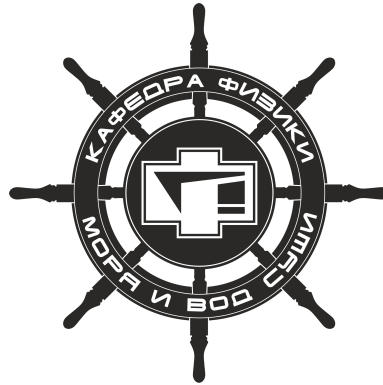


М.А. Носов, А.В. Большакова, К.А. Семенцов



К вопросу о генерации цунами сейсмическими движениями дна

«ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ», 16-17 ноября 2021 г.

Задача о генерации цунами сейсмическими движениями дна исследовалась во многих работах:

[Kajiura, 1963] [Saito, Kubota, 2020]

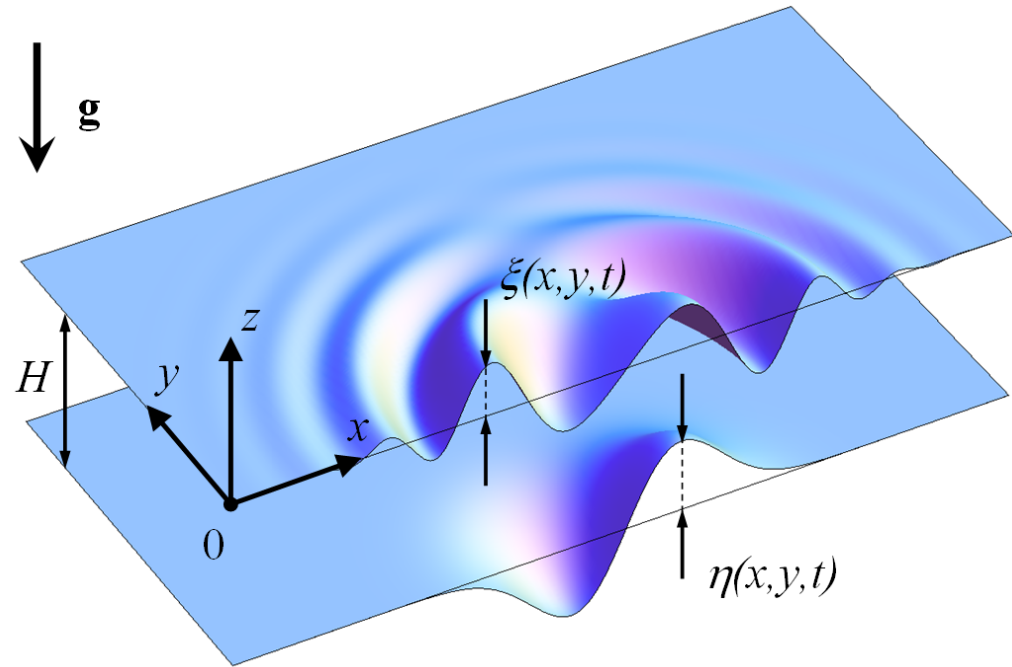
Мотивация:

Войт С.С., Лебедев А.Н., Себекин Б.И. О формировании направленной волны цунами в очаге возбуждения // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 17. № 3. 1981. С. 296–304.

Лебедев А.Н., Себекин Б.И. Генерация направленной волны цунами в прибрежной зоне // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1982. Т. 18. №4. С. 399–417.

Song Y.T., Fu L.L., Zlotnicki V. et al. The role of horizontal impulses of the faulting continental slope in generating the 26 December 2004 tsunami // Ocean Modelling. 2008. V. 20. P. 362–379.

**Задача о генерации
волн движениями дна
малой амплитуды в
бассейне постоянной
глубины**

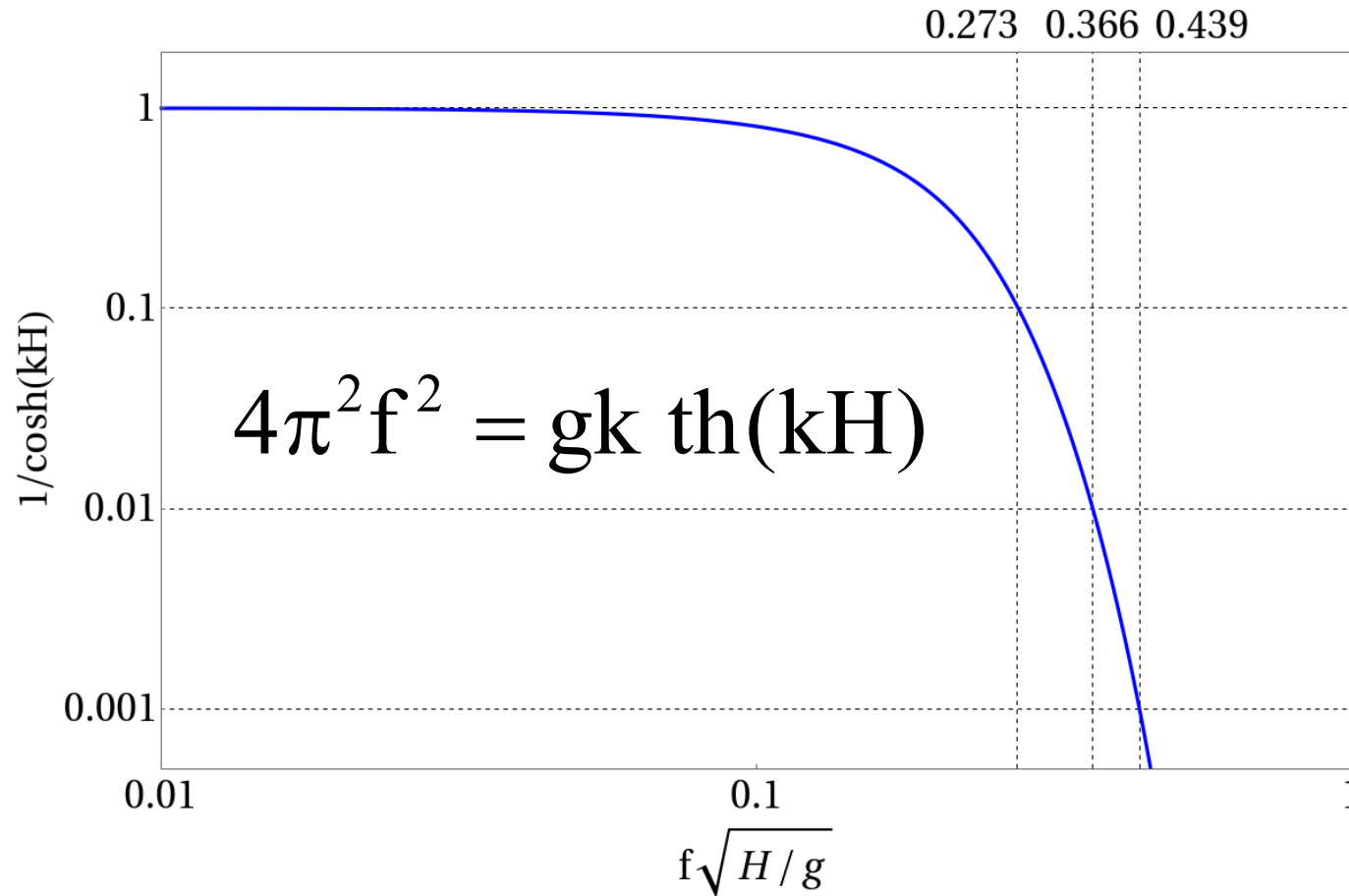


$$\xi = \frac{1}{8\pi^3 i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} dp \int_{-\infty}^{+\infty} dm \int_{-\infty}^{+\infty} dn \frac{p^2 \exp(pt - imx - iny)}{\text{ch}(kH) [gk \text{th}(kH) + p^2]} H(p, m, n)$$

$$H(p, m, n) = \int_0^{\infty} dt \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy \exp(-pt + imx + iny) \eta(x, y, t)$$

$$k^2 = m^2 + n^2$$

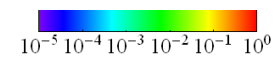
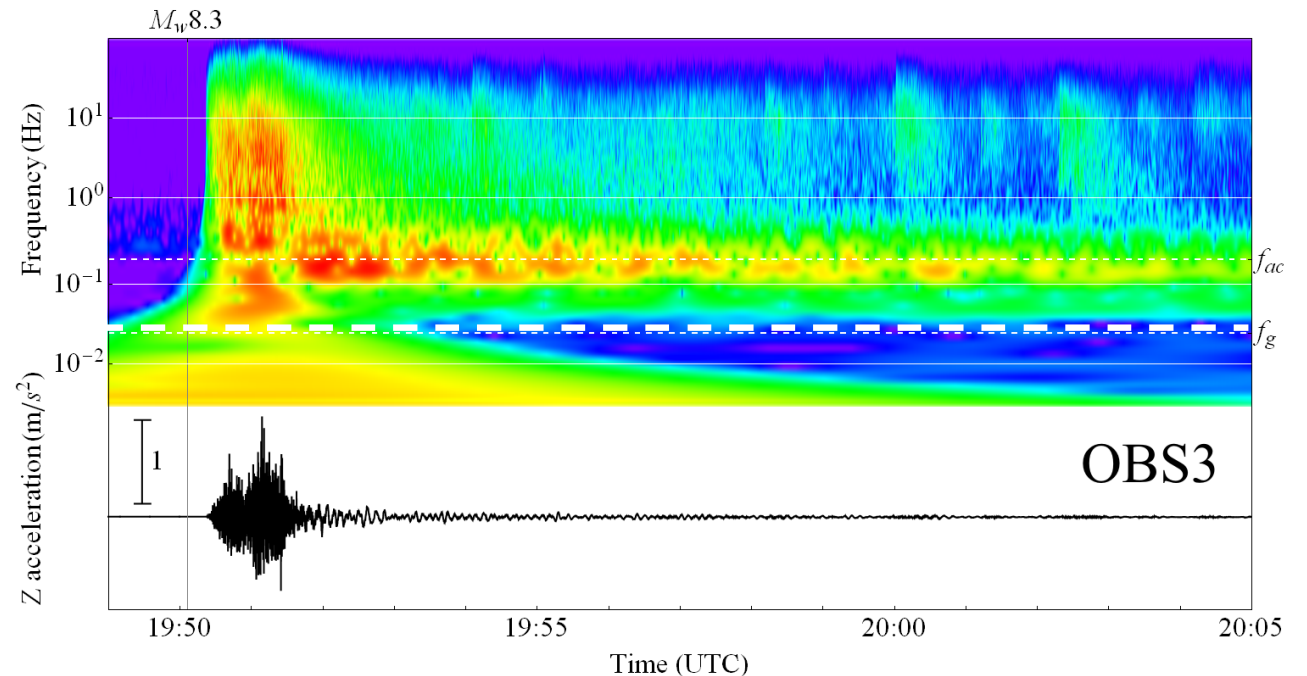
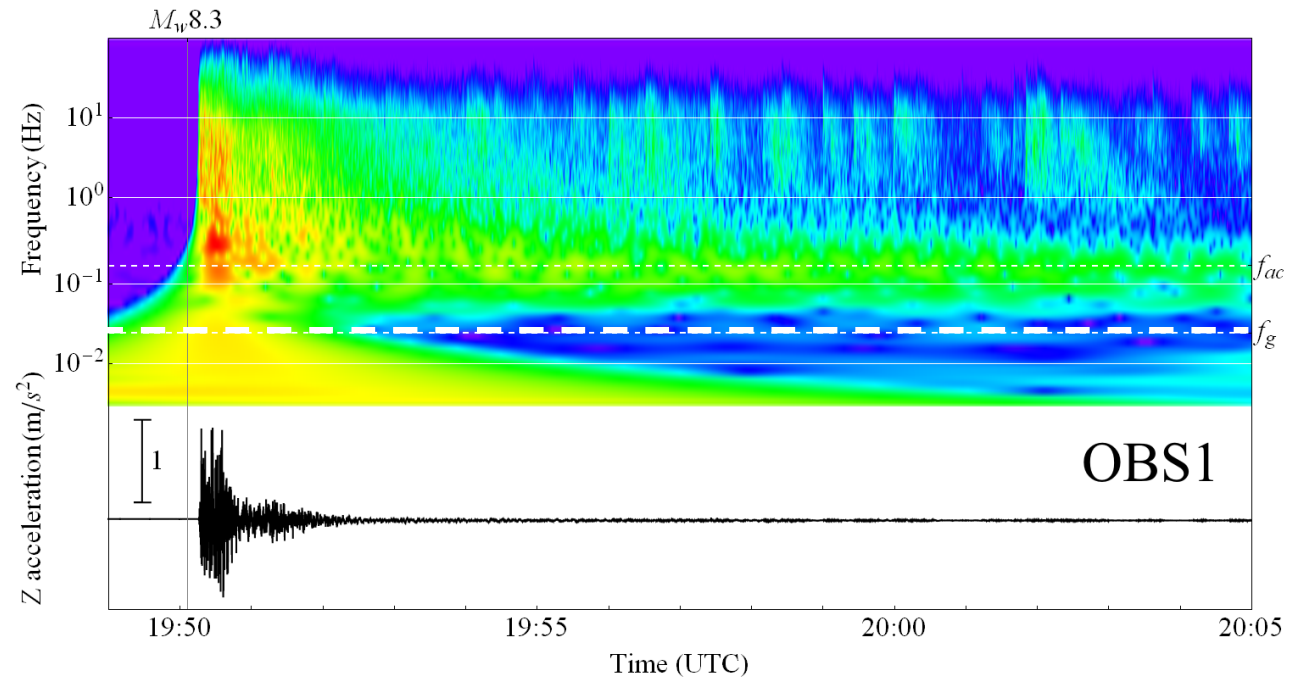
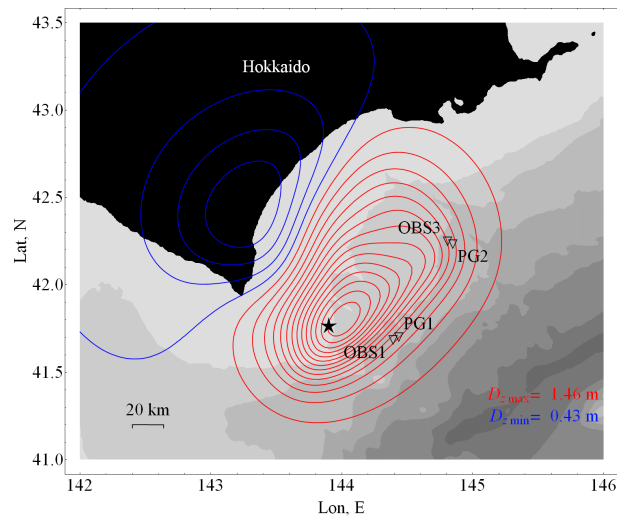
Ограниченность частотного диапазона волн цунами, возбуждаемых сейсмическими движениями дна



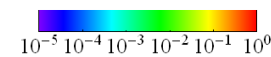
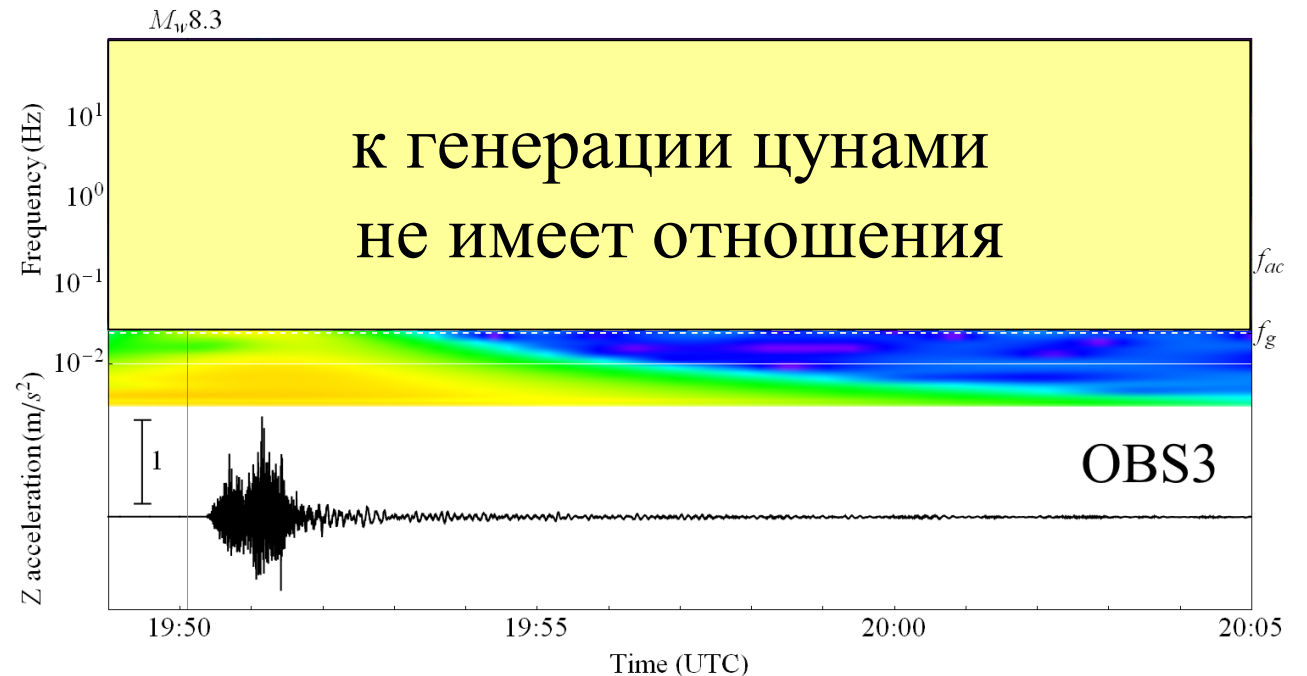
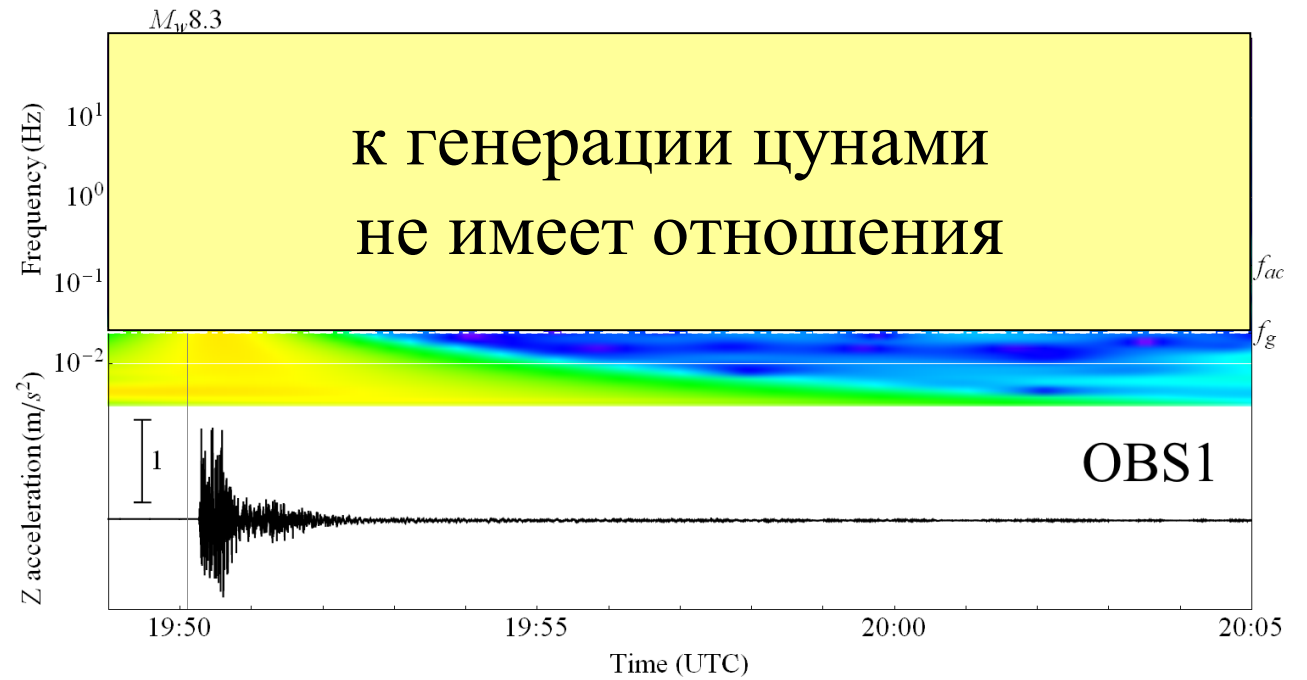
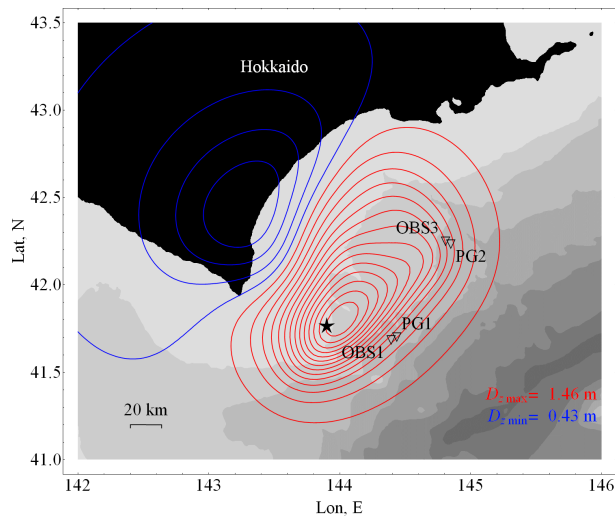
максимальная частота: $f_g \approx 0.366\sqrt{g/H}$

при $H = 4000$ м $f_g \approx 0.02$ Гц

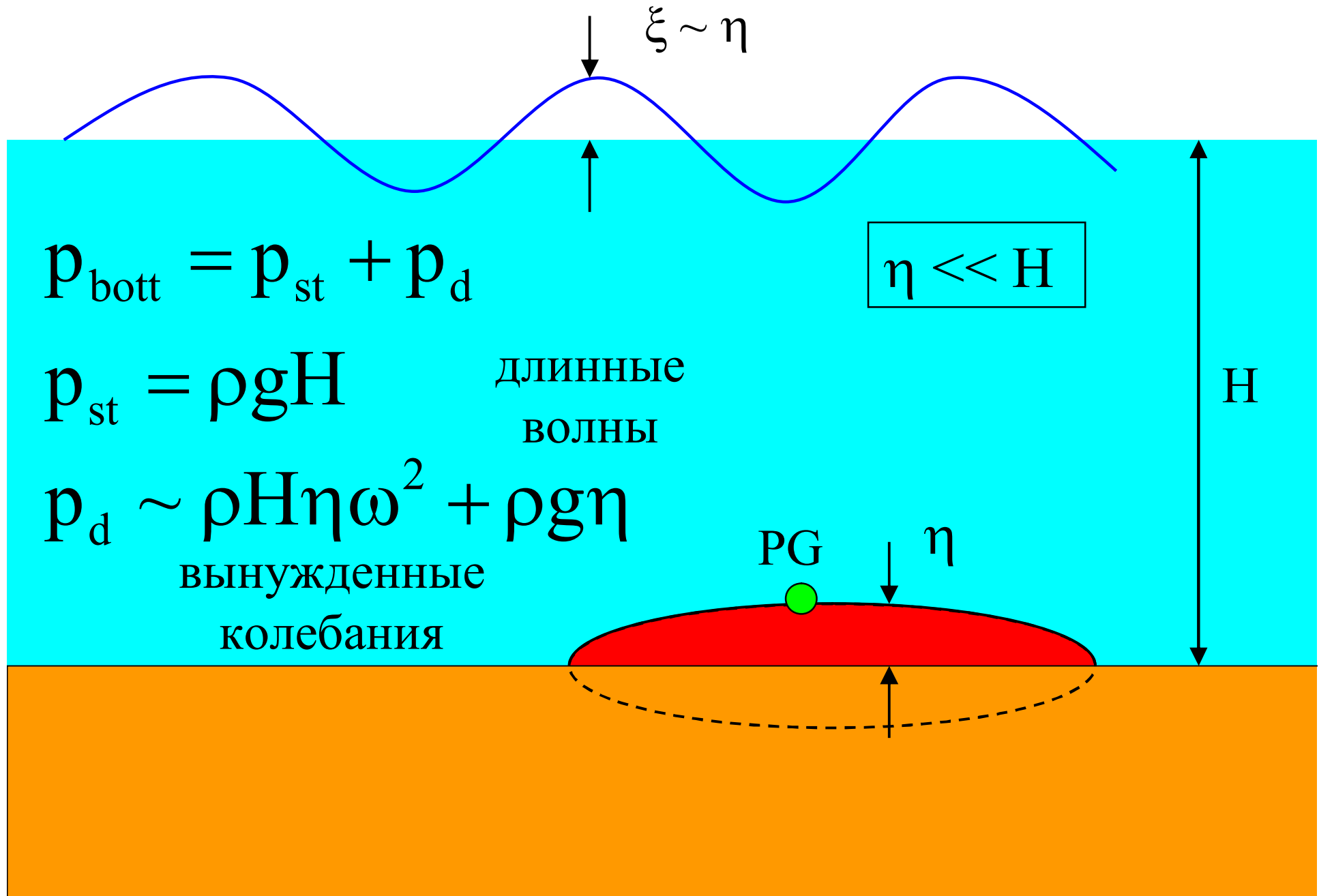
Вертикальные ускорения дна, зарегистрированные в очаге цунами Токачи-оки 2003 г.



Вертикальные ускорения дна, зарегистрированы в очаге цунами Токачи-оки 2003 г.



Гидростатическое и динамическое давление на дно



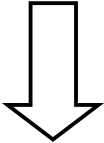
Гидростатическое и динамическое давление на дно

$$\eta \ll H$$

$$\frac{p_d}{p_{st}} \sim \frac{\rho H \eta \omega^2 + \rho g \eta}{\rho g H} = \frac{\eta \omega^2}{g H} + \frac{\eta}{H}$$

$$\omega_{\max} = 2\pi f_g$$

$$f_g = 0.366 \sqrt{g / H}$$

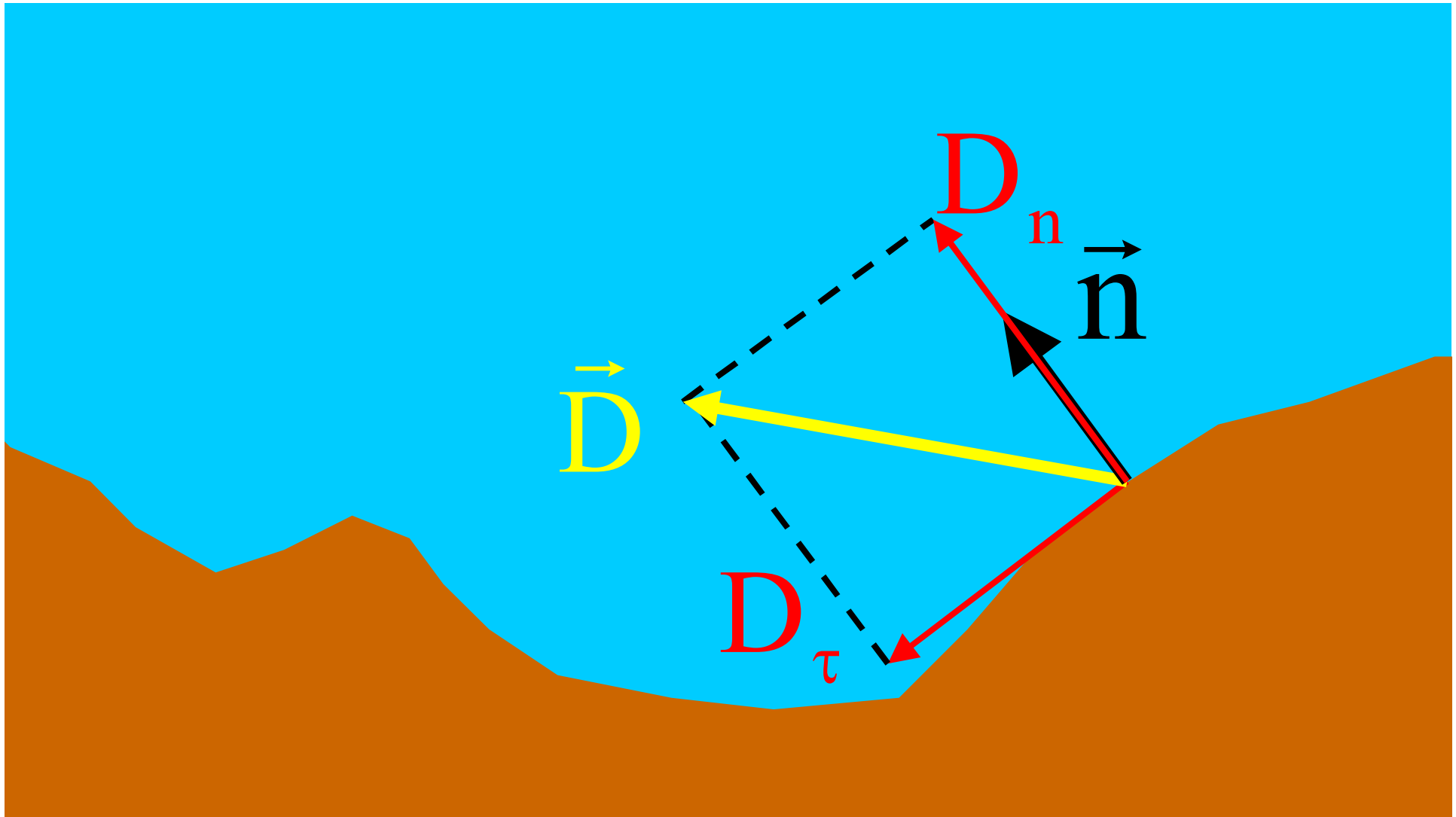

$$< 5.28 \frac{\eta}{H}$$

$$\frac{p_d}{p_{st}} \sim \frac{\eta}{H}$$

**динамическое давление
на дно не имеет
значения в задаче о
генерации цунами!**

Нормальные и тангенциальные движения дна

Какая из компонент D_n или D_τ эффективнее передает энергию водному слою?



Нормальные и тангенциальные движения дна

Пусть участок дна смещается на расстояние η за время τ один раз в нормальном, а другой раз в тангенциальном направлении.

оценка энергии, передаваемой водному слою

нормальное движение

$$A_n = \rho g H \eta$$

работа против сил
гидростатического
давления

$$\eta \sim 1 - 10 \text{ м}$$

$$\tau \sim 10 - 100 \text{ с}$$

$$H \sim 10^3 \text{ м}$$

тангенциальное движение

$$A_t = \rho C_B \eta^3 / \tau^2$$

работа против сил
донного трения
 $\rho C_B u^2$, $C_B = 0.0025$

**имеют
значение
только
нормальные
движения!**

$$\frac{A_t}{A_n} = \frac{C_B \eta^2}{\tau^2 g H} \sim 10^{-11} - 10^{-7}$$

Промежуточные выводы:

- ❑ В задаче о генерации цунами сейсмическими движениями дна энергия передается водному слою исключительно смещениями дна в нормальном к поверхности дна направлении.
- ❑ Механизм передачи энергии – работа, совершаемая против сил гидростатического давления.
- ❑ Нормальные движения обязательно сопровождаются вытеснением воды, следовательно работа идет на изменение положения центра масс водного слоя.
- ❑ Импульс водному слою не передается.

Энергия, передаваемая водному слою, и доступная энергия (энергия цунами)

работа, совершаемая против сил гидростатического давления

$$A = \rho g \iint H (\mathbf{D}, \mathbf{n}) ds$$

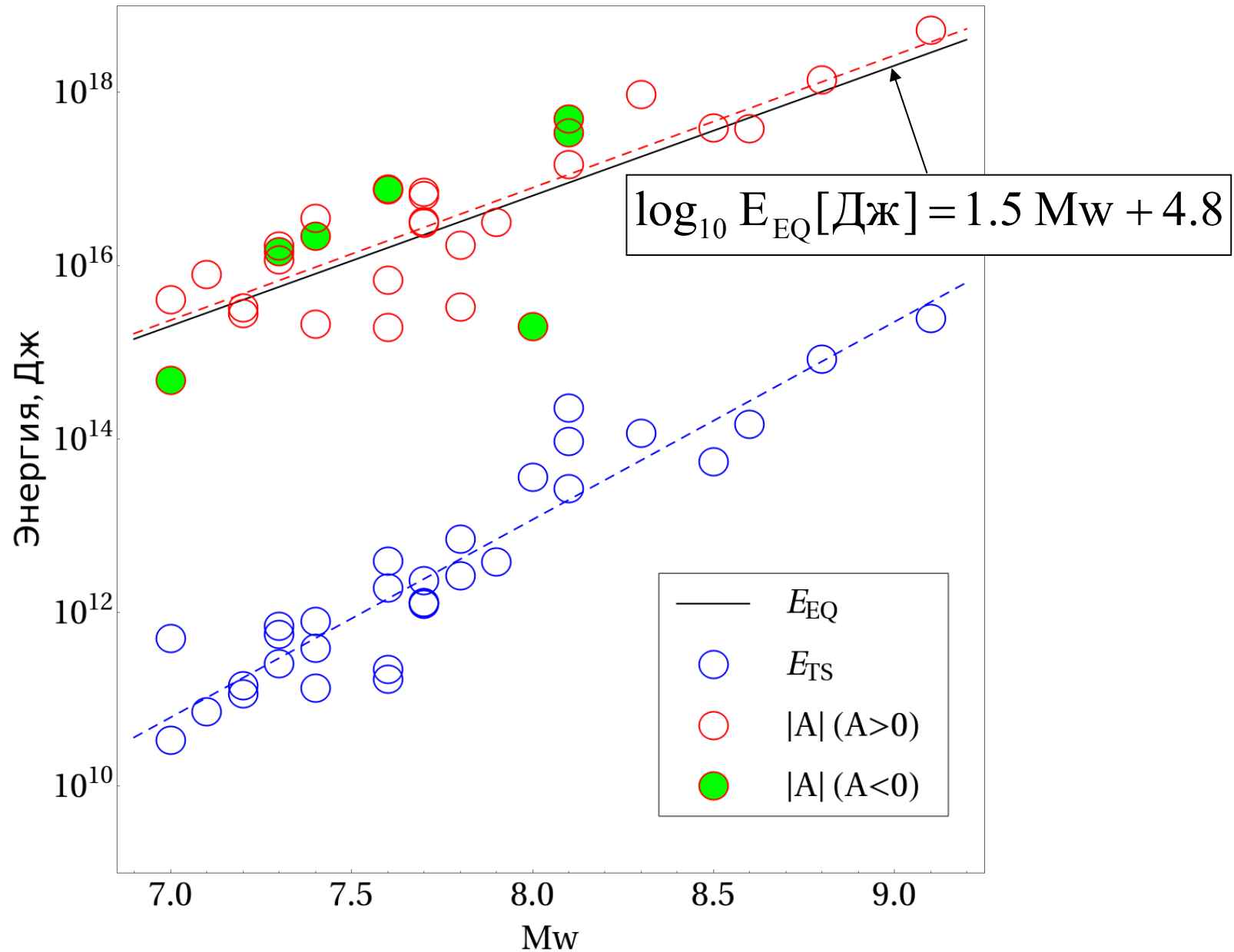
доступная энергия (энергия цунами)

$$E_{TS} = \frac{\rho g}{2} \iint \eta^2 ds$$

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

При численных расчетах использовались: (1) батиметрия GEBCO, (2) векторные поля косейсмических смещений дна (Finite Fault Model, USGS).

Энергия землетрясения, энергия цунами и работа против сил гидростатического давления как функция магнитуды



Выводы:

1. Работа, «совершаемая землетрясением» против сил гидростатического давления по абсолютной величине сопоставима с энергией землетрясения, оцениваемой по формуле Канамори.
2. Доступная энергия (энергия цунами) на 3-4 порядка меньше энергии, передаваемой водному слою движениями дна.

№.	д а т а	м е с т о	Mw	E_{TS} , Дж	A, Дж
1	20061115	Simushir	8.3	1.16E+14	9.39E+17
2	20070113	Simushir	8.1	2.31E+14	-4.9E+17
3	20070401	Solomon	8.1	2.68E+13	1.47E+17
4	20070815	Peru	8.0	3.64E+13	-1.96E+15
5	20070912	Kepulauan	7.9	3.86E+12	3.16E+16
6	20070912	S.Sumatra	8.5	5.51E+13	3.9E+17
7	20071114	Antofagasta	7.7	1.25E+12	3.06E+16
8	20080220	Simeulue	7.4	1.36E+11	2.14E+15
9	20080929	Kermadec	7.0	3.39E+10	4.02E+15
10	20090103	Papua	7.7	2.34E+12	3.2E+16
11	20090715	New Zealand	7.8	7.09E+12	3.34E+15
12	20090929	Samoa	8.1	9.38E+13	-3.43E+17
13	20090930	S.Sumatra	7.6	1.7E+11	6.84E+15
14	20091007	Vanuatu	7.7	1.3E+12	7.03E+16
15	20100112	Haiti	7.0	5.03E+11	-4.77E+14

№.	д а т а	м е с т о	Mw	E_{TS} , Дж	A, Дж
16	20100227	Chile	8.8	8.42E+14	1.37E+18
17	20100406	N.Sumatra	7.8	2.67E+12	1.72E+16
18	20100509	N.Sumatra	7.2	1.17E+11	3.25E+15
19	20101025	Kepulauan	7.7	1.3E+12	6.37E+16
20	20101221	Bonin	7.4	7.99E+11	-2.16E+16
21	20101225	Vanuatu	7.3	6.9E+11	-1.46E+16
22	20110309	Japan	7.3	5.61E+11	1.17E+16
23	20110311	Tohoku	9.1	2.45E+15	5.22E+18
24	20110706	Kermadec	7.6	3.91E+12	-7.67E+16
25	20110820	Vanuatu	7.1	7.24E+10	7.88E+15
26	20111021	Kermadec	7.4	3.9E+11	3.54E+16
27	20120110	N.Sumatra	7.2	1.45E+11	2.81E+15
28	20120411	Sumatra	8.6	1.49E+14	3.82E+17
29	20120827	Salvador	7.3	2.59E+11	1.7E+16
30	20120831	Philippines	7.6	1.93E+12	7.45E+16
31	20120905	Costa Rica	7.6	2.21E+11	1.95E+15