

# Геофизика 2026

## Физика твердой Земли

Смирнов Владимир Борисович  
Заведующий кафедрой физики Земли

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

Лекция № 2

# Специальная литература

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

<https://earthphysics.ru/students>

<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 Балаши	54 к
2. Миршиц	34 д	23 Веден	55 к
3. Ахизер	35 (ж)	24 Микел	55
4. Пацрануик	35 жк	25 Пителески	55 к
5. Мисса	35	26 Саидел	55 к
6. Левир	37 жк	27 <sup>+</sup> Бехаревир	55 к
7. Берестовский	39 д	28 Шлатик	56 к
8. Сморodinский	40 д	29 Болгол	57 к
9. Халатников	41 д	30 Шаповал	58
10. Хуцшвиши	д	31 Фальковский	59
11. Тер-Маршроси	47 д	32 Ардрел	59
12. Абрикосов	47 д	33 Копраемло	59
13. Цорфе	49 д	34 Руснов.	59
14. Жарков	50 к	35 Маринов	60
15. Липидус	50 к	36 Берков	60
16. Суцаков	51 к	37 Мелик-Беркудур	60
17. Калан	51 к.	38 Моккакико	61
18. Керимтик	52 к.	39 Шпатовир	61
19. Корсков	53 д	40 Будько	61
20. Дзюлишинский	53 к	41 Манско	61
21. Архипов	54 к	42 Макки	61
		43 Корнарасел	61 <sup>2</sup>

# Геофизика 2026

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

## Физика твердой Земли



**КАФЕДРА ФИЗИКИ ЗЕМЛИ**  
Физический факультет  
МГУ им. М. В. Ломоносова

[О КАФЕДРЕ](#) [НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ](#) [УЧЕБА](#) [КОНТАКТЫ](#)

<https://earthphysics.ru/students>

### Информация для студентов

#### ОБЩИЕ КУРСЫ

##### ГЕОФИЗИКА

Курс Отделения геофизики для студентов 2-го курса физического факультета.

Раздел "Физика твердой Земли".

##### Содержание:

- Сейсмология и строение Земли
- Очаг землетрясения и сейсмичность Земли
- Гравитационное поле и фигура Земли
- Геотермия и энергия процессов в Земле
- Магнитное поле Земли

##### Материалы лекций

- [1-я лекция](#)
- [2-я лекция](#)
- [3-я лекция](#)
- [4-я лекция](#)

##### Рекомендуемая литература:

1. Захаров В.С., Смирнов В.Б. Строение и физика Земли. Вводный курс: учебное пособие – Долгопрудный. Издательский дом «Интеллект», 2018. – 224 с.
2. Захаров В.С., Смирнов В.Б. Физика Земли: учебник. М.: ИНФРА-М, 2016. – 328 с. / Учебник для естественнонаучных факультетов
3. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука и образование, 2013. – 413 с. / Учебник для углубленного изучения предмета



Смирнов Владимир Борисович  
заведующий кафедрой  
физики Земли

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

# 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

# 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

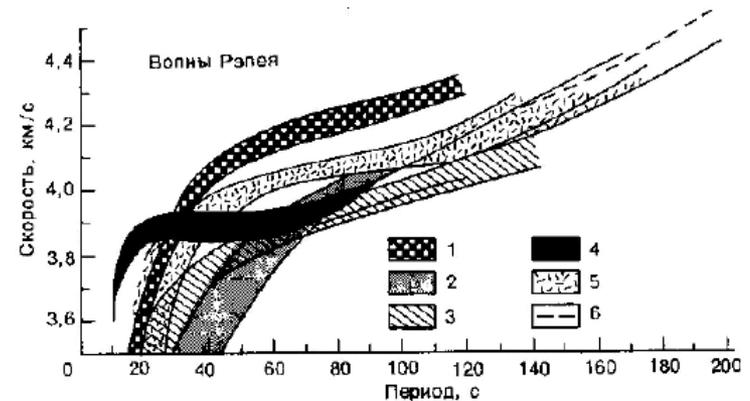
$$c_P > c_S$$

**поверхностные**

**волны  
Рэля**

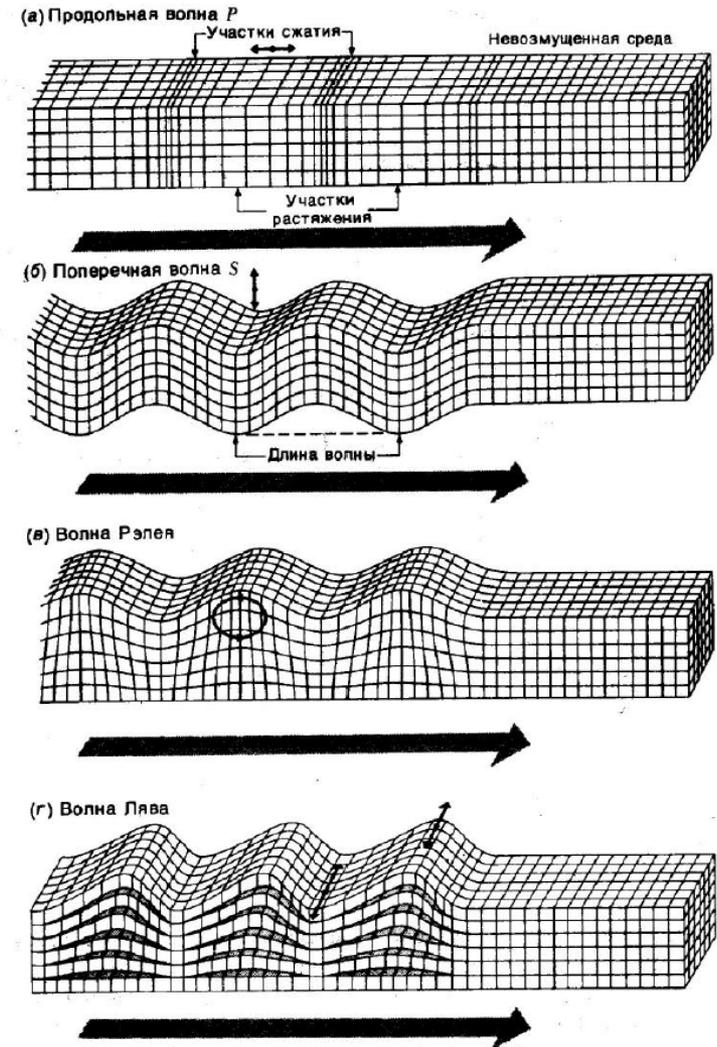
**волны  
Лява**

**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



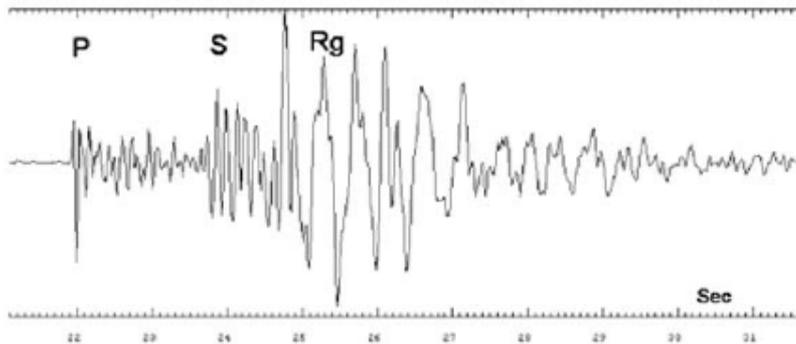
# Prima и Secunda

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

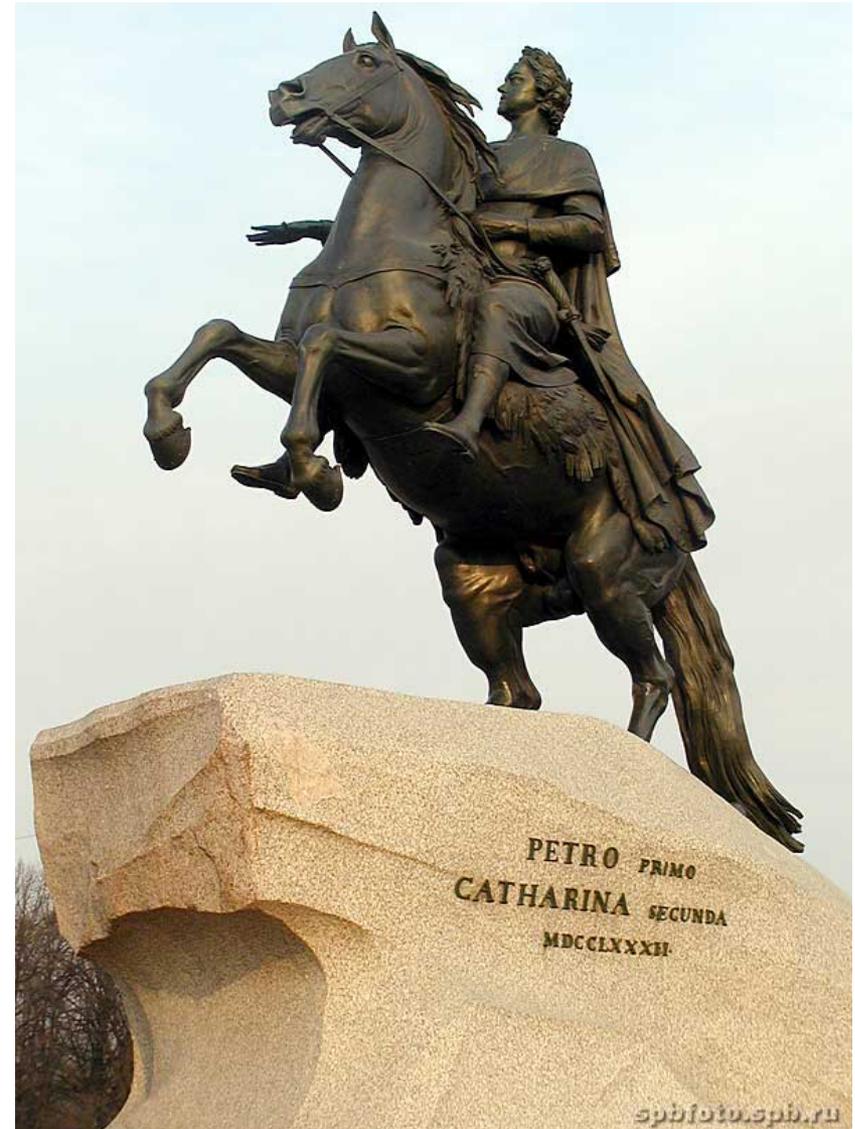
$$c_p > c_s$$

Для горных пород:

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



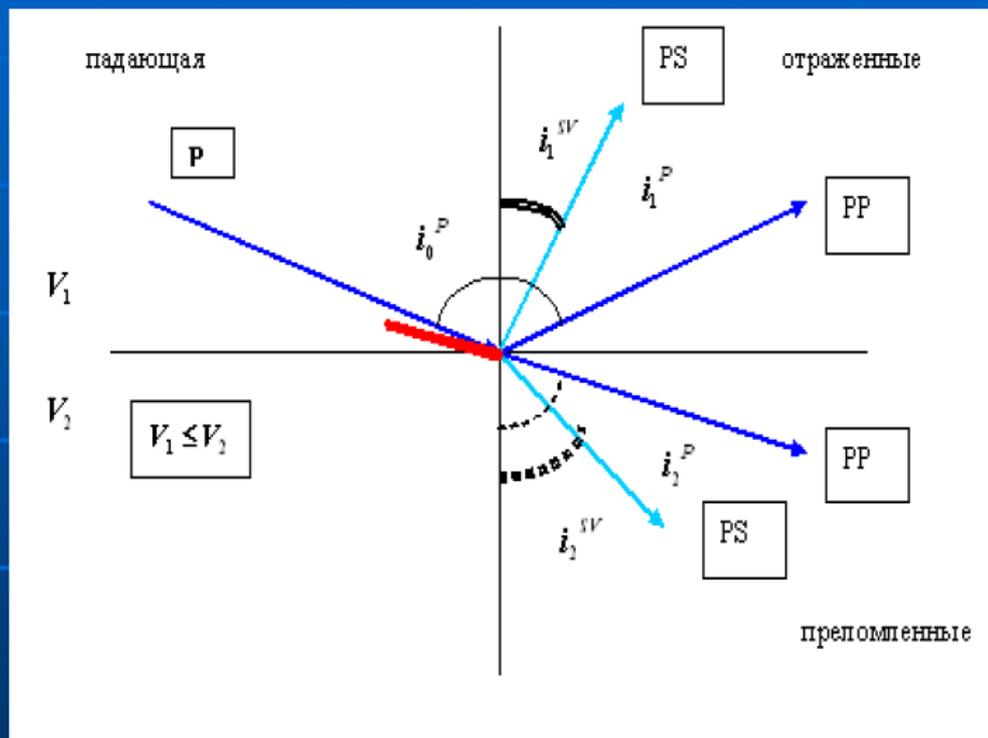
Обозначения: **p** и **s** – Манчестер, 1911



# Скорости сейсмических волн

Порода	Глубина (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

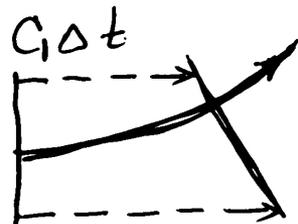
$$i_{\text{крит}} = \arcsin \frac{V_1}{V_2}$$

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

# Градиентная среда: $c=c(z)$

## Искривление лучей

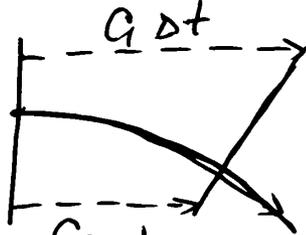
$$\frac{dc}{dz} > 0$$



$$c_1 \Delta t$$

$$c_2 > c_1$$

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



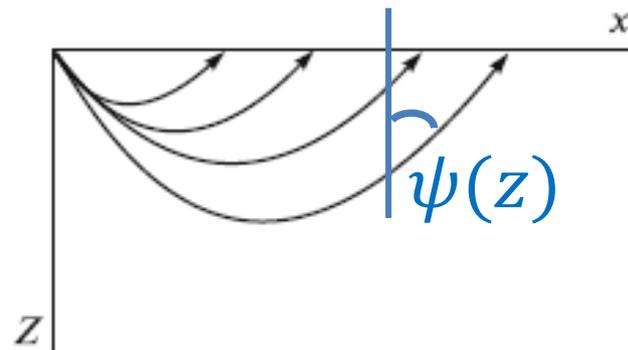
$$c_2 \Delta t$$

$$c_2 < c_1$$

Кривизна луча:

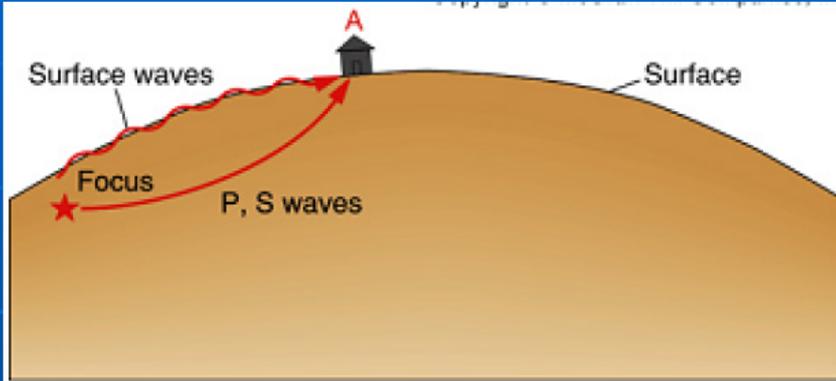
$$k = -p \frac{dc}{dz}$$

## Уравнение луча

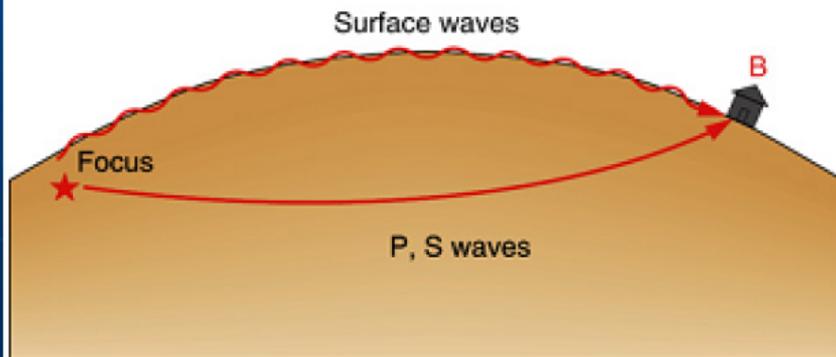


$$\frac{\sin \Psi(z)}{c(z)} = p = \text{const}$$

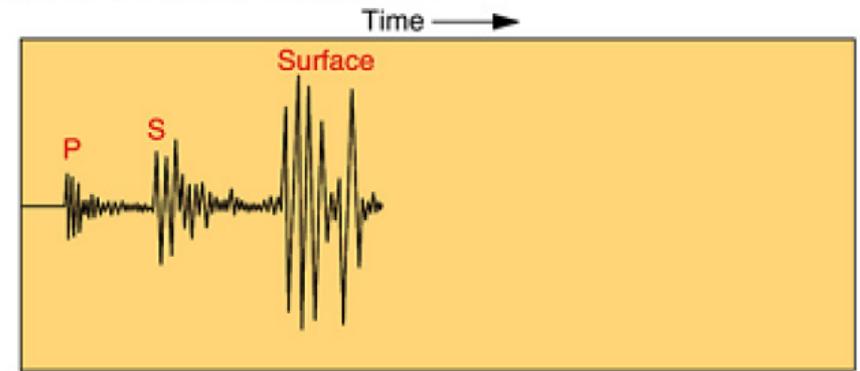
# Время пробега волны и расстояние вдоль поверхности



**A** Station near focus

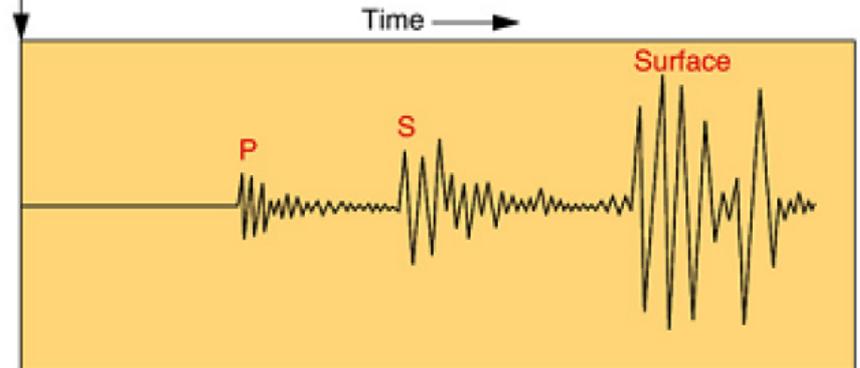


**B** Station far from focus



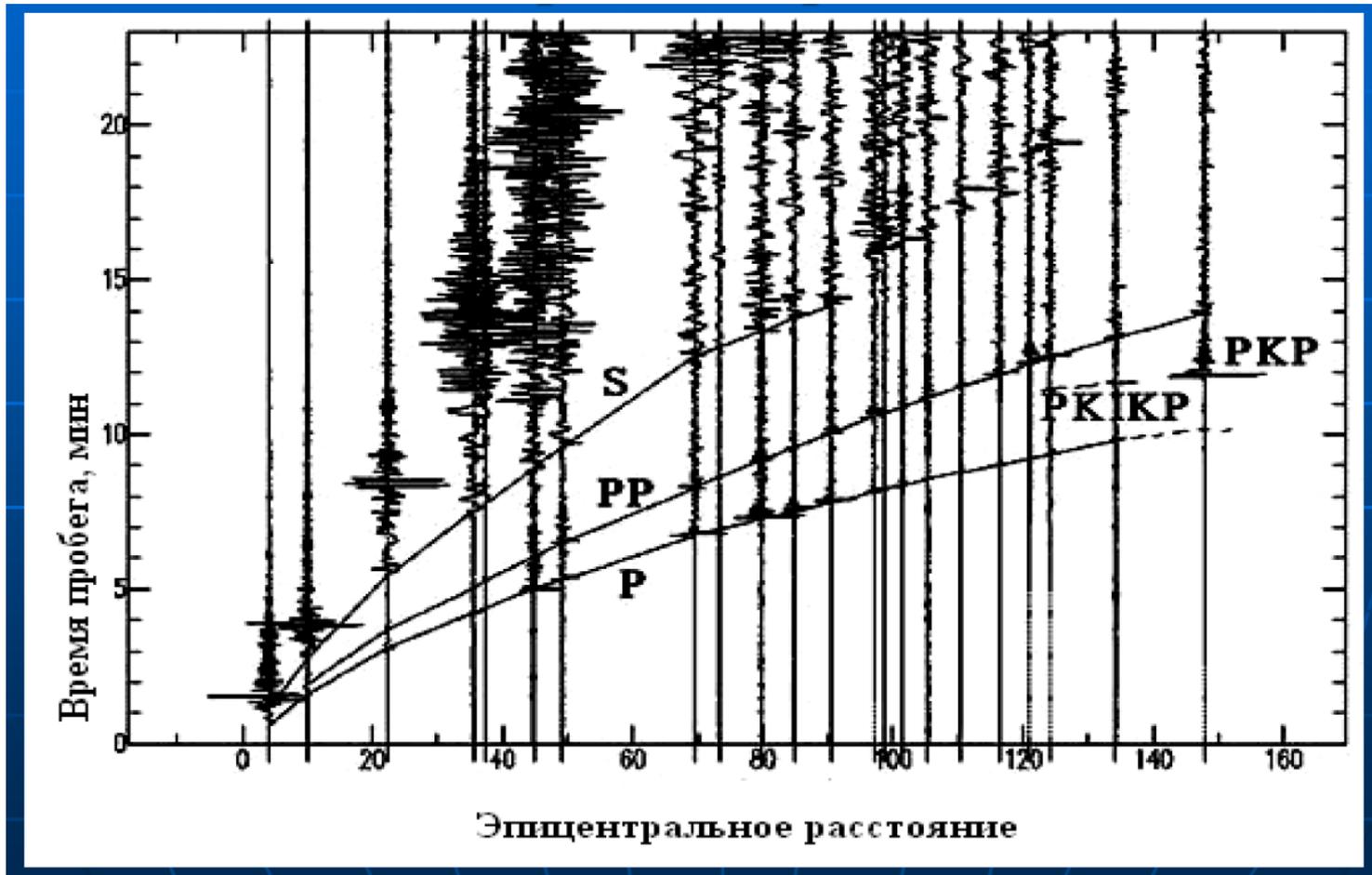
Seismogram from station A

Time of earthquake



Seismogram from station B

# Время пробега сейсмических волн





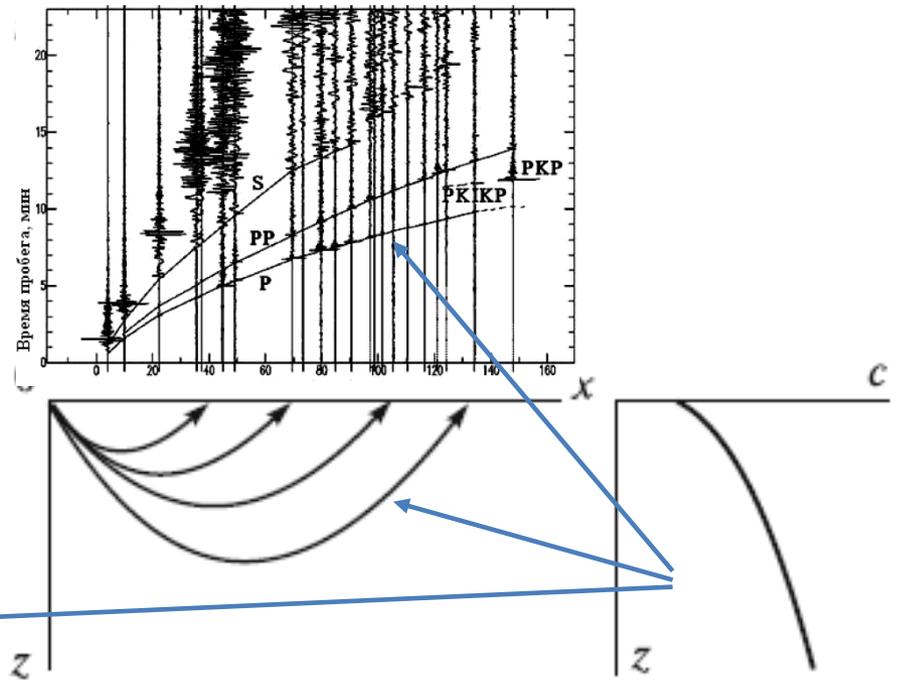
# Сейсмический годограф: теория (прямая кинематическая задача сейсмологии)

- Сейсмический годограф: зависимость времени пробега волны от эпицентрального расстояния

Уравнение годографа

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

( $z_m$  - глубина проникновения луча)



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

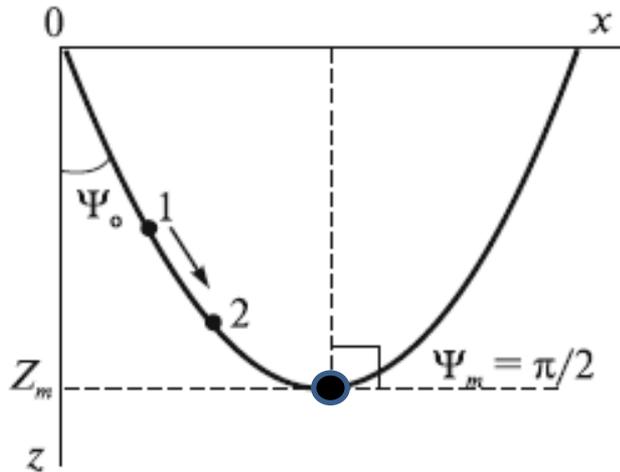
б) **Годограф** может быть **измерен**, если имеется сеть сейсмических станций

# Две замечательные формулы теории сейсмического луча

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

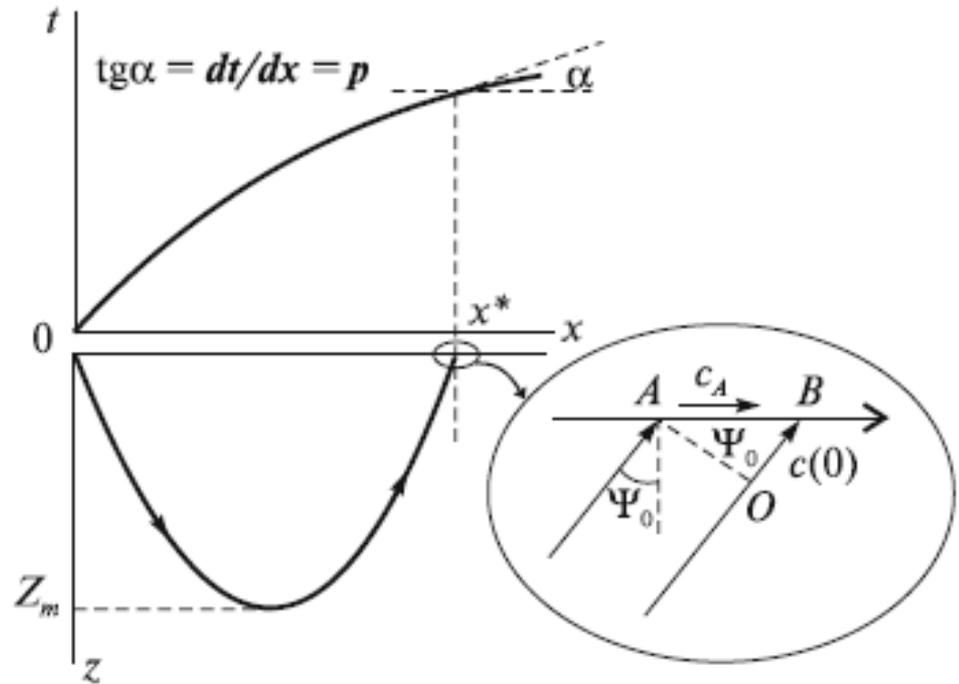
Формула Бендорфа:

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



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

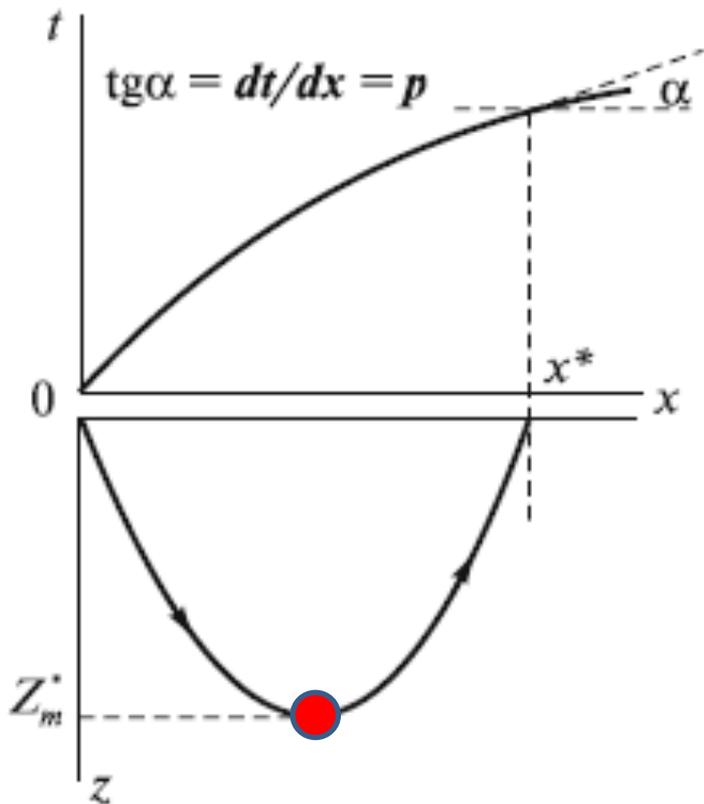
$$\Psi(z_m) = \frac{\pi}{2}$$



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

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

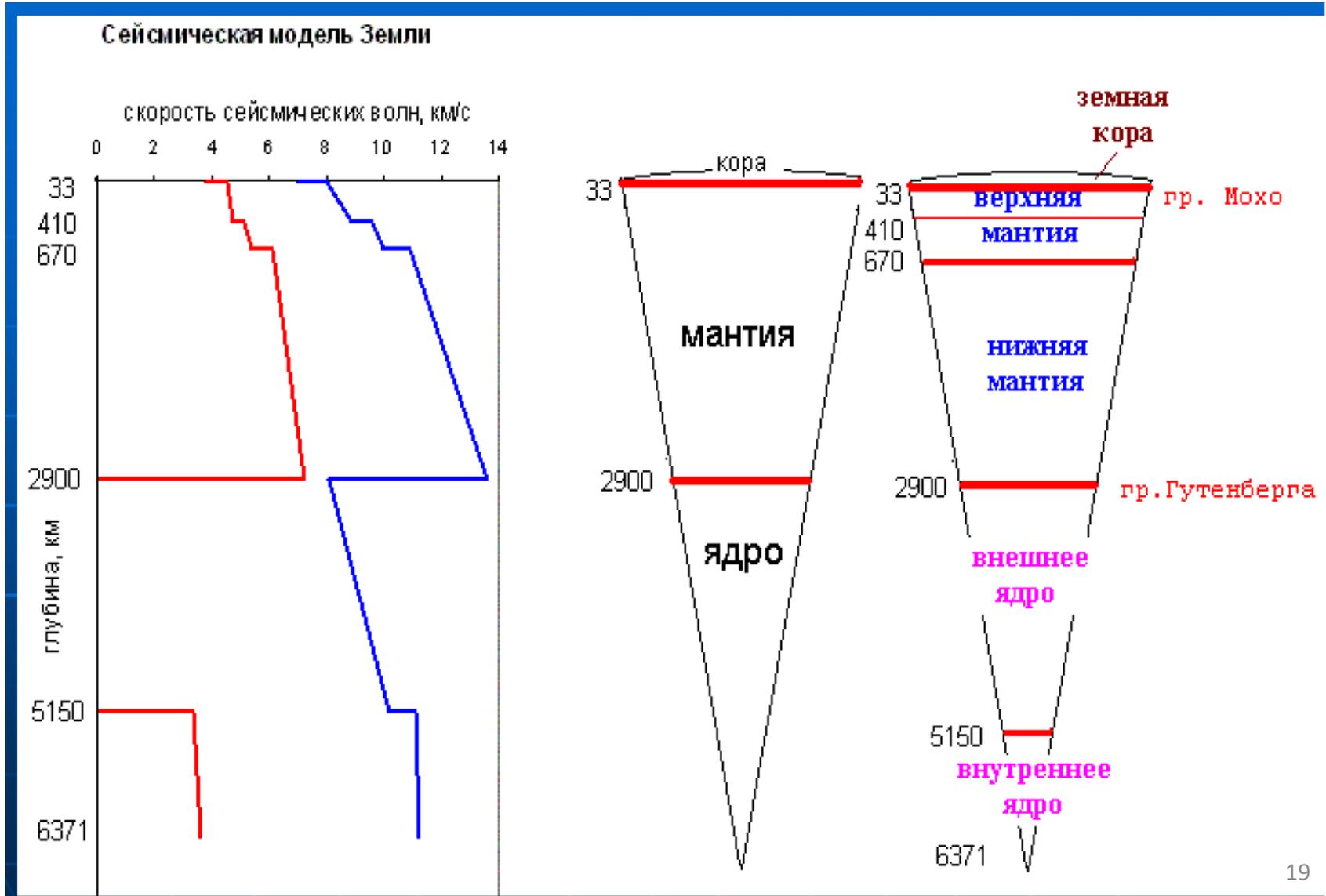
Известен (измерен) годограф  $t=t(x)$ . Найти сейсмический разрез  $c=c(z)$ .



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

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

# Схематичная сейсмическая модель Земли



# Земная кора

## СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

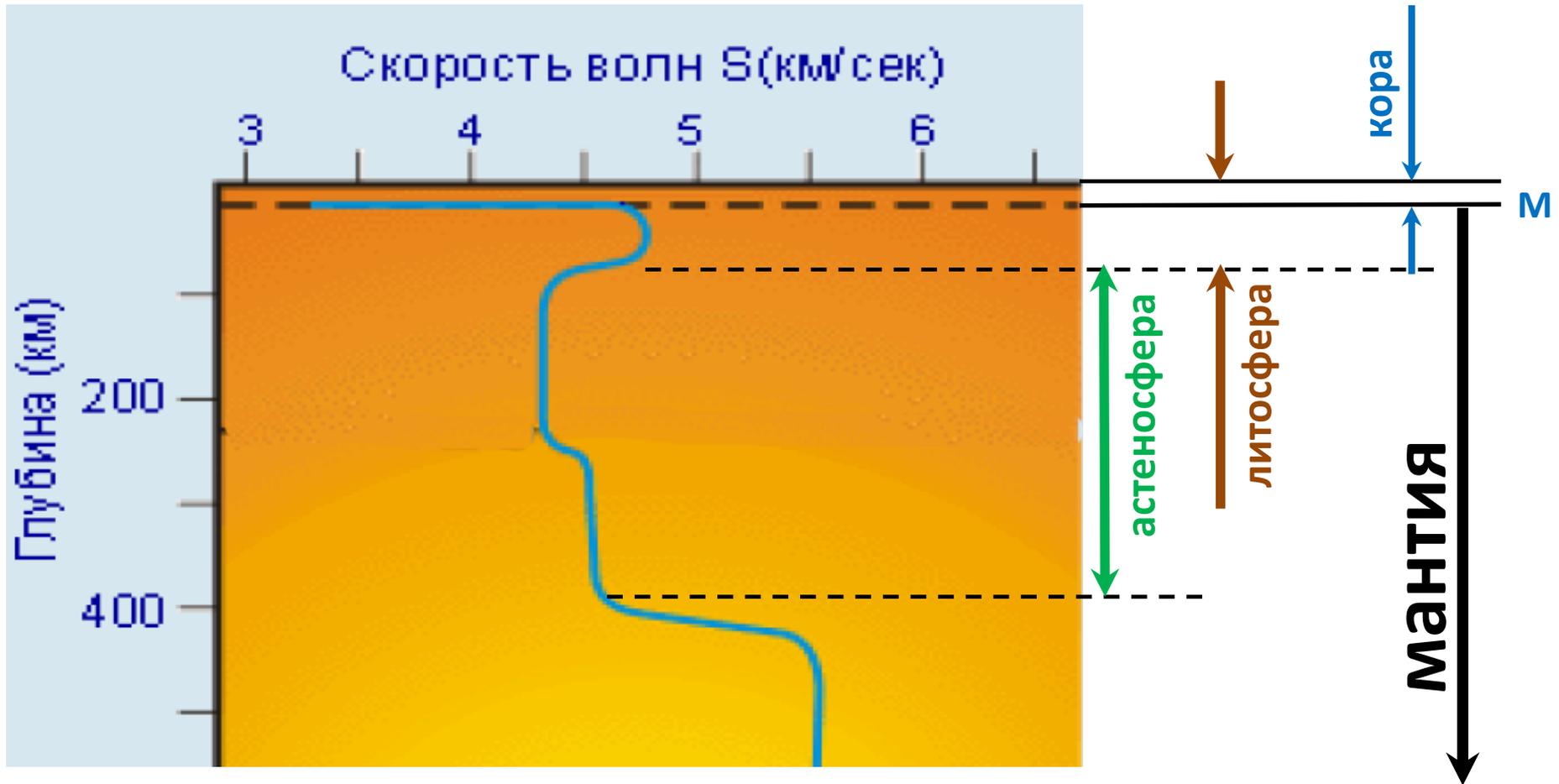


# Континентальная и океаническая кора

№	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

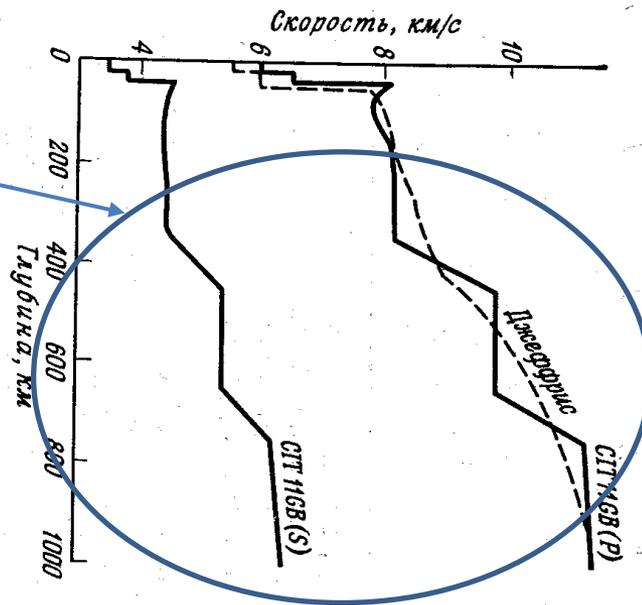
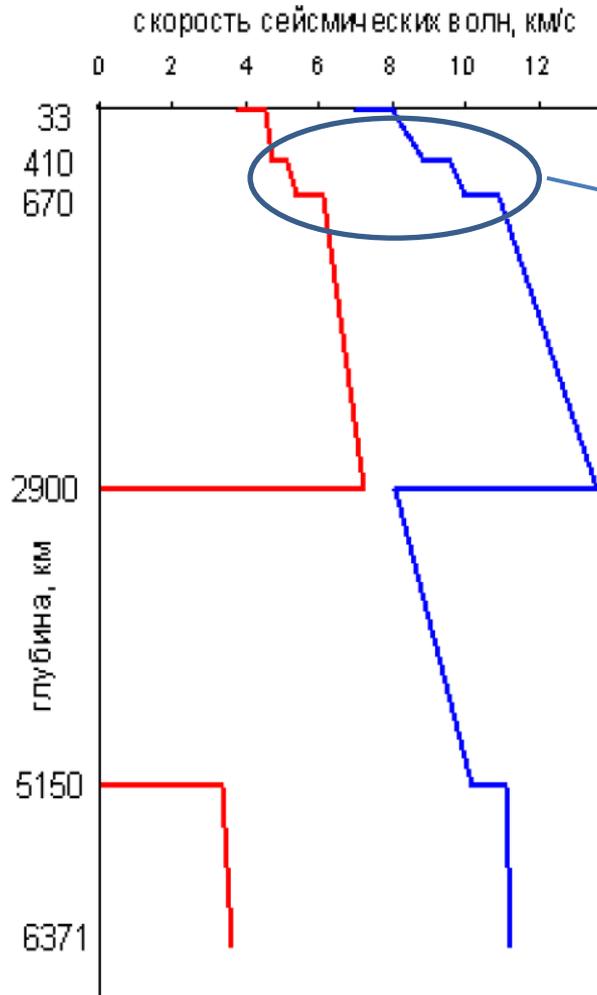
# Литосфера и астеносфера



- **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

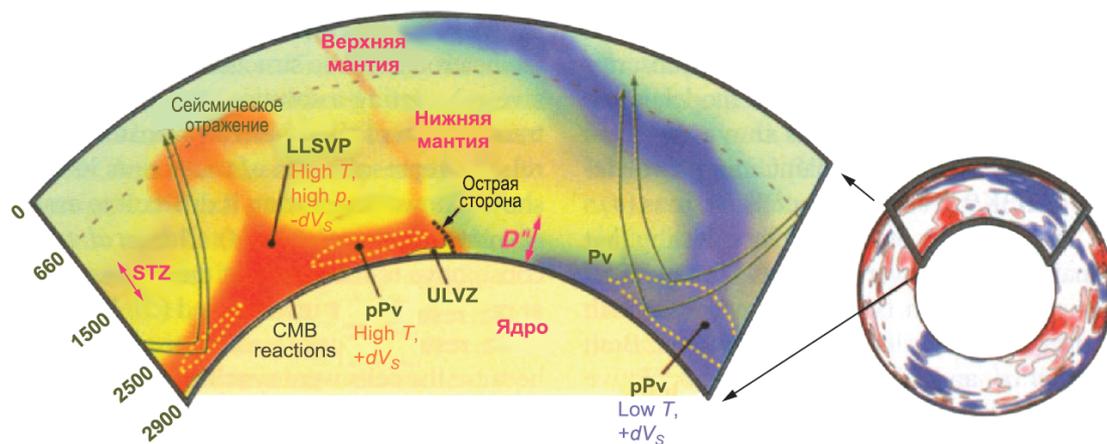
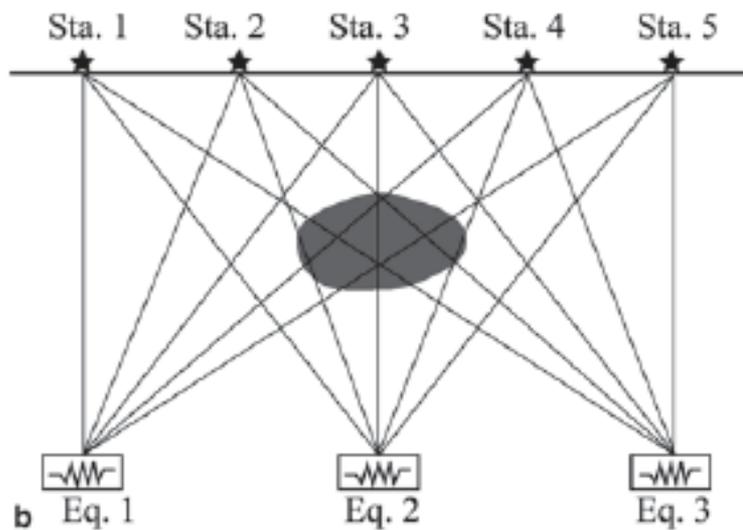
Сейсмическая модель Земли



Требуется объяснение!

# Сейсмическая томография

## Сейсмическая томография (схема)



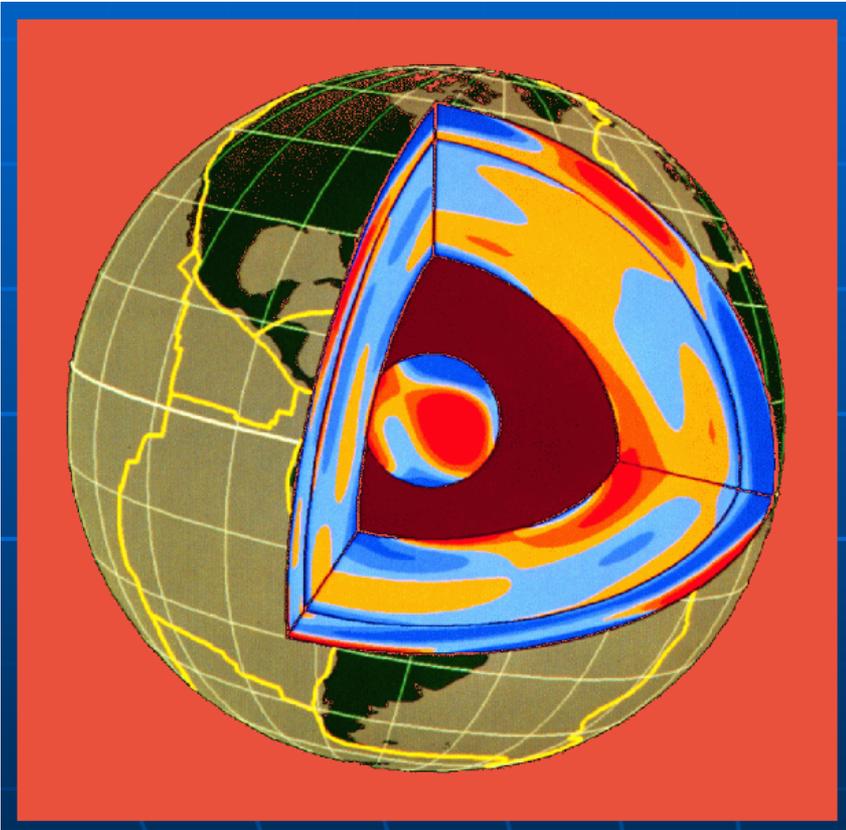
**Рис. 65.** Изображение, полученное методом сейсмической томографии [Ritsema et al., 2004] зон больших и малых вариаций скоростей поперечных волн в мантии Земли (си-

# «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)

# 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:

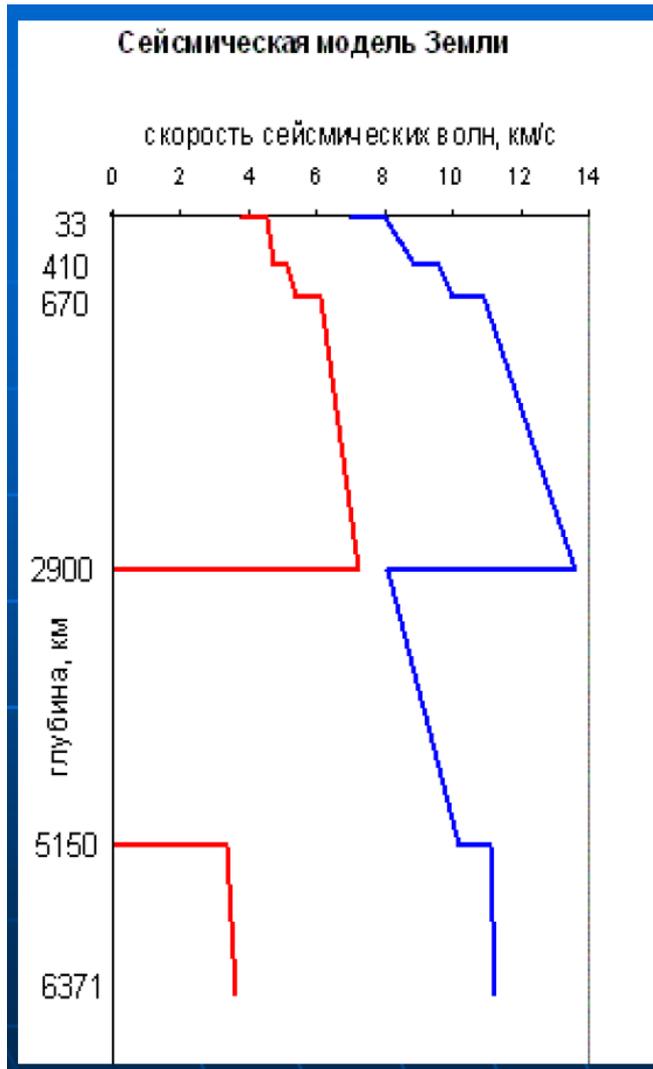
$$\frac{K}{\rho} = c_p^2 - \frac{4}{3} c_s^2 = \Phi(z)$$

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

(1) = (2):

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

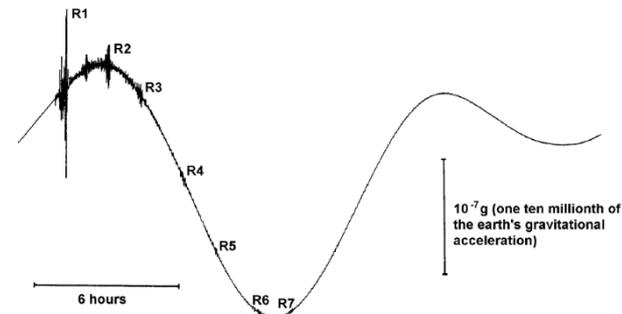
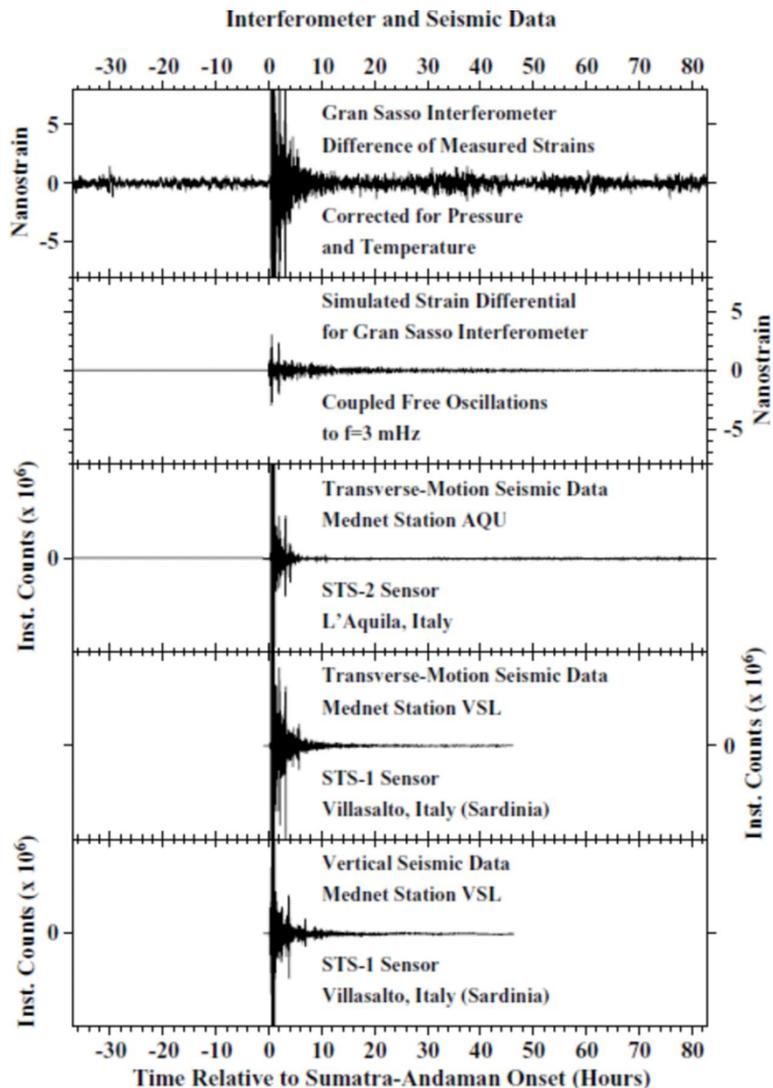
# Уравнение Адамса-Вильямсона: проблема



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

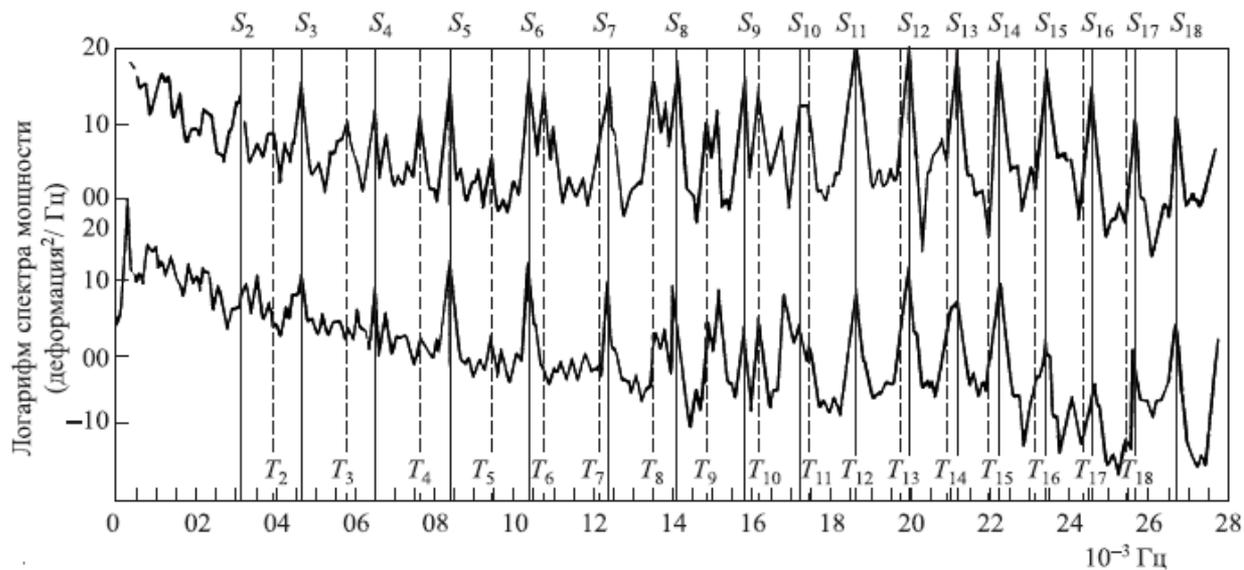
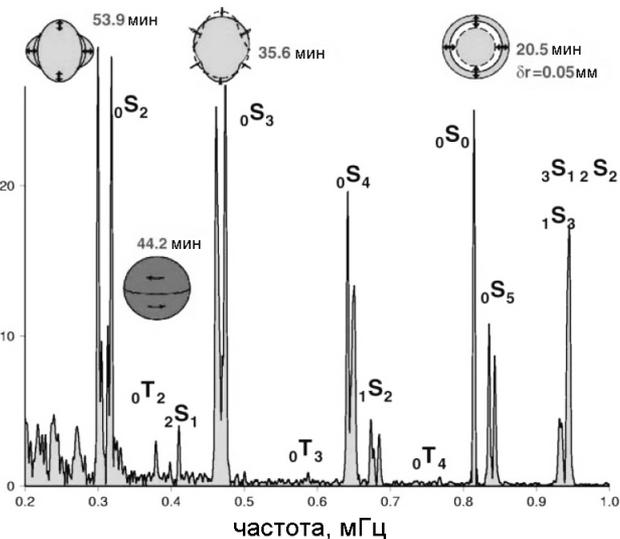
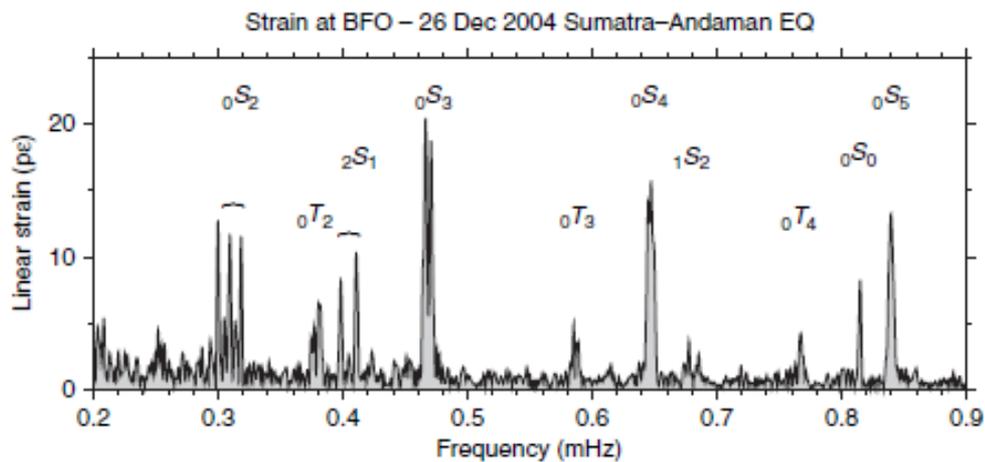
# б) Эмпирическое определение плотности

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



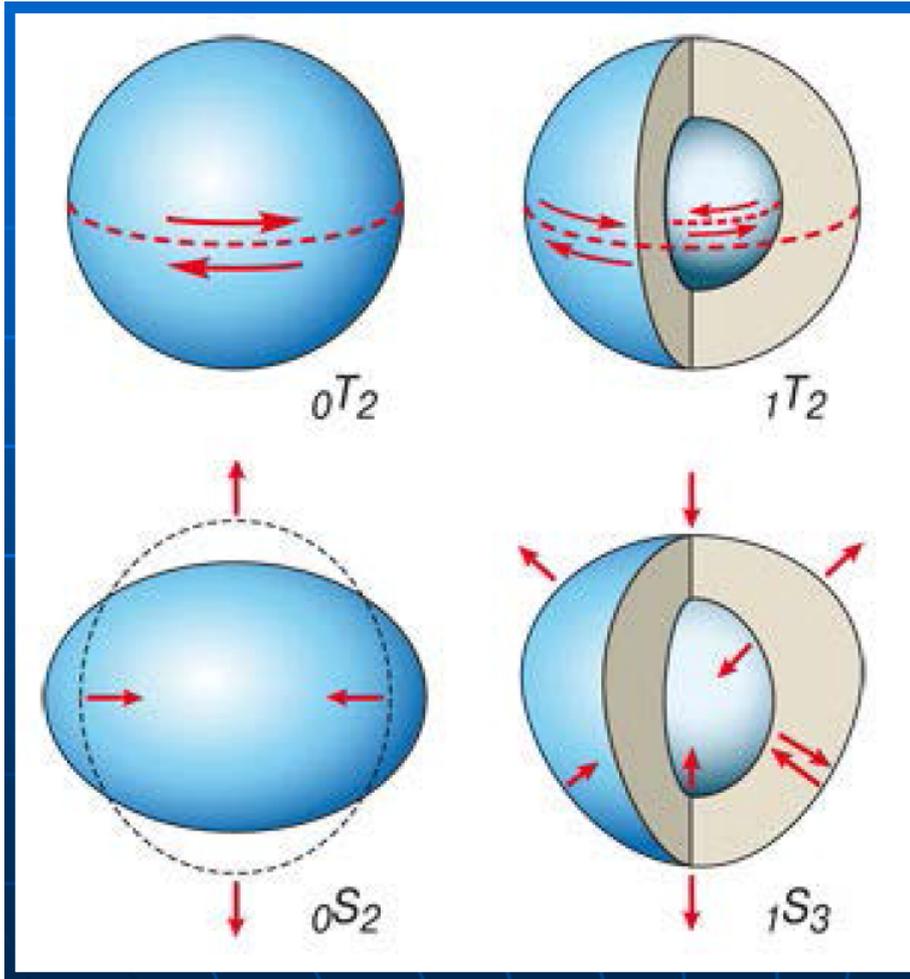
- Собственные колебания Земли (СКЗ): свободные колебания после сильных землетрясений
- Периоды СКЗ определяются распределениями по глубине  $K(z)$ ,  $\mu(z)$ ,  $\rho(z)$
- Первая (неуверенная) регистрация деформографом – после Камчатского землетрясения 1952 г.
- Надежная регистрация деформографом и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

# Спектр СКЗ



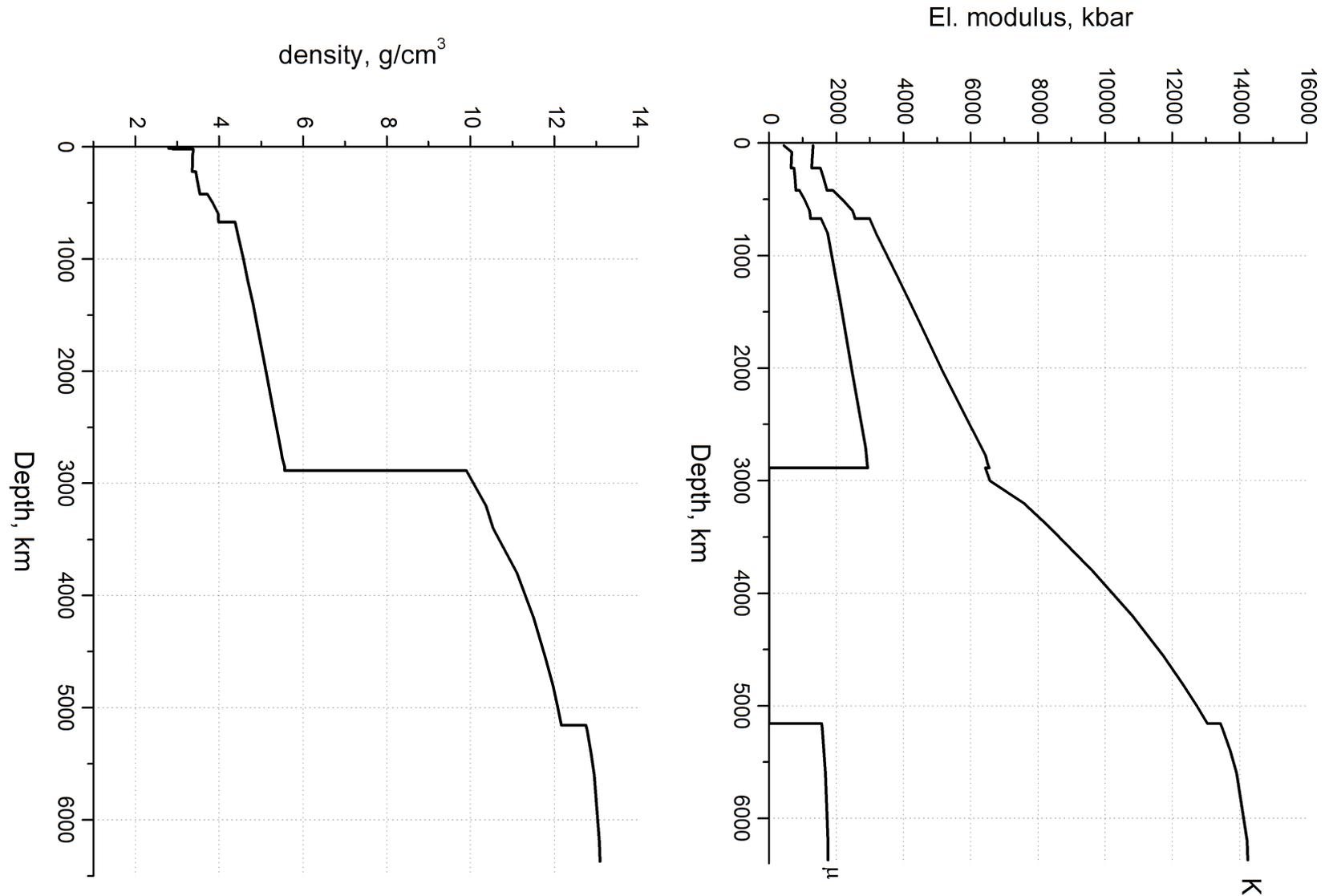
**Диапазон периодов  
5 – 55 минут**

# 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



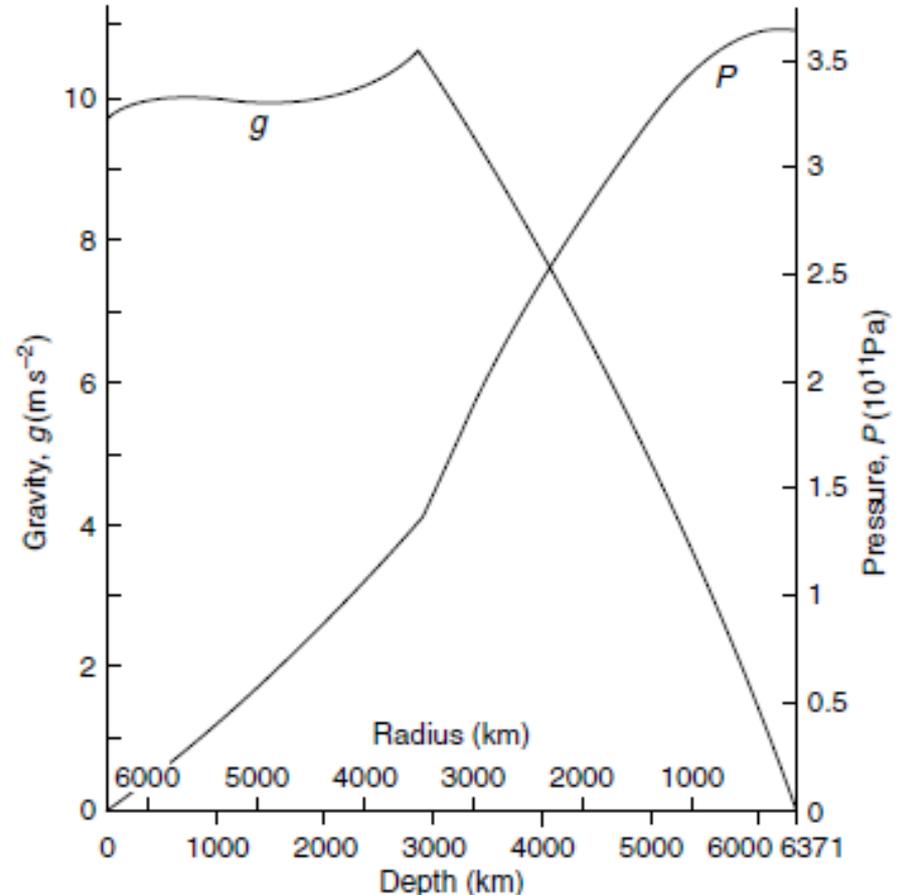
# Ускорение силы тяжести и давление

- Ускорение силы тяжести

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

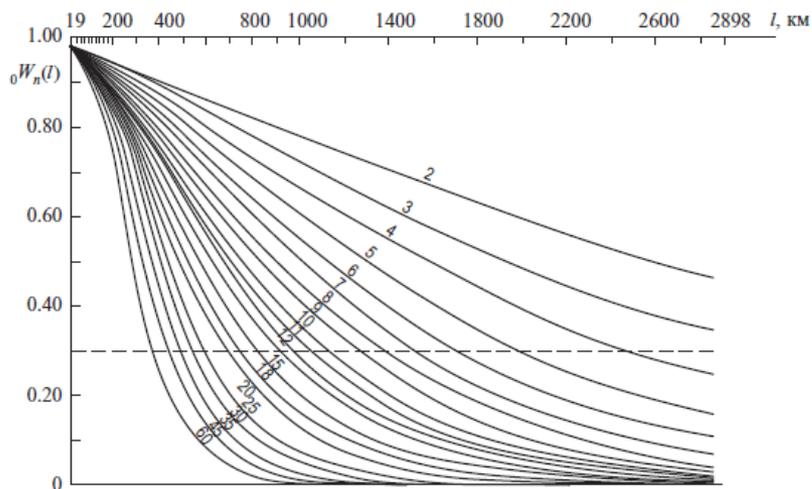
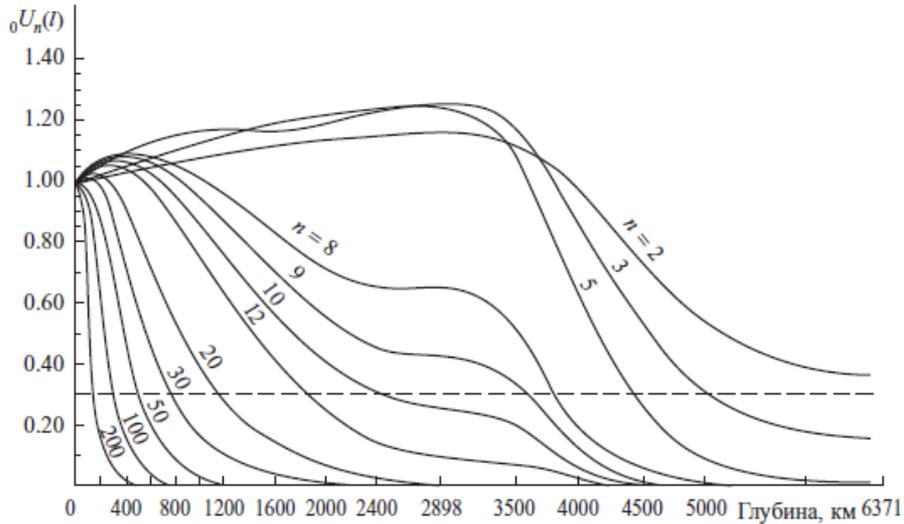
- Давление

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



# Затухание сейсмических колебаний

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



- Затухание колебаний во времени

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

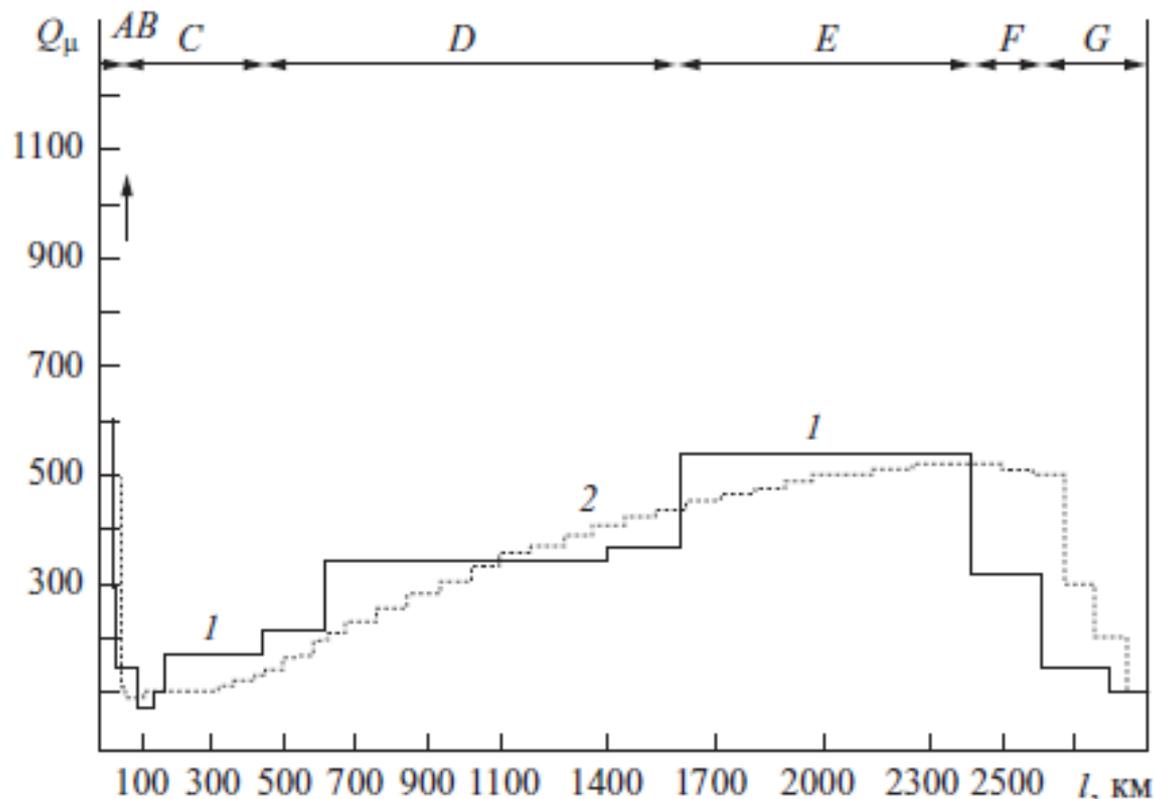
- Добротность

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

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

# Распределение добротности по глубине

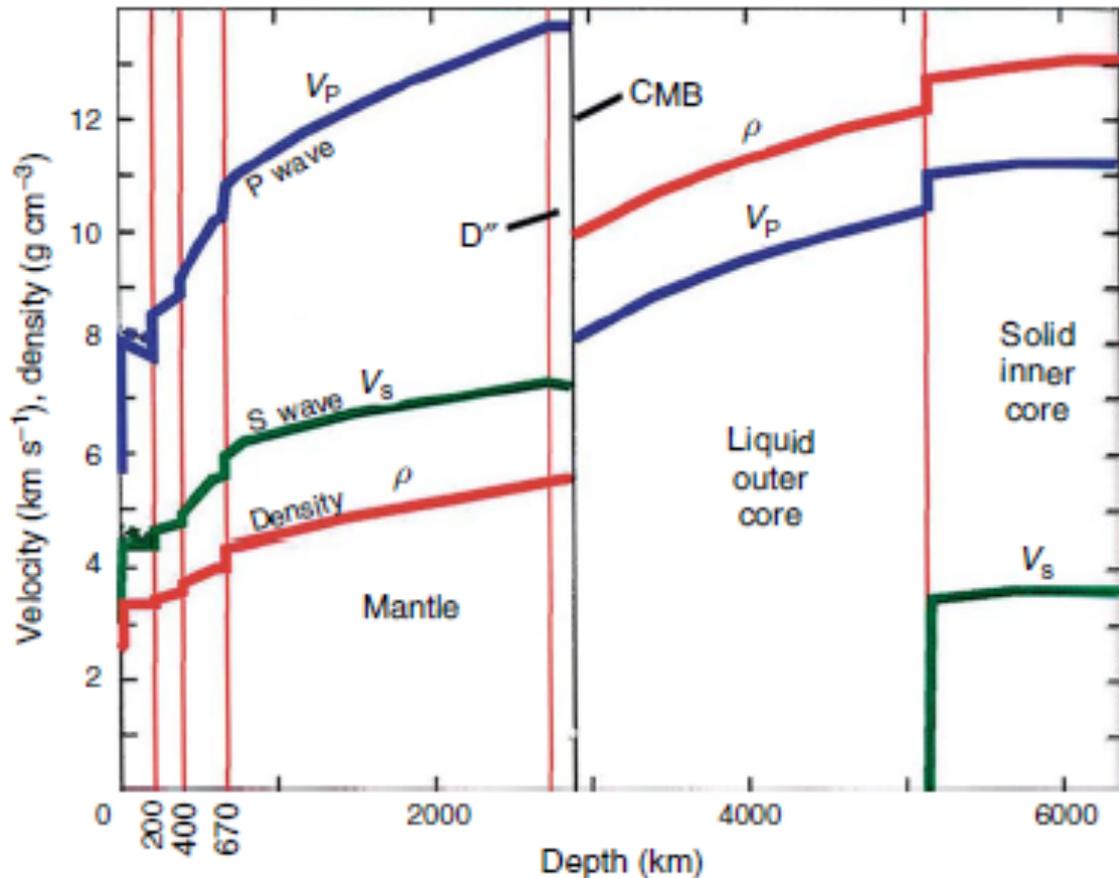
(Жарков, 2013)



**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,	$V_P$ , км/с	$V_S$ , км/с	$Q_\mu$
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

# 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