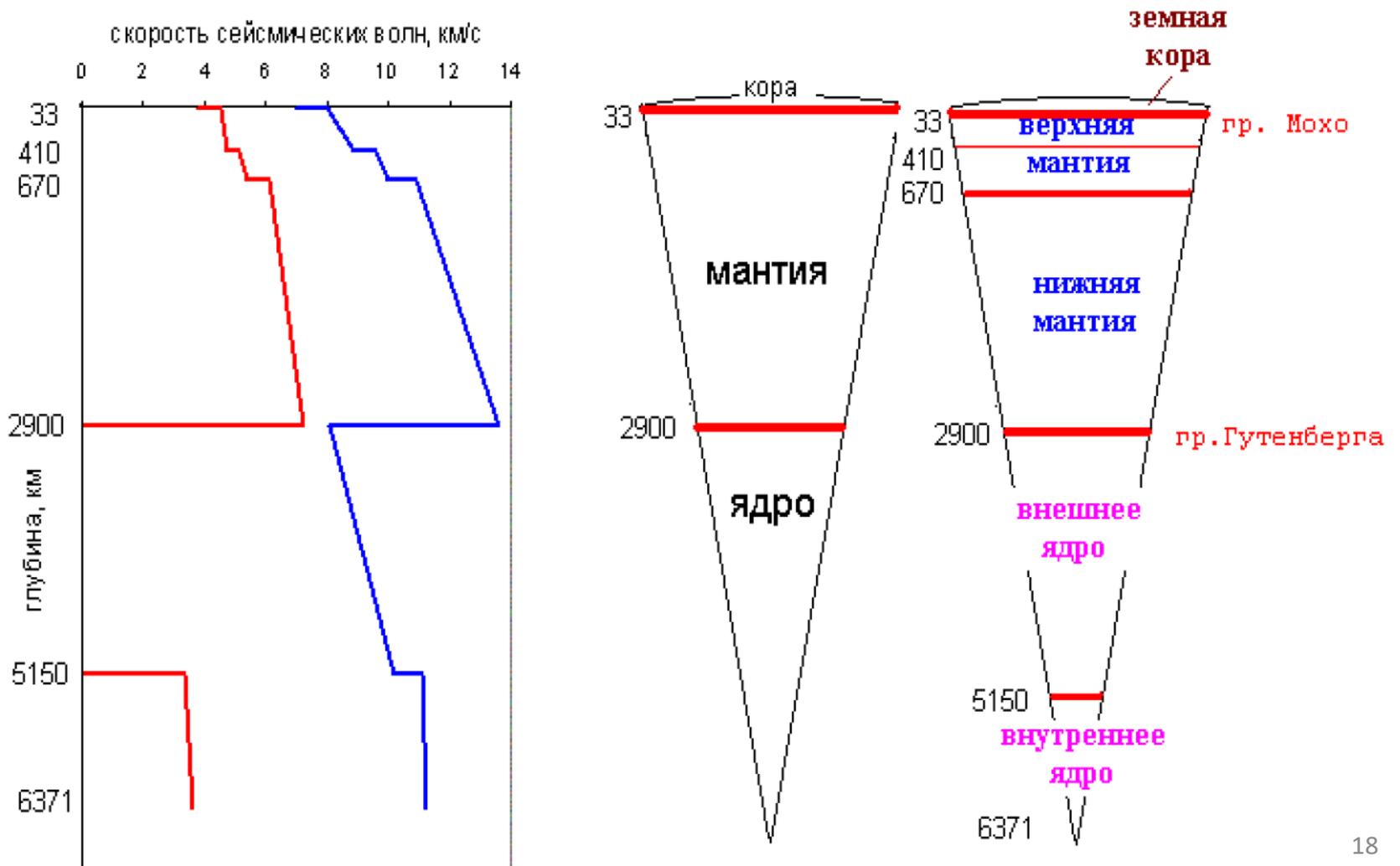


$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=x^*} = p^* = \frac{1}{c(z_m^*)}$$

$$\begin{cases} z_m^* = \frac{1}{\pi} \int_0^{x^*} \text{Arch} \frac{p(x)}{p^*} dx, \\ x^* : \frac{dt}{dx} \Big|_{x=x^*} = p^* \end{cases} .$$

# Схематичная сейсмическая модель Земли

Сейсмическая модель Земли



# Земная кора

## СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

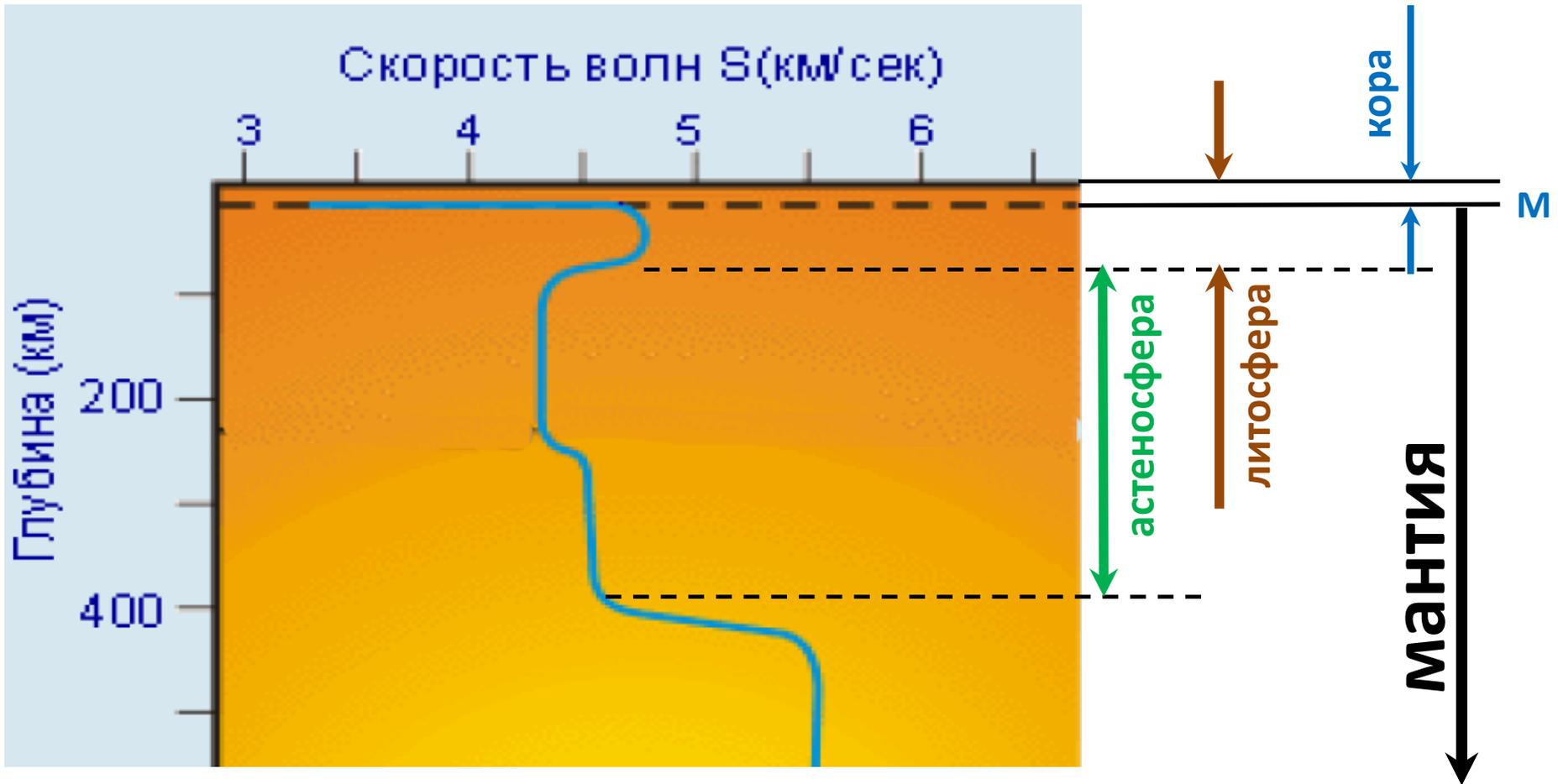


# Континентальная и океаническая кора

| №                             | Слой     | Глубина, км | $V_P$ км/с | $V_S$ км/с | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Давление, Кбар |
|-------------------------------|----------|-------------|------------|------------|------------------------------|----------------|
| <i>Континентальная модель</i> |          |             |            |            |                              |                |
| 1.                            | Граниты  | 20          | 5,8        | 3,45       | 2,72                         | 5,3            |
| 2.                            | Базальты | 35          | 6,5        | 3,75       | 2,92                         | 9,7            |
| <i>Океаническая модель</i>    |          |             |            |            |                              |                |
| 1.                            | Вода     | 4           | 1,5        | 0          | 1,03                         | 0,4            |
| 2.                            | Осадки   | 5           | 2,0        | 1,0        | 1,5                          | 0,6            |
| 3.                            | Базальты | 11          | 6,4        | 3,7        | 2,85                         | 2,2            |

- Континентальная кора толще океанической
- Континентальная кора – 2 основных слоя: базальтовый и гранитный
- Океаническая кора – 1 основной слой: базальтовый

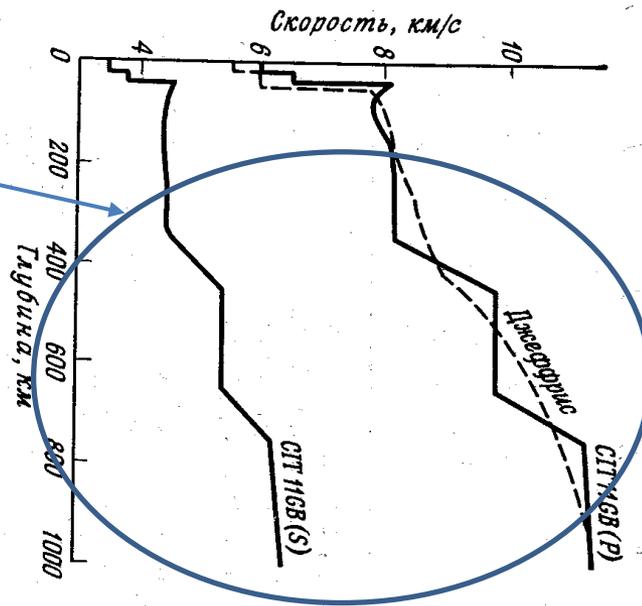
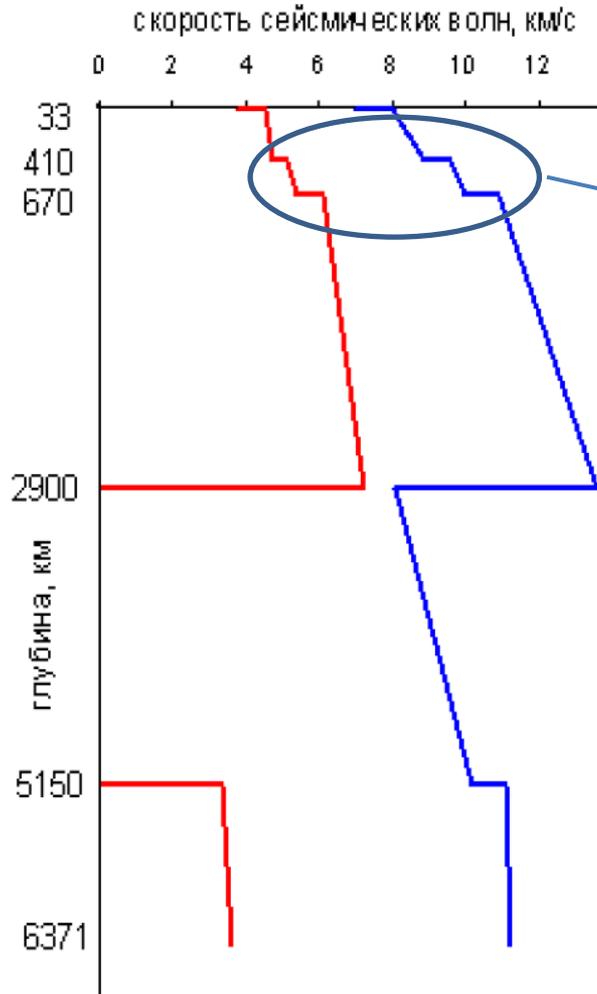
# Литосфера и астеносфера



- **М** – граница Мохоровичича (Мохо) между земной корой и мантией
- Астеносфера – область пониженных скоростей
- Литосфера (литосферные плиты) включает в себя земную кору, границу Мохо и часть мантии

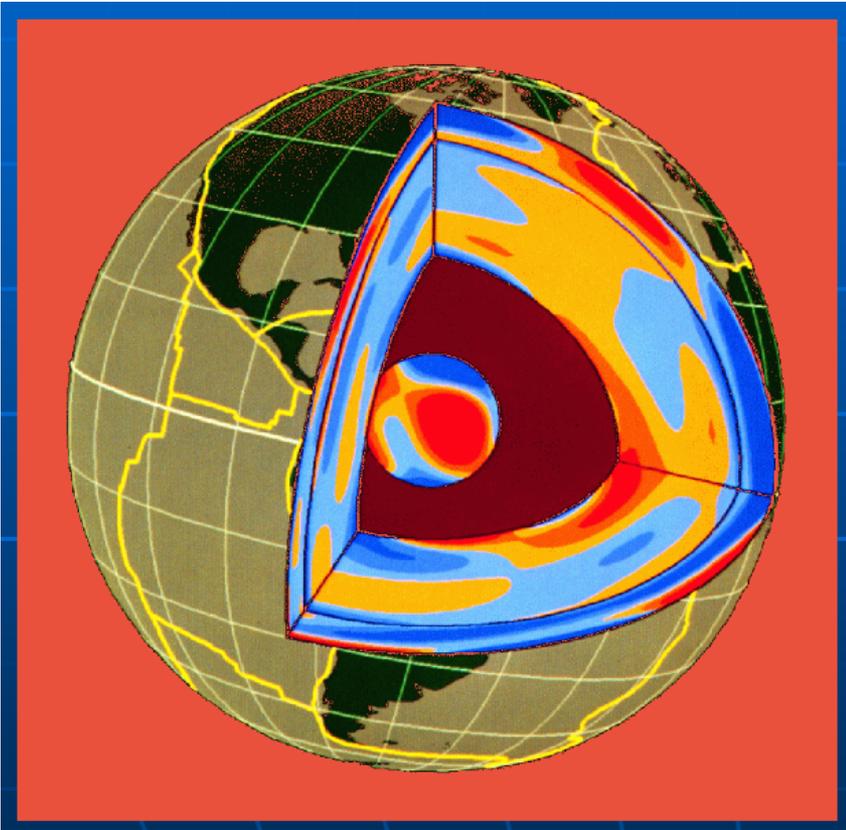
# Области аномального нарастания скоростей волн

Сейсмическая модель Земли



Требуется объяснение!

# Механическая модель Земли: проблема!



- Сейсмическая модель:

$$c_p(z) = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}}$$

$$c_s(z) = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

- Механическая модель:
- $K(z)$ ,  $\mu(z)$ ,  $\rho(z)$  - ???
- Нужно независимое отыскание плотности  $\rho(z)$

# а) Теоретический расчет плотности

## **Идея:**

Плотность Земли определяется  
балансом двух сил:  
силы тяжести и силы упругости

## **Реализация идеи:**

уравнение Адамса-Вильямсона  
(Williamson, Adams, 1923)

- плотность растет только вследствие сжатия весом вышележащих слоев
- Земля однородна по составу
- сжатие адиабатическое

# Уравнение Адамса-Вильямсона

- Гравитационное сжатие:

- $dP = \rho g dz$  (1)

где:

- $g(R) = G \int_V \frac{\rho(r)}{r^2} dV$

- Закон Гука:

- $dP = -K \frac{dV}{V} = K \frac{d\rho}{\rho}$

- Сейсмическая функция:

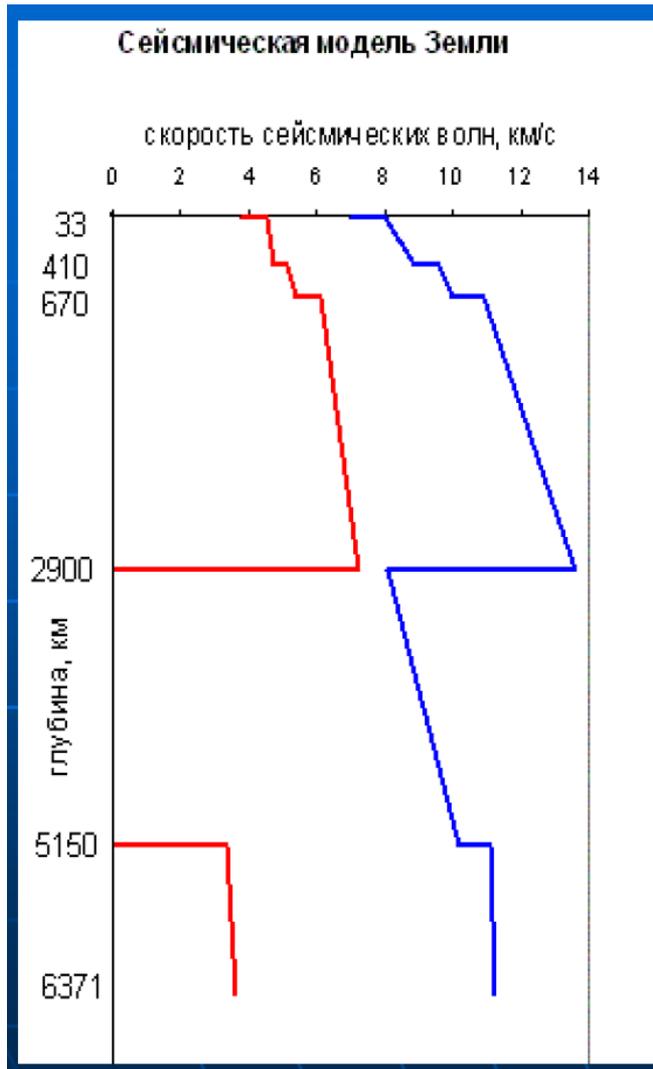
$$\frac{K}{\rho} = c_p^2 - \frac{4}{3} c_s^2 = \Phi(z)$$

- $dP = \Phi d\rho$  (2)

$$(1) = (2):$$

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{g}{\Phi} \rho$$

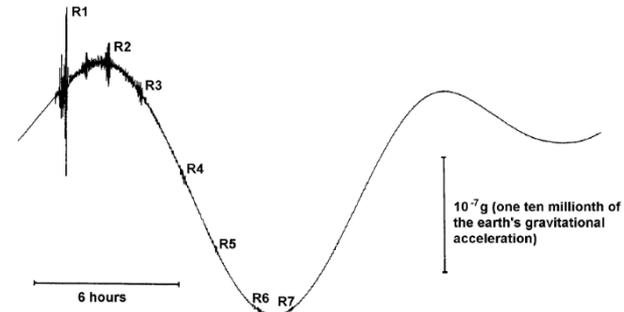
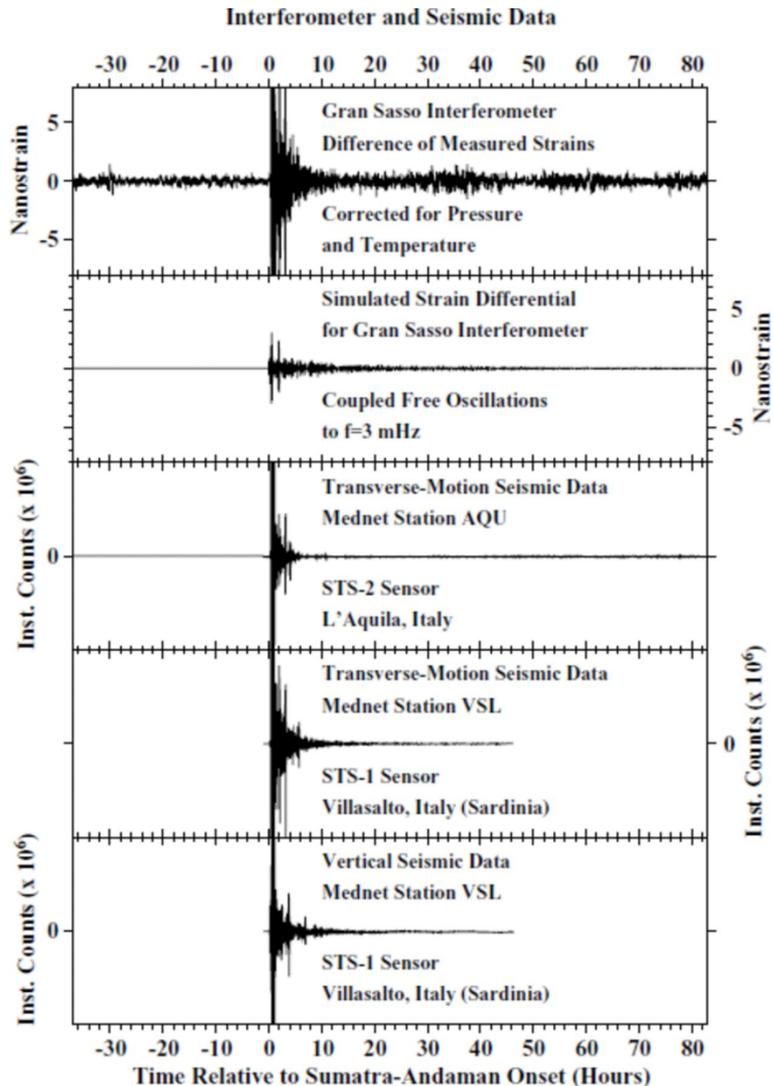
# Уравнение Адамса-Вильямсона: проблема



- Скачки сейсмических скоростей **не обусловлены** гравитационным сжатием
- Уравнение Адамса-Вильямсона нарушается на границе ядро-мантия и в верхней мантии

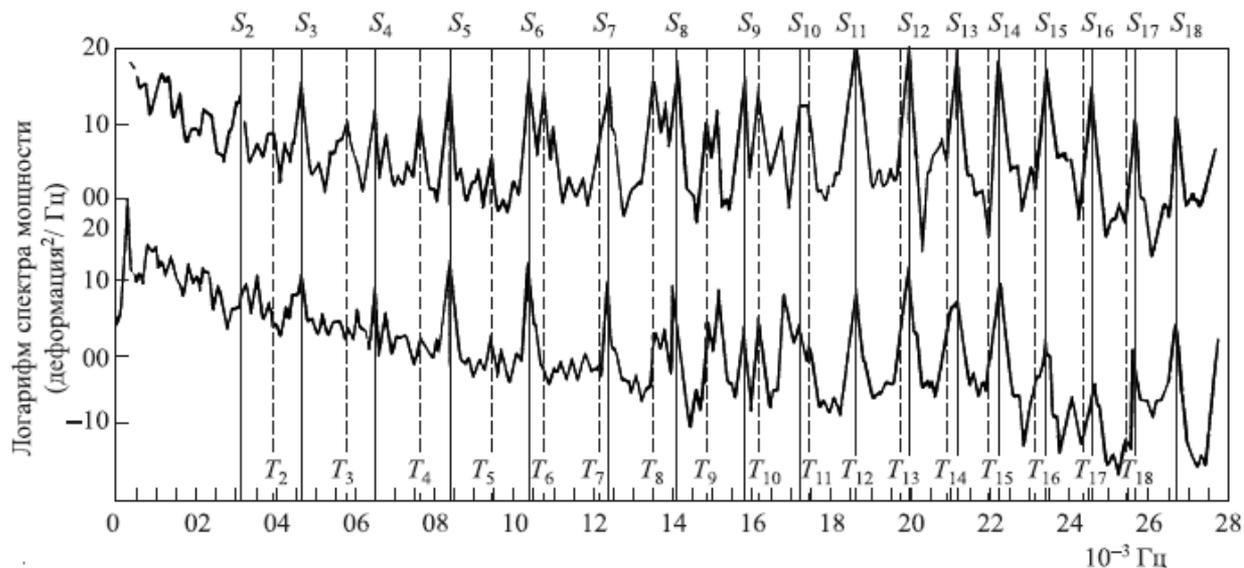
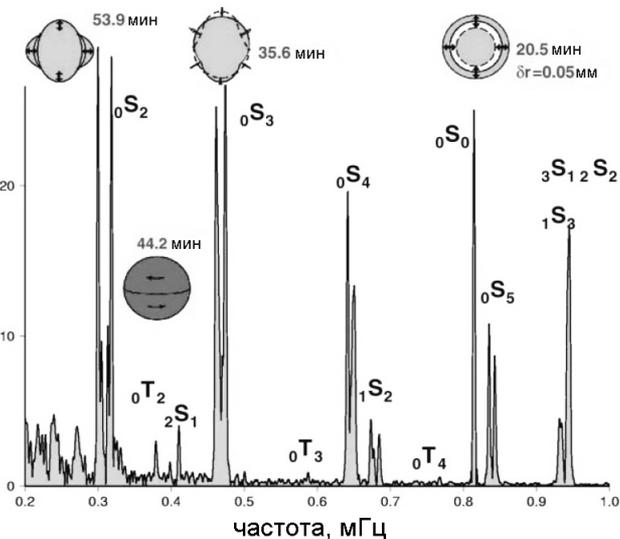
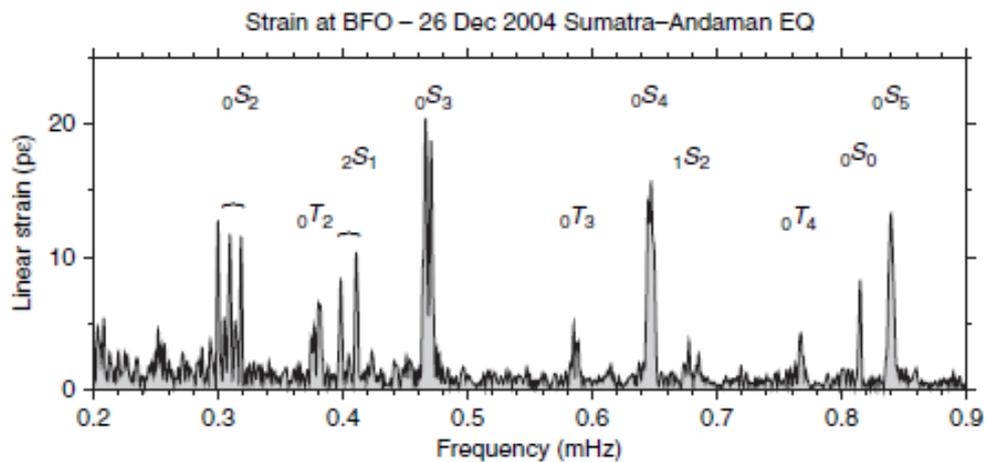
# б) Эмпирическое определение плотности

## СКЗ после Суматранского землетрясения 2004 г. M=9.3



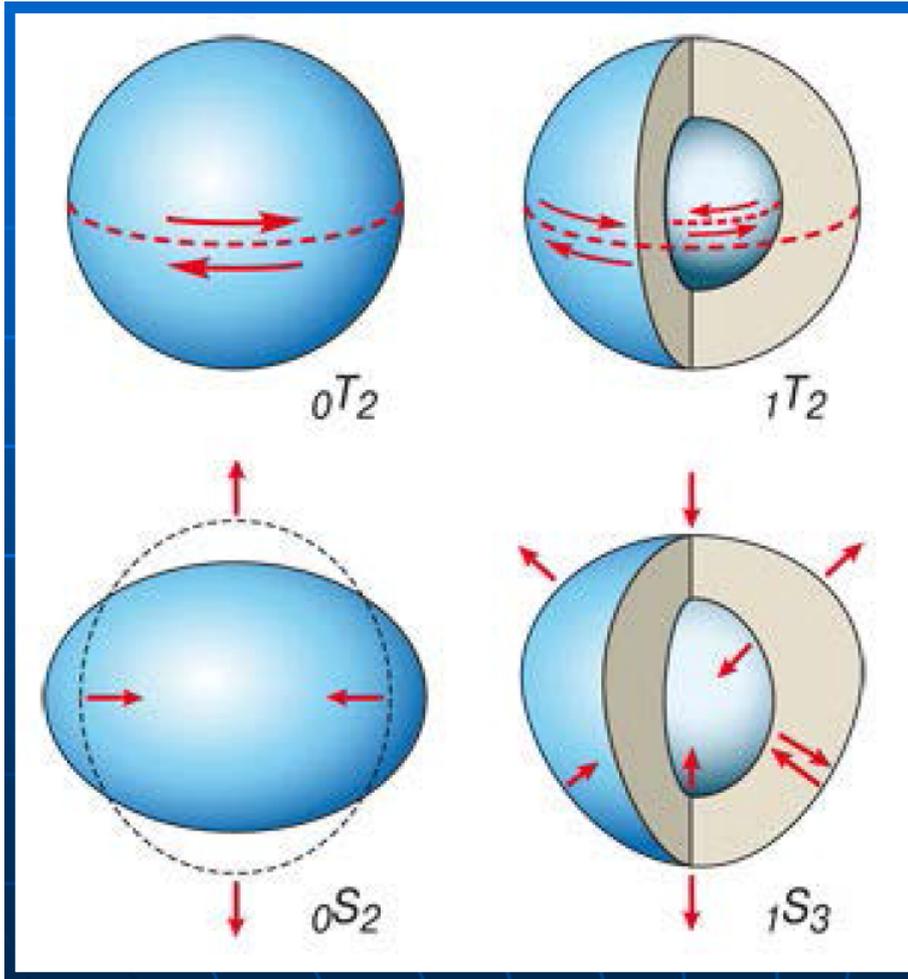
- Собственные колебания Земли (СКЗ): свободные колебания после сильных землетрясений
- Периоды СКЗ определяются распределениями по глубине  $K(z)$ ,  $\mu(z)$ ,  $\rho(z)$
- Первая (неуверенная) регистрация деформографом – после Камчатского землетрясения 1952 г.
- Надежная регистрация деформографом и гравиметром – после Чилийского землетрясения 1960 г.

# Спектр СКЗ



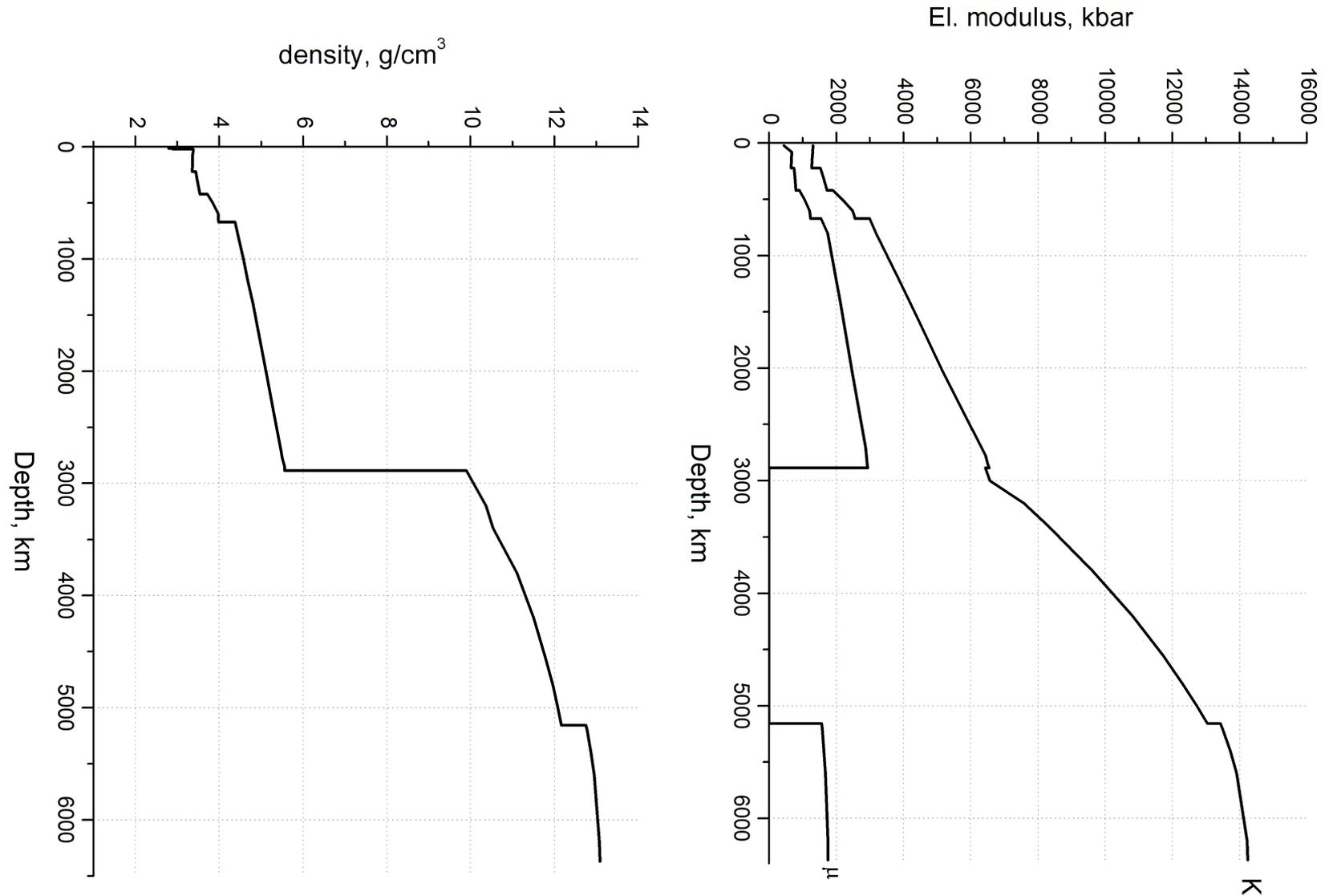
**Диапазон периодов  
5 – 55 минут**

# Формы СКЗ



- Крутильные (торсионные)
  - Нет радиальной составляющей смещения
  - Плотность не меняется
- Сфероидальные
  - Есть радиальное смещение, изменяется и форма и объем
  - возбуждаются колебания гравитационного поля

# Современная модель Земли PREM



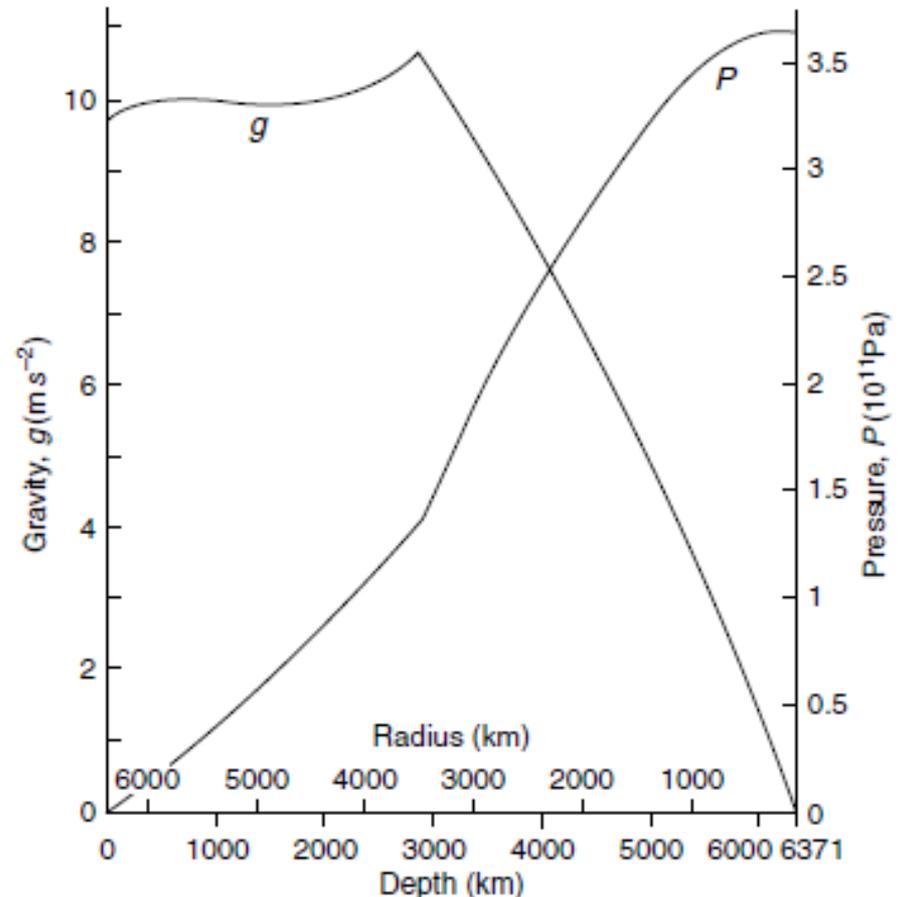
# Ускорение силы тяжести и давление

- Ускорение силы тяжести

$$g(R) = G \int_V \frac{\rho(r)}{r^2} dV$$

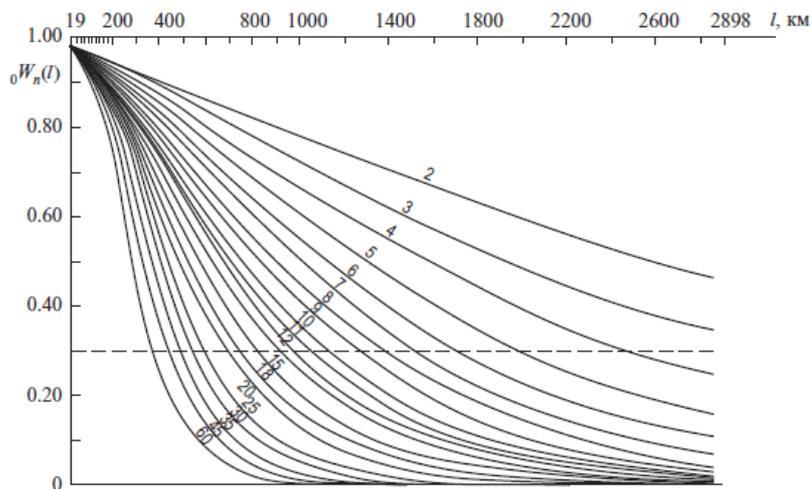
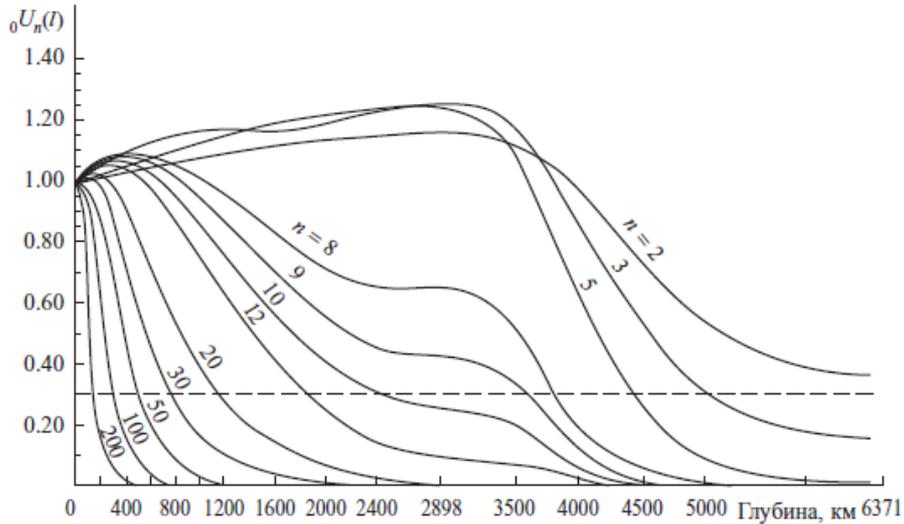
- Давление

$$P(z) = \int_0^z \rho(h)g(h)dh$$



# Затухание сейсмических колебаний

Зависимость амплитуды сферидальных  $U$  и крутильных  $W$  колебаний от глубины для разных периодов  
(больше  $n$  – меньше период)



- Затухание колебаний во времени

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right)$$

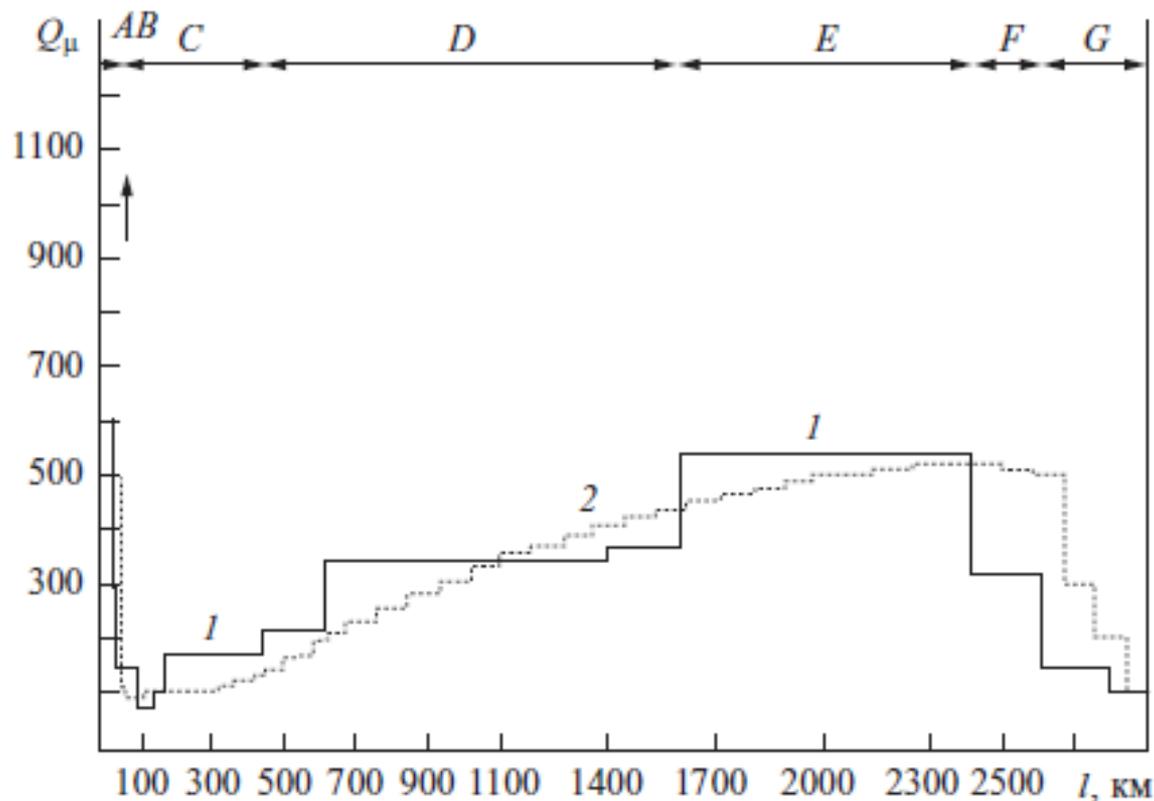
- Добротность

$$Q_n = \pi \frac{\tau_n}{T_n}$$

Определяя время затухания различных гармоник  $\tau_n$ , получают зависимость добротности  $Q_n$  от глубины

# Распределение добротности по глубине

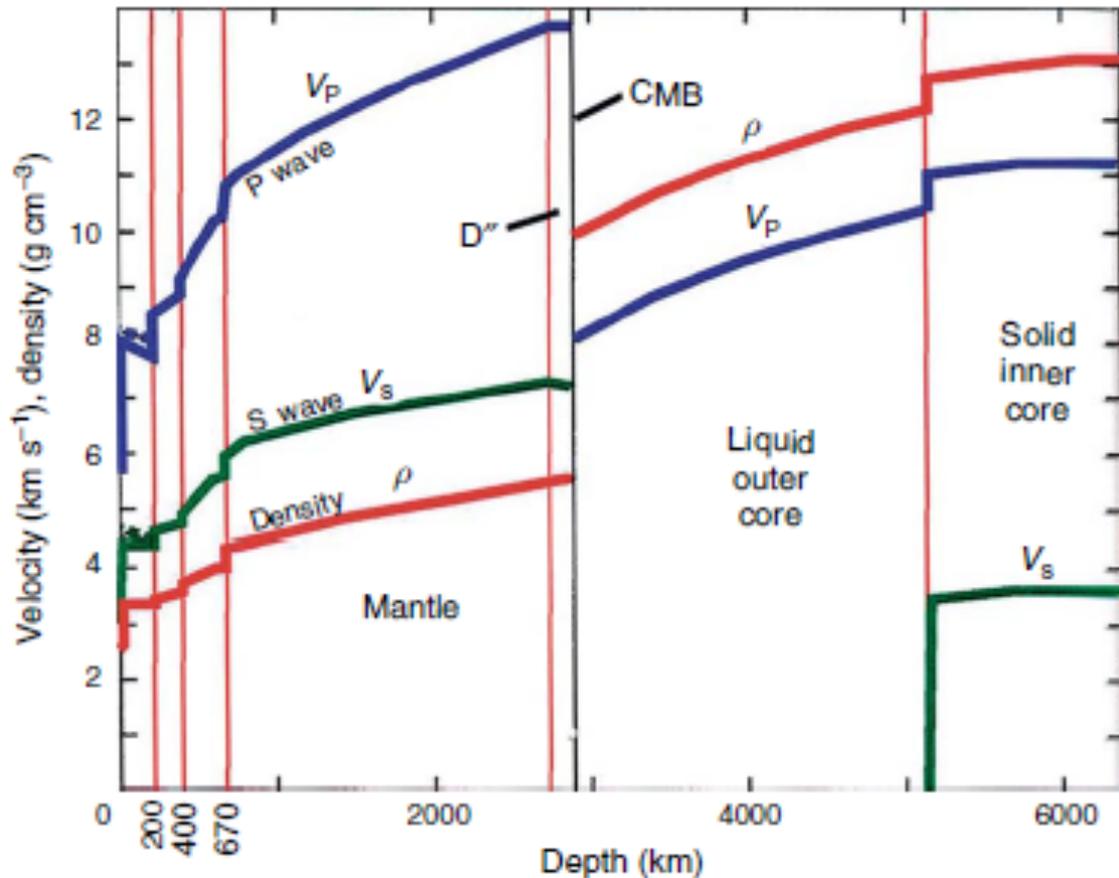
(Жарков, 2013)



**Рис. 21.** Распределение механической добротности  $Q_\mu(l)$  в коре и мантии Земли

A (0–38 км) — 1-я зона высоких  $Q_\mu$  (упругая литосфера); B (38–90 км) — неупругая литосфера; C (90–450 км) — 1-я зона низких  $Q_\mu$ ; D (450–1600 км) — 1-я зона промежуточных  $Q_\mu$ ; E (1600–2400 км) — 2-я зона высоких  $Q_\mu$ , F (2400–2600) — 2-я зона промежуточных  $Q_\mu$ ; G (2600–2885 км) — 2-я зона низких  $Q_\mu$ . 1 — модифицированное распределение полученное В.М. Дорофеевым и В.Н. Жарковым (1978 г.); 2 — модель SL8 (Андерсон, Харт, 1978 г.)

# Современные модели Земли



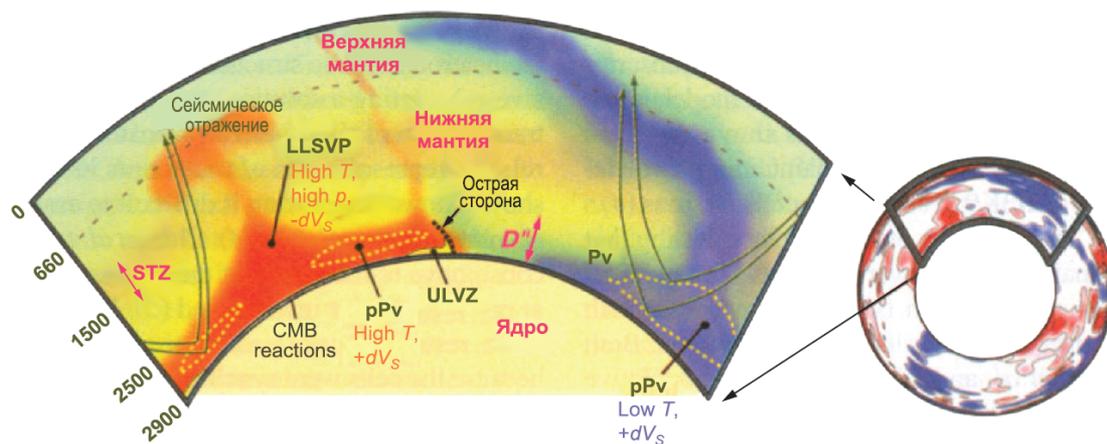
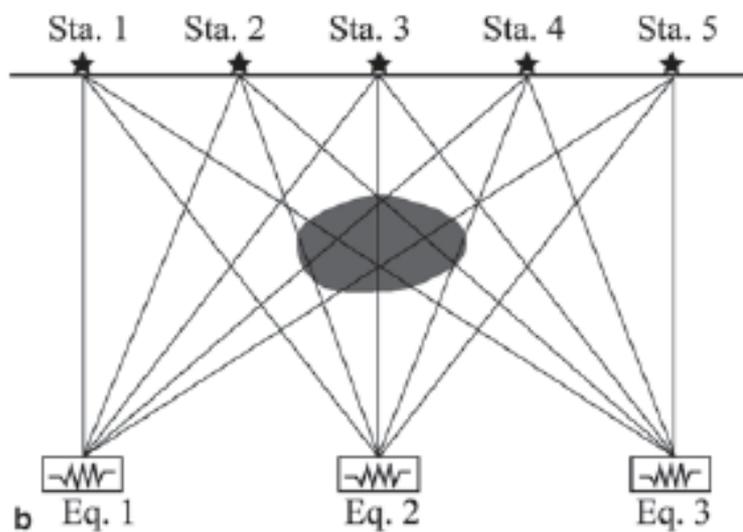
Модель PREM

- PEM - 1975
- PREM - 1981
- IASP91 - 1991
- Ak135 - 1995
- STW105 - 2008

|    | Радиус, | Глубина, | Плотность, | VP, км/с | VS, км/с | Q <sub>μ</sub> |
|----|---------|----------|------------|----------|----------|----------------|
| 1  | 0       | 6371.0   | 13.08      | 11.26    | 3.66     | 85             |
| 2  | 1221.5  | 5149.5   | 12.76      | 11.02    | 3.5      | 85             |
| 3  | 1221.5  | 5149.5   | 12.16      | 10.35    | 0        | 0              |
| 4  | 3480.0  | 2891.0   | 9.90       | 8.06     | 0        | 0              |
| 5  | 3480.0  | 2891.0   | 5.56       | 13.71    | 7.26     | 312            |
| 6  | 3630.0  | 2741.0   | 5.49       | 13.68    | 7.26     | 312            |
| 7  | 5600.0  | 771.0    | 4.44       | 11.06    | 6.24     | 312            |
| 8  | 5701.0  | 670.0    | 4.38       | 10.75    | 5.94     | 312            |
| 9  | 5701.0  | 670.0    | 3.99       | 10.26    | 5.57     | 143            |
| 10 | 5771.0  | 600.0    | 3.97       | 10.15    | 5.51     | 143            |
| 11 | 5971.0  | 400.0    | 3.72       | 9.13     | 4.93     | 143            |
| 12 | 5971.0  | 400.0    | 3.54       | 8.90     | 4.76     | 143            |
| 13 | 6151.0  | 220.0    | 3.43       | 8.55     | 4.64     | 143            |

# Сейсмическая томография

## Сейсмическая томография (схема)



**Рис. 65.** Изображение, полученное методом сейсмической томографии [Ritsema et al., 2004] зон больших и малых вариаций скоростей поперечных волн в мантии Земли (си-

# «Структурная» сейсмология:

## Резюме

- 1. Сейсмические волны (упругие колебания) проникают во все оболочки твердой Земли
- 2. Скорости волн  $p$  и  $s$  несут информацию об упругих модулях и плотности среды
- 3. Прямая кинематическая задача сейсмологии имеет единственное и устойчивое решение – если задать сейсмический разрез, то:
  - можно рассчитать ход сейсмических лучей для всех волн
  - можно рассчитать сейсмические годографы для всех волн
- 4. Годограф – измеряемая зависимость времени пробега волны от эпицентрального расстояния. Знание годографа позволяет получить распределение величин скоростей сейсмических волн по глубине
- 5. Современные плотные сейсмические сети позволяют получить не только зависимость скоростей от глубины, но и оценить изменения скоростей в латеральном направлении, т.е. получить трехмерное распределение скоростей сейсмических волн (сейсмическая томография)

# Механические модели Земли:

## Резюме

- Только сейсмический разрез (зависимость скоростей сейсмических волн от глубины) не позволяет получить распределение по глубине модулей упругости и плотности
- Распределение плотности может быть рассчитано теоретически по данным о сейсмических скоростях и в предположении роста плотности только за счет сжатия вышележащими слоями (это предположение не выполняется в областях аномального роста плотности на границах оболочек твердой Земли и в верхней мантии)
- Механическая модель Земли – распределение упругих модулей, плотности, добротности – может быть построена эмпирически по периодам собственных колебаний Земли
- Зная распределение плотности по глубине, можно рассчитать распределение силы тяжести и давления