

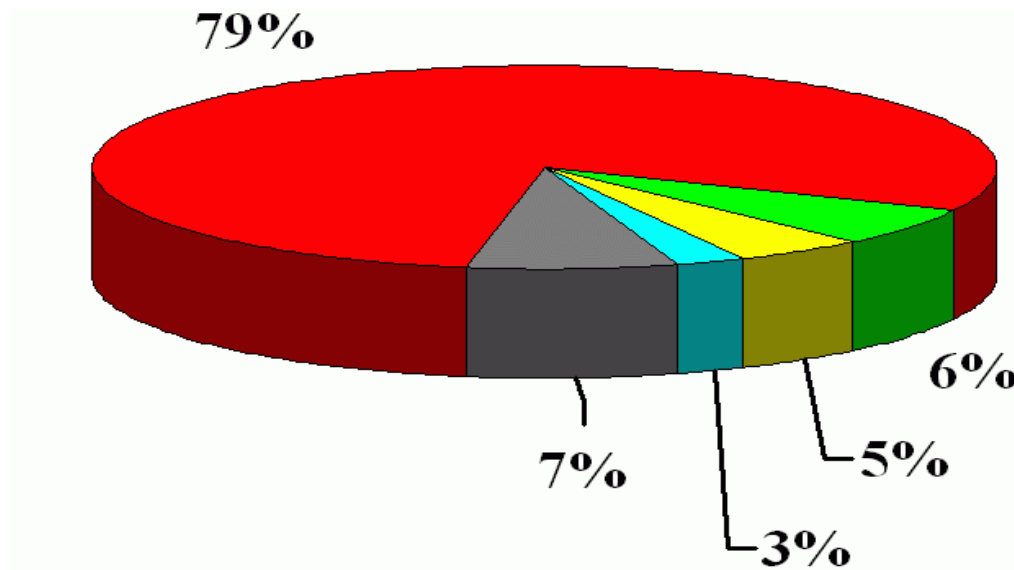
*Носов Михаил Александрович
Большакова Анна Владимировна*

Физика цунами

*Межфакультетский учебный курс
Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова*

Лекция №3





ИТДВ/ВЛД
(Новосибирск)

- подводные землетрясения
- оползни и обвалы
- вулканические извержения
- метеорологические причины
- падение метеоритов (нет данных)
- причина неизвестна

Общее количество землетрясений

Mw	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022 (08/03)
8.0+	1	1	1	2	2	1	1	0	1	1	1	0	3	0
7–7.9	16	23	19	12	17	11	18	16	6	16	9	8	16	0
6–6.9	144	150	185	108	123	143	127	130	104	117	222	87	140	30
5–5.9	1896	2209	2276	1401	1453	1574	1419	1550	1455	1674	2429	945	2051	330

<https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes>

M 8.0 - 78km SE of Lagunas, Peru

26.05.2019 07:41:15 (UTC)

5.812°S 75.270°W

122.6 km depth

Duration - 60 seconds

Casualties - 2 dead, 30 injured



M 8.2 - 286km NNE of Ndoi Island, Fiji

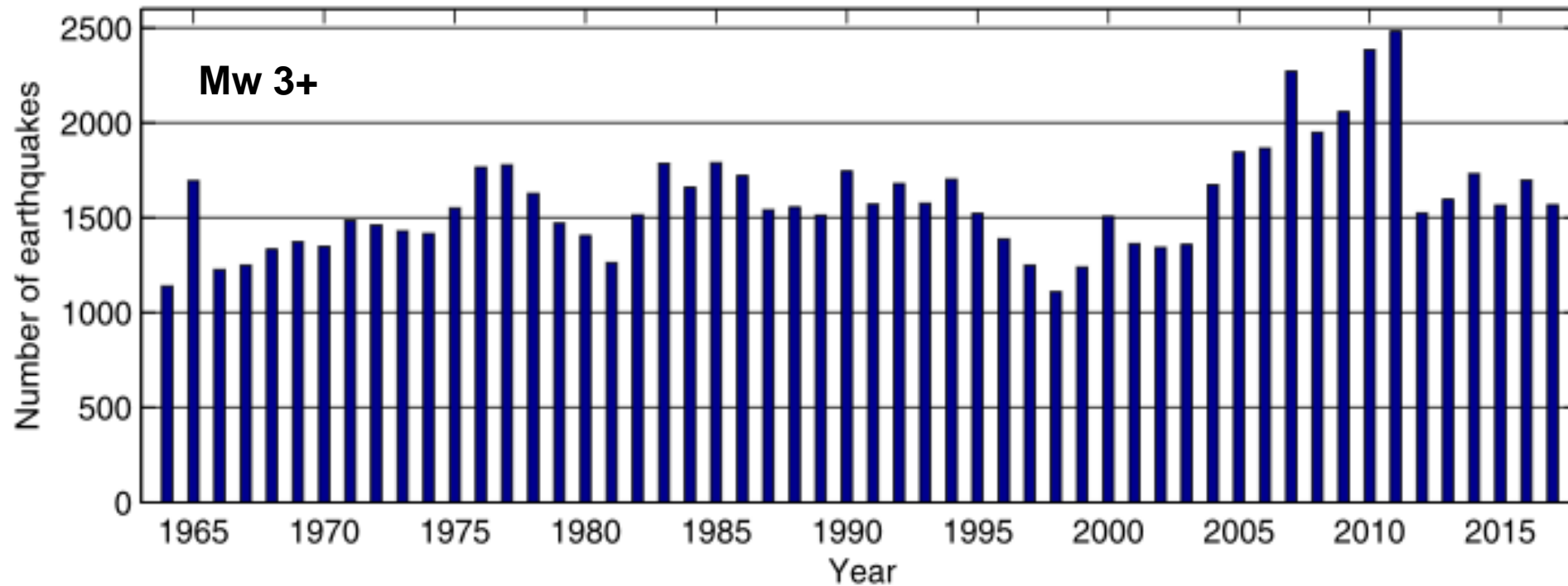
19.08.2018 00:19:40 (UTC)

18.113°S 178.153°W

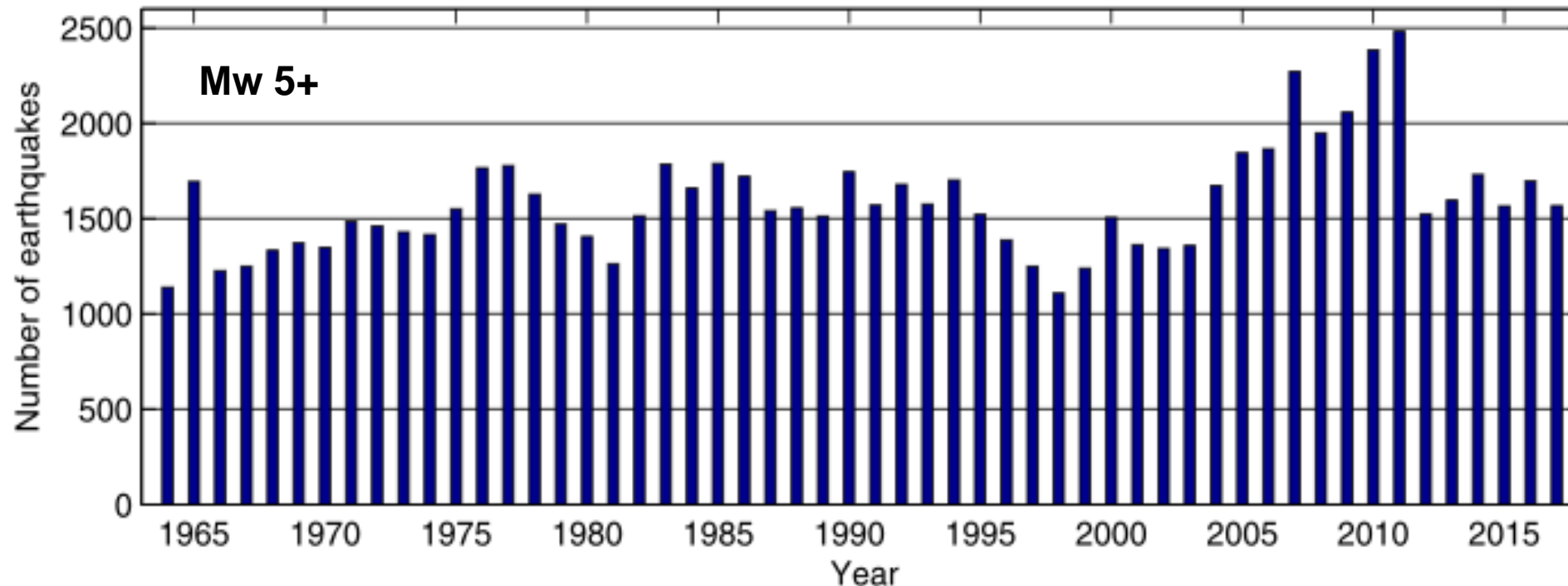
600.0 km depth



Общее количество землетрясений



Общее количество землетрясений



Mw 3+ **113** earthquakes in the past **24** hours
1,095 earthquakes in the past **7** days
4,810 earthquakes in the past **30** days
21,497 earthquakes in the past **365** days

08.03.2022

Япония

Japan has had: (M1.5 or greater)

4 earthquakes in the past 24 hours
15 earthquakes in the past 7 days
87 earthquakes in the past 30 days
677 earthquakes in the past 365 days

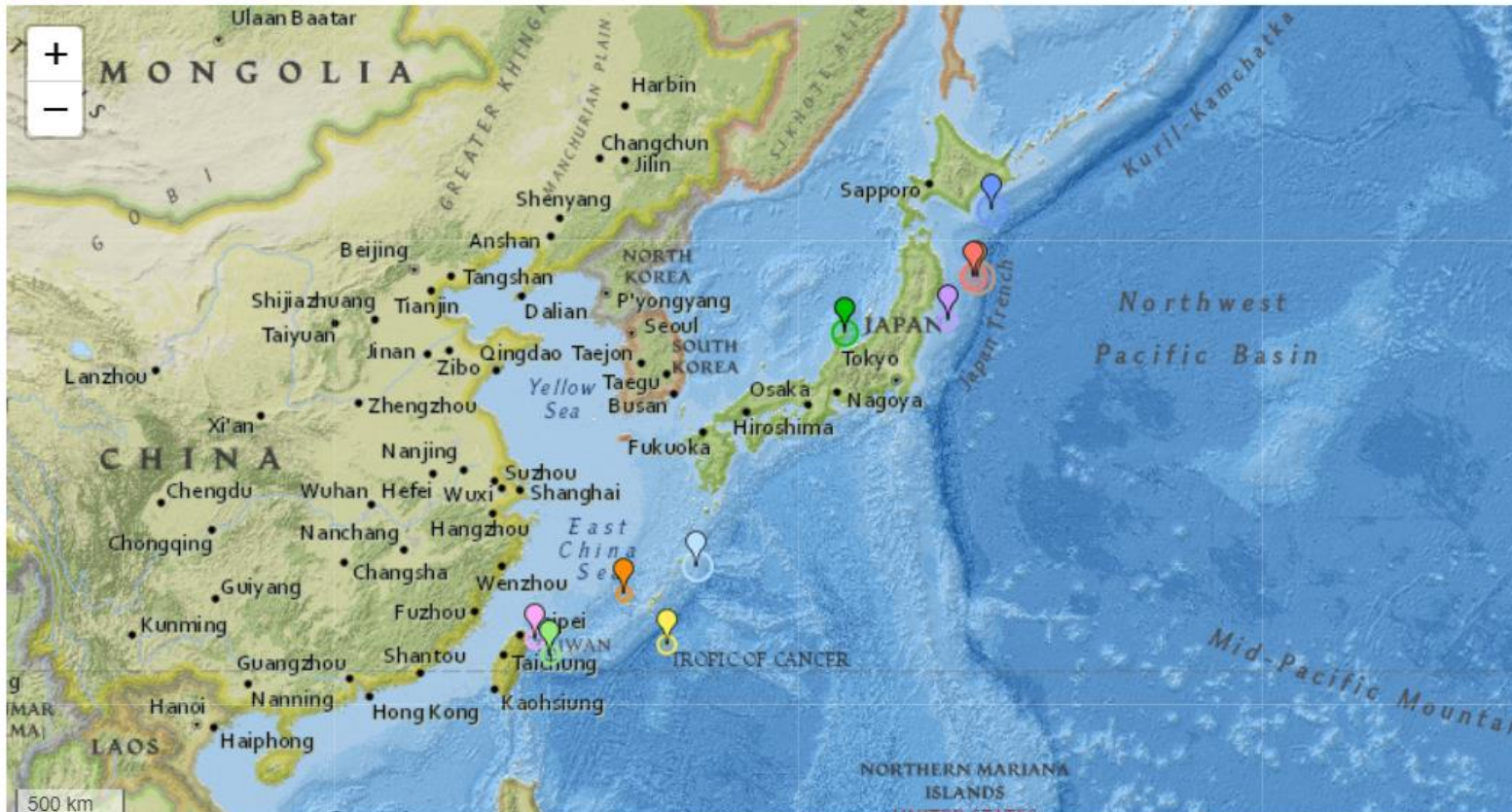
The largest earthquake in Japan:

today: [4.8](#) in [Nanao, Ishikawa, Japan](#)
this week: [5.1](#) in [Miyako, Iwate, Japan](#)
this month: [5.6](#) in [Naha, Okinawa, Japan](#)
this year: [7.0](#) in [Ishinomaki, Miyagi, Japan](#)

Sorted: Recent ▾

Filter By Magnitude ▾

Nearby Places ▾



- [2 hours ago 4.3 magnitude](#), 10 km depth
[Naha, Okinawa, Japan](#)
- [8 hours ago 4.5 magnitude](#), 10 km depth
[Itoman, Okinawa, Japan](#)
- [18 hours ago 4.6 magnitude](#), 77 km depth
[Yonakuni, Okinawa, Japan](#)
- [19 hours ago 4.8 magnitude](#), 4 km depth
[Nanao, Ishikawa, Japan](#)
- [1 day ago 4.9 magnitude](#), 10 km depth
[Kushiro, Hokkaido, Japan](#)
- [1 day ago 4.4 magnitude](#), 36 km depth
[Ishinomaki, Miyagi, Japan](#)
- [2 days ago 4.5 magnitude](#), 110 km depth
[Yilan, Taiwan, Taiwan](#)
- [2 days ago 5.1 magnitude](#), 10 km depth
[Naze, Kagoshima, Japan](#)
- [3 days ago 5.1 magnitude](#), 10 km depth
[Miyako, Iwate, Japan](#)
- [3 days ago 4.7 magnitude](#), 10 km depth

<https://earthquaketrack.com/recent>

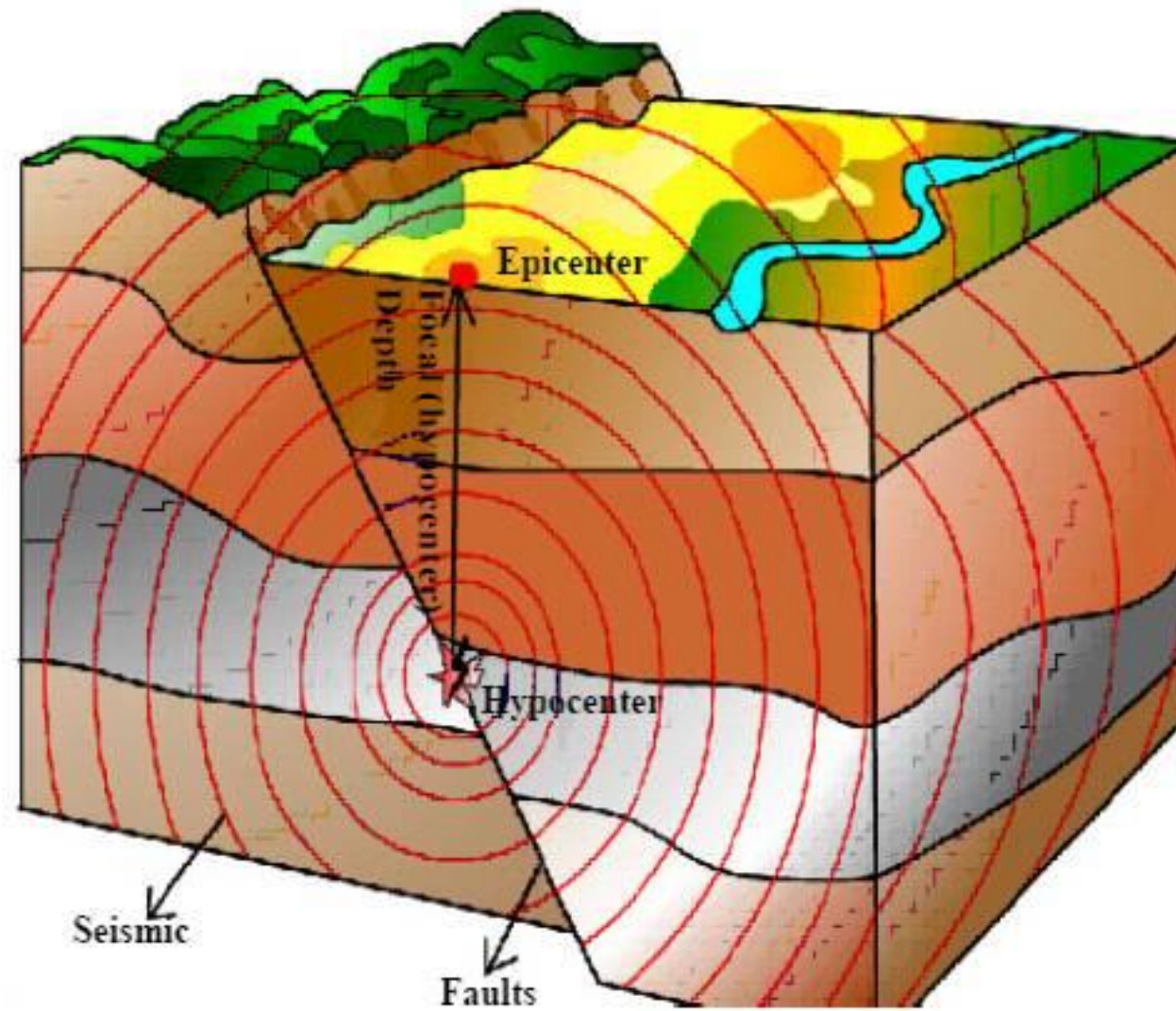
СЕЙСМОЛОГИЯ

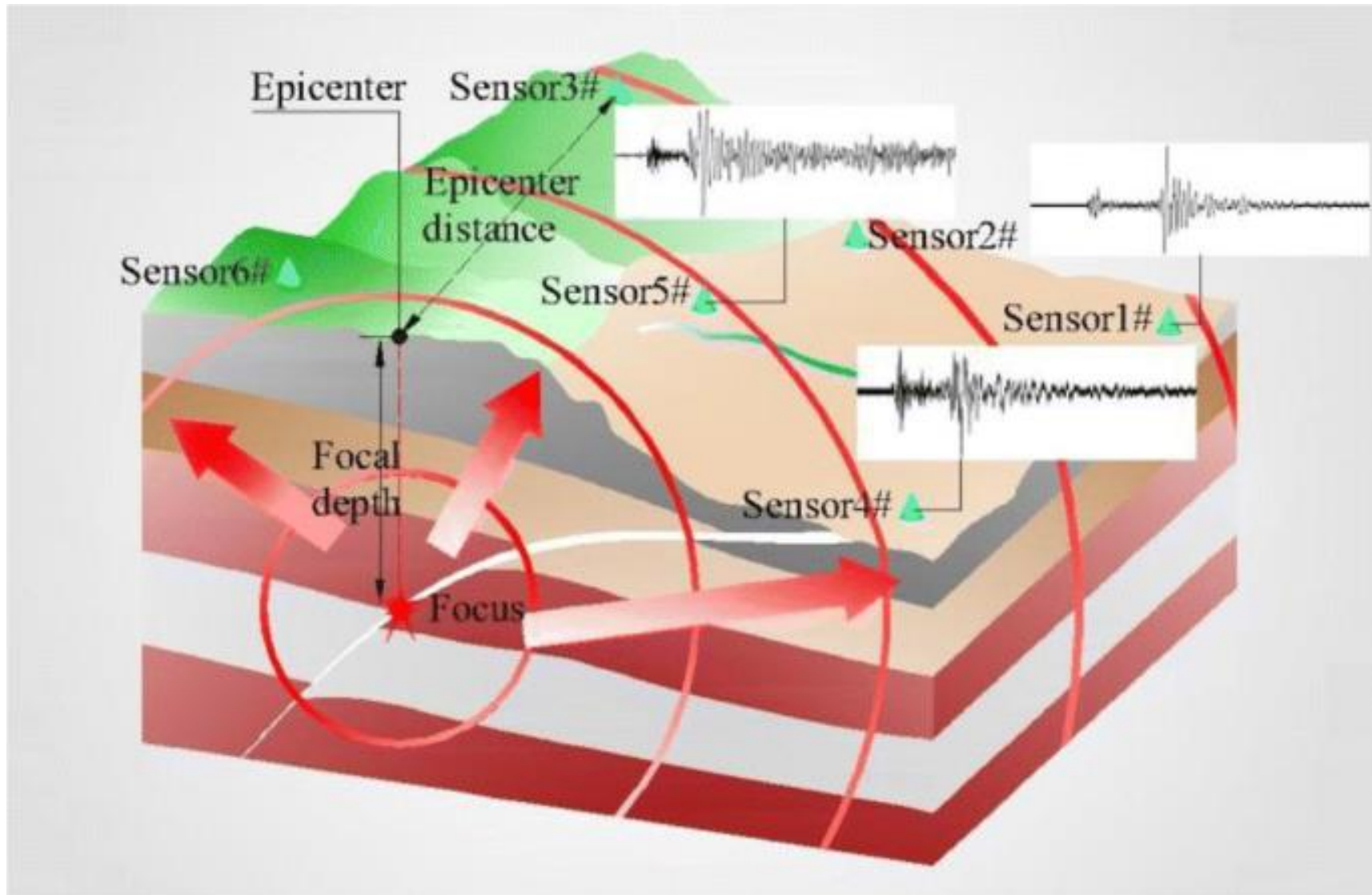
σεισμός — землетрясение

λόγος — учение

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

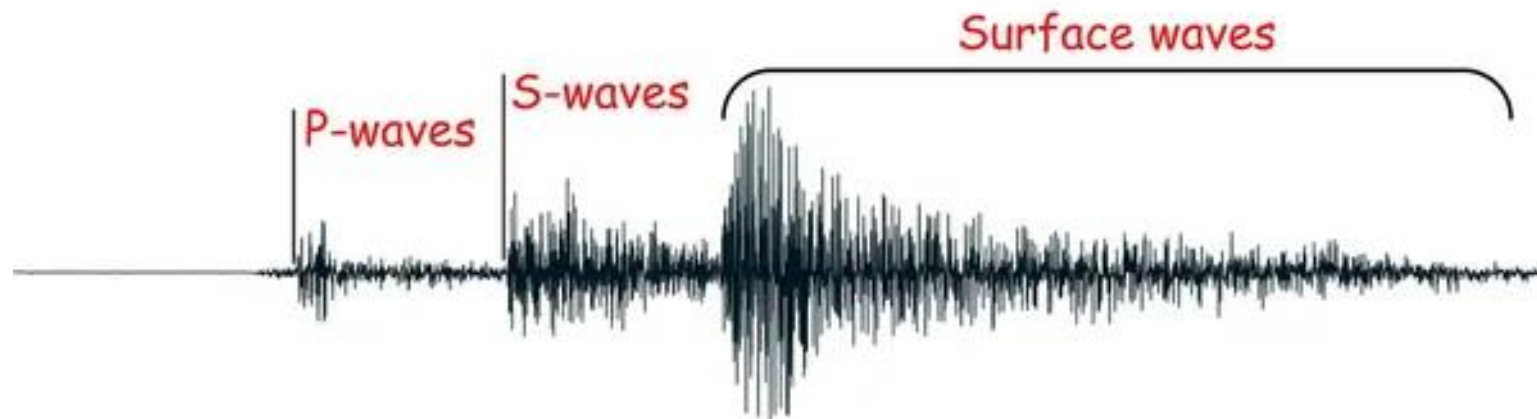
Схема землетрясения





Пример сейсмограммы

Earthquake seismogram structure

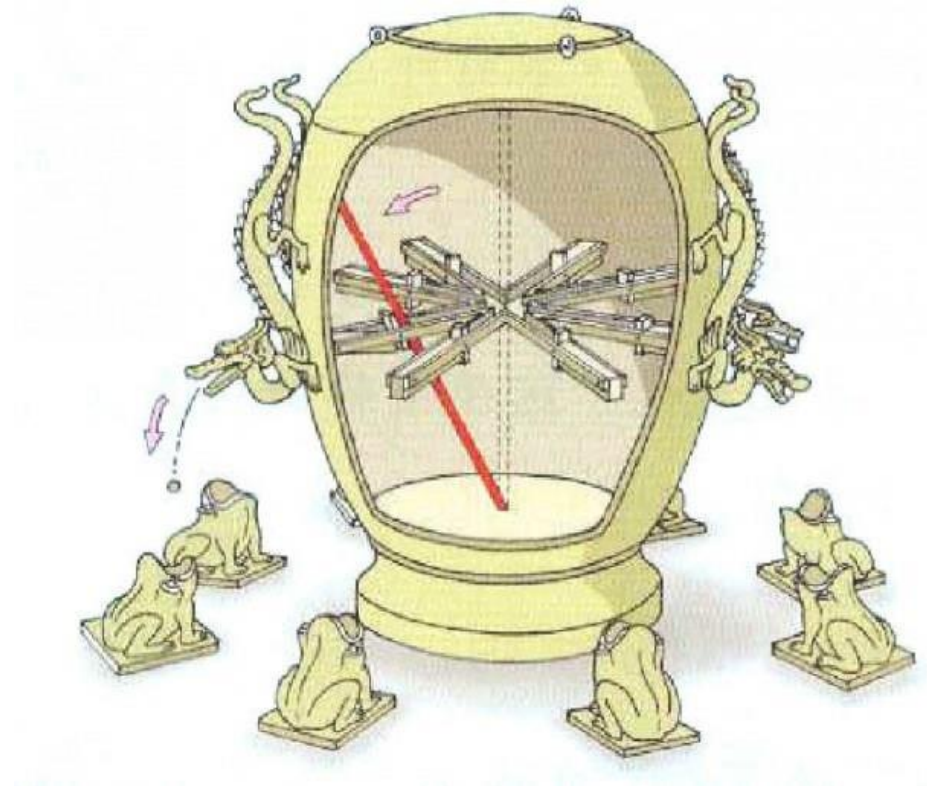


Typical earthquake seismogram



Первый сейсмограф

В древние времена считалось, что землетрясения – очень недобрый знак и гнев небес.

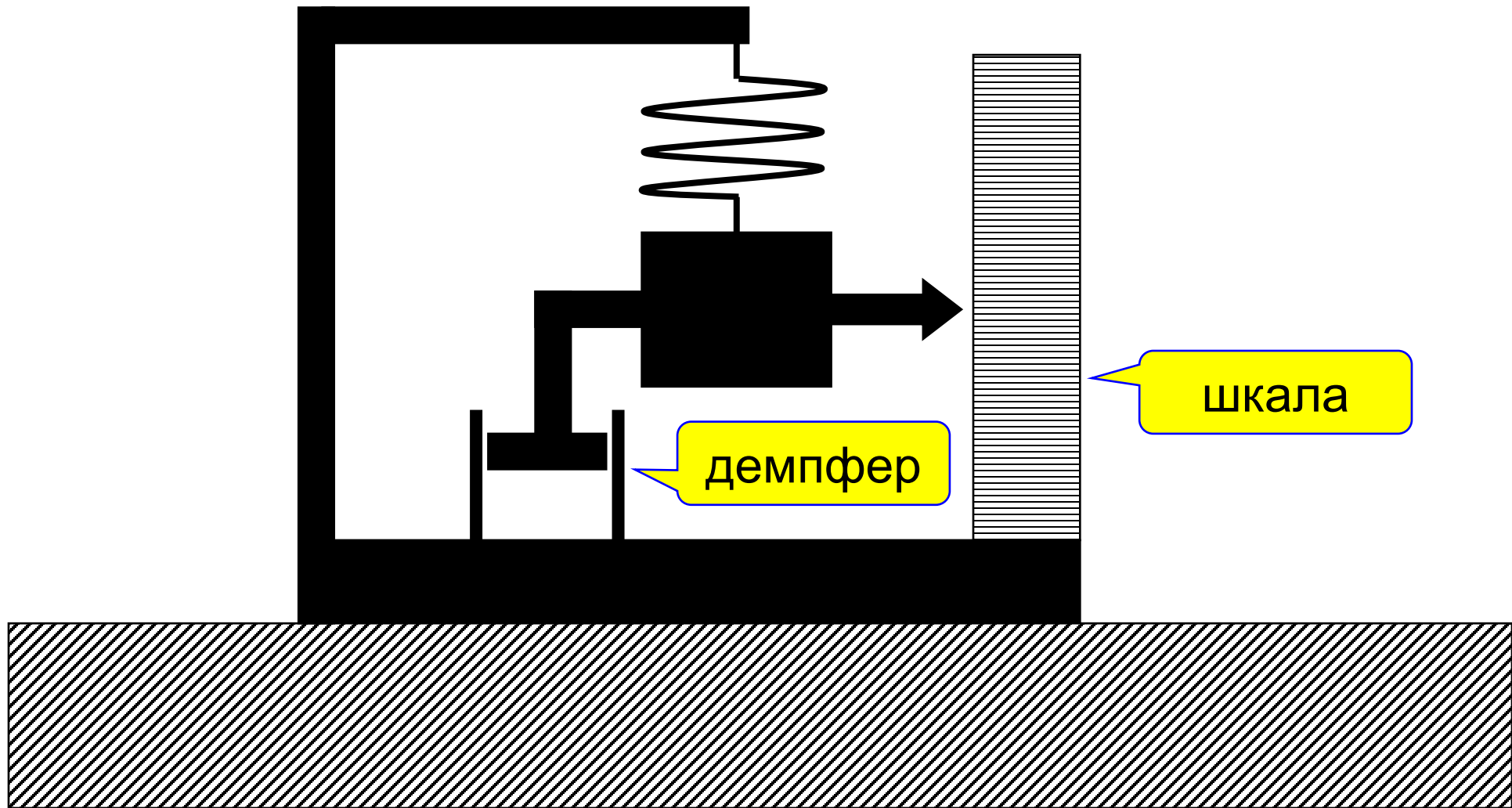


Сеймоскоп — указывает направление на эпицентр землетрясения.
Был изобретён Чжан Хэном в 132 году в Китае



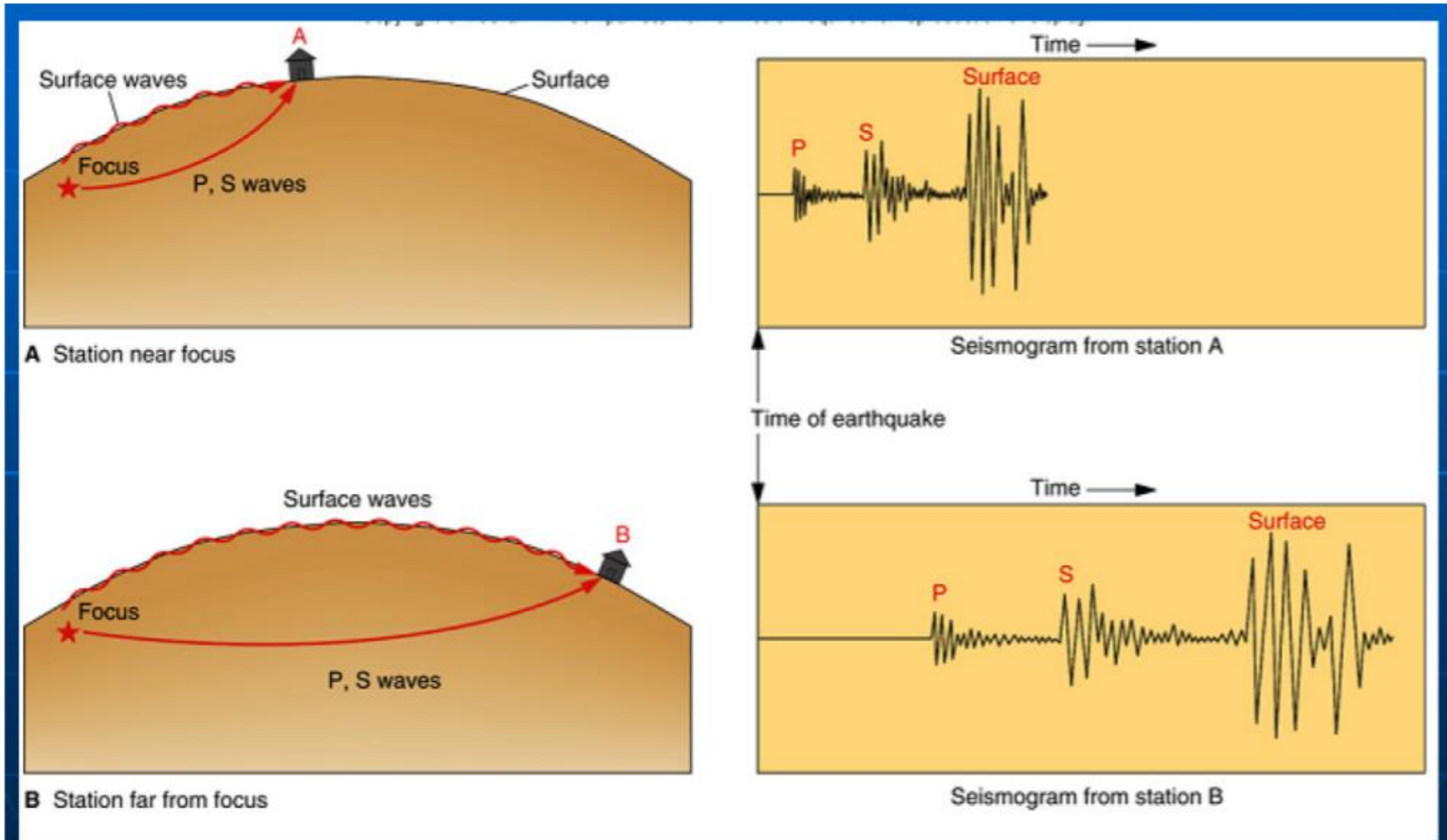
Сегодня воссозданный древний сейсмограф хранится в выставочном зале Музея истории Китая в городе Пекин.

Инструментальная эпоха в сейсмологии началась в 1879-1890 гг. с появлением первых эффективных сейсмографов





Время пробега волны и расстояние вдоль поверхности



Типы сейсмических (упругих) волн

объемные

продольные
P (primary)

поперечные
S (secondary)

недиспергирующие

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

$$c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

μ – модуль сдвига

K – модуль всестороннего сжатия

$$c_P > c_S$$

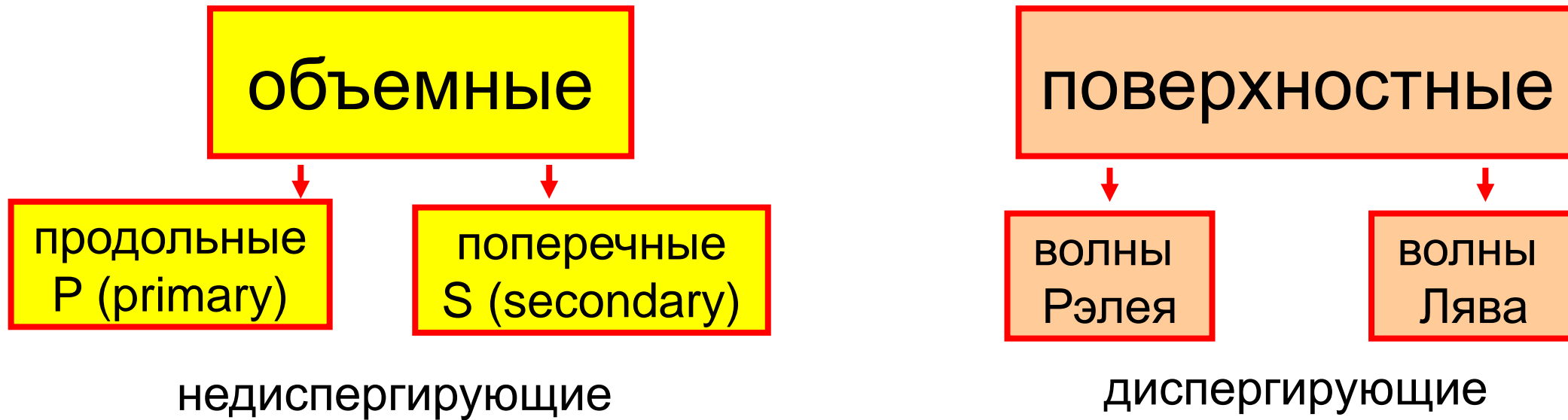
поверхностные

волны
Рэлея

волны
Лява

диспергирующие

Типы сейсмических (упругих) волн

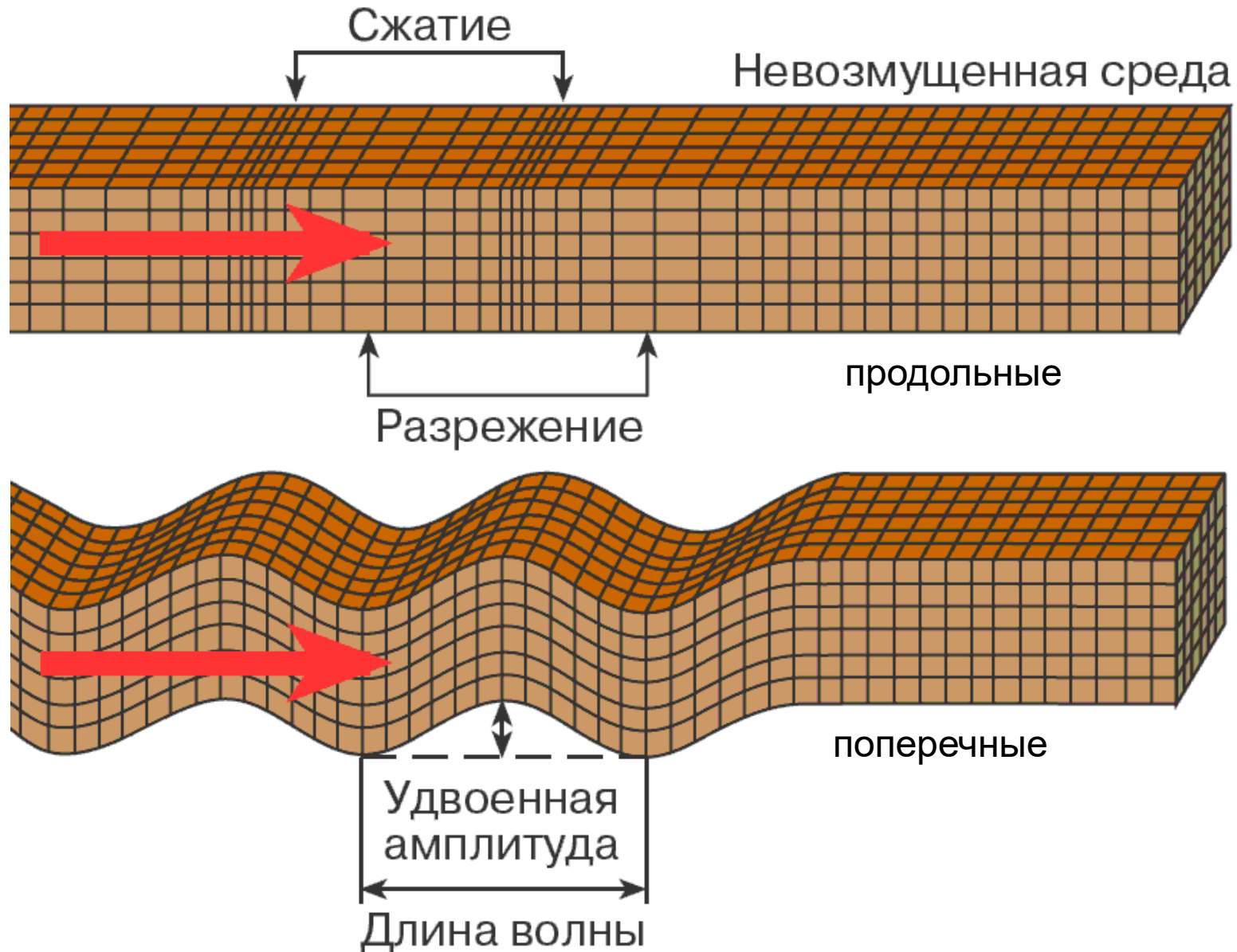


В коре Земли (PREM)

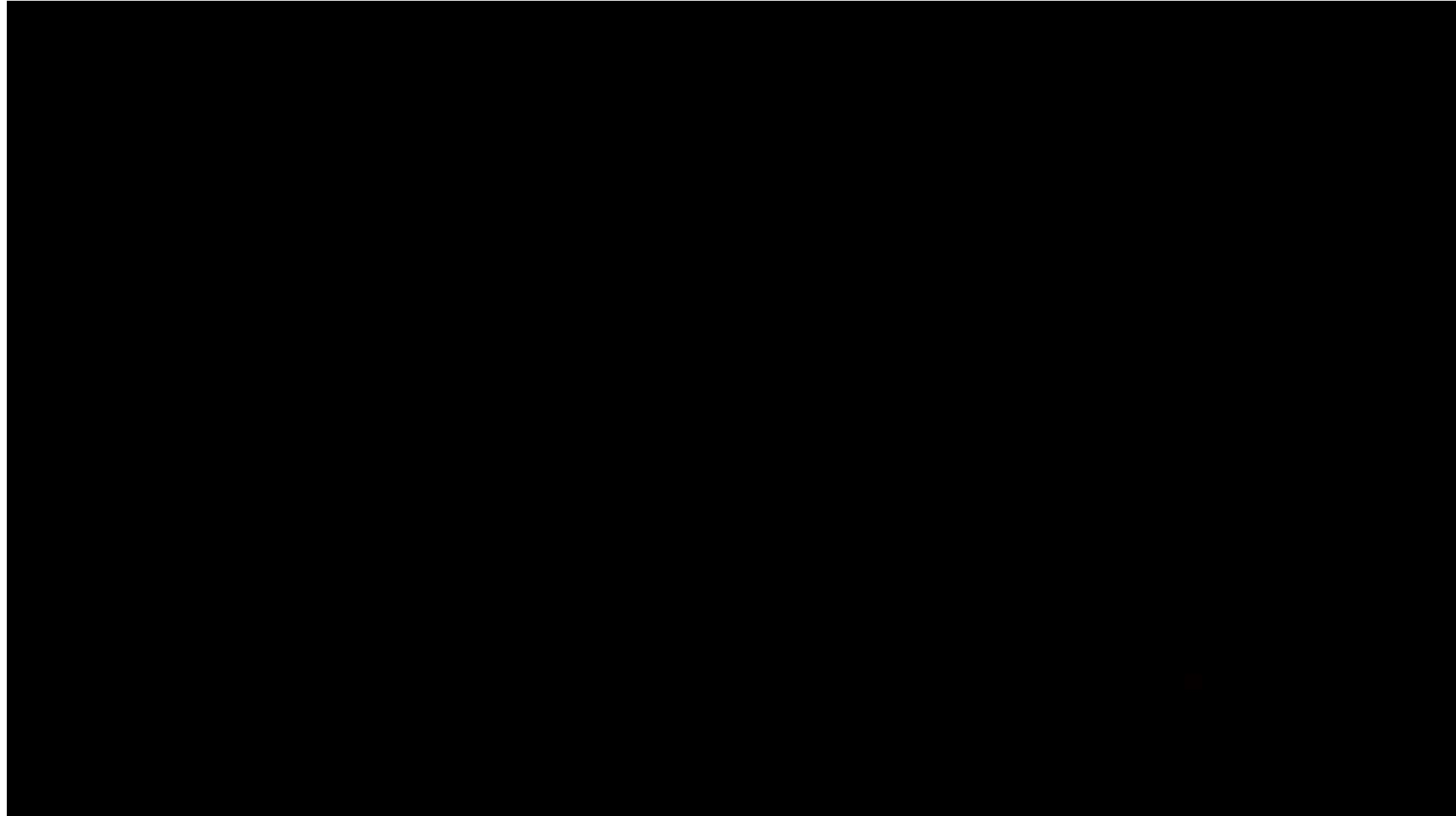
$$c_P \approx 5.8 - 6.8 \text{ км/с}$$

$$c_S \approx 3.2 - 3.9 \text{ км/с}$$

Типы упругих волн в безграничной однородной и изотропной среде



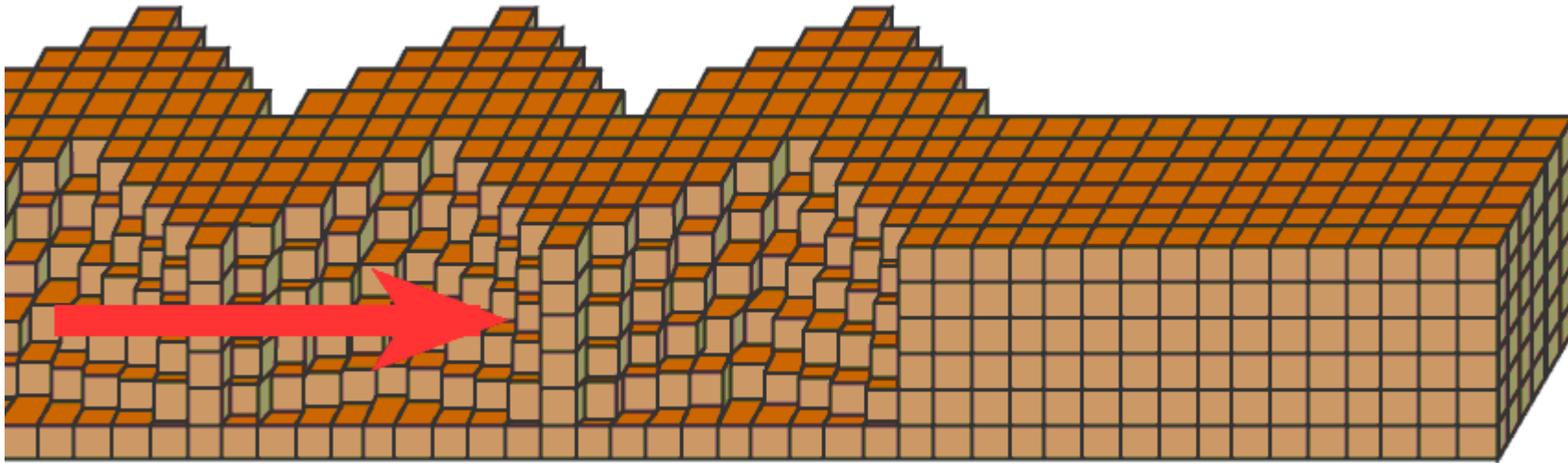
Распространение р- волн



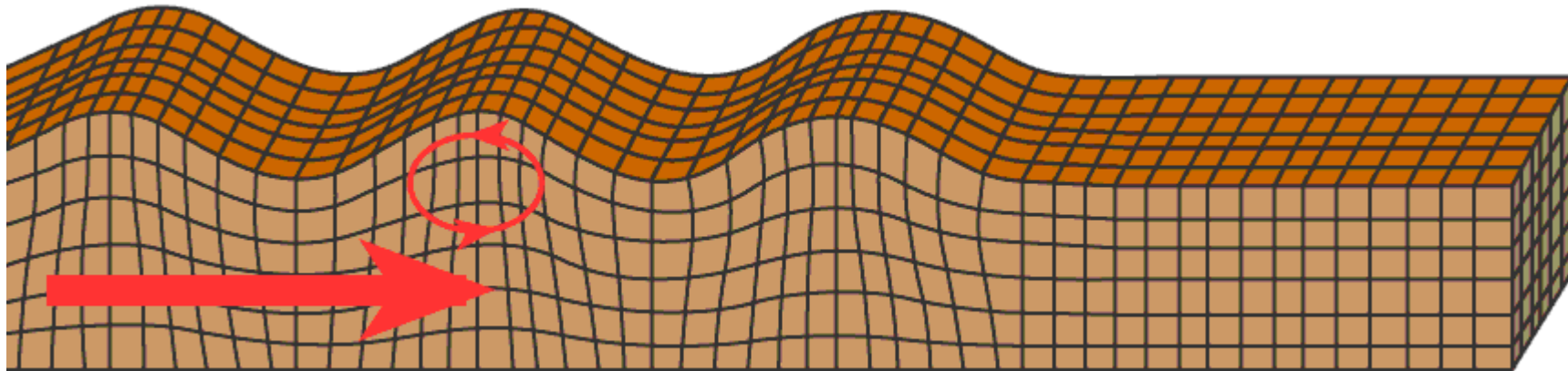
Распространение s- волн



Типы поверхностных упругих волн

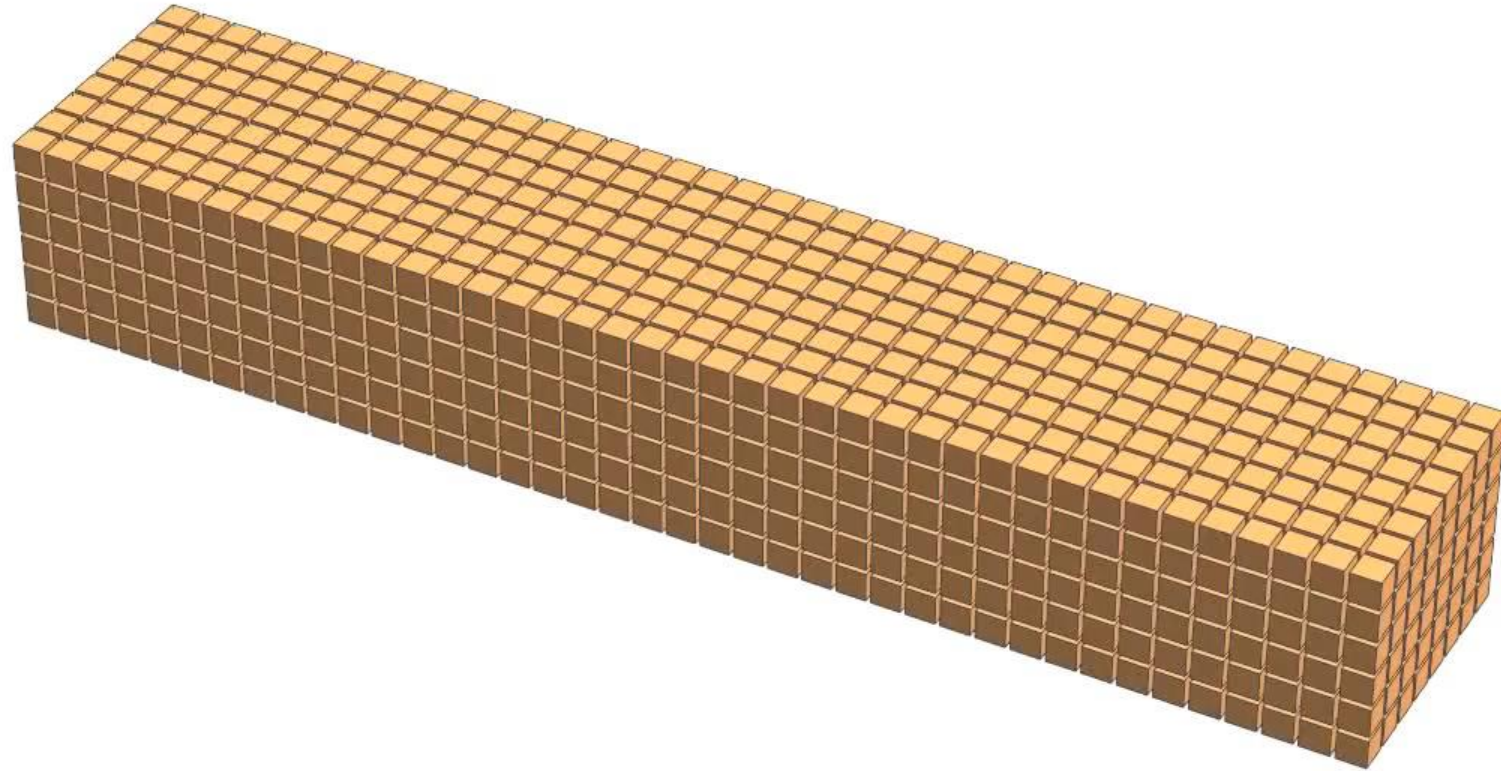


волны Лява



волны Рэлея

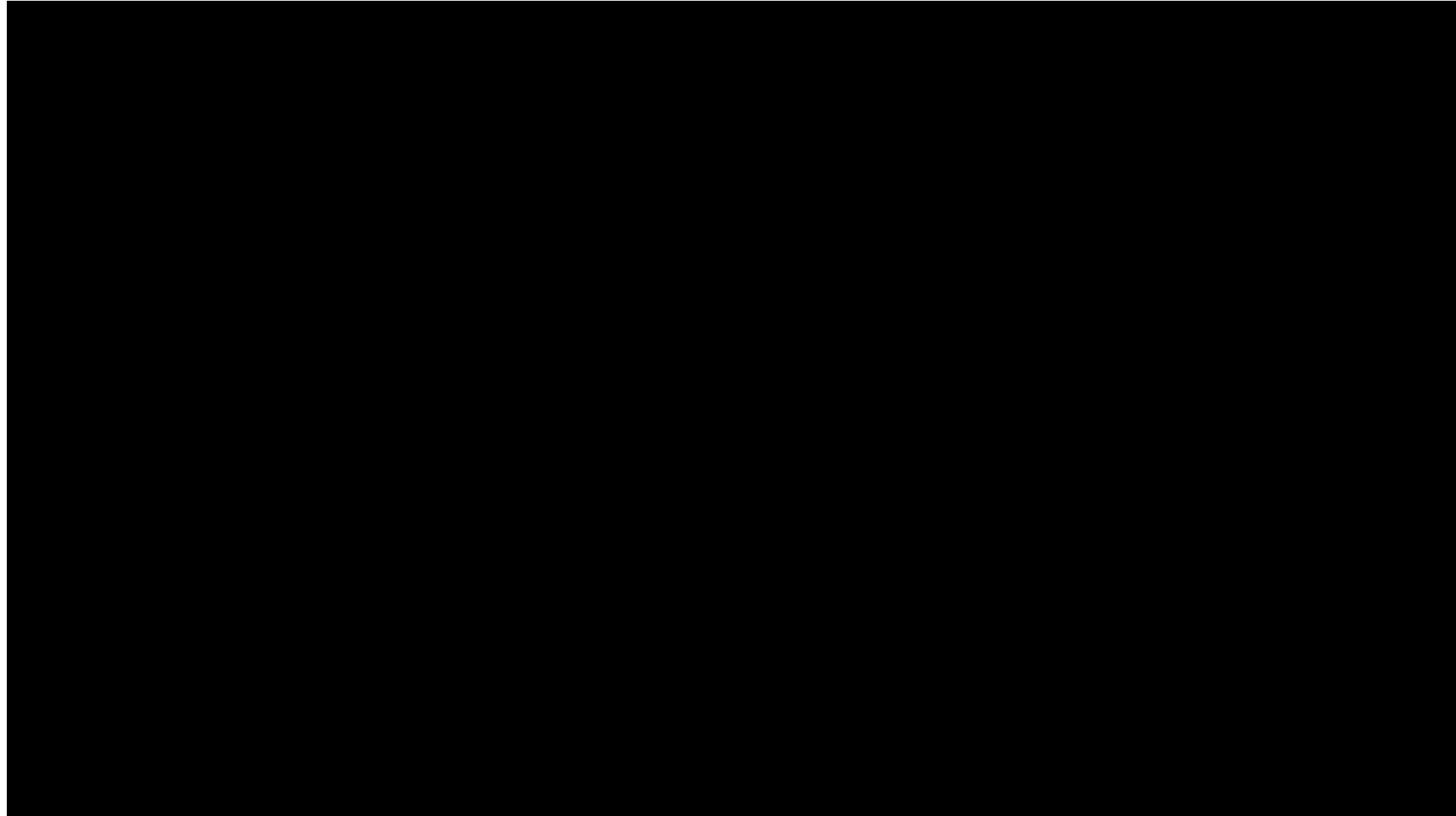
Распространение волны





Новая Зеландия, 2011

Распространение волны

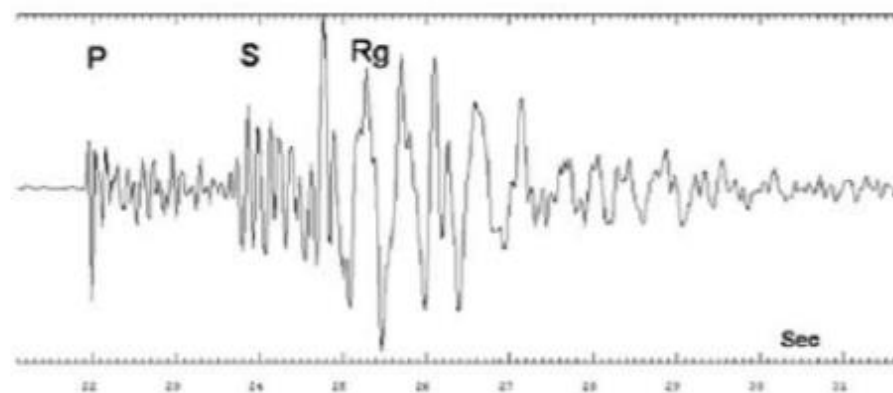


$$c_p(z) = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}} \quad c_s(z) = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$$c_p > c_s$$

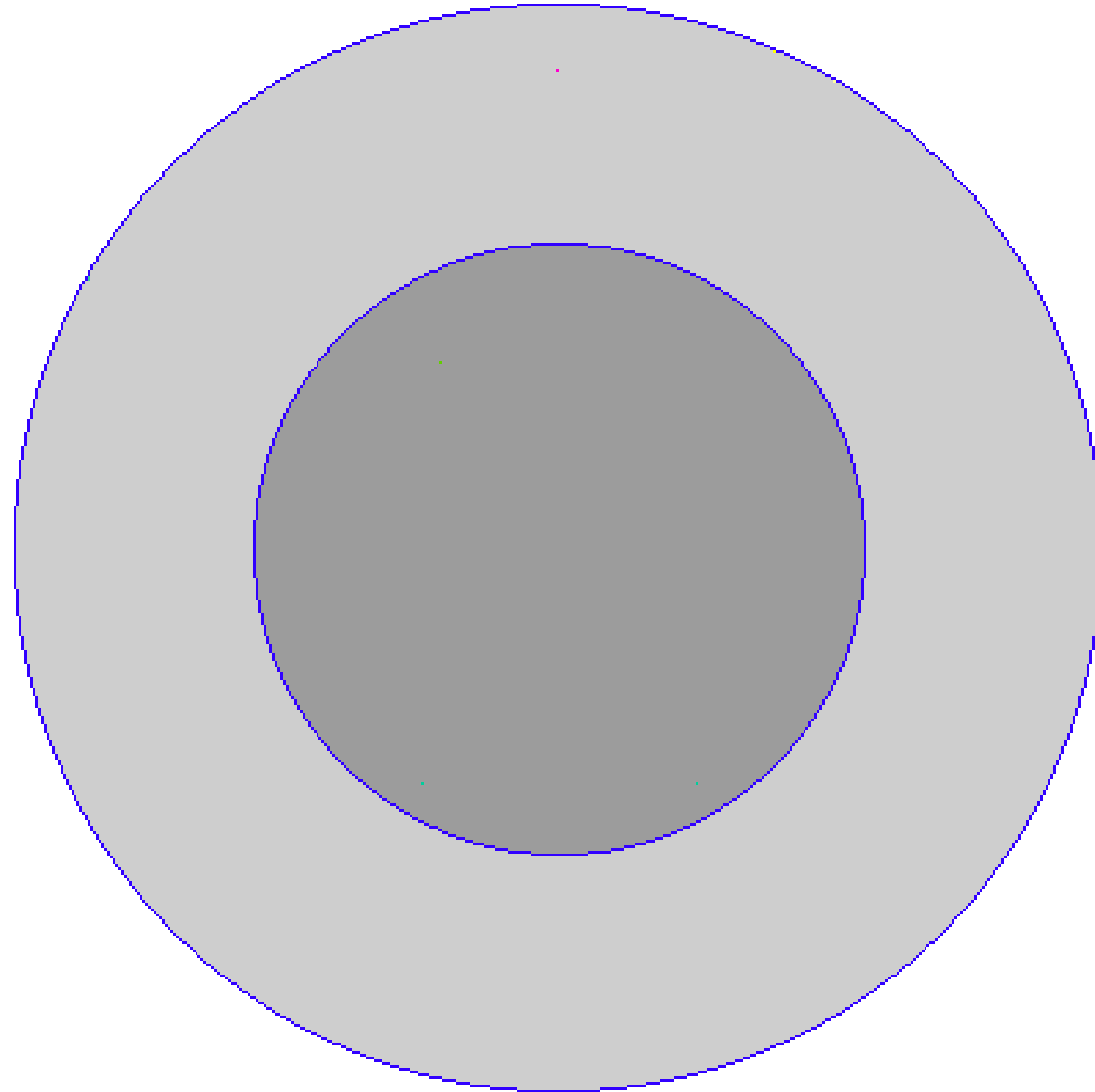
Для горных пород:

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



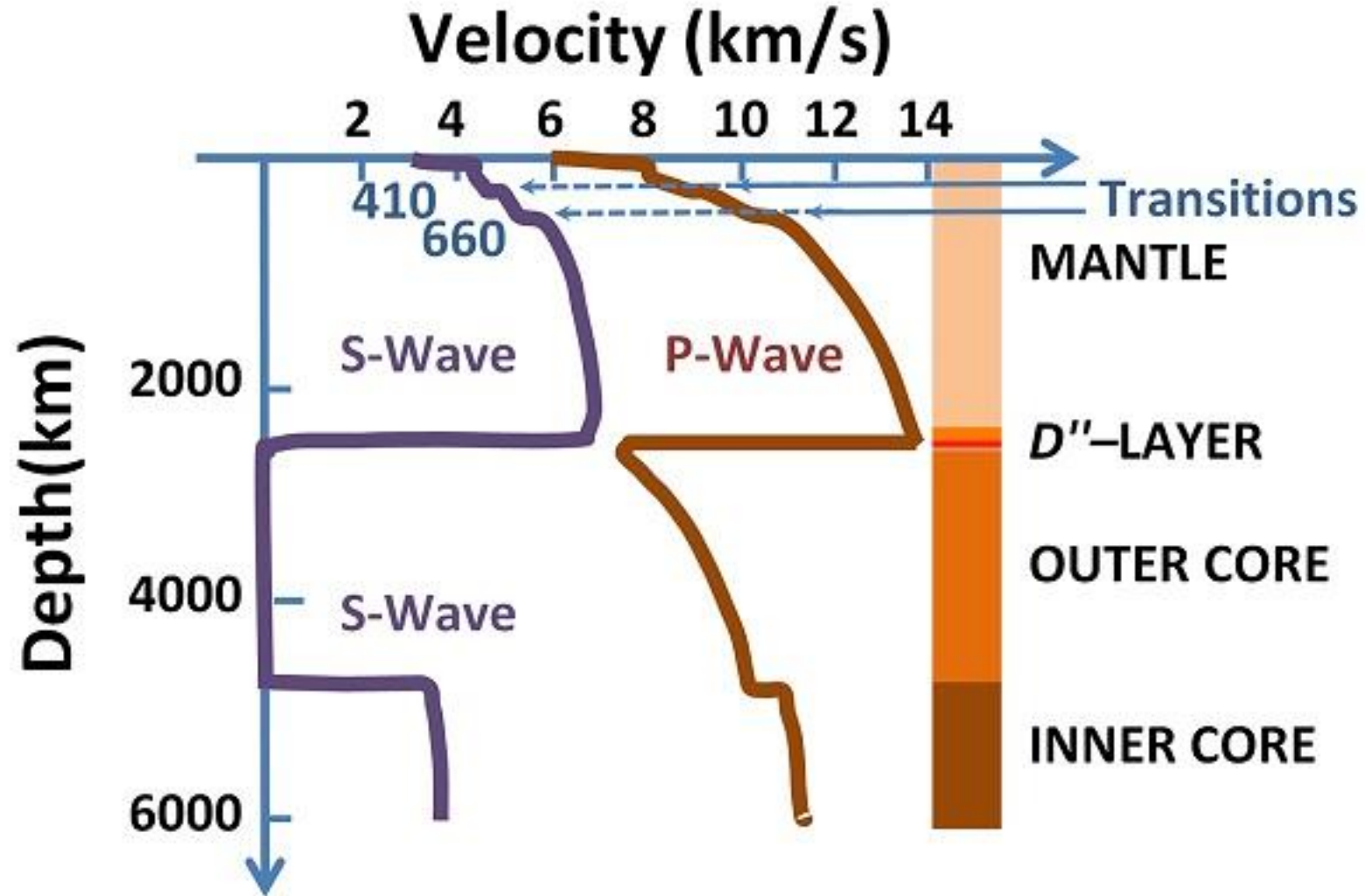
Обозначения: **p** и **s** – Манчестер, 1911

Сейсмические волны (лучи) внутри Земли

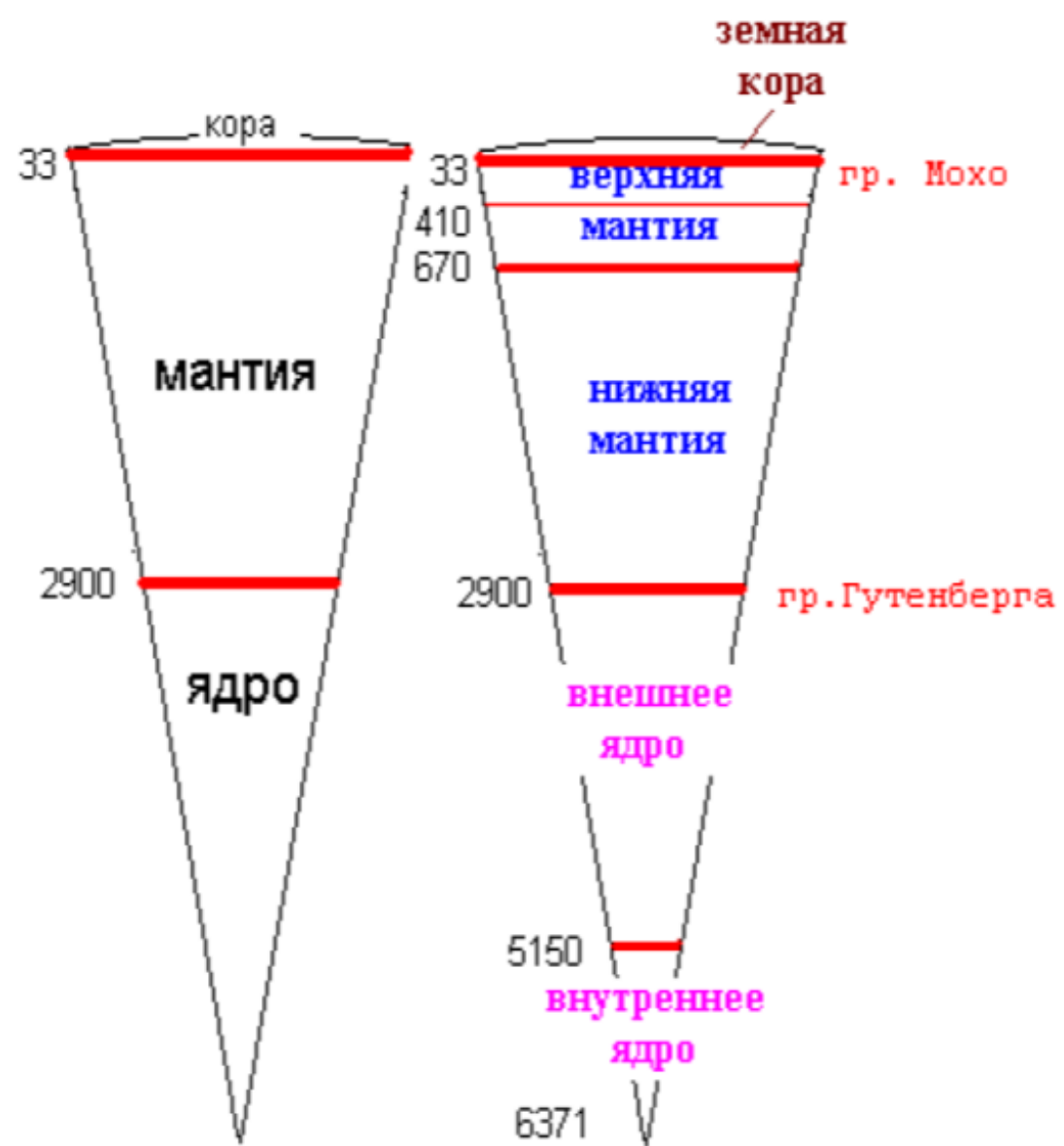
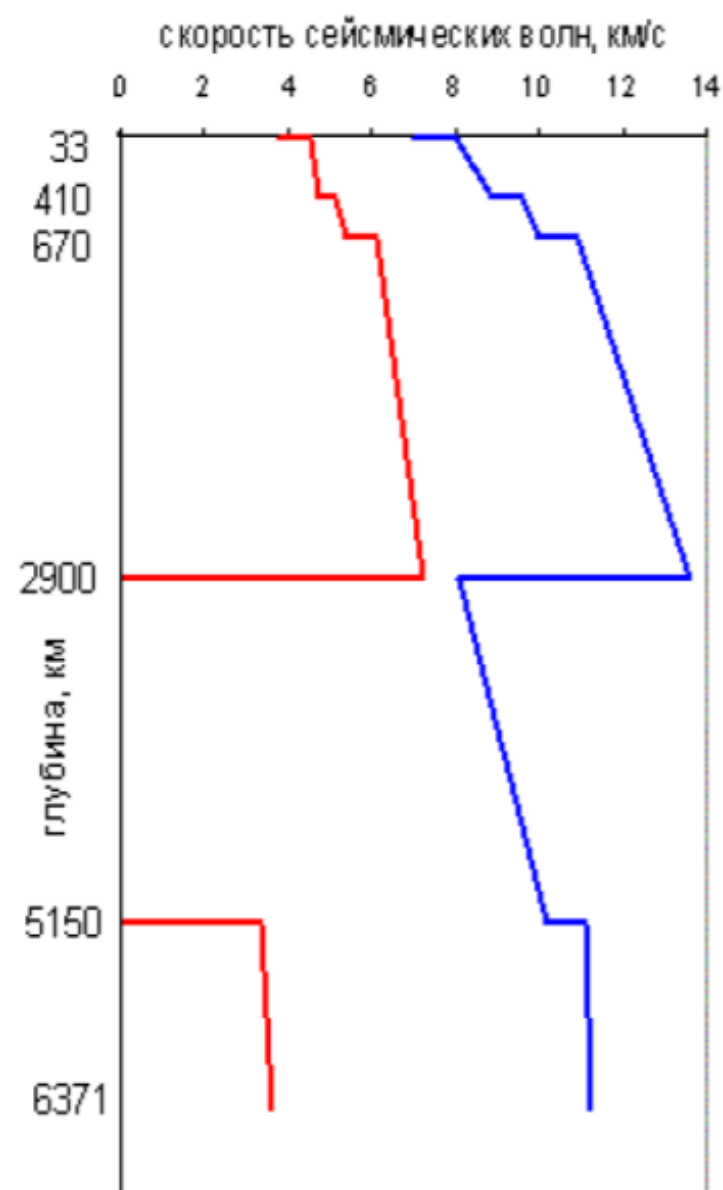


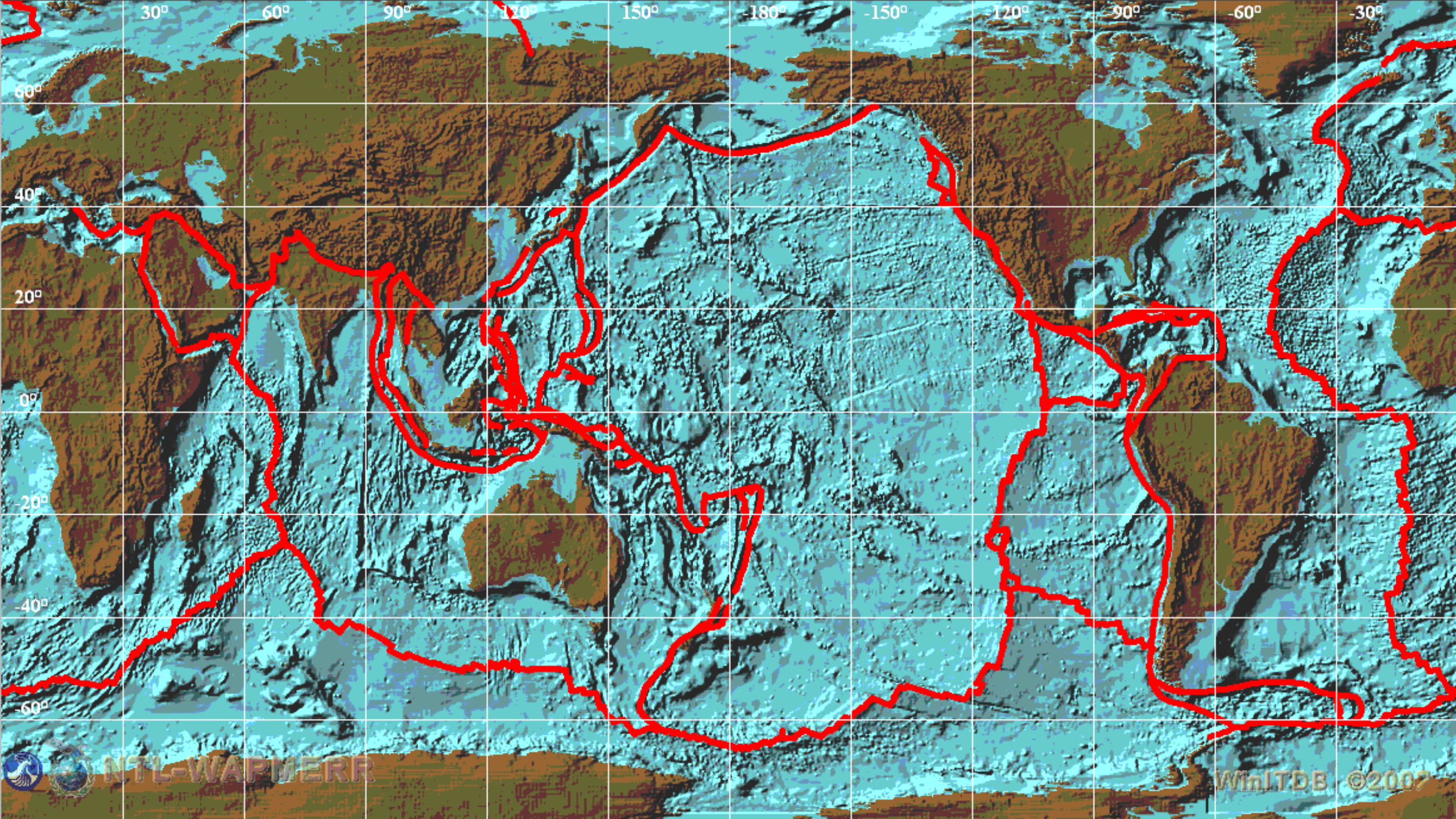
Preliminary Reference Earth Model (PREM)

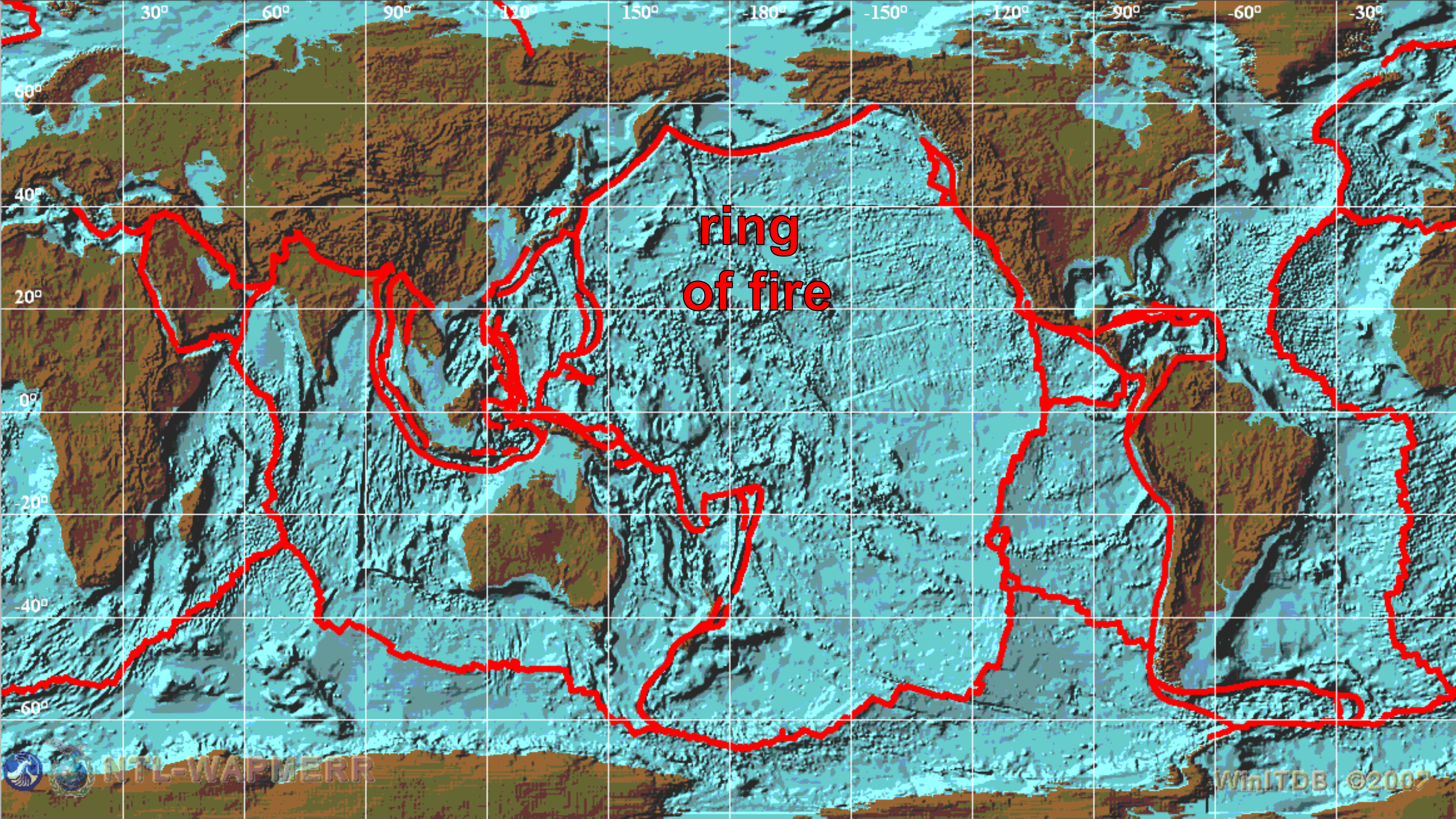
Dziewonski & Anderson 1981 г.



Скоростной разрез

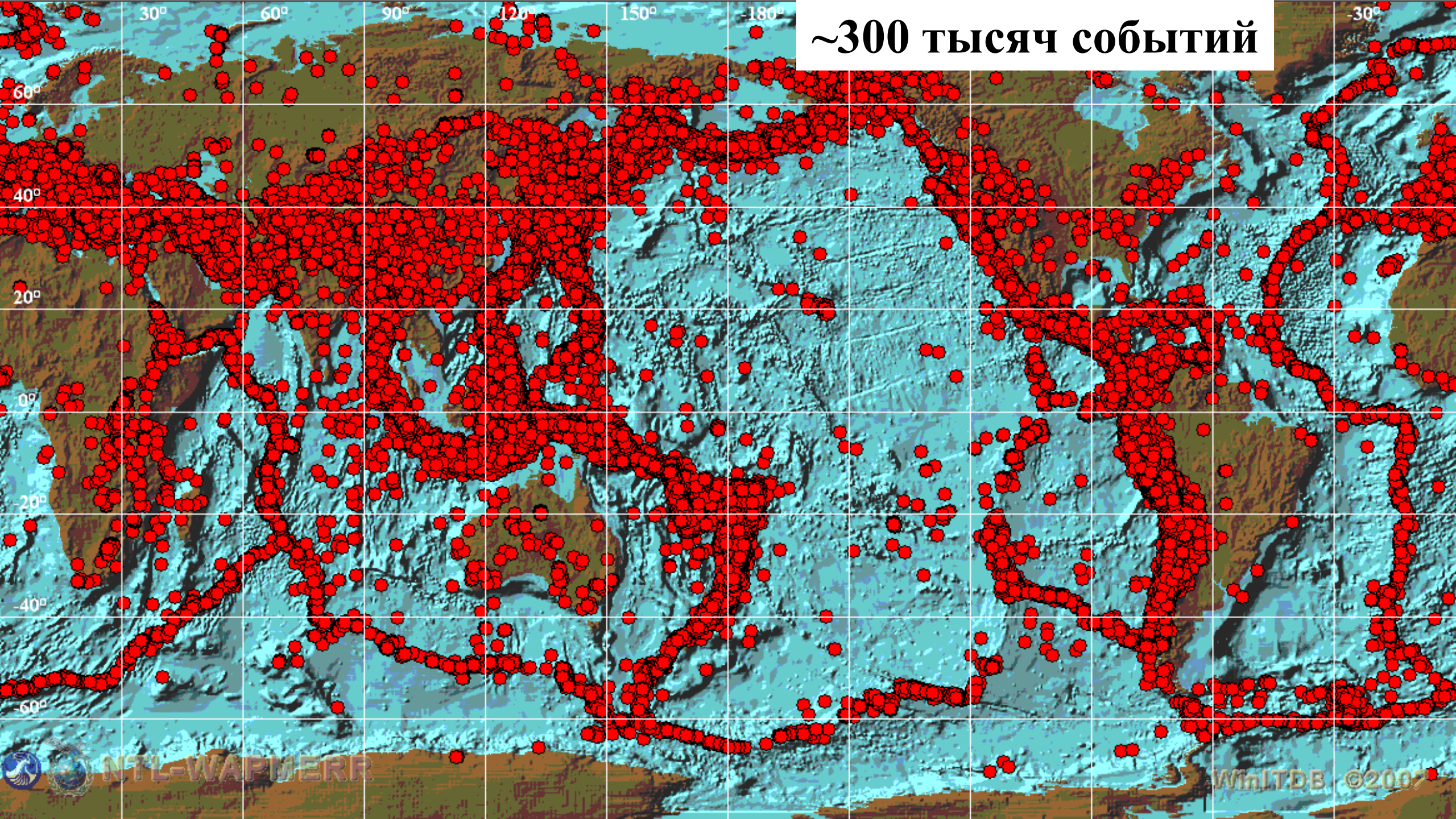






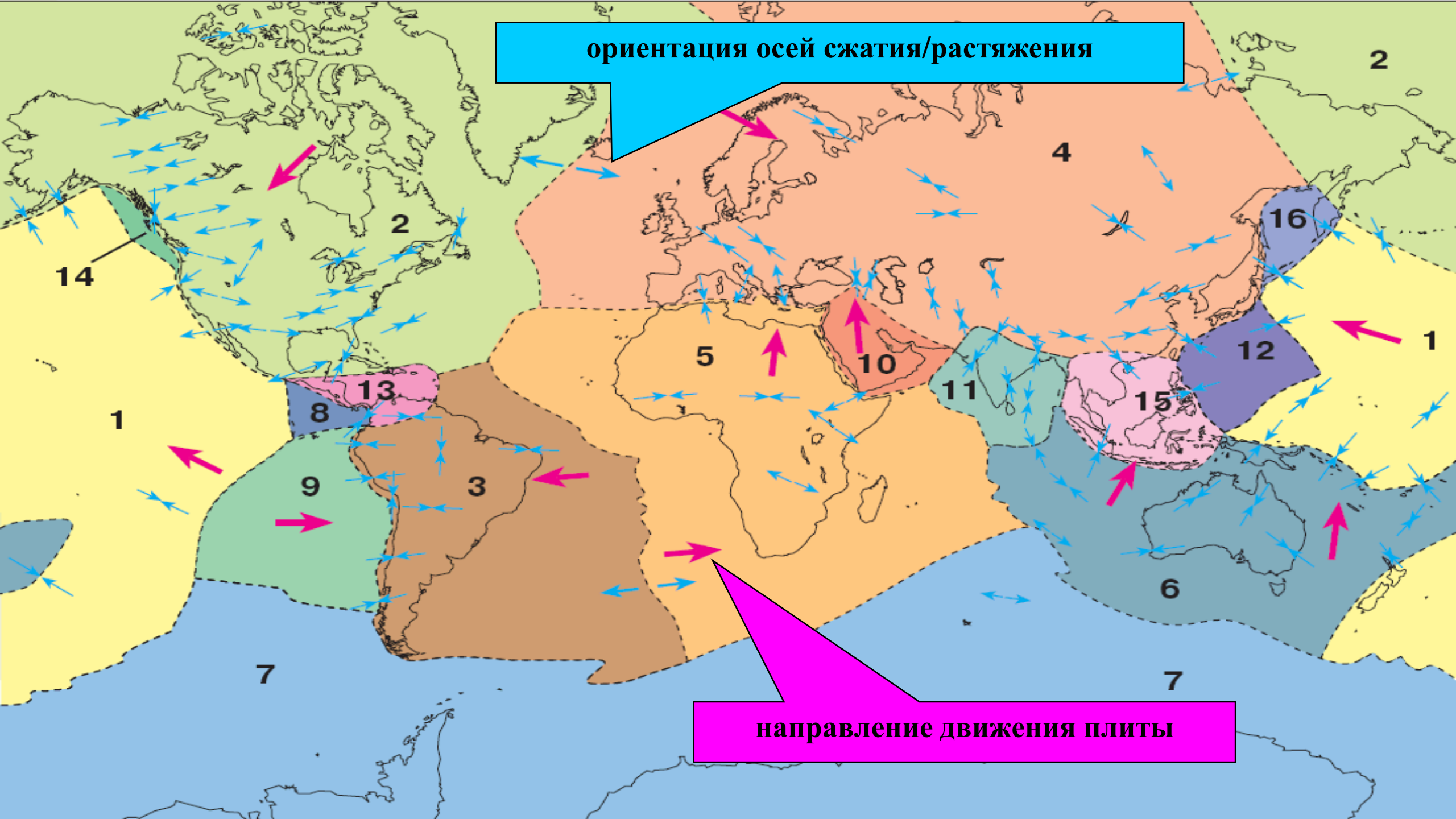
ring
of fire

~300 тысяч событий



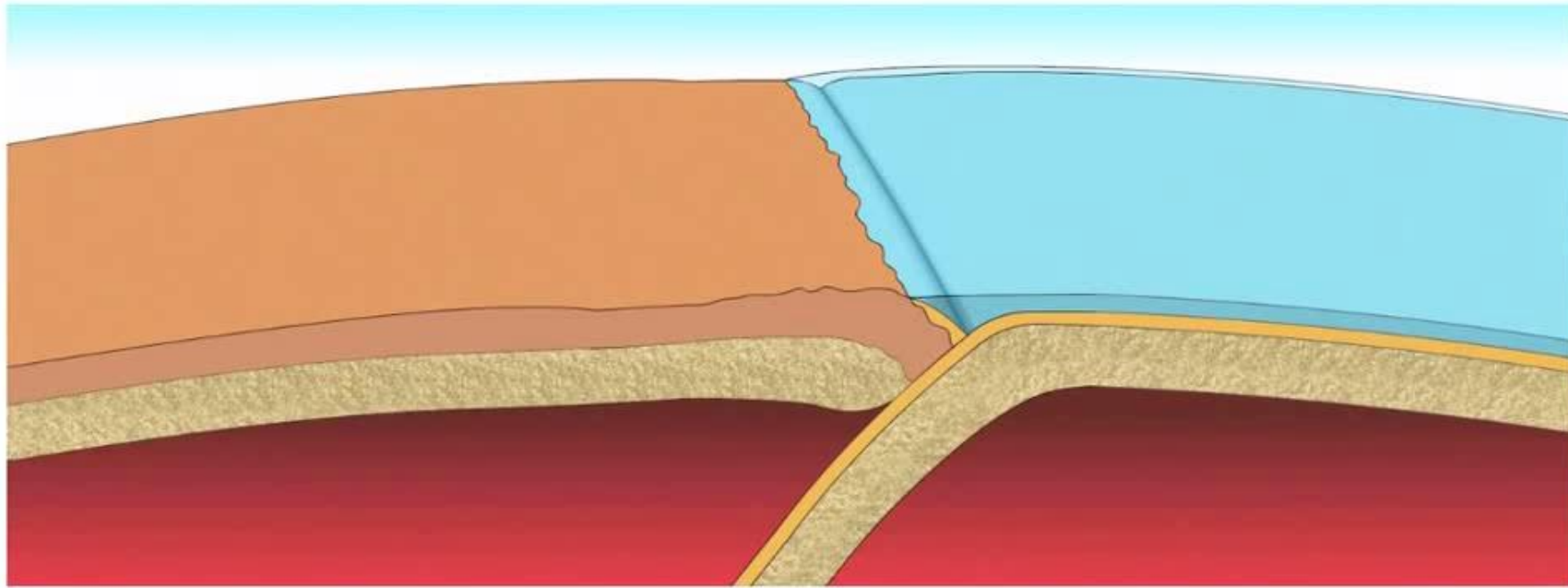


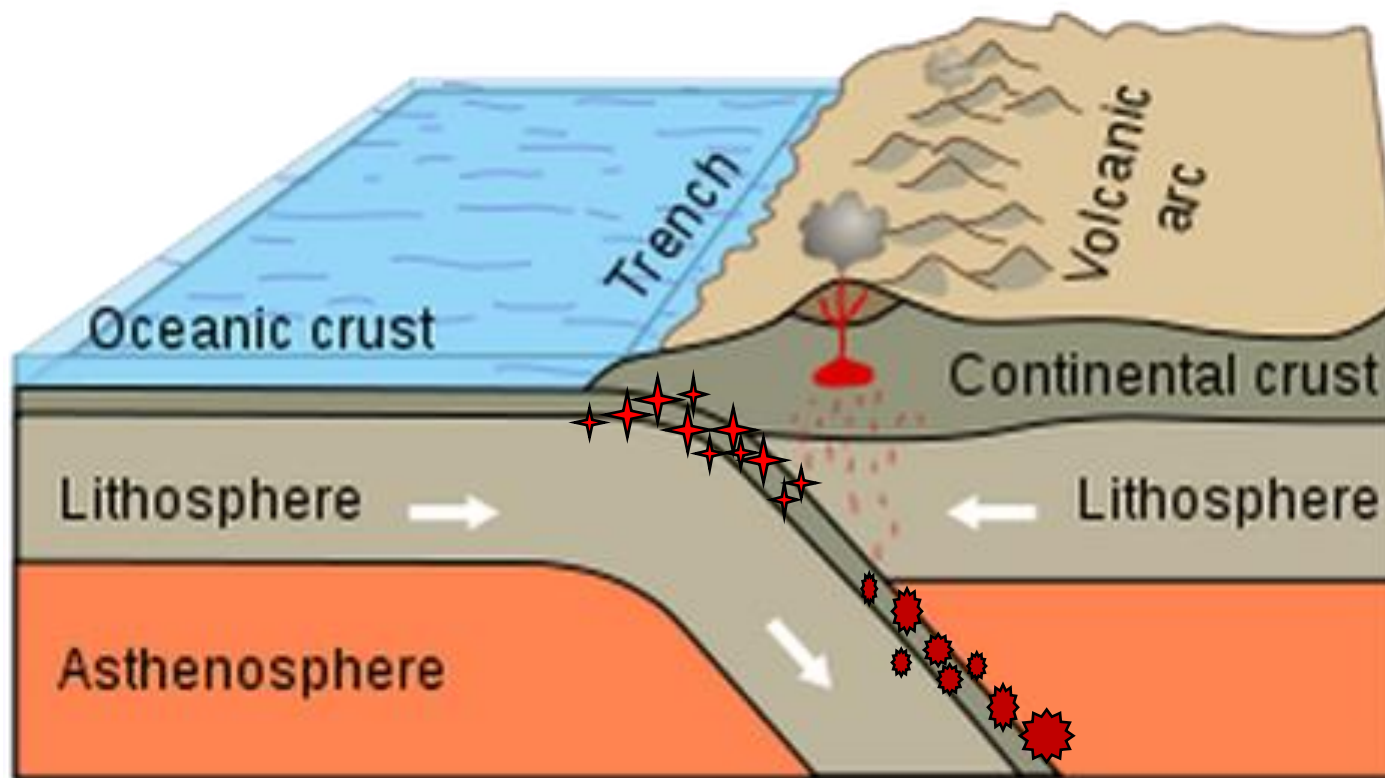
ориентация осей сжатия/растяжения



направление движения плиты

Subduction Zone





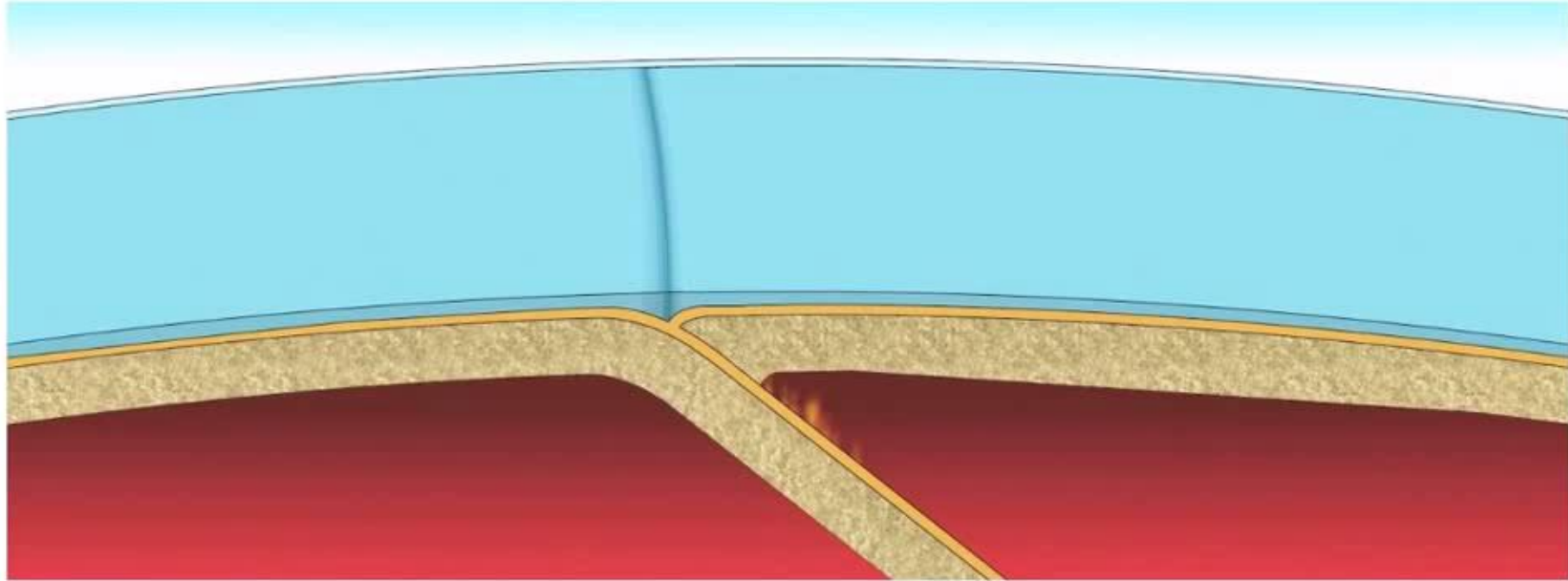
★ Мелкофокусные землетрясения

$h < 70$ км – 60-70%

★ Глубокофокусные землетрясения

$h_{\max} = 734$ км (Фиджи, NEIC)

Island Arc



Сейсмичность Сахалинской области

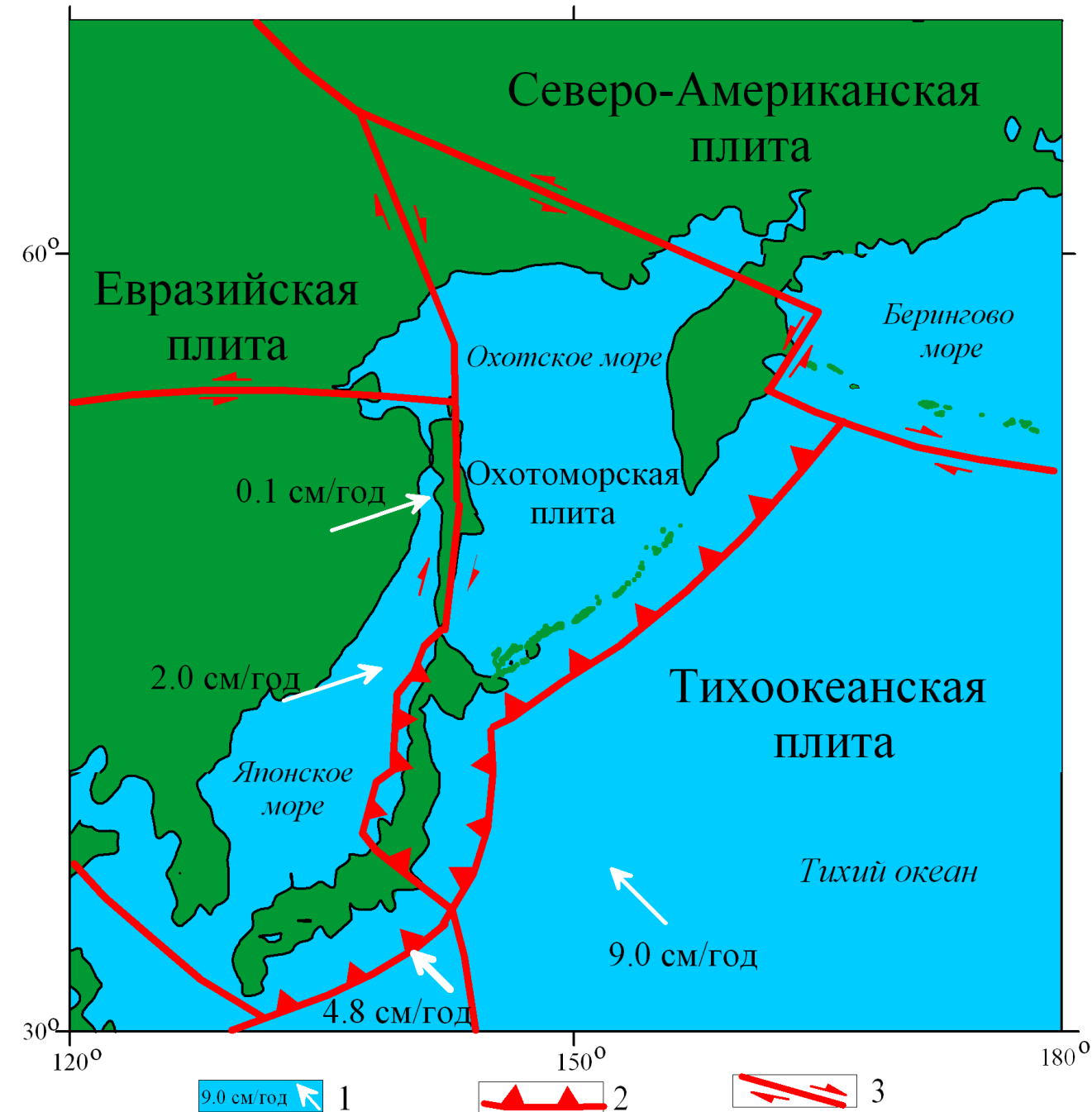
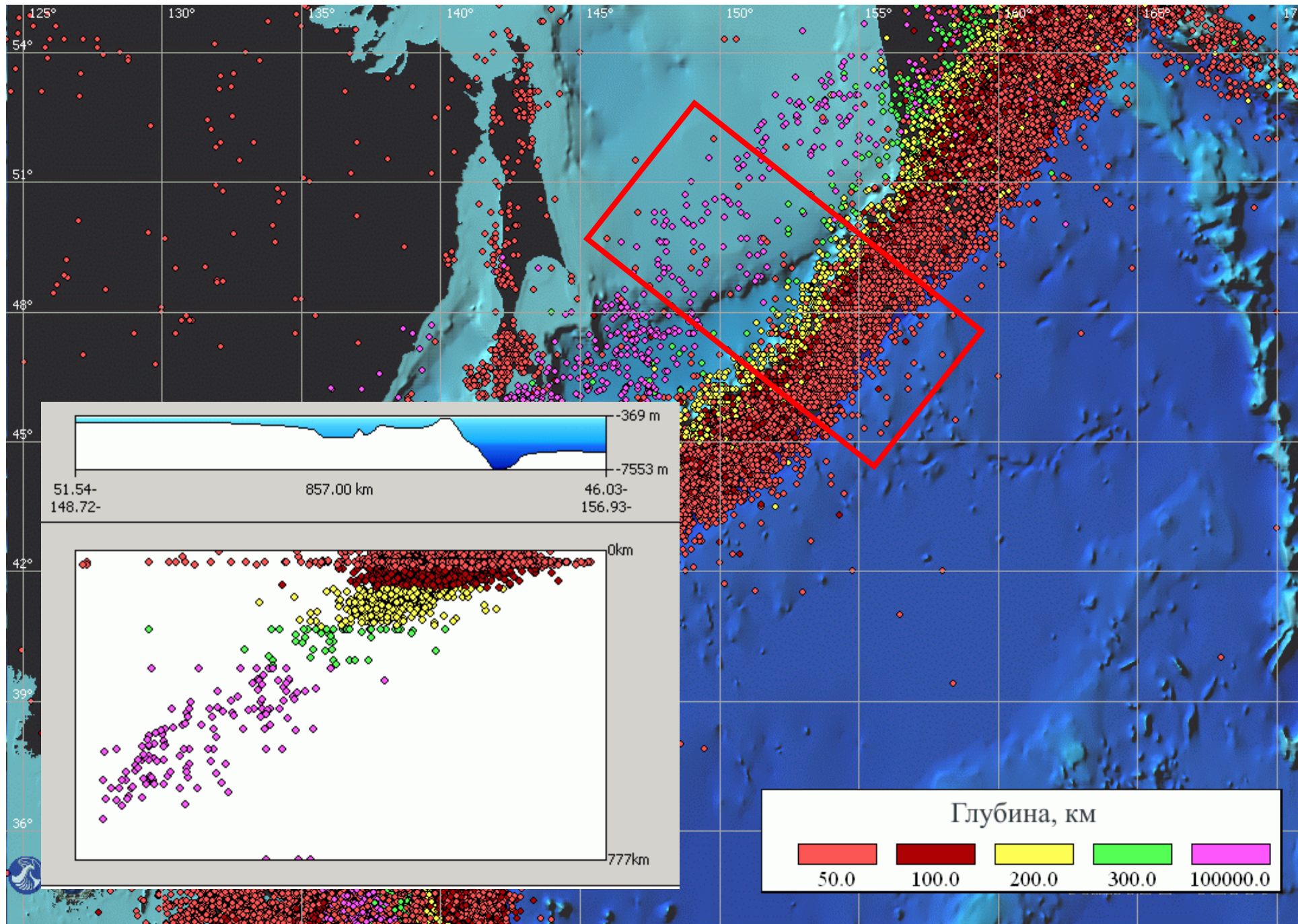
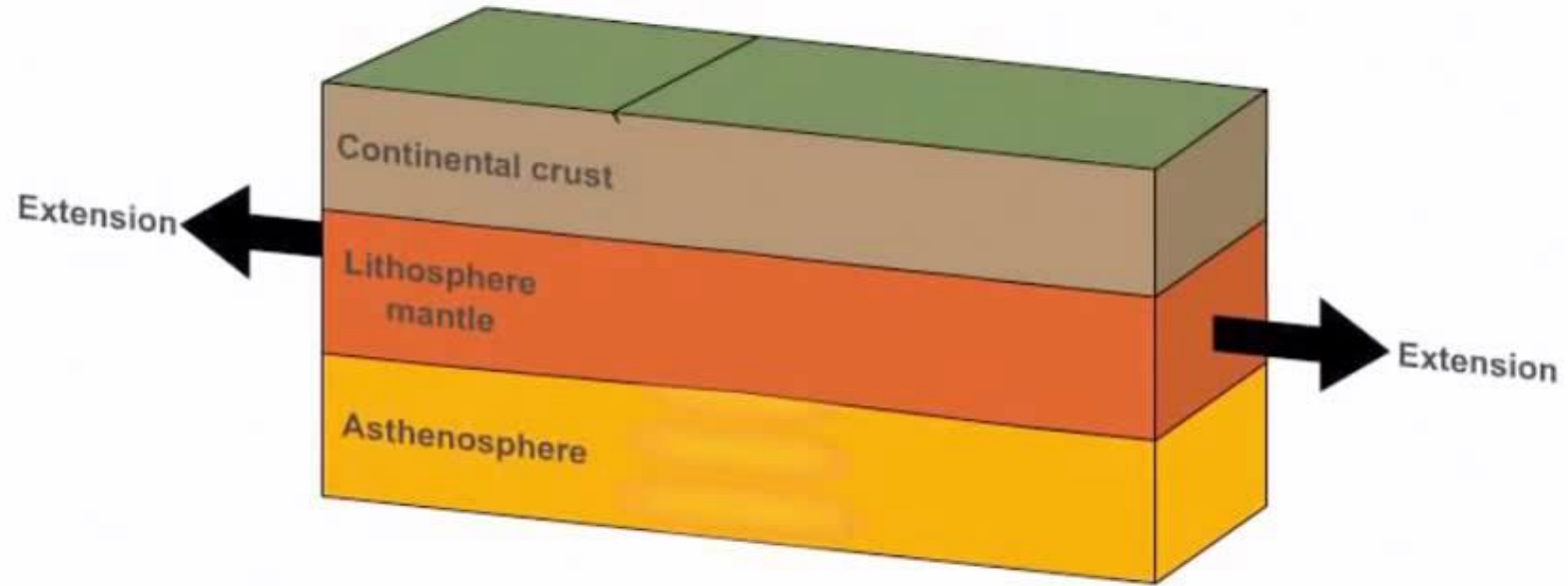


Рисунок 1. Тектоническая схема региона Охотского моря (Biebow et al., 2000; Kiratzi and Papazachos, 1996; Maruyama et al., 1997; Rodnikov et al., 2001).

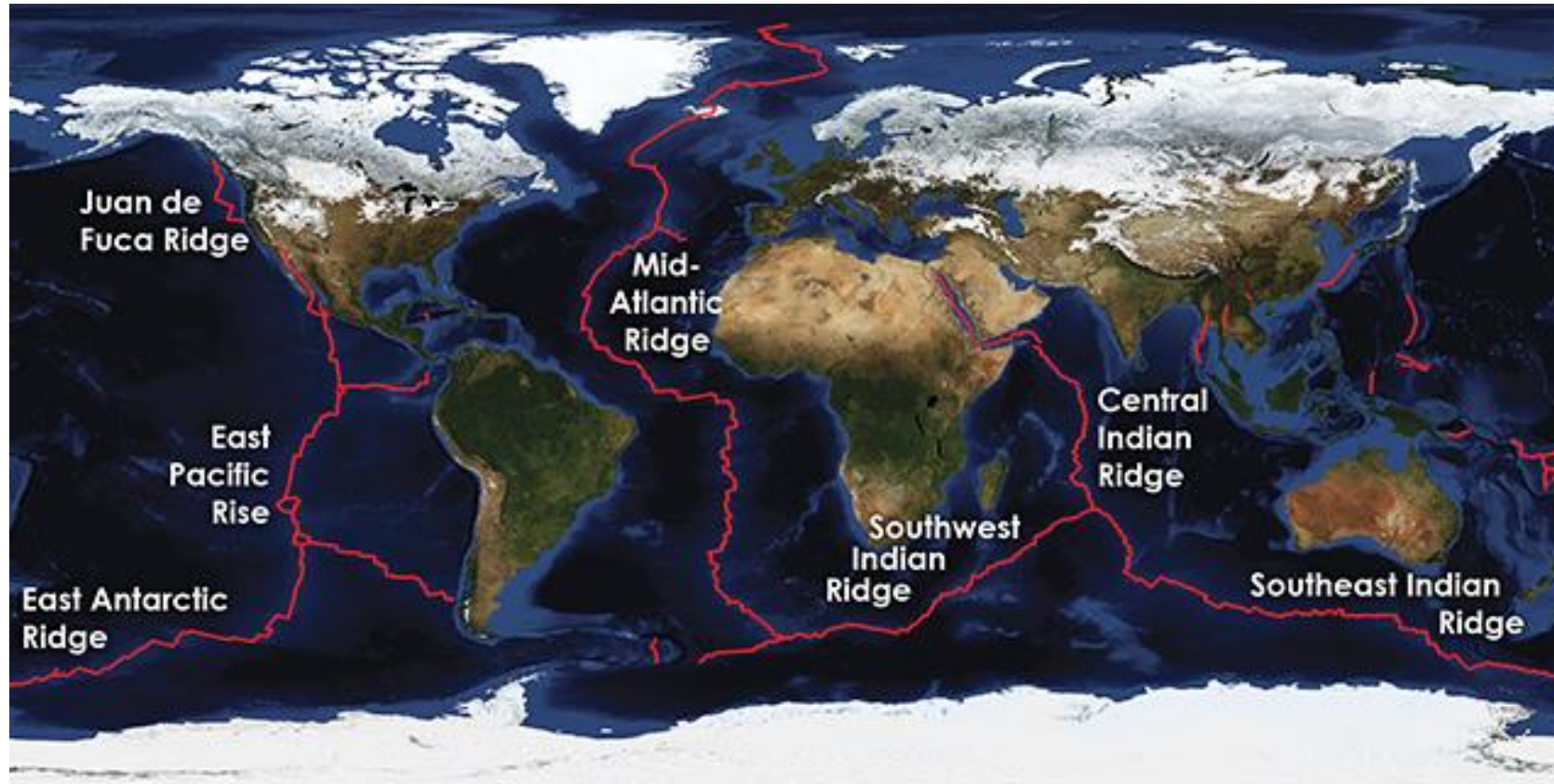
1 – скорость движения плит по данным GPS;
2 – зоны субдукции; 3 – разломы

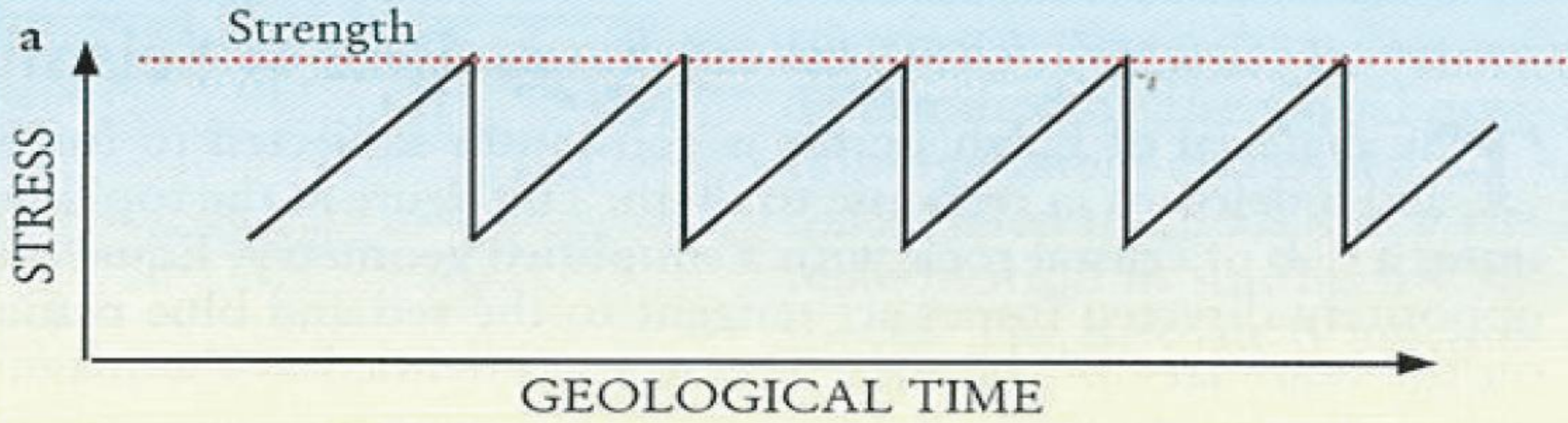


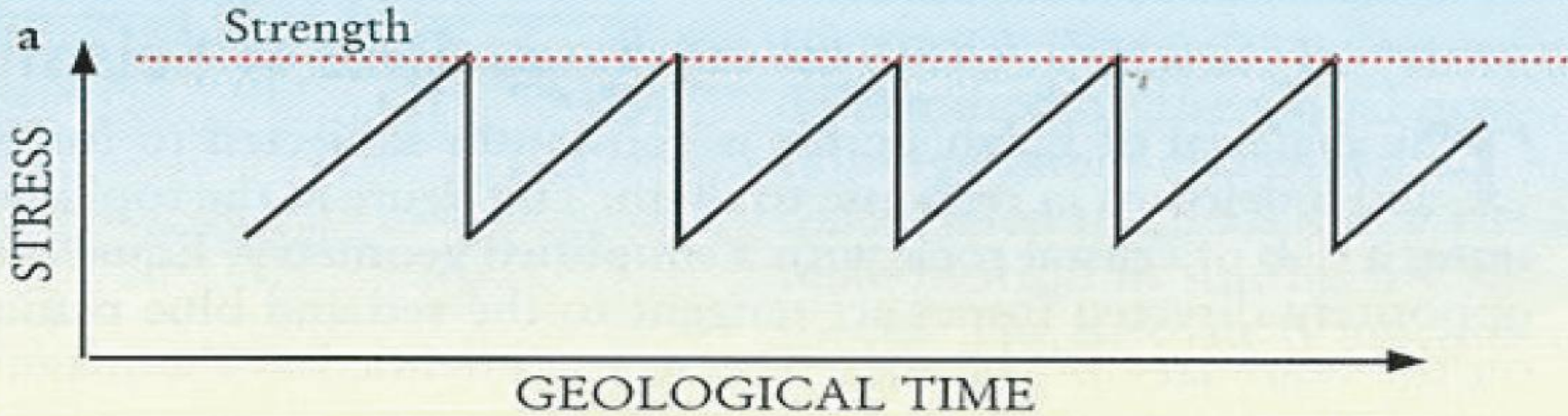
Rift Zone



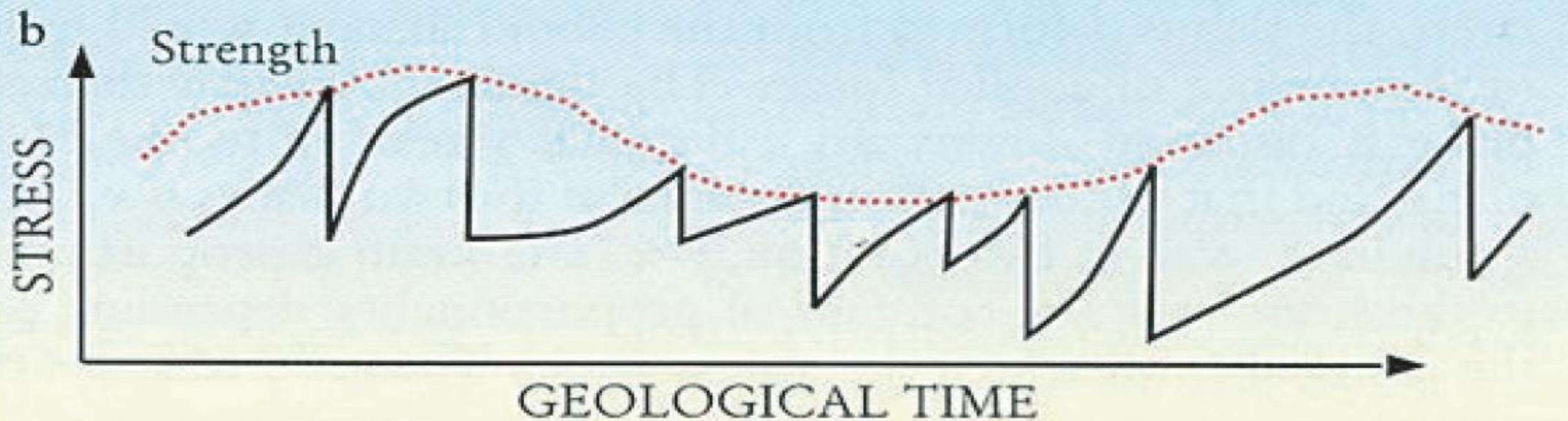
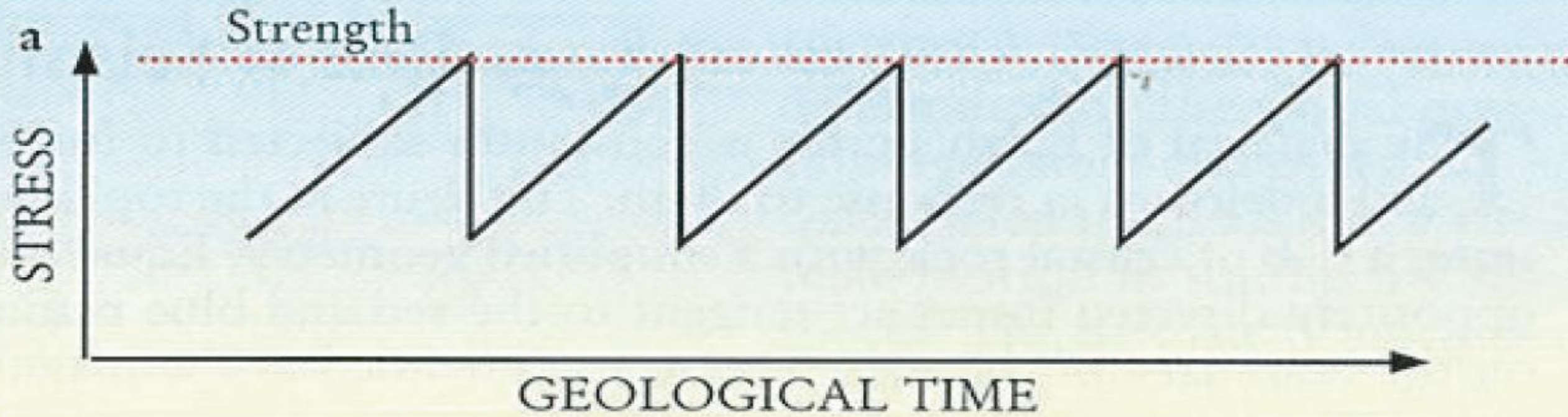
Срединно-океанические хребты





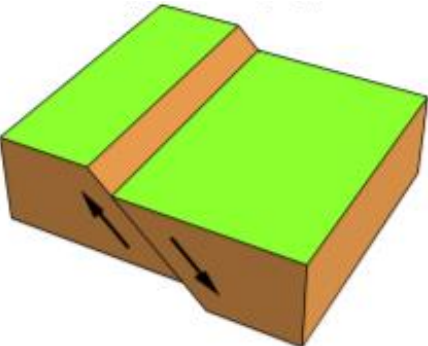


Время между двумя последовательными землетрясениями и величина сбрасываемого напряжения варьируются от события к событию

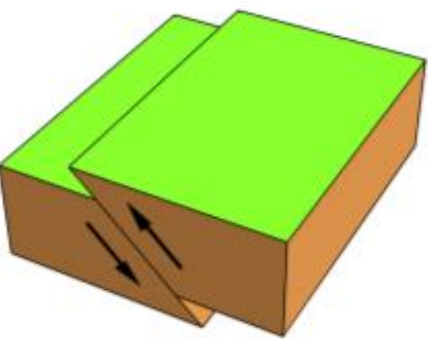


Основные типы тектонических разрывов и геометрия разлома

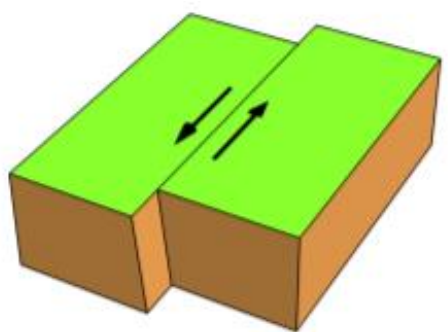
сброс (normal dip-slip)



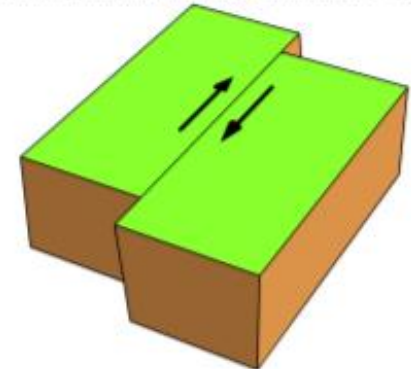
взброс (reverse dip-slip)



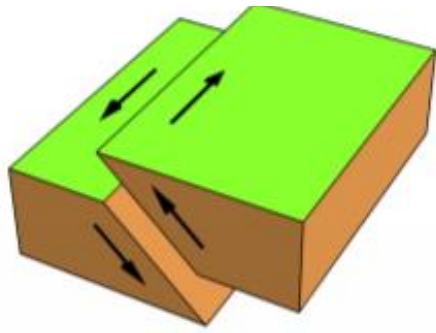
левосторонний сдвиг (left-lateral strike-slip)



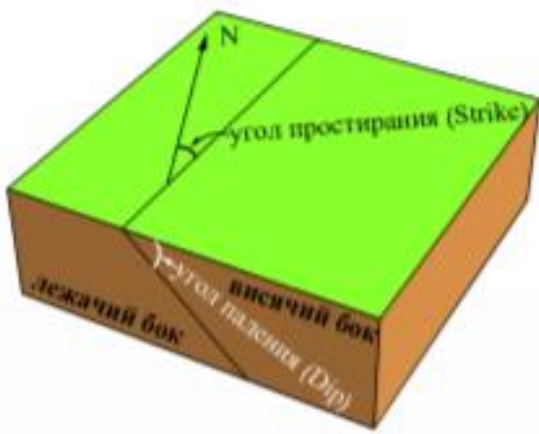
правосторонний сдвиг (right-lateral strike-slip)



взбросо-сдвиг (oblique-slip)



геометрия разлома



Как измерить силу землетрясения?

- **Шкала интенсивности качественная, организована по трем признакам (MSK-64, 12-балльная) :**
 - а) **воздействие на людей и их окружение**
 - б) **воздействие на сооружения**
 - в) **природные явления**

- **Шкала магнитуд или шкала Рихтера**

Как измерить силу землетрясения?

➤ **Шкала интенсивности**
организована по балльной
балльная) :

Описательная, субъективная шкала
(используется для сейсмического
районирования)

- а) воздействие на людей и их окружение**
- б) воздействие на сооружения**
- в) природные явления**

➤ **Шкала магнитуд**

Физическая,
объективная шкала

Шкала MSK-64

IX баллов. Всеобщие повреждение зданий.

а) Всеобщая паника; большие повреждения мебели. Животные мечутся и кричат.

б) Во многих зданиях большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб, в отдельных - сквозные трещины и проломы в стенах, обрушение частей зданий, обрушение внутренних стен. Некоторые здания полностью разрушены. Памятники и колонны опрокидываются. Значительные повреждения искусственных водоемов; разрывы части подземных трубопроводов. В отдельных случаях - искривление железнодорожных рельсов и повреждение проезжих частей дорог.

в) На равнинах наводнения. Трещины в грунтах достигают ширины 10 см, большое количество тонких трещин в грунтах. Скалы обваливаются; оползни и осыпания грунта. На поверхности воды большие волны.

Шкала магнитуд

(существует несколько вариантов!)

Понятие магнитуды введено Чарльзом Рихтером в 1935 г.

Первоначальная шкала Рихтера для близких землетрясений <600км

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

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

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

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

D – эпицентральное расстояние в градусах

Шкала магнитуд

(существует несколько вариантов!)

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

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

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

Магнитуда, определяемая по сейсмическому моменту

M_0 [Н м]

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

$$M_0 = \mu S d$$

«Сила цунами»

(описательная)

(физическая)

1. 6-балльная Зиберга-
Амбразейса

2. 12-балльная
Пападопулоса-
Имамуры

1. Имамуры-Ииды

$$m = \log_2 N_{\max}$$

2. Соловьева-Имамуры

$$I = 0.5 + \log_2 \bar{N}$$

3. Мурти-Лумиса

$$ML = 2(\log_2 E[\text{эрг}] - 19)$$

«Сила цунами»

(описательная)

(физическая)

1. 6-балльная Зиберга-
Амбразейса

2. 12-балльная
Пападопулоса-
Имамуры

1. Имамуры-Ииды

$$m = \log_2 N_{\max}$$

2. Соловьева-Имамуры

$$I = 0.5 + \log_2 \bar{N}$$

3. Мурти-Лумиса

$$ML = 2(\log_2 E[\text{эрг}] - 19)$$



TL/ICMMG Global Historical Tsunami Database

Year: —

Depth: —

Magnitude: —

Tsunami intensity: —

Tsunami Magnitude: —

Wave Height: —

Moment magnitude: —

Abe's tsunami magnitude —

Cause of Tsunami:
(**Ctrl+Click** to select more than one):

- Volcanic
- Landslide
- Meteorological
- Seiches
- Explosion

Area Coordinates ('-' for southern latitude and western longitude):

Latitude: —

Longitude: —

Number of Run-ups: —

Tsunamiogenic Region Code:

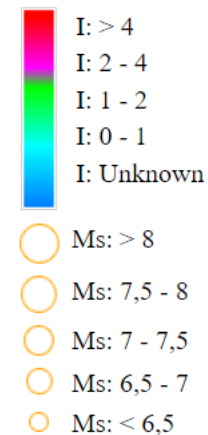
Basic reference code:

Source Region:

Damage: None Slight Moderate Large

Validity: —

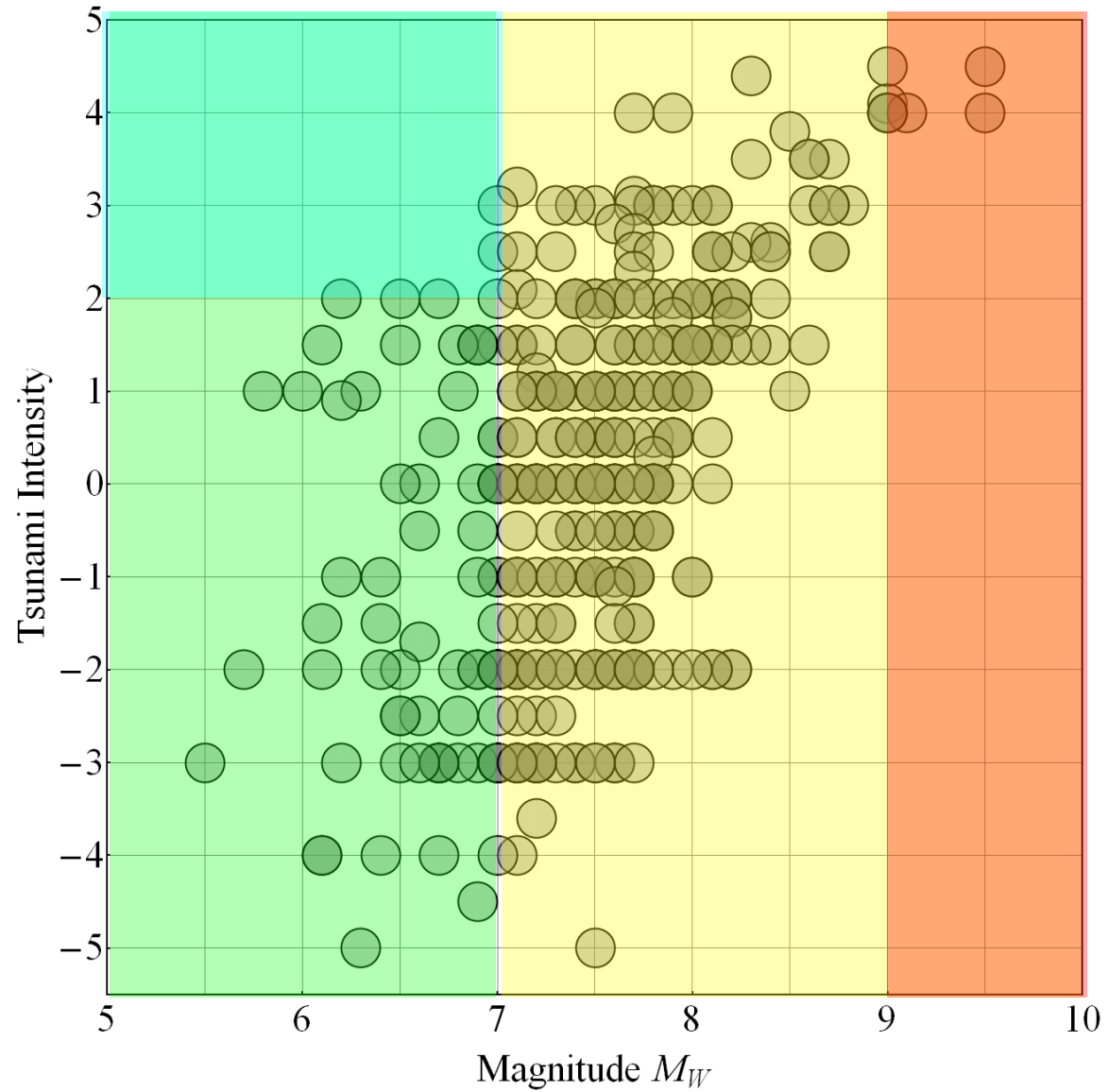
Results per page:



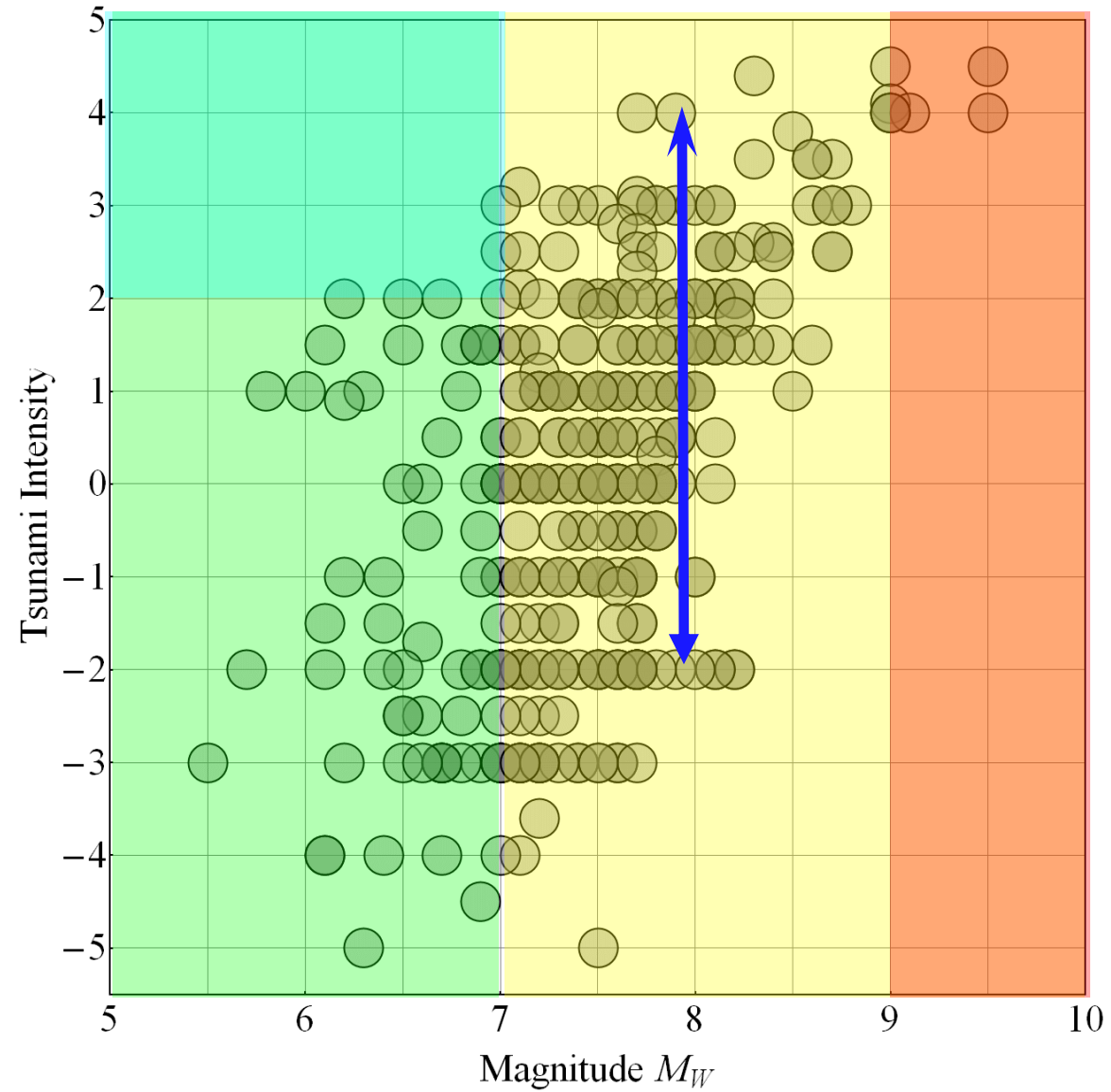
Характеристики «силы» землетрясений и цунами

землетрясения	цунами
<p data-bbox="580 701 728 768" style="text-align: center;">M_w</p> $M_w = \frac{\lg M_0}{1.5} - 6.07$	<p data-bbox="1722 701 1760 768" style="text-align: center;">I</p> <p data-bbox="1429 825 2244 903" style="text-align: center;">Соловьева-Имамуры</p> $I = 0.5 + \log_2 \bar{H}$

Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения



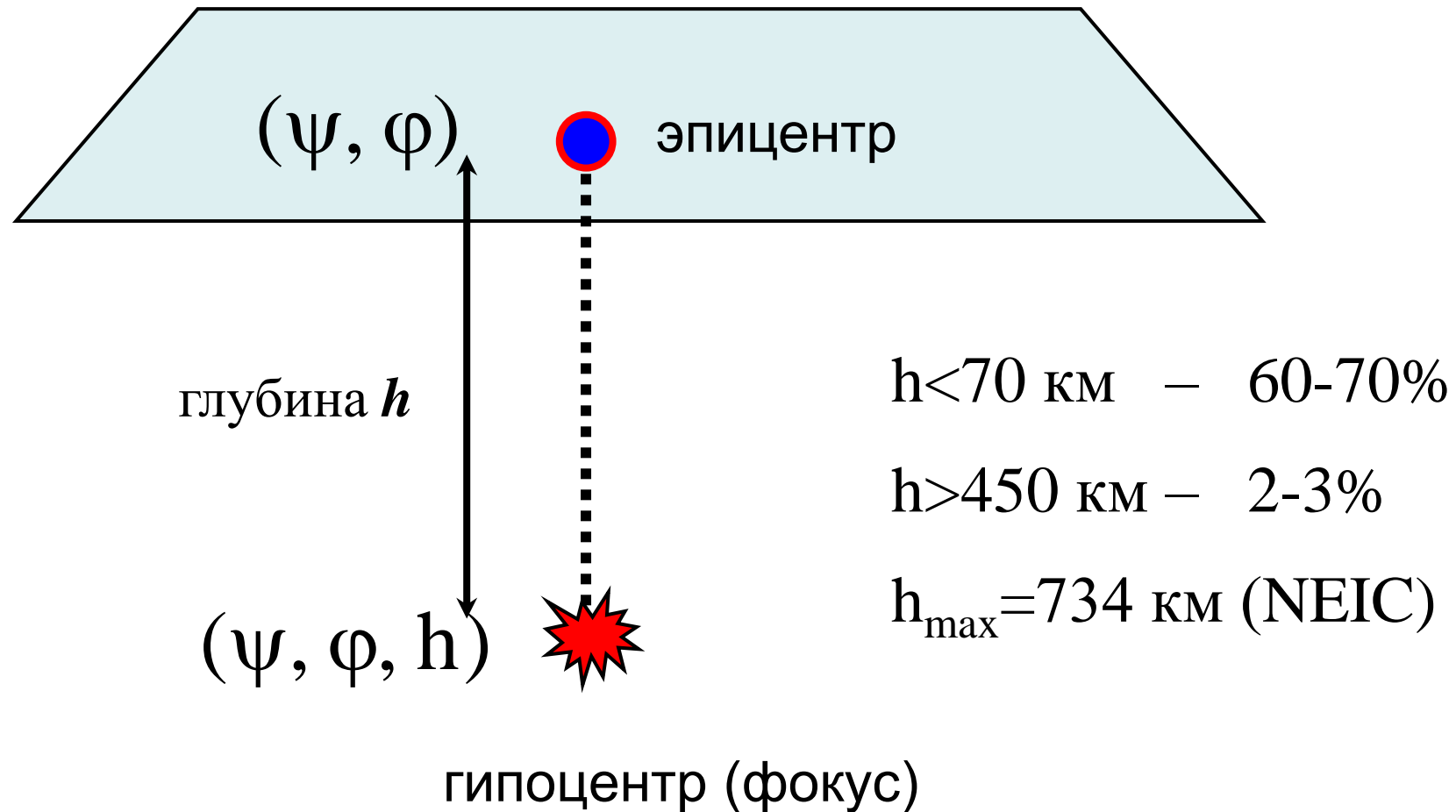
Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения



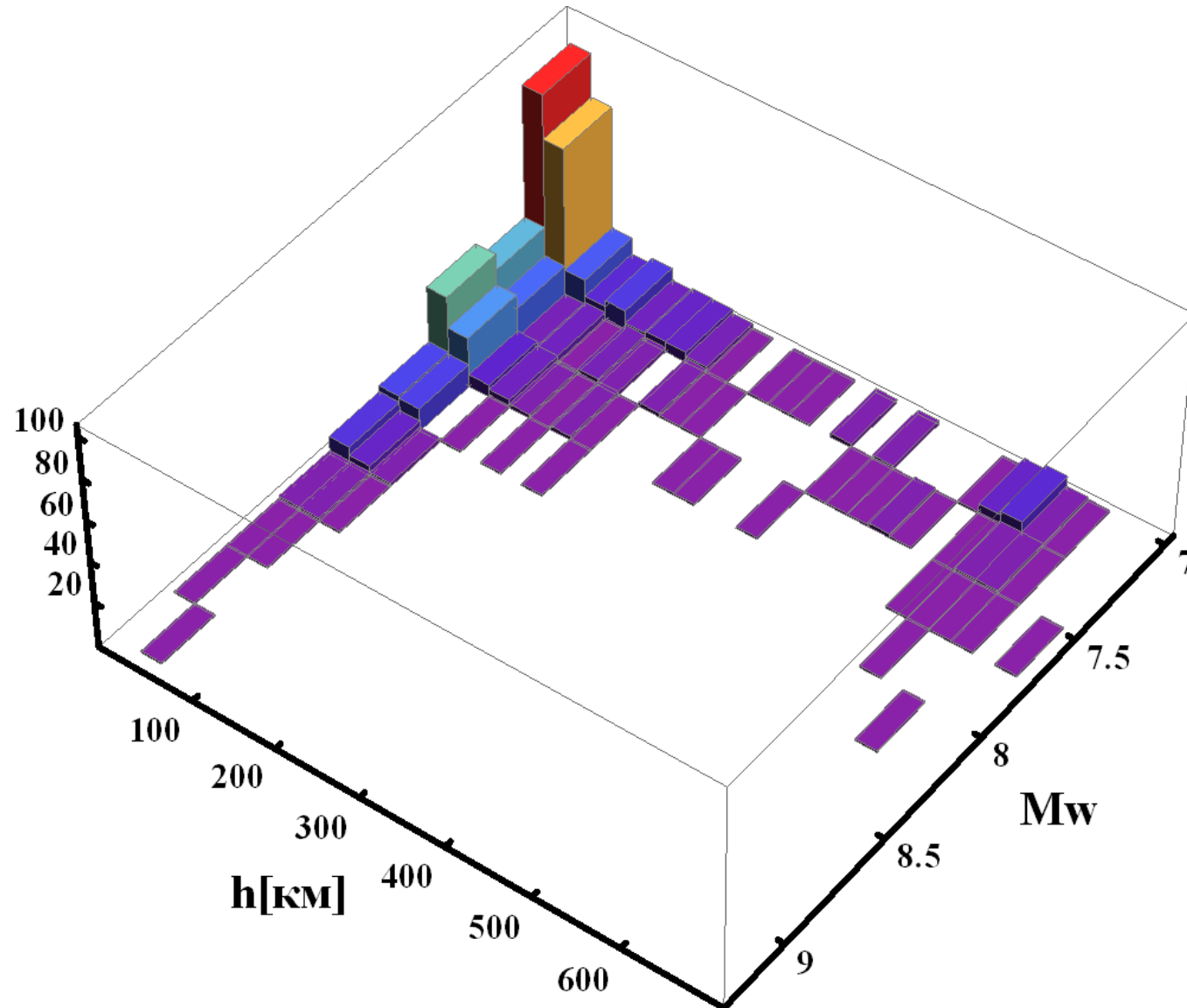
Большой разброс обязан различиям в

- ✓ механизме землетрясения;
- ✓ глубине землетрясения;
- ✓ распределении подвижки;
- ✓ продолжительности вспарывания разрыва;
- ✓ особенностям топографии берега и дна;
- ✓ возможному вкладу в цунами несейсмических источников и фазы прилива;
- ✓ глубине океана в источнике;
- ✓ ошибкам в определении M_w и I ;
- ✓ несовершенству шкал M_w и I (???)

Землетрясение: основные понятия



Распределение реальных событий (с 1976 г.) по глубине h и магнитуде M_w

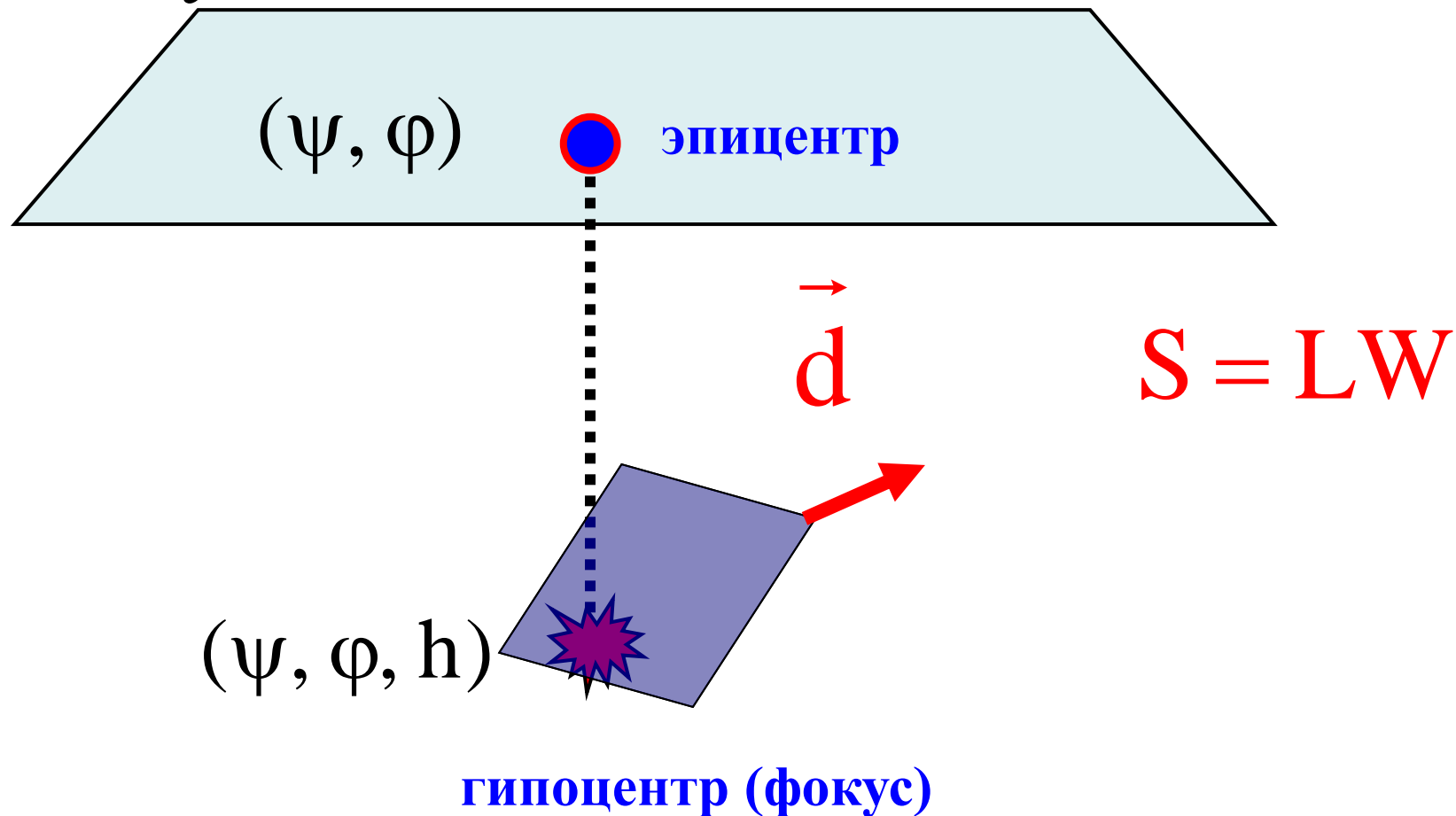


Очаг землетрясения. Основные понятия

$$M_0 = \mu S d \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

сейсмический момент

μ – модуль сдвига ($\approx 3 - 8 \cdot 10^{10}$ Па)

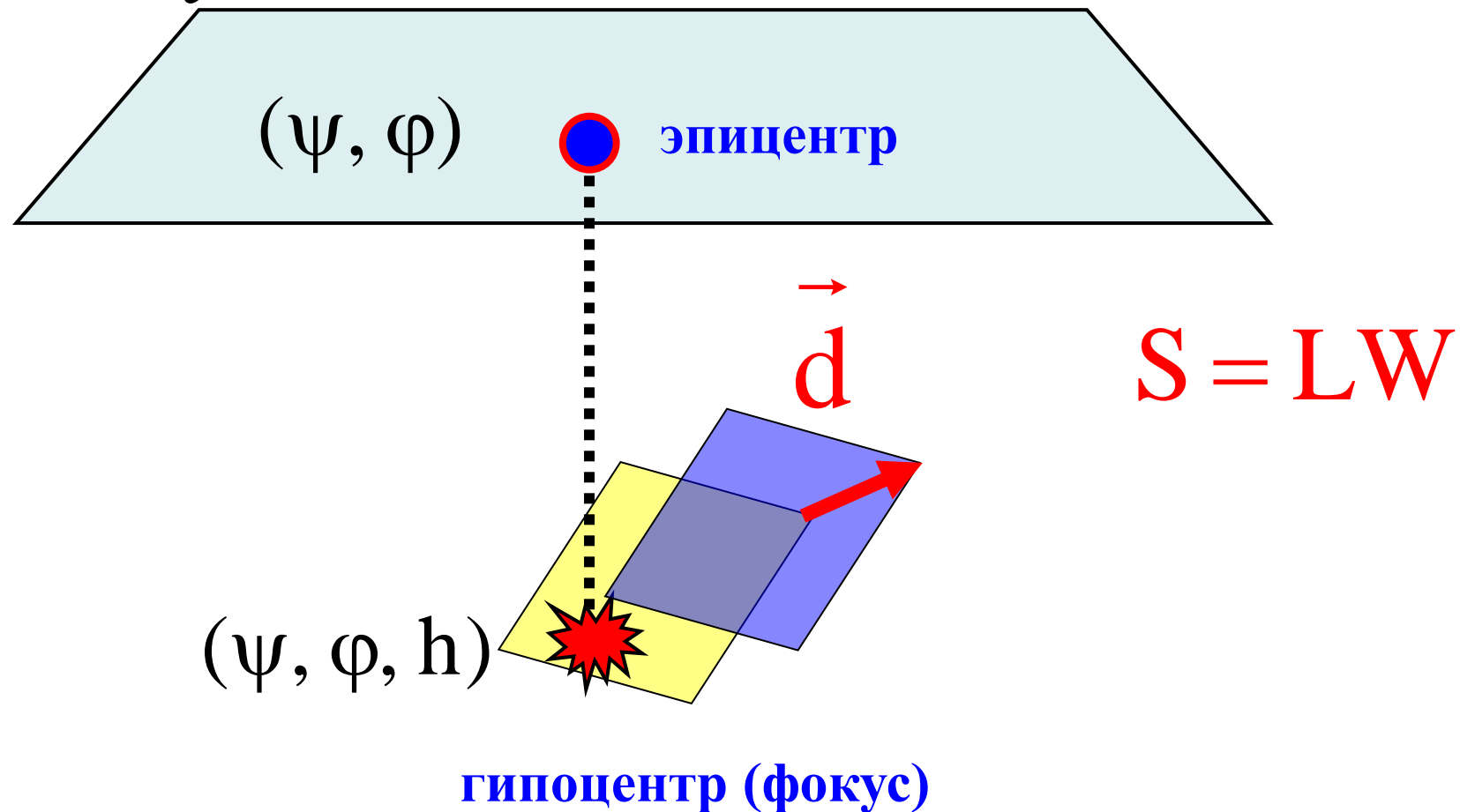


Очаг землетрясения. Основные понятия

$$M_0 = \mu S d \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

сейсмический момент

μ – модуль сдвига ($\approx 3 - 8 \cdot 10^{10}$ Па)



Моментная магнитуда

$$M_w = \frac{\lg M_0}{1.5} - 6.07 \quad M_0 = \mu L W d$$

L, km	W, km	d, m	M₀, Н*м	M_w
1	0.5	0.1	1.5*10¹⁵	4
10	5	1	1.5*10¹⁸	6
100	50	10	1.5*10²¹	8
1000	500	50	7.5*10²³	9.8
10000	1000	100	3*10²⁵	10.9

невероятное для Земли событие

Энергия землетрясения

эмпирическая зависимость [Канатогі, 1977]

$$\lg E [\text{Дж}] = 4.8 + 1.5 M_w$$

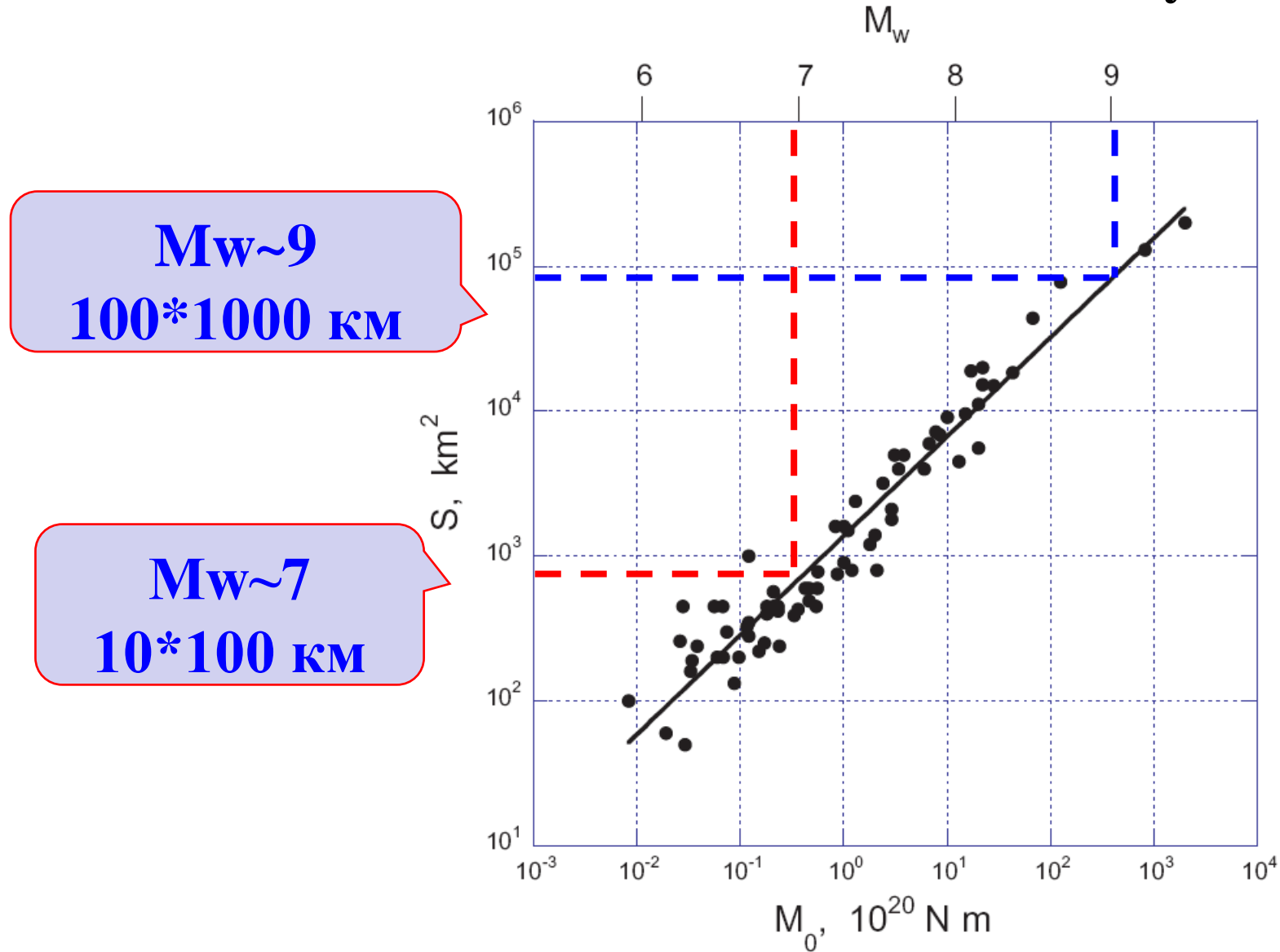
M_w	Е, Дж
6	6.3×10^{13}
7	2×10^{15}
8	6.3×10^{16}
9	2×10^{18}

1 мегатонна ТНТ
 $\sim 4.184 \times 10^{15}$ Дж

К сейсмическим
волнам переходит
1-10% энергии
землетрясения

«Царь-бомба»
 $\sim 2.4 \times 10^{17}$ Дж
58.6 метатонн ТНТ

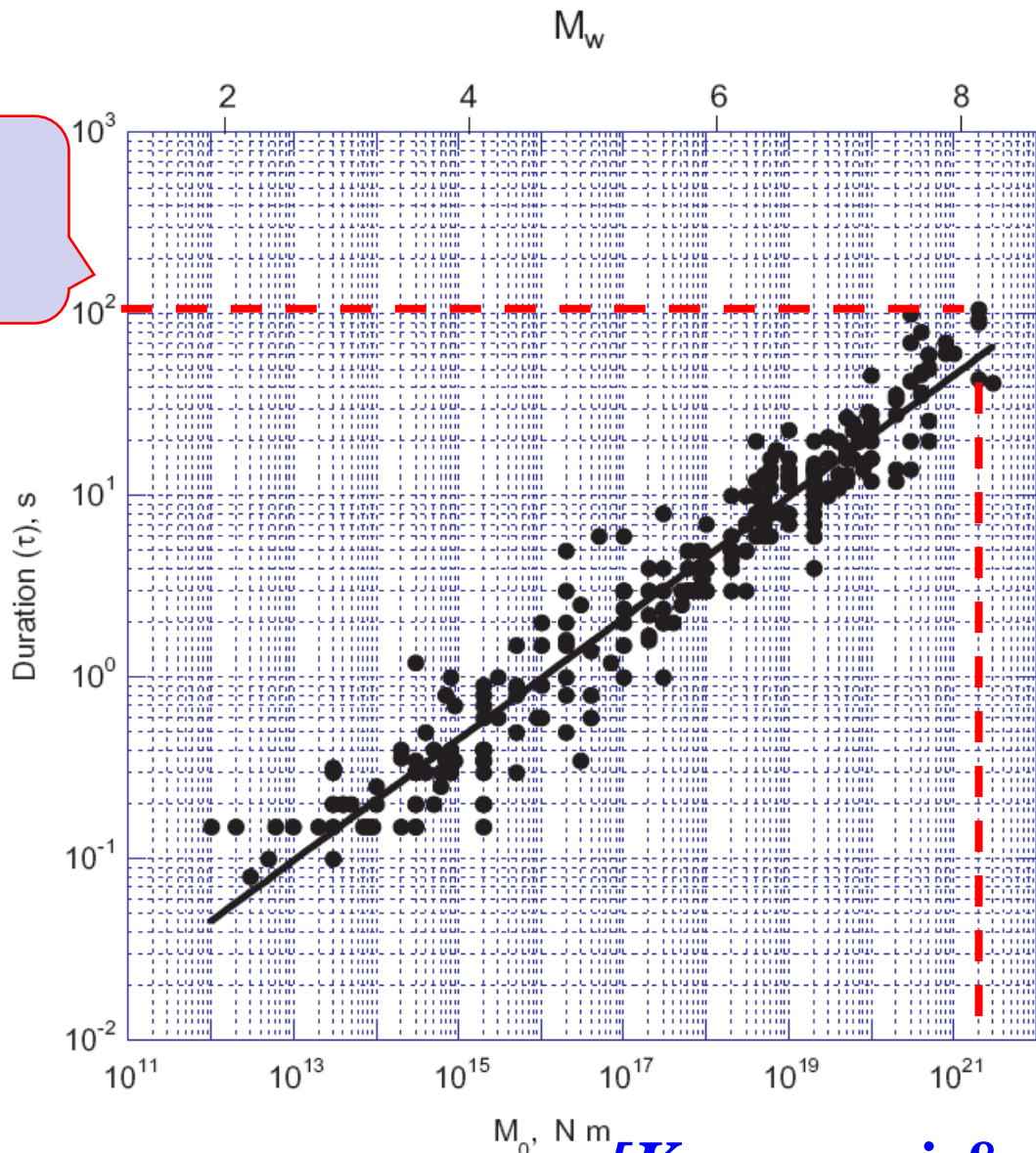
Площадь площадки разрыва как функция сейсмического момента/магнитуды



[Kanamori & Brodsky 2004]

Продолжительность вспарывания разрыва как функция сейсмического момента/магнитуды

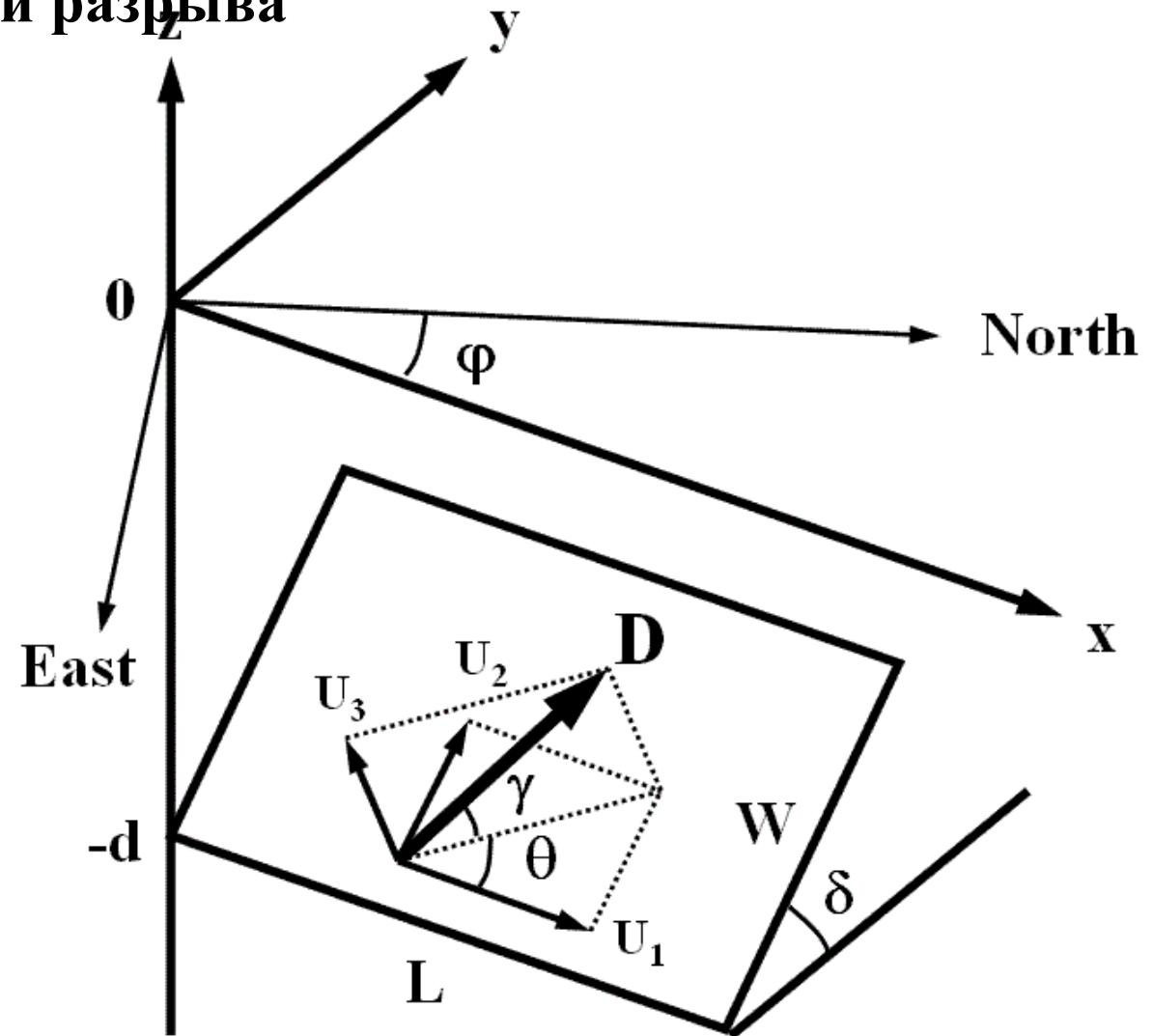
$M_w \sim 8$
100 с



[Kanamori & Brodsky 2004]

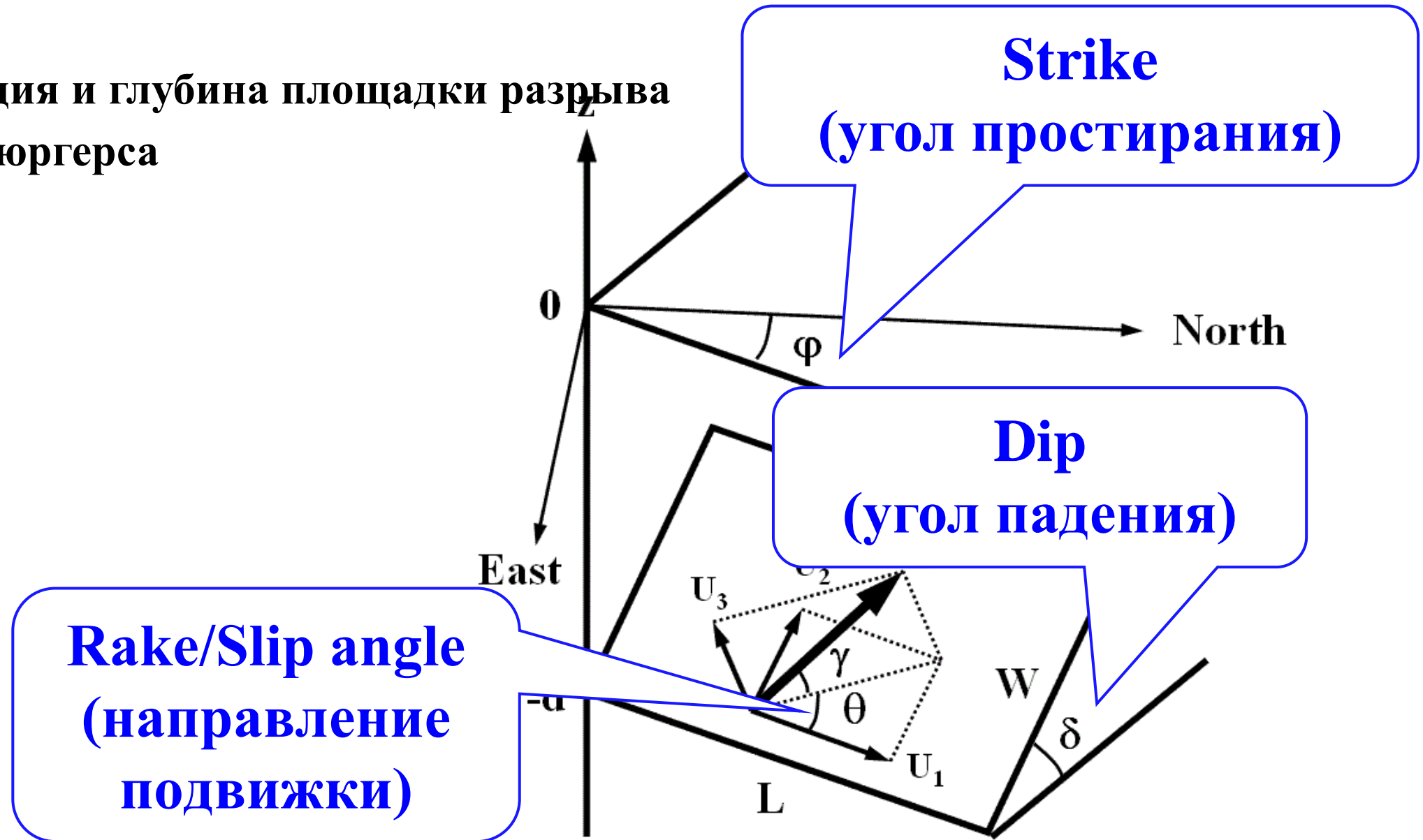
Механизм очага землетрясения:

- ✓ Ориентация и глубина площадки разрыва
- ✓ Вектор Бюргерса

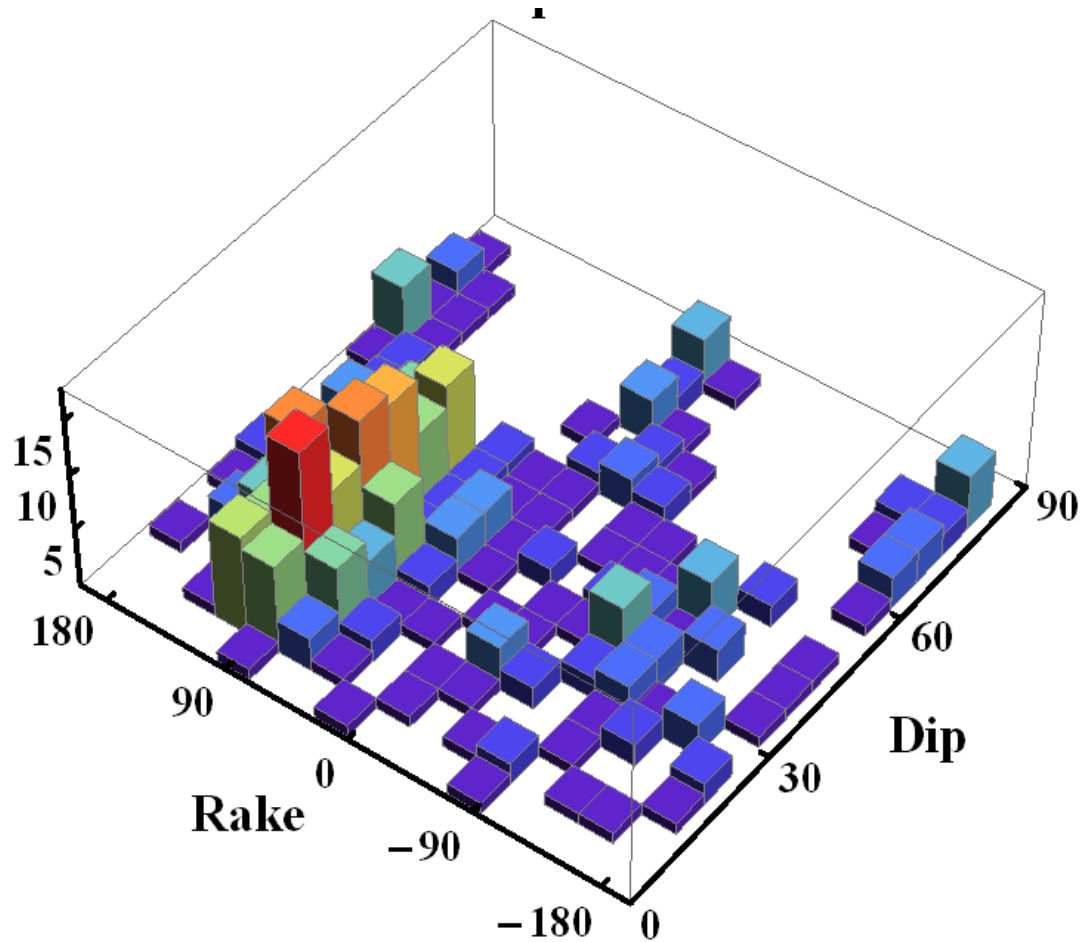


Механизм очага землетрясения:

- ✓ Ориентация и глубина площадки разрыва
- ✓ Вектор Бюргерса



Распределение реальных событий (с 1976 г.) с магнитудой $7 \leq M_w \leq 9$ по углам Dip и Rake



Угол падения δ (Dip) определяется, как угол в вертикальной плоскости, отсчитывается вниз от горизонтали и изменяется $0 \leq \delta \leq \pi/2$

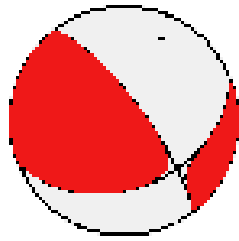
Угол подвижки θ (Rake) измеряется $-\pi \leq \theta \leq \pi$

Если $\delta \neq 0$, $\delta \neq \pi/2$ и $0 \leq \theta \leq \pi$, то подвижку называют взбросом или надвигом.

Если $\delta \neq 0$, $\delta \neq \pi/2$ и $-\pi \leq \theta \leq 0$, то подвижку называют сбросом или разрыв со скольжением по падению.

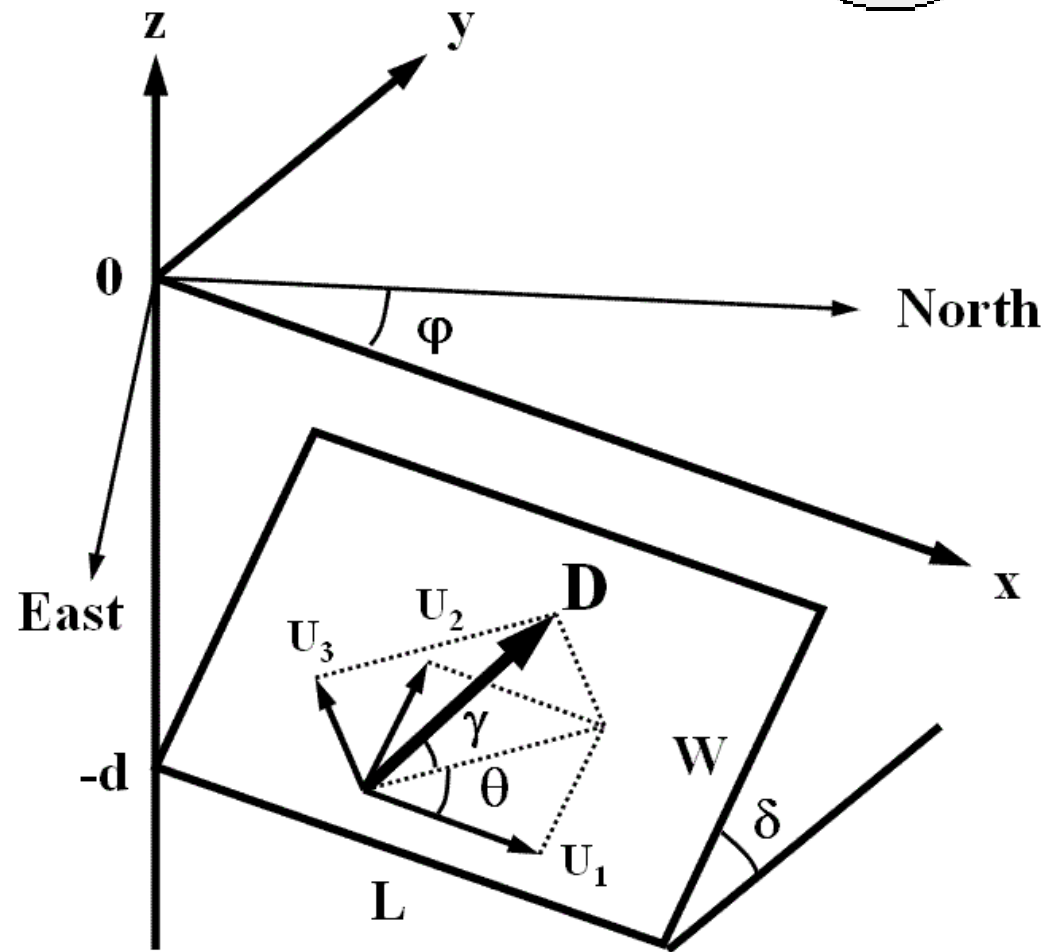
Чистый взброс $\delta = \pi/2$, $\theta = \pi/2$

Чистый сброс $\delta = \pi/2$, $\theta = -\pi/2$



Global CMT Web Page

<http://www.globalcmt.org/>





Search form

If you use CMT results in published work, please provide an appropriate citation; see [here](#) for information on how to cite the catalog. Thanks!

Enter parameters for CMT catalog search. All constraints are 'AND' logic.

Date constraints: catalog starts in 1976 and goes through present

There are several methods to choose date ranges--use the radio buttons to select which method you want to use

Starting Date:		Ending Date:	
<input checked="" type="radio"/> Year: 1976 Month: 1 Day: 1		<input type="radio"/> Year: 1976 Month: 1 Day: 1	
<input type="radio"/> Year: 1976 Julian Day: 1		<input type="radio"/> Year: 1976 Julian Day: 1	
		<input checked="" type="radio"/> Number of days: 1 Including starting day	

Magnitude constraints: catalog includes moderate to large earthquakes only

(see [note on calculation of magnitudes](#))

Moment magnitude: 0 <= Mw <= 10

Surface wave magnitude: 0 <= Ms <= 10

Body wave magnitude: 0 <= mb <= 10

Location constraints:

Latitude: (degrees) from -90 to 90 Must be between -90 and 90

Longitude: (degrees) from -180 to 180 Must be between -180 and 180

Depth: (kilometers) from 0 to 1000

Source time and mechanism constraints:

Centroid time shift: (seconds) from -9999 to 9999

Tension axis plunge: (degrees) from 0 to 90

Null axis plunge: (degrees) from 0 to 90

Use tension and null axis plunge to search by mechanism. For example, thrust faults have large plunge (>45) of tension axis, strike-slip faults have large plunge of null axis, and normal faults have small (<45) for both tension and null axes.

Output type:

- Standard
- List of event names
- GMT psvelomeca input
- GMT psmeca input
- CMTSOLUTION format
- Full format

Done Reset

Global CMT Catalog

Search criteria:

Start date: 2018/1/1 End date: 2018/9/12
-90 <=lat<= 90 -180 <=lon<= 180
0 <=depth<= 1000 -9999 <=time shift<= 9999
0 <=mb<= 10 0<=Ms<= 10 7<=Mw<= 10
0 <=tension plunge<= 90 0 <=null plunge<= 90

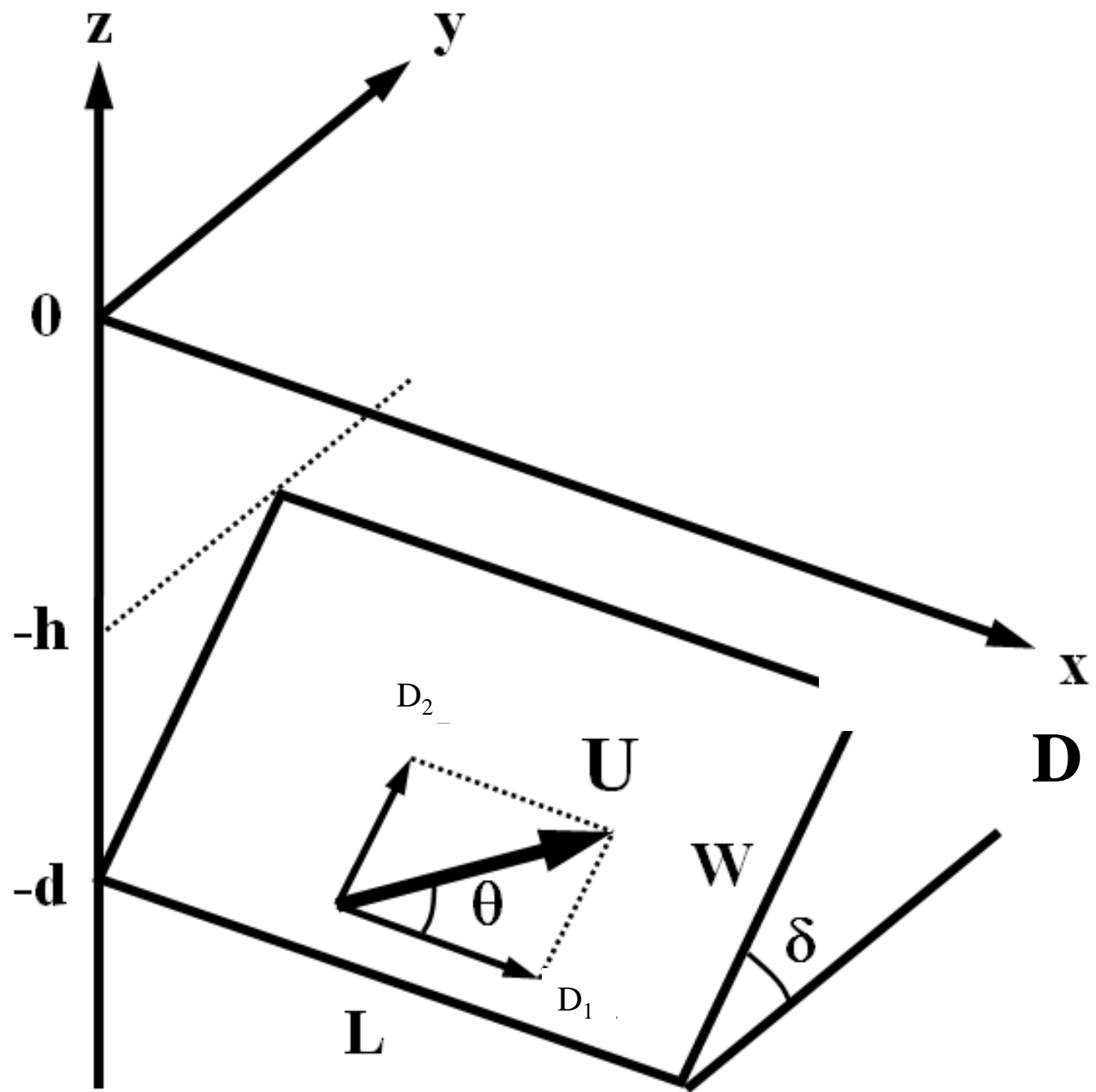
Results

201801100251A NORTH OF HONDURAS Γ

Date: 2018/ 1/10 Centroid Time: 2:51:44.3 GMT
Lat= 17.56 Lon= -83.86
Depth= 16.5 Half duration=14.0
Centroid time minus hypocenter time: 11.0
Moment Tensor: Expo=27 -0.242 -0.967 1.210 0.117 0.199 2.090
Mw = 7.5 mb = 0.0 Ms = 7.5 Scalar Moment = 2.37e+27
Fault plane: strike=76 dip=87 slip=3
Fault plane: strike=346 dip=87 slip=177

201801140918A NEAR COAST OF PERU Γ

Date: 2018/ 1/14 Centroid Time: 9:18:52.3 GMT
Lat= -15.95 Lon= -74.78
Depth= 40.9 Half duration= 8.9
Centroid time minus hypocenter time: 6.8
Moment Tensor: Expo=26 5.570 -3.120 -2.440 0.760 -1.530 3.390
Mw = 7.1 mb = 0.0 Ms = 7.1 Scalar Moment = 6.13e+26
Fault plane: strike=305 dip=38 slip=79
Fault plane: strike=139 dip=53 slip=98



h – глубина верхней кромки
 площадки разрыва
 L – длина площадки разрыва,
 W – ширина площадки разрыва
 D – вектор Бюргерса,
 μ, λ – константы Ламе
 δ – угол падения (Dip),
 θ – угол между направлением
 простирания и
 направлением подвижки
 (Rake)

Формулы Окада

[Okada, 1985]

Входные данные:

- ✓ Упругие модули (μ, λ)
- ✓ Размеры площадки (L, W)
- ✓ Глубина (h)
- ✓ Углы: Strike, Dip, Rake
- ✓ Подвижка ($|D|$)

$$f(\xi, \eta) = f(x, p) - f(x, p - W) - f(x - L, p) + f(x - L, p - W).$$

For strike-slip

$$\begin{aligned} u_x &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\xi q}{R(R+\eta)} + \arctan\left(\frac{\xi \eta}{qR}\right) + I_1 \sin \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \\ u_y &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \cos \delta}{R+\eta} + I_2 \sin \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \\ u_z &= -\frac{U_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\eta)} + \frac{q \sin \delta}{R+\eta} + I_4 \sin \delta \right] \Bigg| \Bigg|. \end{aligned}$$

For dip-slip

$$\begin{aligned} u_x &= -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{q}{R} - I_3 \sin \delta \cos \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \\ u_y &= -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \arctan\left(\frac{\xi \eta}{qR}\right) - I_1 \sin \delta \cos \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \\ u_z &= -\frac{U_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}q}{R(R+\xi)} + \sin \delta \arctan\left(\frac{\xi \eta}{qR}\right) - I_5 \sin \delta \cos \delta \right] \Bigg| \Bigg|. \end{aligned} \quad (2.23)$$

For tensile fault

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{q^2}{R(R+\eta)} - I_3 \sin^2 \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \\ u_y &= \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{-\tilde{d}q}{R(R+\xi)} - \sin \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \arctan\left(\frac{\xi \eta}{qR}\right) \right\} - I_1 \sin^2 \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \\ u_z &= \frac{U_3}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}q}{R(R+\xi)} + \cos \delta \left\{ \frac{\xi q}{R(R+\eta)} - \arctan\left(\frac{\xi \eta}{qR}\right) \right\} - I_5 \sin^2 \delta \right] \Bigg| \Bigg|, \end{aligned} \quad (2.24)$$

where

$$\begin{aligned} I_1 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{\xi}{(R+d) \cos \delta} \right] - I_5 \tan \delta, \\ I_2 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \ln(R+\eta) - I_3, \\ I_3 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\frac{\tilde{y}}{(R+d) \cos \delta} - \ln(R+\eta) \right] + I_4 \tan \delta, \\ I_4 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{\cos \delta} [\ln(R+d) - \sin \delta \ln(R+\eta)], \\ I_5 &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{2}{\cos \delta} \arctan\left(\frac{\eta(X+q \cos \delta) + X(R+X) \sin \delta}{\xi(R+X) \cos \delta}\right), \end{aligned} \quad (2.25)$$

and if $\cos \delta = 0$,

$$\begin{aligned} I_1 &= -\frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \frac{\xi q}{(R+d)^2}, \\ I_3 &= \frac{\mu}{2(\lambda + \mu)} \left[\frac{\eta}{R+d} + \frac{\tilde{y}q}{(R+d)^2} - \ln(R+\eta) \right], \\ I_4 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{q}{R+d}, \\ I_5 &= -\frac{\mu}{\lambda + \mu} \frac{\xi \sin \delta}{R+d}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

Определение сейсмического момента

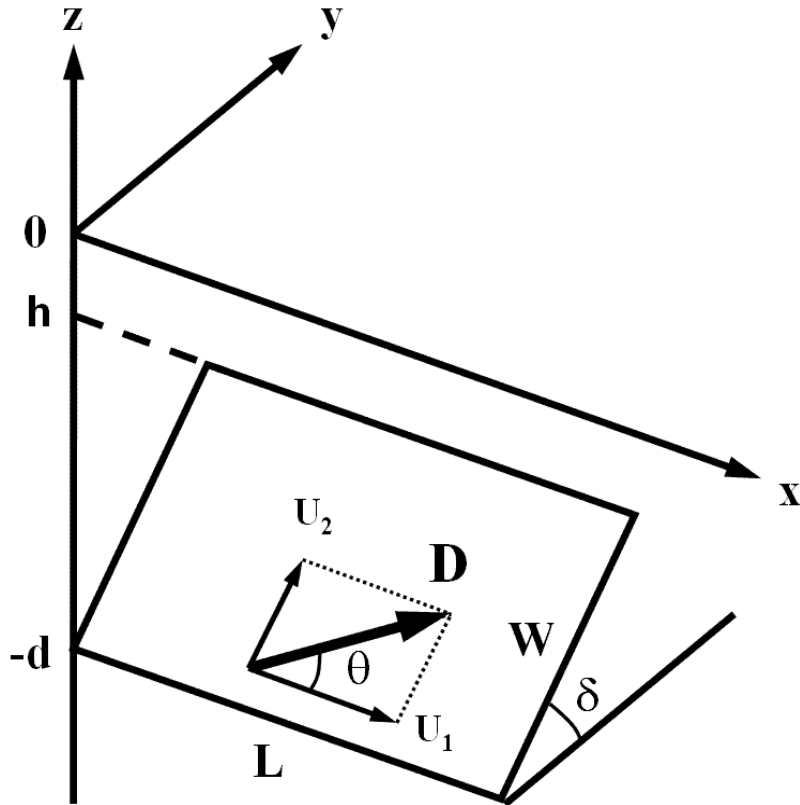
$$M_0 = \mu DLW$$

Эмпирические соотношения
[Kanamori, Anderson, 1975]

$$L/W = 2, \quad D/L = 5 \cdot 10^{-5}$$

Эмпирические соотношения
[Kanamori, 1997]

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 6.07$$



h - глубина верхней кромки площадки разрыва

L -длина площадки разрыва, W -ширина площадки разрыва

D - вектор Бюргера, μ, λ - константы Ламе

M_0 -сейсмический момент, M_w -моментная магнитуда

δ - угол падения, θ - угол между направлением простирания и направлением подвижки

$$\lg L[\kappa\mathcal{M}] = 0.5 M_w - A_L$$

$$\lg W[\kappa\mathcal{M}] = 0.5 M_w - A_W$$

$$\lg D[\mathcal{M}] = 0.5 M_w - A_D$$

$$\mu: 3-12 \cdot 10^{10} \text{ Па} \quad \begin{array}{l} A_L = 1.92 - 2.07 \\ A_W = 2.22 - 2.37 \\ A_D = 3.22 - 3.37 \end{array}$$

1. магнитуда землетрясения M_w
2. глубина очага h
3. углы δ и θ

Пример современных эмпирических связей для параметров очага землетрясения

$$W = C_1 L^\beta$$

$$\beta = 2/3$$

$$D = C_2 \sqrt{LW}$$

$$C_1 = 17.5 (12 - 25) \text{ м}^{1/3}$$

$$C_2 = 3.8 (1.5 - 12) \cdot 10^{-5}$$

$$M_0 = \mu DLW [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

$$M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6.07 \quad [\text{Leonard, 2010}]$$

Пример современных эмпирических связей для параметров очага землетрясения

$$\log L[M] =$$

$$= 3/5 M_w + 3.642 - 3/5 \log C_1 - 2/5 \log C_2 \mu$$

$$\log W[M] =$$

$$= 2/5 M_w + 2.428 + 3/5 \log C_1 - 4/15 \log C_2 \mu$$

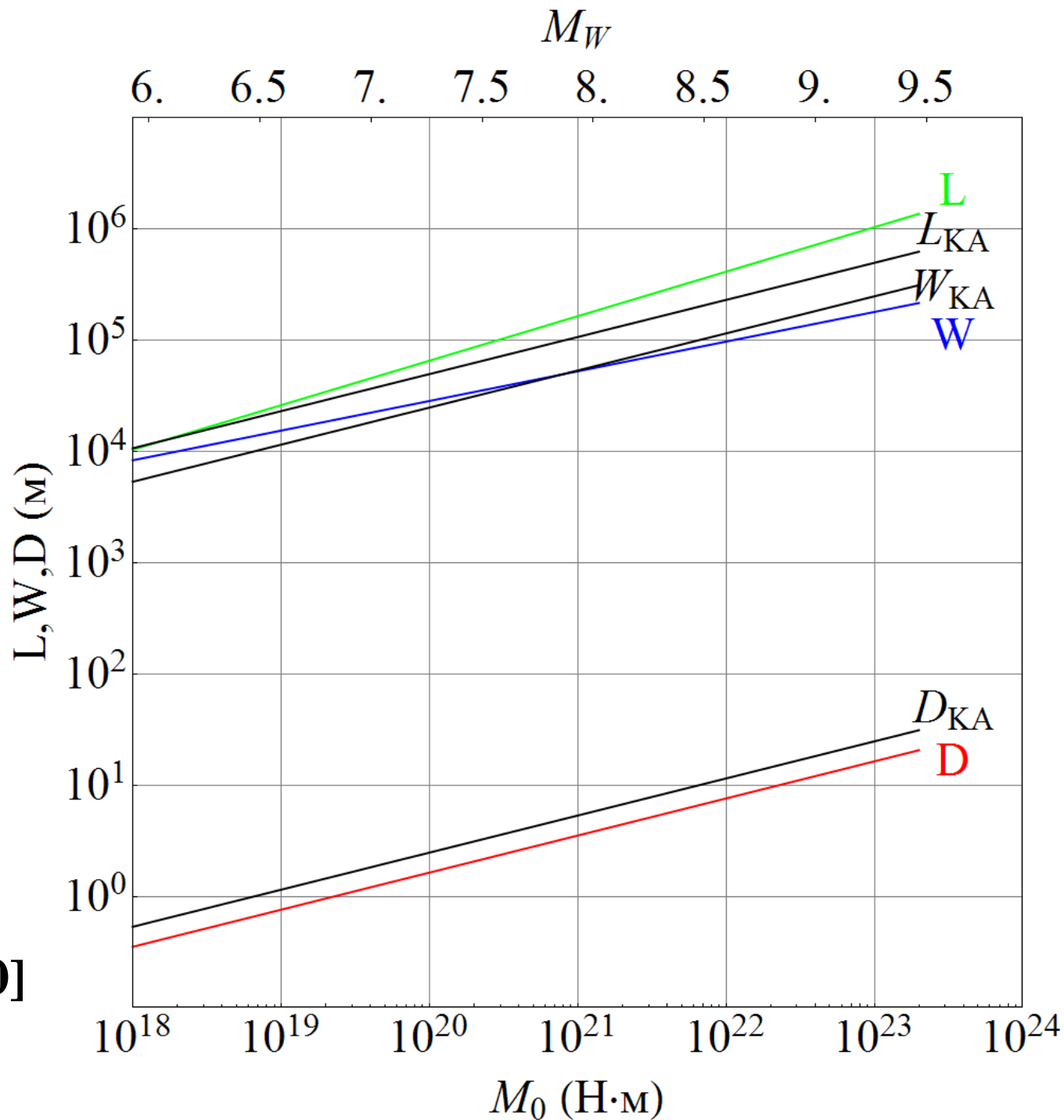
$$\log D[M] =$$

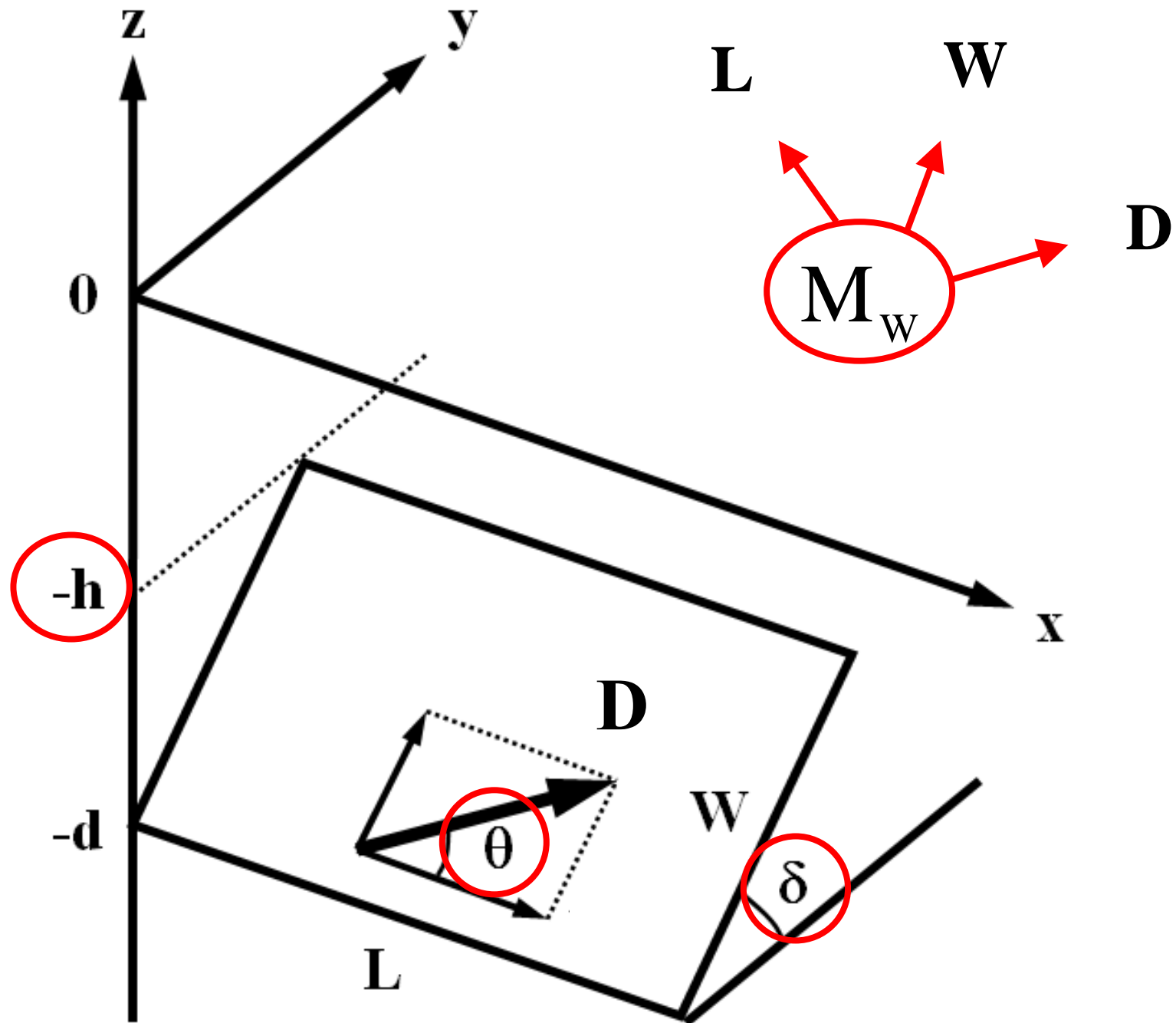
$$= 1/2 M_w + 3.035 + 2/3 \log C_2 - 1/3 \log \mu$$

[Leonard, 2010]

**Связь
параметров
очага с
сейсмическим
моментом
(моментной
магнитудой)**

- [Kanamori
Anderson,
1975]
- [Leonard, 2010]





Global CMT Catalog

Search criteria:

Start date: 2021/1/1 End date: 2022/3/8
-90 <=lat<= 90 -180 <=lon<= 180
0 <=depth<= 1000 -9999 <=time shift<= 9999
0 <=mb<= 10 0<=Ms<= 10 8<=Mw<= 10
0 <=tension plunge<= 90 0 <=null plunge<= 90

Results

202103041928A KERMADEC ISLANDS, NEW ZE

Date: 2021/ 3/ 4 Centroid Time: 19:29: 2.1 GMT
Lat= -29.11 Lon=-176.73
Depth= 33.9 Half duration=26.5
Centroid time minus hypocenter time: 28.9
Moment Tensor: Expo=28 0.957 -0.055 -0.903 0.231 1.260 -0.247
Mw = 8.1 mb = 0.0 Ms = 8.1 Scalar Moment = 1.6e+28
Fault plane: strike=199 dip=19 slip=97
Fault plane: strike=11 dip=72 slip=88

Global CMT Catalog

Search criteria:

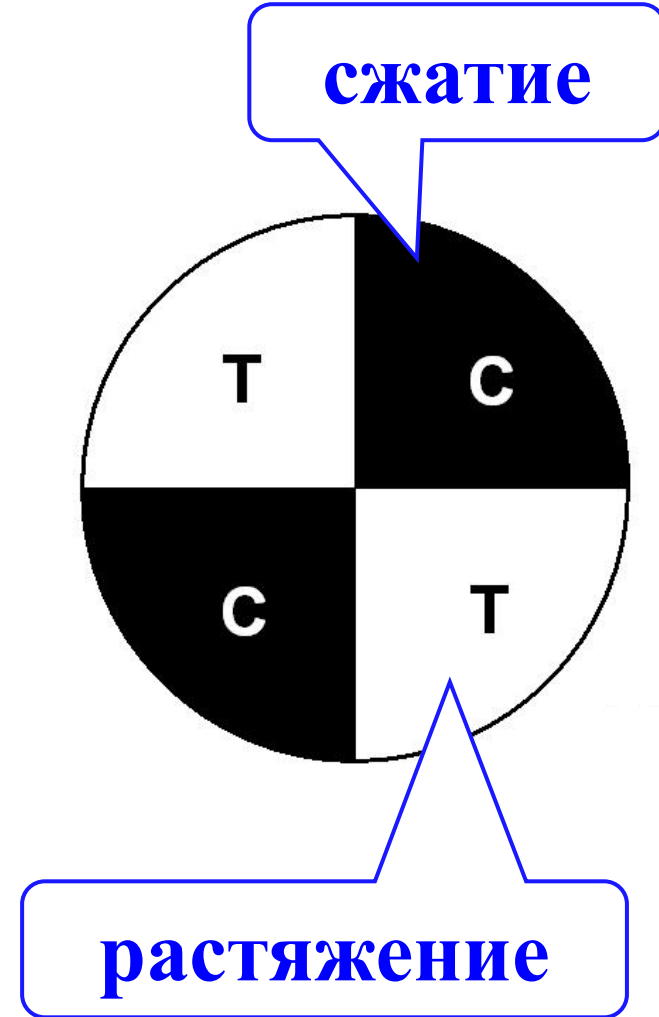
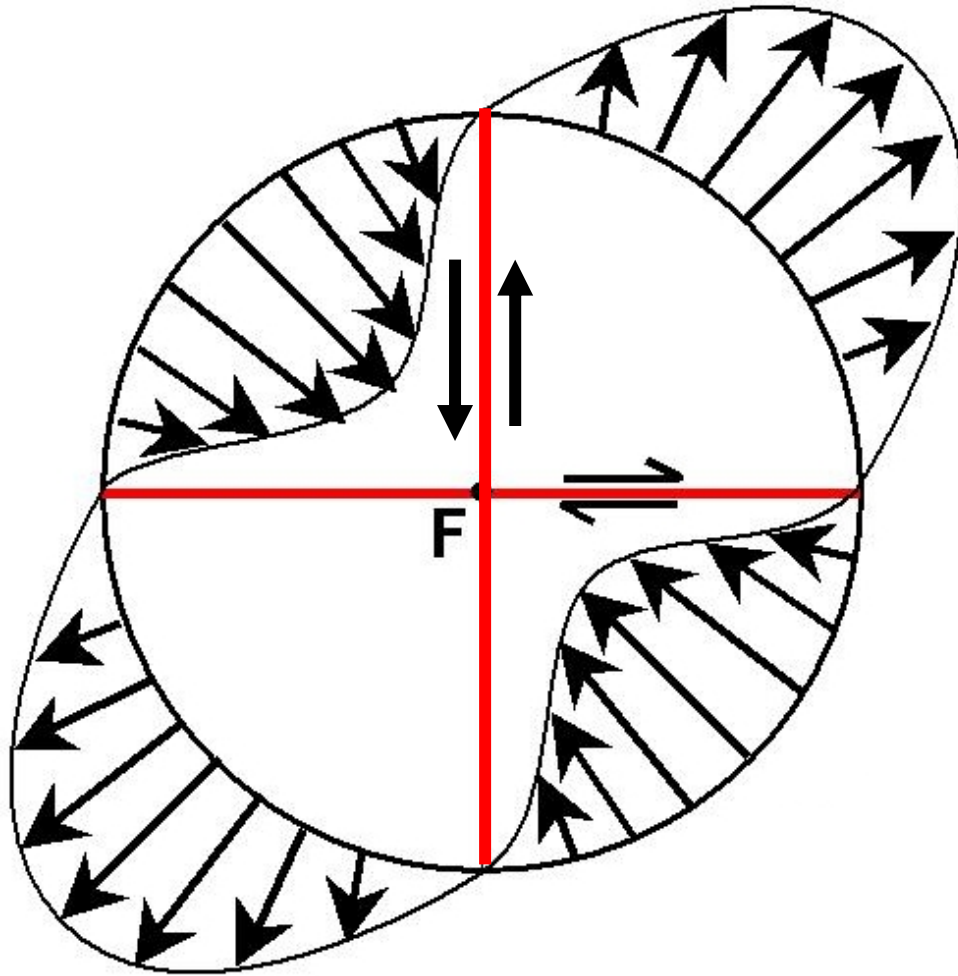
Start date: 2021/1/1 End date: 2022/3/8
-90 <=lat<= 90 -180 <=lon<= 180
0 <=depth<= 1000 -9999 <=time shift<= 9999
0 <=mb<= 10 0<=Ms<= 10 8<=Mw<= 10
0 <=tension plunge<= 90 0 <=null plunge<= 90

Results

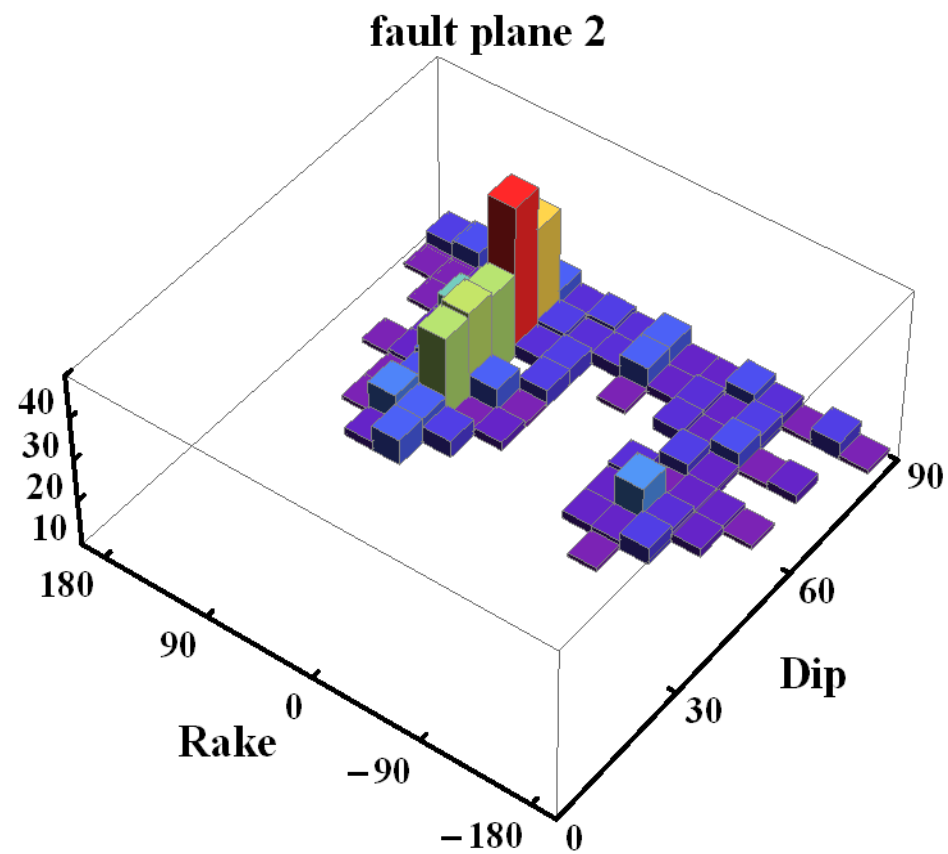
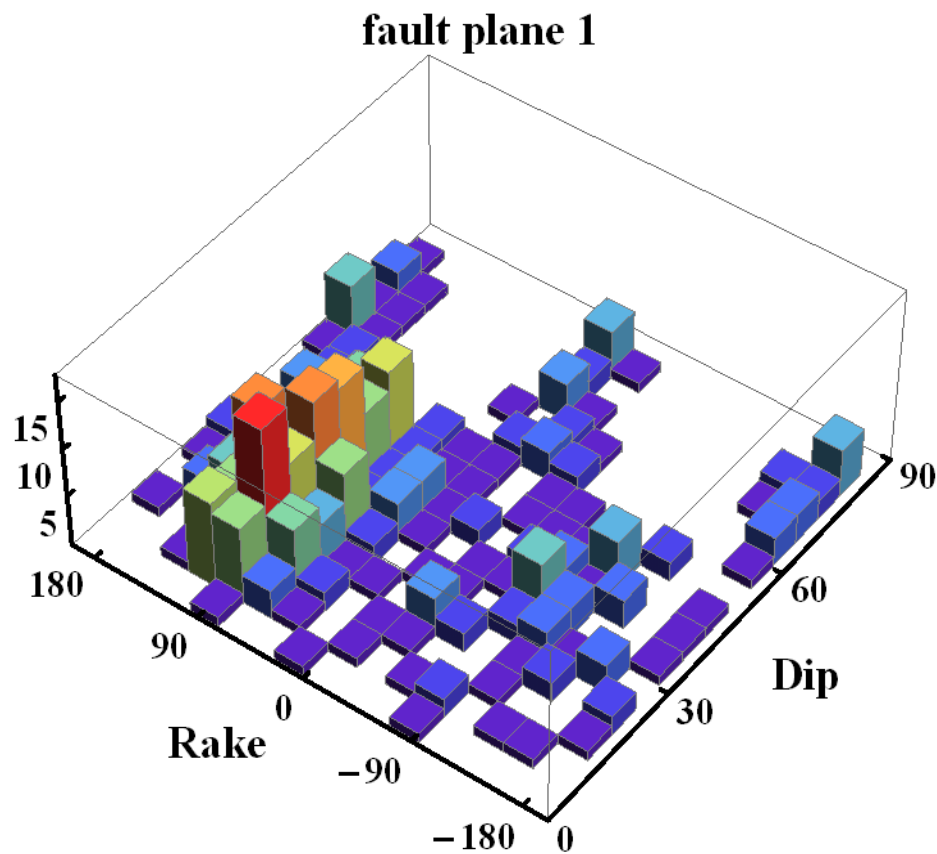
202103041928A KERMADEC ISLANDS, NEW ZE

Date: 2021/ 3/ 4 Centroid Time: 19:29: 2.1 GMT
Lat= -29.11 Lon=-176.73
Depth= 33.9 Half duration=26.5
Centroid time minus hypocenter time: 28.9
Moment Tensor: Expo=28 0.957 -0.055 -0.903 0.231 1.260 -0.247
Mw = 8.1 mb = 0.0 Ms = 8.1 Scalar Moment = 1.6e+28
Fault plane: strike=199 dip=19 slip=97
Fault plane: strike=11 dip=72 slip=88

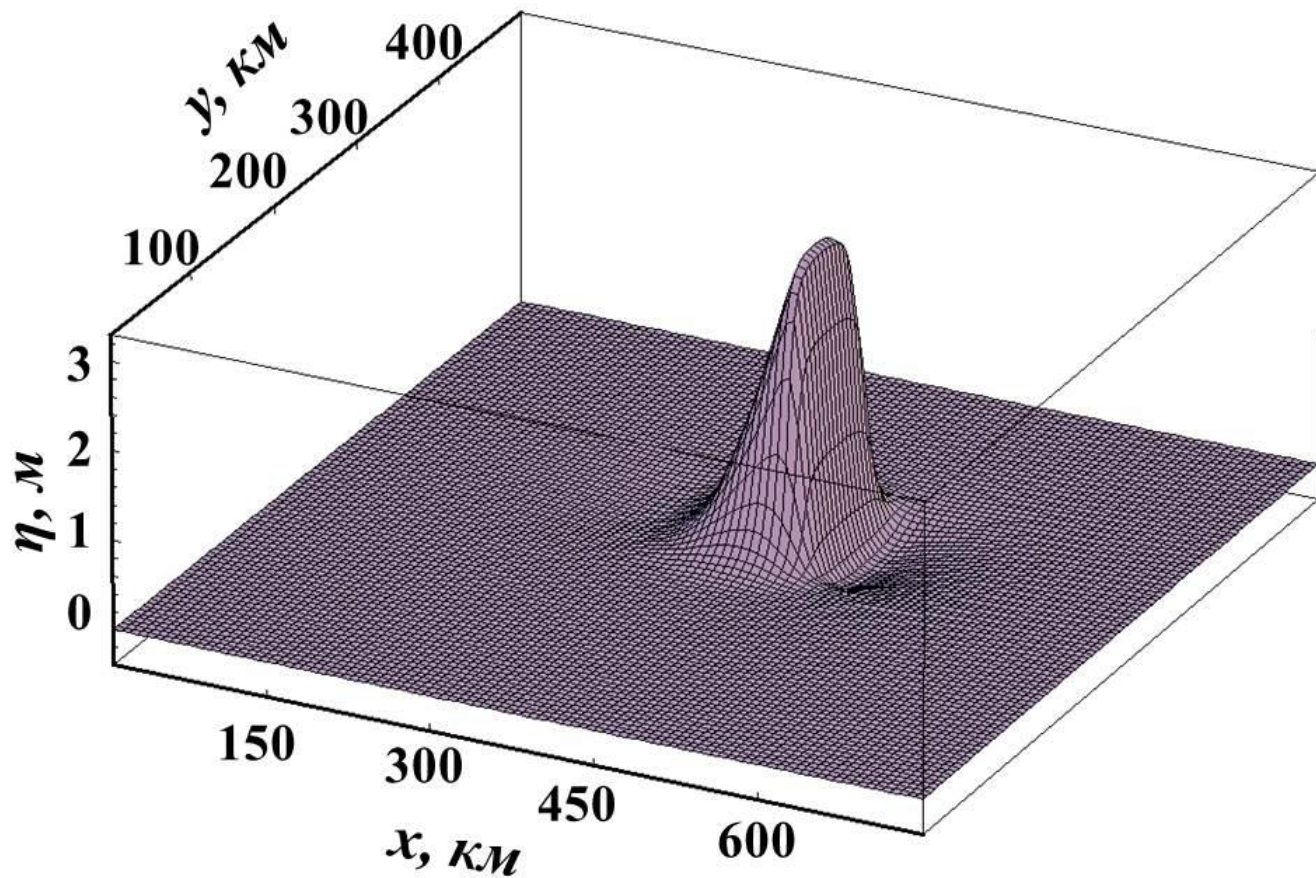
Две возможные плоскости разрывов



Распределение реальных событий (1976-2012) с магнитудой $7 \leq M_w \leq 9$ по углам Dip и Rake



1. магнитуа землетрясения M_w
2. глубина очага h
3. углы δ и θ

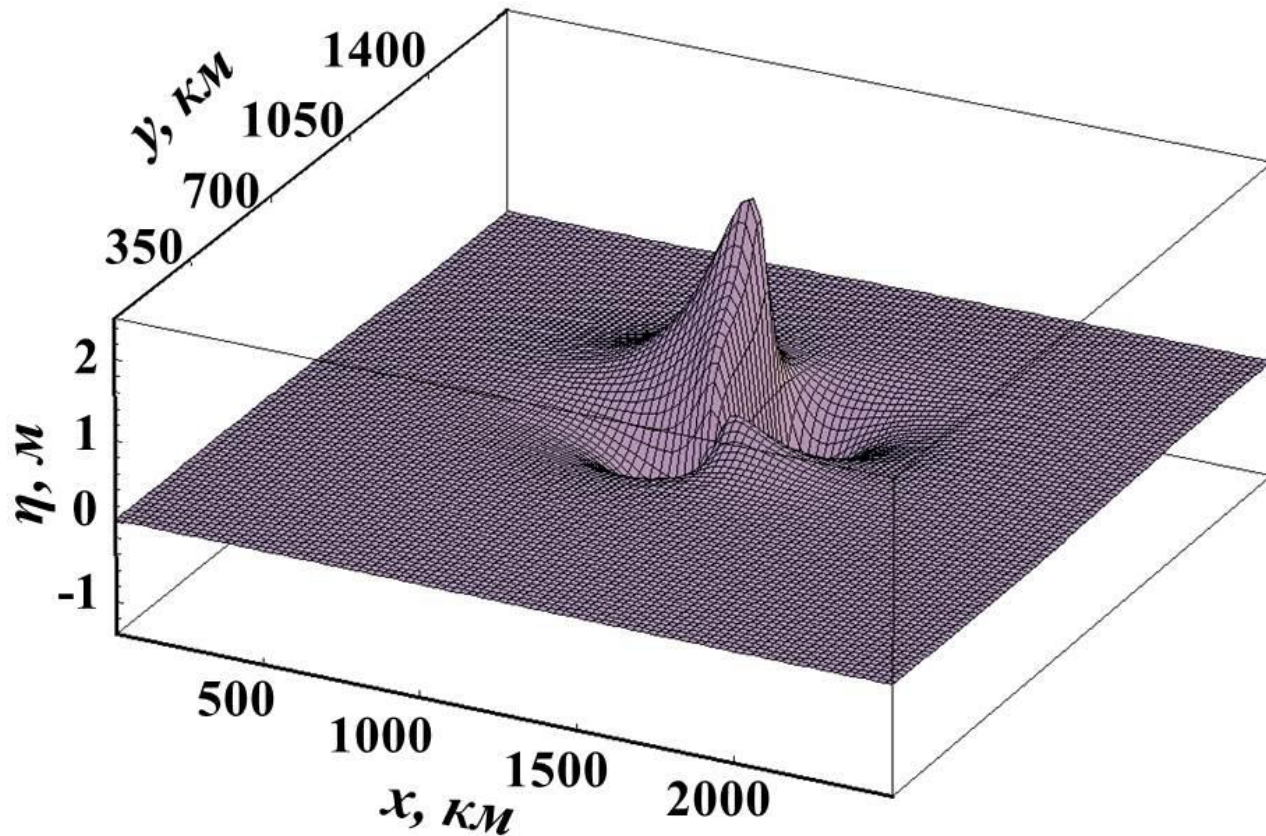


$$M_w=8; h=10;$$

$$\delta=45^\circ; \theta=90^\circ$$

Формулы Окада

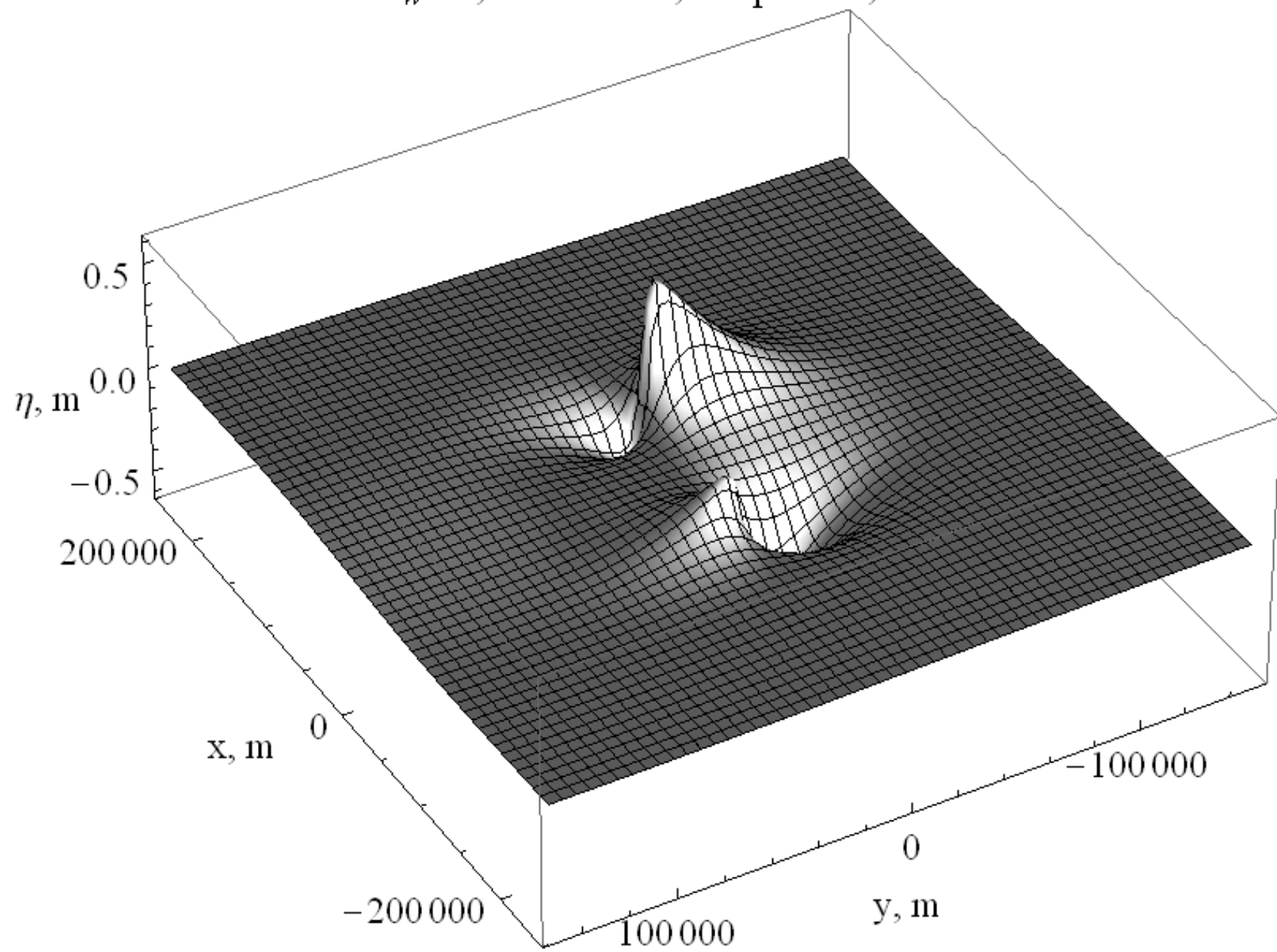
1. магнитуда землетрясения M_w
2. глубина очага h
3. углы δ и θ



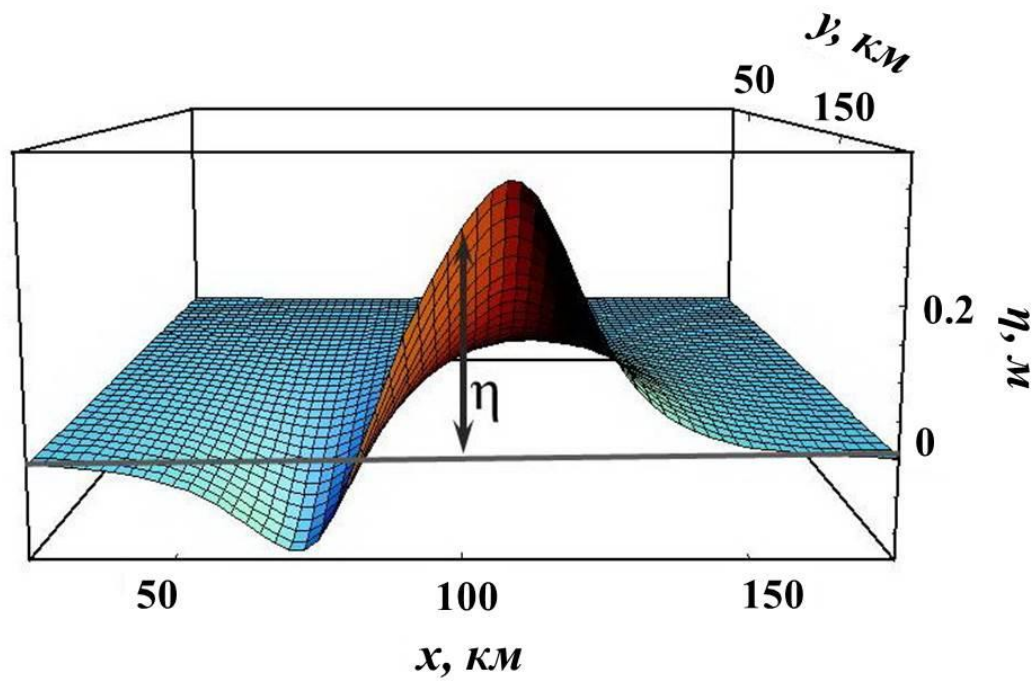
$$M_w=9; h=40;$$
$$\delta=80^\circ; \theta=10^\circ$$

Формулы Окада

$M_w=8$, $h=30$ km, Dip= 80° , Rake= 0°

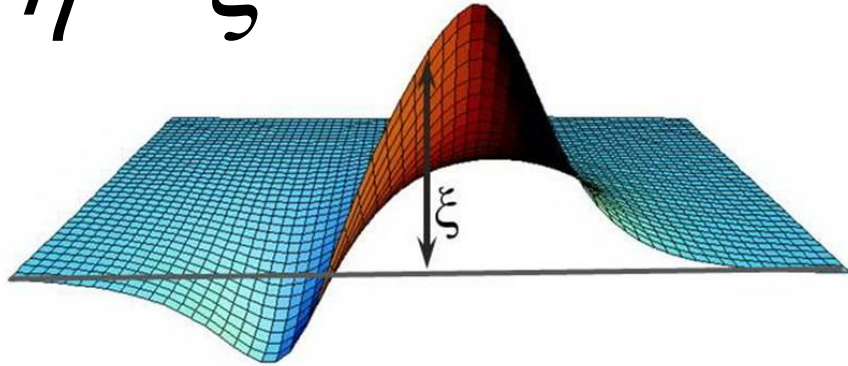


Параметры деформации дна в очаге цунами



Параметры деформации дна в очаге цунами

$$\eta = \xi$$



1. Амплитуда

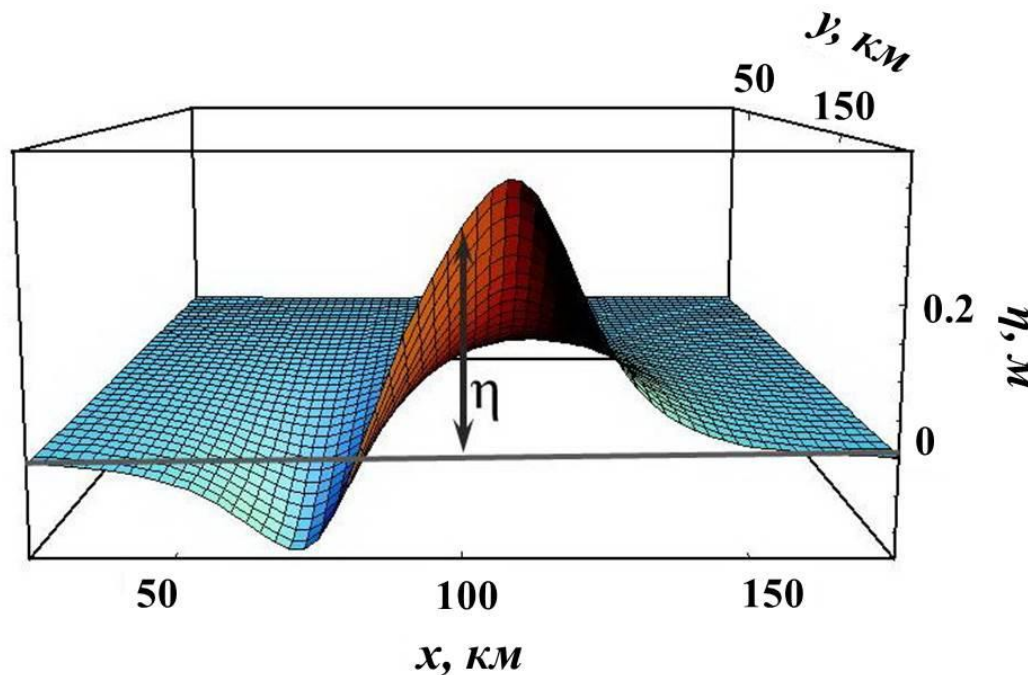
$$\Delta \eta = \eta_{\max} - \eta_{\min}$$

2. Вытесненный объём

$$V = \left| \iint \eta \, ds \right|$$

3. Потенциальная энергия начального возвышения

$$E = \frac{\rho g}{2} \iint \eta^2 \, ds$$



$$W_{TS} = "mgh" = \underbrace{\rho S \xi}_{m} g \underbrace{\xi}_{h} =$$

$$= \rho S g \xi^2 / 2$$



$h: 0 - 300 \text{ km}$

$M_w: 7 - 9$

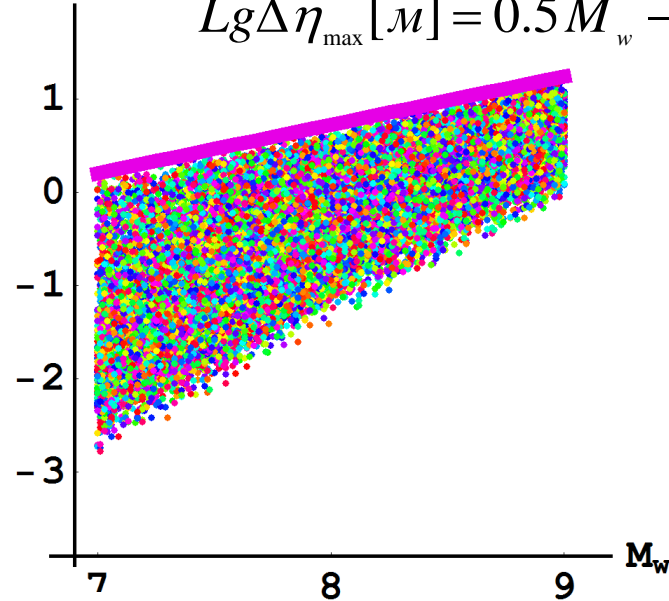
$dip: 0^\circ - 90^\circ$

$rake: -90^\circ - 90^\circ$

$N = 30000$

$\text{Lg}(\Delta\eta, \text{м})$

$$\text{Lg}\Delta\eta_{\max} [\text{м}] = 0.5 M_w - 3.4$$



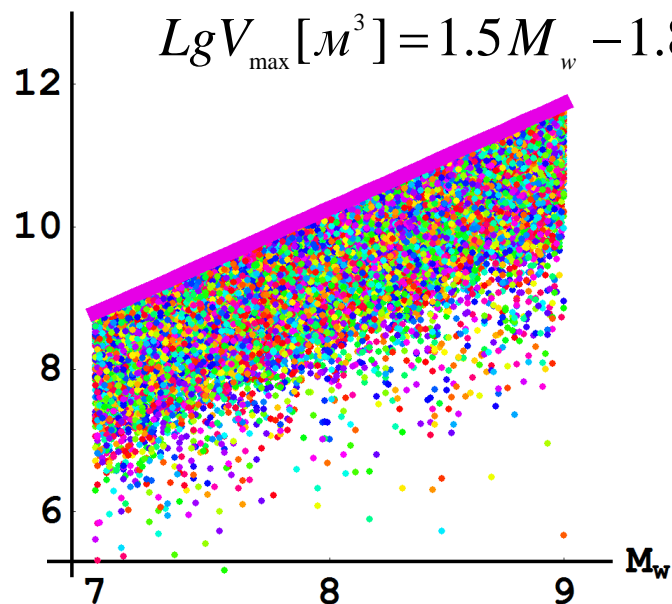
$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{\min}$$

$$V = \left| \iint \eta \, ds \right|$$

$$E = \frac{\rho g}{2} \iint \eta^2 \, ds$$

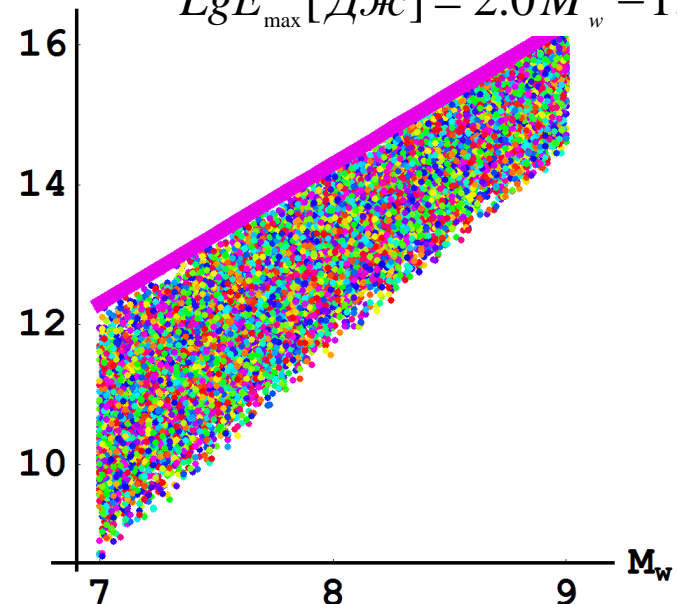
$\text{Lg}(V, \text{м}^3)$

$$\text{Lg}V_{\max} [\text{м}^3] = 1.5 M_w - 1.8$$

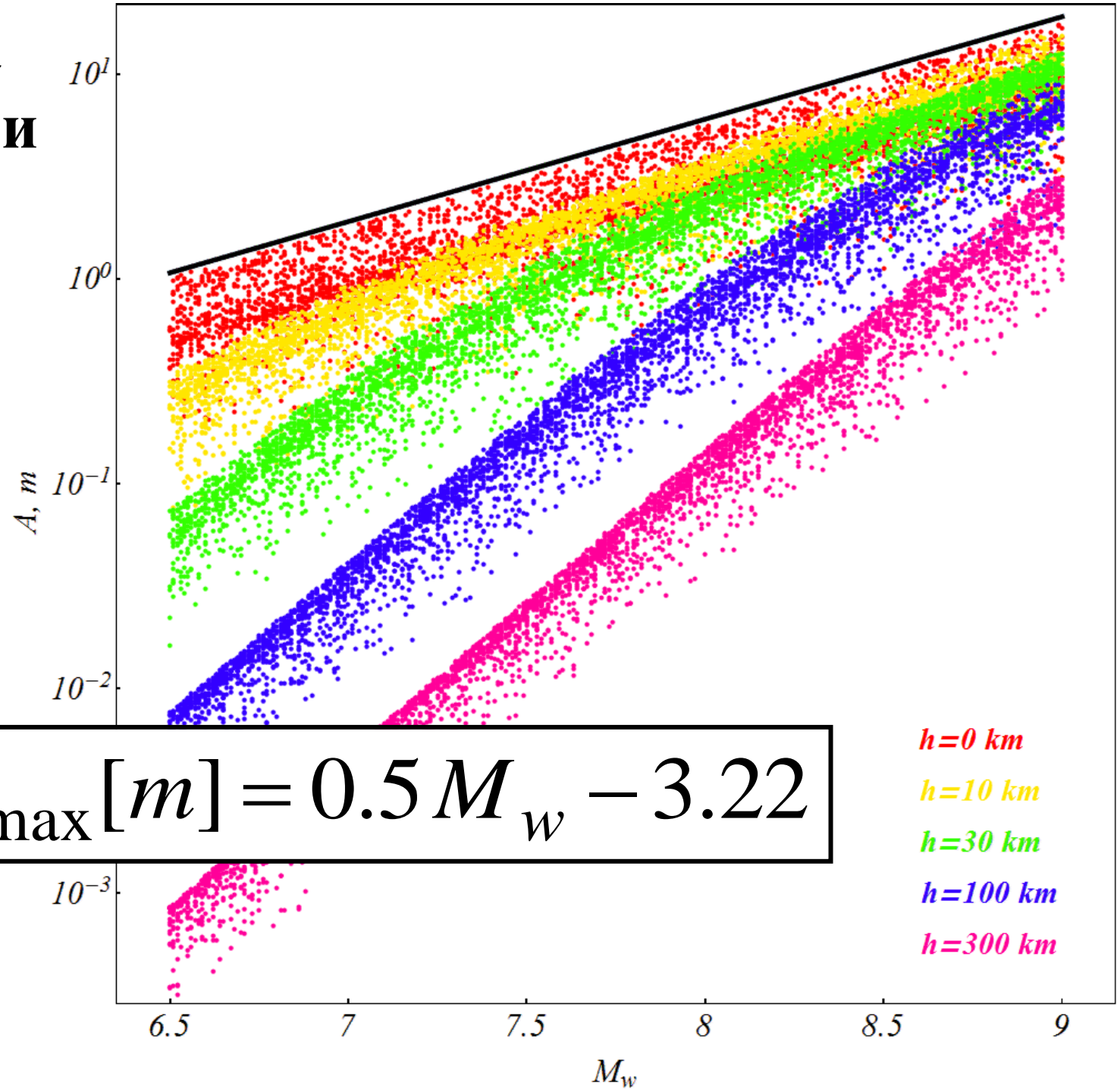


$\text{Lg}(E, \text{Дж})$

$$\text{Lg}E_{\max} [\text{Дж}] = 2.0 M_w - 1.7$$

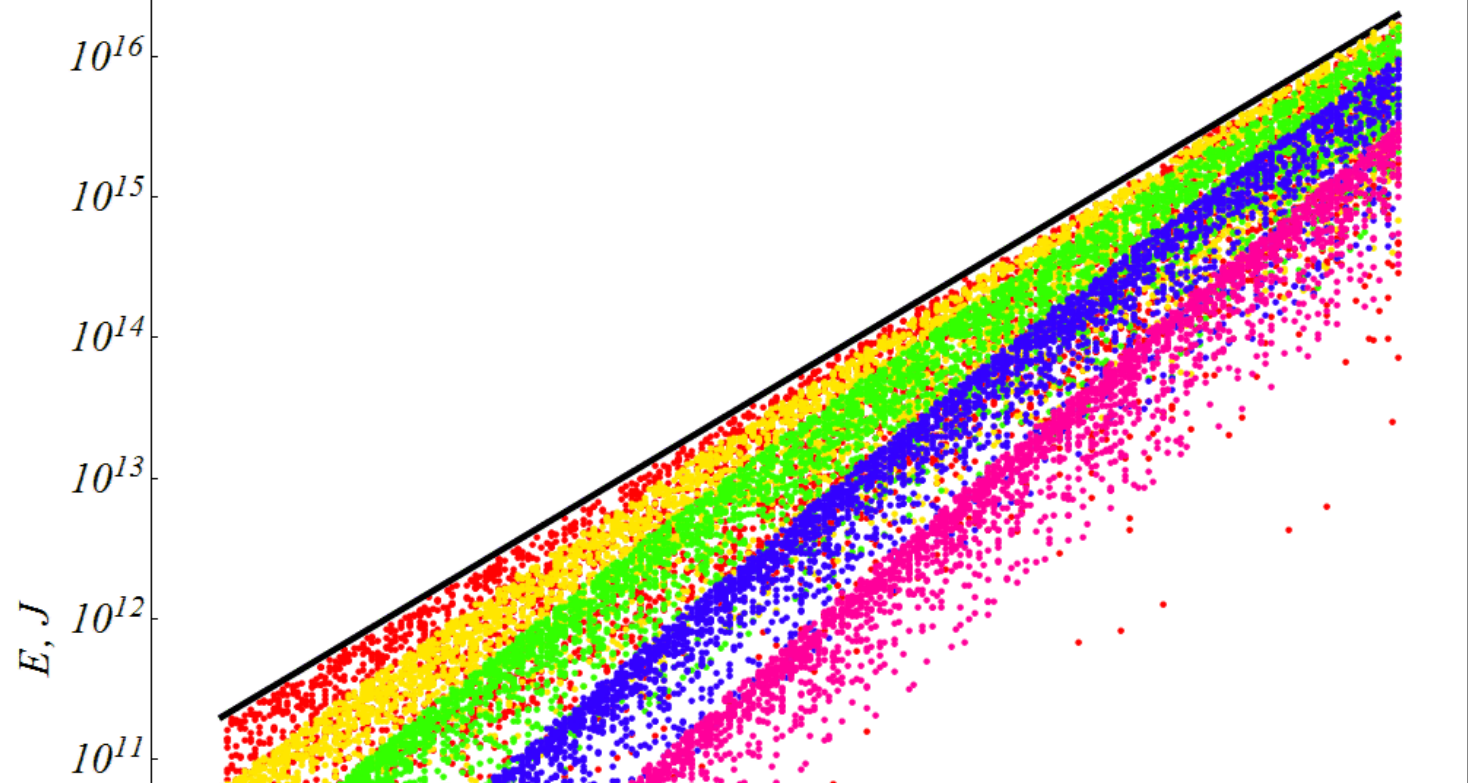


Амплитуда деформации

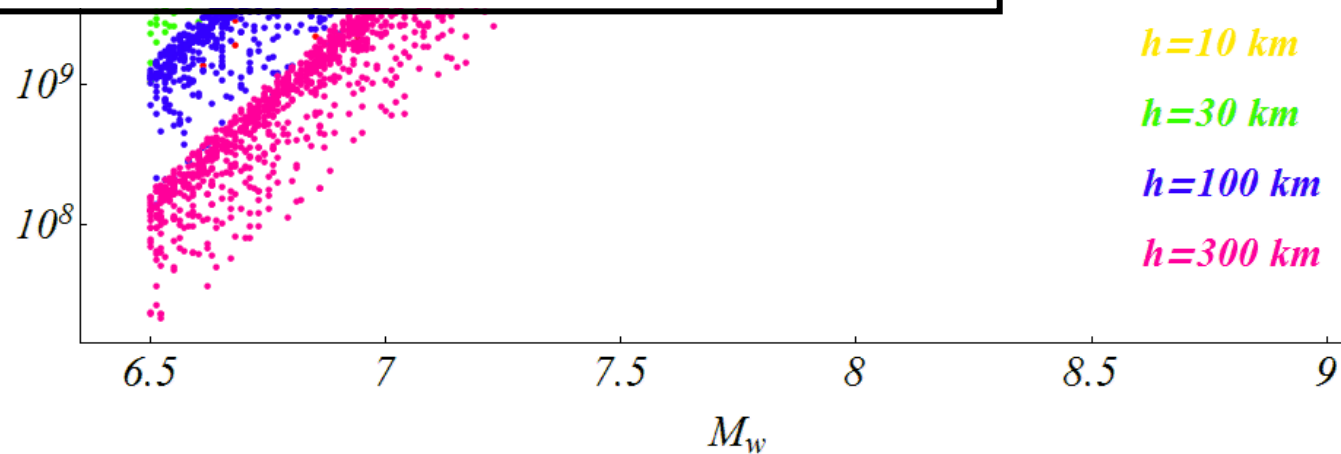


$$\log_{10} A_{\max} [m] = 0.5 M_w - 3.22$$

**Потенциальная
энергия
начального
возвышения**



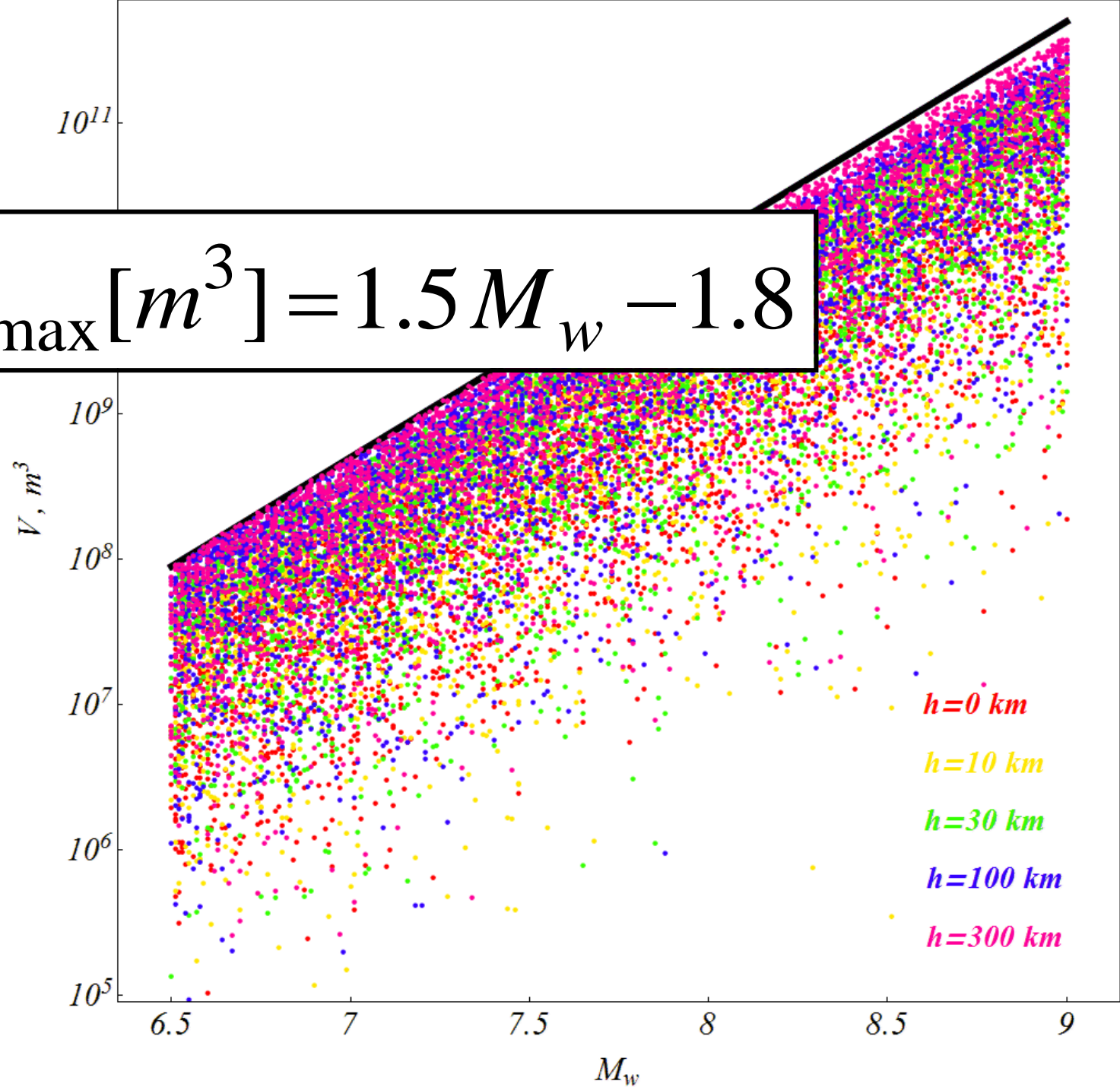
$$\log_{10} E_{\max} [J] = 2.0 M_w - 1.7$$



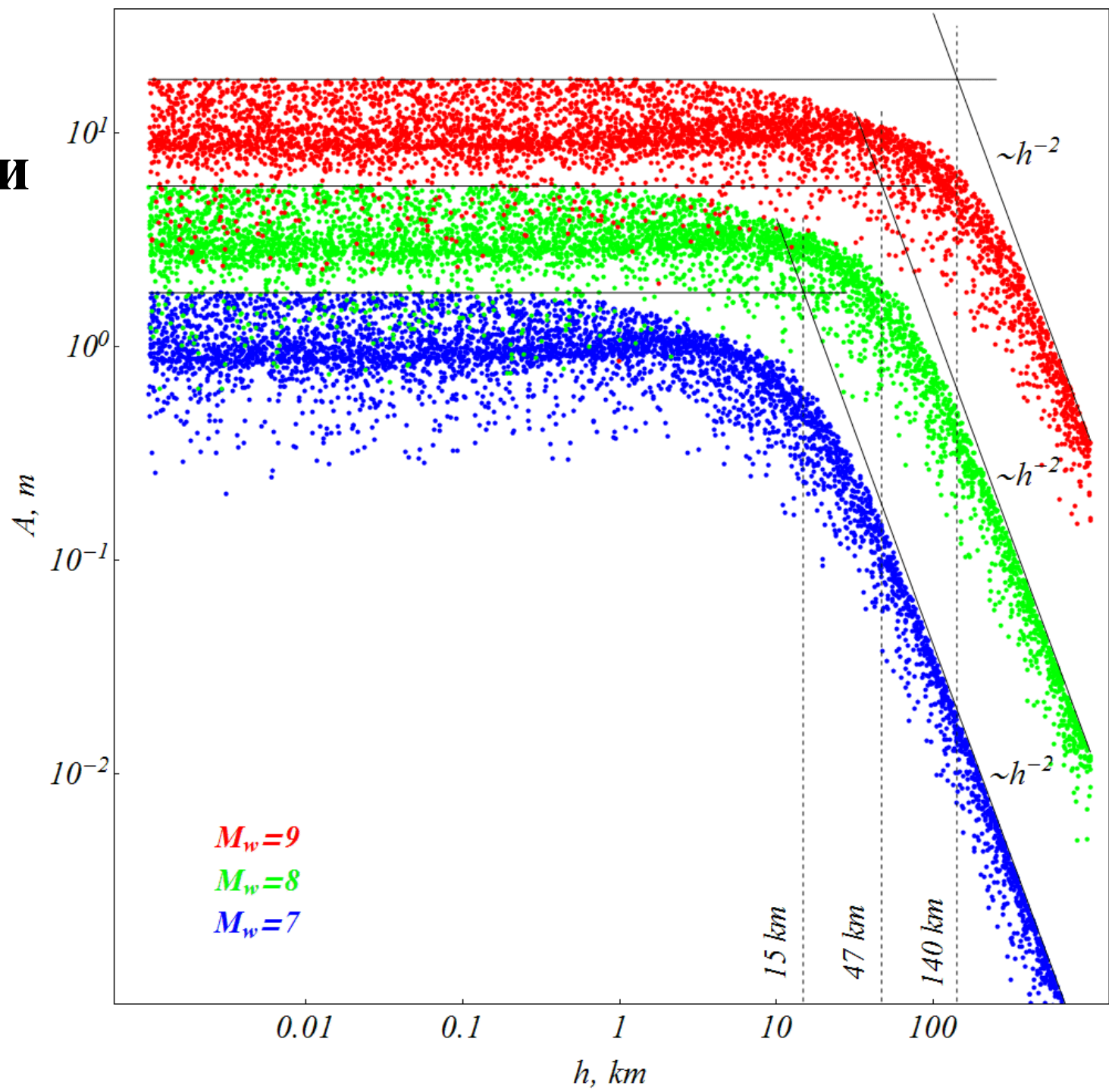
$h=0$ km
 $h=10$ km
 $h=30$ km
 $h=100$ km
 $h=300$ km

Вытесненный объем

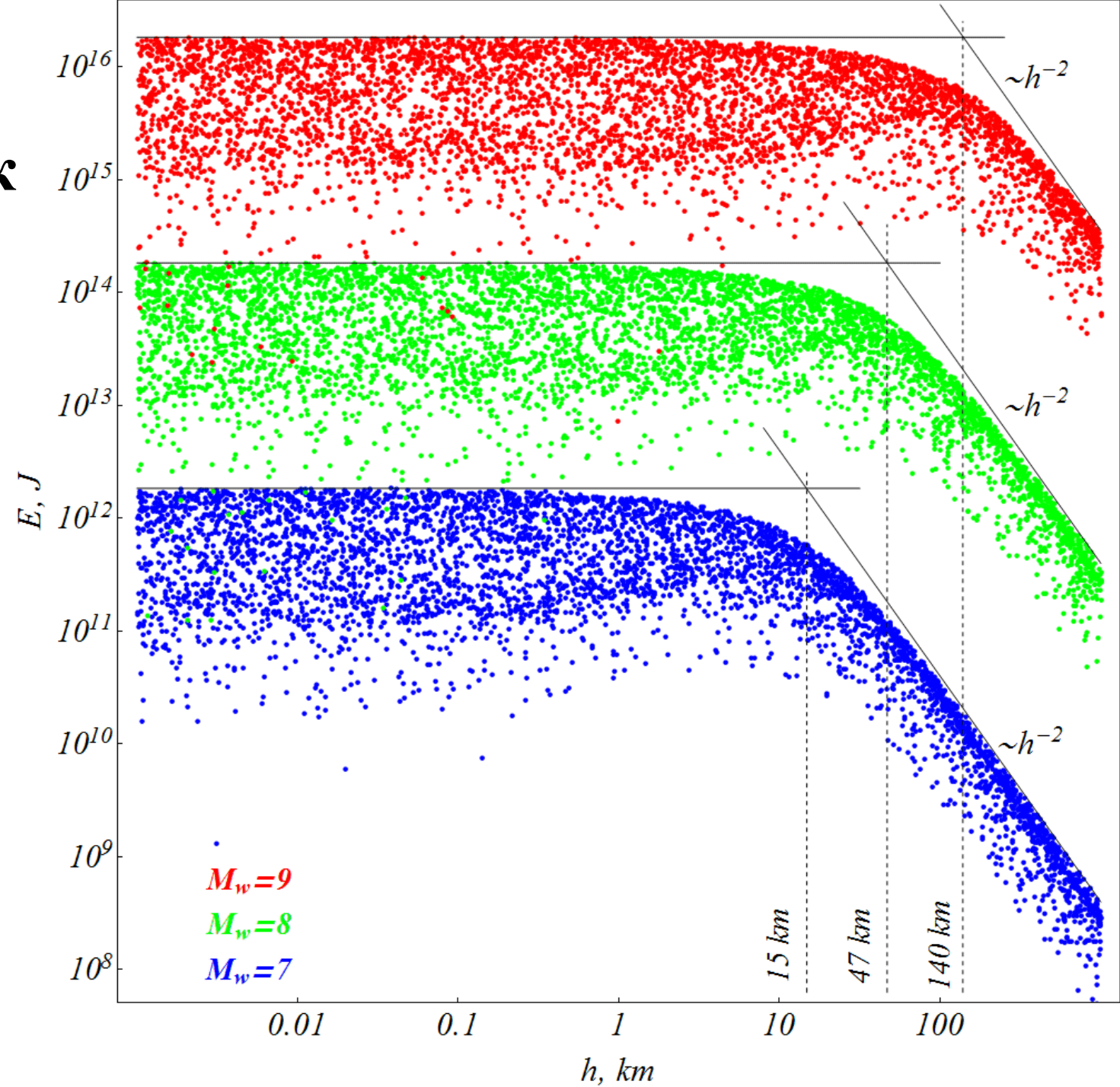
$$\log_{10} V_{\max} [m^3] = 1.5 M_w - 1.8$$



**Амплитуда
деформации
дна как
функция
глубины
очага
землетря-
сения**



Энергия
цунами как
функция
глубины
очага
землетря-
сения



Горизонтальный размер (средний радиус) очага цунами

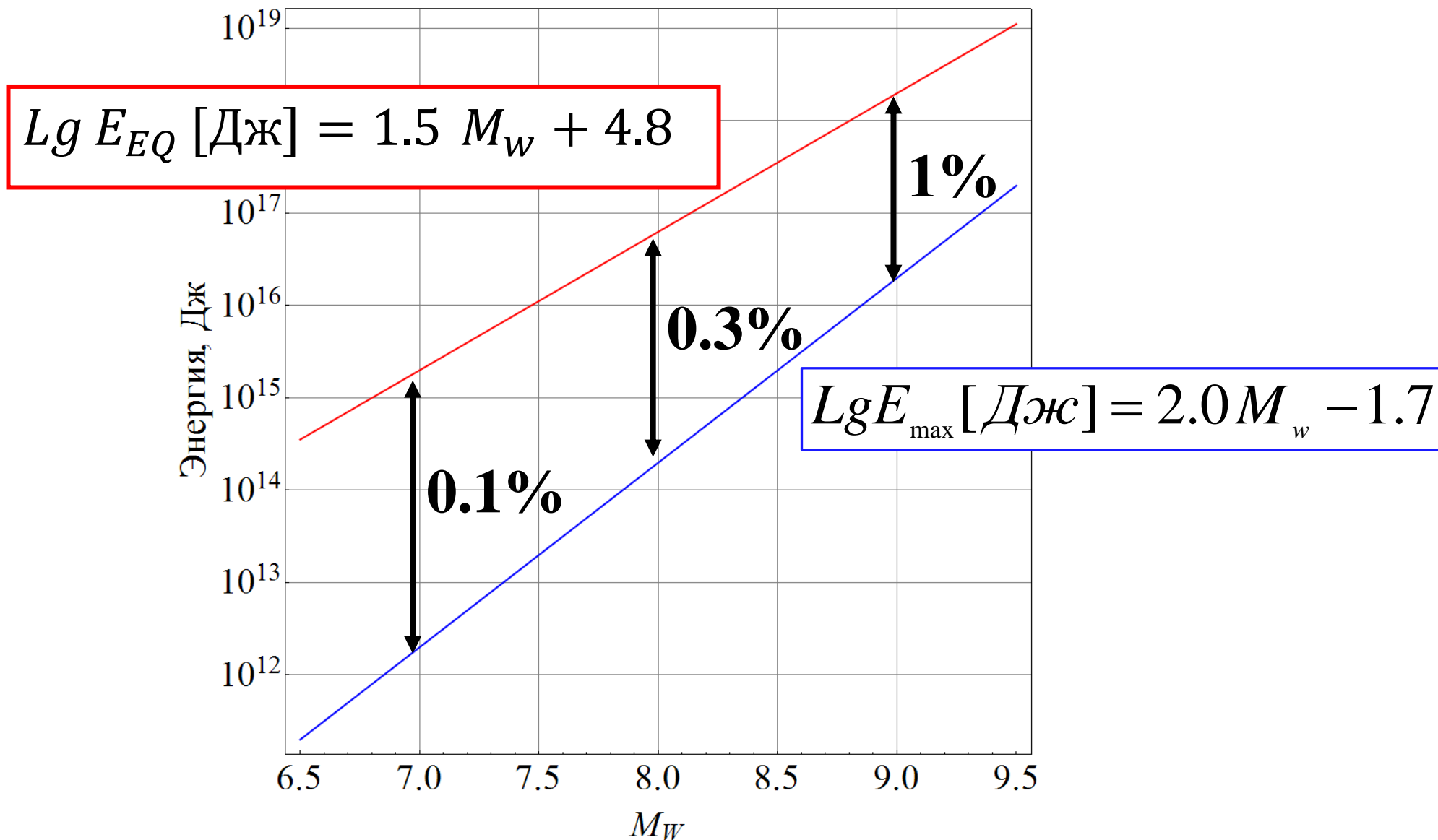
$$R_{ts} \equiv \sqrt{V / \Delta\eta}$$

$$\log_{10} R_{ts} [\text{km}] = 0.5 M_w - 2.29$$

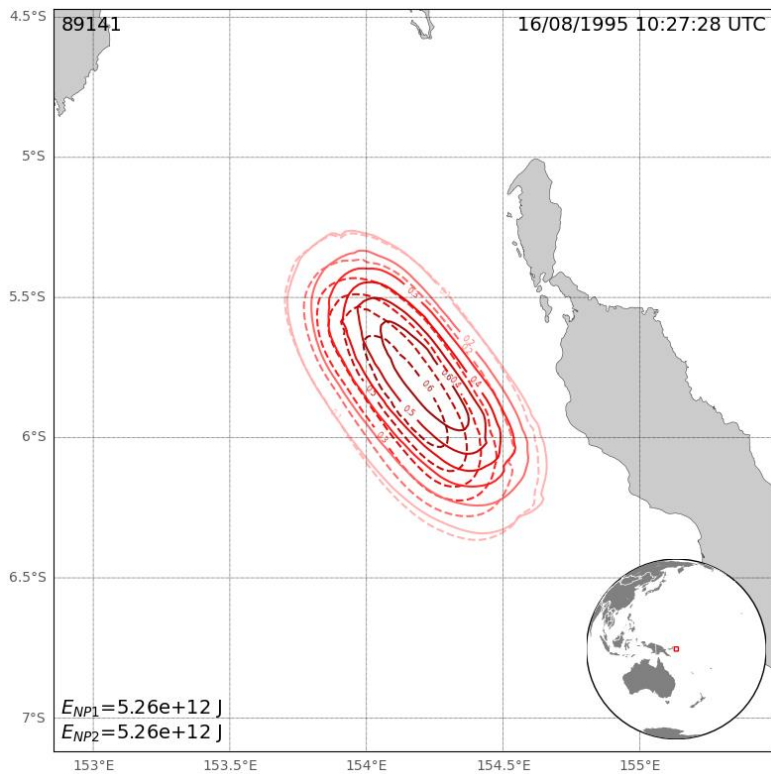
$$\lg R_{TS} = (0.5 \pm 0.07)M - (2.1 \pm 0.6)$$

[Доценко, Соловьев, 1990]

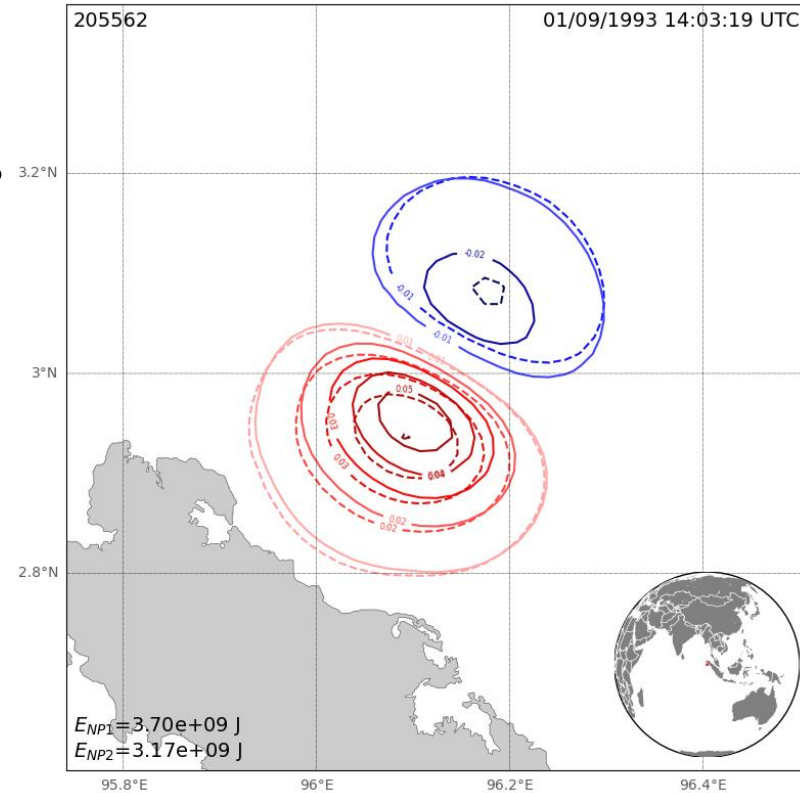
Энергии землетрясения и цунами в зависимости от моментной магнитуды



Примеры расчета начального возвышения водной поверхности



16.08.1995
Solomon Islands
 $M_w = 7.7$
 $E_{NP1}/E_{NP2} \approx 1$

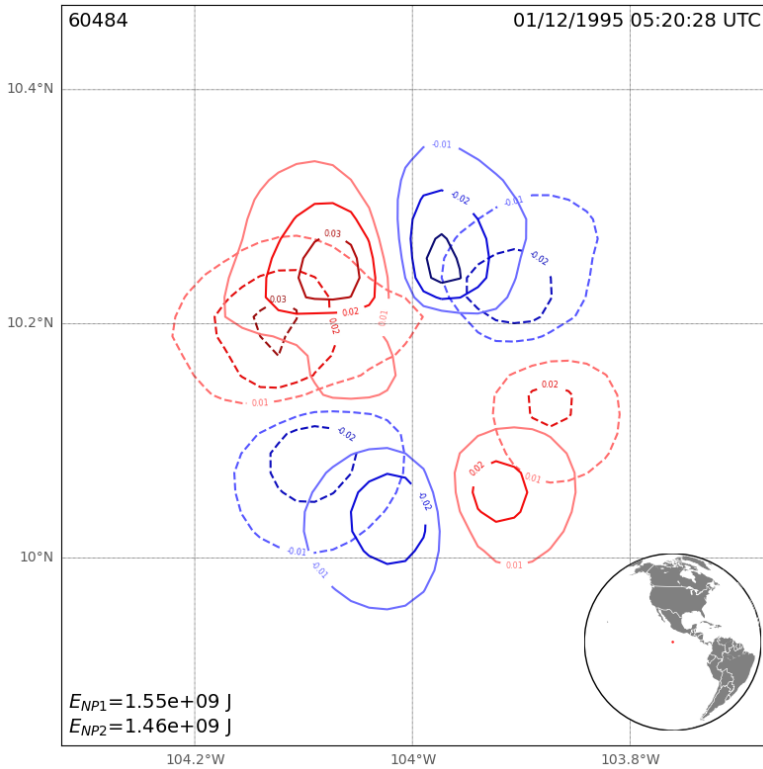


01.09.1993
Northern Sumatra
 $M_w = 6.3$
 $E_{NP1}/E_{NP2} \approx 1.2$

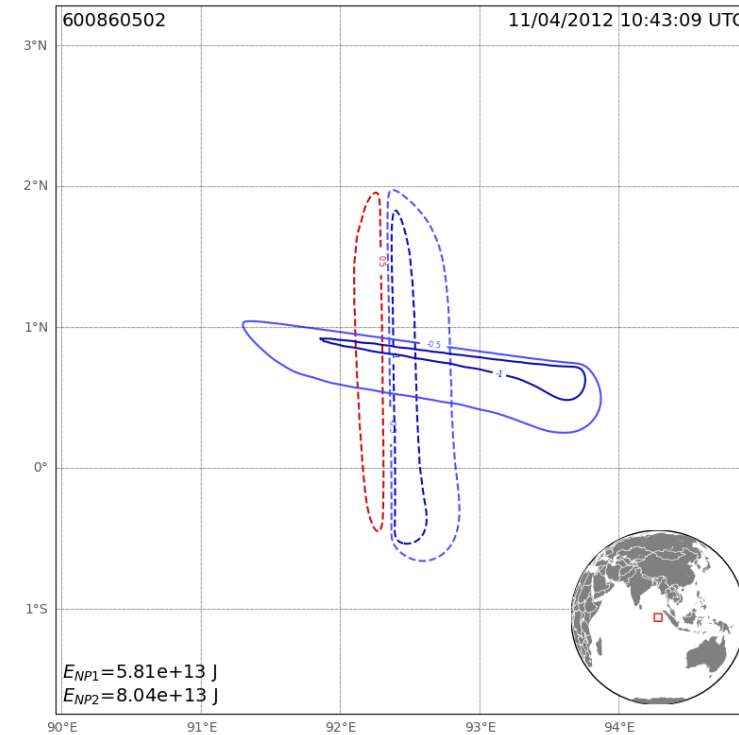
NP1
NP2

1. Форма начального возвышения и отношение энергии начального возвышения близки

Примеры расчета начального возвышения водной поверхности



01.12.1995
Mexico
 $M_w = 6.6$
 $E_{NP1}/E_{NP2} \approx 1.06$



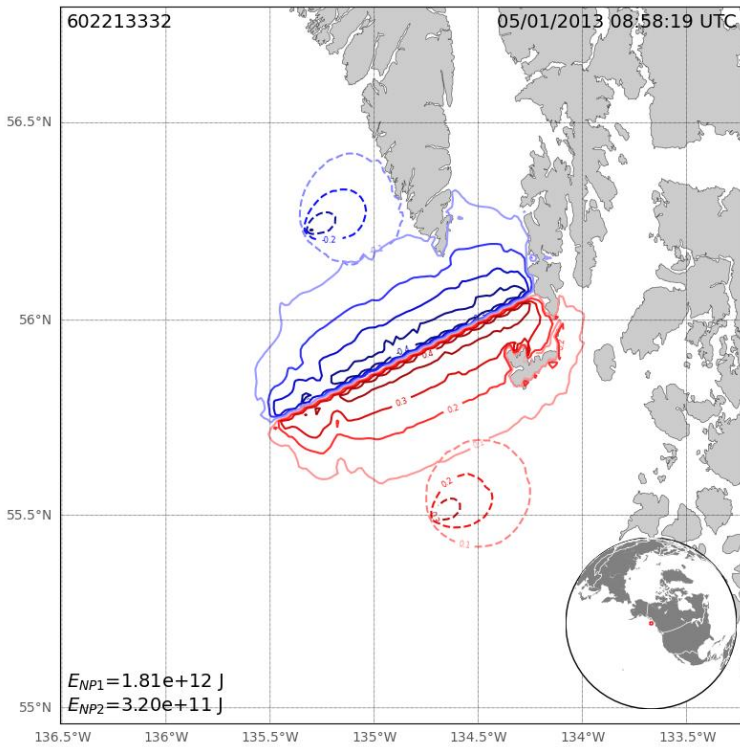
11.04.2012
Northern Sumatra
 $M_w = 8.2$
 $E_{NP1}/E_{NP2} \approx 0.7$

— NP1
— NP2

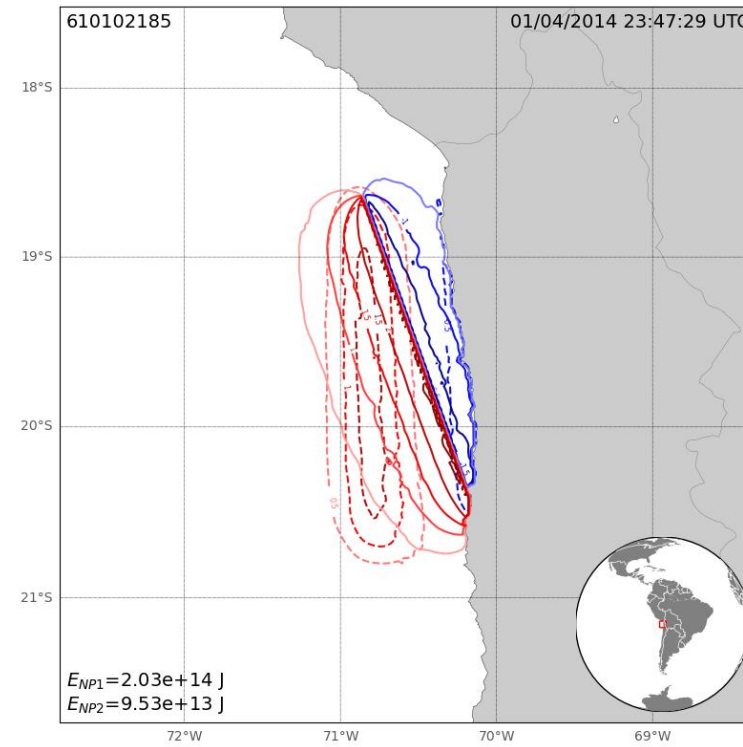
2. Форма начального возвышения различаются существенно, в то время как значения энергий близки

Примеры расчета начального возвышения водной поверхности

поверхности



05.01.2013
Alaska
 $M_w = 7.5$
 $E_{NP1}/E_{NP2} \approx 5.7$

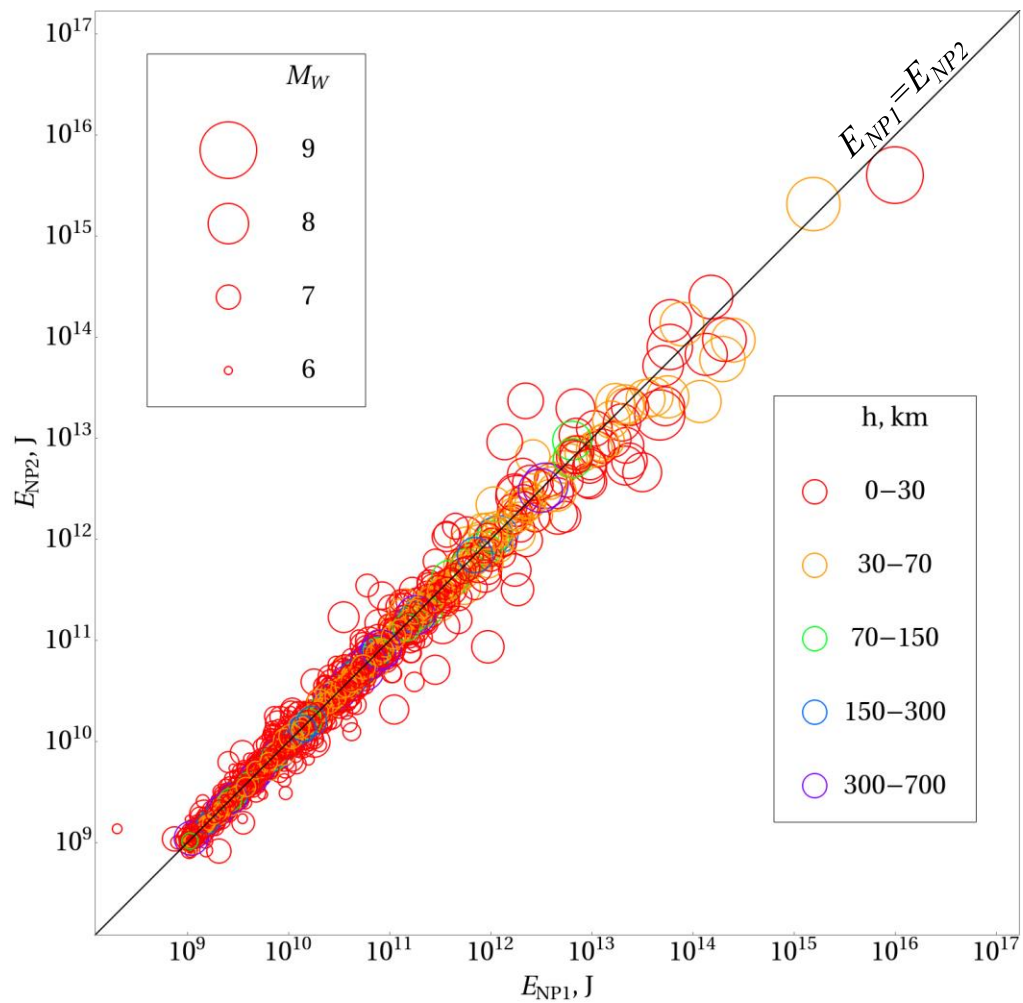


01.04.2014
Chile
 $M_w = 8.1$
 $E_{NP1}/E_{NP2} \approx 2.1$

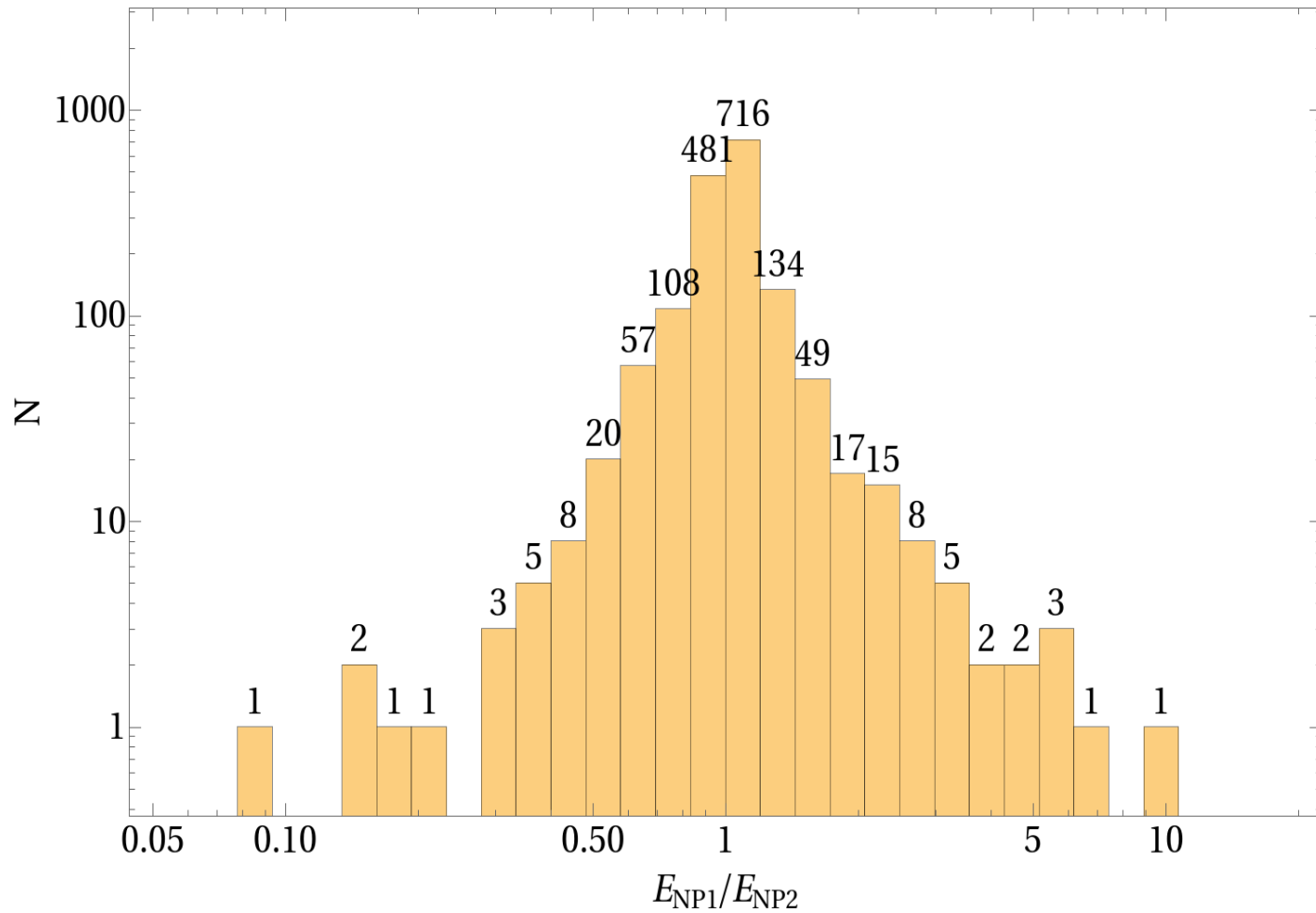
NP1
NP2

3. Форма начального возвышения и значения энергии различаются значительно

СВЯЗЬ E_{NP1} И E_{NP2}



Распределение числа событий по отношению E_{NP1}/E_{NP2}



11.04.2012 Суматра

Mw=8.2, h=10 km

F-E Region Off West Coast of Northern Sumatra

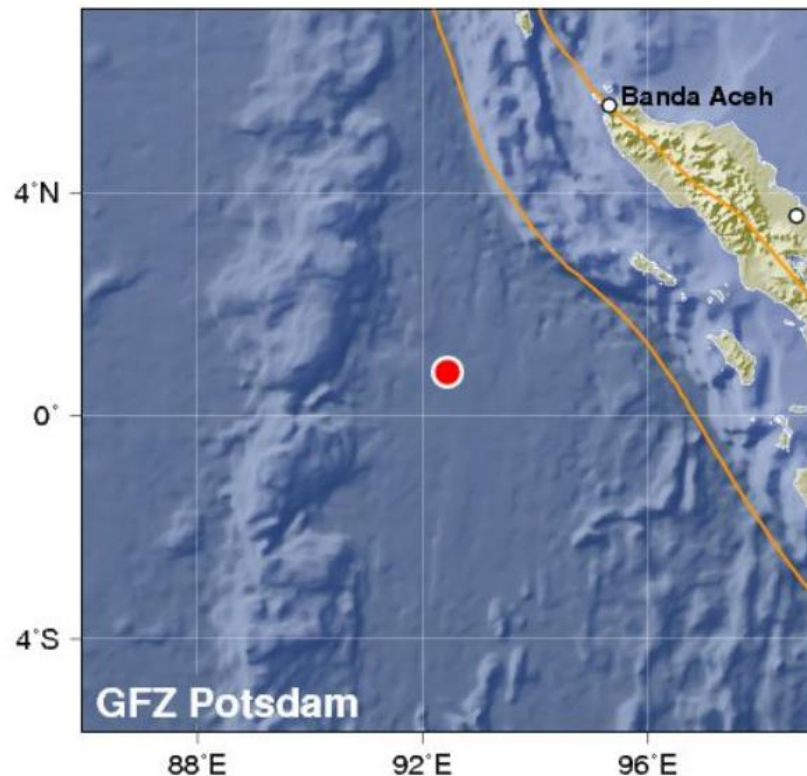
Time 2012-04-11 10:43:09.2 UTC

Magnitude 8.2 (Mw)

Epicenter [92.43°E 0.76°N](#)

Depth 10 km

Status M - manually revised [?](#)

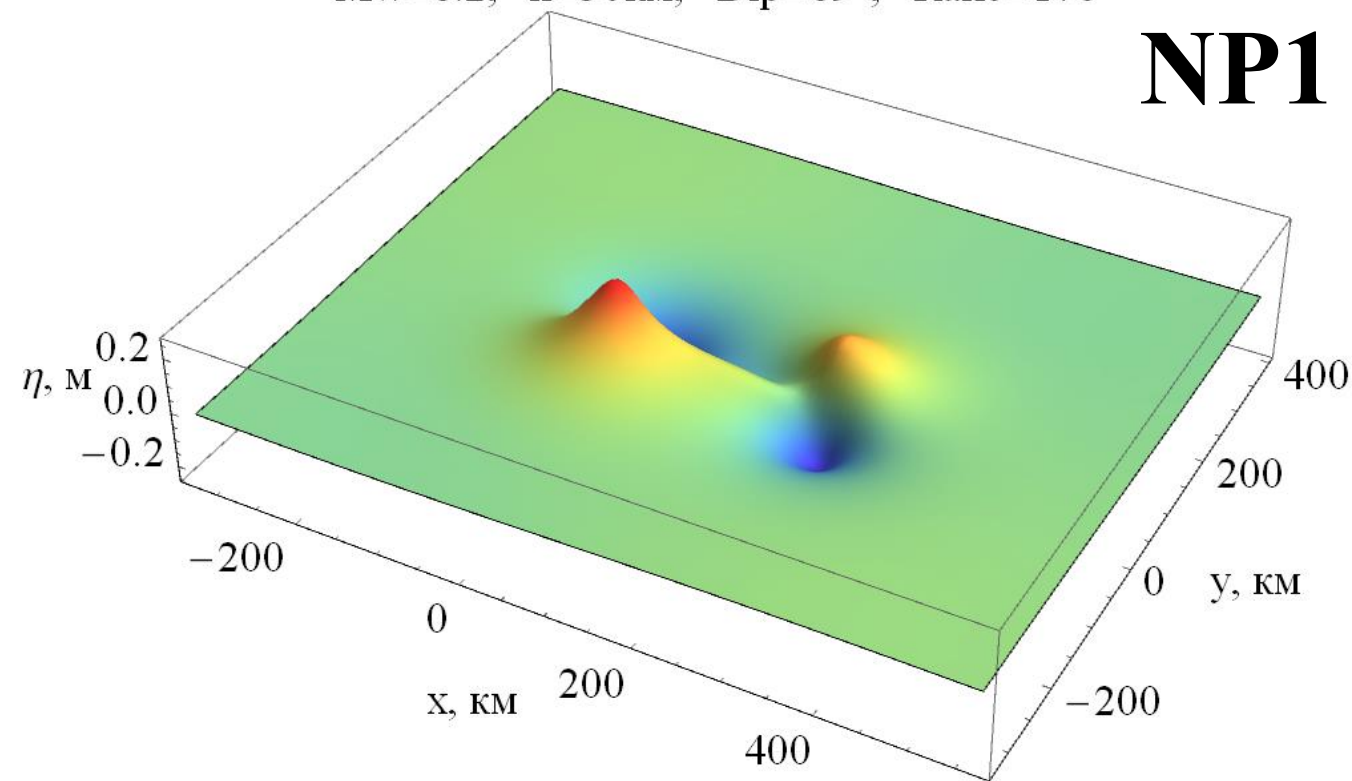


Moment tensor solutions

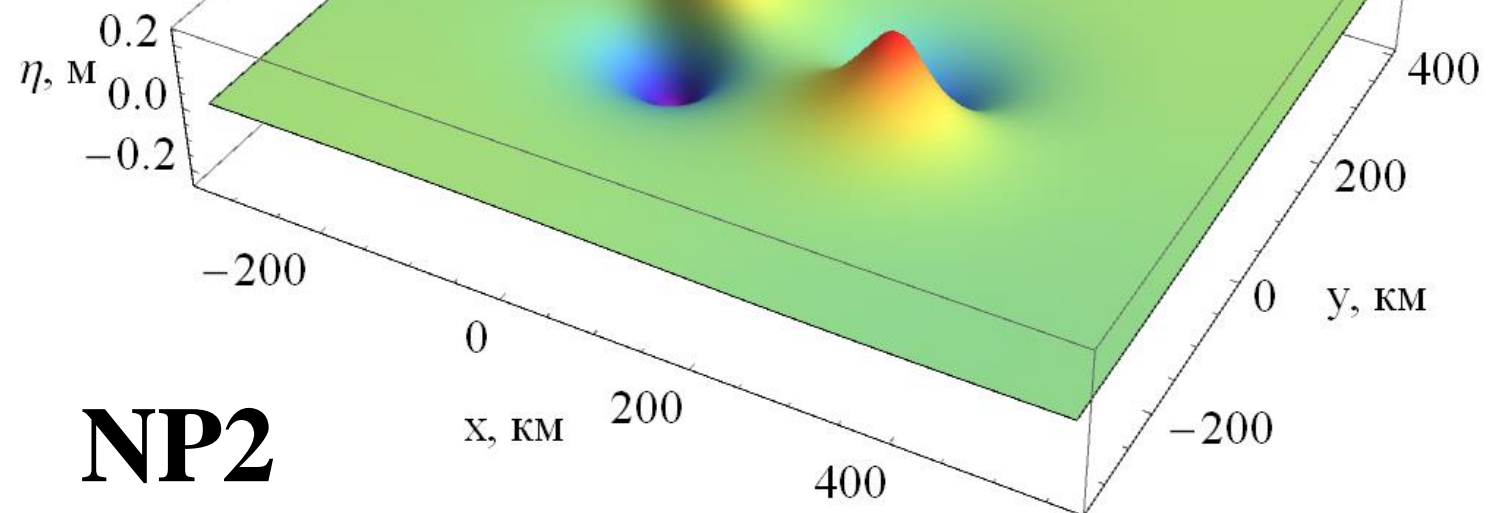
Time	2012-04-11 10:43:09		
Magnitude	8.2		
Latitude	0.63°N		
Longitude	92.58°E		
Depth	30 km		
Nodal planes	Strike	Dip	Rake
	107°	89°	176°
	17°	87°	0°

Mw=8.2, h=30KM, Dip=89°, Rake=176°

NP1



Mw=8.2, h=30KM, Dip=87°, Rake=0°



NP2

11.03.2011 Япония

Mw=8.9, h=15 km

F-E Region Near East Coast of Honshu, Japan

Time 2011-03-11 05:46:23.0 UTC

Magnitude 8.9 (Mw)

Epicenter [142.53°E 38.23°N](#)

Depth 15 km

Status M - manually revised [?](#)



Moment tensor solutions

Time 2011-03-11 05:46:22

Magnitude 8.9

Latitude 38.12°N

Longitude 142.65°E

Depth 15 km

Nodal planes

Strike

Dip

Rake

200°

10°

91°

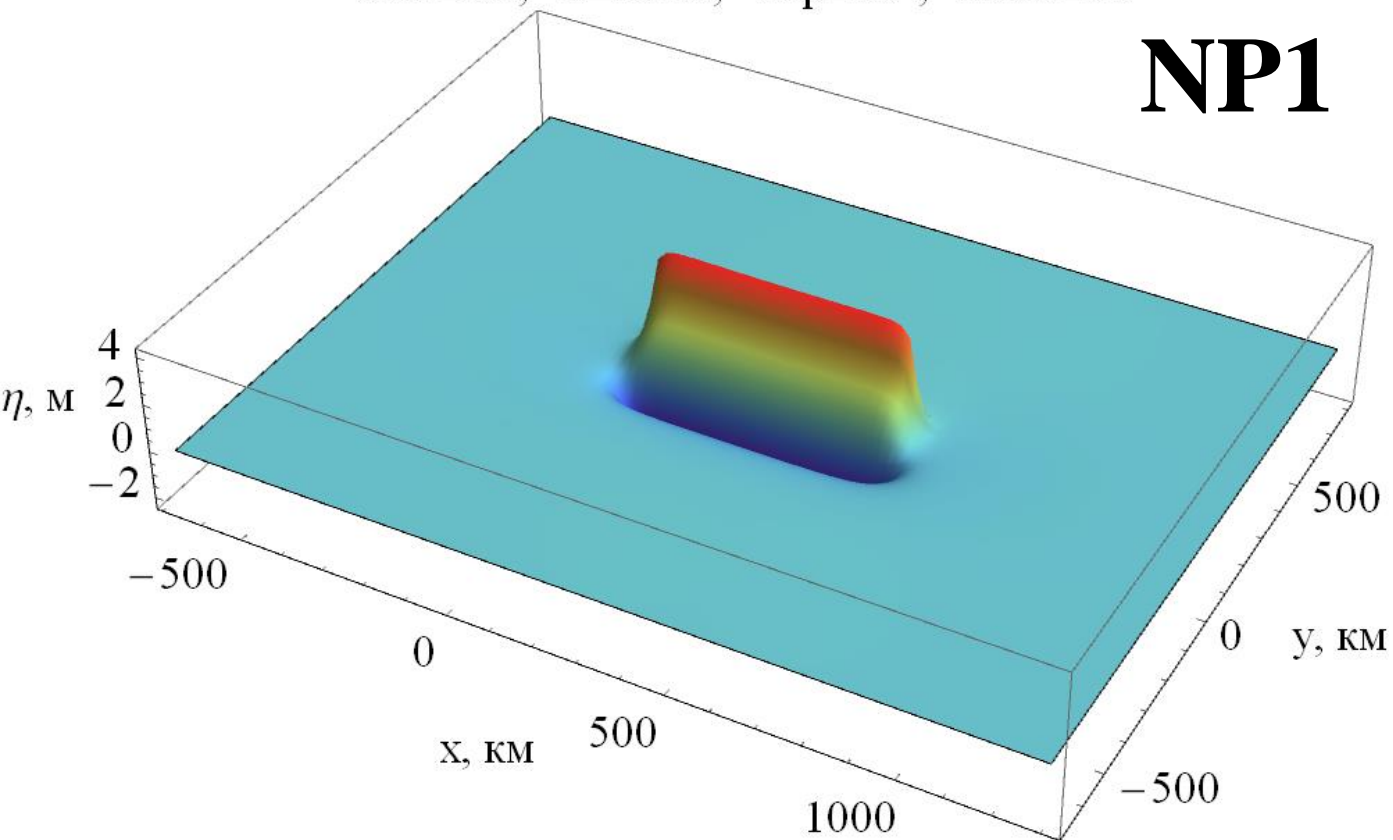
20°

80°

90°

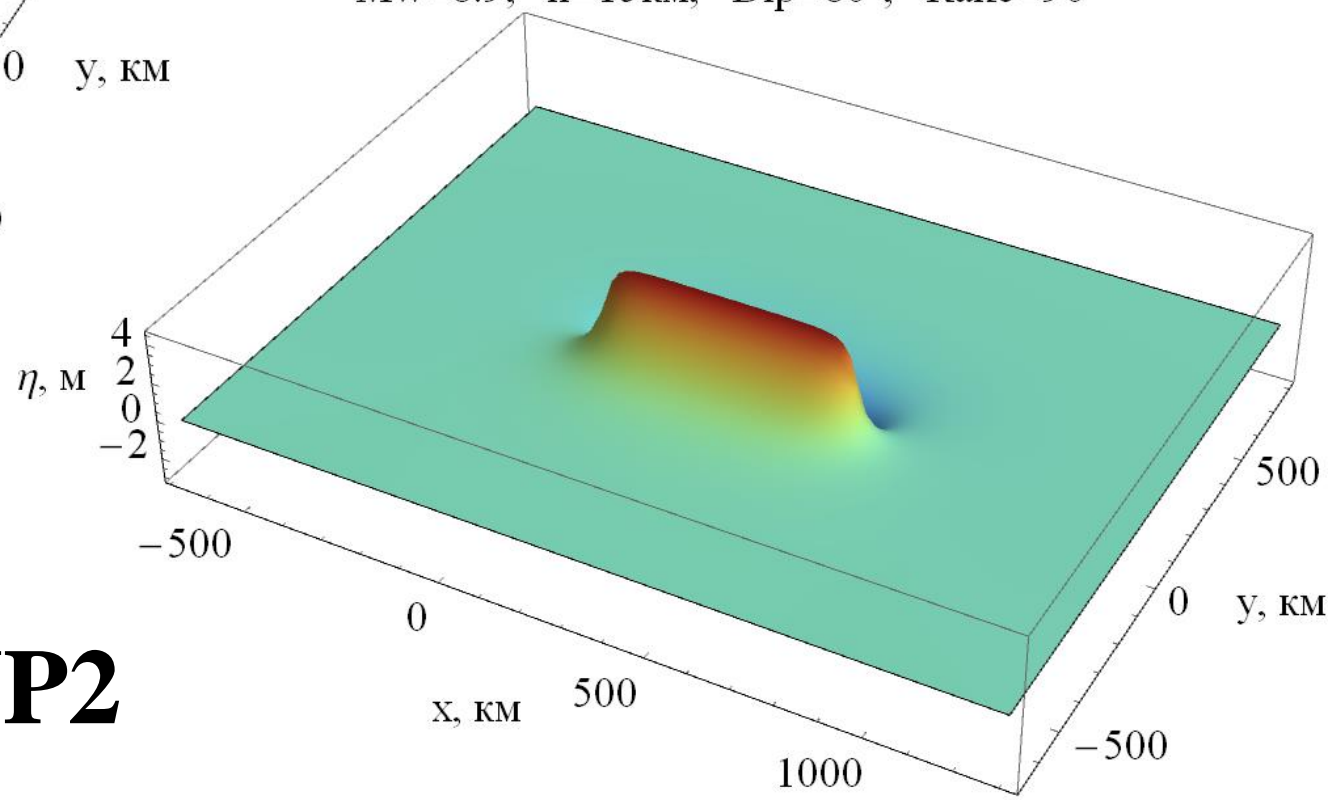
Mw=8.9, h=15km, Dip=10°, Rake=91°

NP1



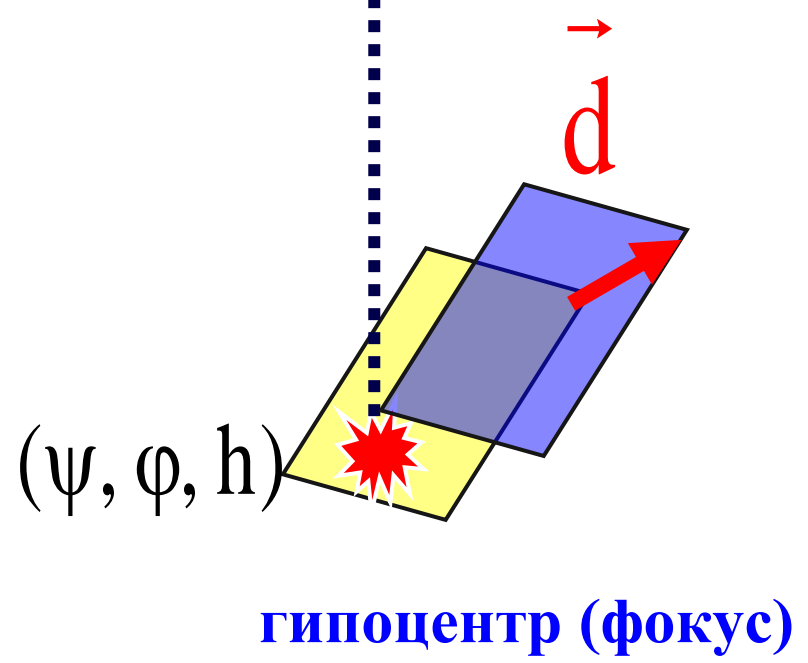
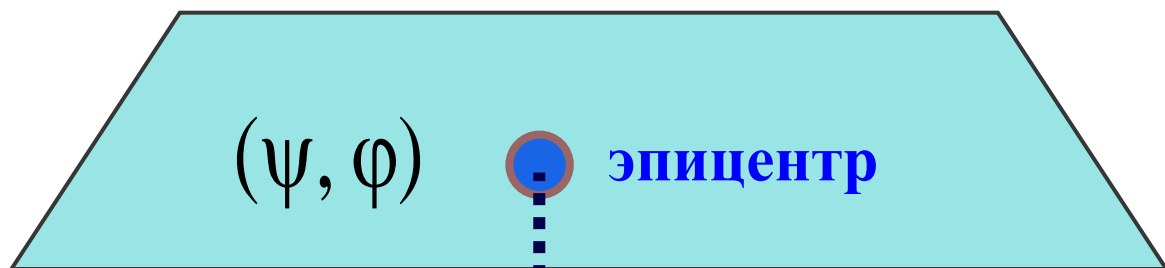
Mw=8.9, h=15km, Dip=80°, Rake=90°

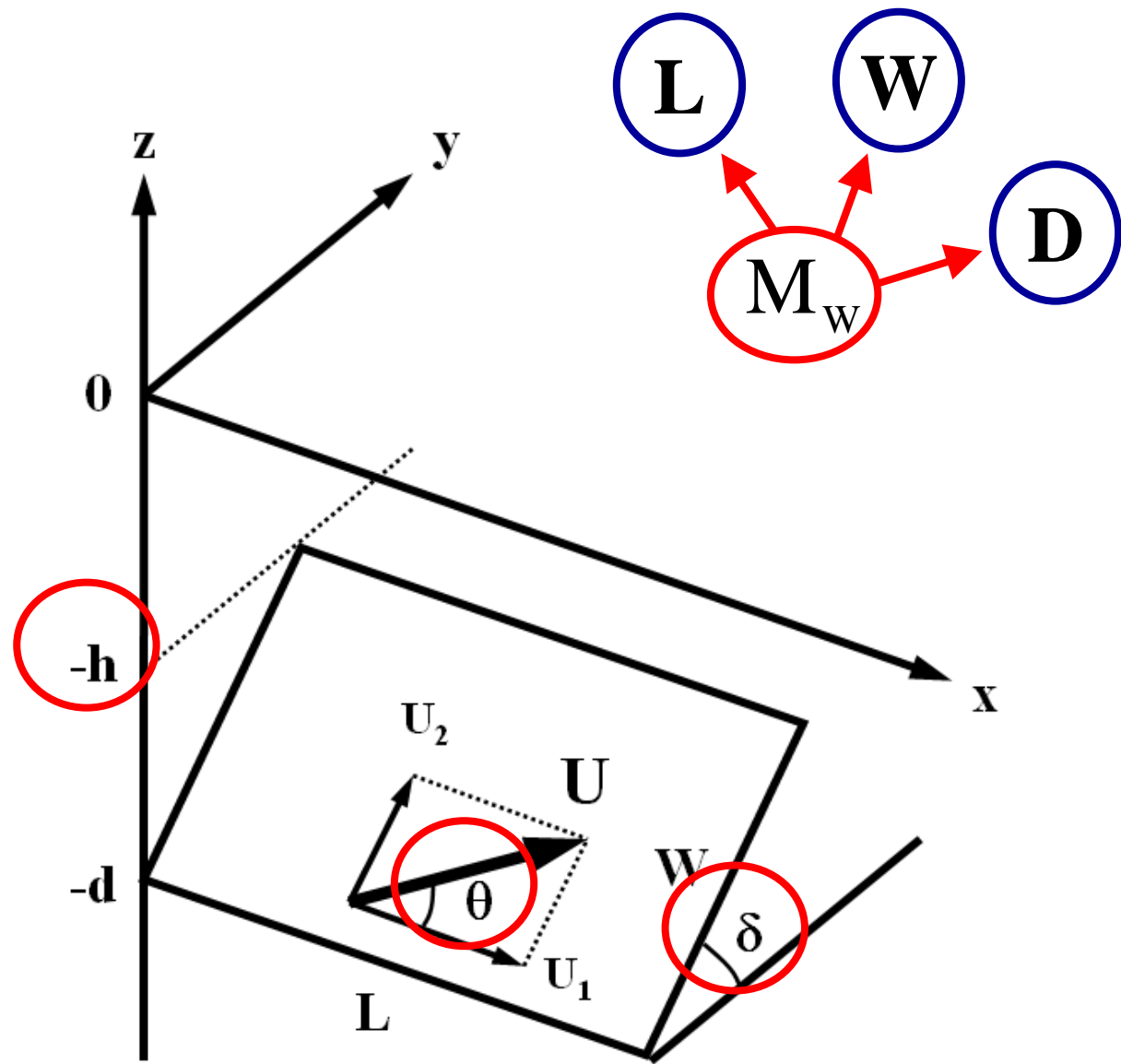
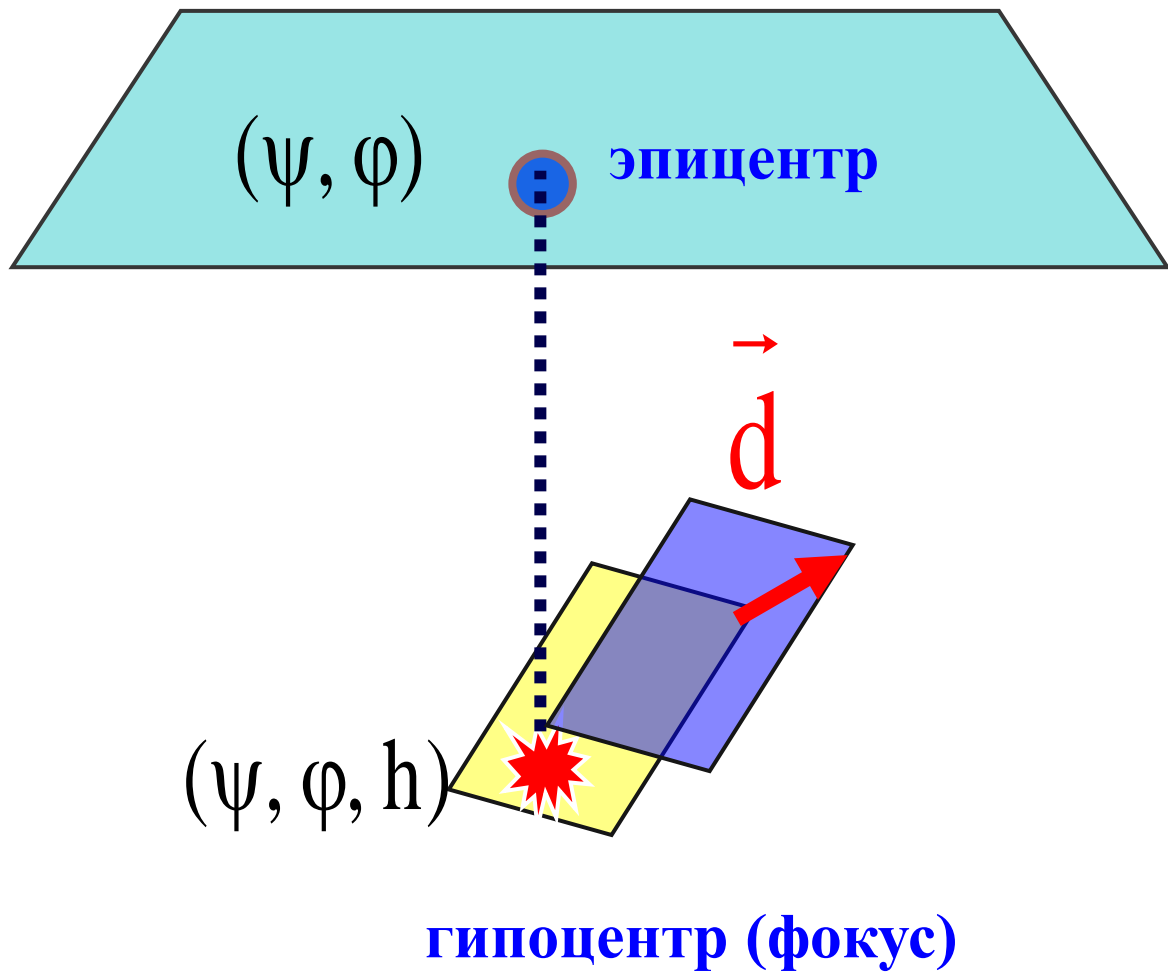
NP2



Характеристики «силы» землетрясений и цунами

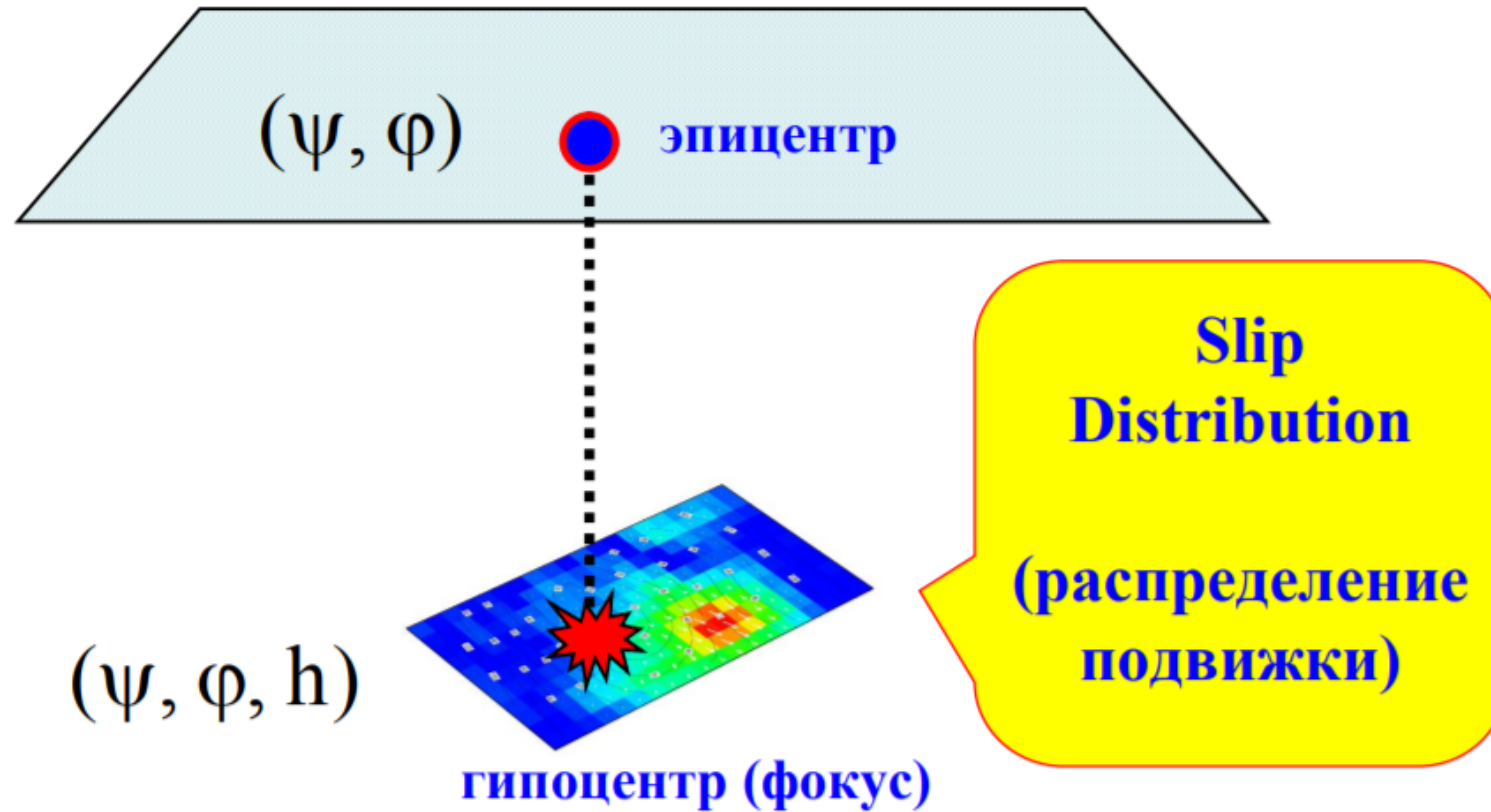
землетрясения	цунами
<p data-bbox="580 701 728 768" style="text-align: center;">M_w</p> $M_w = \frac{\lg M_0}{1.5} - 6.07$	<p data-bbox="1722 701 1760 768" style="text-align: center;">I</p> <p data-bbox="1429 825 2244 903" style="text-align: center;">Соловьева-Имамуры</p> $I = 0.5 + \log_2 \bar{H}$



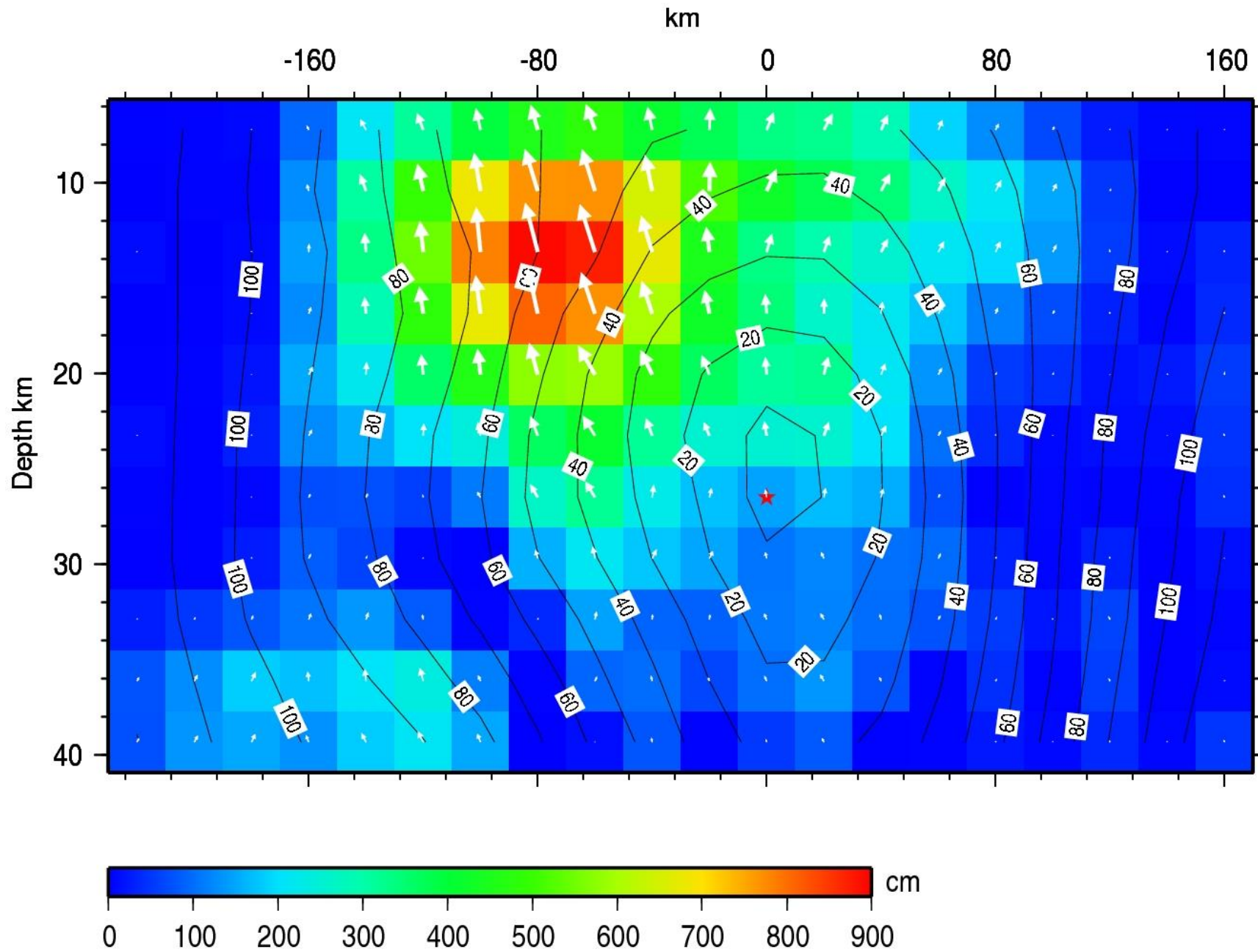


Очаг землетрясения. Основные понятия

Finite Fault Model



Центральные Курилы, 15 ноября 2006 г



Sumatra - Andaman Earthquake

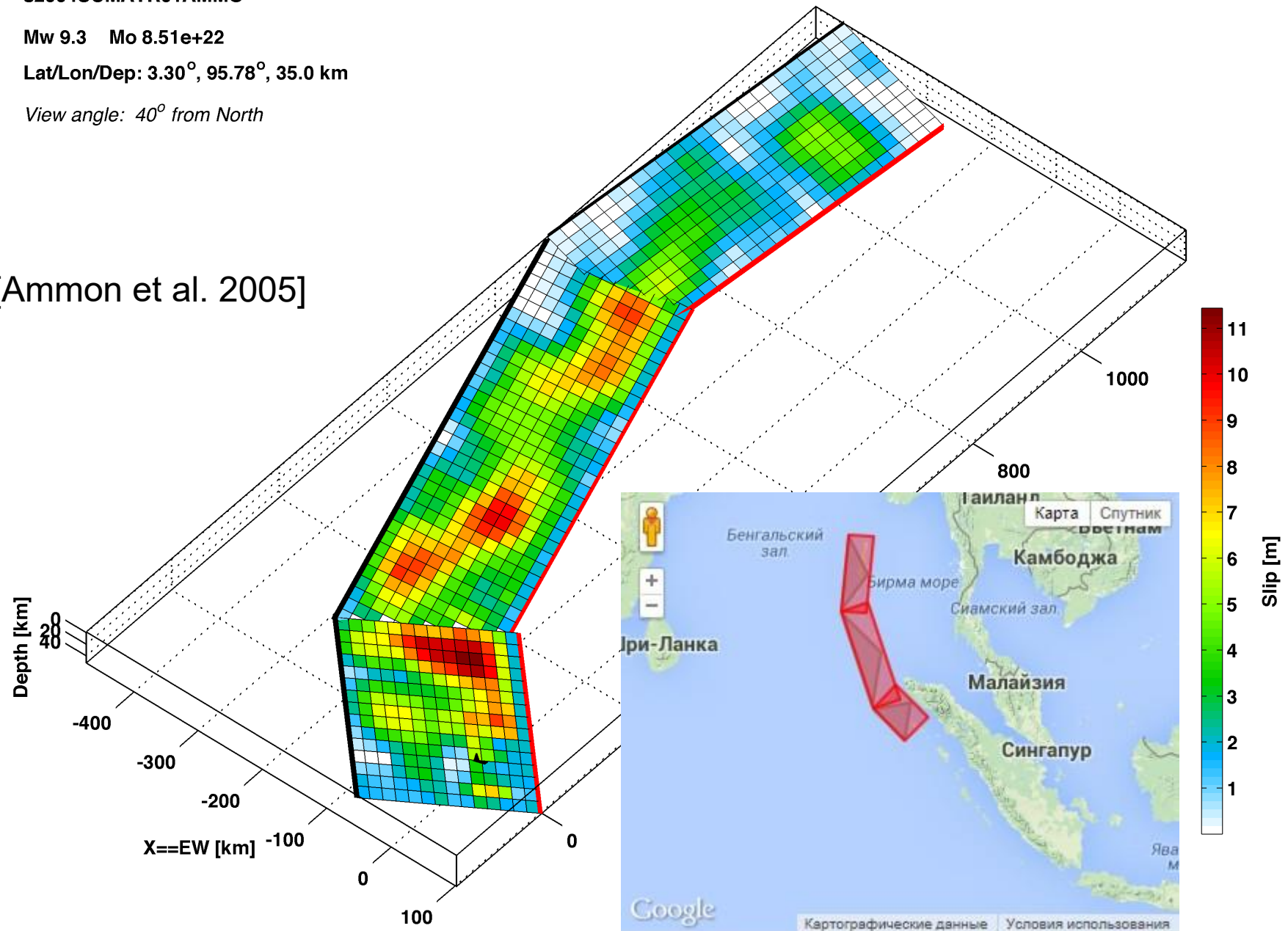
s2004SUMATR01AMMO

Mw 9.3 Mo 8.51e+22

Lat/Lon/Dep: 3.30°, 95.78°, 35.0 km

View angle: 40° from North

[Ammon et al. 2005]



Sumatra (Indonesia)

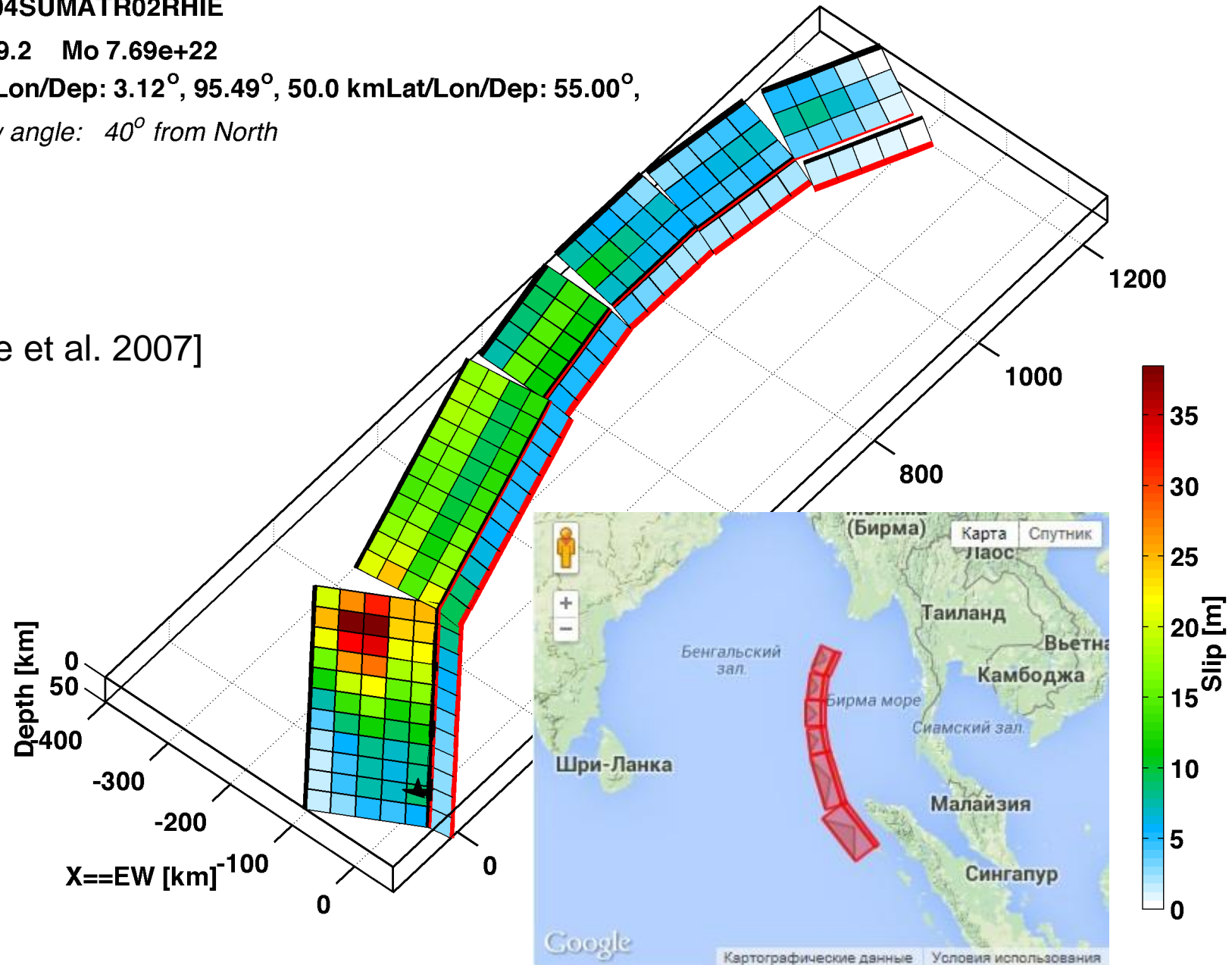
s2004SUMATR02RHIE

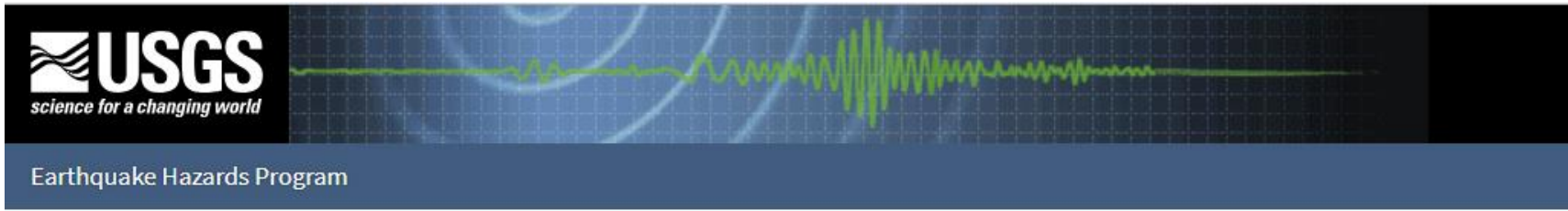
Mw 9.2 Mo 7.69e+22

Lat/Lon/Dep: 3.12°, 95.49°, 50.0 km Lat/Lon/Dep: 55.00°

View angle: 40° from North

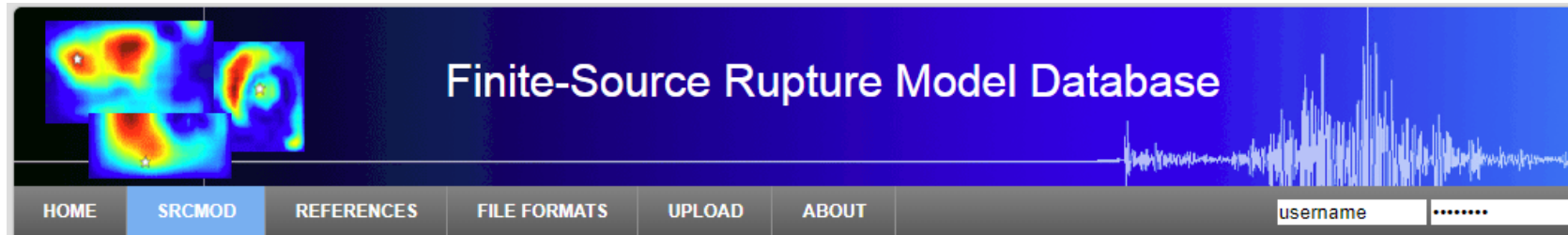
[Rhie et al. 2007]





<https://earthquake.usgs.gov/>

The United States Geological Survey



<http://equake-rc.info/SRCMOD/>

Finite-Source Rupture Model Database

Метод расчета «источника цунами»

**Начальное возвышение водной поверхности в
очаге цунами**

**Остаточное смещение поверхности дна
(скалярное поле)**

**Остаточная деформация дна
(векторное поле)**

**Формулы Окада
и принцип суперпозиции**

Finite Fault Model

Источники данных:

Finite Fault Models:

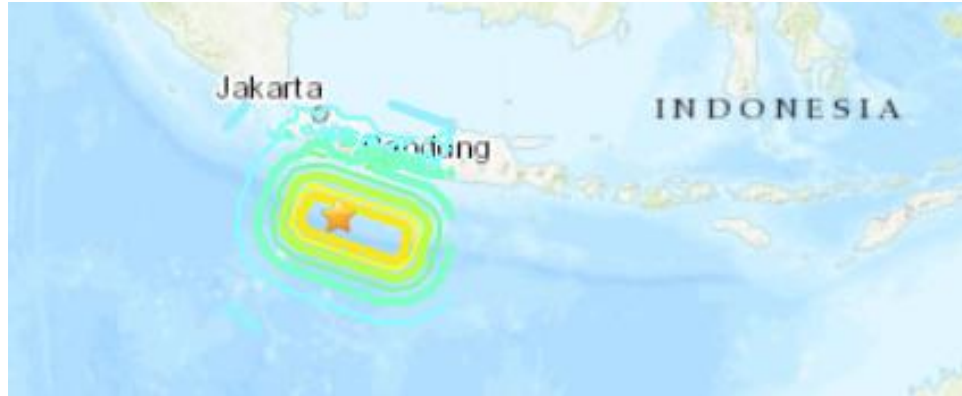
- U.S. Geological Survey (USGS)
- California Institute of Technology (CalTech)
- UC Santa Barbara (UCSB)
- SRCMOD (Finite-Source Rupture Model Database)

Глобальные данные по батиметрии и топографии:

- The GEBCO_08 Grid - a global 30 arc-second grid (General Bathymetric Chart of the Oceans)

17.07.2006 ЯВа $M_w=7.9$, I=2

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ensm/executive>



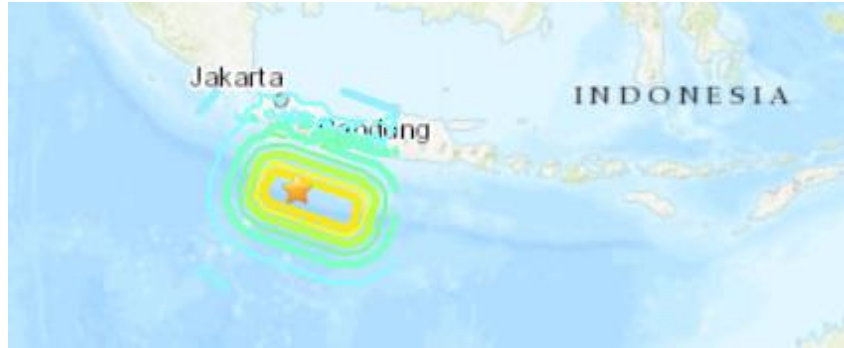
2006-07-17 08:19:26 (UTC)

9.284°S 107.419°E

20.0 km depth

17.07.2006 Ява $M_w=7.9$, I=2

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ensm/executive>

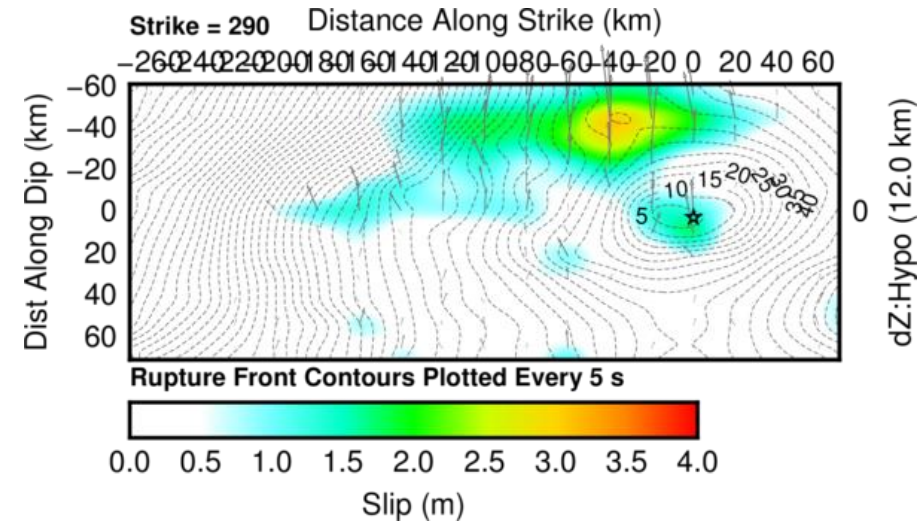


2006-07-17 08:19:26 (UTC)

9.284°S 107.419°E

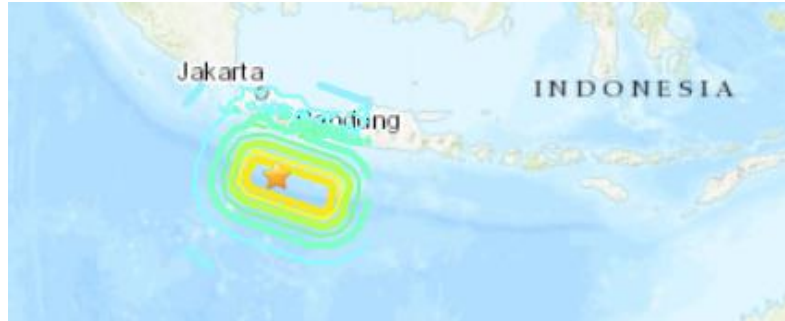
20.0 km depth

Finite Fault model



17.07.2006 Ява $M_w=7.9$, I=2

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000ensm/executive>

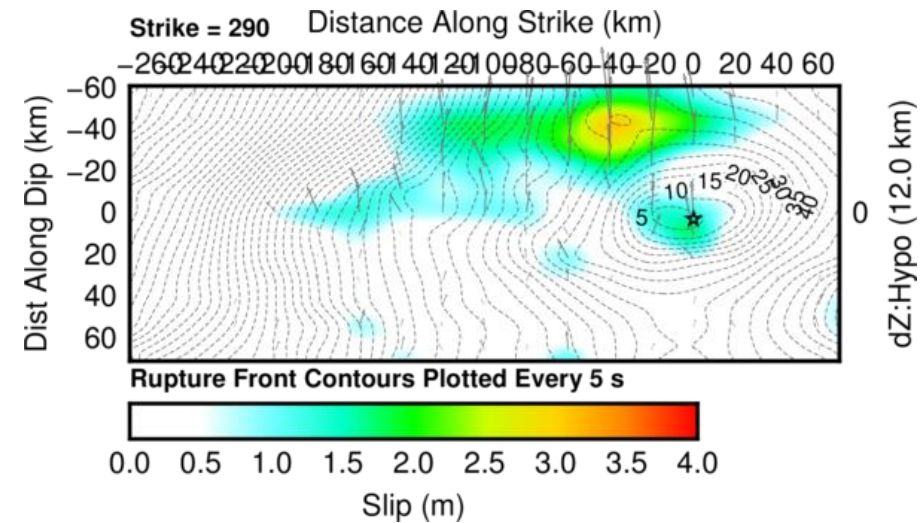


2006-07-17 08:19:26 (UTC)

9.284°S 107.419°E

20.0 km depth

Finite Fault model

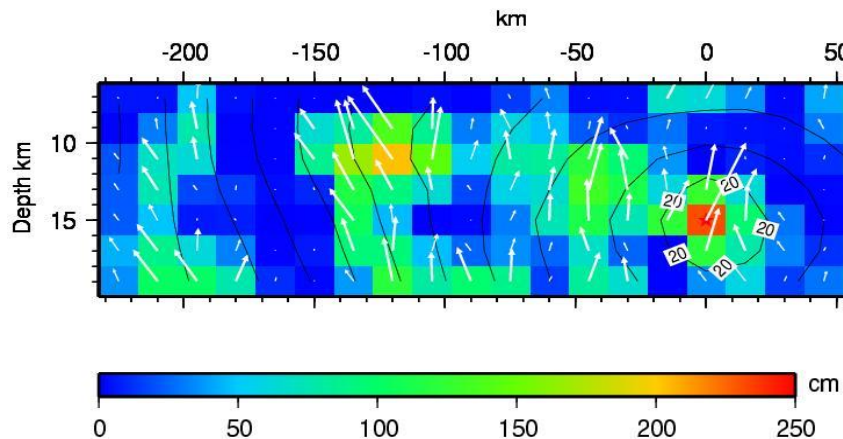


https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

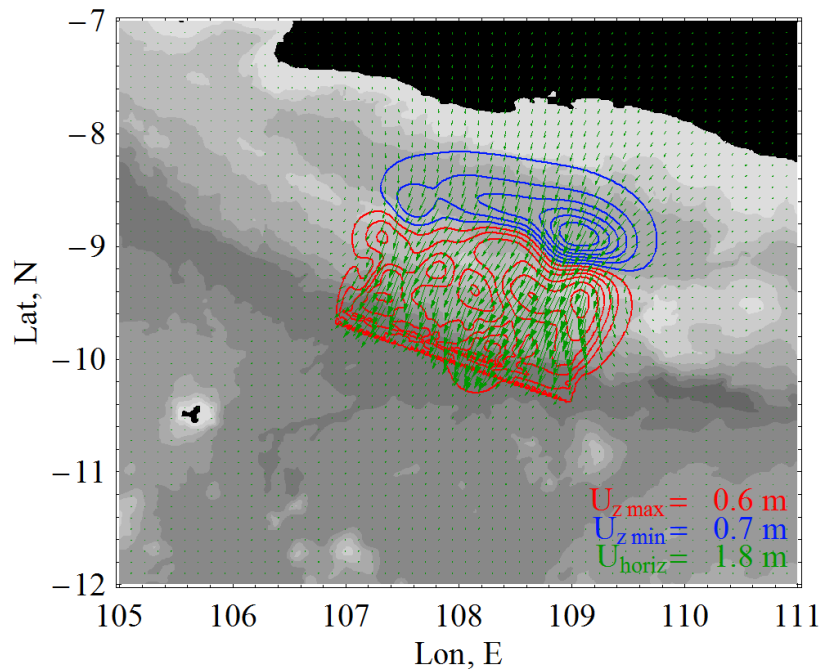
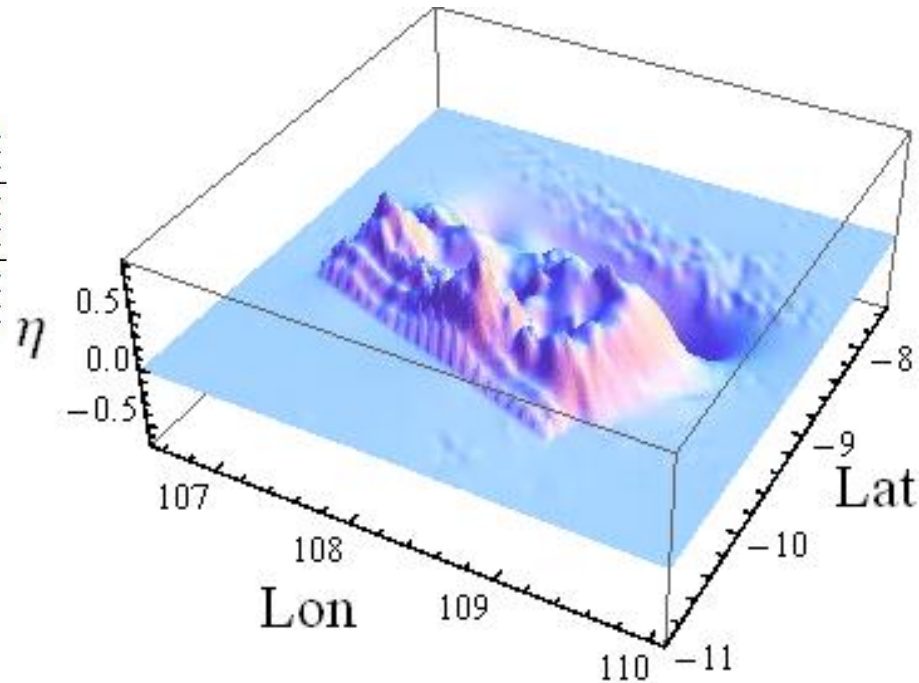
I=2

17.07.2006 Ява $M_w=7.9, I=2$

Strike= 289 degrees



Okada, 1985



$$\eta = D_z + \frac{\partial H}{\partial x} D_x + \frac{\partial H}{\partial y} D_y$$

$$\vec{D} \equiv (D_x, D_y, D_z)$$