

Геофизика 2024

Физика твердой Земли

Смирнов Владимир Борисович
Заведующий кафедрой физики Земли

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 эк	25 Пителески	55 к
5. Мисса	35	26 Сандел	55 к
6. Левин	37 эк	27 ⁺ Бехаревич	55 к
7. Берестовский	39 д	28 Шатик	56 к
8. Смординович	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. Черныш	52 к.	39 Шпатович	61
19. Корсков	53 д	40 Будко	61
20. Дзюльковский	53 к	41 Манско	61
21. Архипов	54 к	42 Маркин	61
		43 Корнацков	61 ^Р

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

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

μ – модуль сдвига

K – модуль всестороннего сжатия

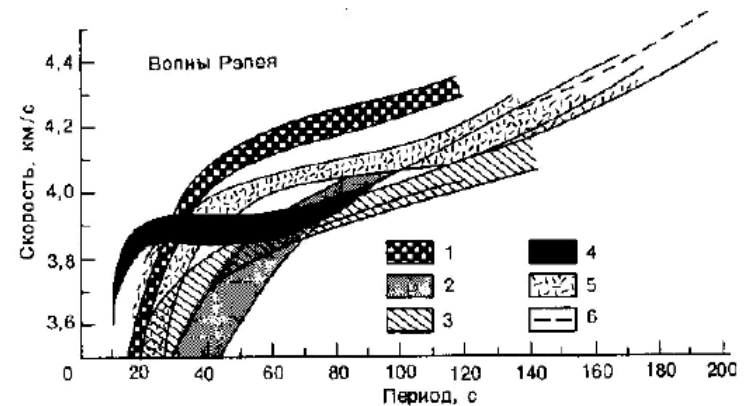
$$c_P > c_S$$

поверхностные

**волны
Рэля**

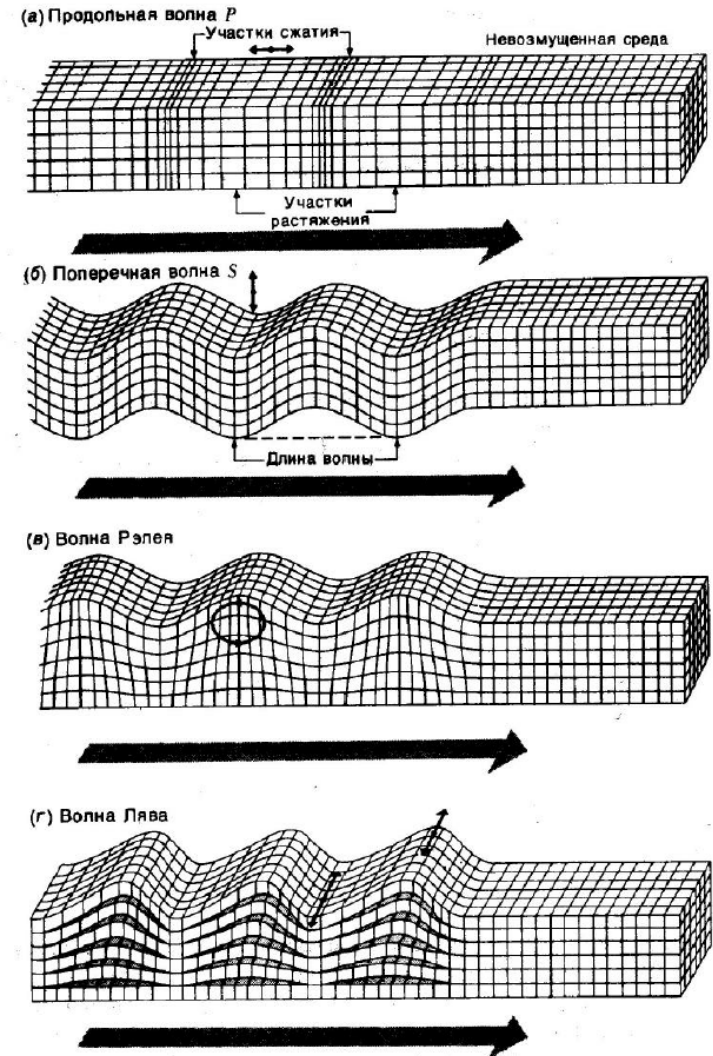
**волны
Лява**

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



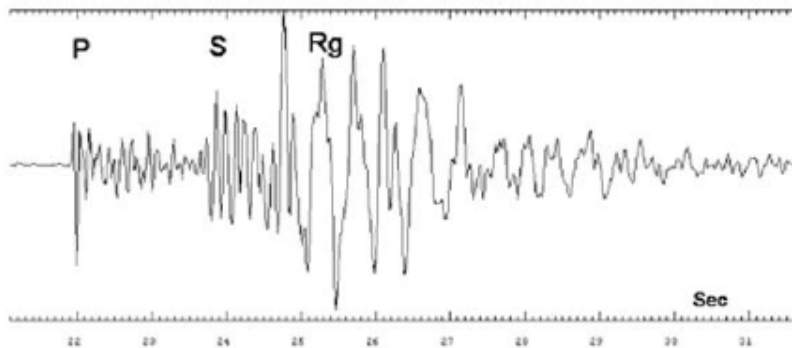
Prima и Secunda

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

$$c_p > c_s$$

Для горных пород:

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



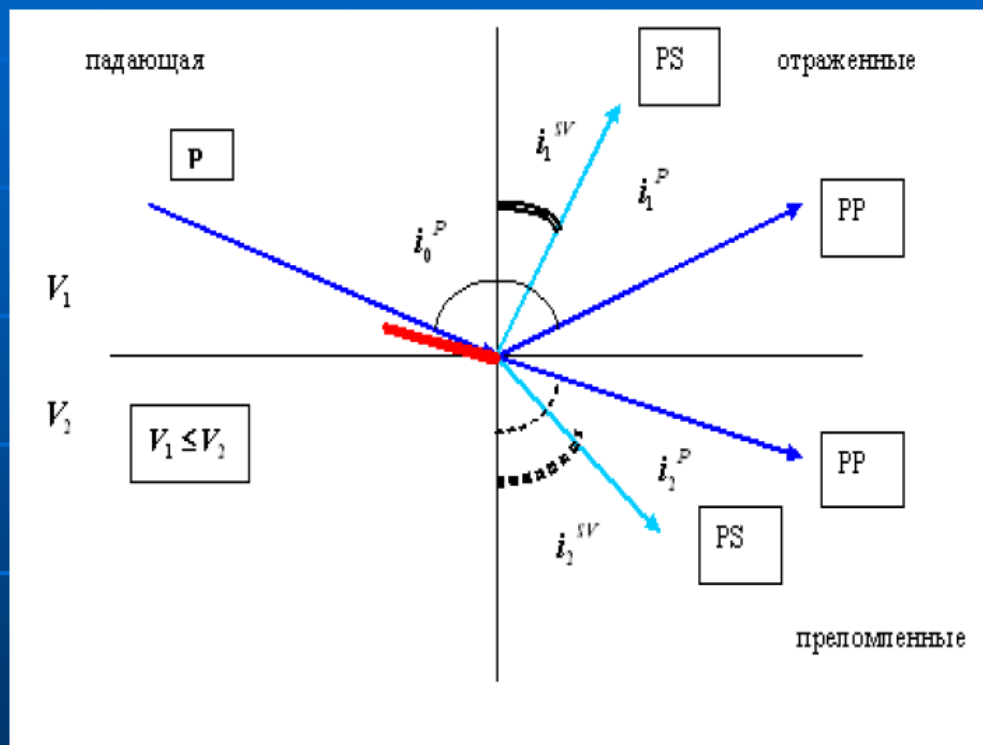
Обозначения: **p** и **s** – Манчестер, 1911



Скорости сейсмических волн

Порода	Глубина (км)	K (ГПа)	μ (ГПа)	ρ (г/см ³)	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

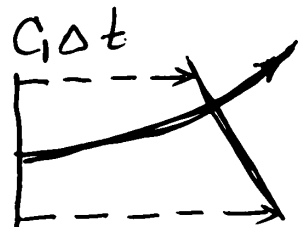
$$i_{\text{крит}} = \arcsin \frac{V_1}{V_2}$$

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

Градиентная среда: $c=c(z)$

Искривление лучей

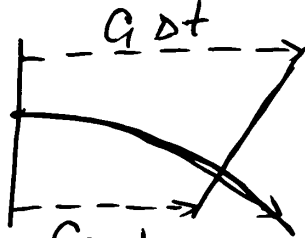
$$\frac{dc}{dz} > 0$$



$$c_1 \Delta t$$

$$c_2 > c_1$$

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



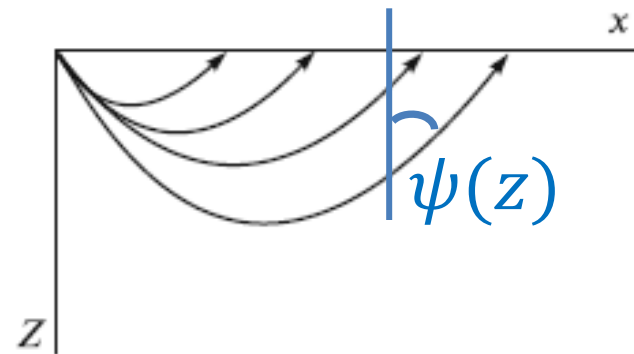
$$c_2 \Delta t$$

$$c_2 < c_1$$

Кривизна луча:

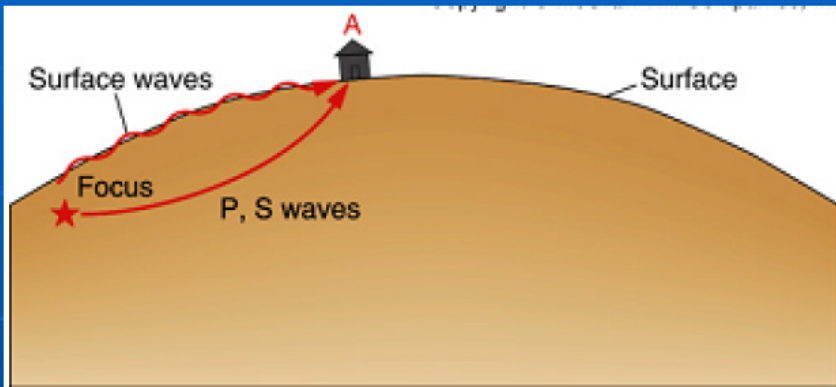
$$k = -p \frac{dc}{dz}$$

Уравнение луча

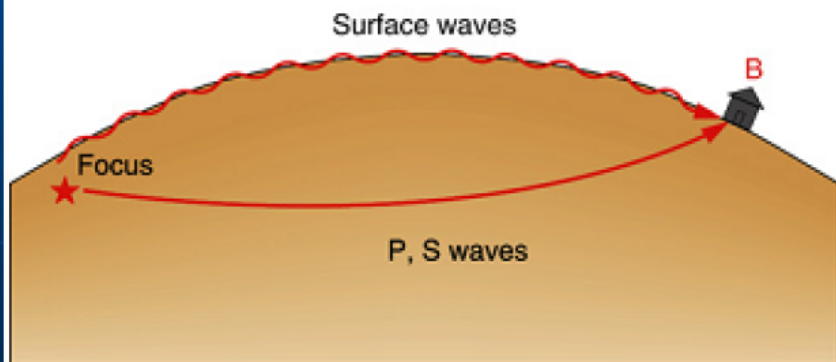


$$\frac{\sin \Psi(z)}{c(z)} = p = \text{const}$$

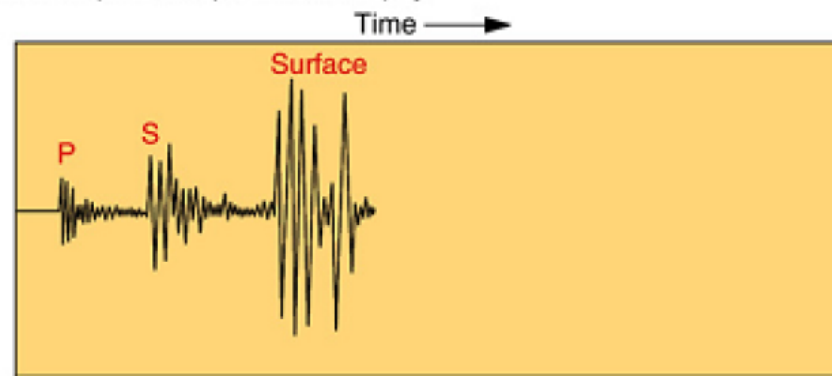
Время пробега волны и расстояние вдоль поверхности



A Station near focus

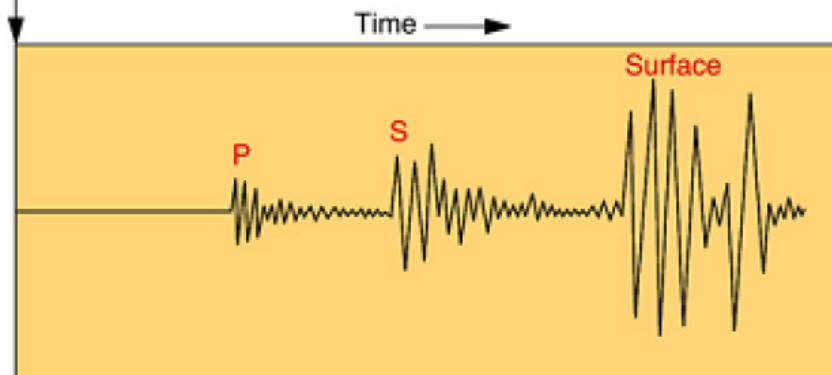


B Station far from focus



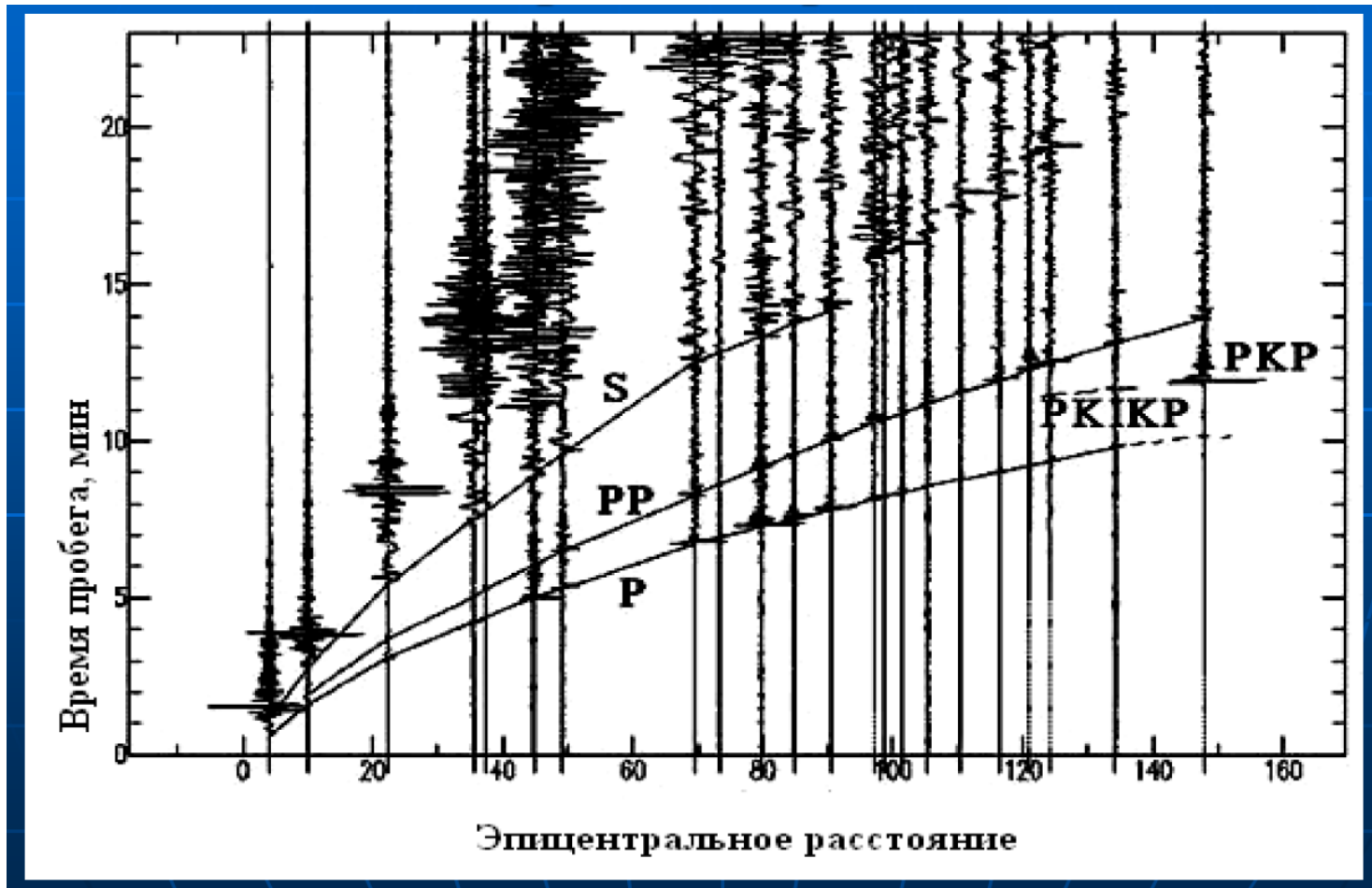
Seismogram from station A

Time of earthquake

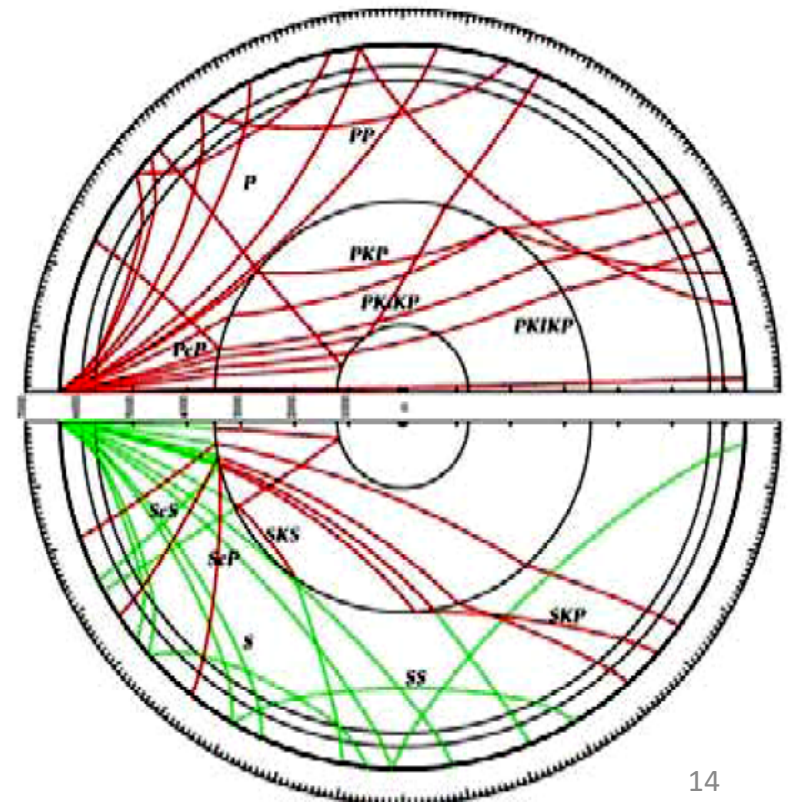
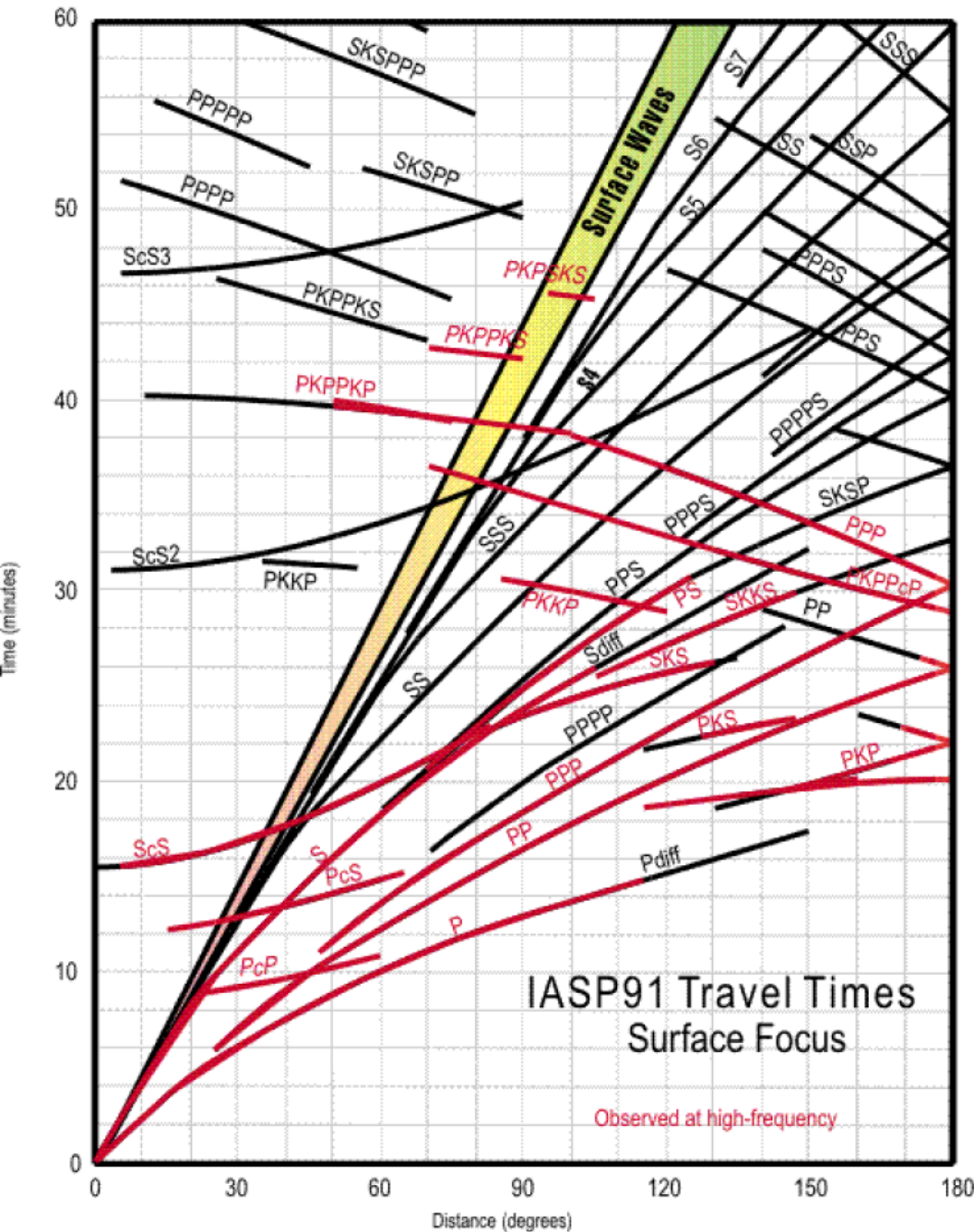


Seismogram from station B

Время пробега сейсмических волн



Годографы и ход лучей основных фаз объемных сейсмических волн



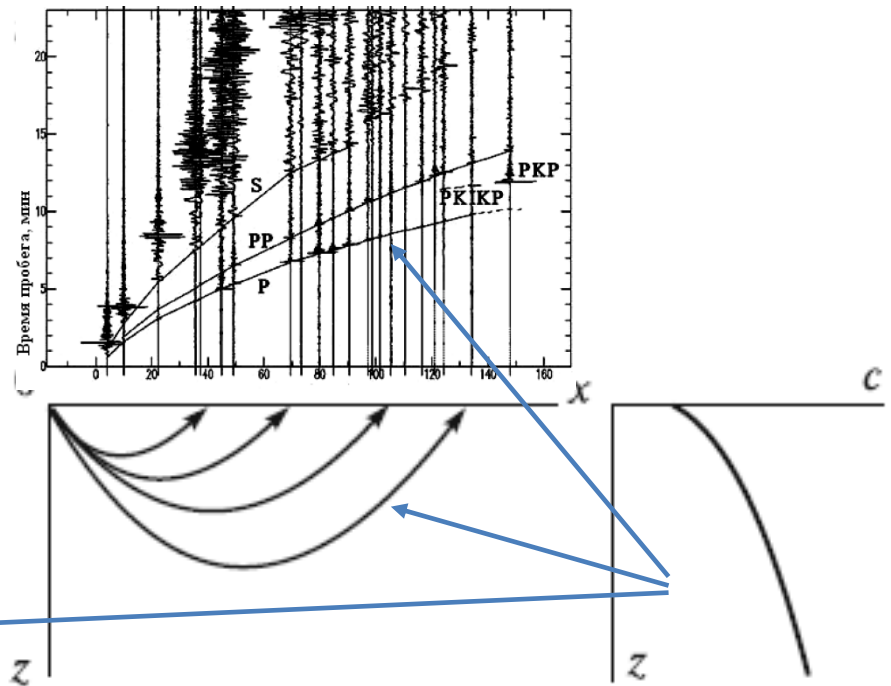
Сейсмический годограф: теория (прямая кинематическая задача сейсмологии)

- 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 $c=c(z)$

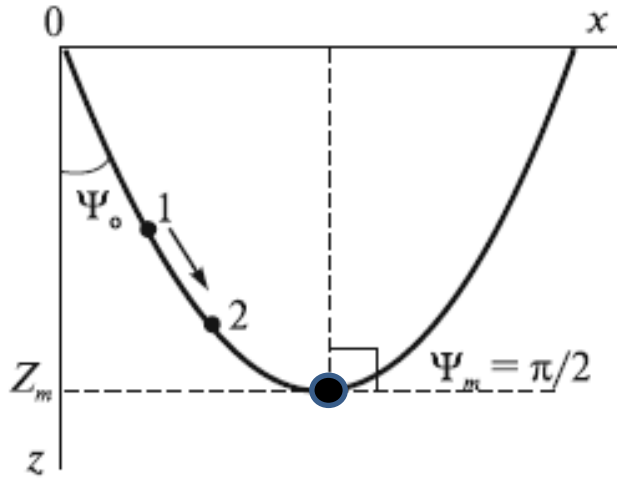
б) **Годограф** может быть **измерен**, если имеется сеть сейсмических станций

Две замечательные формулы теории сейсмического луча

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

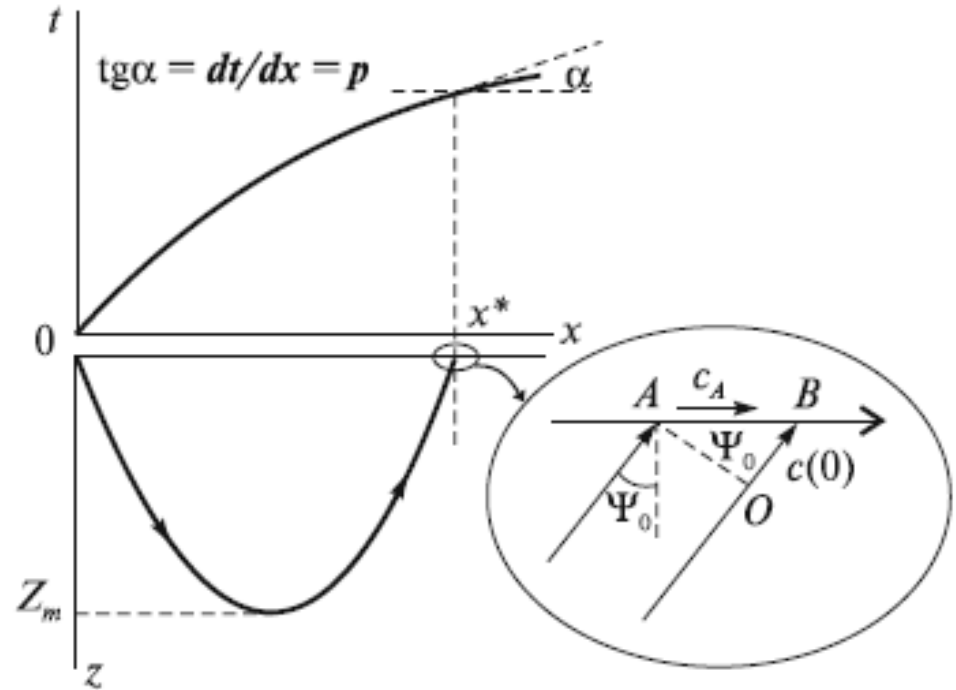
Формула Бендорфа:

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



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

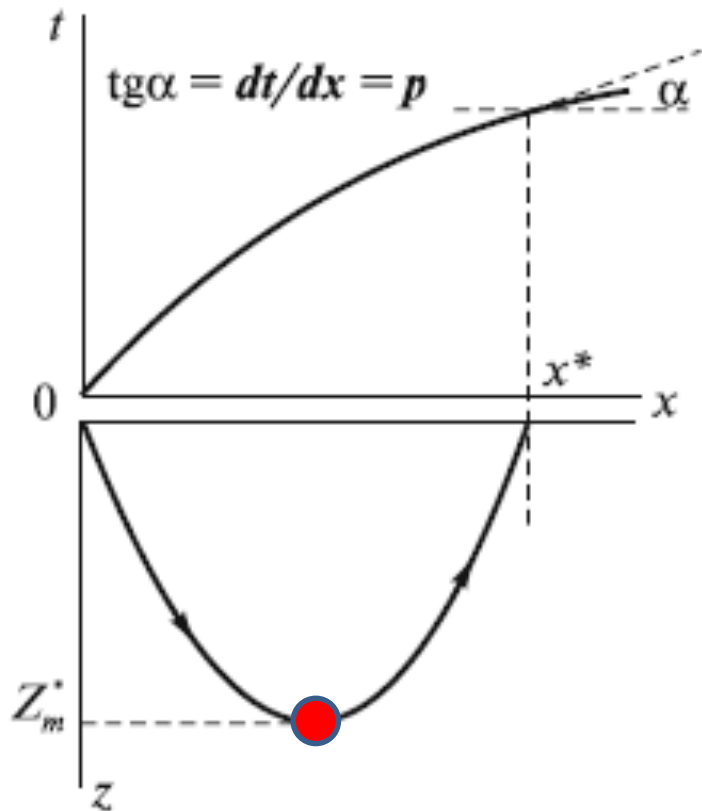
$$\Psi(z_m) = \frac{\pi}{2}$$



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

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

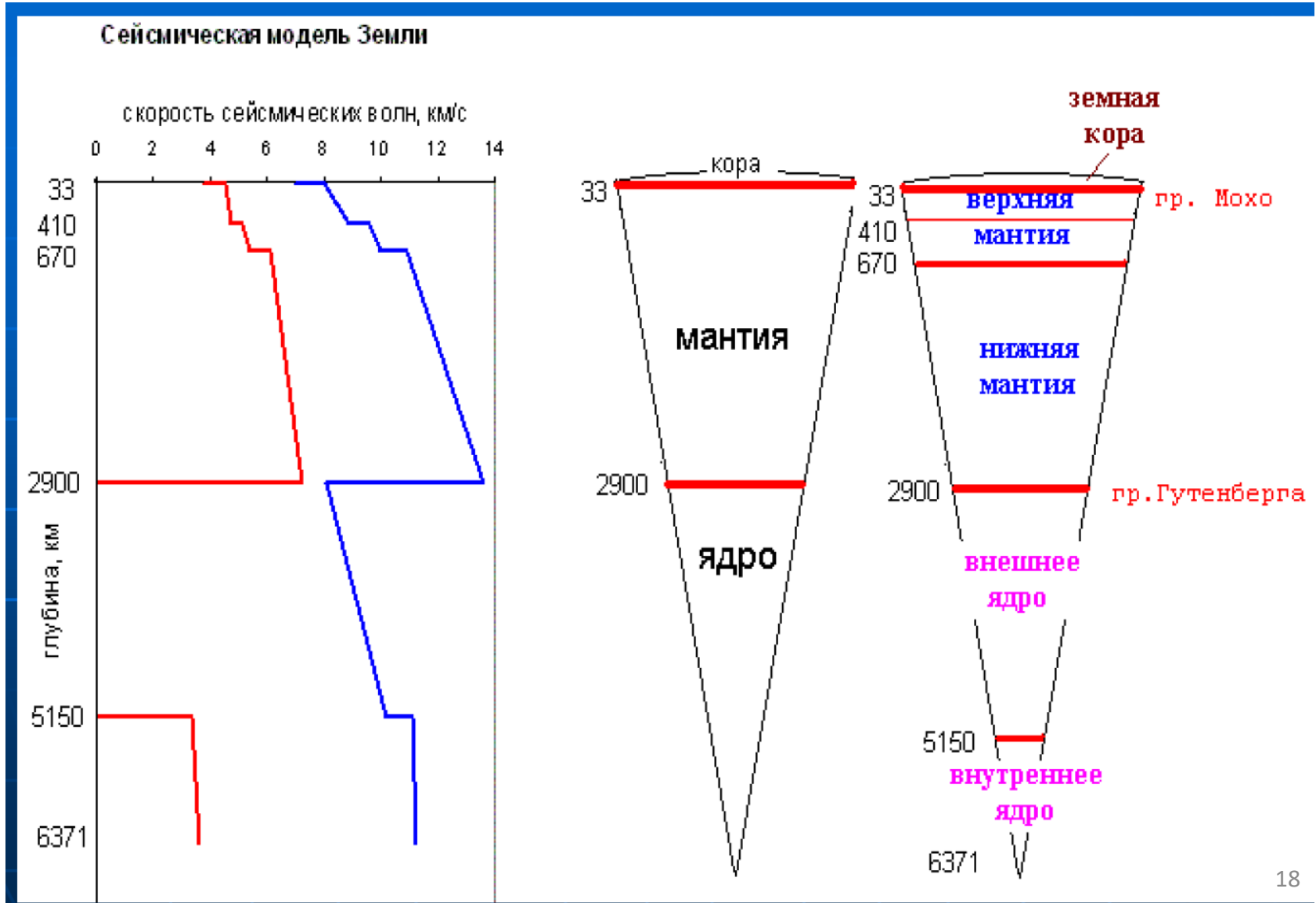
Известен (измерен) годограф $t=t(x)$. Найти сейсмический разрез $c=c(z)$.



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

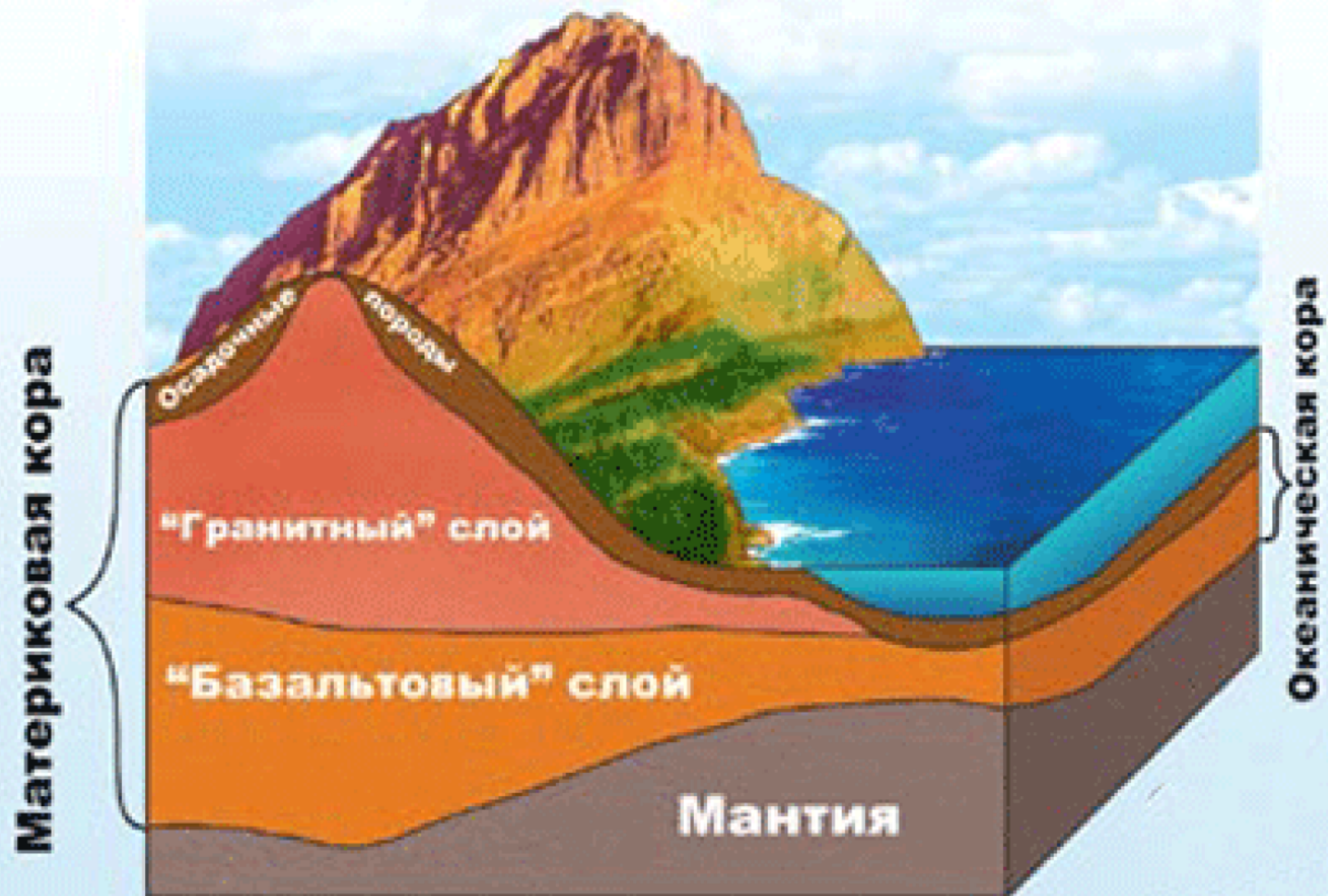
$$\begin{cases} z_m^* = \frac{1}{\pi} \int_0^{x^*} \operatorname{Arch} \frac{p(x)}{p^*} dx, \\ x^* : \frac{dt}{dx} \Big|_{x=x^*} = p^* \end{cases} .$$

Схематичная сейсмическая модель Земли



Земная кора

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

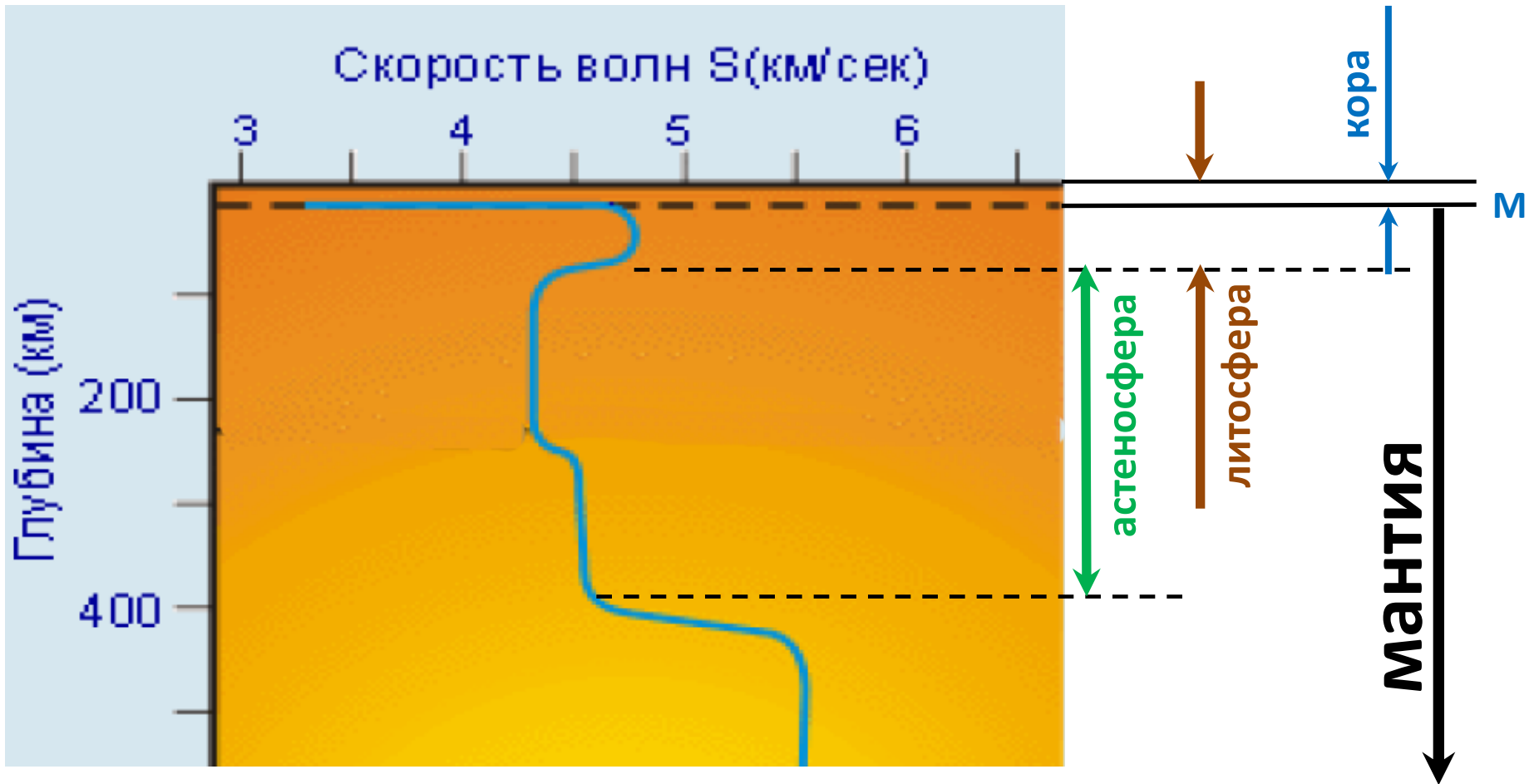


Континентальная и океаническая кора

№	Слой	Глубина, км	V_P км/с	V_S км/с	Плотность, г/см ³	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

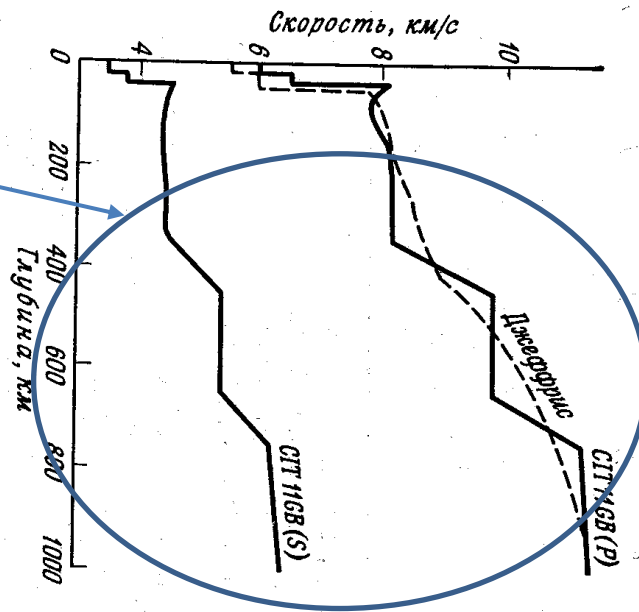
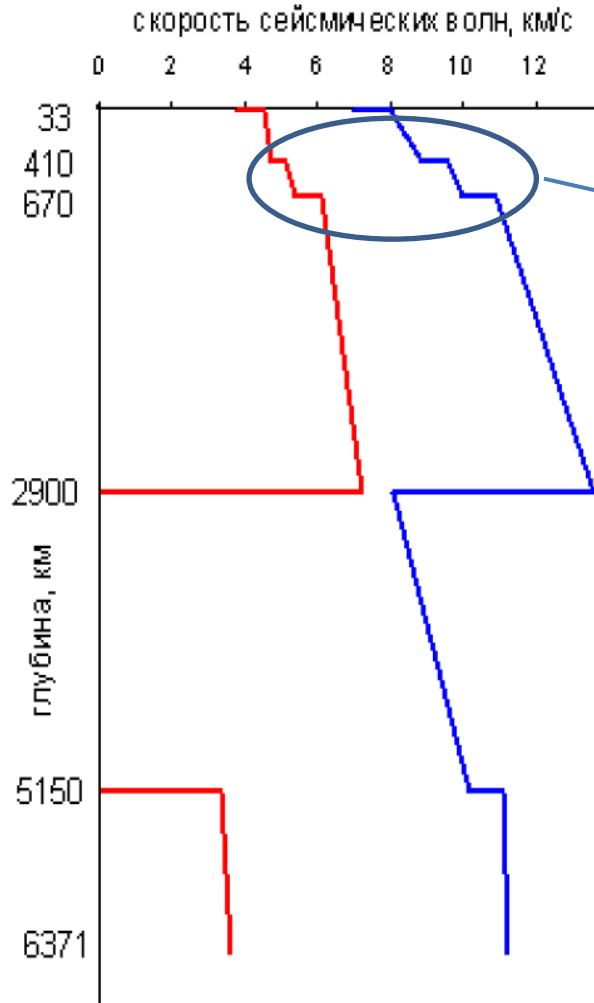
Литосфера и астеносфера



- **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

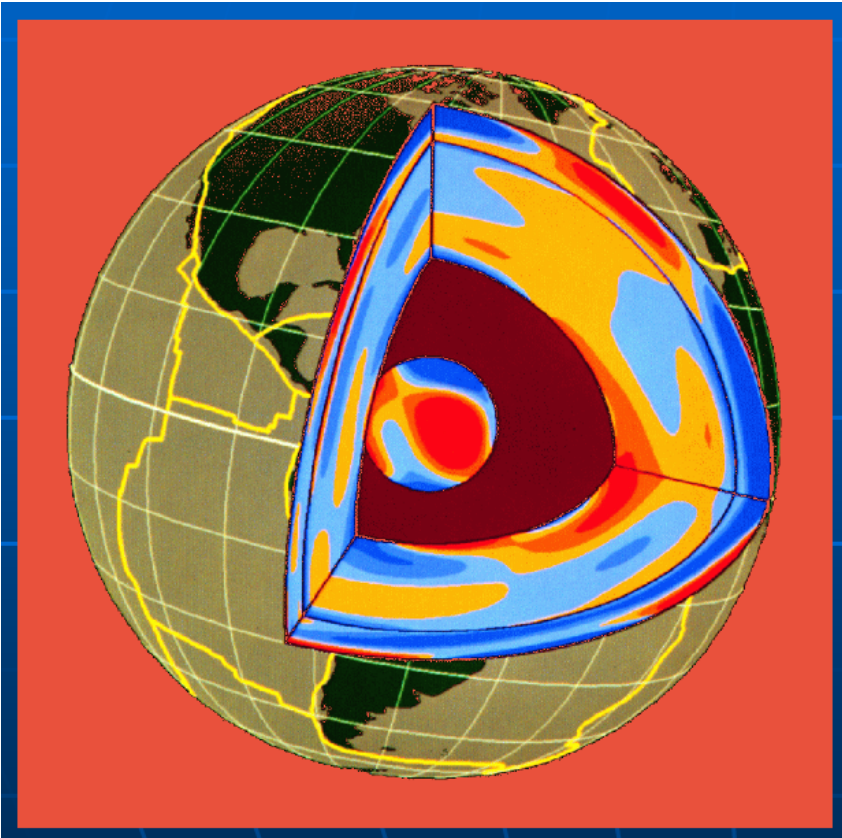
Области аномального нарастания скоростей волн

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:

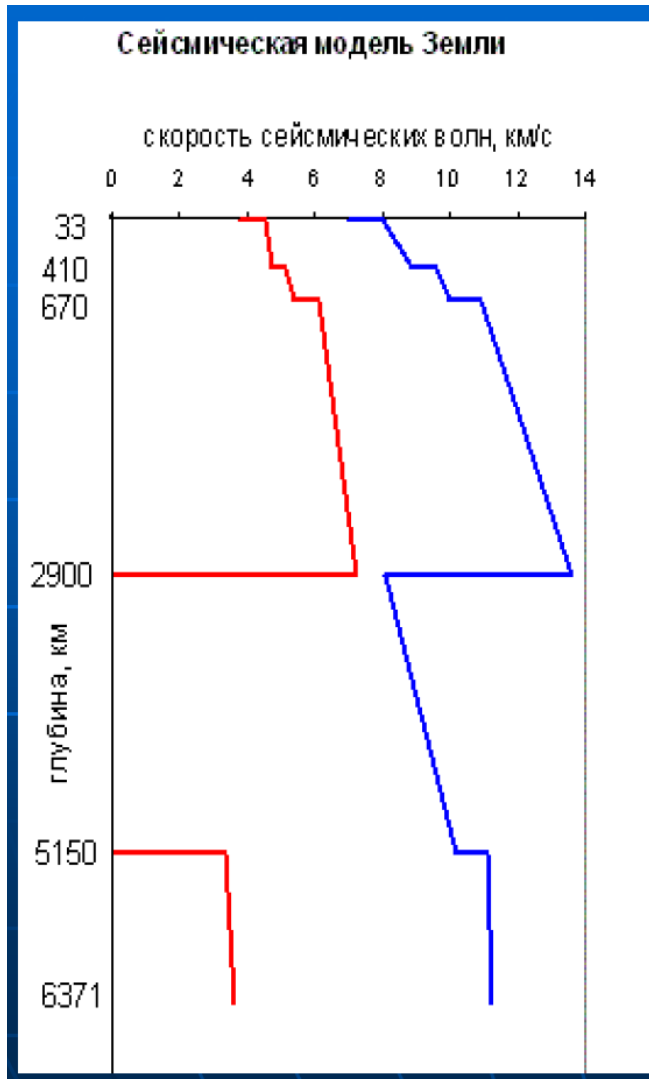
$$\frac{K}{\rho} = c_p^2 - \frac{4}{3} c_s^2 = \Phi(z)$$

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

(1) = (2):

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

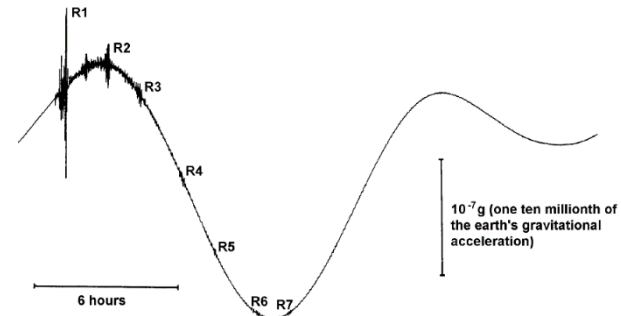
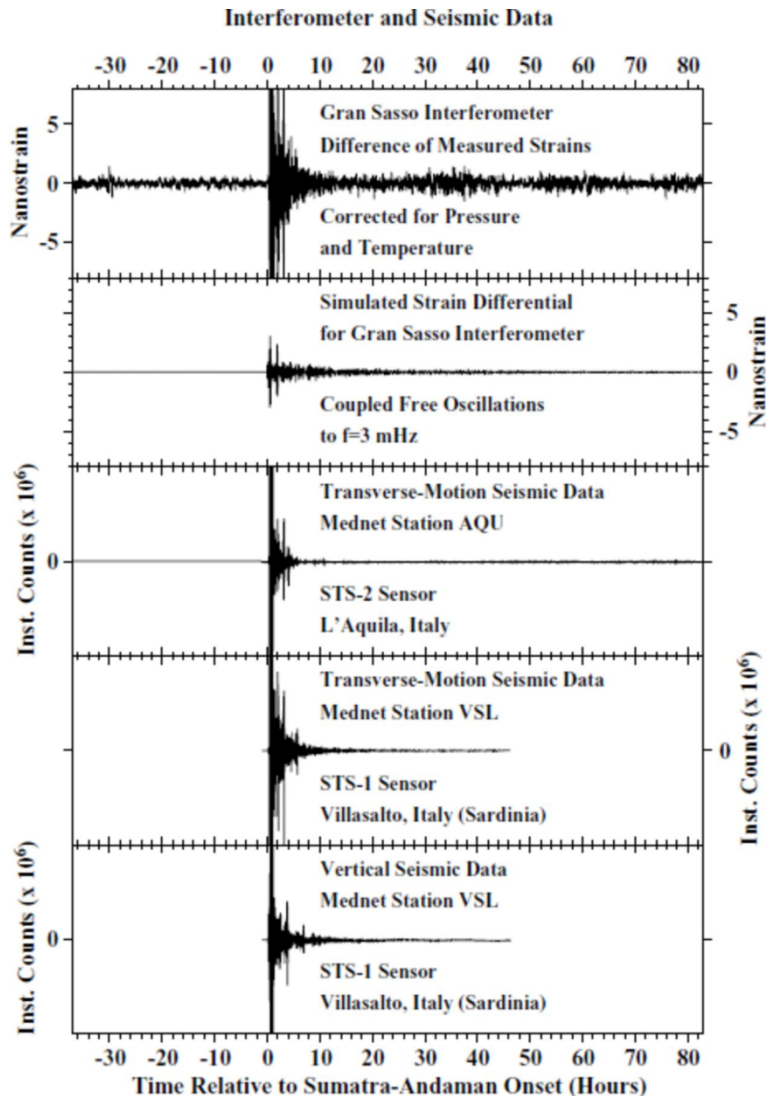
Уравнение Адамса-Вильямсона: проблема



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

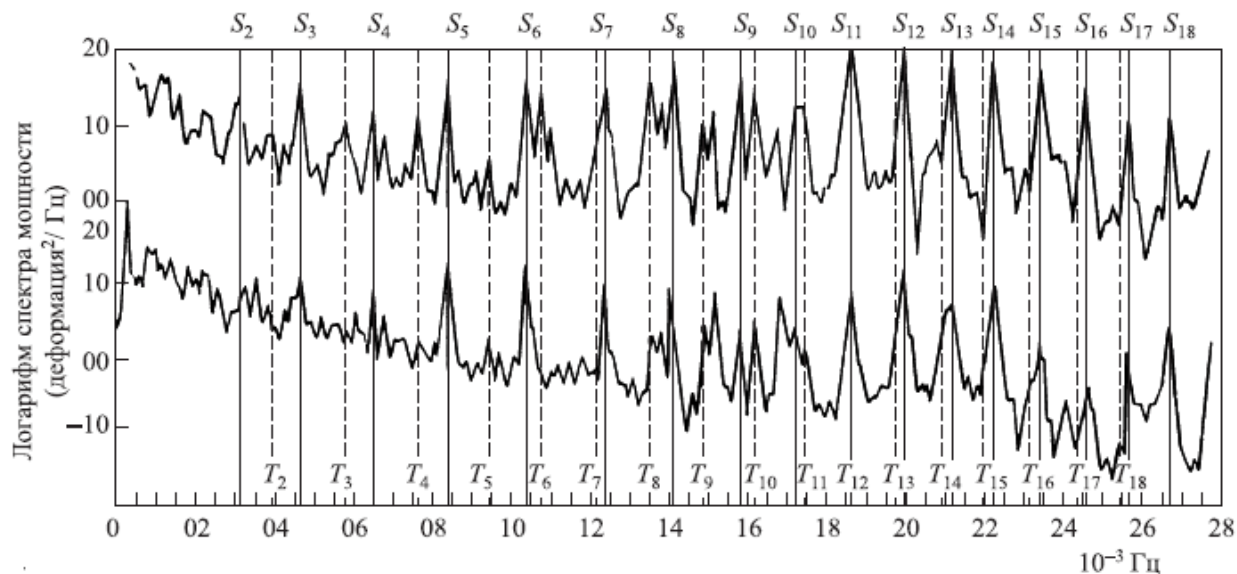
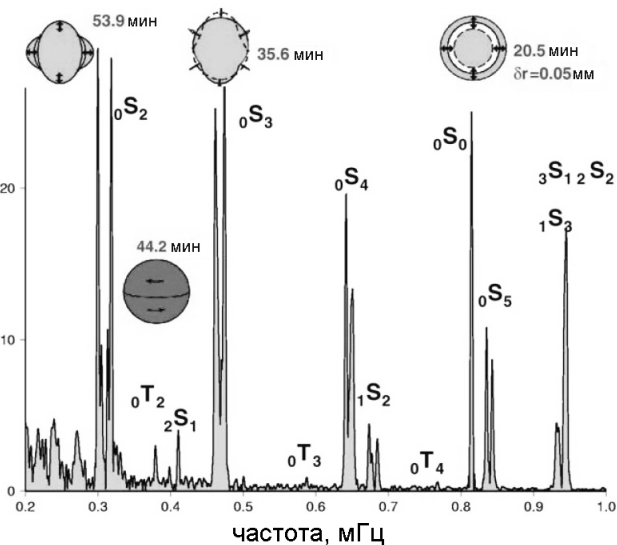
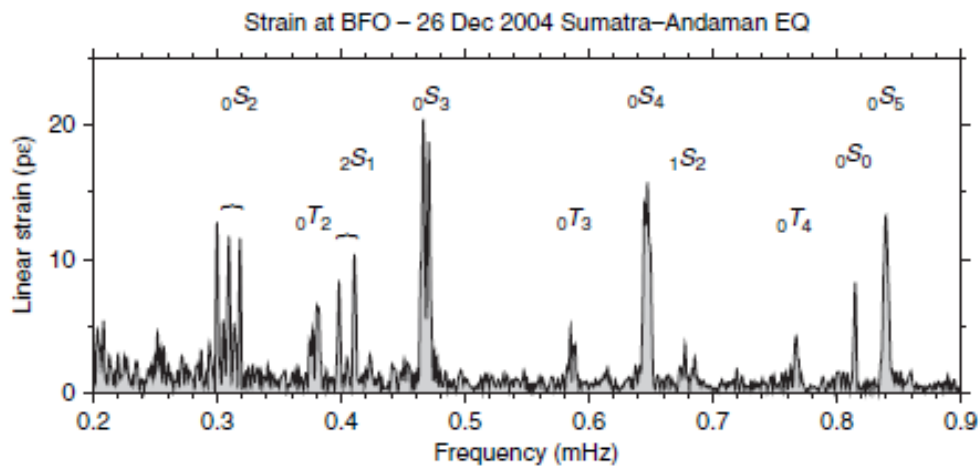
б) Эмпирическое определение плотности

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



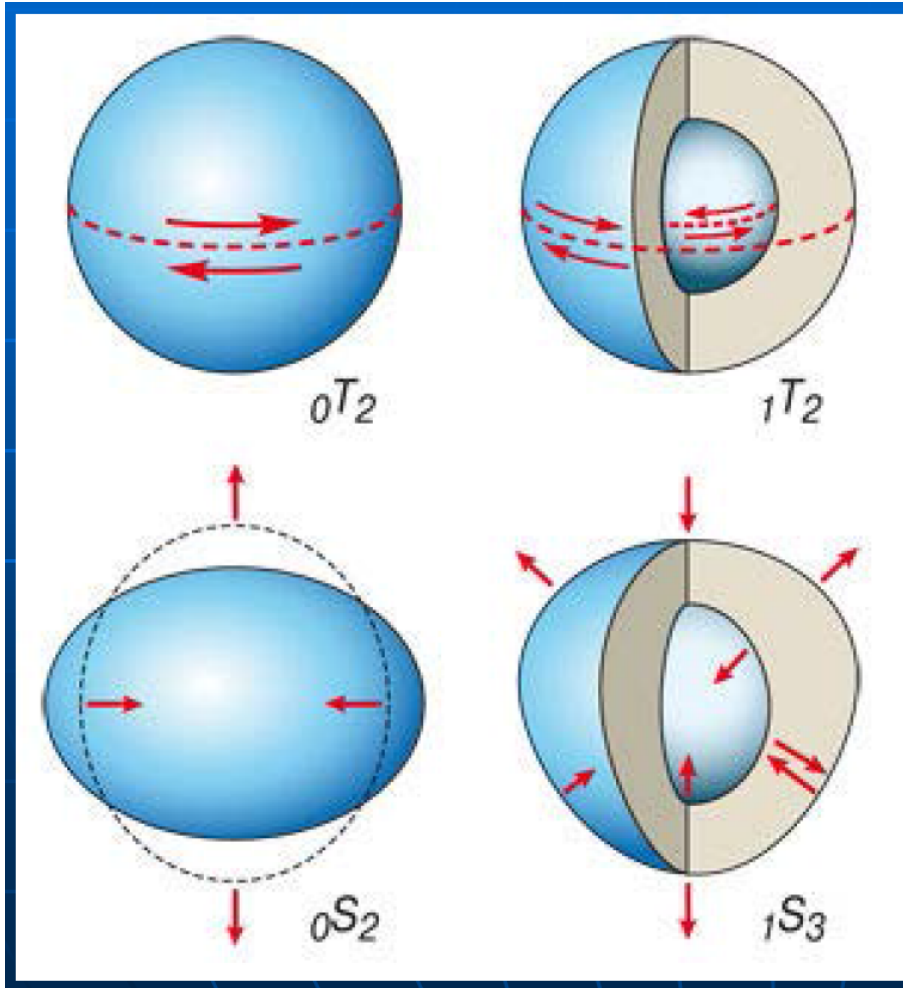
- Собственные колебания Земли (СКЗ): свободные колебания после сильных землетрясений
- Периоды СКЗ определяются распределениями по глубине $K(z)$, $\mu(z)$, $\rho(z)$
- Первая (неуверенная) регистрация деформографом – после Камчатского землетрясения 1952 г.
- Надежная регистрация деформографом и гравиметром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

Спектр СКЗ



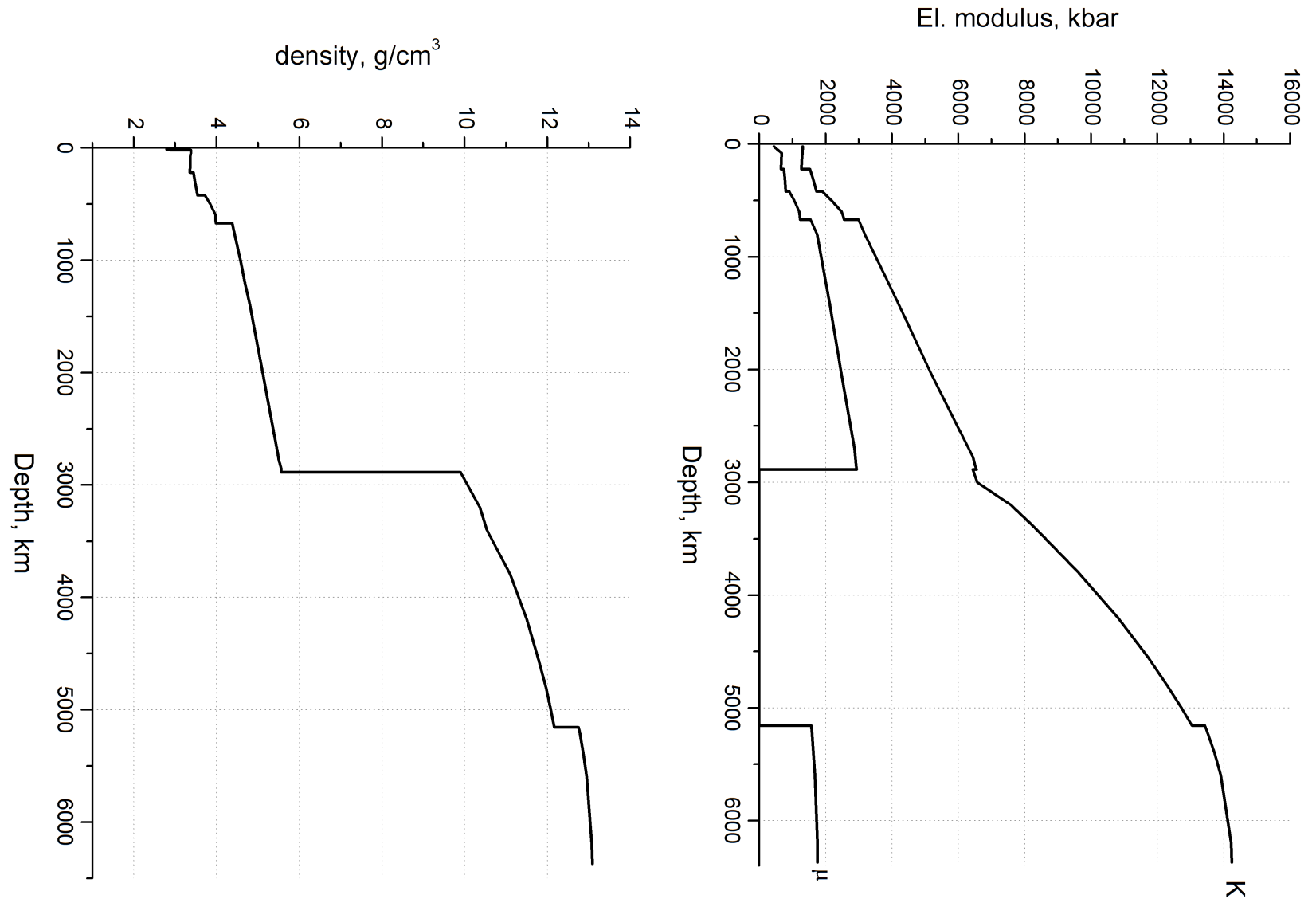
**Диапазон периодов
5 – 55 минут**

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



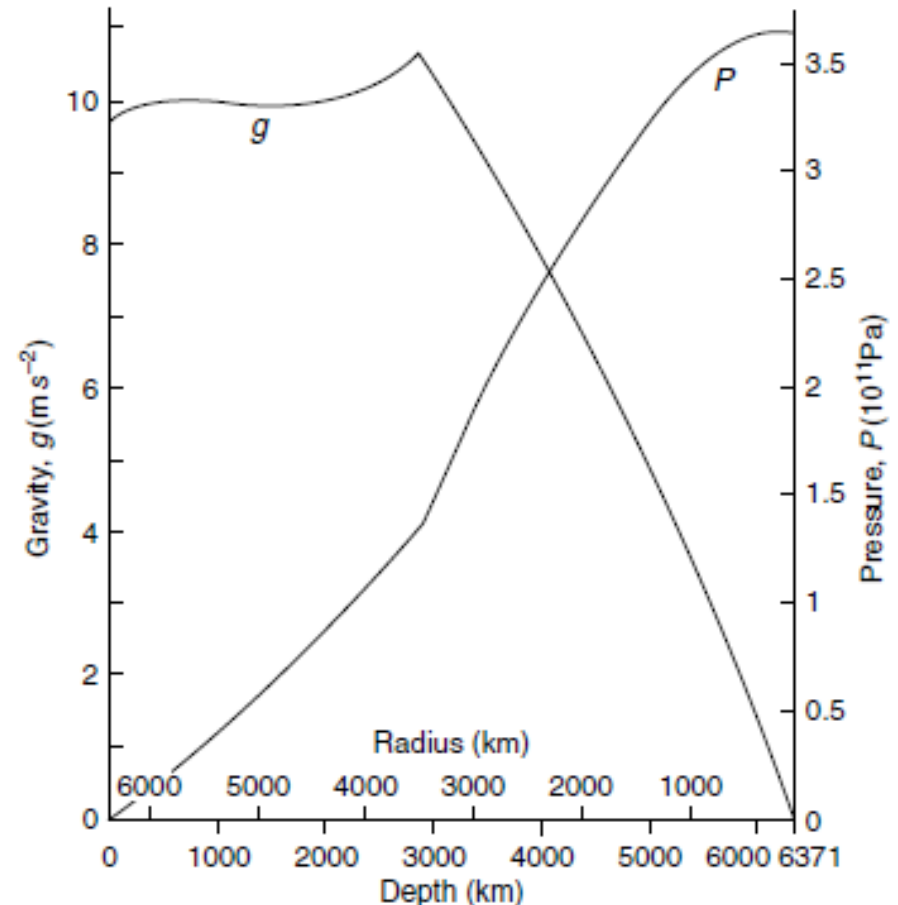
Ускорение силы тяжести и давление

- Ускорение силы тяжести

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

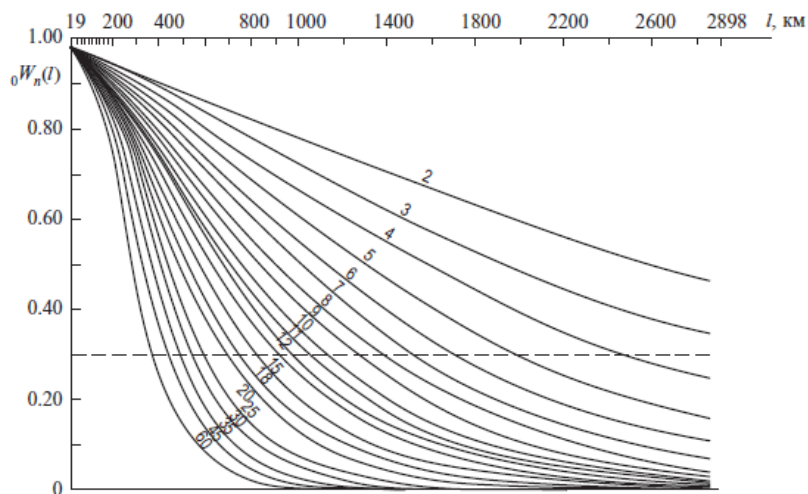
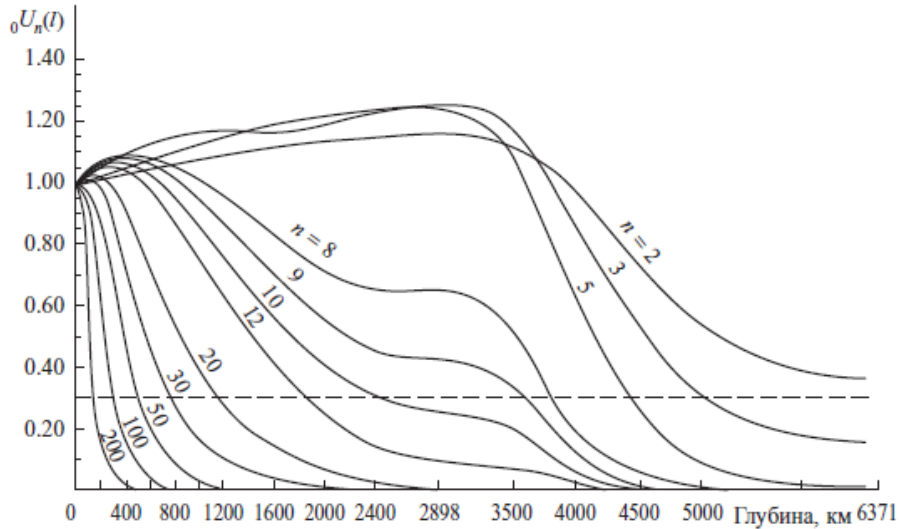
- Давление

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



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 τ_n , получают зависимость добротности Q_n от глубины

Распределение добротности по глубине

(Жарков, 2013)

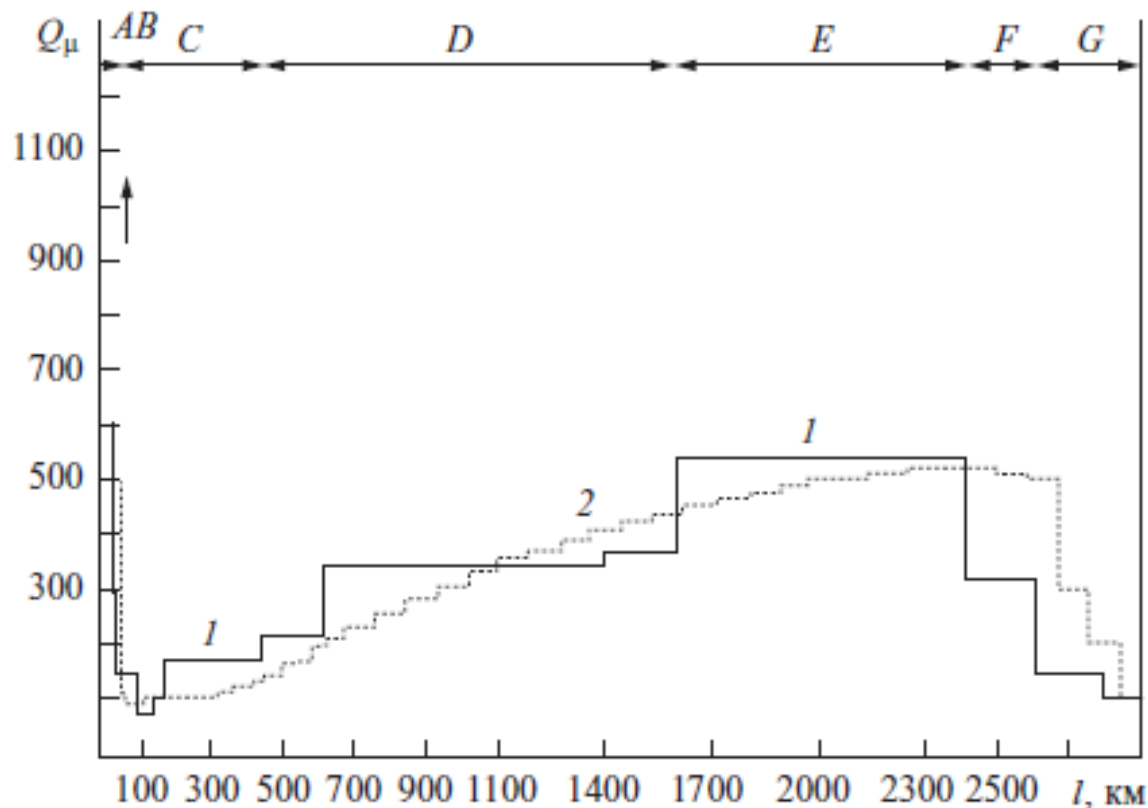
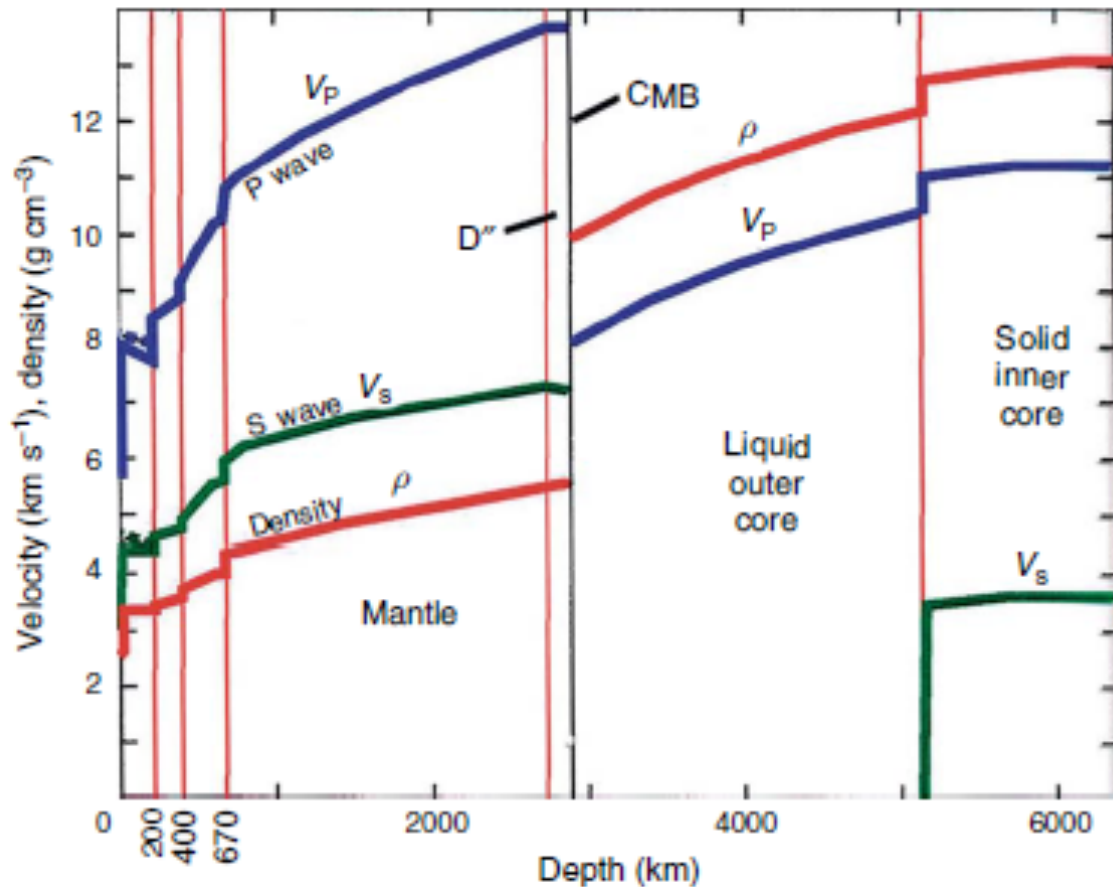


Рис. 21. Распределение механической добротности $Q_\mu(l)$ в коре и мантии Земли

A (0–38 км) — 1-я зона высоких Q_μ (упругая литосфера); B (38–90 км) — неупругая литосфера; C (90–450 км) — 1-я зона низких Q_μ ; D (450–1600 км) — 1-я зона промежуточных Q_μ ; E (1600–2400 км) — 2-я зона высоких Q_μ , F (2400–2600) — 2-я зона промежуточных Q_μ ; G (2600–2885 км) — 2-я зона низких Q_μ . 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 _μ
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)

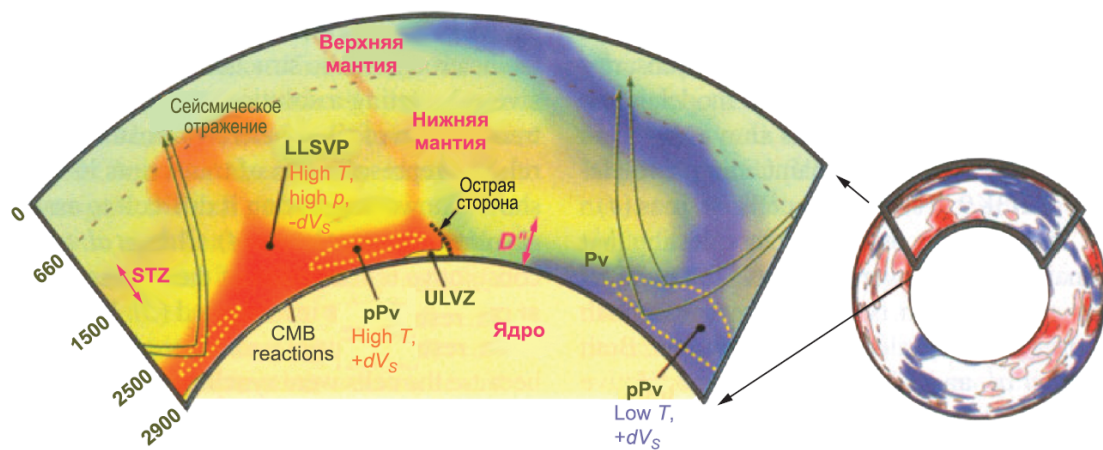
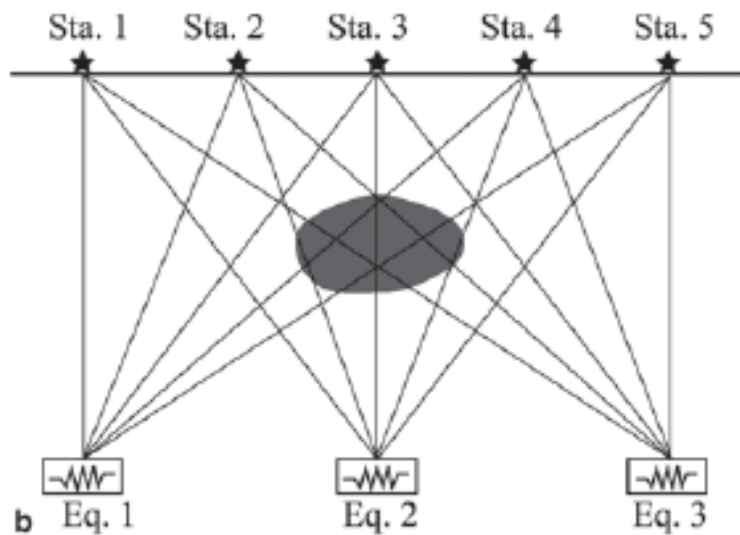


Рис. 65. Изображение, полученное методом сейсмической томографии [Ritsema et al., 2004] зон больших и малых вариаций скоростей поперечных волн в мантии Земли (си-

«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