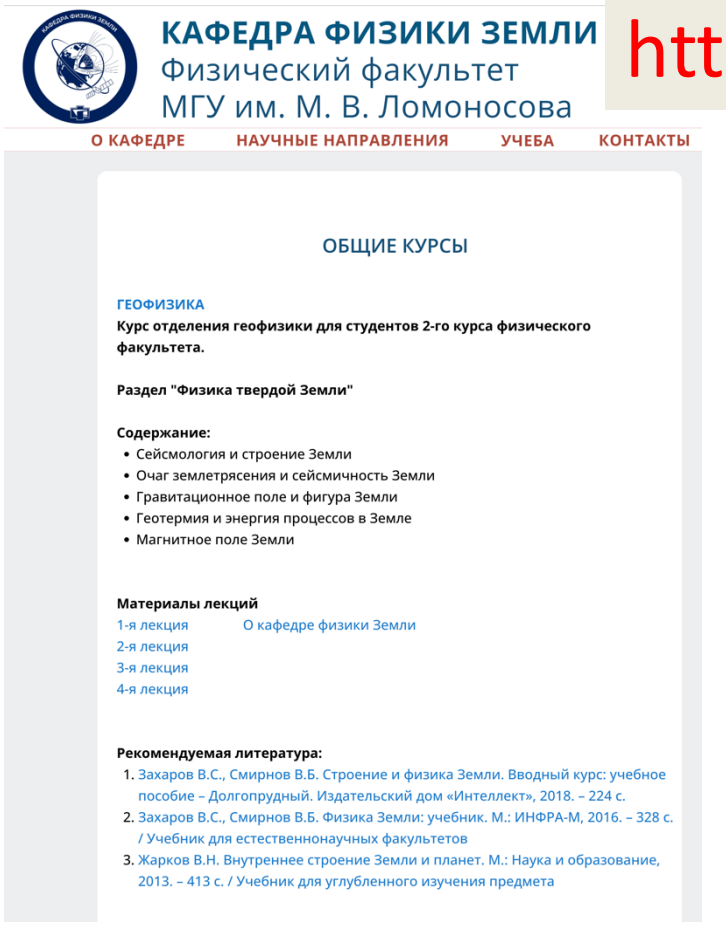
Геофизика 2026 Лекция № 3

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

Физика твердой Земли (лекция 2)



https://earthphysics.ru/students

Смирнов Владимир Борисович
заведующий кафедрой
физики Земли
vs60@mail.ru

Физика 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

Землетрясения

Разрушение зданий

Падение зданий

Пожары

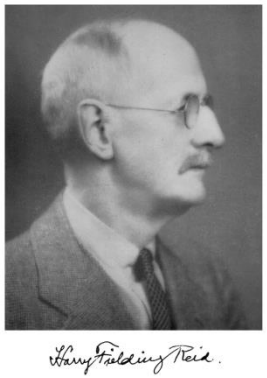
За 4000 лет от землетрясений погибли 13 миллионов человек

«Очаговая» сейсмология

- Очаг землетрясения
- Принцип регистрации сейсмических колебаний
- Локация землетрясений
- Величина землетрясения
- Закон повторяемости землетрясений
- География землетрясений
- Проблема прогноза землетрясений

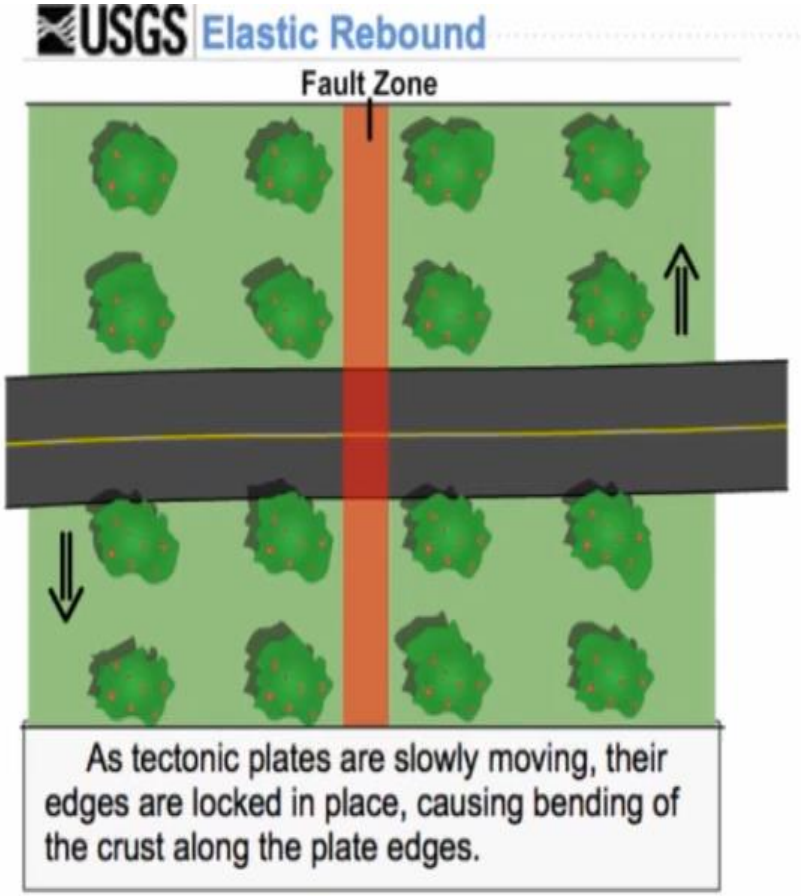
Полезный сайт: http://seismos-u.ifz.ru/personal/index.htm

Землетрясение Сан-Франциско, 1906

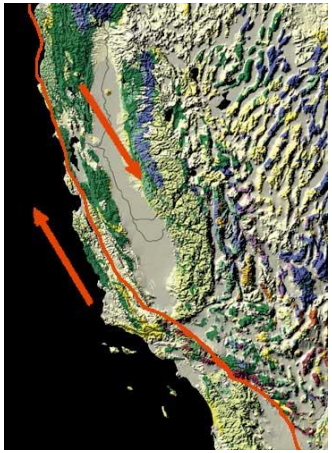


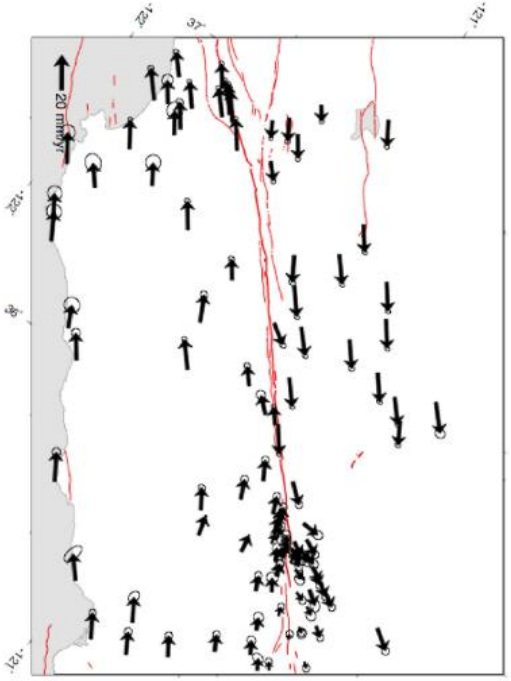
Теория упругой отдачи (Гарри Филдинг Рейд, 1911г.)

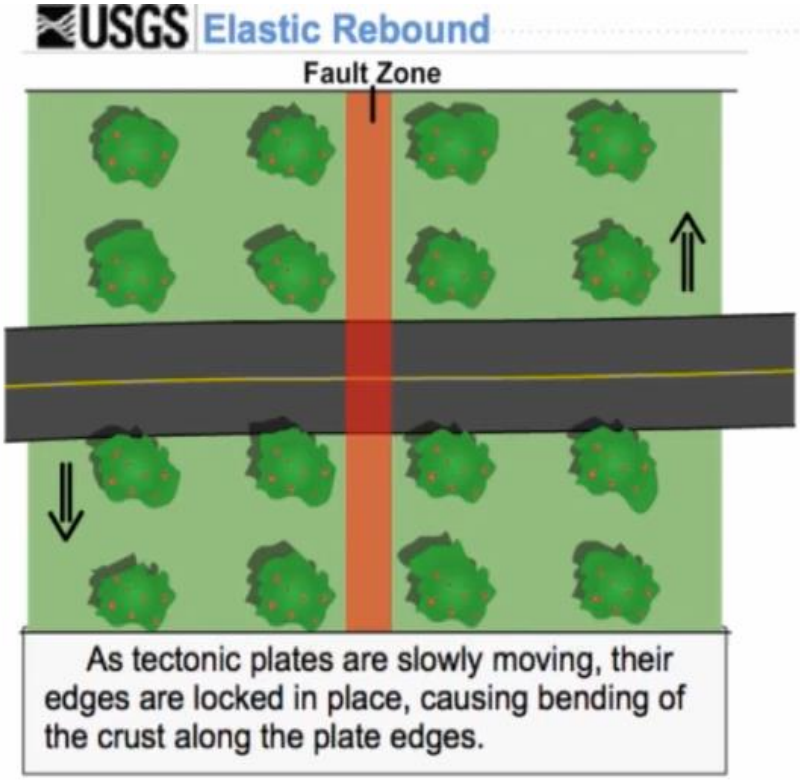
- Очаг землетрясения – **разрыв** сплошности среды.
- Разрыв возникает, когда величина внешних напряжений **превосходит предел прочности** горных пород
- Разрыв сопровождается резкой **подвижкой**, генерирующей сейсмические волны
- Энергия, высвобождаемая при землетрясении, есть доля накопленной упругой энергии (0.3%-5%)

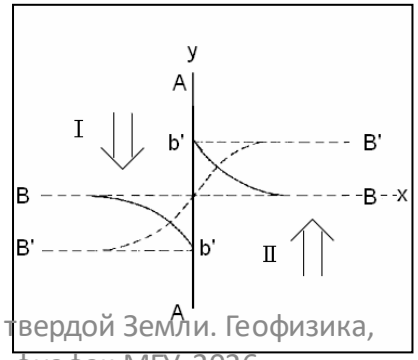


Теория упругой отдачи: современные данные









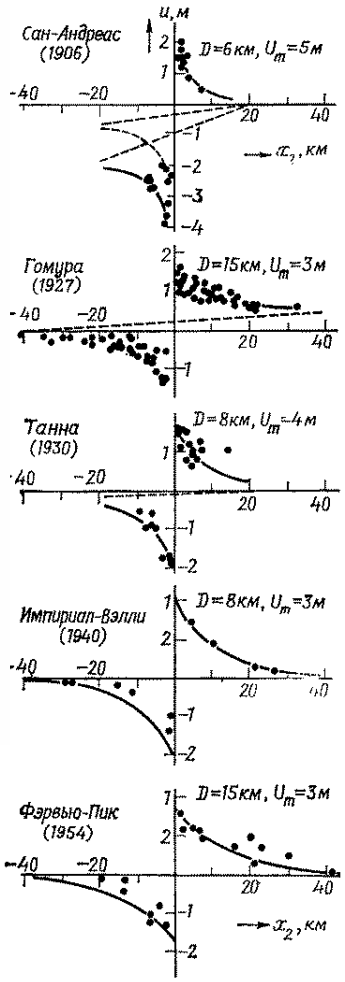


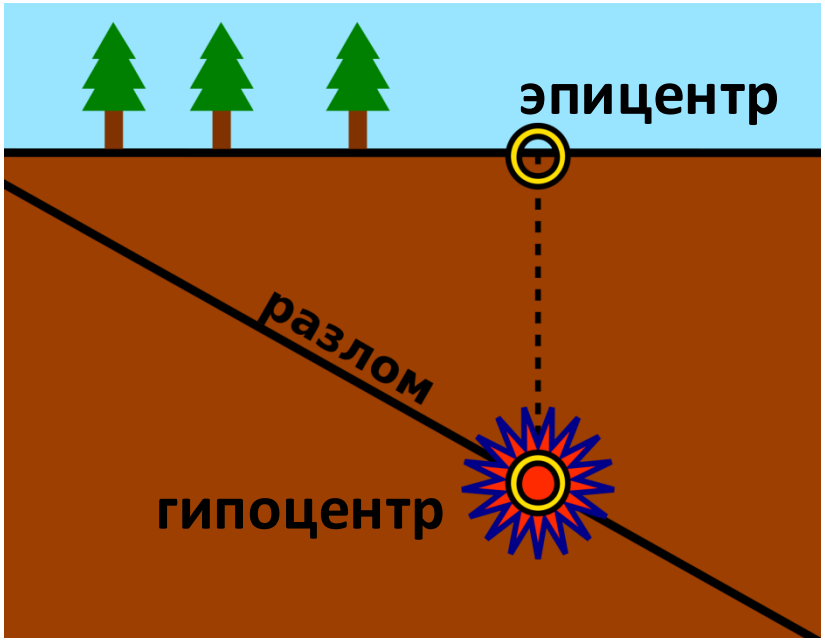
Рис. 4.9. Смещения поверхности (параллельно простиранию разлома), обусловленные несколькими характерными разломами с подвижкой по простиранию, в сравнении со значениями, рассчитанными теоретически на основе модели с подвижкой по простиранию (рис. 4.7).

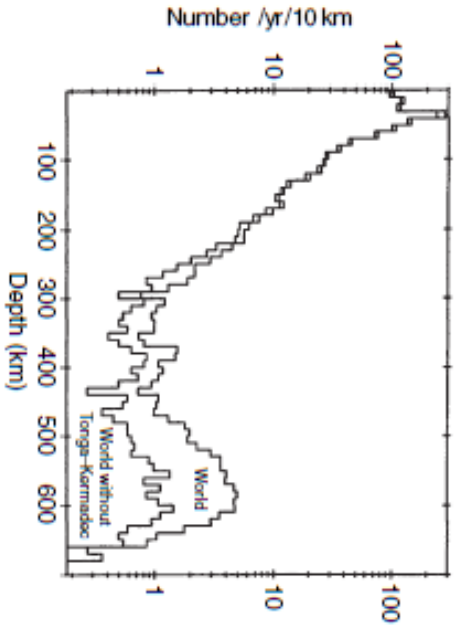
Пазарджыкское землетрясение Турция, 6 февраля 2023 года, M7.8

Смещение на поверхности более 5 м.

Челик и др., «Физика Земли», 2023, №6.

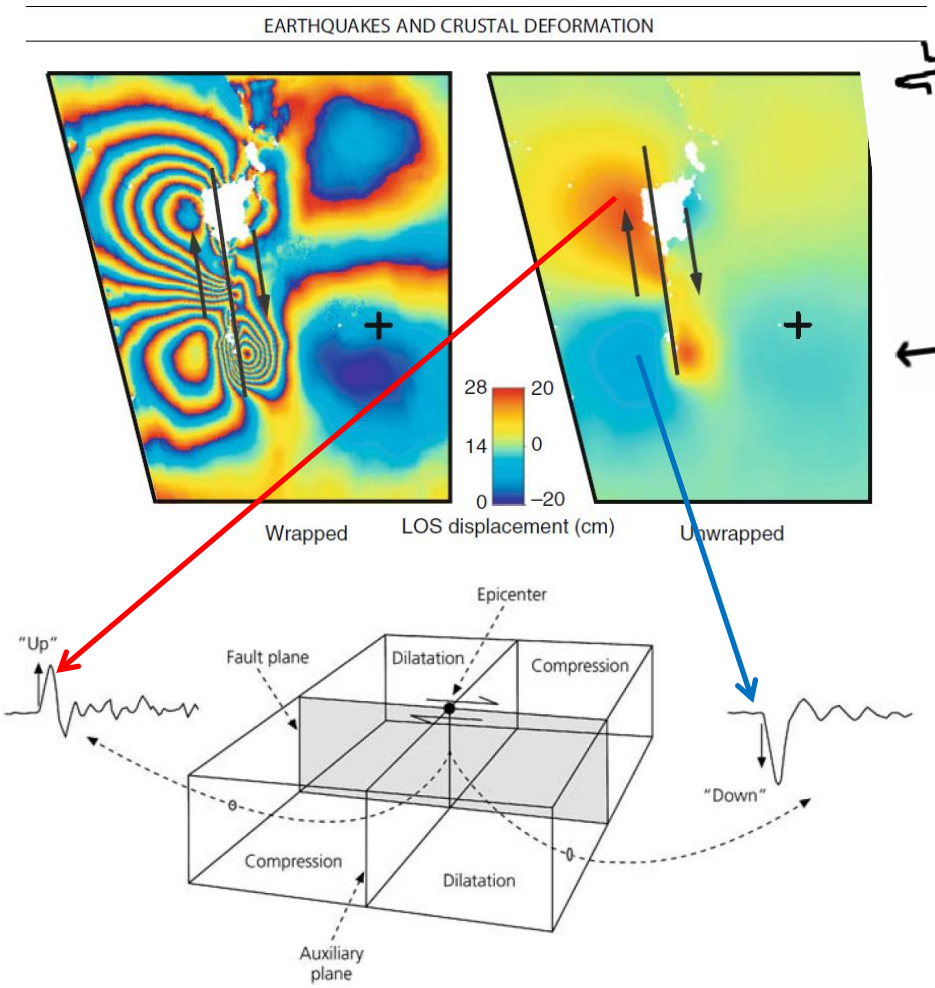
Терминология:
гипоцентр (фокус) и эпицентр землетрясения

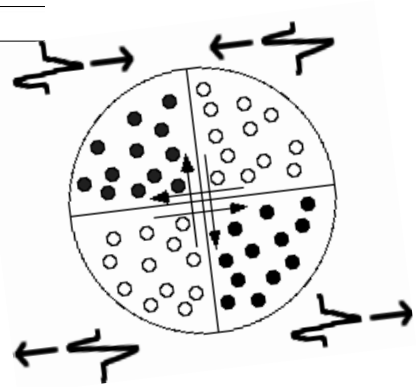


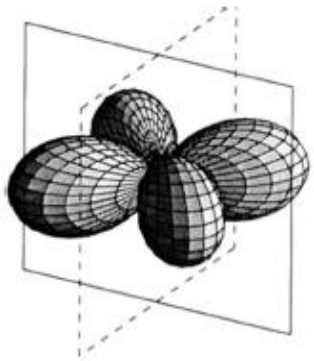


- 80% землетрясений – на глубинах от 0 до 80 км (внутри литосферы Земли)
- Самые глубокие землетрясения имеют глубину около 800 км

Очаг землетрясения: диаграмма направленности излучения волн







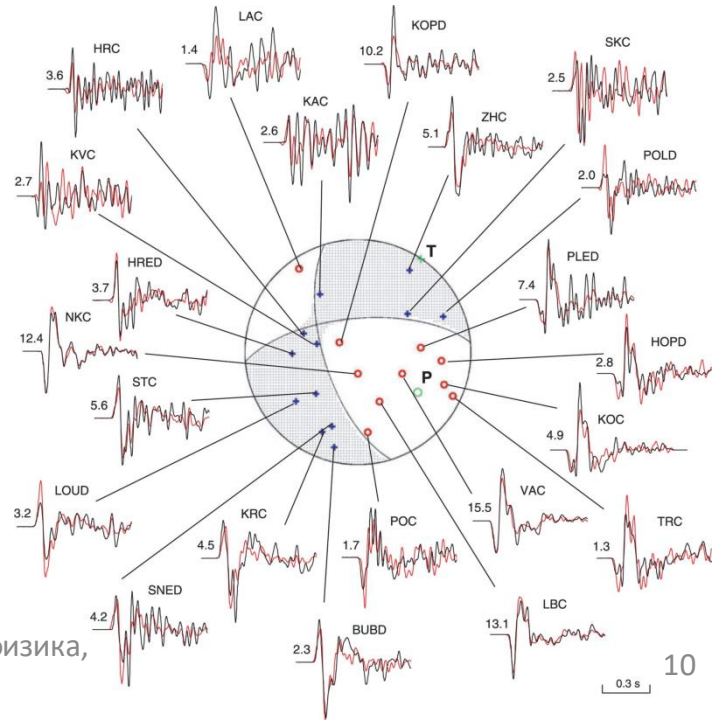
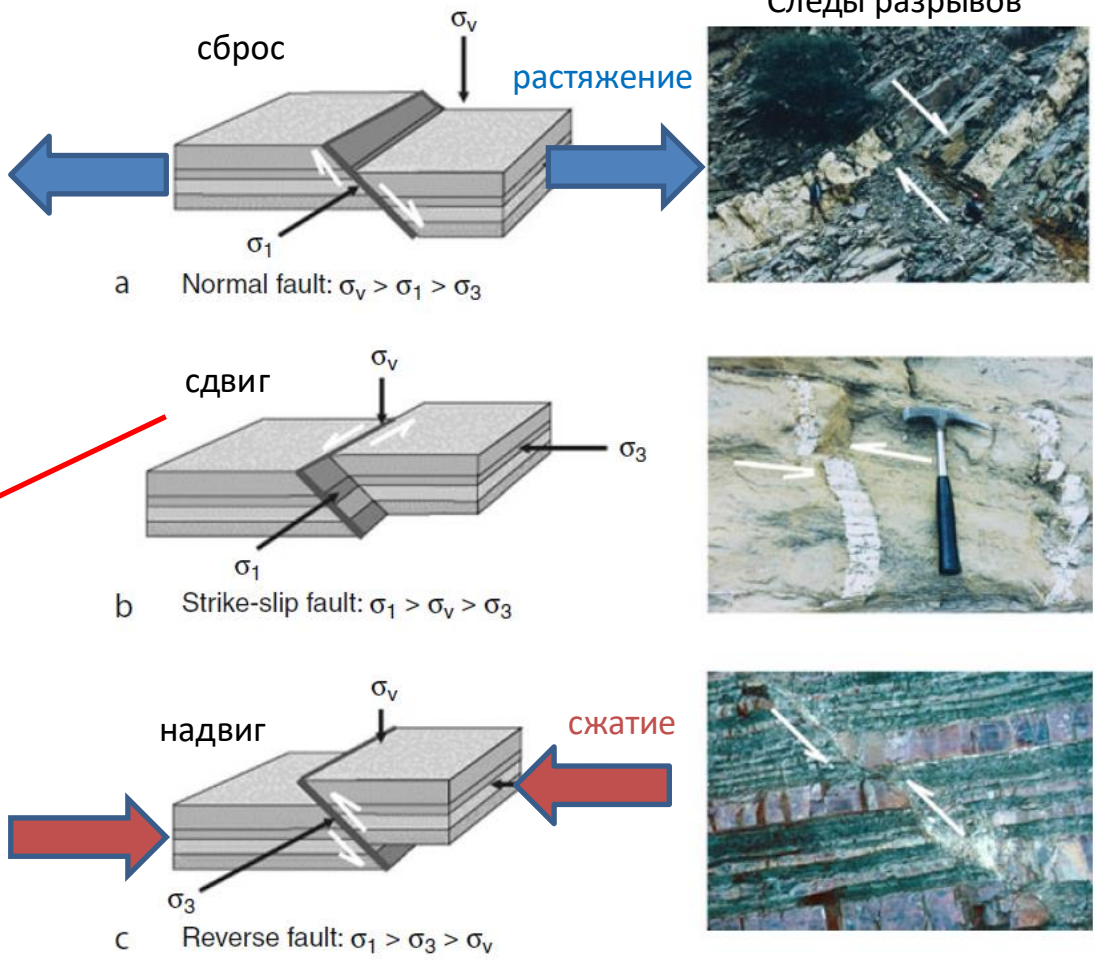


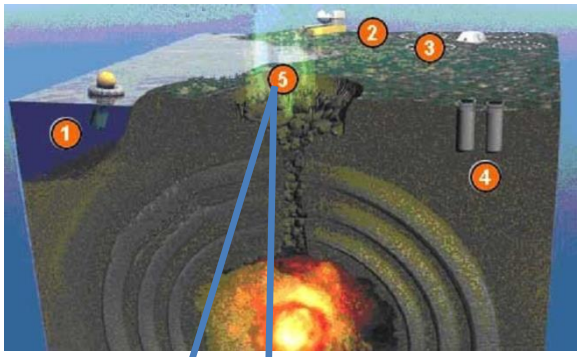
Fig. 1.12 First motion of P observed at different directions relative to the fault plane. The arrows in the fault plane show the relative slip direction in the fault plane. Figure from Stein and Wysession (2003) and copied from http://epscx.wustl.edu/seismology/book/book_no_captions/figures/

Типы разрывов в очагах землетрясений

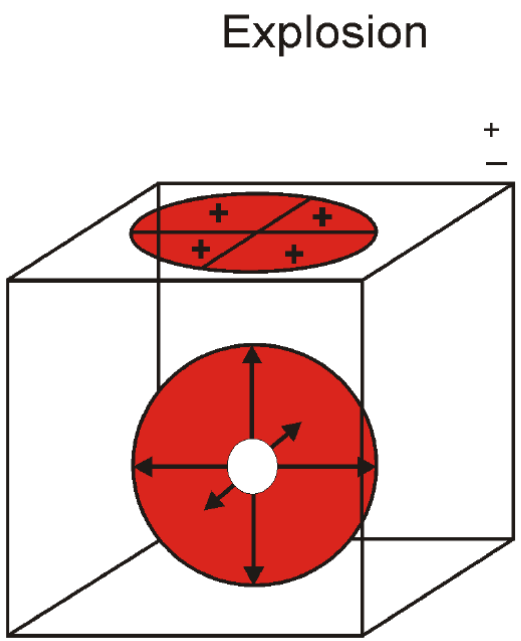


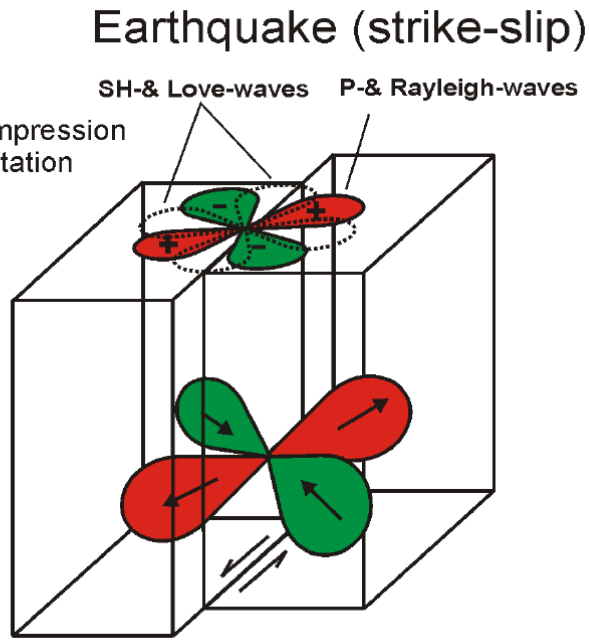
Ядерные взрывы и землетрясения (военно-прикладная сейсмология)

Схема подземного ядерного взрыва



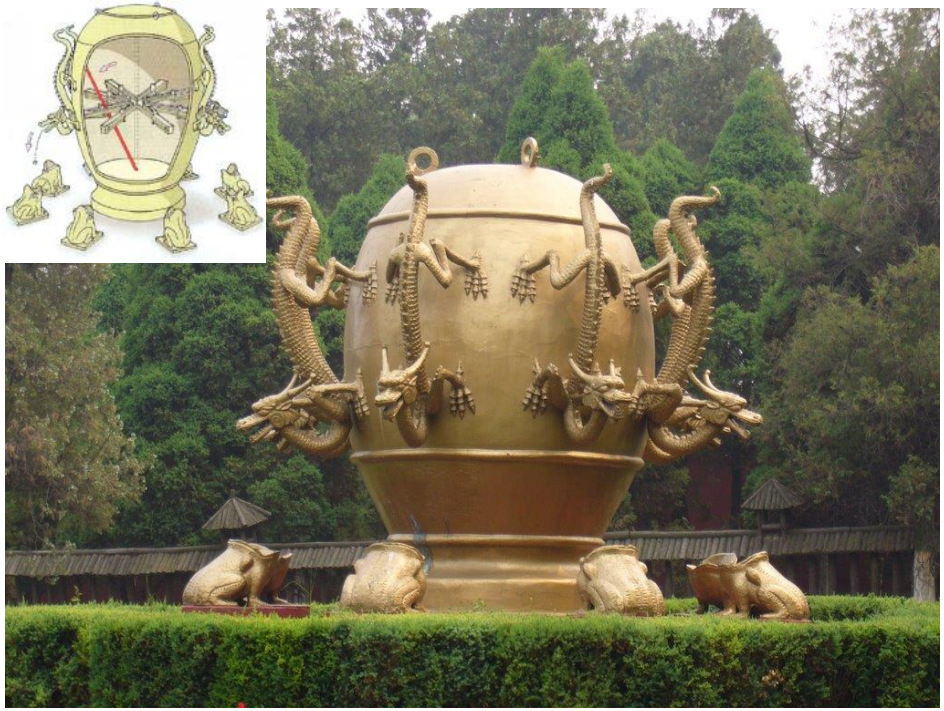
Воронки от взрывов на Семипалатинском полигоне



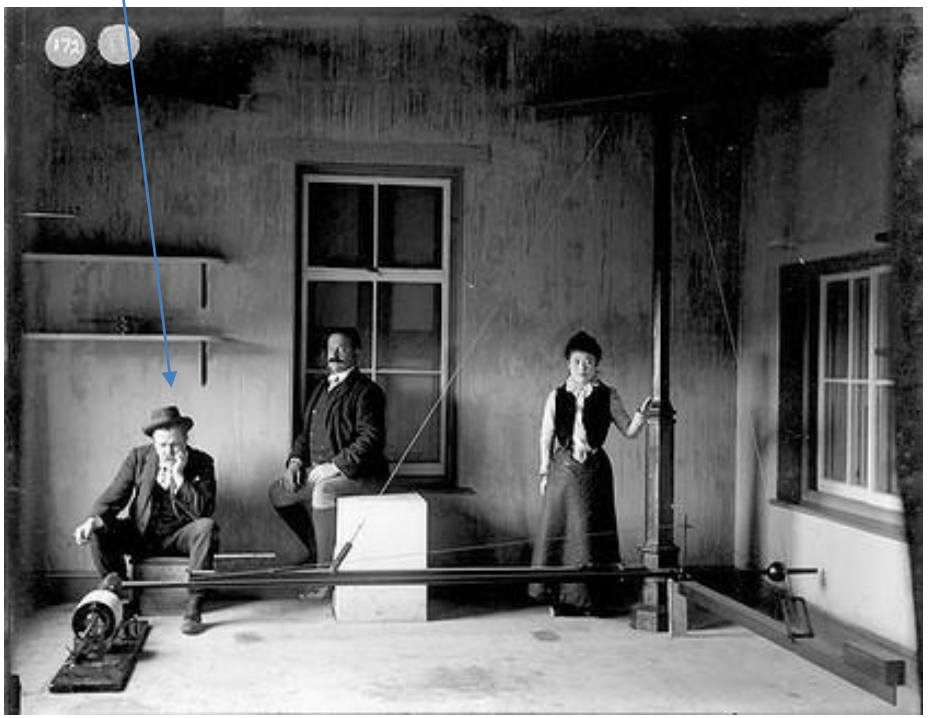


Исторические сейсмические инструменты

Первый сейсмоскоп
Чжан Хэн (Китай), 132 г. н.э.



Сейсмограф Милна (1880)
(John Milne, Б.Б.Голицын, Tone Milne (Harikaw))



Принцип регистрации сейсмических колебаний

Принцип работы сейсмографа

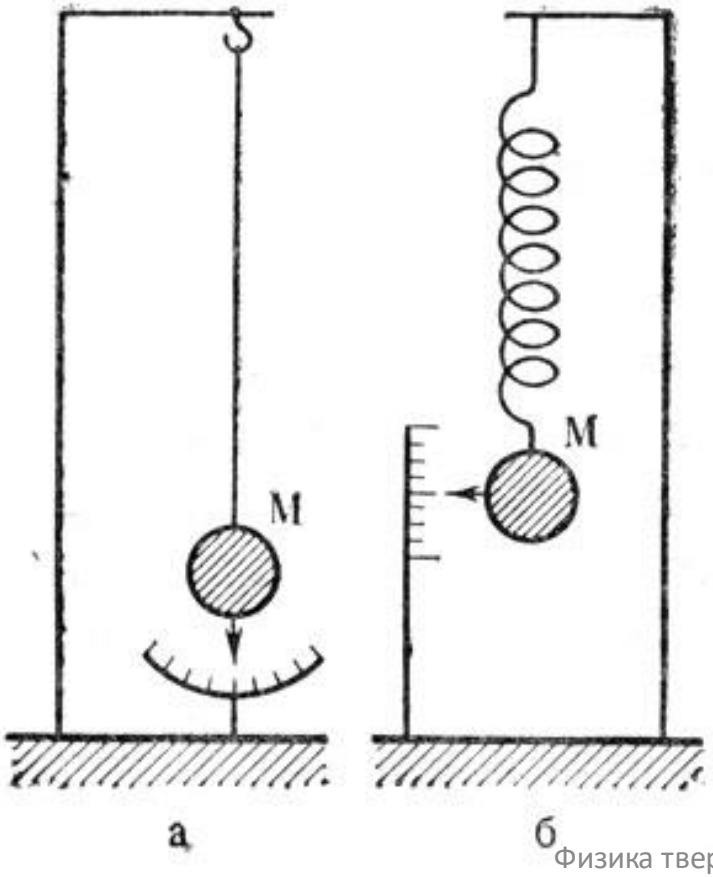
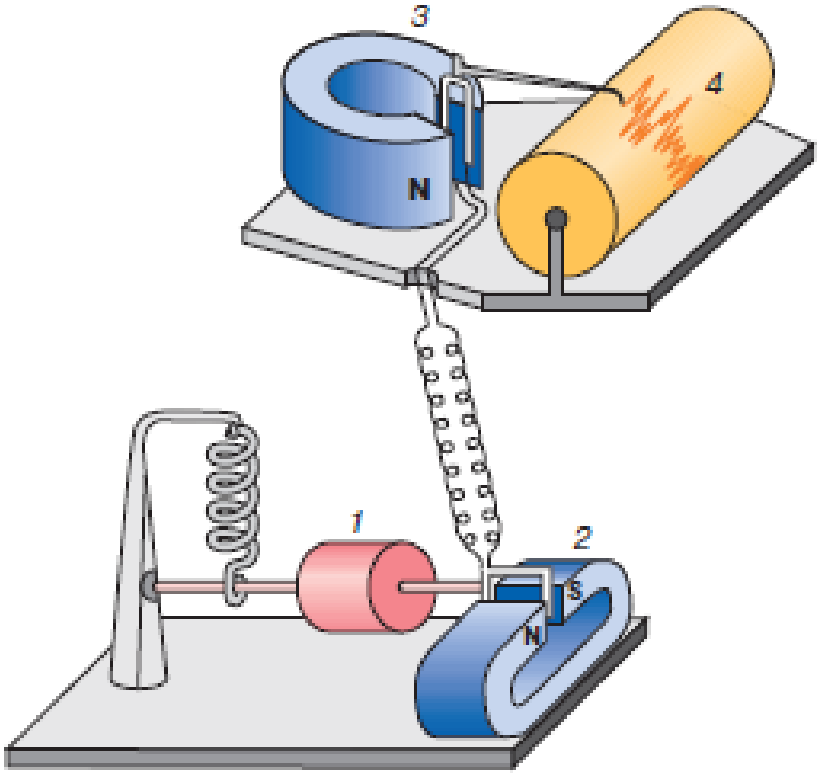


Схема сейсмографа Голицына с электромагнитным преобразователем (1906)



Современные сейсмометры

Академик Б.Б.Голицын

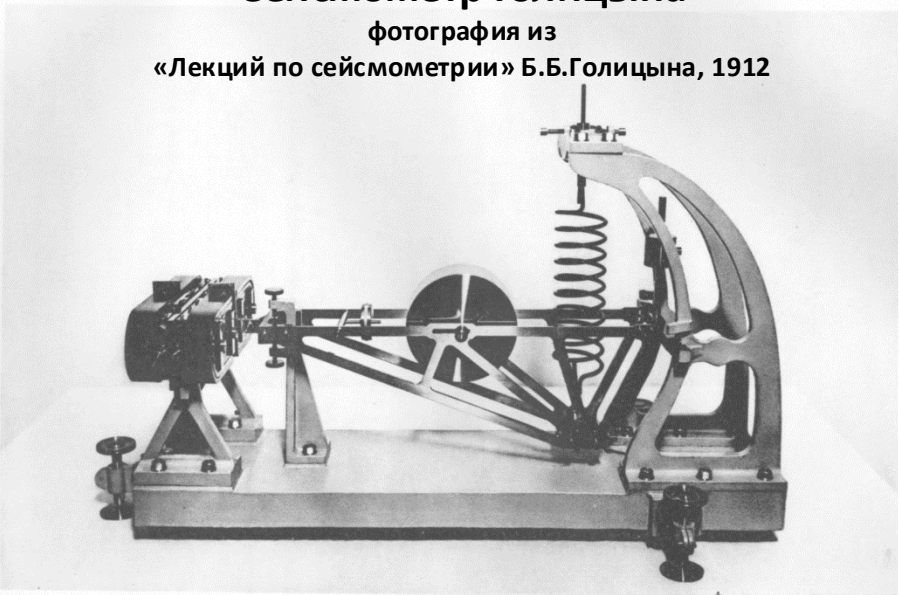
STS-1 и его АЧХ

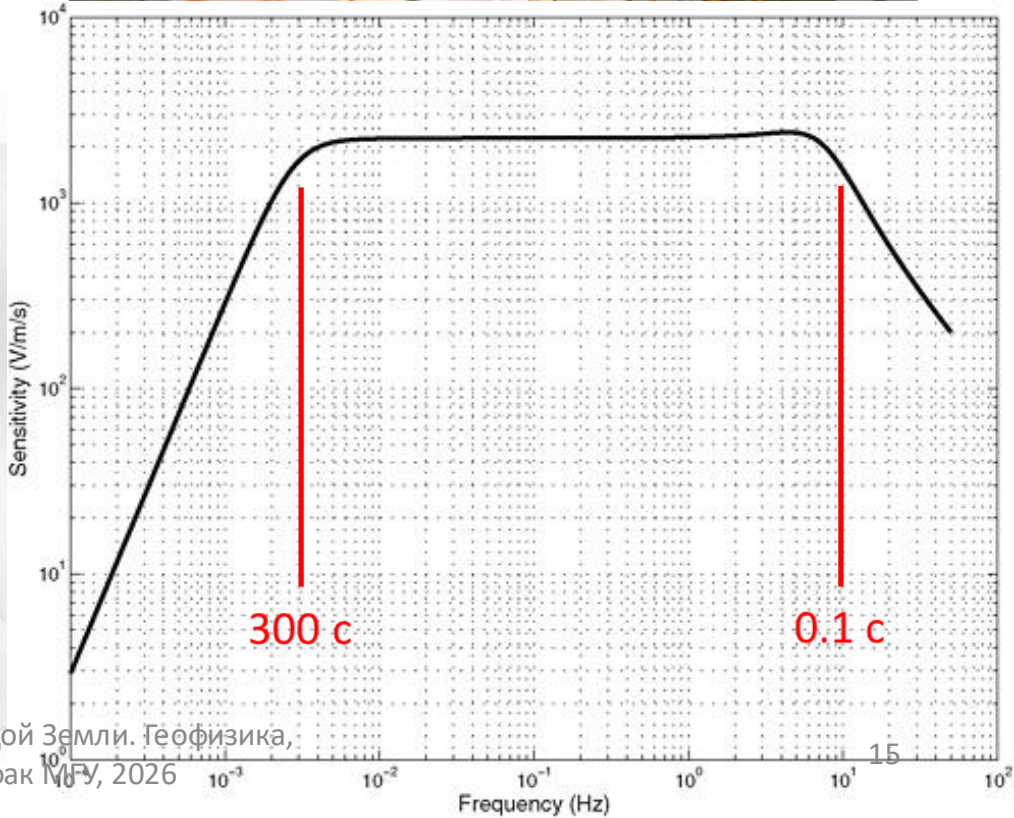
Рис. 84.

Сейсмометр Голицына

фотография из

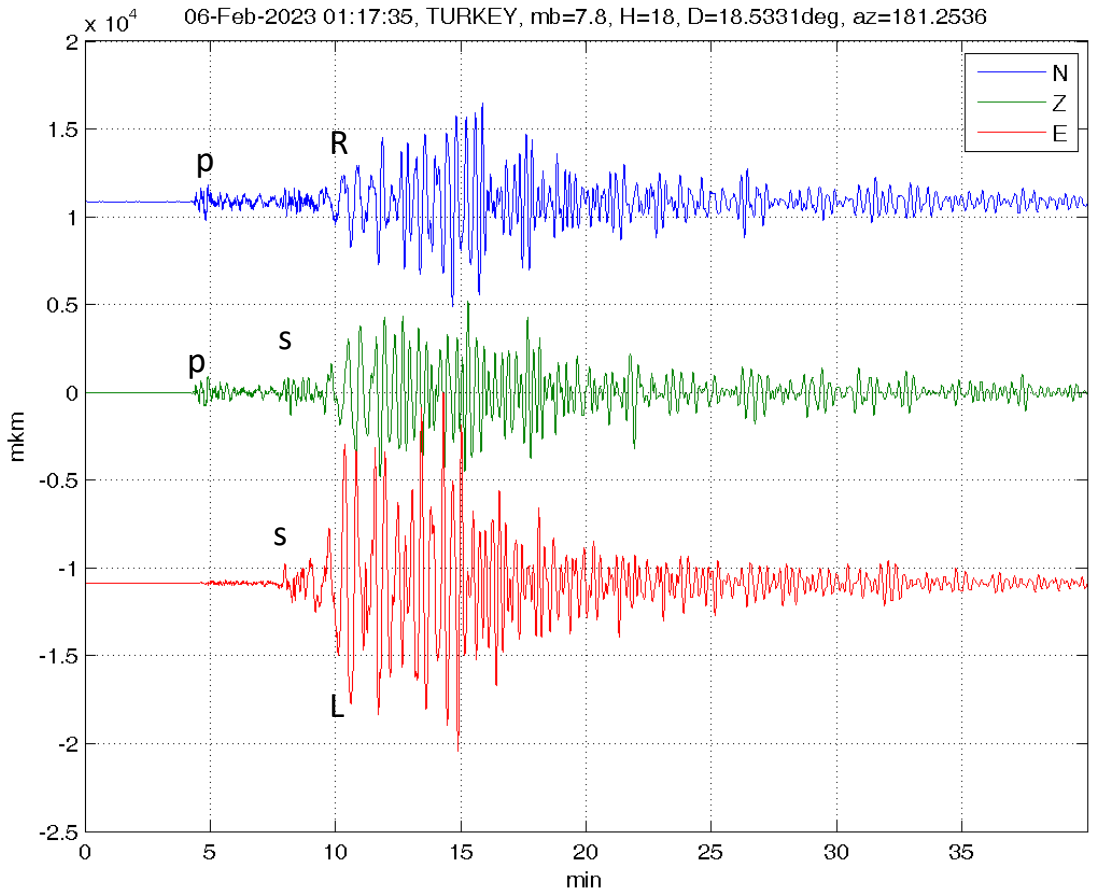
«Лекций по сейсмометрии» Б.Б.Голицына, 1912



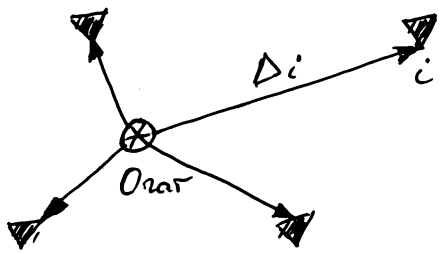


Сейсмограмма землетрясения

Запись волн землетрясения в Турции 6 февраля 2023 г. Mw7.8 сейсмической станцией физического факультета МГУ



Локация землетрясений (задача гипоцентрии)



Очаг

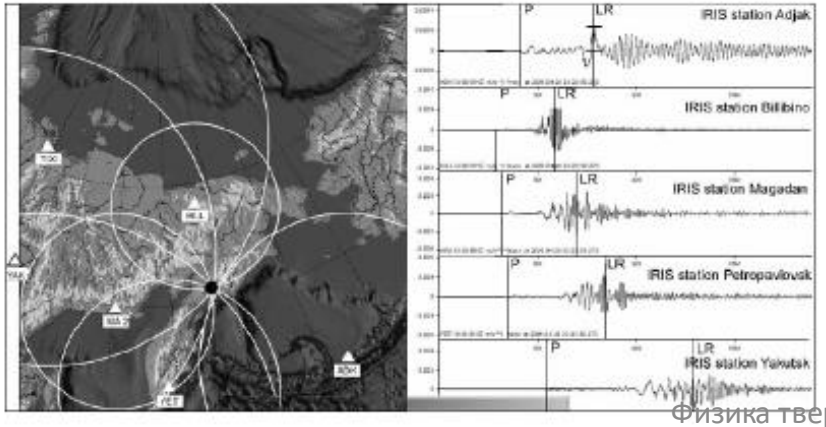
X_0, Y_0, Z_0, t_0

n станций

X_i, y_i, z_i, t_i

$$t_i = t_0 + \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{C}$$

С.у. – n уравнений относительно 4-х неизвестных: X_0, Y_0, Z_0, t_0.



Определение положения эпицентра Олюторского землетрясения 2006 г.

Для локации очага землетрясения и отыскания времени его возникновения необходимо иметь записи минимум на 4-х сейсмических станциях.

Из-за наличия погрешностей во временах вступления ***ti*** и скоростях волн ***C*** систему уравнений приходится решать методами статистики. В этом случае желательно иметь записи более, чем на 4-х сейсмических станциях (обычно используют не менее 7-10)

Магнитуда

Чарльз Рихтер

Bulletin of the Seismological Society of America

VOL. 25 JANUARY, 1935 No. 1

AN INSTRUMENTAL EARTHQUAKE MAGNITUDE SCALE*

By Charles F. Richter

In the course of historical or statistical study of earthquakes in any given region it is frequently desirable to have a scale for rating these shocks in terms of their original energy, independently of the effects which may be produced at any particular point of observation. On the suggestion of Mr. H. O. Wood, it is here proposed to refer to such a scale as a "magnitude" scale. This terminology is offered in distinction from the name "intensity" scale, now in general use for such scales as the Rossi-Forel and Mercalli-Cancani scales, which refer primarily to the local intensity of shock manifestation.

Магнитуда

- Введена американским сейсмологом Чарльзом **Рихтером** (1935)
- Иногда – ***неправильно*** – называется «баллами» по шкале Рихтера
- Шкала – **непрерывная**, баллами не является
- Величина магнитуды пропорциональна логарифму энергии землетрясения

lgE(Дж)=1.5Ms+4.8

lgE(Дж)=2.4mb-5.8

mb=0.63Ms+2.5

- Основные типы магнитуд:
  - магнитуда **mb** – определяется по амплитудам объемных волн (отсюда b – body)
  - магнитуда **Ms** – определяется по амплитудам поверхностных волн волн (отсюда S – surface)

Ms	E, Дж
6	6.3E+13
7	2.0E+15
8	6.3E+16
9	2.0E+18

M1-M2=1 -> E1/E2=31.6

$$M_S = \log(A/T)_{max} + 1.66 \log \Delta + 3.3$$

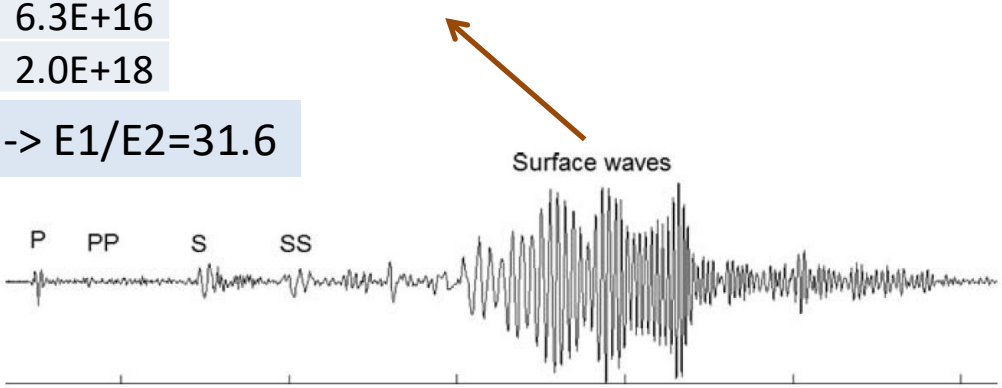
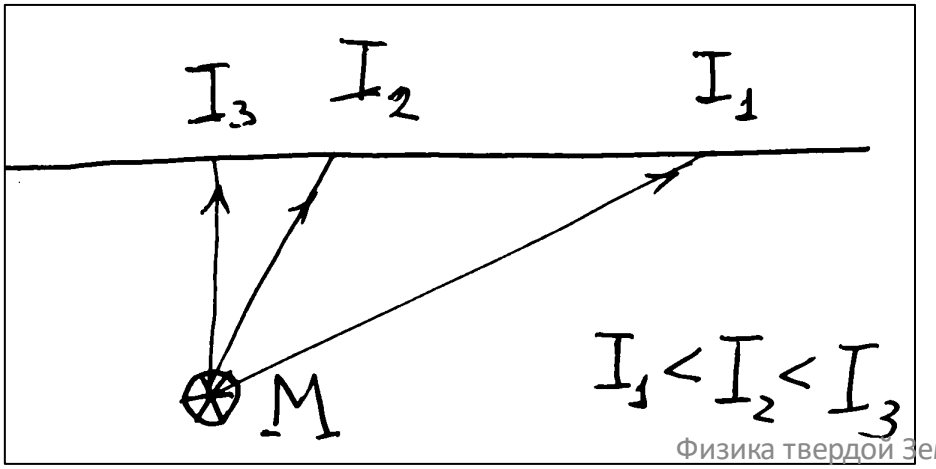


Fig. 6.14 LP seismogram of a large earthquake recorded on KBS, vertical channel. The origin time is 2001/01/26 17:33, m_b(ISC) is 6.3 and M_S is 7.8 (PDE). Epicentral distance is 79°

Магнитуда и интенсивность

- **Магнитуда землетрясения M** – характеристика **очага** землетрясения
- Для каждого землетрясения – **одна магнитуда**



- **Интенсивность I** (или сотрясаемость) – характеристика проявления землетрясения **на поверхности** Земли
- Для каждого землетрясения – **разные интенсивности** в разных точках поверхности

Макросейсмическая шкала: интенсивность землетрясения, сотрясаемость

- Шкала баллов
- В разных странах используются разные шкалы
  - Россия – 12-ти бальная
  - Япония – 9-ти бальная
- В 12-ти бальной шкале: увеличение интенсивности на **1 балл** – увеличение ускорения грунта в **2 раза**

$$I = log_2(a) + const$$

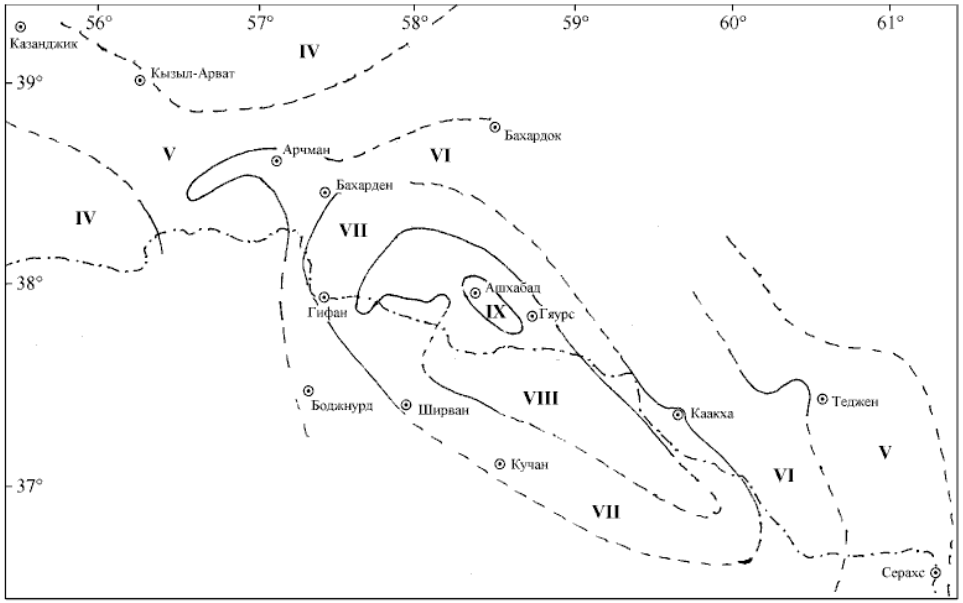
$$I = 7 \quad a = 1\ м/с^2$$

(ГОСТ Р 53166-2008)

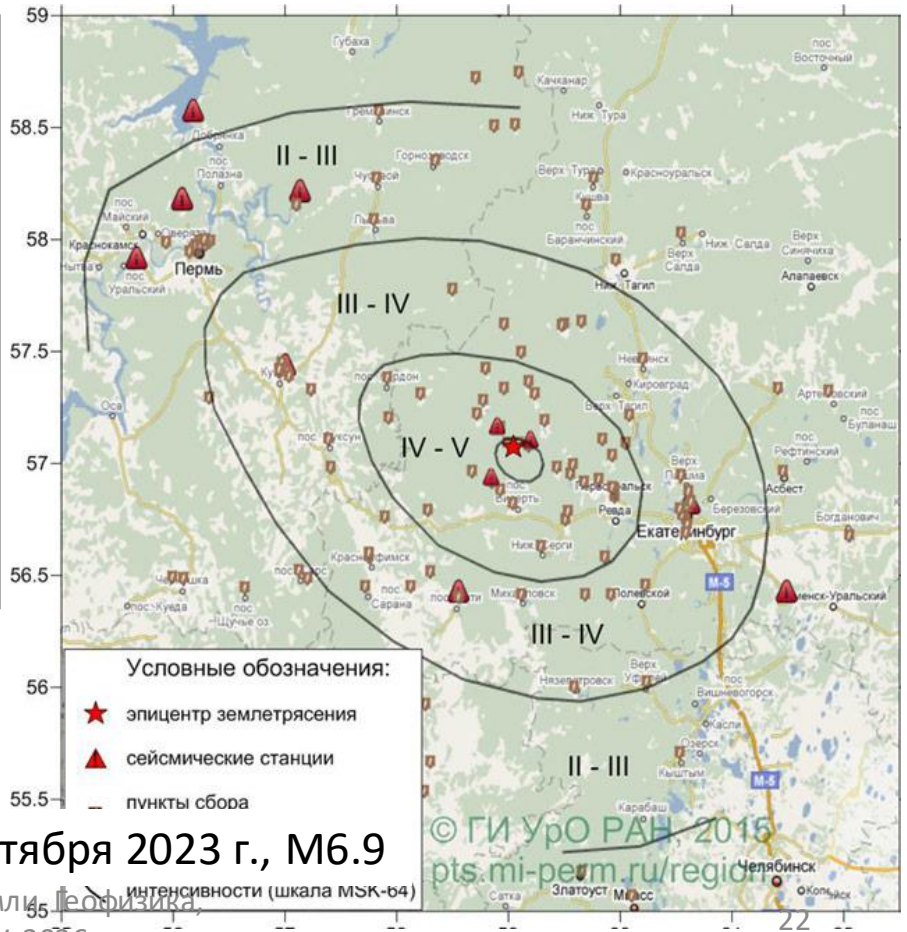
Балл. Сила землетрясения	Краткая характеристика
I. Не ощущается	Не ощущается. Отмечается только сейсмическими приборами.
II. Очень слабые толчки	Отмечается сейсмическими приборами. Ощущается только отдельными людьми, находящимися в состоянии полного покоя в верхних этажах зданий, и очень чуткими домашними животными
III. Слабое	Ощущается только внутри некоторых зданий, как сотрясение от грузовика.
IV. Интенсивное	Распознаётся по лёгкому дребезжанию и колебанию предметов, посуды и оконных стёкол, скрипу дверей и стен. Внутри здания сотрясение ощущает большинство людей.
V. Довольно сильное	Под открытым небом ощущается многими, внутри домов — всеми. Общее сотрясение здания, колебание мебели. Маятники часов останавливаются. Трещины в оконных стёклах и штукатурке. Пробуждение спящих. Ощущается людьми и вне зданий, качаются тонкие ветки деревьев. Хлопают двери.
VI. Сильное	Ощущается всеми. Многие в испуге выбегают на улицу. Картины падают со стен. Отдельные куски штукатурки откалываются.
VII. Очень сильное	Повреждения (трещины) в стенах каменных домов. Антисейсмические, а также деревянные и плетневые постройки остаются невредимыми.
VIII. Разрушительное	Трещины на крутых склонах и на сырой почве. Памятники сдвигаются с места или опрокидываются. Дома сильно повреждаются. Падают фабричные трубы.
IX. Опустошительное	Сильное повреждение и разрушение каменных домов. Старые деревянные дома кривятся.
X. Уничтожающее	Трещины в почве иногда до метра шириной. Оползни и обвалы со склонов. Разрушение каменных построек. Искривление железнодорожных рельсов.
XI. Катастрофа	Широкие трещины в поверхностных слоях земли. Многочисленные оползни и обвалы. Каменные дома почти полностью разрушаются. Сильное искривление и выпучивание железнодорожных рельсов, разрушаются мосты.
XII. Сильная катастрофа	Изменения в почве достигают огромных размеров. Многочисленные трещины, обвалы, оползни. Возникновение водопадов, подпруд на озёрах, отклонение течения рек. Изменяется рельеф. Ни одно сооружение не выдерживает.

Карты сейсмической интенсивности

Ашхабадское землетрясение 1948-го года, M=7.3



Среднеуральское землетрясение 2015-го года, M=4.7

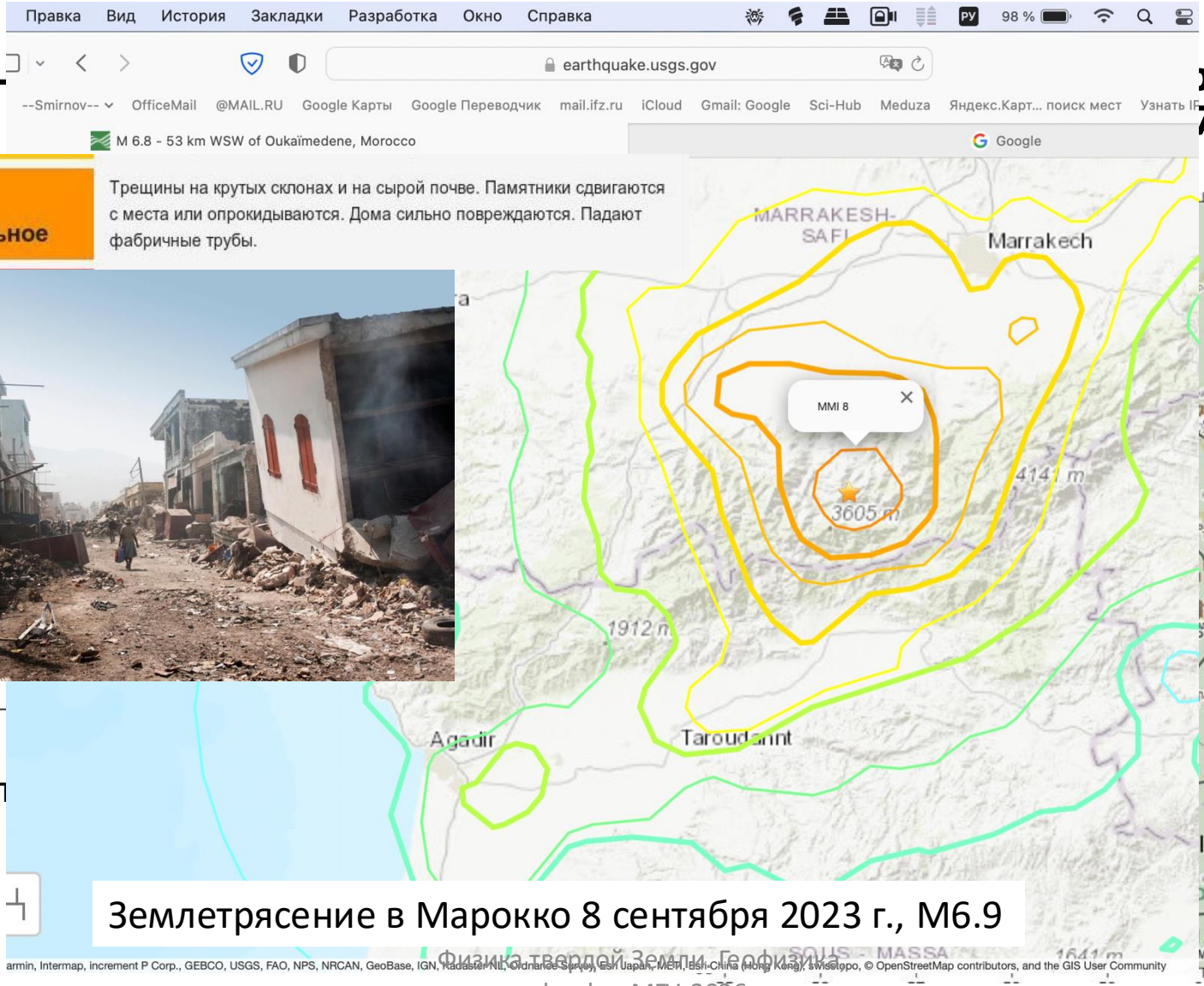


Изосейста – линия постоянной интенсивности

Землетрясение в Марокко 8 сентября 2023 г., M6.9

Карты сейсмической интенсивности

Ац **рясение**
7

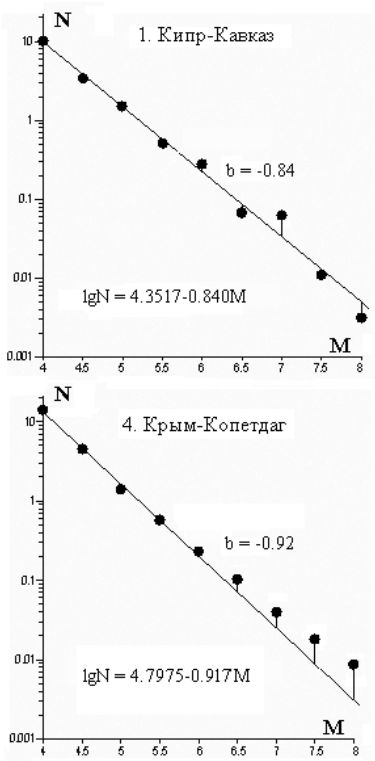


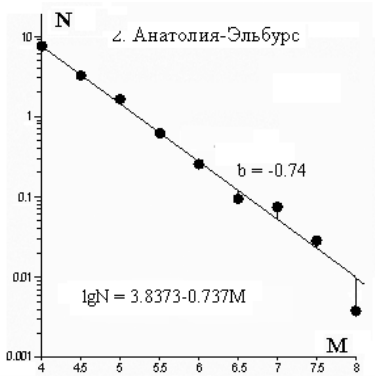
Изосейст

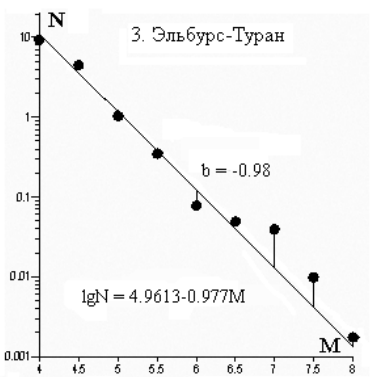
Землетрясение в Марокко 8 сентября 2023 г., M6.9

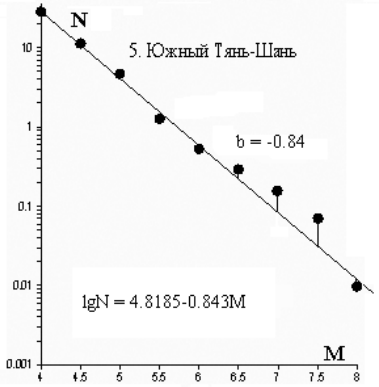
Закон Гутенберга-Рихтера (энергетический спектр сейсмичности)

$$\lg N(M) = -b(M - M_0) + \lg A + \lg T$$









Наименование профилей	Периоды (годы) повторяемости землетрясений		
	7.0	7.5	8.0
Кипр-Кавказ	34	89	233
Анатолия-Эльбурс	21	49	114
Эльбурс-Туран	75	232	716
Крым-Копетдаг	42	120	345
Южн. Тянь-Шань	12	32	84

● сейсмические события разных магнитуд M;

— аппроксимация данных методом максимального правдоподобия

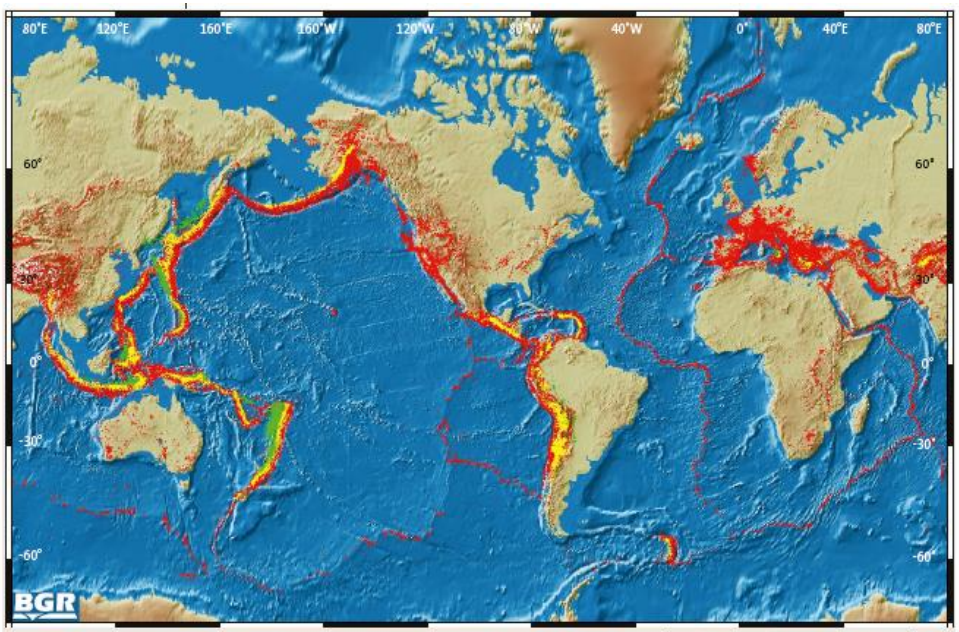
$$p(E) \sim E^{-b}$$

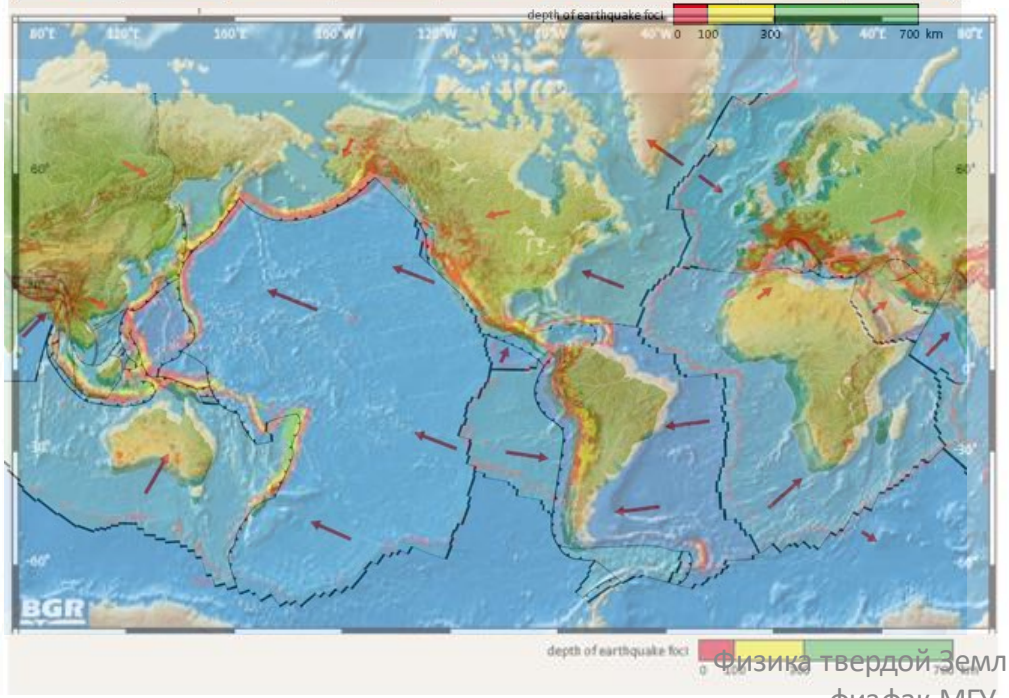
- b – наклон графика повторяемости;
- A – сейсмическая активность;
- T – длительность наблюдений

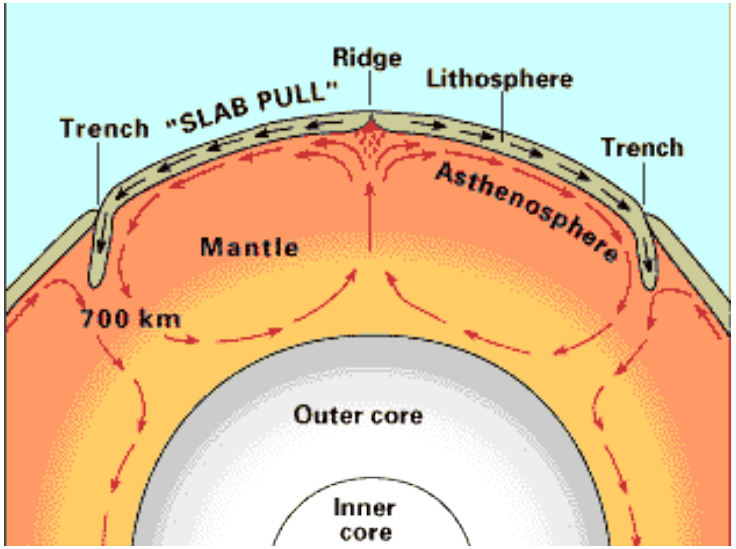
❖ В среднем b=0.9

❖ Уменьшение магнитуды на единицу – увеличение частоты землетрясений примерно в 10 раз

География землетрясений







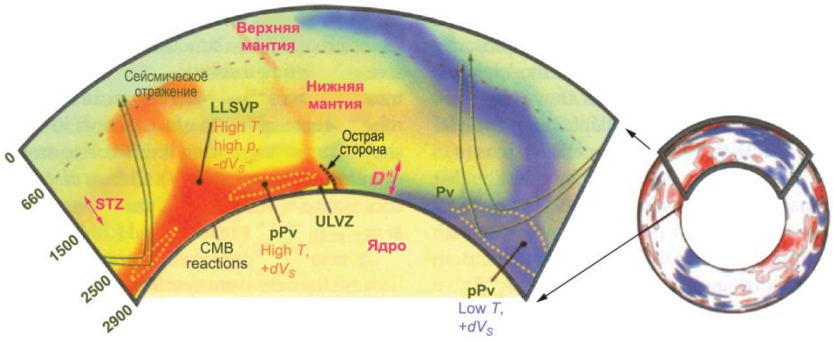


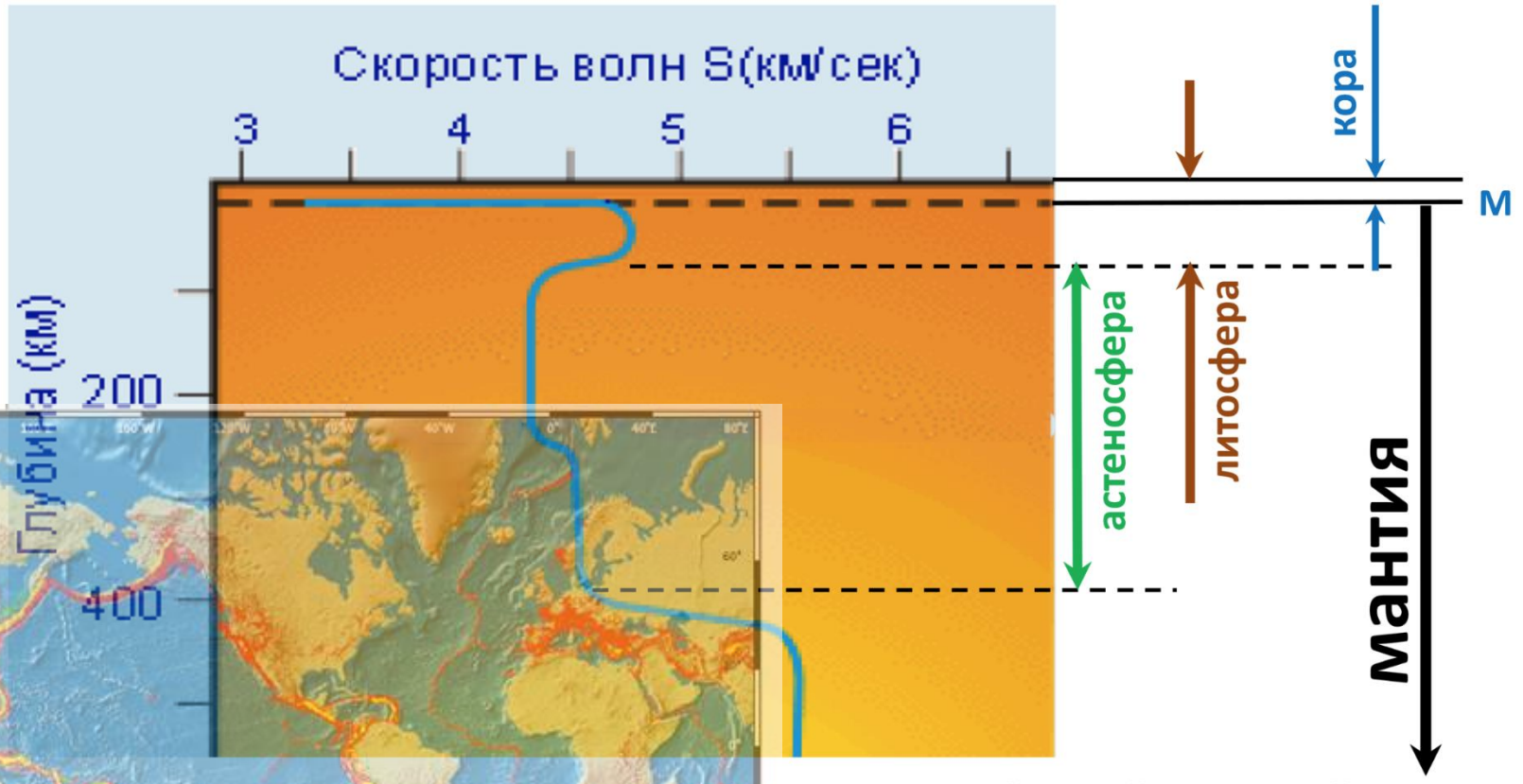
Рис. 65. Изображение, полученное методом сейсмической томографии [Ritsema et al., 2004] зон больших и малых вариаций скоростей поперечных волн в мантии Земли (си-

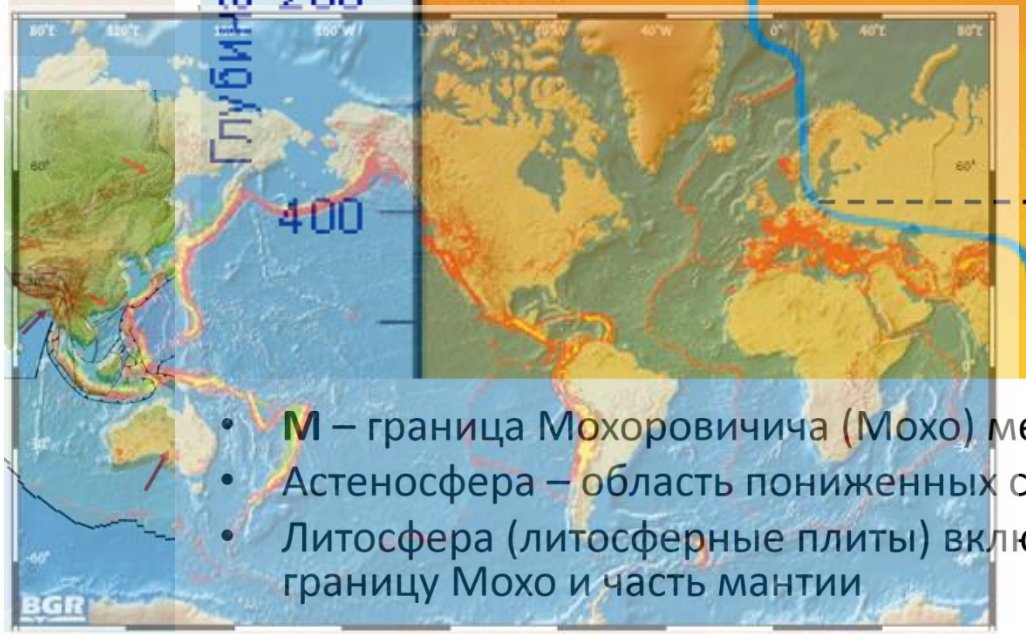
Толщина плиты – около 80 км

80% гипоцентров землетрясений находятся внутри плит

География

Литосфера и астеносфера





- **M** – 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

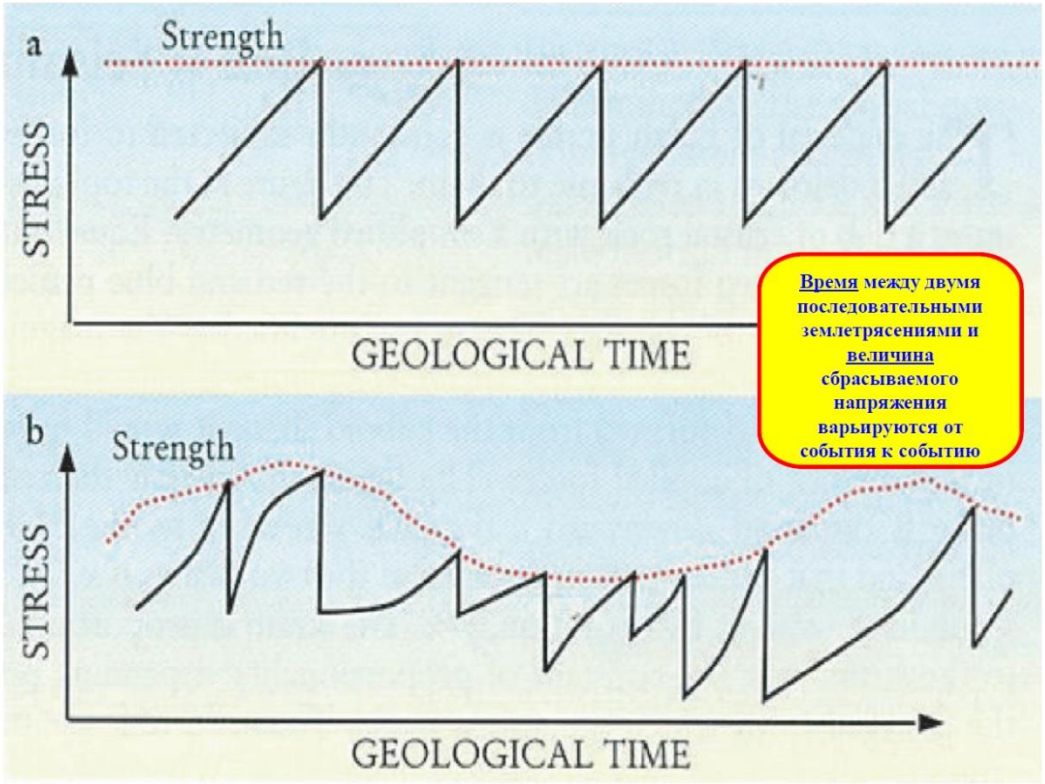
находятся внутри плит

Проблема прогноза землетрясений

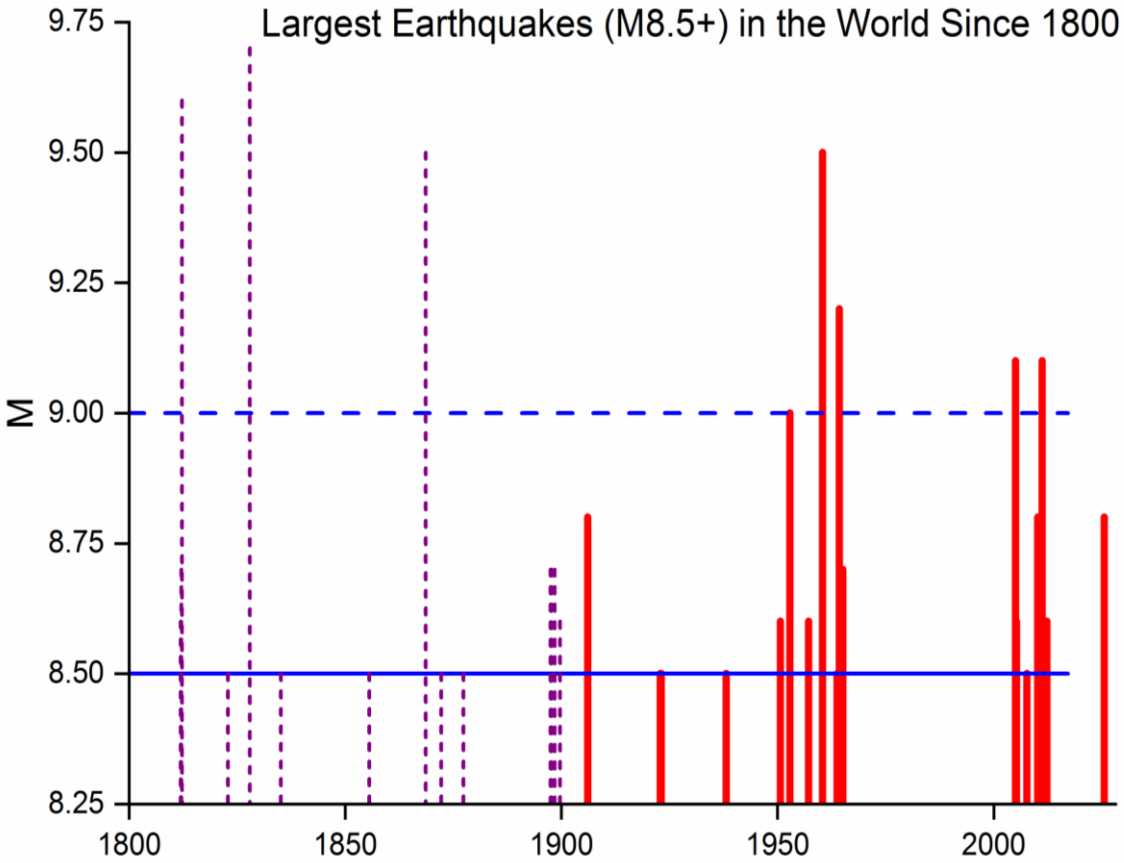
Прогноз:

- Места
- Величины
- Времени

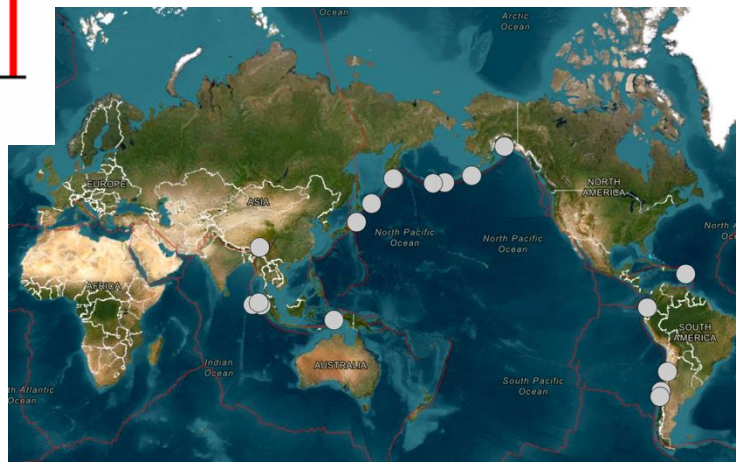
землетрясения



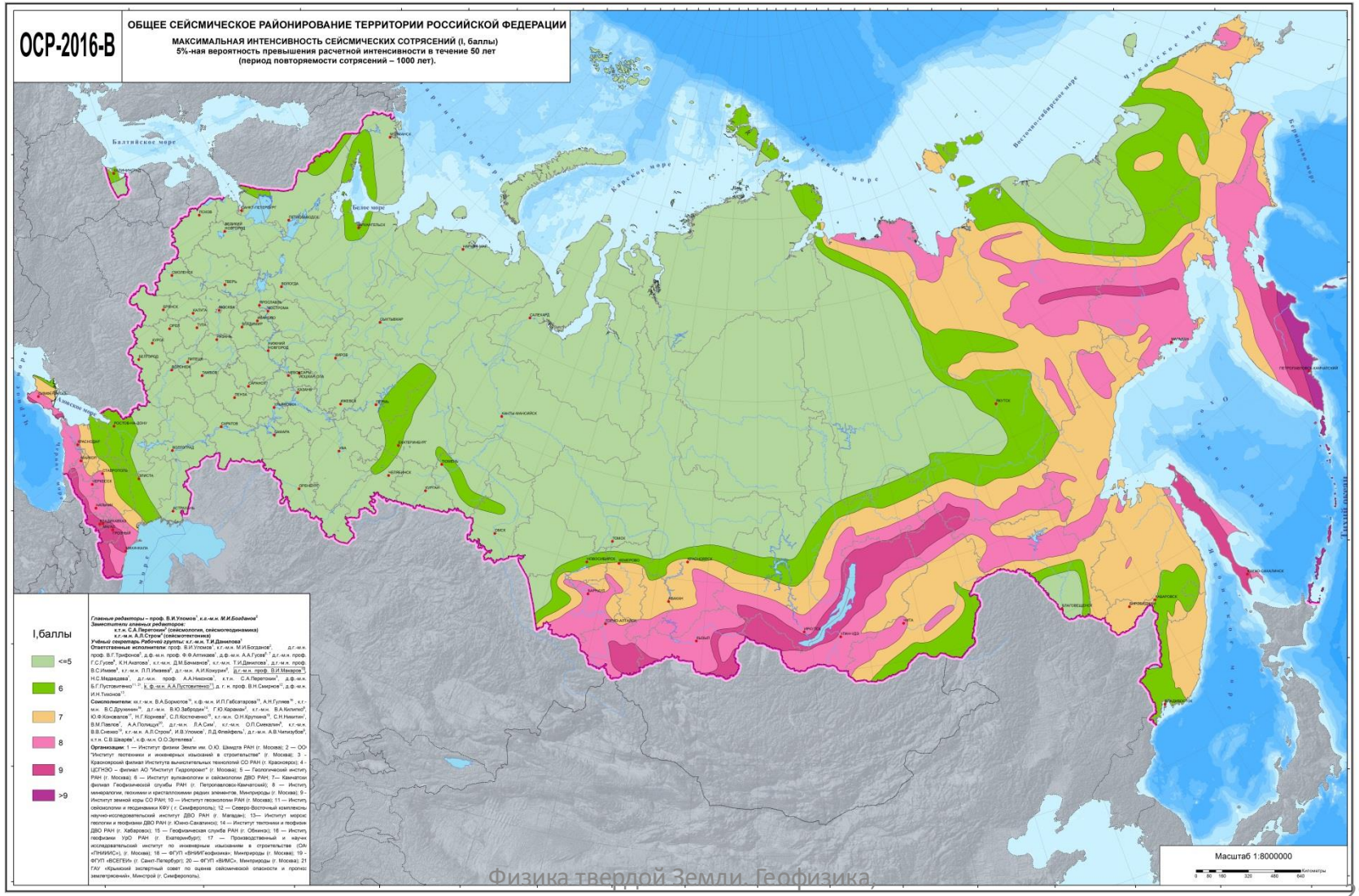
- Напряжения и прочность не поддаются прямым измерениям
- Прогноз строится на основе косвенных признаков – геофизических полей, в той или иной мере отражающих напряжения и прочность
- Прогноз носит вероятностный характер



Сильнейшие землетрясения (M>=8.5)



Общее сейсмическое районирование (ОСР) РФ
(прогноз места и силы возможного землетрясения)



Предвестники землетрясений
(прогноз времени землетрясения)

Сейсмические предвестники

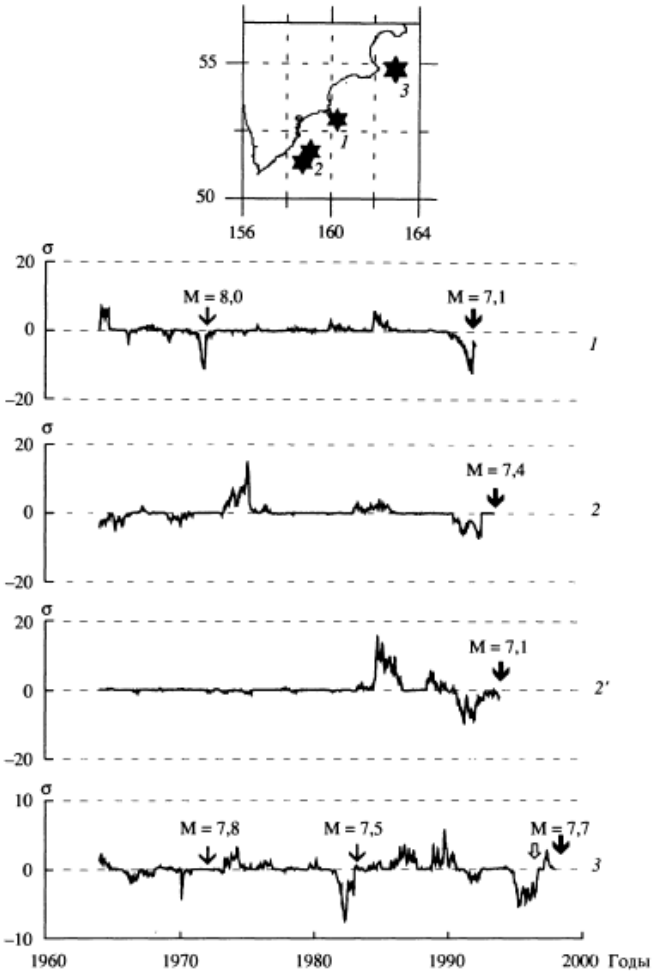
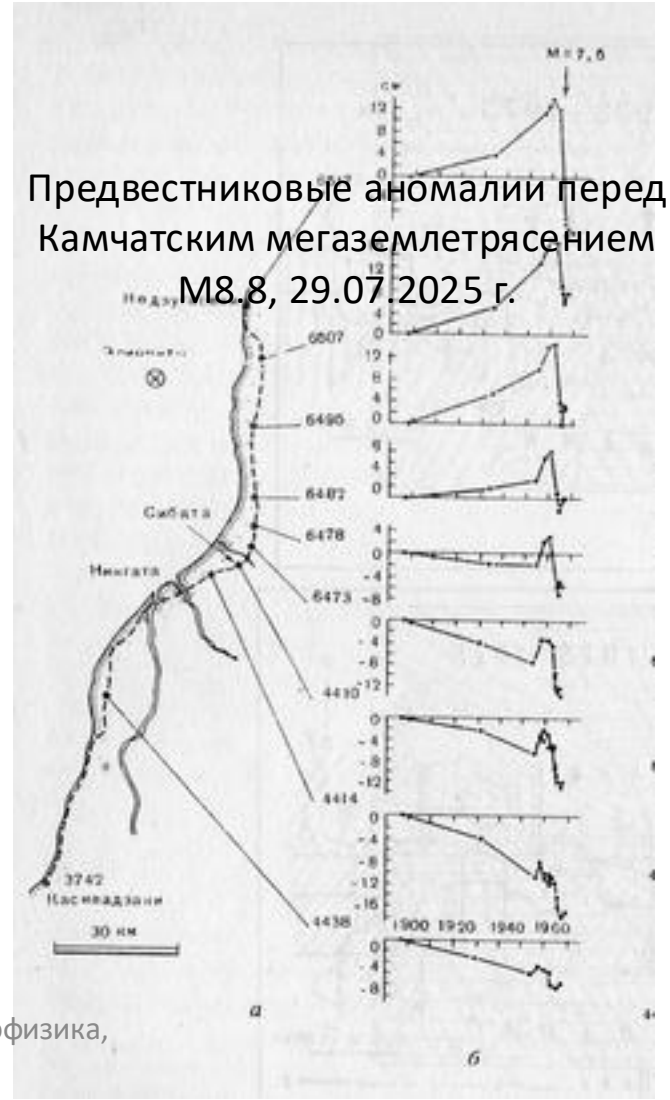


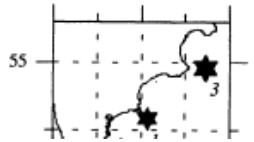
Рис. 91. Местоположение четырех сильных камчатских землетрясений 2 марта 1992 г., 8 июня и 13 ноября 1993 г., 5 декабря 1997 г. (вверху) и графики *1–3* параметра *RTL* в единицах стандартного отклонения от многолетнего фона в местах их эпицентров

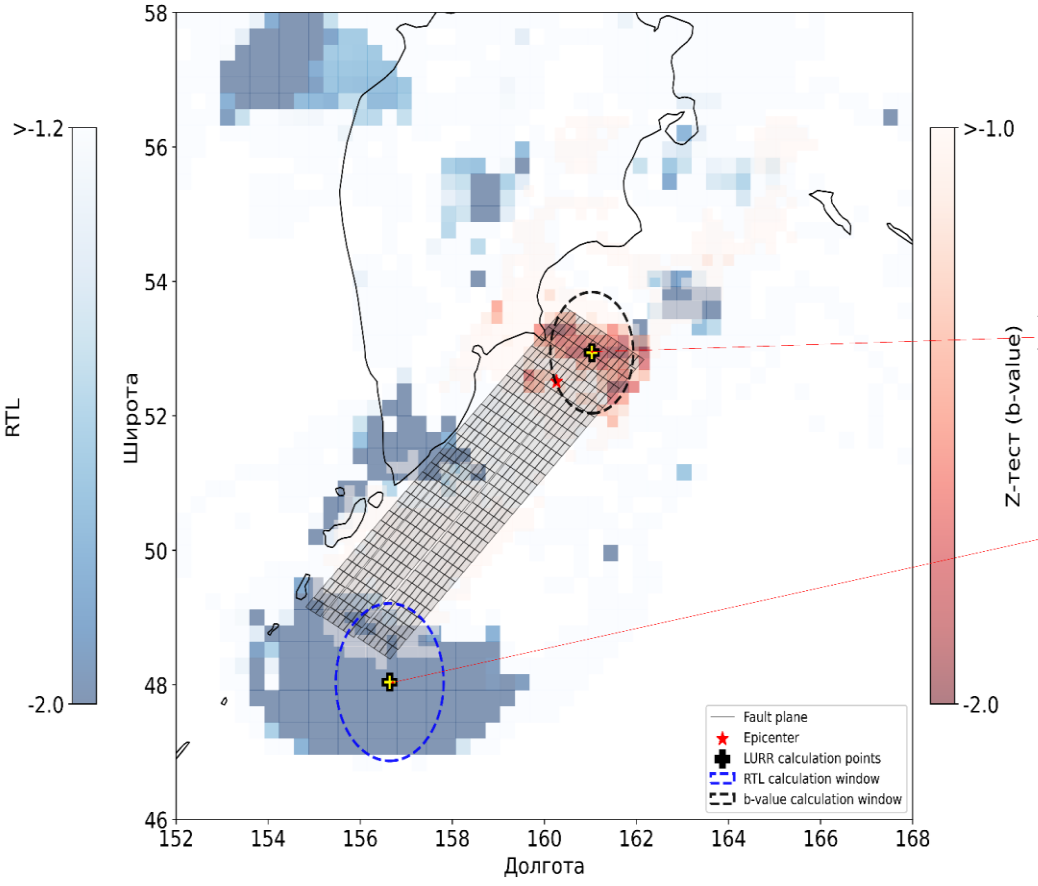
Деформационные предвестники



Предвестники землетрясений
(прогноз времени землетрясения)

Сейсмические предвестники

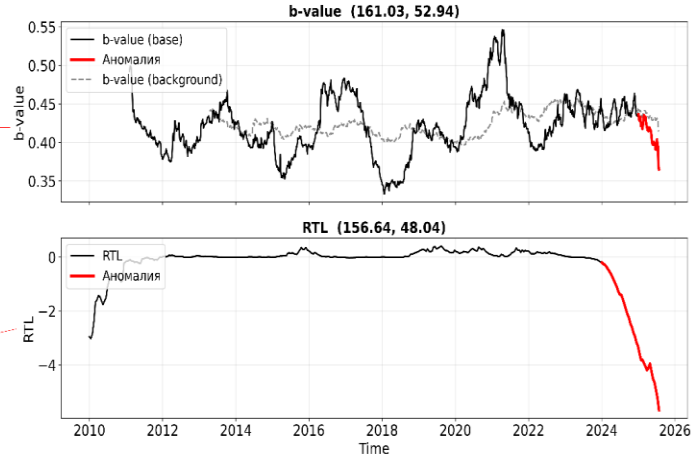




стандартного отклонения от многолетнего фона в местах их эпицентров

Деформационные предвестники

Предвестниковые аномалии перед Камчатским мегаземлетрясением M8.8, 29.07.2025 г.



Качество прогноза

- Карта ОСР – оправдываемость 95-98%
- Среднесрочный прогноз времени землетрясения (0.5-3 года) – по разным оценкам 65-75%
- Краткосрочный прогноз (несколько суток – несколько часов) - ???
- ***«Можно предсказать приближение грозовой тучи, но трудно предсказать где и когда ударит молния»***

«Очаговая» сейсмология: Резюме

- Землетрясение – разрушение среды в результате достижения напряжениями предела прочности
- При землетрясении накопленная упругая энергия обеспечивает излучение сейсмических волн в результате резкой подвижки в очаге
- Диаграмма направленности излучения из очага землетрясения – квадрантная (квадрупольная)
- Для регистрации сейсмических колебаний используются маятниковые сейсмометры с механоэлектрическими преобразователями
- Для определения положения гипоцентра и времени землетрясения необходимо иметь записи не менее, чем в 4-х точках

«Очаговая» сейсмология: Резюме (продолжение)

- Энергетической характеристикой величины землетрясения является магнитуда, пропорциональная логарифму энергии землетрясения
- Интенсивность, выражаемая в баллах 12-бальной шкалы, пропорциональна логарифму ускорения грунта на поверхности Земли
- Основная часть землетрясений сосредоточена в литосфере Земли, на границах литосферных плит
- Распределение землетрясений по их энергиям имеет степенной вид – закон Гутенберга-Рихтера
- В настоящее время решена задача надежного прогнозирования мест возможного возникновения землетрясений – общее сейсмическое районирование. Проблема прогноза времени землетрясения остается открытой.

Физика Земли

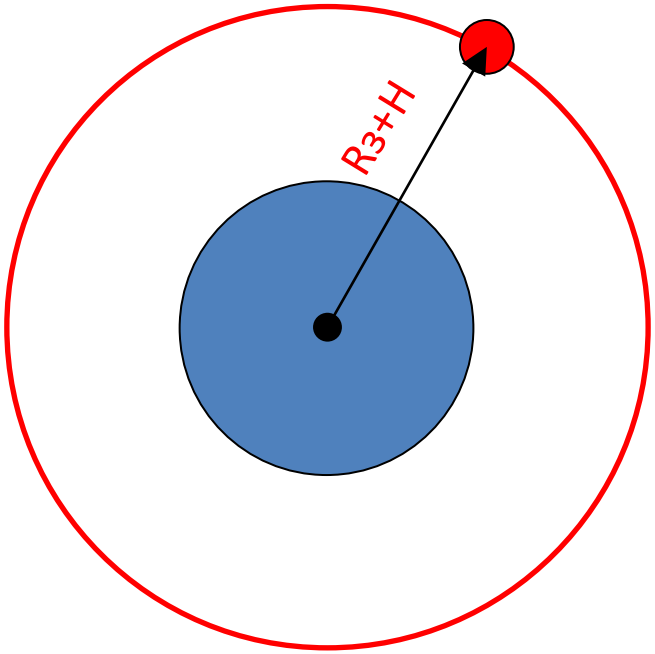
- Сейсмология и строение Земли
  - Основной инструмент исследования строения Земли
  - Физическая (механическая) модель Земли
- Очаг землетрясения и сейсмичность Земли
  - Землетрясение с точки зрения физики
  - Проблема прогноза землетрясений
- **Гравитационное поле и фигура Земли**
  - **Сила тяжести – 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

Гравитационный потенциал

Величина	Точечная масса	Распределенная масса
Сила	$\vec{F} = f\frac{Mm}{r^2}\vec{n}$	
Напряженность поля $\vec{g} = \vec{F}/m$	$\vec{g} = f\frac{M}{r^2}\vec{n}$	$\vec{g} = f\int\frac{\rho' dV'}{\lvert\vec{r}-\vec{r}'\rvert^2}\vec{n}$
Потенциал U $\vec{g} = -\mathrm{grad}U$	$U = f\frac{M}{r}$	$U = f\int\frac{\rho' dV'}{\lvert\vec{r}-\vec{r}'\rvert}$

$$\boldsymbol{f = 6.67 \cdot 10^{-11}\text{м}^3\text{кг}^{-1}\text{с}^{-2}}$$

Орбита ИСЗ и сила тяжести



$$\frac{mV^2}{2} + mg(Rз + H) = const$$

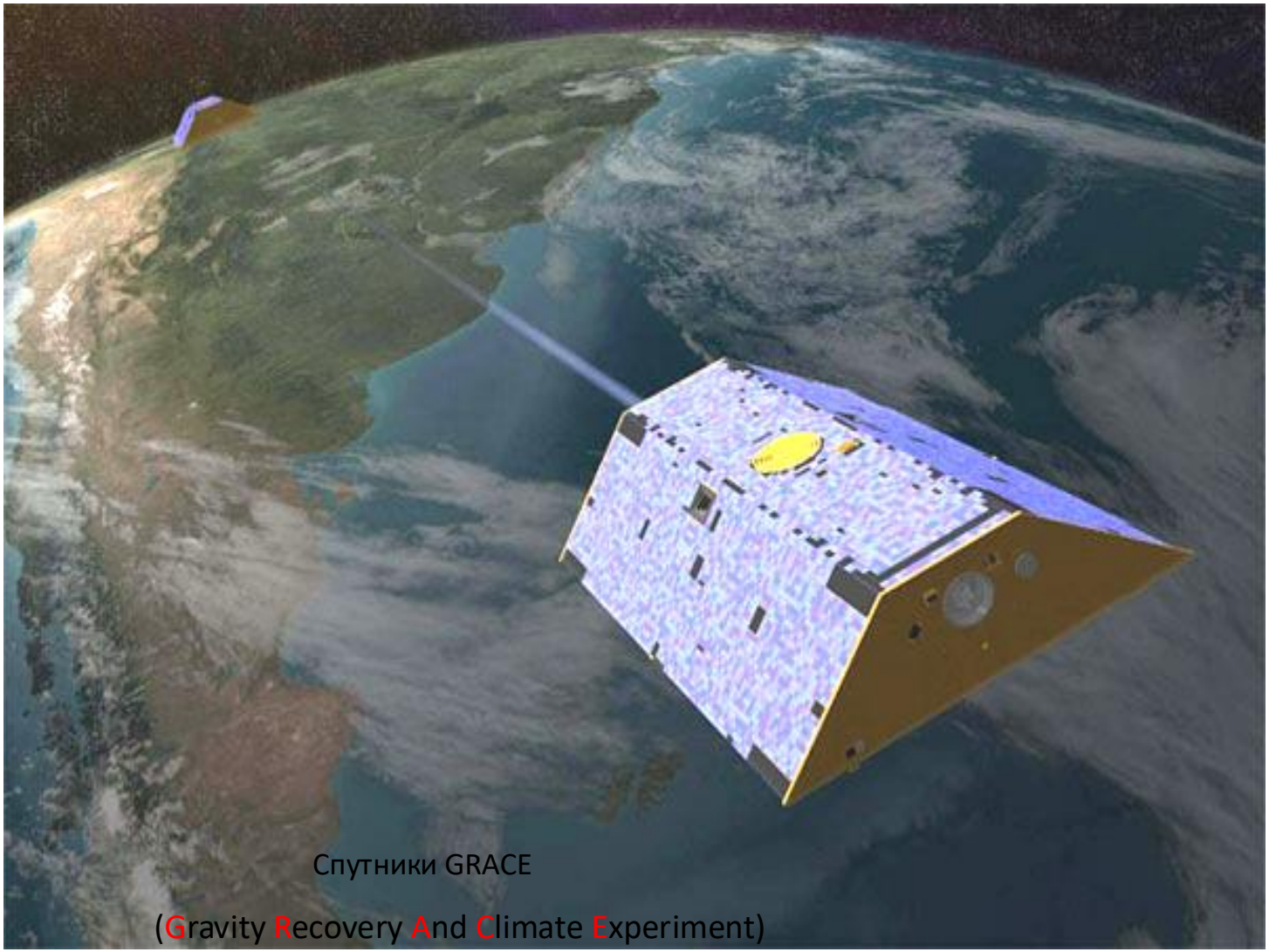
$$mg = mV^2/(Rз + H)$$

$$V = \sqrt{g(Rз + H)}$$

$$\frac{3}{2}mg(Rз + H) = const$$

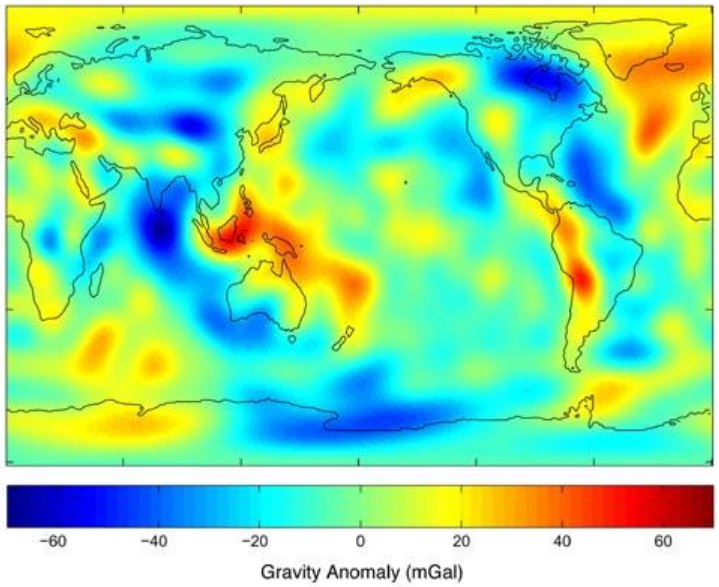
$$gH = const$$

Изменения *H* отражают изменения *g*

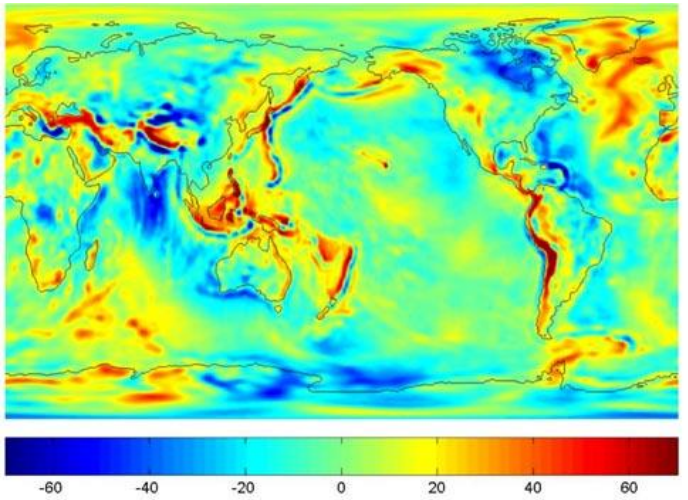


Спутники GRACE

(Gravity Recovery And Climate Experiment)



Глобальное гравитационное поле, полученное за 10 лет слежения за орбитами спутников.



Модель глобального гравитационного поля GGM02S, полученная за 1 год работы системы Grace