

Носов Михаил Александрович

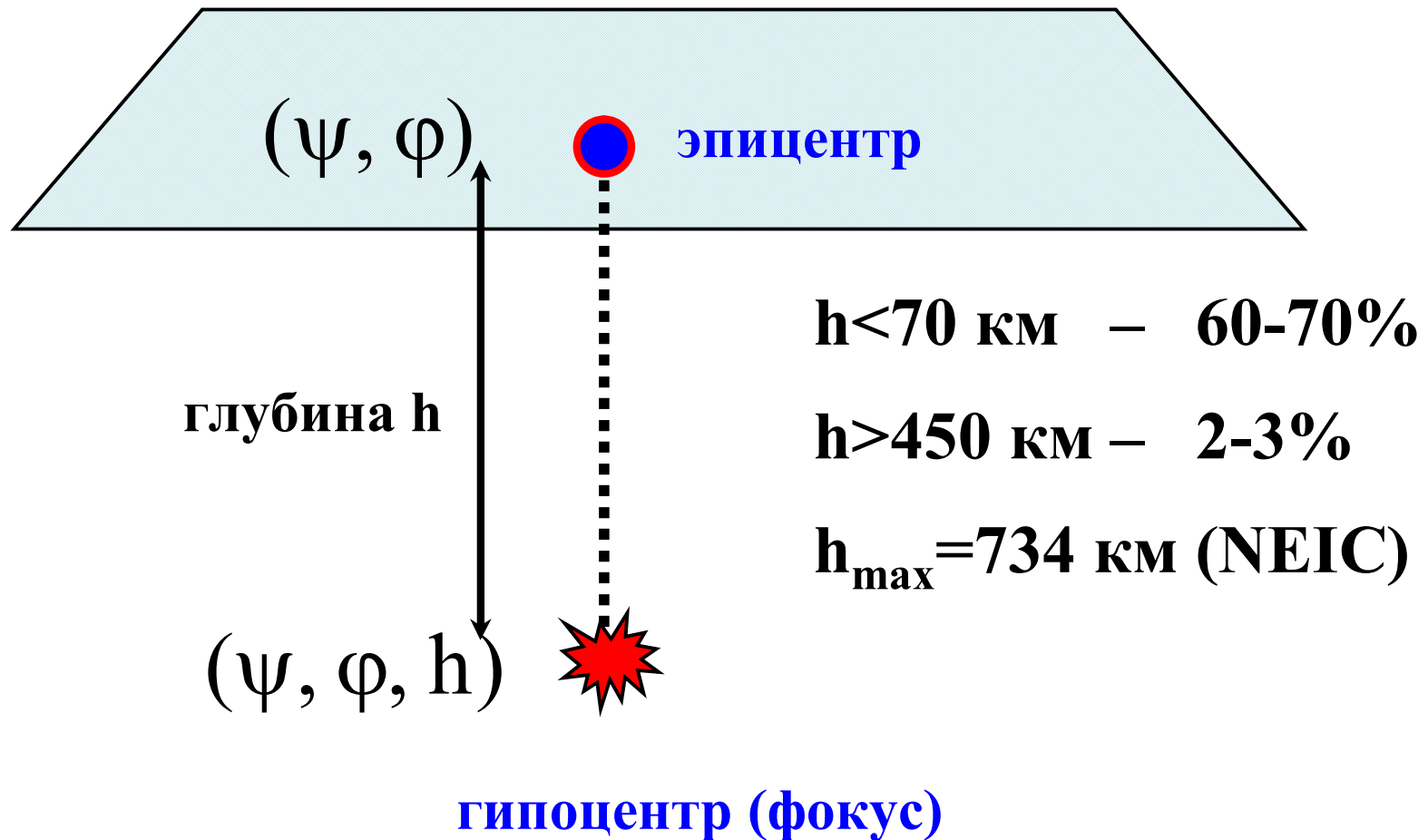
Физика цунами

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

Лекция №5



Землетрясение: основные понятия

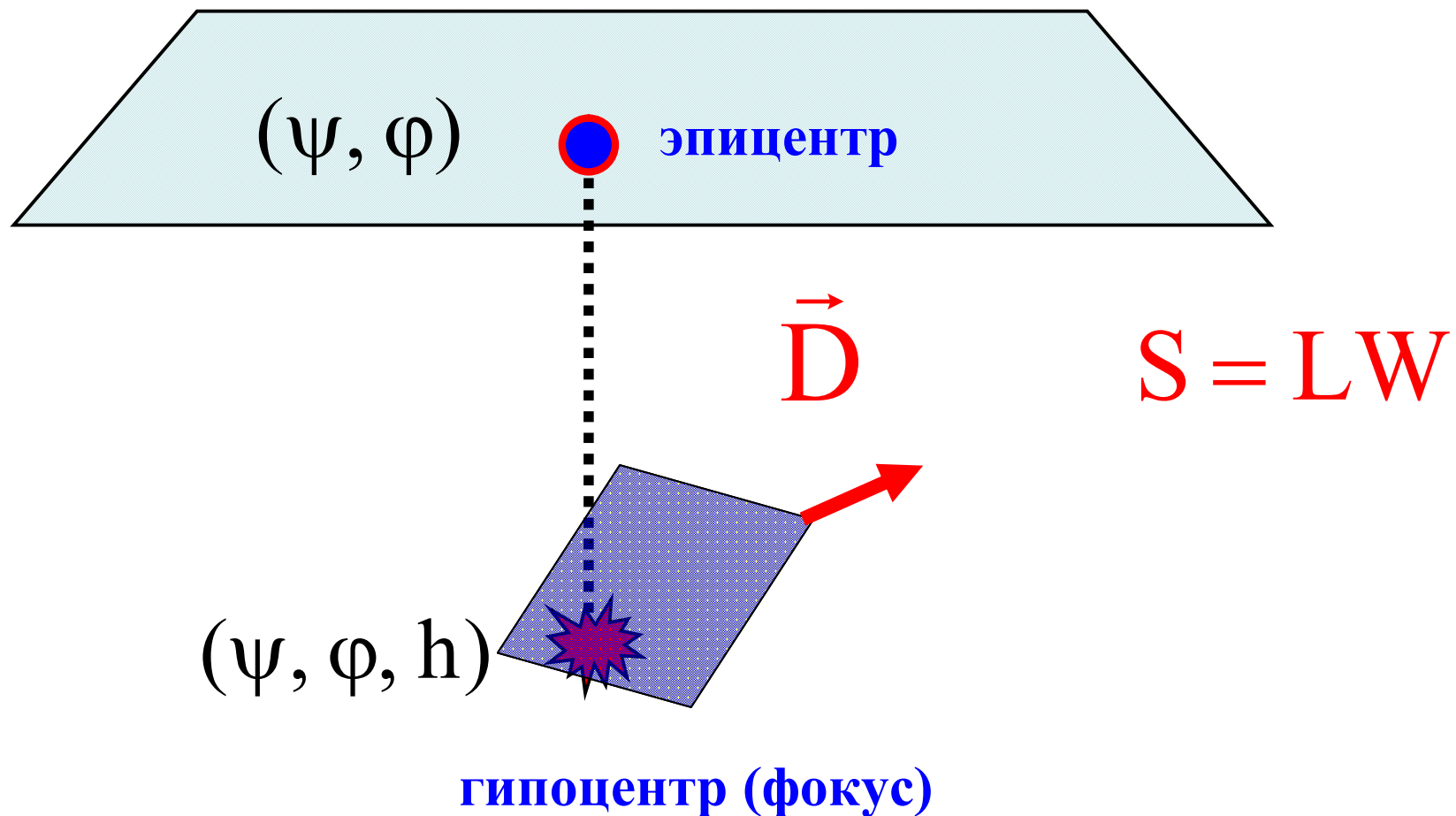


Очаг землетрясения. Основные понятия

$$M_0 = \mu S |\vec{D}| \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

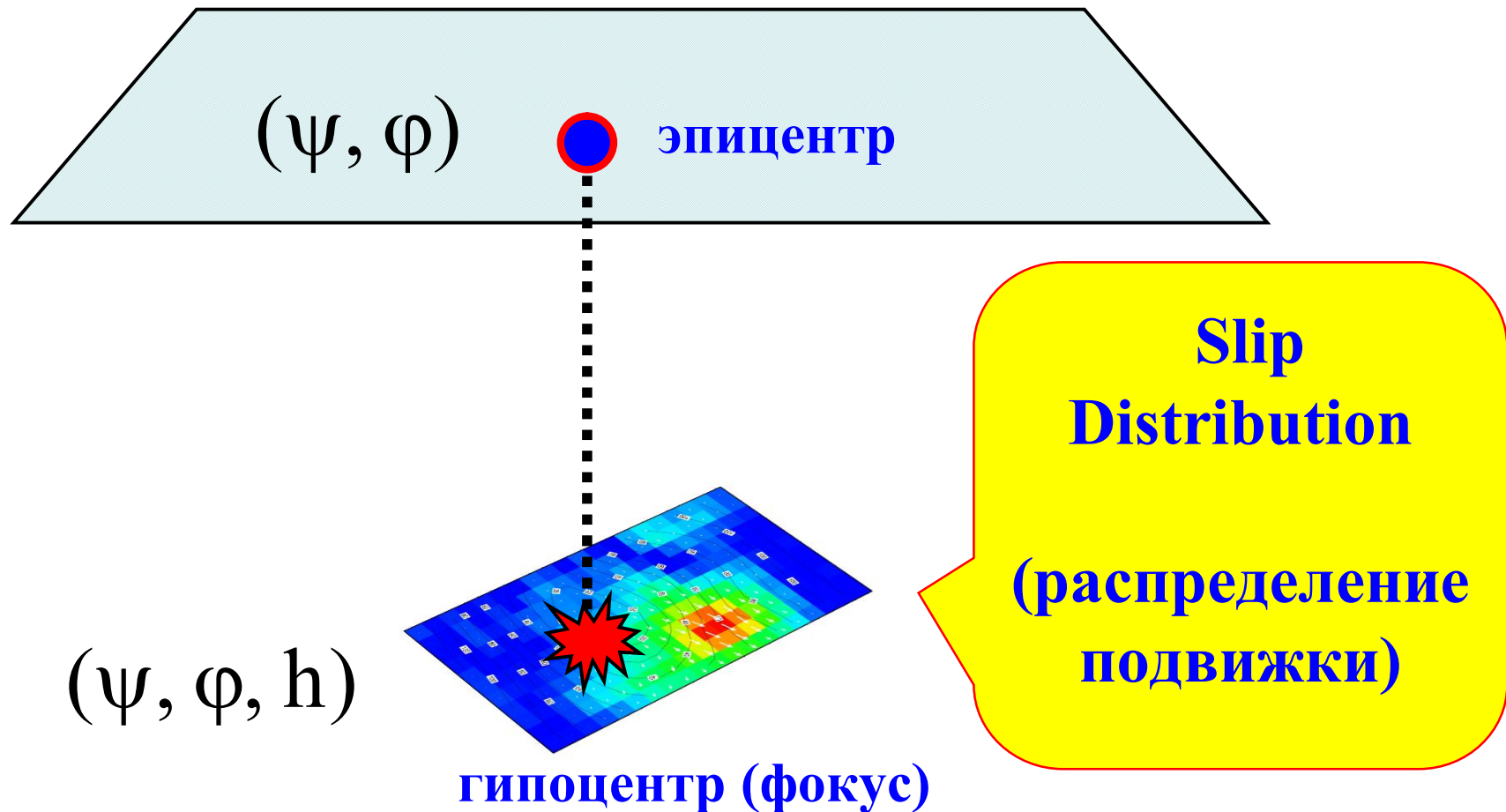
сейсмический момент

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

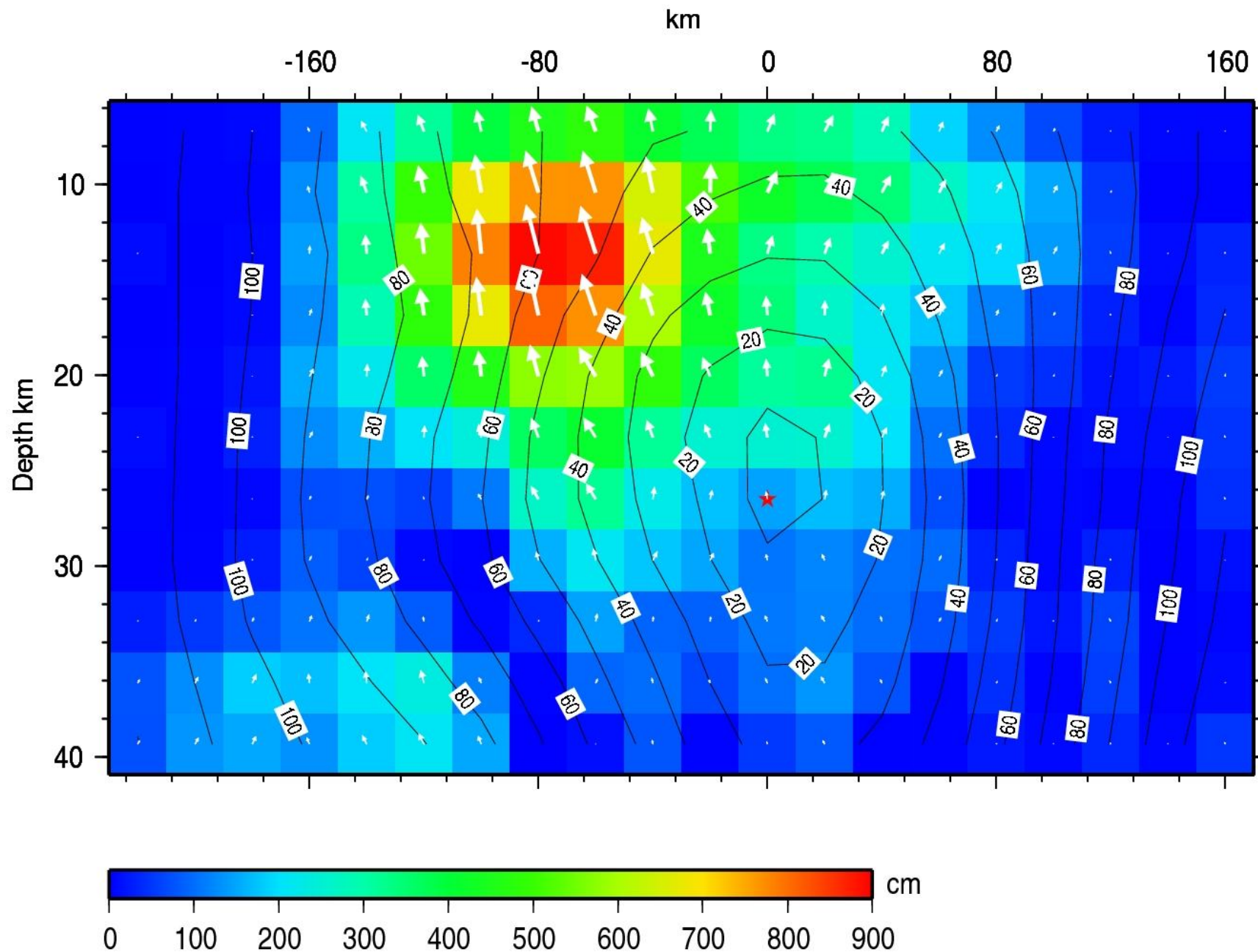


Очаг землетрясения. Основные понятия

Finite Fault Model



Центральные Курилы, 15.11.2006 (Finite Fault Model)





**Анализ подвижек вдоль древних разломов
позволяет оценивать «силу землетрясений»,
произшедших в доинструментальную эпоху**



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 расстоянии 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

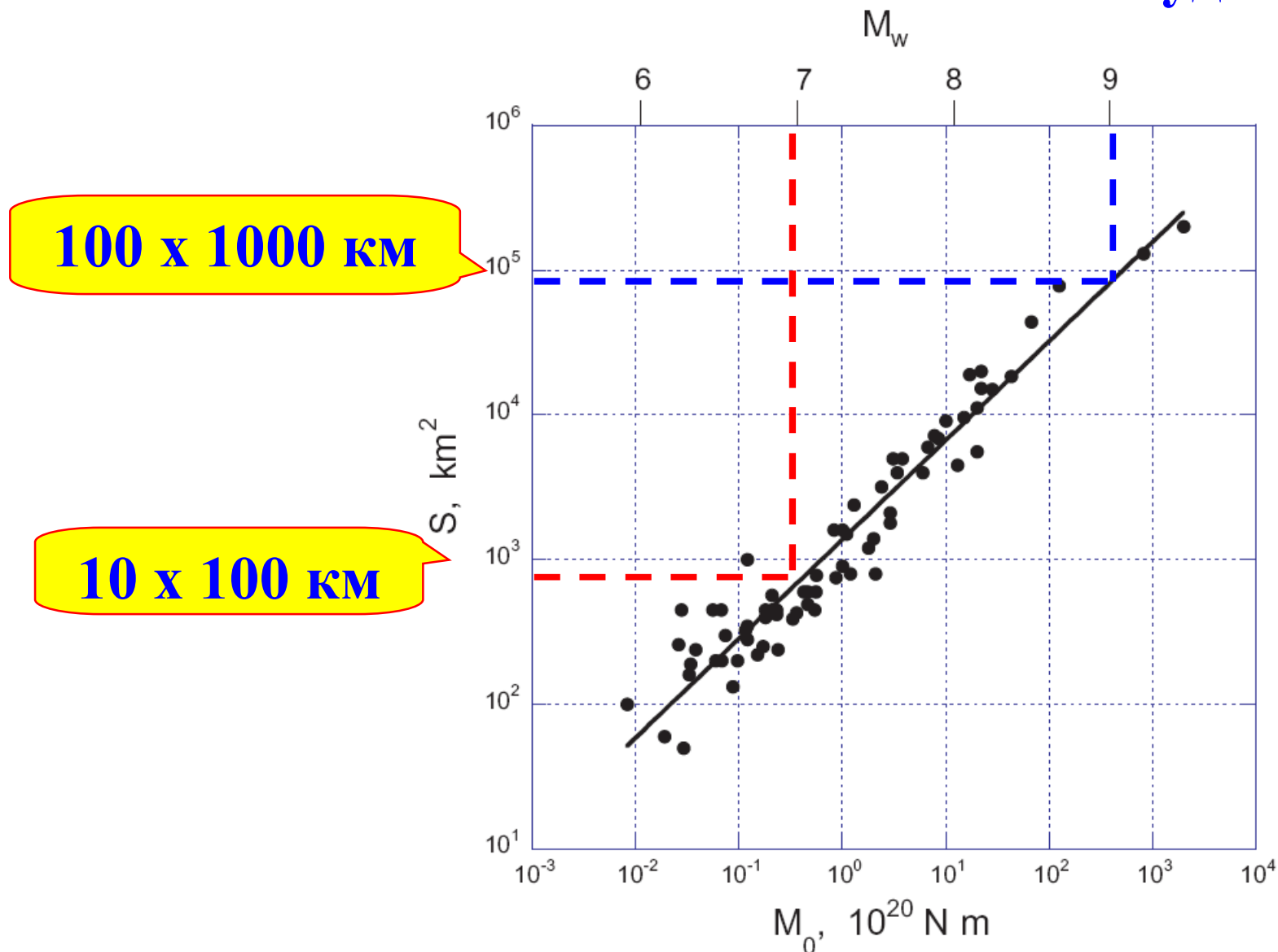
$$m_b = \lg(A / T) + Q(D, h)$$

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

Магнитуда, определяемая по сейсмическому моменту M_0 [Н м]

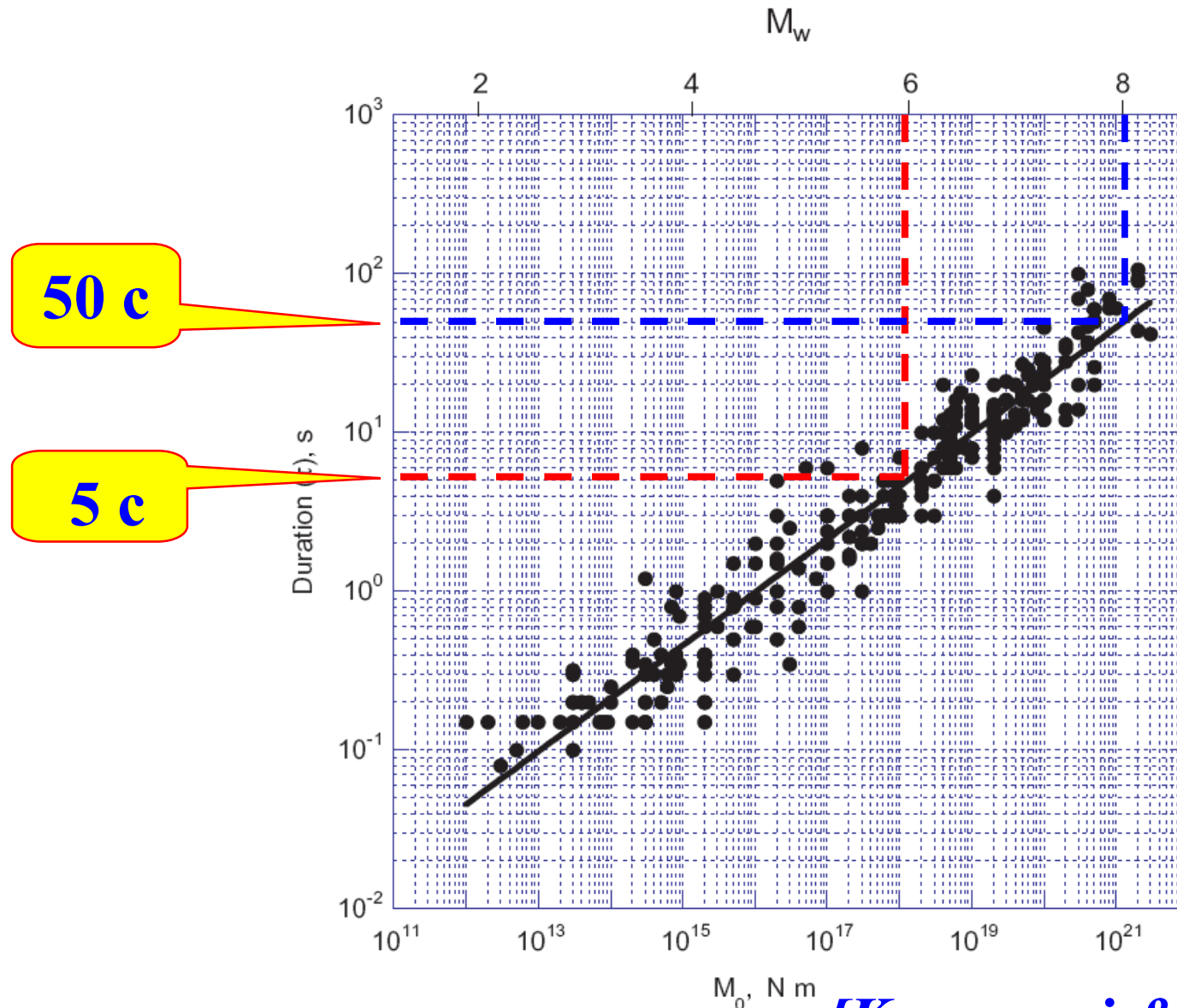
$$M_w = \frac{\lg M_0}{1.5} - 6.07 \quad M_0 = \mu S |\vec{D}|$$

Площадь площадки разрыва как функция сейсмического момента/магнитуды



[Kanamori & Brodsky 2004]

Продолжительность вспарывания разрыва как функция сейсмического момента/магнитуды



[Kanamori & Brodsky 2004]

Энергия землетрясения

эмпирическая зависимость [Kanamori, 1977]

$$\lg E [\text{Дж}] = 4.8 + 1.5 M_w$$

M_w	E , 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

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

К сейсмическим
волнам переходит
1-10% энергии
землетрясения

сейсм. энергия за год
 $\sim 10^{18}$ Дж ($\sim 0.1\%$ тепл.
потока из недр Земли)

Как часто происходят землетрясения ?

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ	МАГНИТУДА	СРЕДНЕЕ ЧИСЛО СОБЫТИЙ В ГОД
Мега-событие	≥ 9.0	0.04 ?
Катастрофическое	8.0 – 8.9	1
Разрушительное	7.0 – 7.9	17
Сильное	6.0 – 6.9	134
Умеренное	5.0 – 5.9	1319
Слабое	4.0 – 4.9	около 13 тыс.
Незначительное	3.0 – 3.9	около 130 тыс.
Очень слабое	2.0 – 2.9	около 1300 тыс.

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



**Магнитуда НЕ
измеряется в баллах!!!**

**Шкалы интенсивности по
Рихтеру НЕ существует!!!**

«Сила цунами»

Шкала
интенсивности
(описательная)

1. 6-балльная
Зиберга-
Амбразейса

2. 12-балльная
Пападопулоса-
Имамуры

Шкала магнитуд
(физическая)

1. Имамуры-Ииды

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

2. Соловьева-Имамуры

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

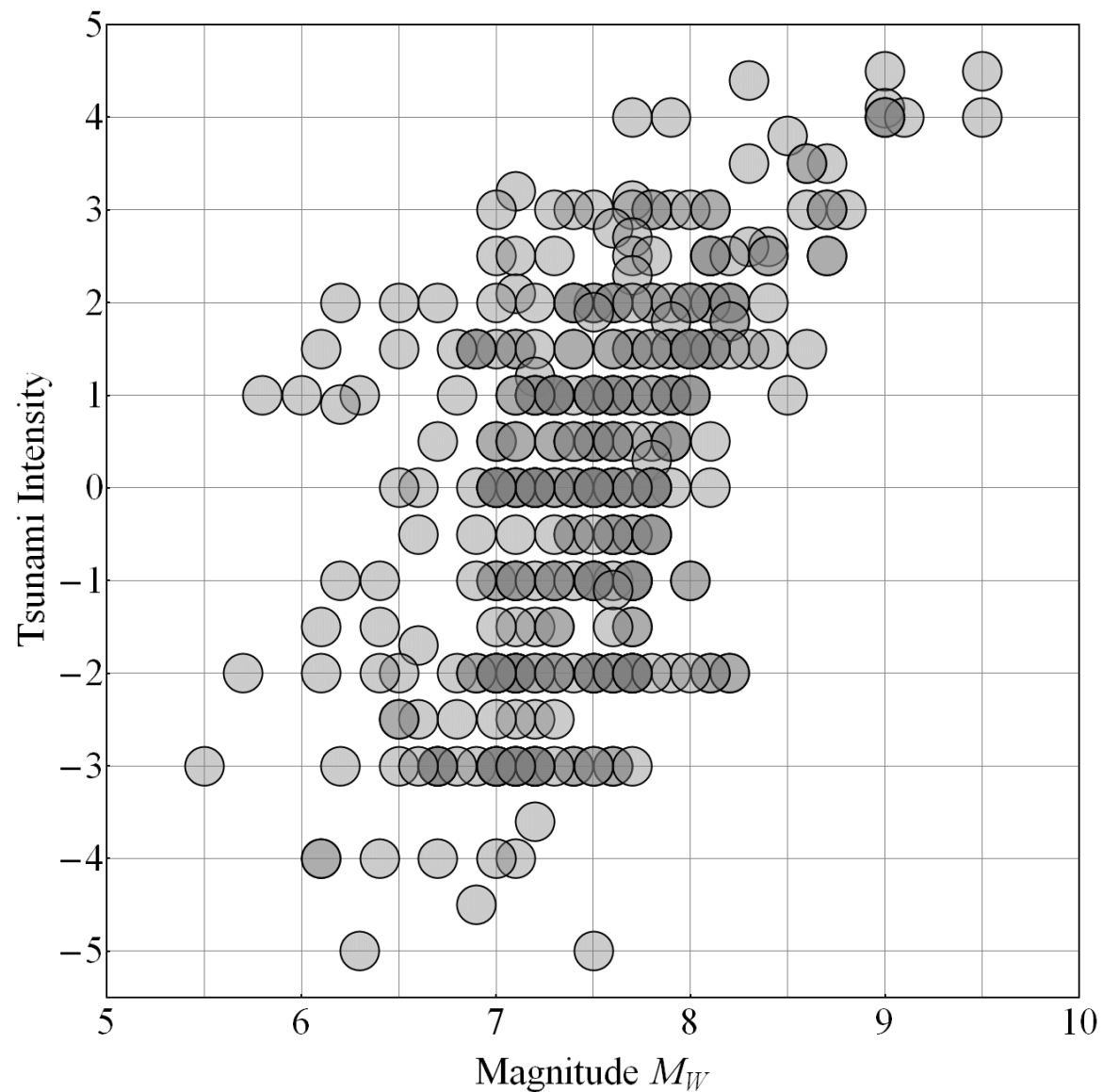
3. Мурти-Лумиса

$$ML = 2(\log_2 E[\text{эрг}] - 19)$$

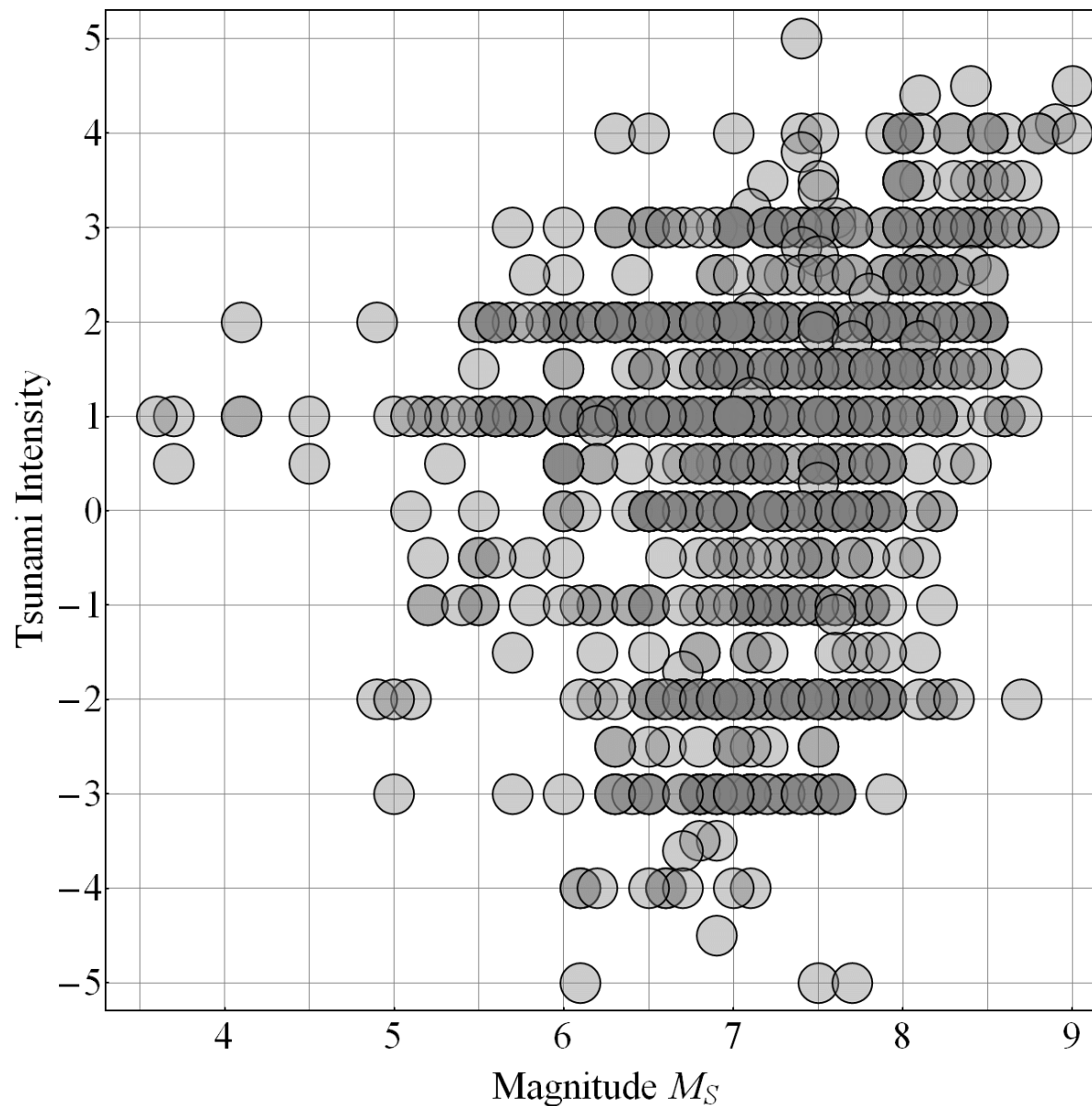
Характеристики «силы» землетрясений и цунами

	землетрясения	цунами
Шкала магнитуд (количественная, или физическая)	M_w, M_s	Соловьева- Имамуры $I = 0.5 + \log_2 \bar{N}$
Шкала интенсивности (субъективная или описательная)	12-балльная (MSK-64, MM, JMA)	12-балльная Пападопулоса- Имамуры

Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения M_W



Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения M_S

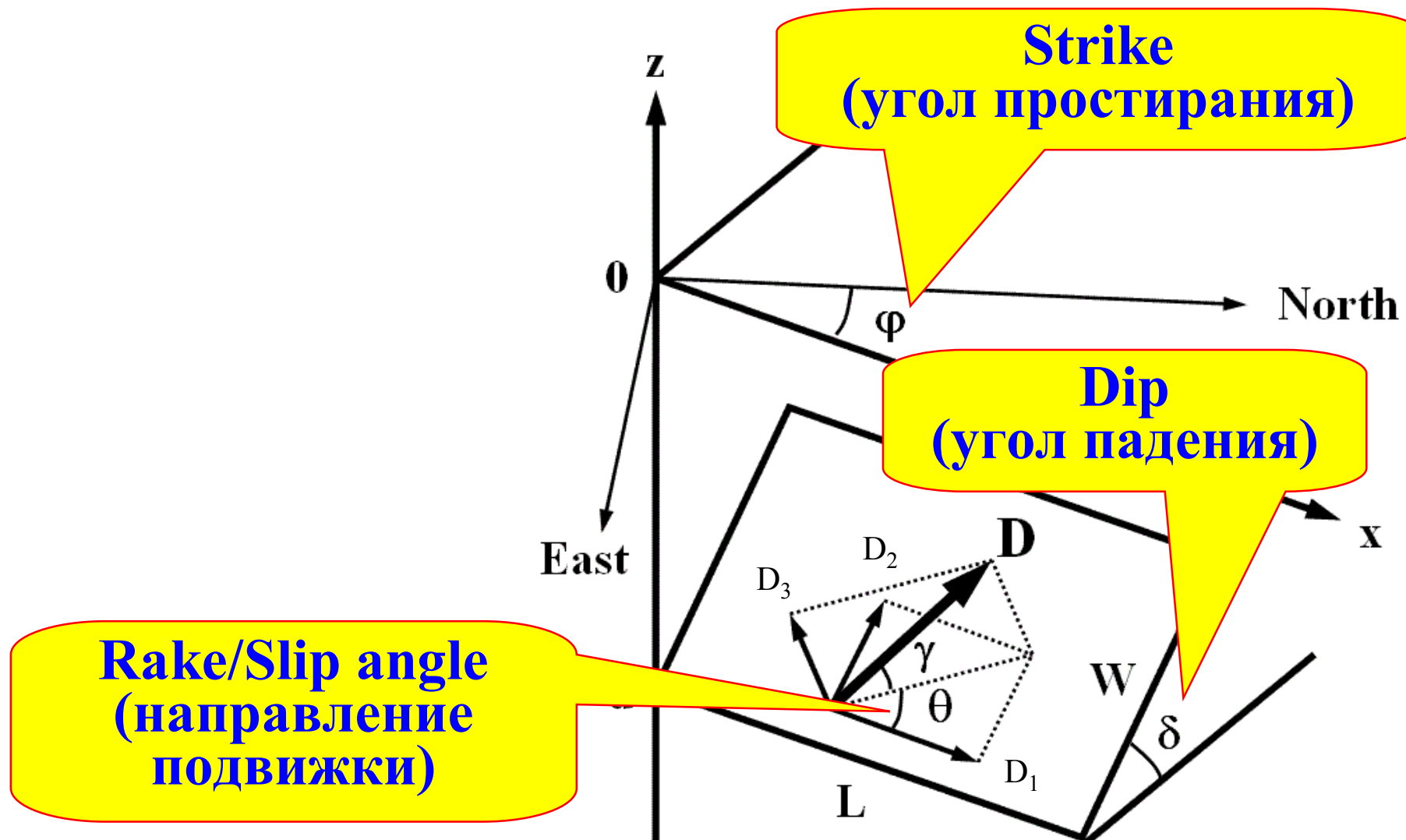


Большой разброс обязан различиям в

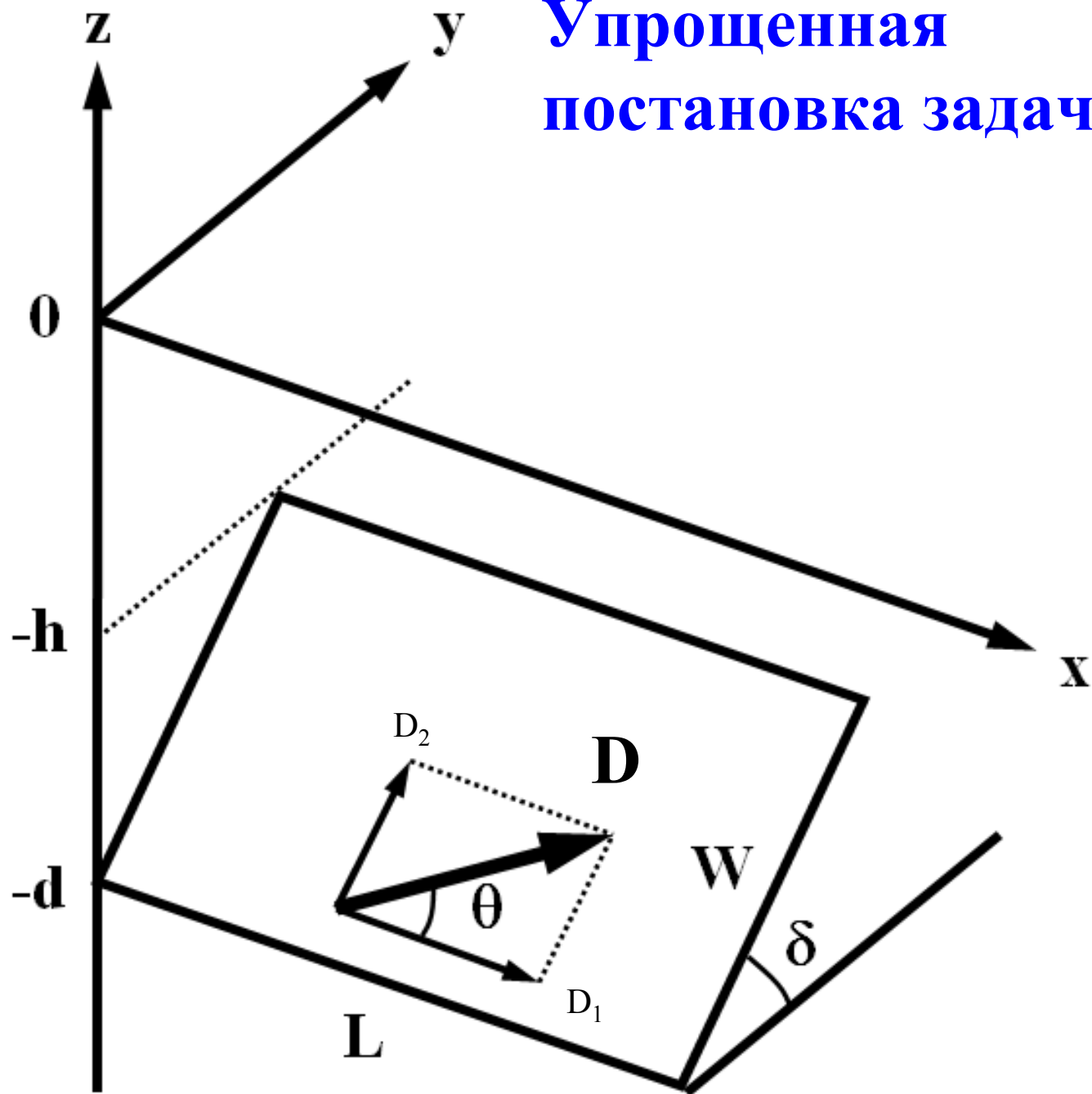
- механизме землетрясения;
- глубине землетрясения;
- распределении подвижки;
- продолжительности вспарывания разрыва;
- особенностям топографии берега и дна;
- возможному вкладу в цунами несейсмических источников и фазы прилива;
- глубине океана в источнике;
- ошибкам в определении M_w и I ;
- несовершенству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

Механизм очага землетрясения:

- ❑ Ориентация и глубина площадки разрыва
- ❑ Направление и длина вектора подвижки



Упрощенная постановка задачи



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 $\cos \delta = 0$,

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

Пример простых эмпирических связей для параметров очага землетрясения

$$W = 0.5 L$$

$$D = 5 \cdot 10^{-5} L$$

$$M_0 = \mu D L W$$

$$M_w = 2/3 \log_{10} M_0 - 6.07$$

[Kanamori and Anderson, 1975]

Пример простых эмпирических связей для параметров очага землетрясения

$$\log_{10} L[\text{км}] = 0.5 M_w - 1.9$$

$$\log_{10} W[\text{км}] = 0.5 M_w - 2.2$$

$$\log_{10} D[\text{м}] = 0.5 M_w - 3.2$$

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

$$\begin{aligned}\log L[\text{M}] &= \\ &= 3/5 M_w + 3.642 - 3/5 \log C_1 - 2/5 \log C_2 \mu\end{aligned}$$

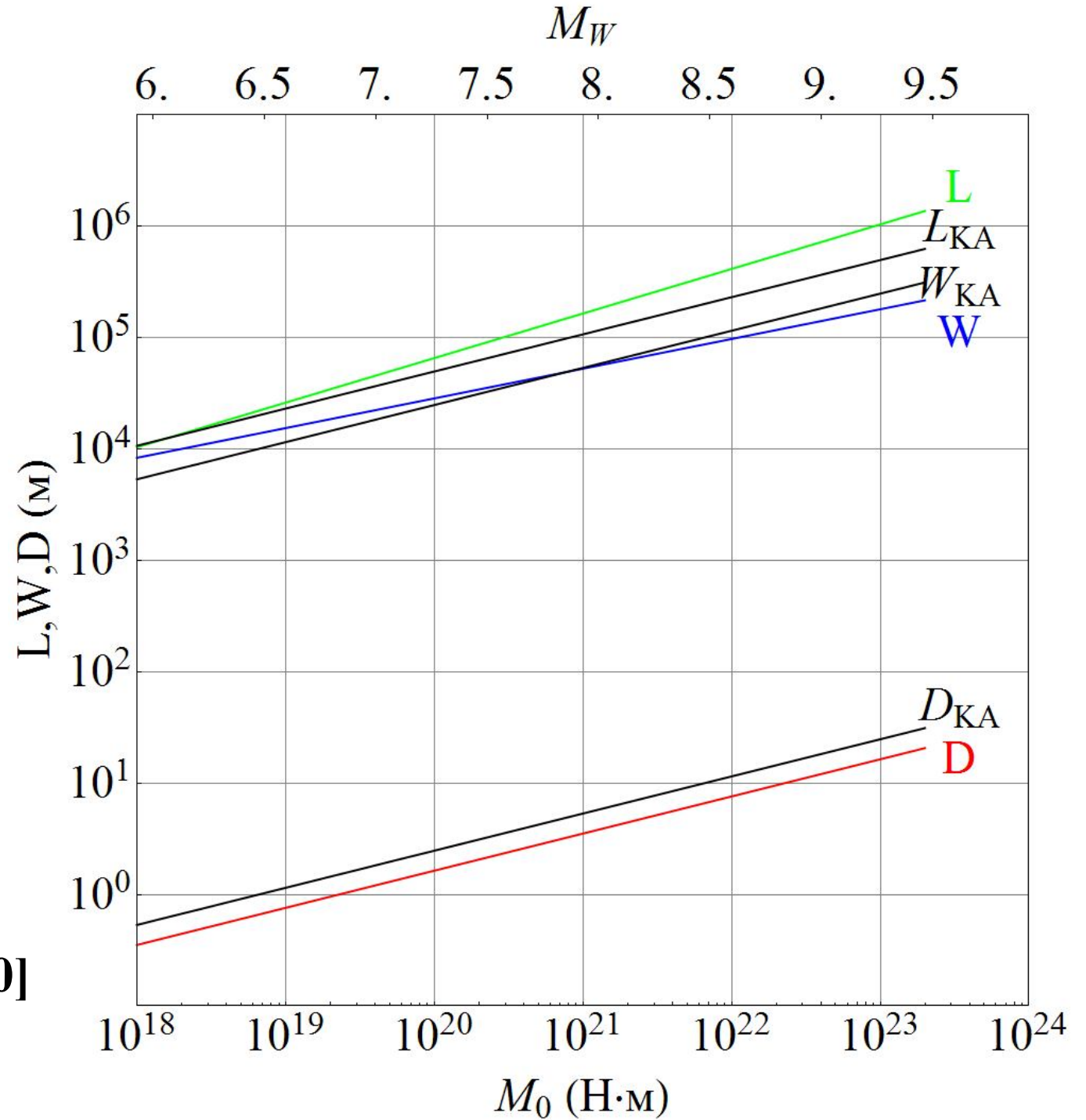
$$\begin{aligned}\log W[\text{M}] &= \\ &= 2/5 M_w + 2.428 + 3/5 \log C_1 - 4/15 \log C_2 \mu\end{aligned}$$

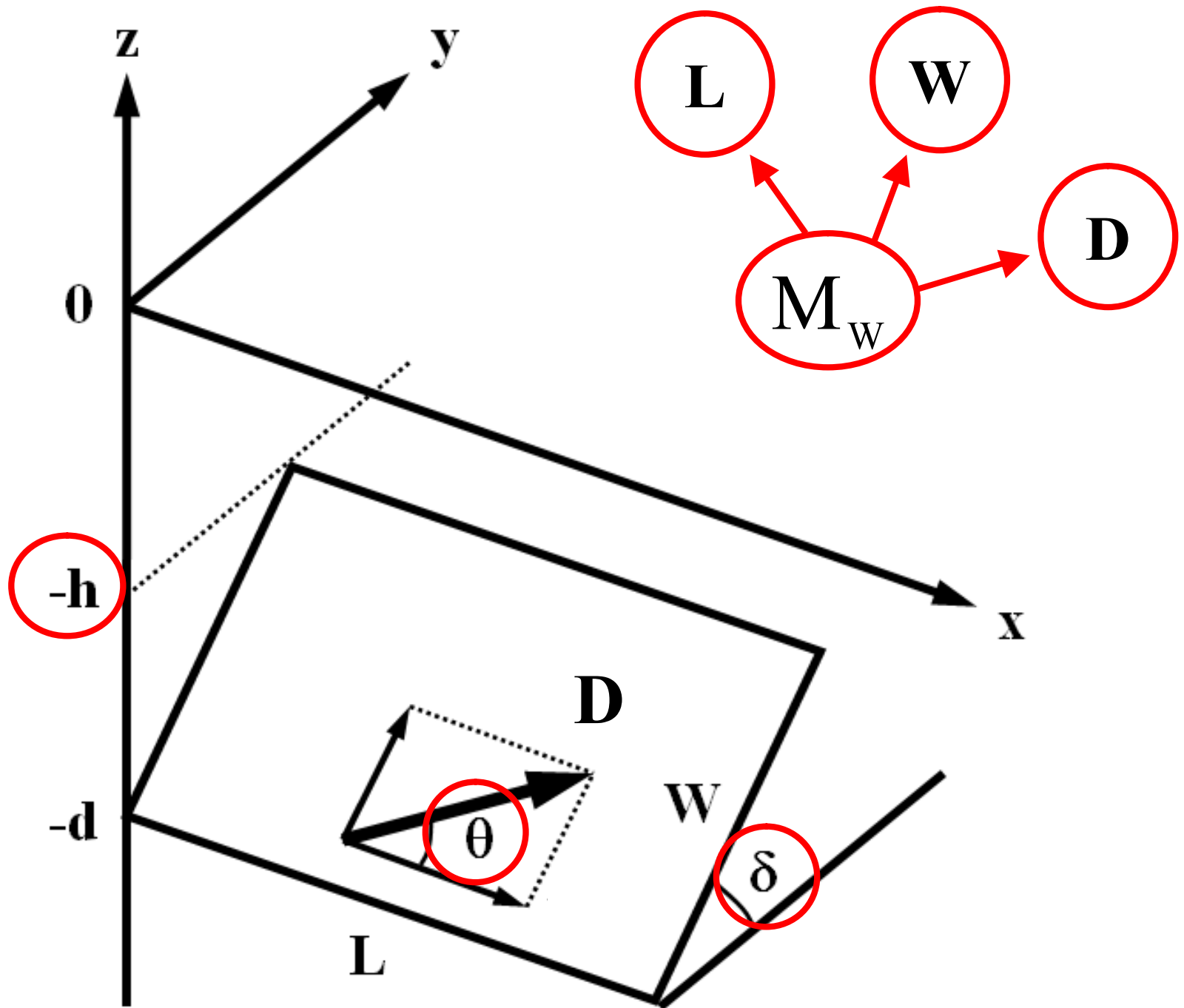
$$\begin{aligned}\log D[\text{M}] &= \\ &= 1/2 M_w + 3.035 + 2/3 \log C_2 - 1/3 \log \mu\end{aligned}$$

[Leonard, 2010]

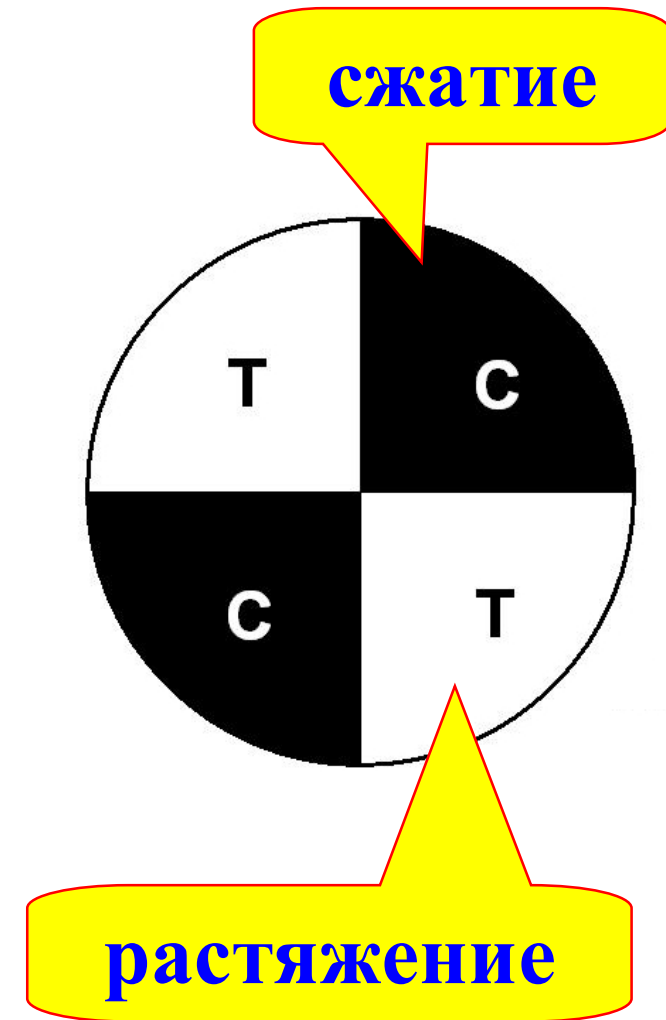
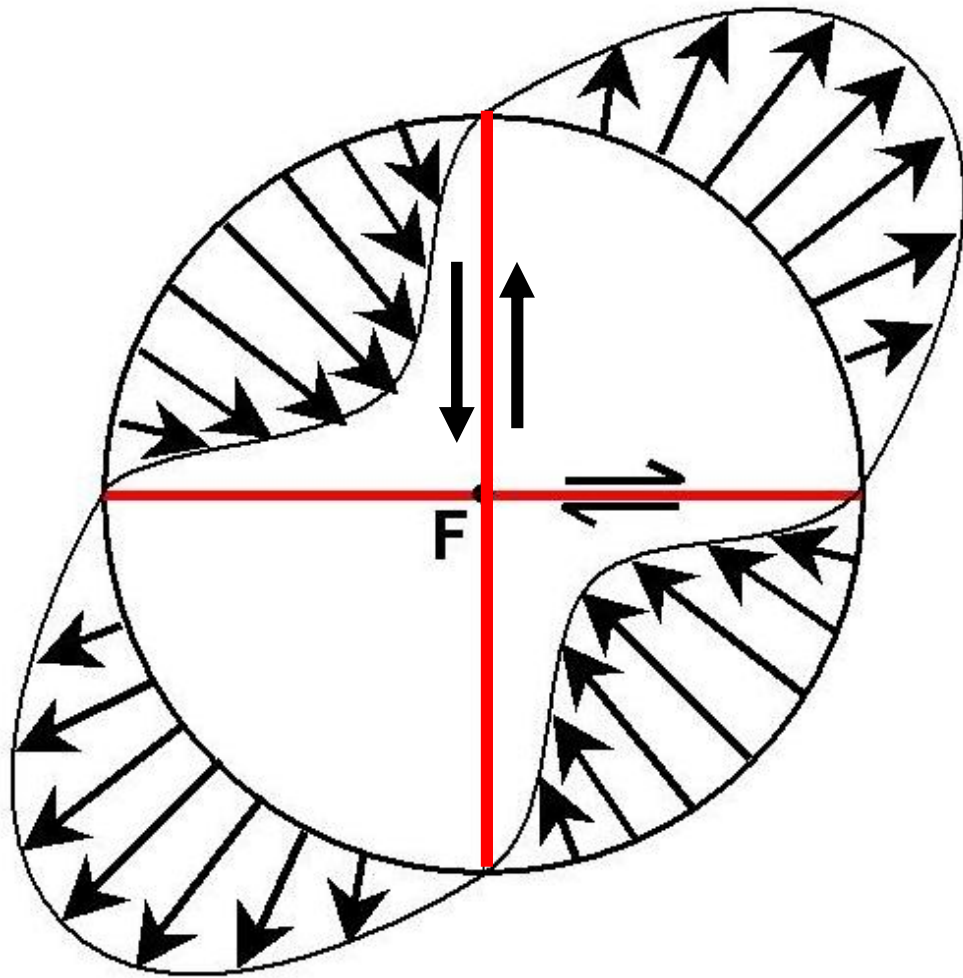
**Связь
параметров
очага с
сейсмическим
моментом
(моментной
магнитудой)**

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

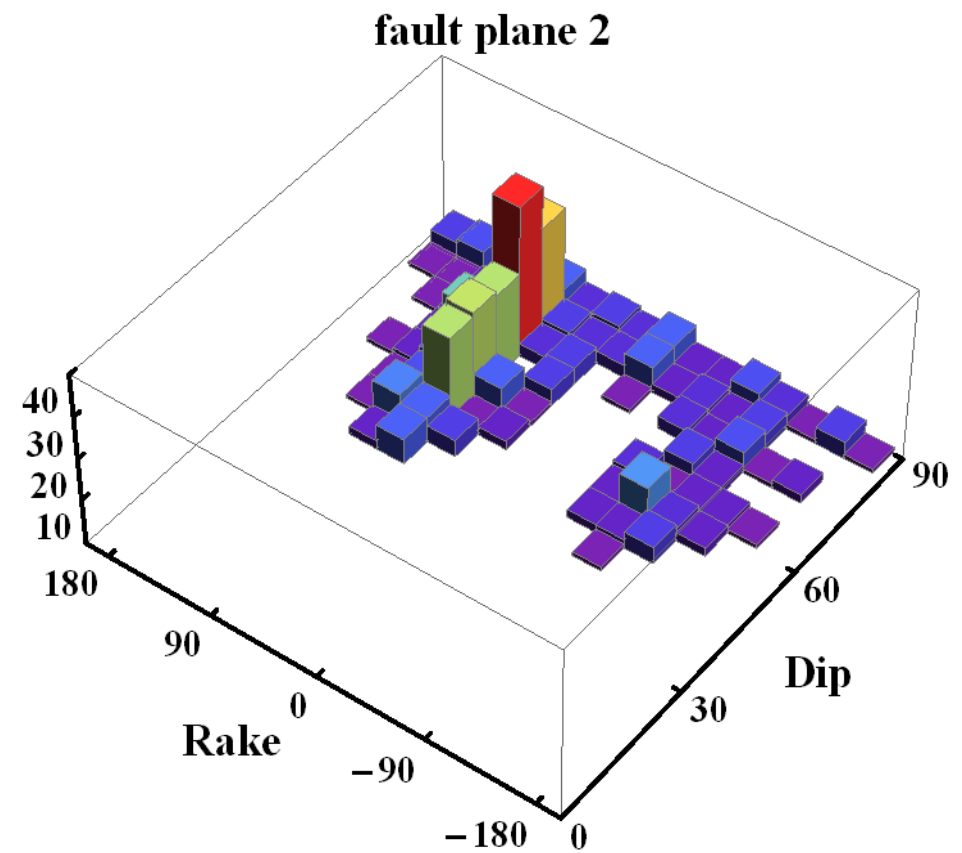
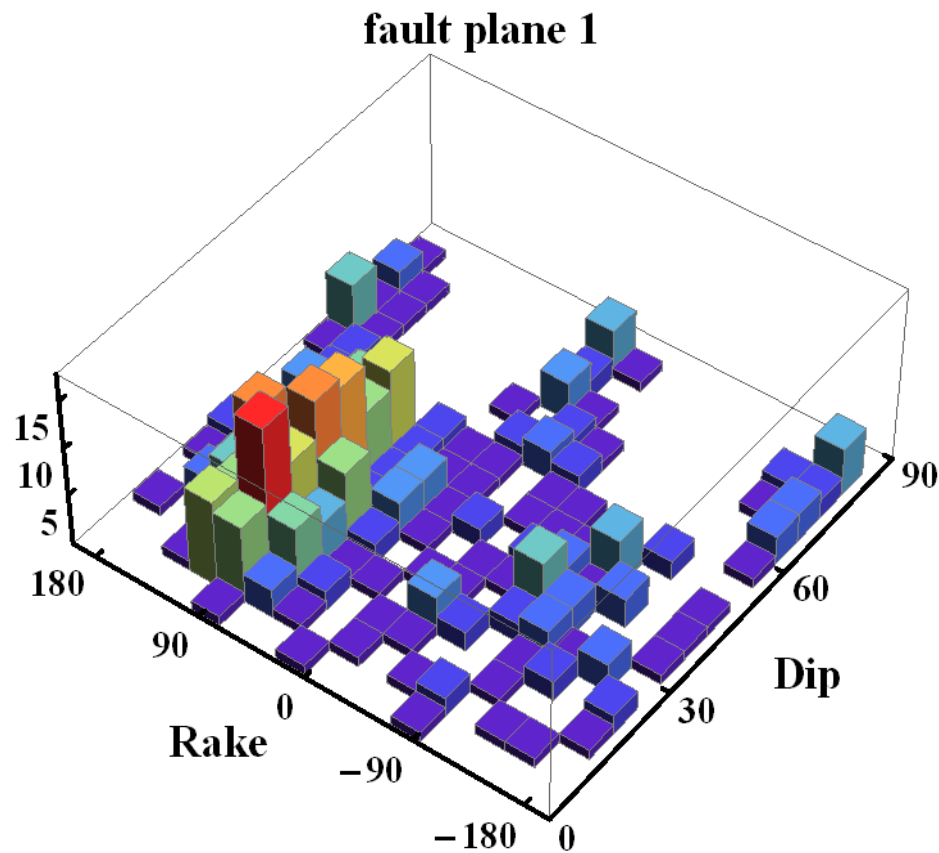




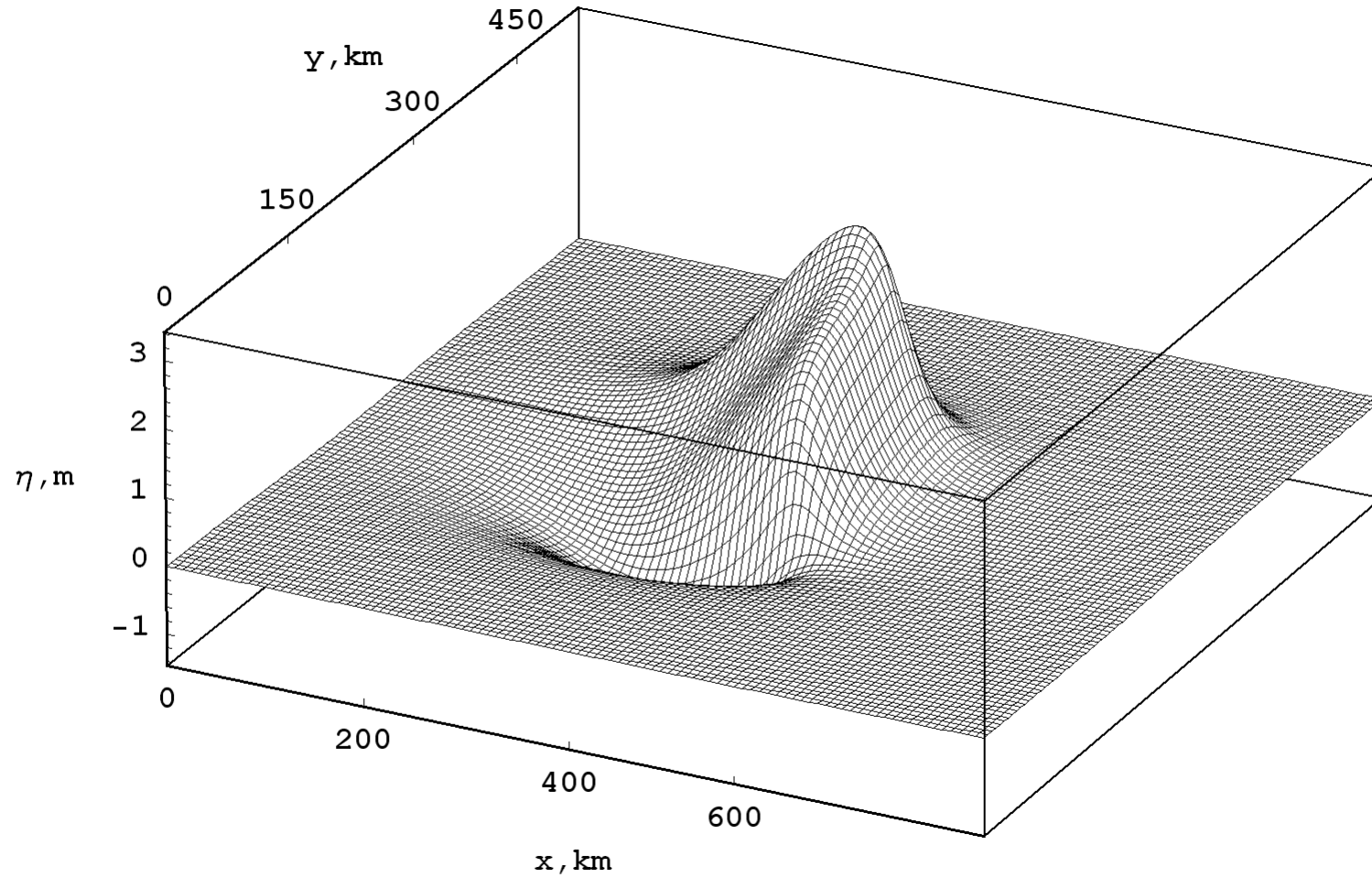
Две возможные плоскости разрывов



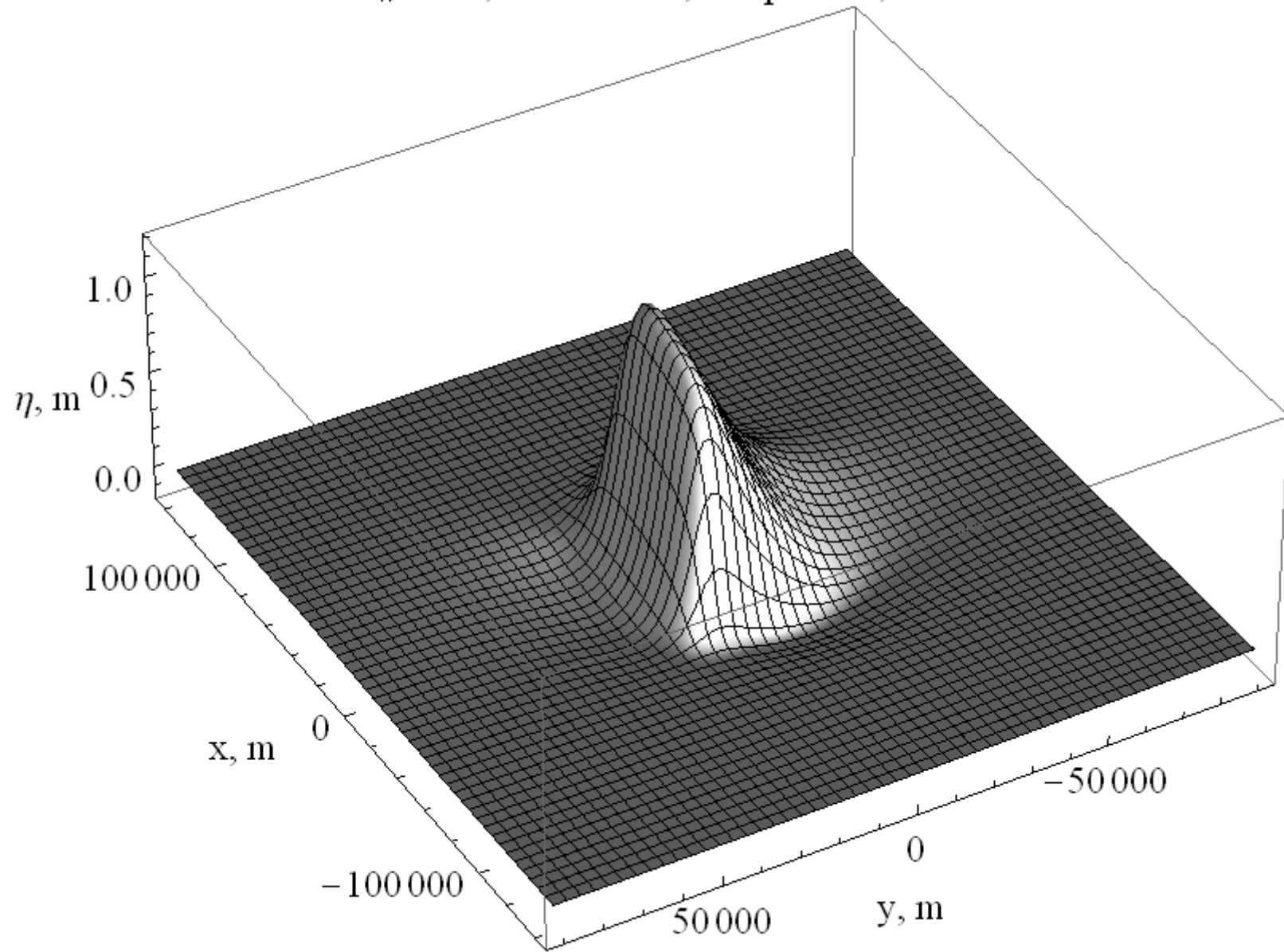
Распределение реальных событий (1976-2012) с магнитудой $7 \leq M_w \leq 9$ по углам Dip и Rake



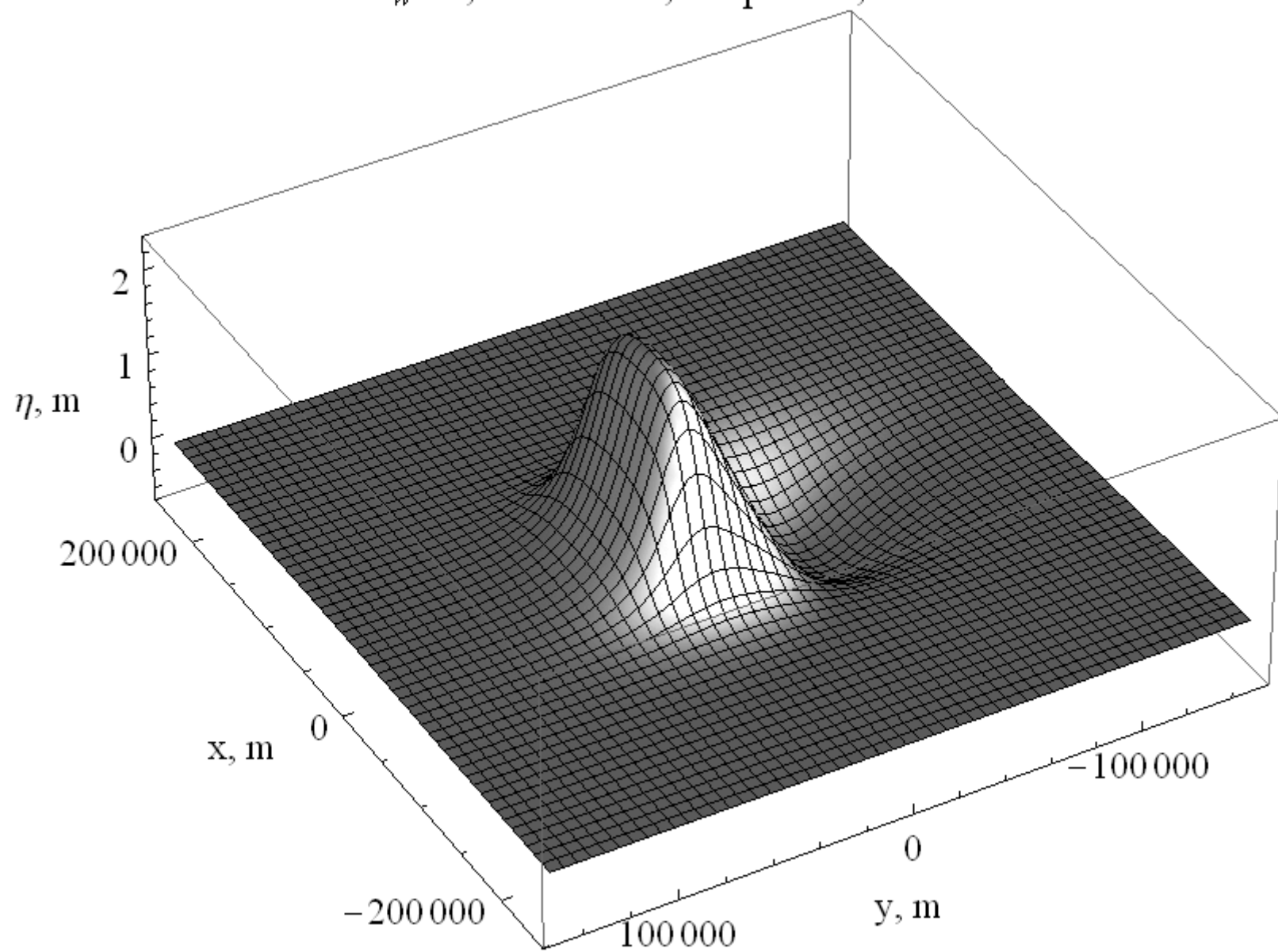
Mw =....; h =....; Dip =....; Rake =....



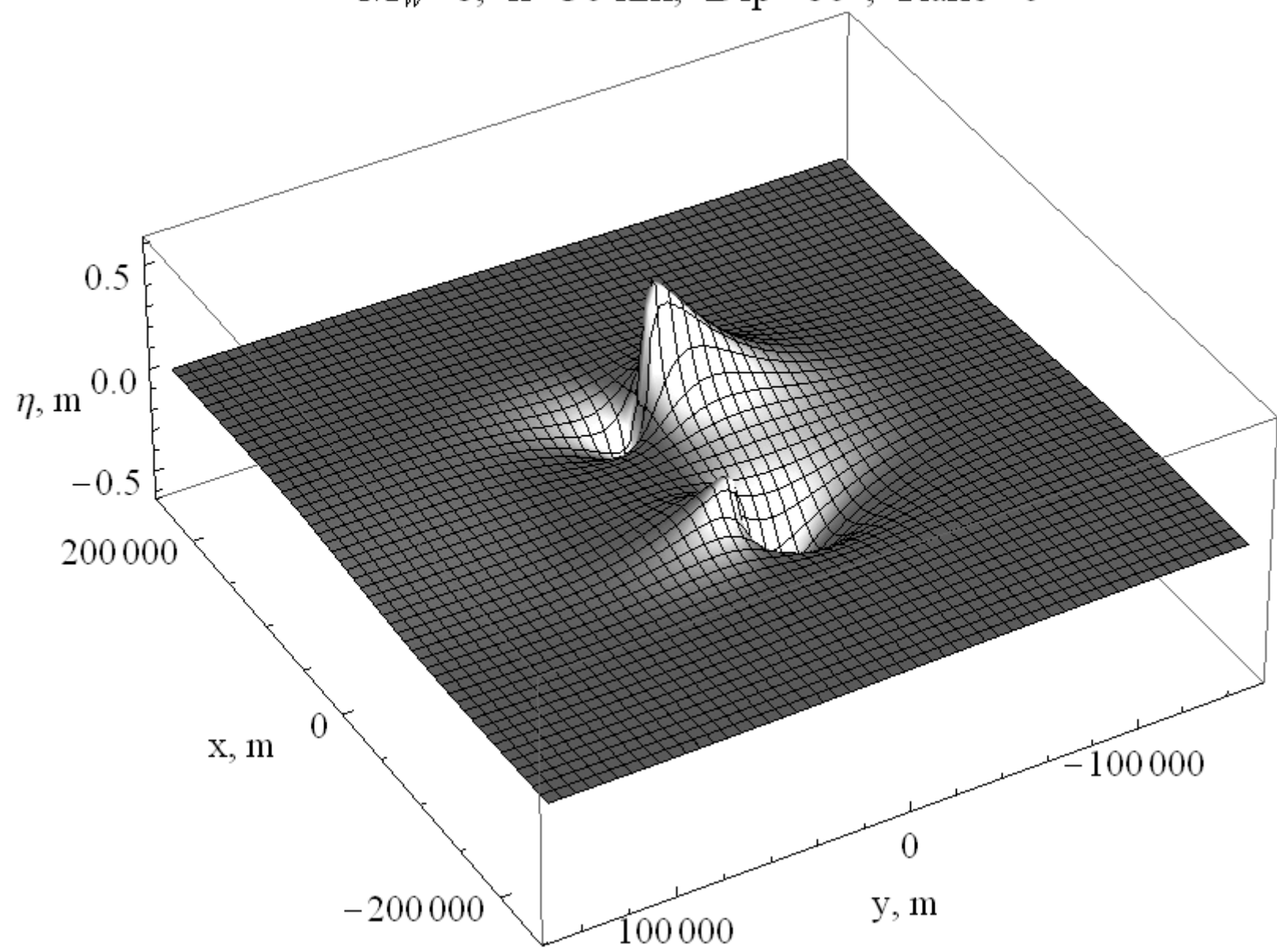
$M_w=7.5$, $h=20$ km, Dip= 45° , Rake= 45°



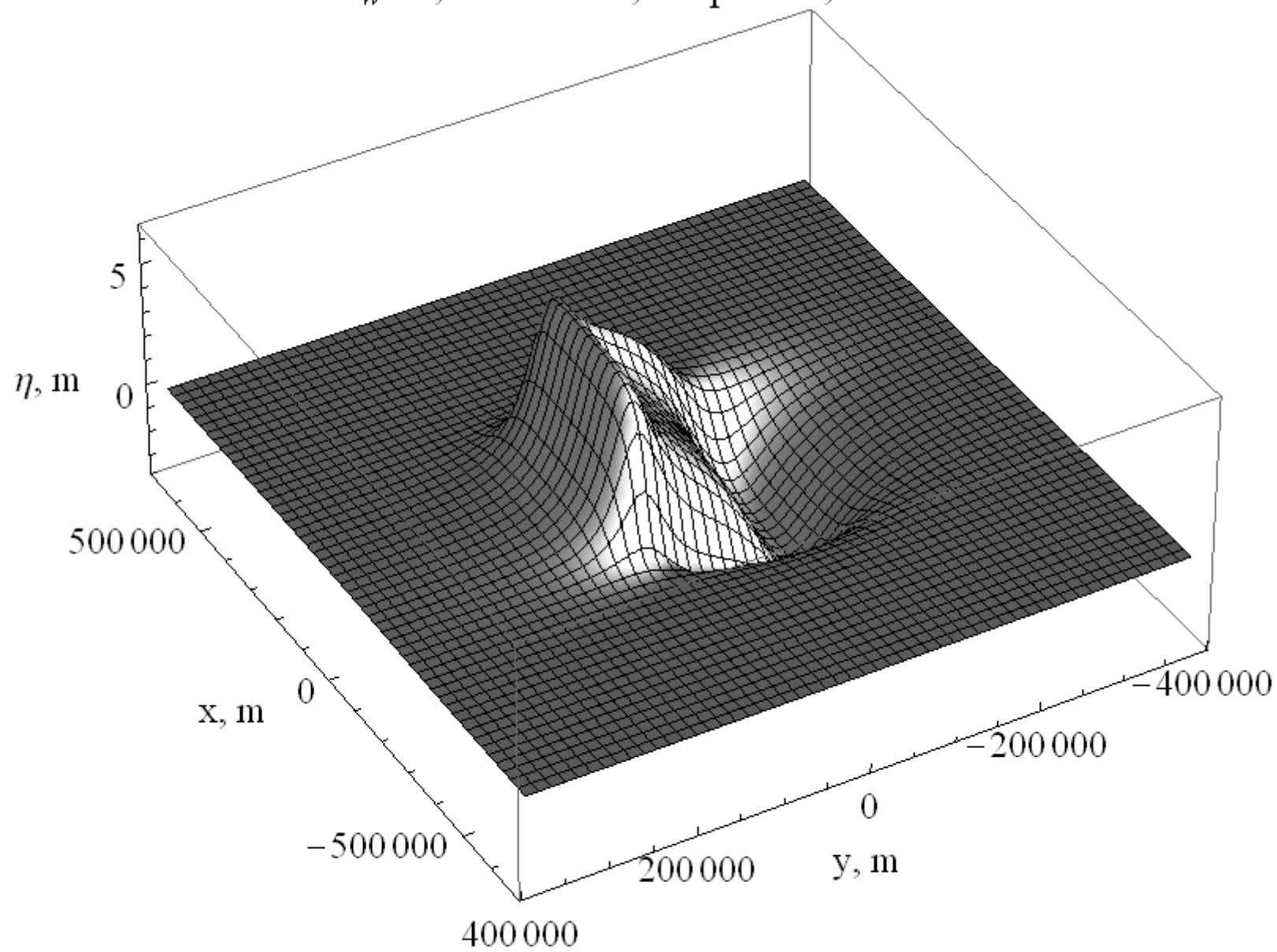
$M_w=8$, $h=30$ km, Dip= 20° , Rake= 90°



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

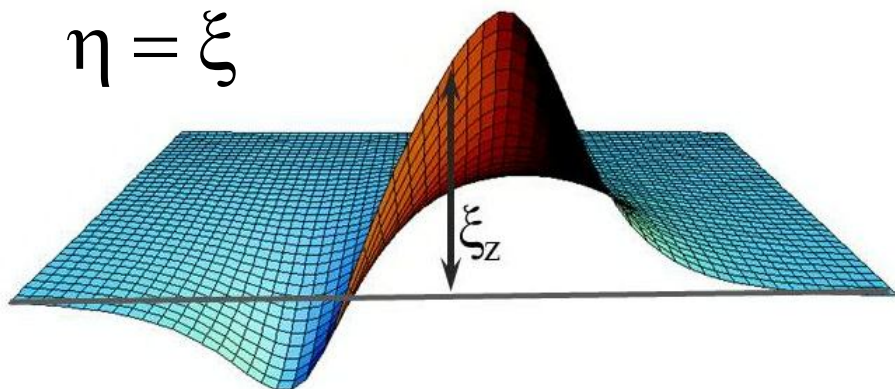


$M_w=9$, $h=50$ km, Dip= 10° , Rake= 60°



Параметры деформации дна

$$\eta = \xi$$



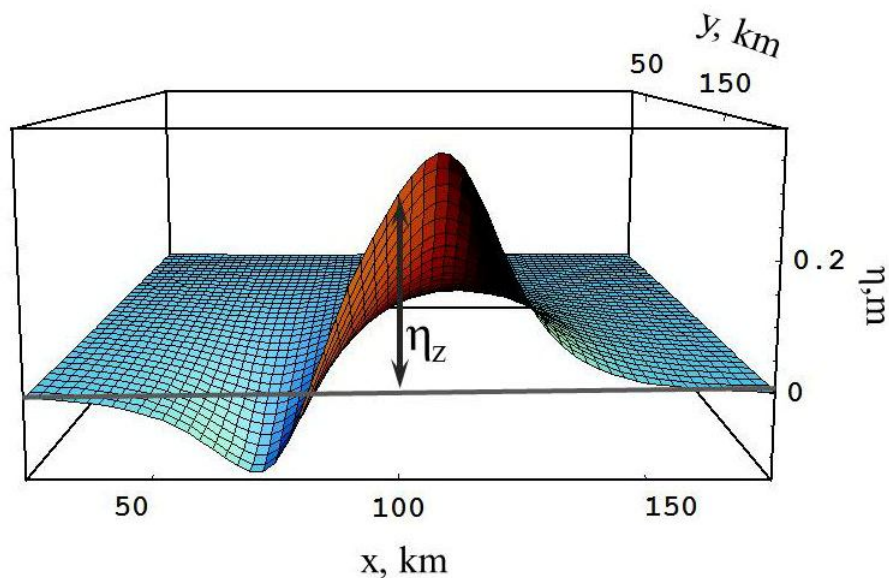
1. Амплитуда деформации

$$A = \eta_{\max} - \eta_{\min}$$

2. Вытесненный объем

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

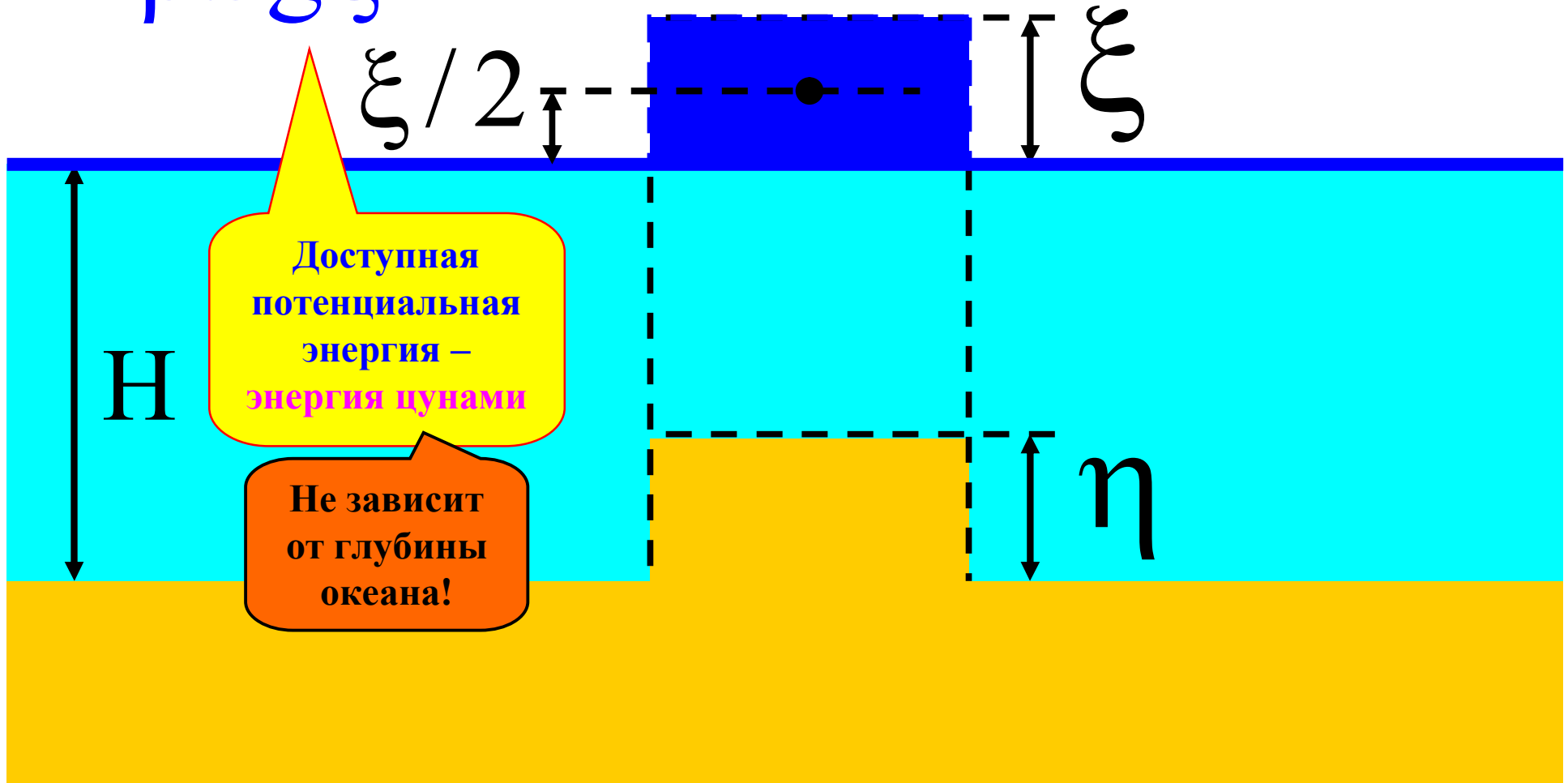
3. Потенциальная энергия начального возвышения (энергия цунами)



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

$$\xi = \eta$$

$$W_{TS} = "mgh" = \underbrace{\rho S \xi}_m g \underbrace{\xi}_h / 2 =$$
$$= \rho S g \xi^2 / 2$$



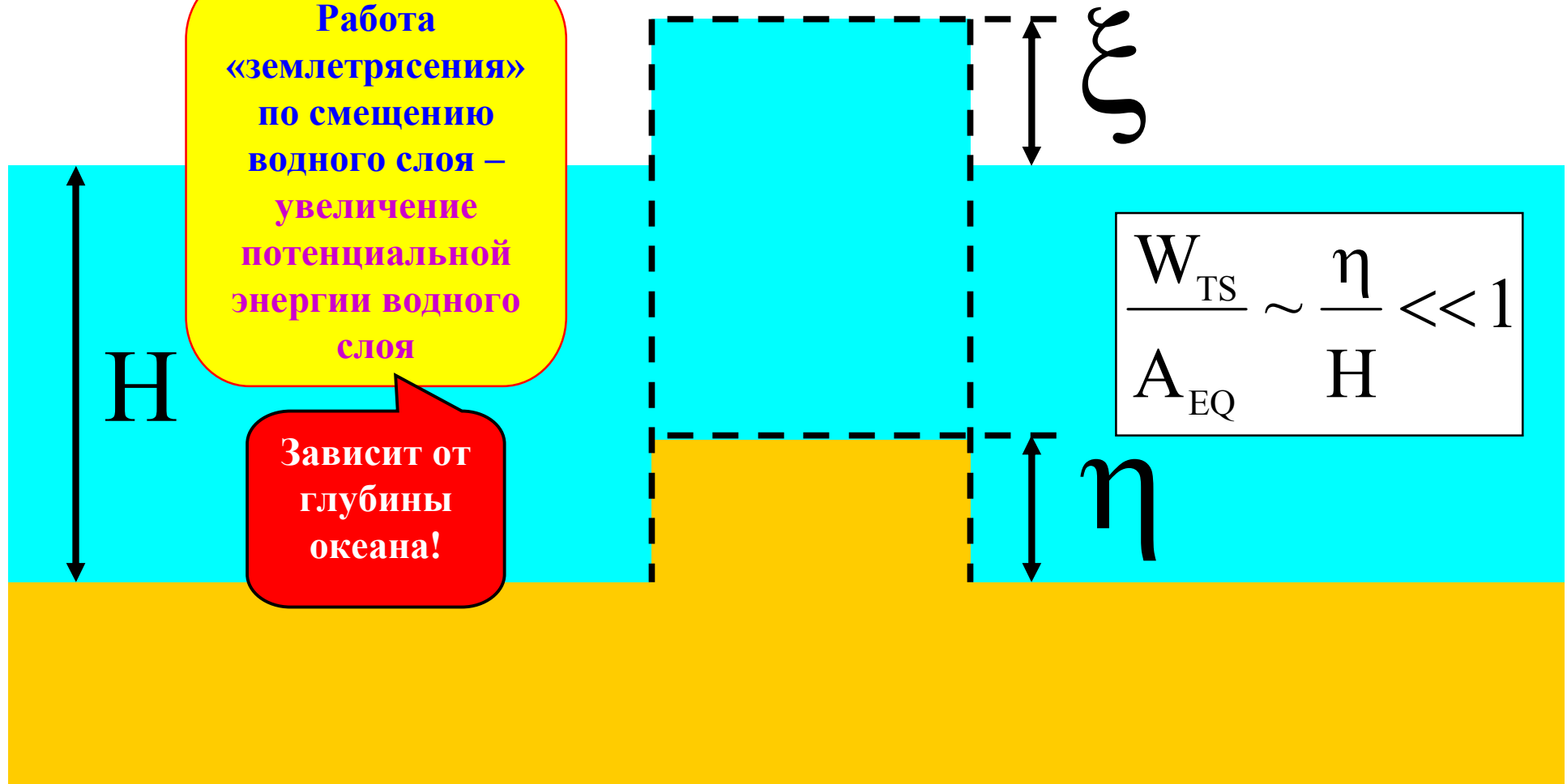
$$A_{EQ} = F \cdot \eta = \underbrace{\rho S H g}_F \cdot \eta$$

$$\xi = \eta$$

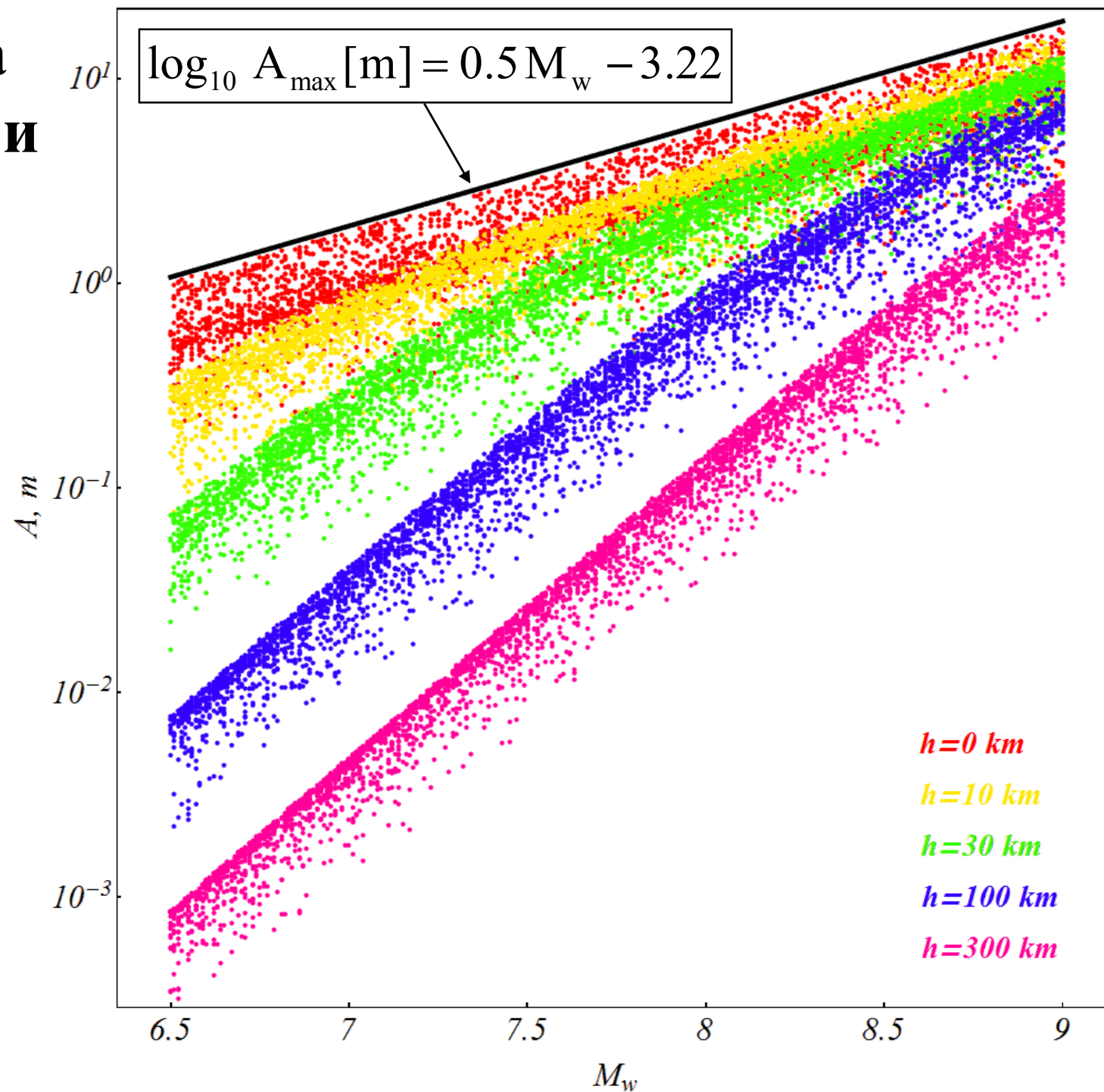
Работа
«землетрясения»
по смещению
водного слоя –
увеличение
потенциальной
энергии водного
слоя

Зависит от
глубины
океана!

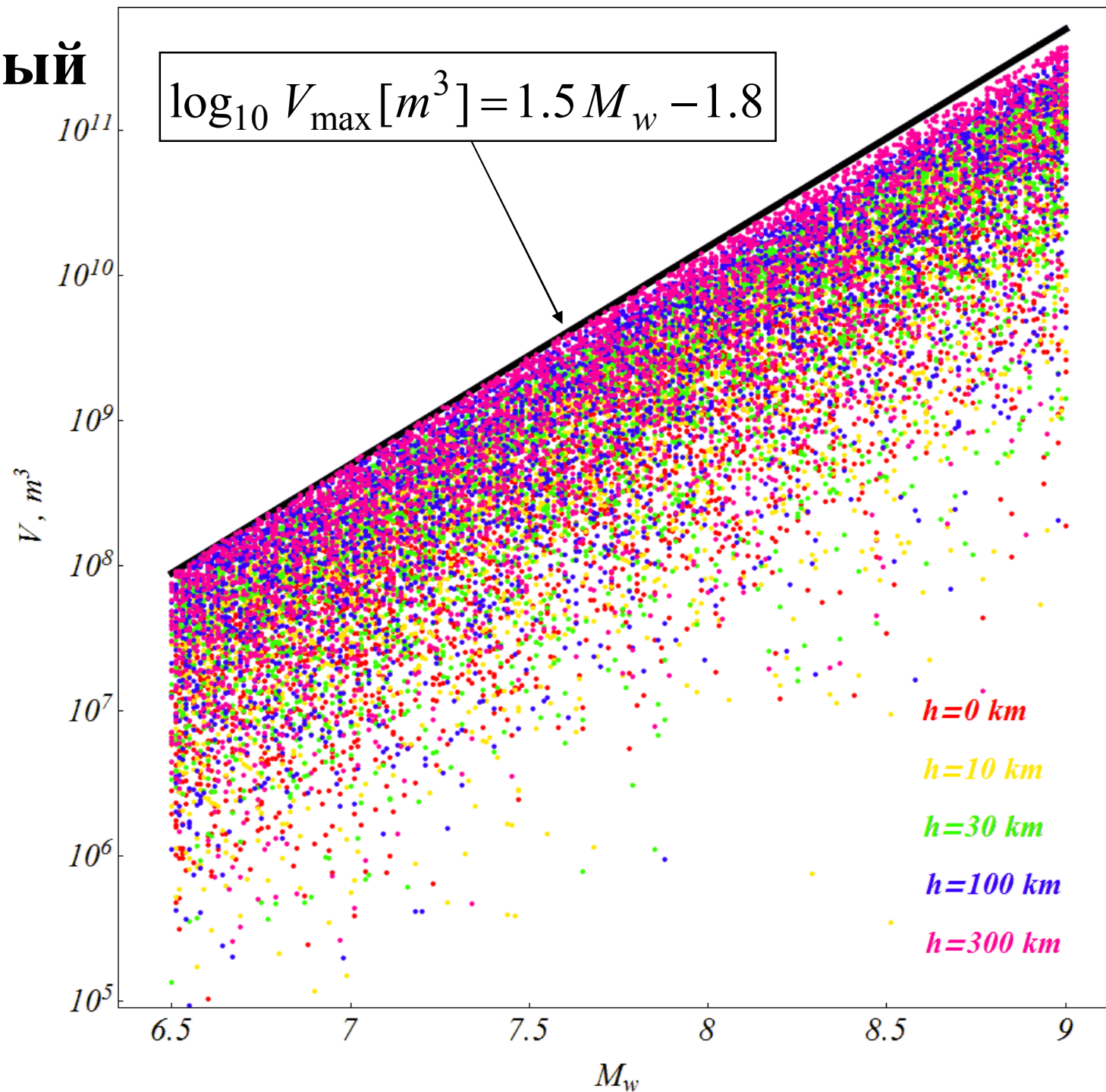
$$\frac{W_{TS}}{A_{EQ}} \sim \frac{\eta}{H} \ll 1$$



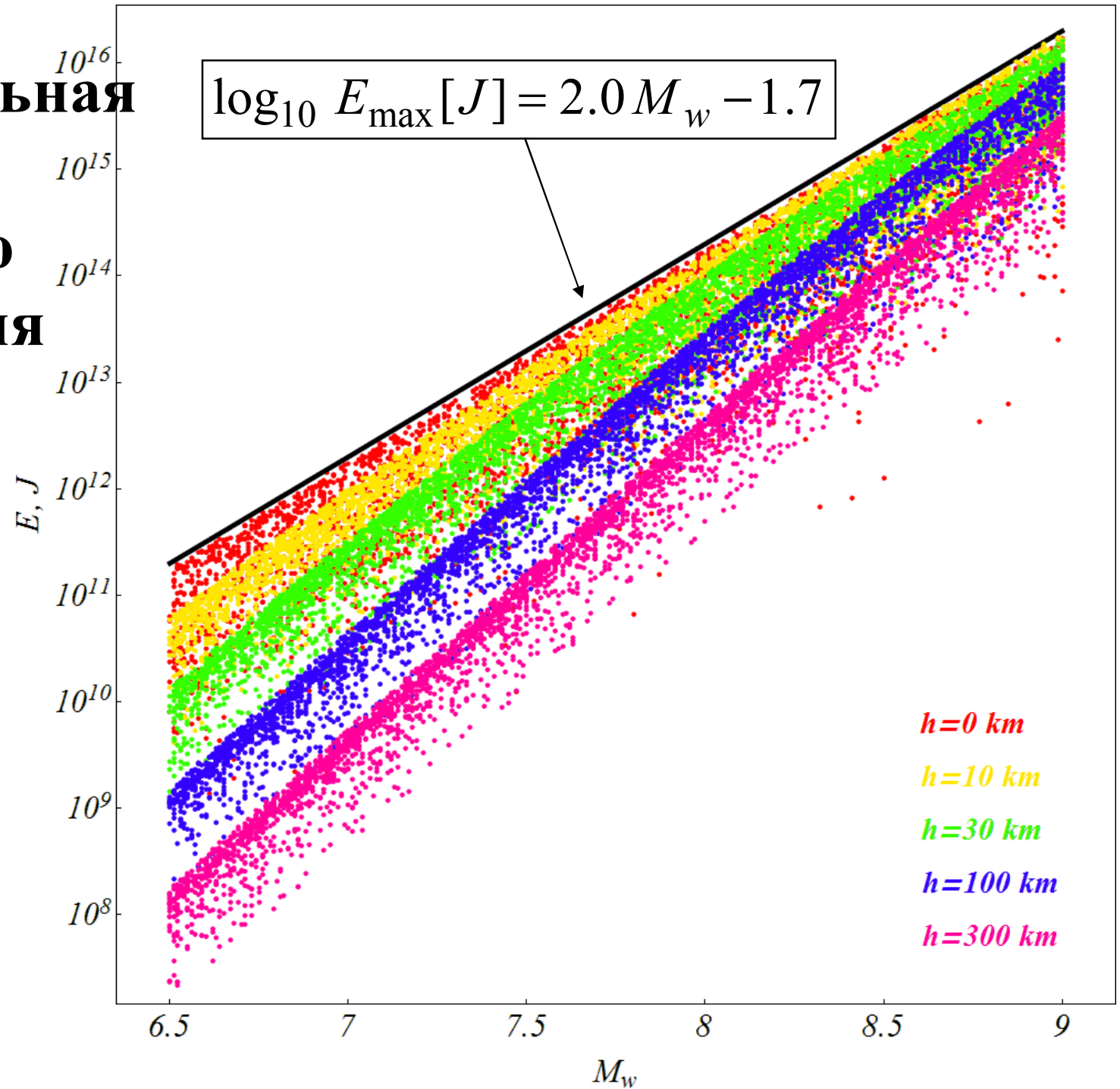
Амплитуда деформации



Вытесненный объем



**Потенциальная
энергия
начального
возвышения**



Горизонтальный размер (средний радиус) очага цунами

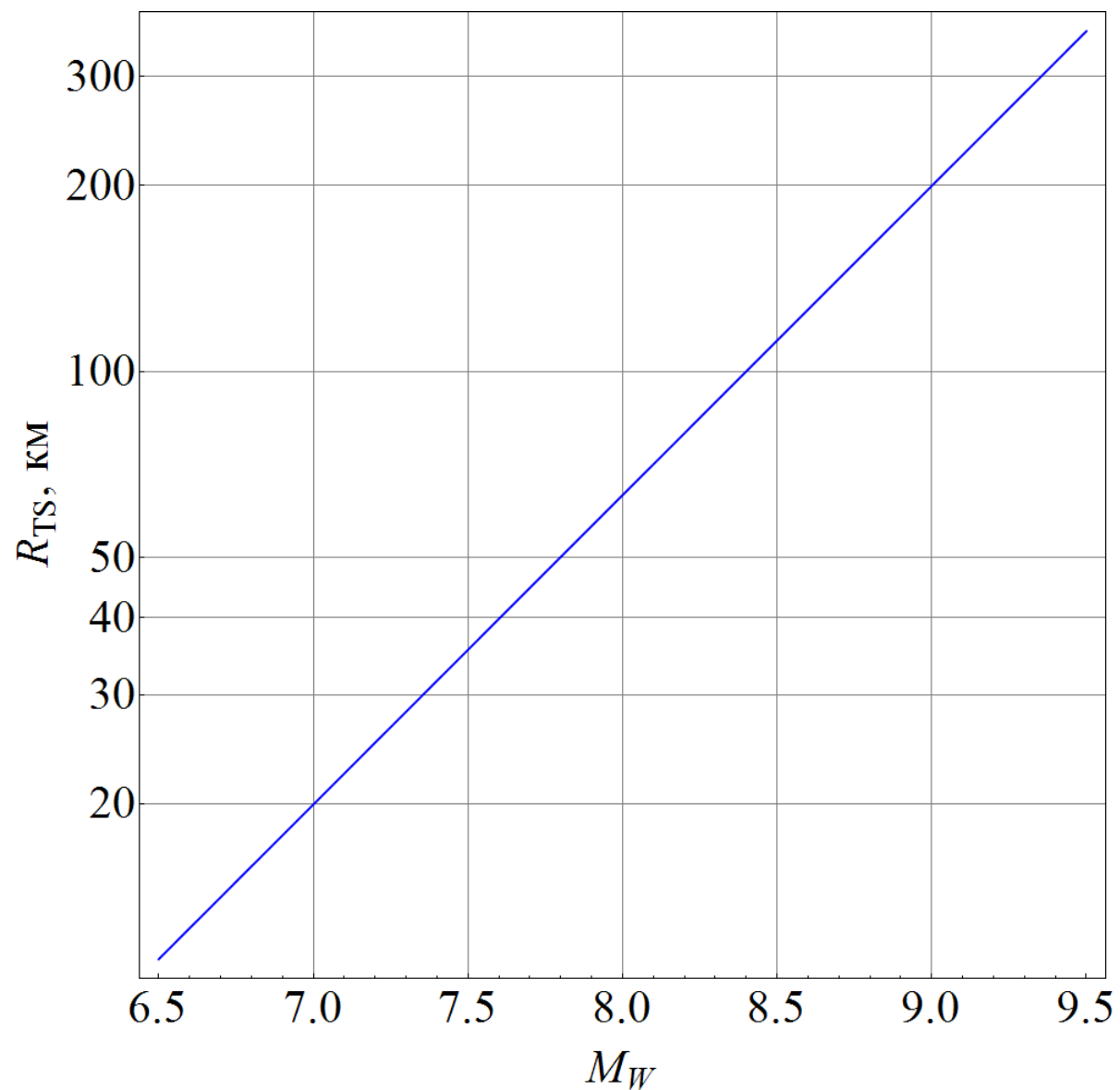
$$R_{ts} \equiv \sqrt{V / \Delta\eta}$$

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

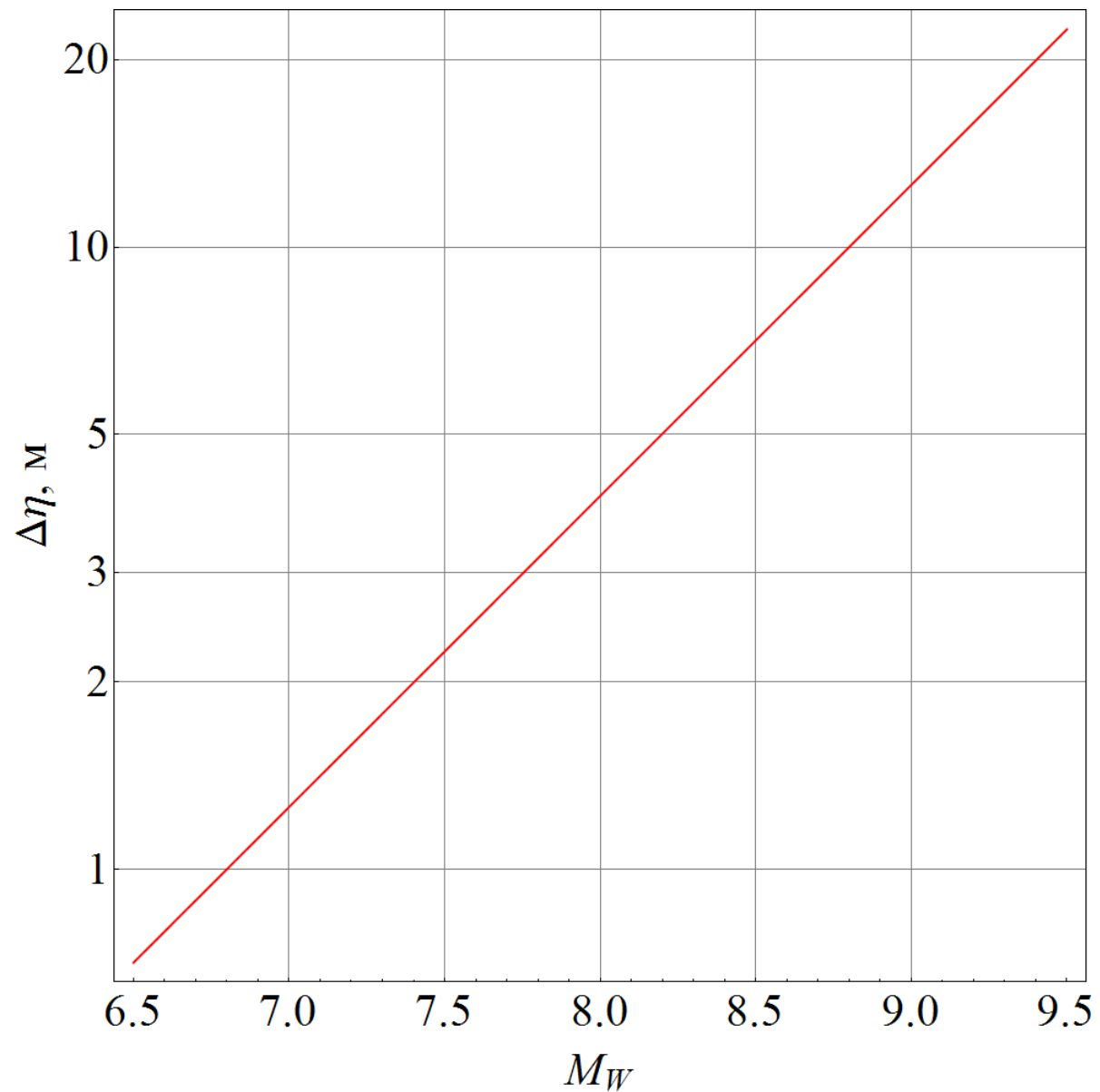
$$\lg R_{TS} = (0.5 \pm 0.07)M - (2.1 \pm 0.6)$$

[Доценко, Соловьев, 1990]

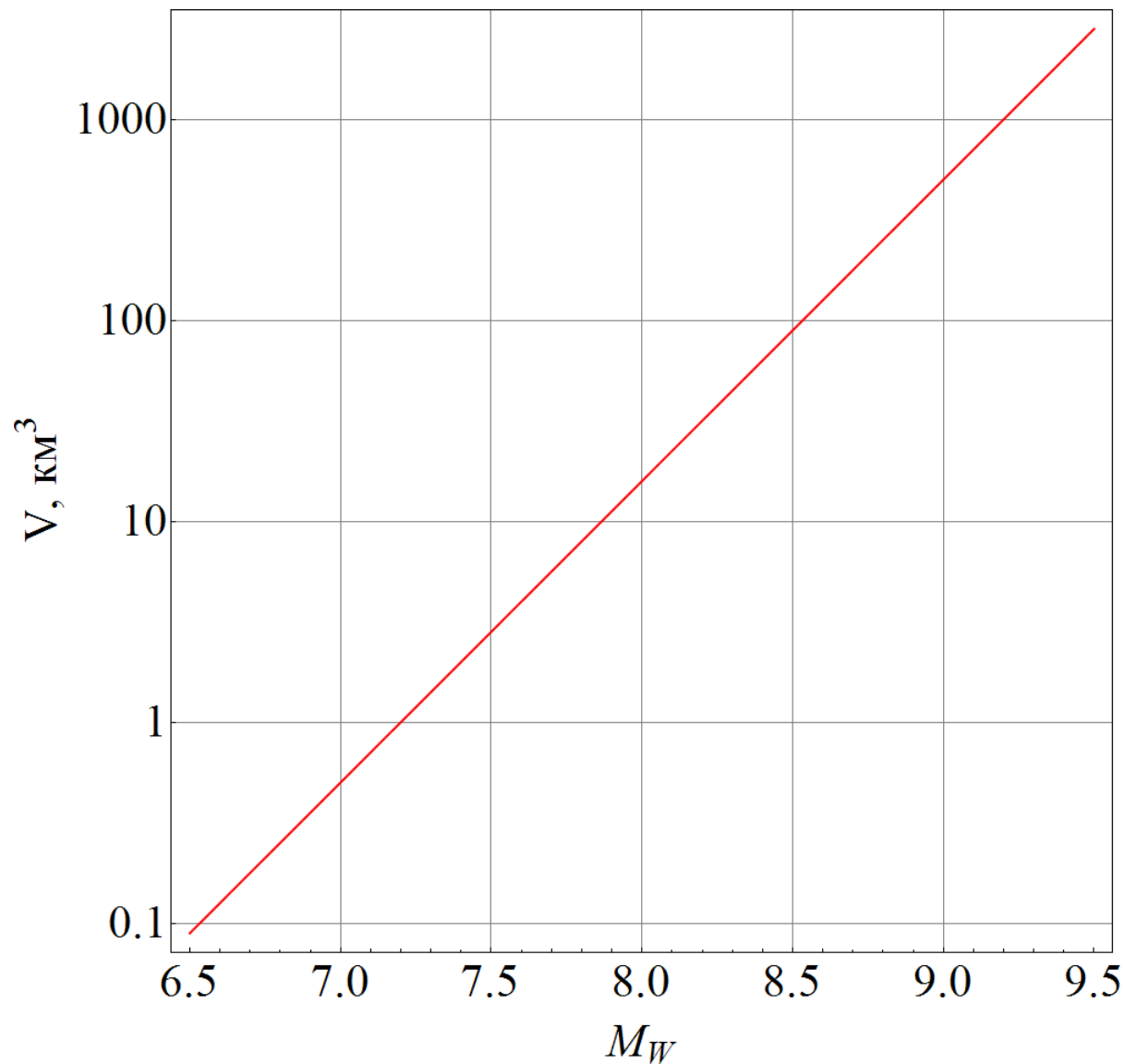
Горизонтальный размер (средний радиус) очага цунами как функция моментной магнитуды



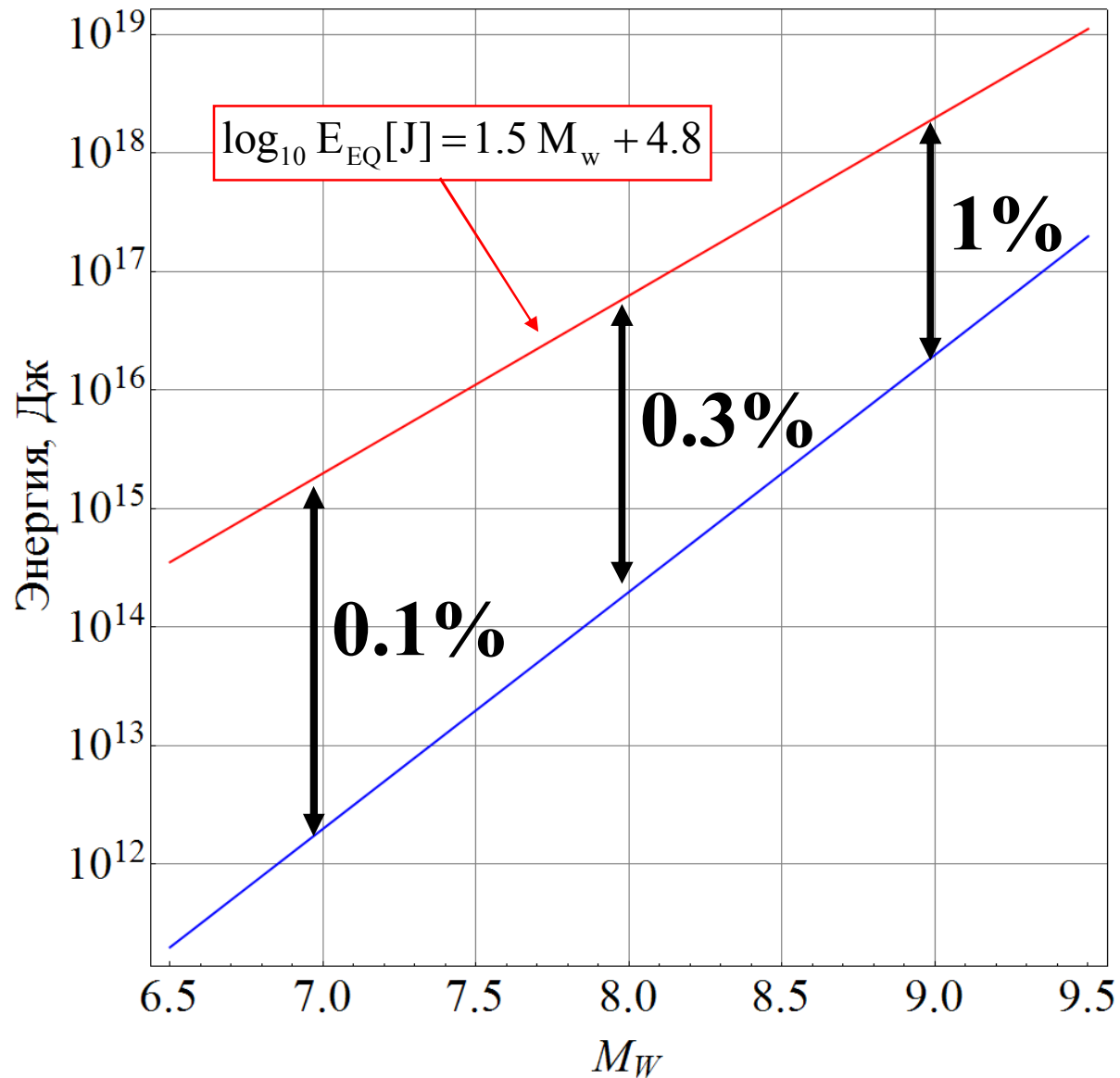
Максимальная величина амплитуды деформации дна как функция моментной магнитуды



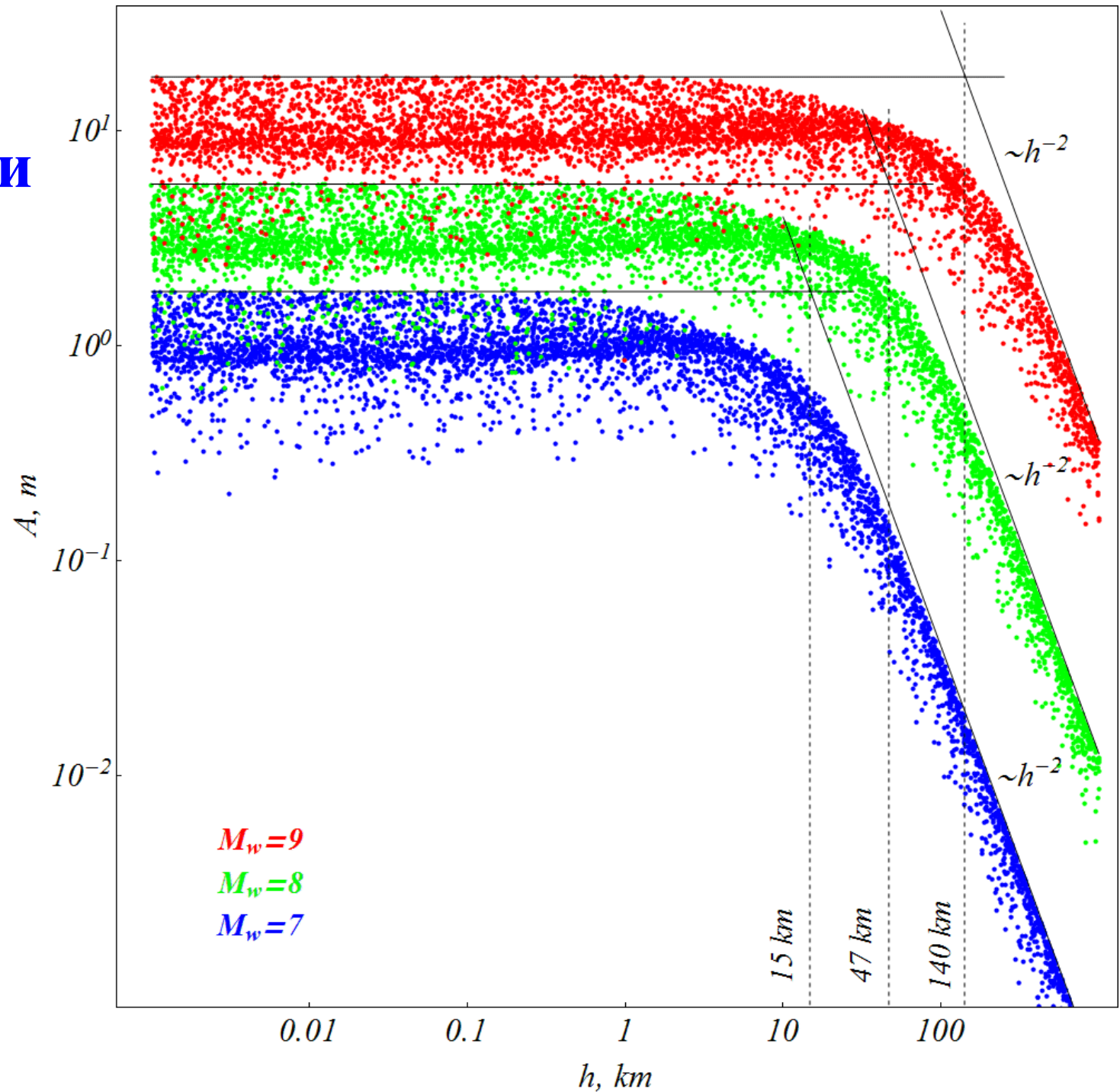
Максимальная величина вытесненного объема как функция моментной магнитуды



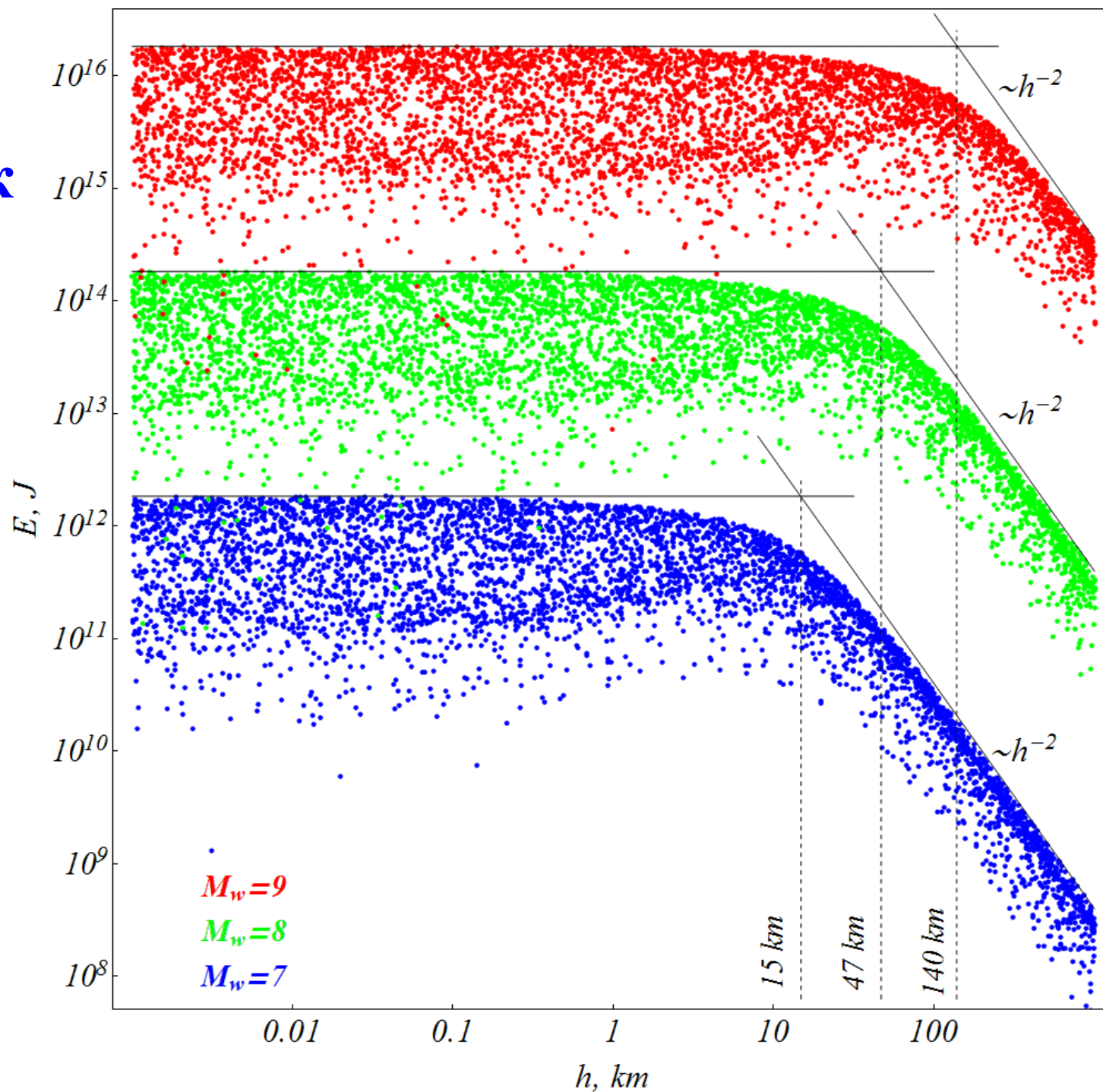
Энергия землетрясения и цунами как функция моментной магнитуды



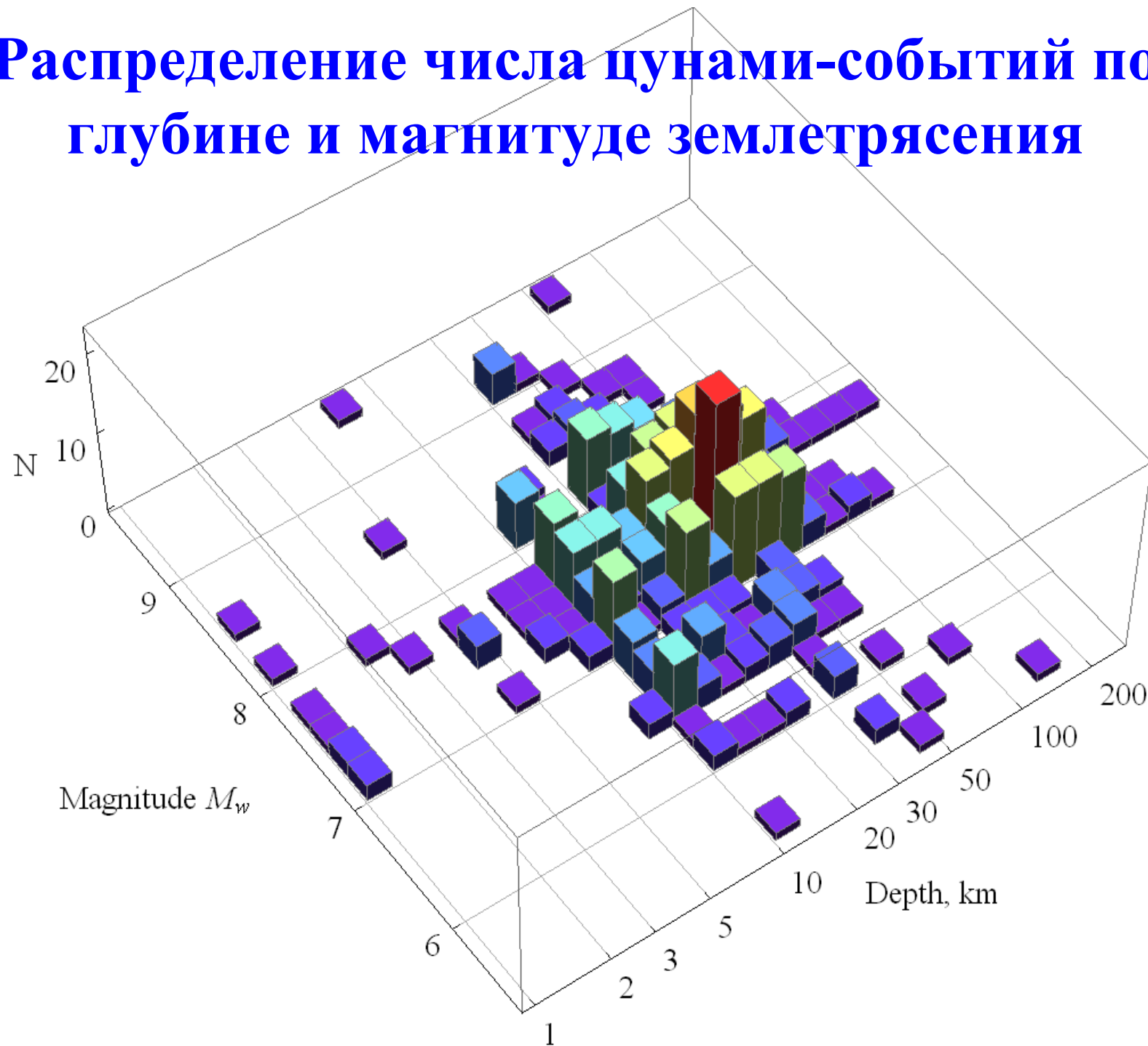
Амплитуда
деформации
дна как
функция
глубины
очага
землетрясения



Энергия
цунами как
функция
глубины
очага
землетрясения



Распределение числа цунами-событий по глубине и магнитуде землетрясения



Распределение числа цунами-событий по глубине и магнитуде землетрясения

