

*Носов Михаил Александрович
Колесов Сергей Владимирович*

Физика цунами

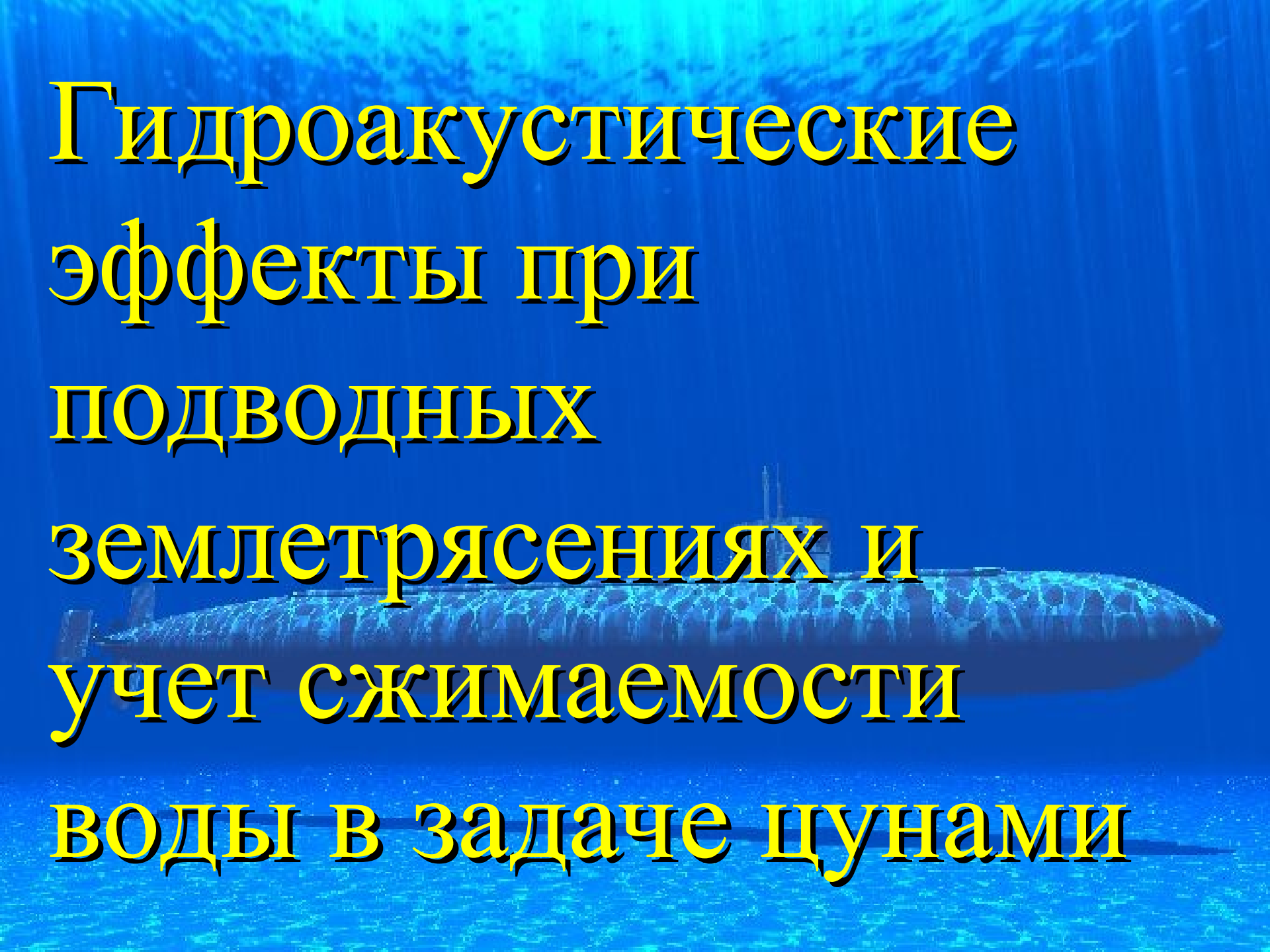
Межфакультетский учебный курс

Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

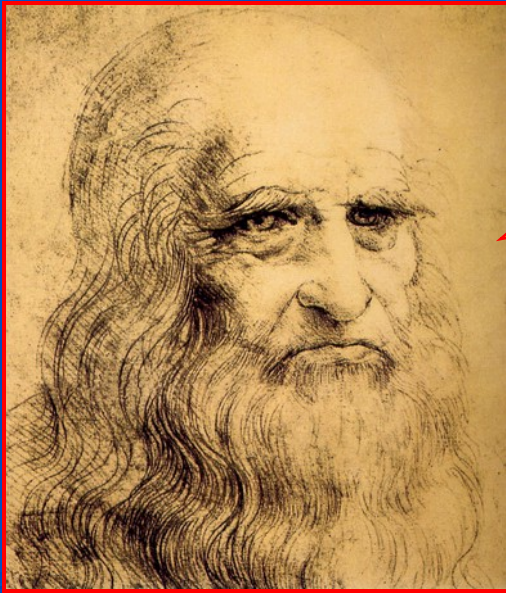
Лекция №7



Гидроакустические
эффекты при
ПОДВОДНЫХ
землетрясениях и
учет сжимаемости
ВОДЫ в задаче цунами



*«...погрузив трубу одним
концом в воду и прижав
другой ее конец к уху,
можно услышать корабли,
идушие вдали...»*



Леонардо да Винчи
1452- 1519



T - фаза

T phase

T wave

P - primaе

S - secondae

T - tertiae

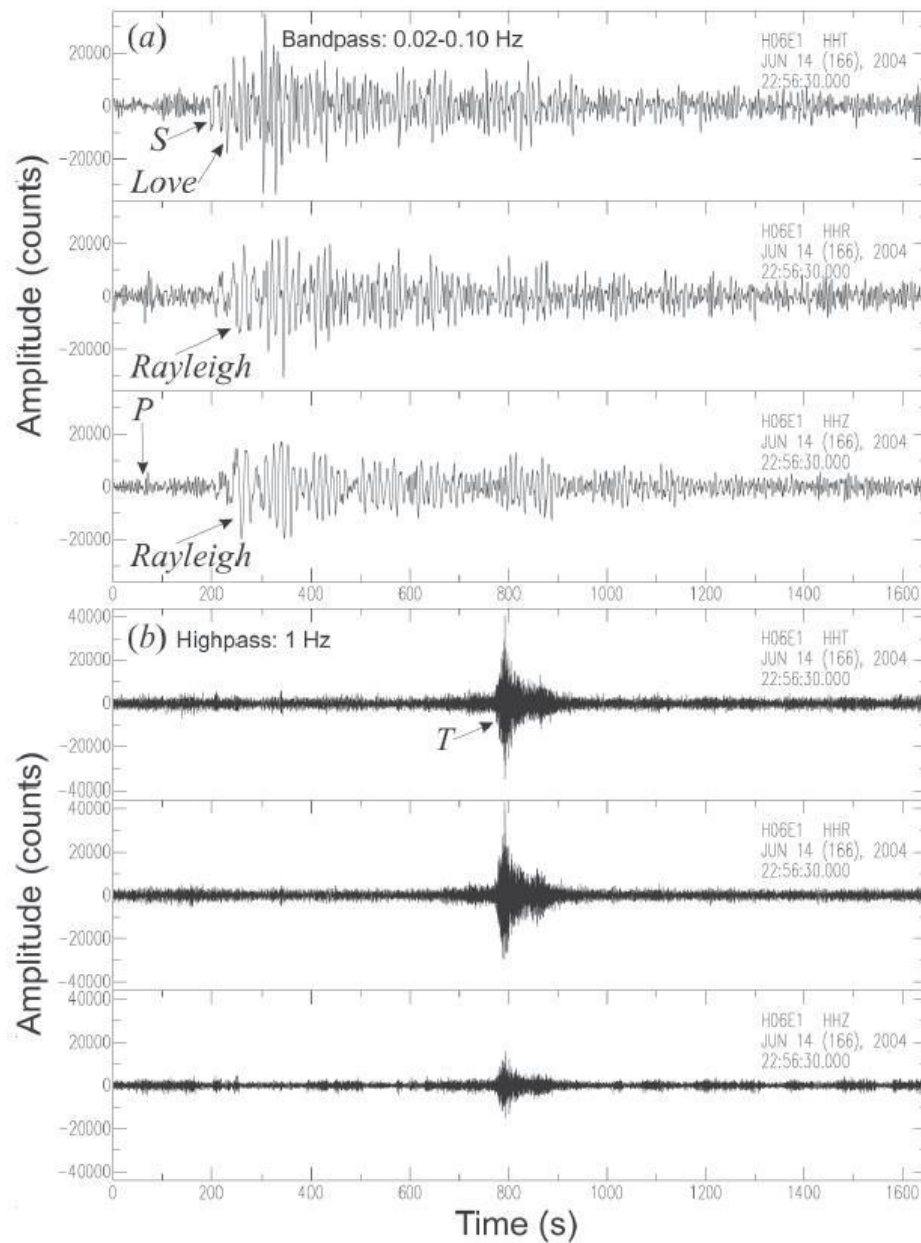
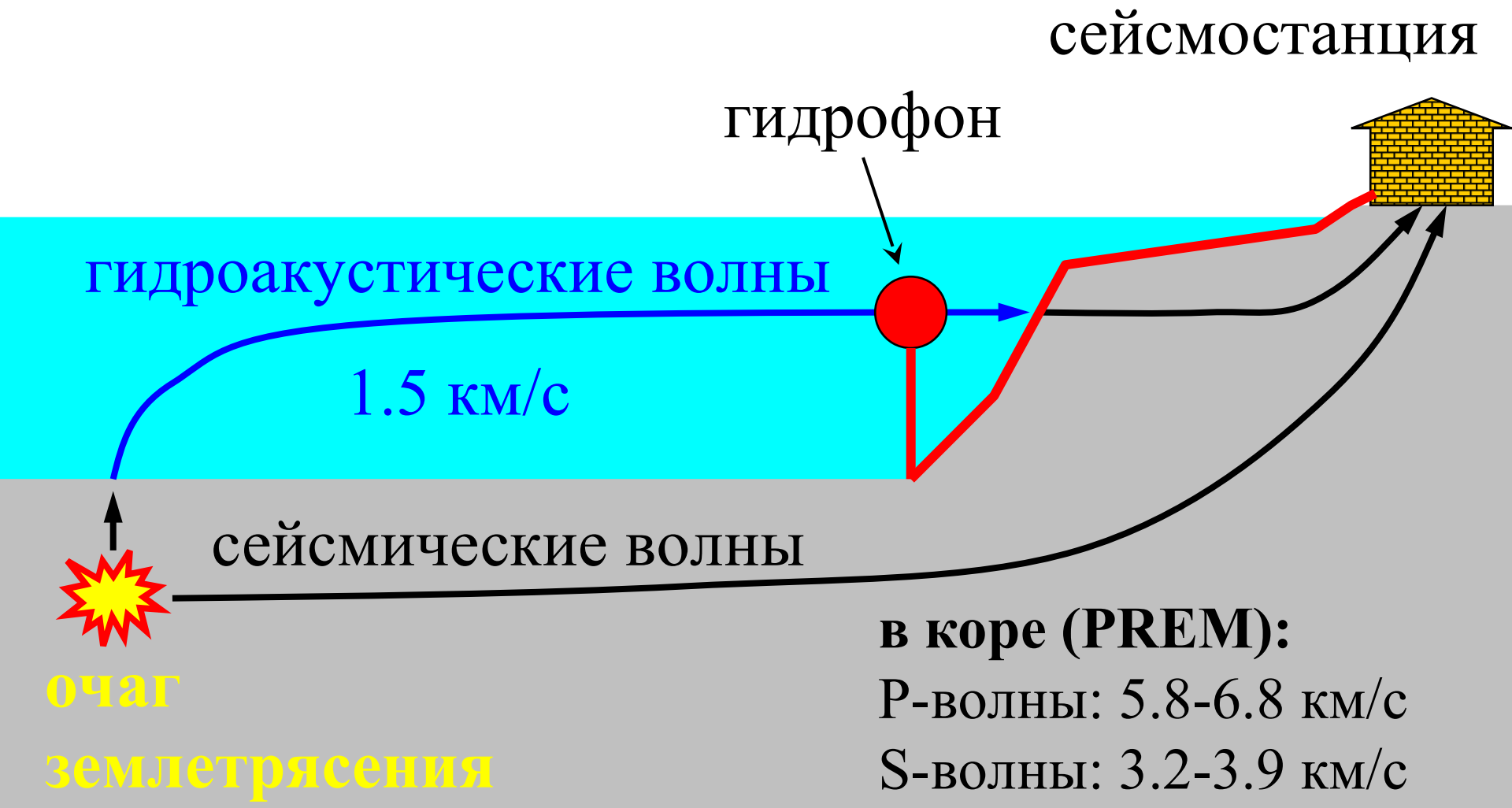


Fig. 5. Velocity records for the earthquake in the Guerrero-Oaxaca border region, 06/14/2004, at the broadband station SRAD (H06E1). The transverse, radial and vertical components are shown. (a) the time series were bandpass filtered between 0.02 and 0.10 Hz. All records are shown at the same scale. Body and surface waves are observed. (b) the records were highpass filtered at 1 Hz in order to show the *T* phase. (c) spectrogram of the filtered transverse component. The early, weak arrival is the *P* → *T* wave. The second arrival is the *S* → *T* wave. The third arrival is very clear and it has a predominant frequency around 3.5 Hz. The combined duration for all three arrivals is approximately 200 s.

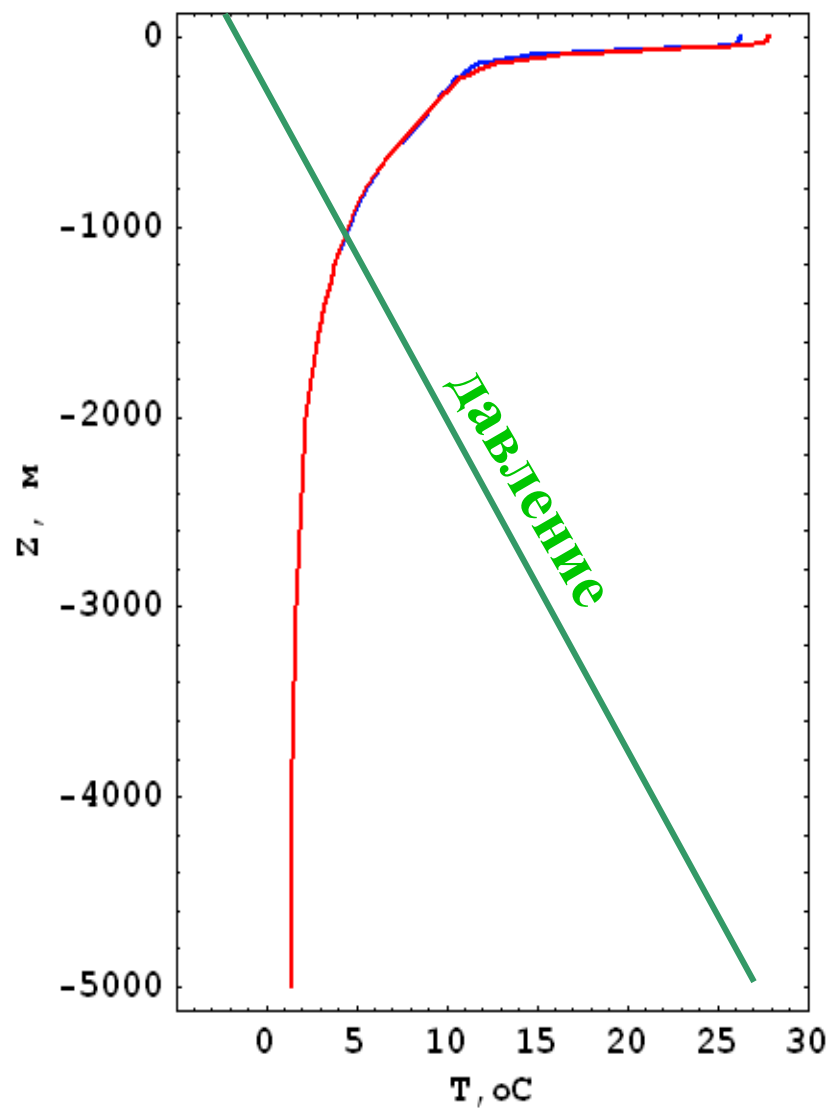
Пути распространения сигнала от очага землетрясения до береговой сейсмостанции



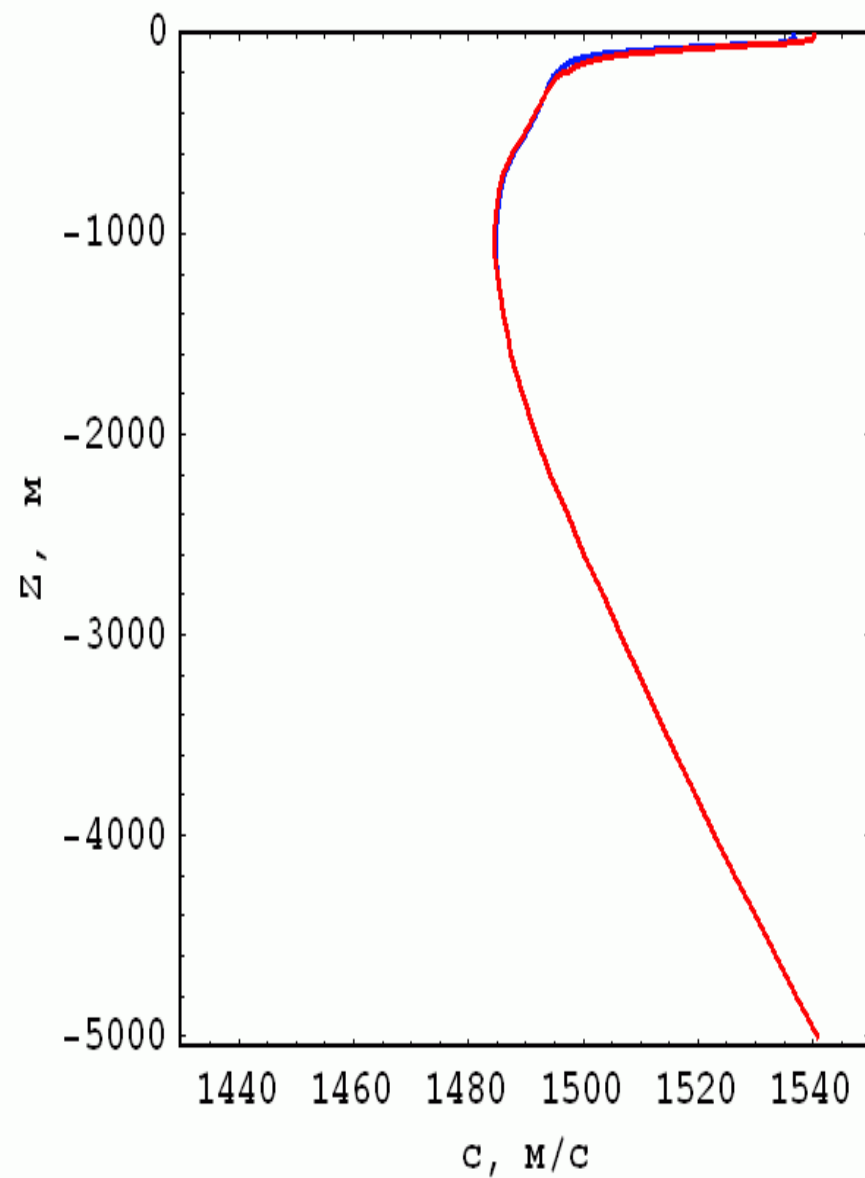
Lat=10

Lon=-150

Температура

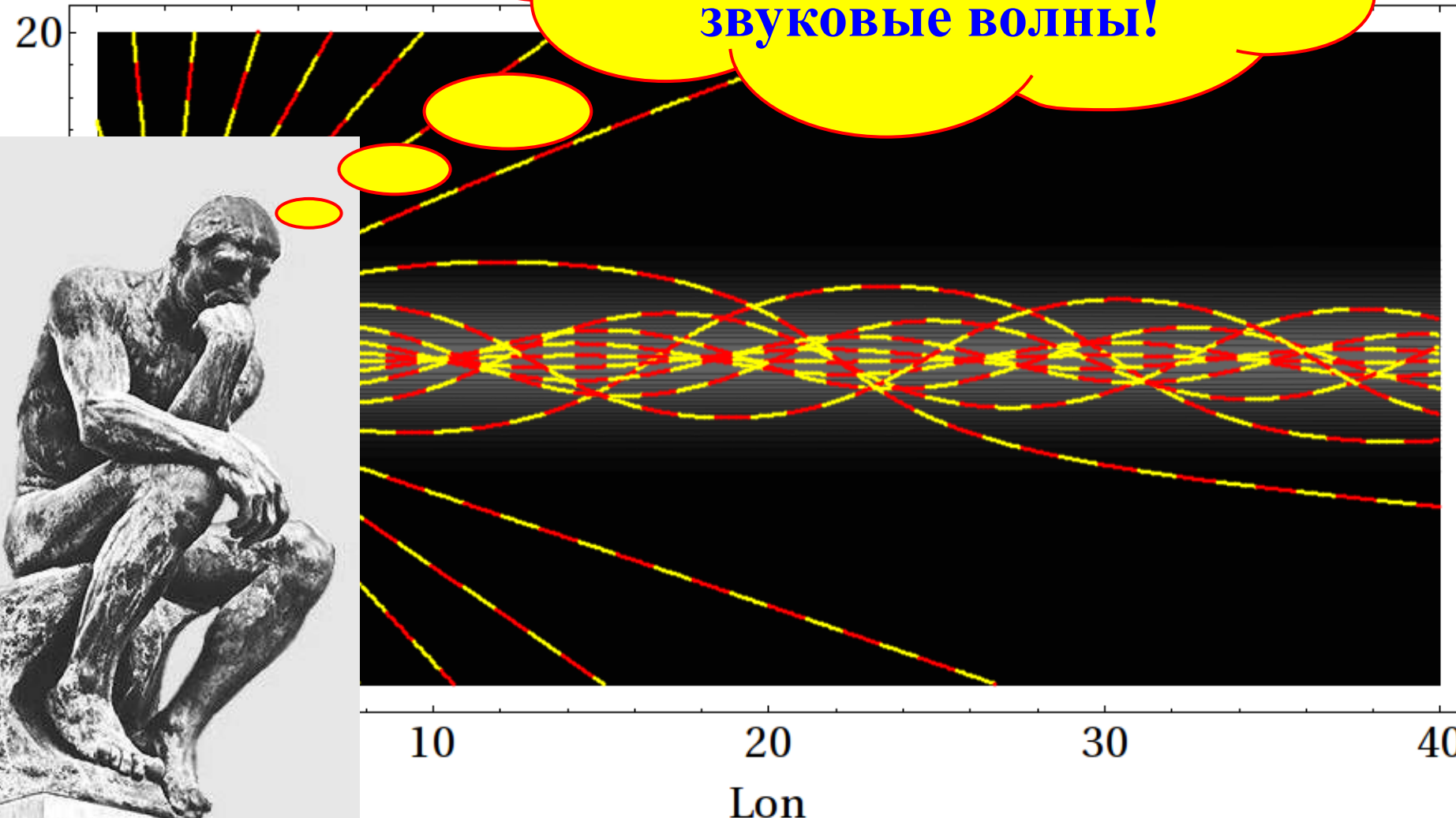


Скорость звука



Захват волн т.е. областями распространения

Область с пониженной скоростью звука может захватывать звуковые волны!



Подводный звуковой канал (ПЗК)



**William Maurice
Ewing**

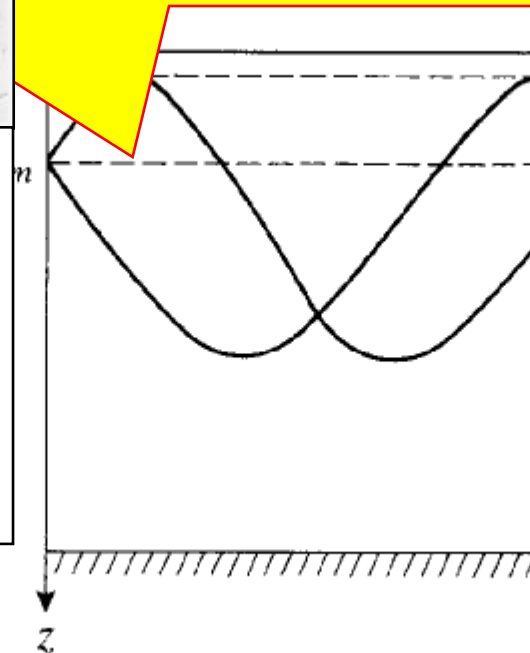
1906 – 1974

**american geophysicist and
oceanographer**



nging)

ПЗК обычно лежит на
глубине ~1000 м



**Леонид
Максимович
Бреховских**
1917-2005

**выдающийся учёный в
области физики,
акустики океана,
академик АН СССР**

Пути распространения землетрясения до берега

Возможен ли прогноз
цунами по Т-фазе?

$$T_{\max} = \lambda_{\max} / c \sim 1 \text{ с}$$

сейсмостанция

$$\lambda_{\max} \sim 1 \text{ км}$$

цунами 0.2 км/с

гидроакустические волны

1.5 км/с

сейсмические волны



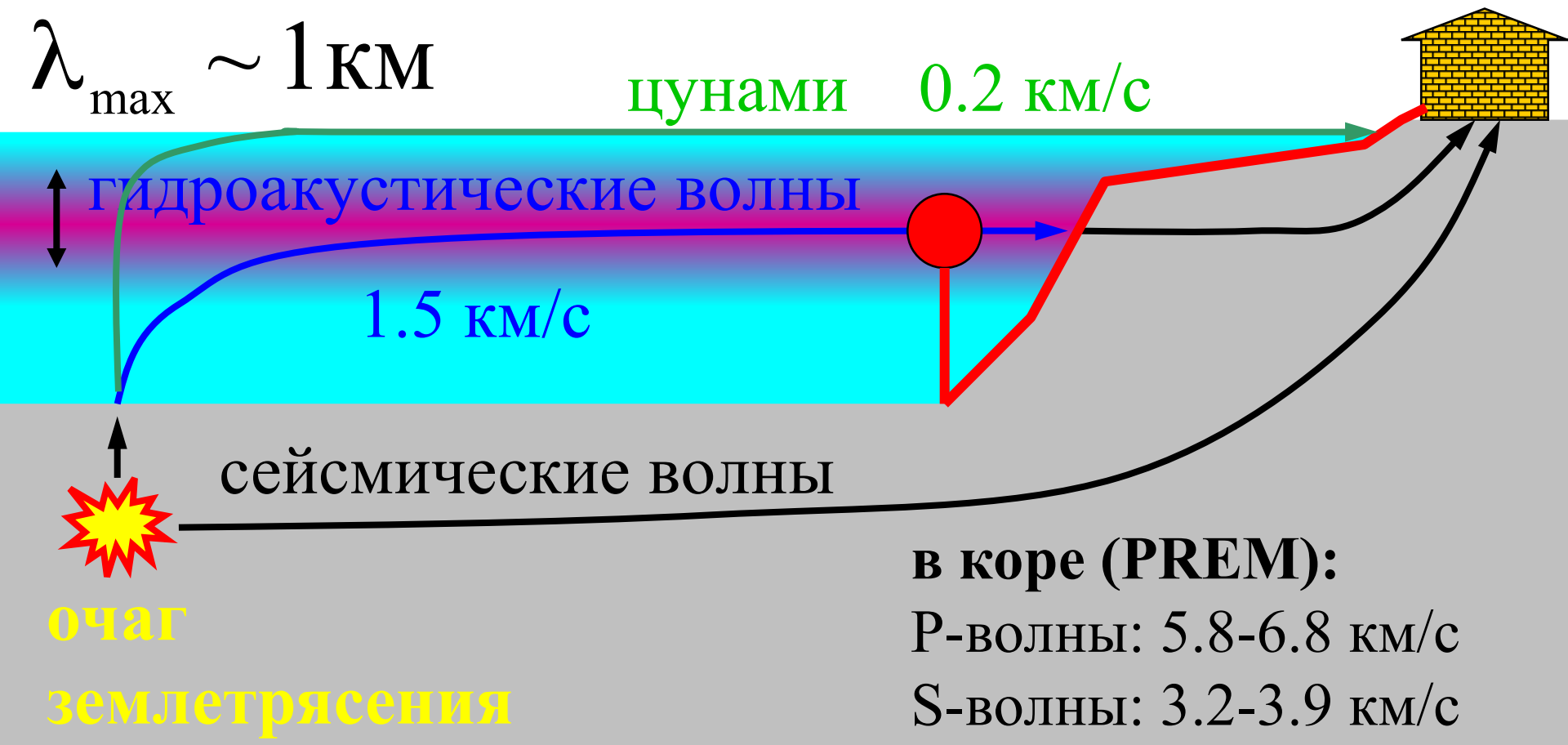
очаг

землетрясения

в коре (PREM):

P-волны: 5.8-6.8 км/с

S-волны: 3.2-3.9 км/с



**Bull. Seismol.
Soc. Am. 1950**

PROPOSED USE OF THE T PHASE IN
TSUNAMI WARNING SYSTEMS*

By MAURICE EWING, IVAN TOLSTOY, and FRANK PRESS

ABSTRACT

A STRIKING correlation between the occurrence of a short-period earthquake phase (T phase) traveling through the ocean with the speed of sound in sea water and the occurrence of tsunamis has been observed. The characteristics of the T phase are described and the data upon which the correlation is based are presented. Although further study is needed, the evidence at hand warrants the inclusion of instruments suitable for recording the T phase in tsunami warning systems. It is quite possible that SOFAR listening stations would be valuable adjuncts in the detection of tsunami-producing earthquakes since they offer the best means of recording the T phase.

Geophys. J. Int. 2003

The deficient *T* waves of tsunami earthquakes

Emile A. Okal,¹ Pierre-Jean Alasset,^{2,*} Olivier Hyvernaud² and François Schindelé³

¹*Department of Geological Sciences, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA. E-mail: emile@earth.northwestern.edu*

²*Laboratoire de Géophysique, Commissariat à l'Énergie Atomique, Boîte Postale 640, F-98713 Papeete, Tahiti, French Polynesia*

³*Département Analyse et Surveillance de l'Environnement, Commissariat à l'Énergie Atomique, BP 12, F-91680 Bruyères-le-Châtel, France*

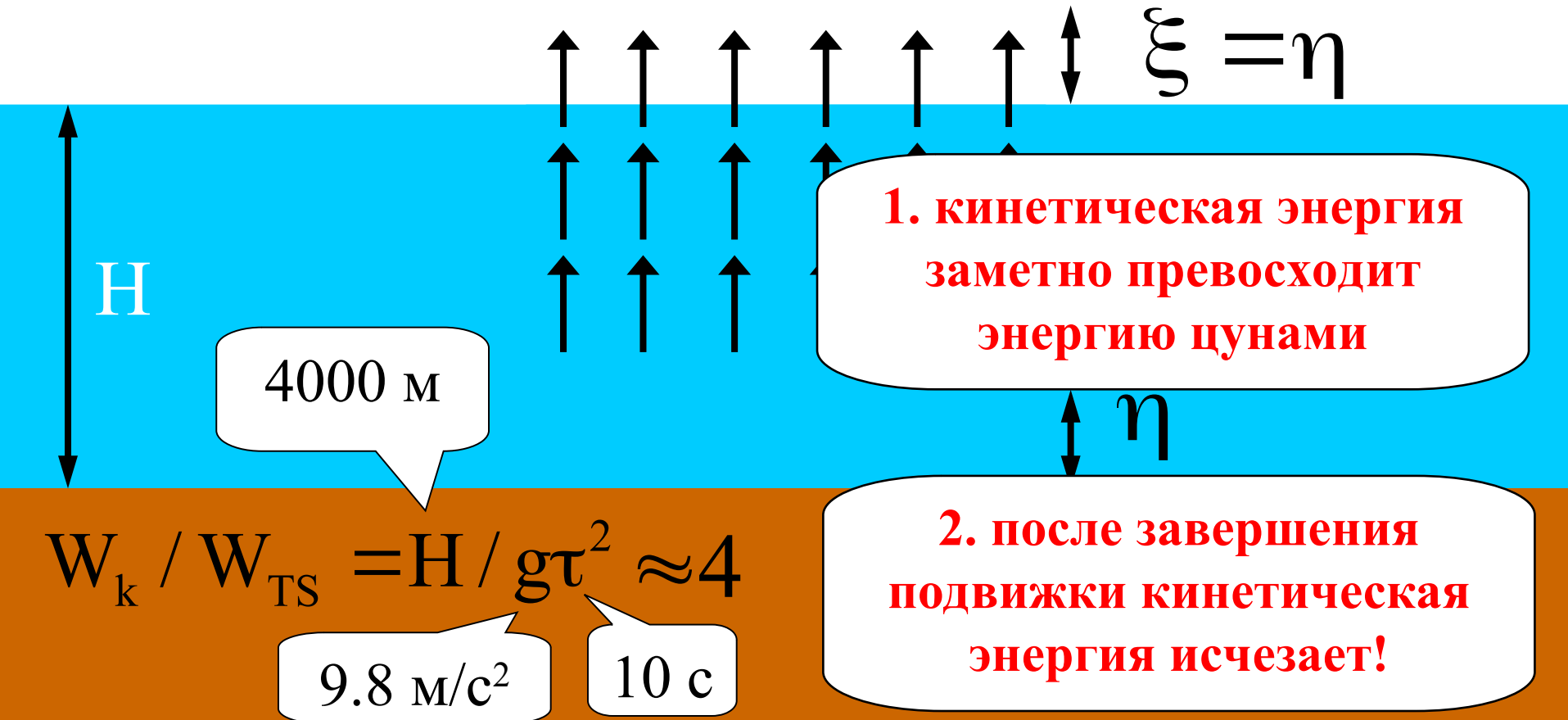
**Нужно ли
учитывать
сжимаемость
воды в задаче
цунами?**



Парадокс теории несжимаемой жидкости

$$W_k = \underbrace{\rho HS}_m \frac{v^2}{2} = \rho HS \frac{\eta^2}{2\tau^2}$$

$$W_{TS} = \frac{\rho g \xi^2 S}{2} = \frac{\rho g \eta^2 S}{2}$$



Оценка энергии акустических волн

$$W_A = \underbrace{\rho c v}_p S \eta = \underbrace{\rho c S}_F \frac{\eta^2}{\tau}$$

$$W_{TS} = \frac{\rho g \xi^2 S}{2} = \frac{\rho g \eta^2 S}{2}$$

$$\updownarrow \xi = \eta$$

↑
H
↓

1500 м/с

↑
η
↓

$$W_A / W_{TS} = 2c / g\tau \approx 30$$

9.8 м/с²

10 с

**Акустические волны
доминируют!**

Система уравнений Навье-Стокса

- линейное приближение – волны малой амплитуды
 - пренебрежем вращением Земли
 - идеальная (невязкая) жидкость

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \cancel{(\vec{v}, \nabla) \vec{v}} = - \frac{\nabla p}{\rho} + \vec{g} + \cancel{2[\vec{v} \times \vec{\omega}]} + \cancel{\nu \Delta \vec{v}} +$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

$$\rho = \rho(p)$$
$$+ \cancel{\left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} &= - \frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{g} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{v} &= 0 \end{aligned} \right.$$

**Система для описания
линейных упругих волн
в идеальной жидкости**

Предположения:

v' - малая
величина

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}' \quad \mathbf{v}_0 = 0$$

$$p = p_0 + p' \quad p' \ll p_0$$

$$\rho = \rho_0 + \rho' \quad \rho' \ll \rho_0$$

$$\frac{\nabla p_0}{\rho_0} = \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = - \frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{g} \Rightarrow \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = - \frac{\nabla(p_0 + p')}{\rho_0 + \rho'} + \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = - \frac{\nabla p_0}{\rho_0} - \frac{\nabla p'}{\rho_0} + \mathbf{g}$$

$\rho' \ll \rho_0$

$$\frac{\nabla p_0}{\rho_0} = \mathbf{g}$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = - \frac{\nabla p'}{\rho_0}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0$$

$$\rho' \ll \rho_0$$

$$\frac{\partial (\rho_0 + \rho')}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho_0 + \cancel{\rho'}) \vec{v}' = 0$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \operatorname{div} (\rho_0 \vec{v}') = 0$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \vec{v}' = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = - \frac{\nabla p'}{\rho_0} \quad \frac{\partial(\nabla F)}{\partial t} = - \frac{\nabla p'}{\rho_0} \\ \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \vec{v}' = 0 \quad \frac{1}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \nabla F = 0 \end{array} \right.$$

$$p' = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \rho' = c^2 \rho'$$

скорость звука

**потенциал
скорости**

$$\vec{v}' = \nabla F$$

$$\frac{\partial(\nabla F)}{\partial t} = - \frac{\nabla p'}{\rho_0} \Rightarrow \frac{\partial F}{\partial t} = - \frac{p'}{\rho_0}$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \nabla F = 0$$

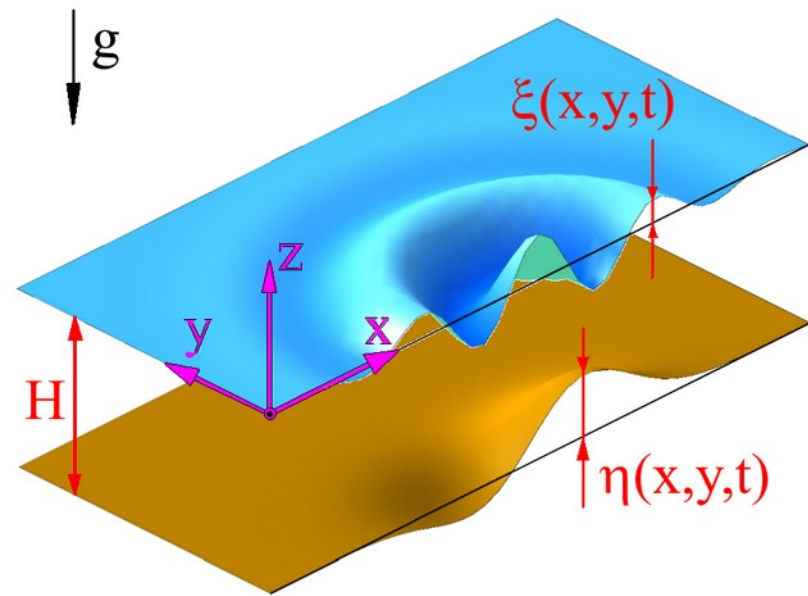
Волновое уравнение

$$v' = \nabla F$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} - c^2 \Delta F = 0$$

$$p' = - \rho_0 \frac{\partial F}{\partial t}$$

Генерация цунами с учетом сжимаемости воды



$$\Delta F = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 F}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial t^2} = -g \frac{\partial F}{\partial z}, \quad z = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial n} = (\vec{u}, \vec{n}), \quad z = -H(x, y)$$

Модель сжимаемой жидкости

нормальные
частоты:

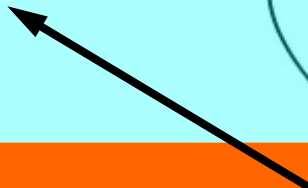
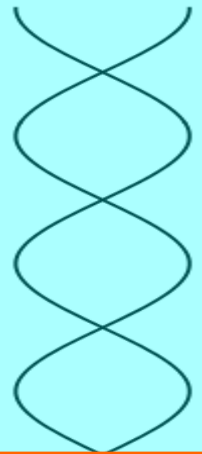
$$f_k = c(1 + 2k) / 4H, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$k = 0$$

$$k = 1$$

$$k = 2$$

$$k = 3$$



$$f_{ac} = c / 4H$$

$$\frac{\lambda}{4} = H$$

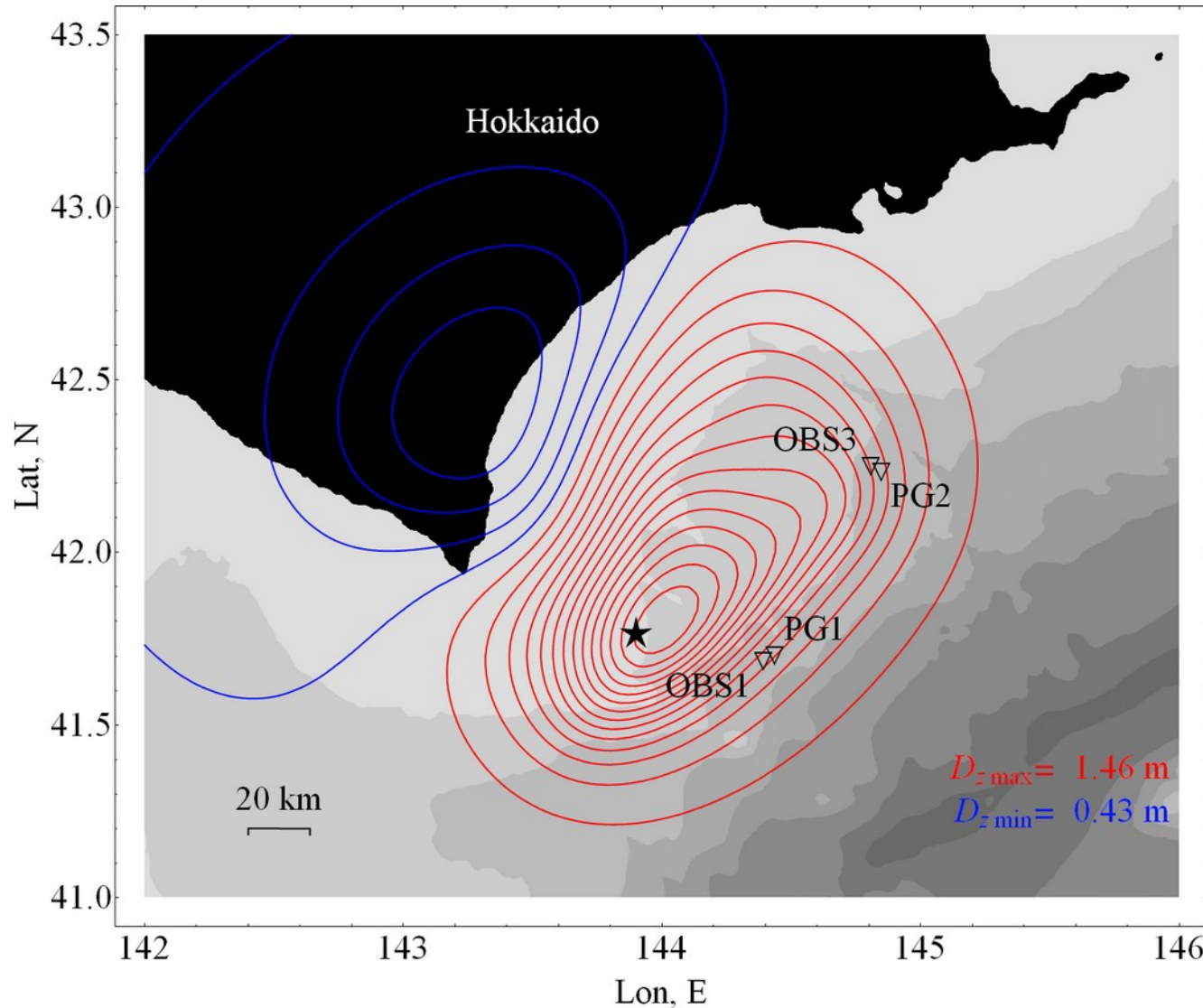
$$\frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} = H$$

$$\frac{\lambda}{4} + 2\frac{\lambda}{2} = H$$

$$\frac{\lambda}{4} + 3\frac{\lambda}{2} = H$$

The 2003 Tokachi-Oki earthquake

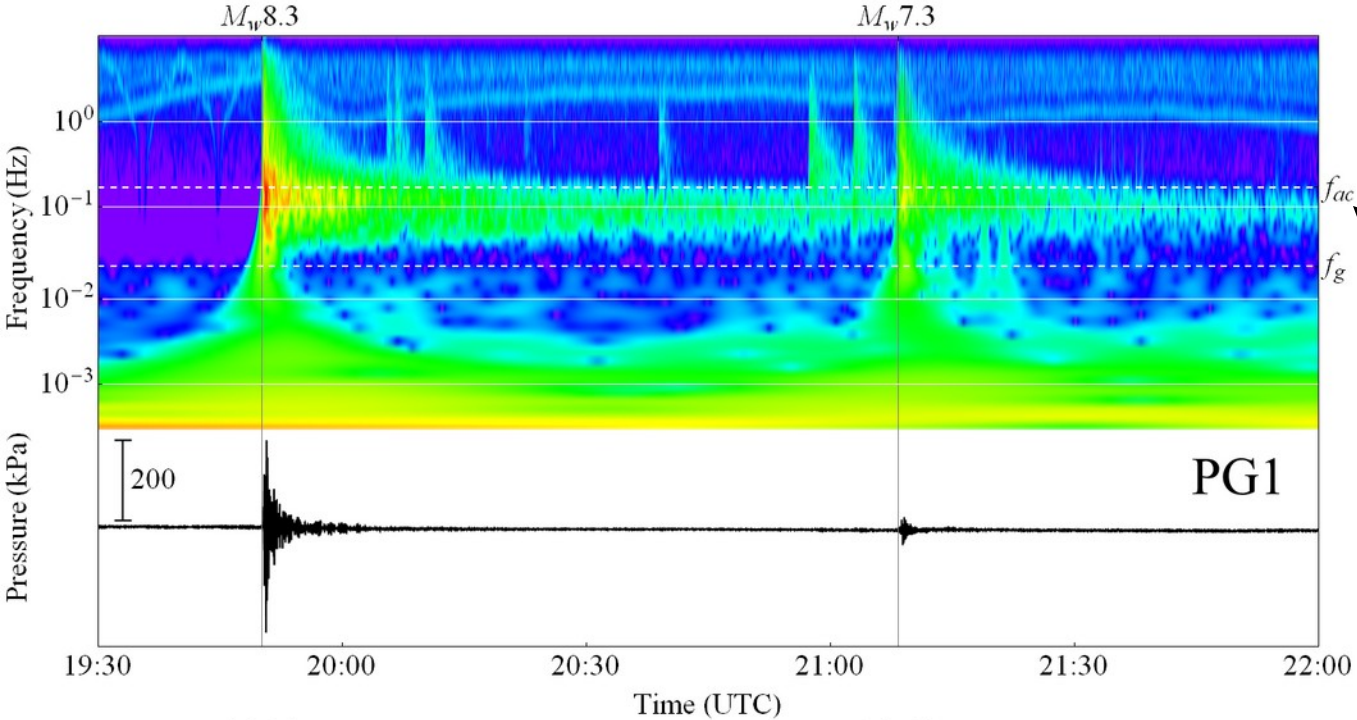
September 25, 19:50:06 UTC, $M_w=8.3$, Depth = 27 km



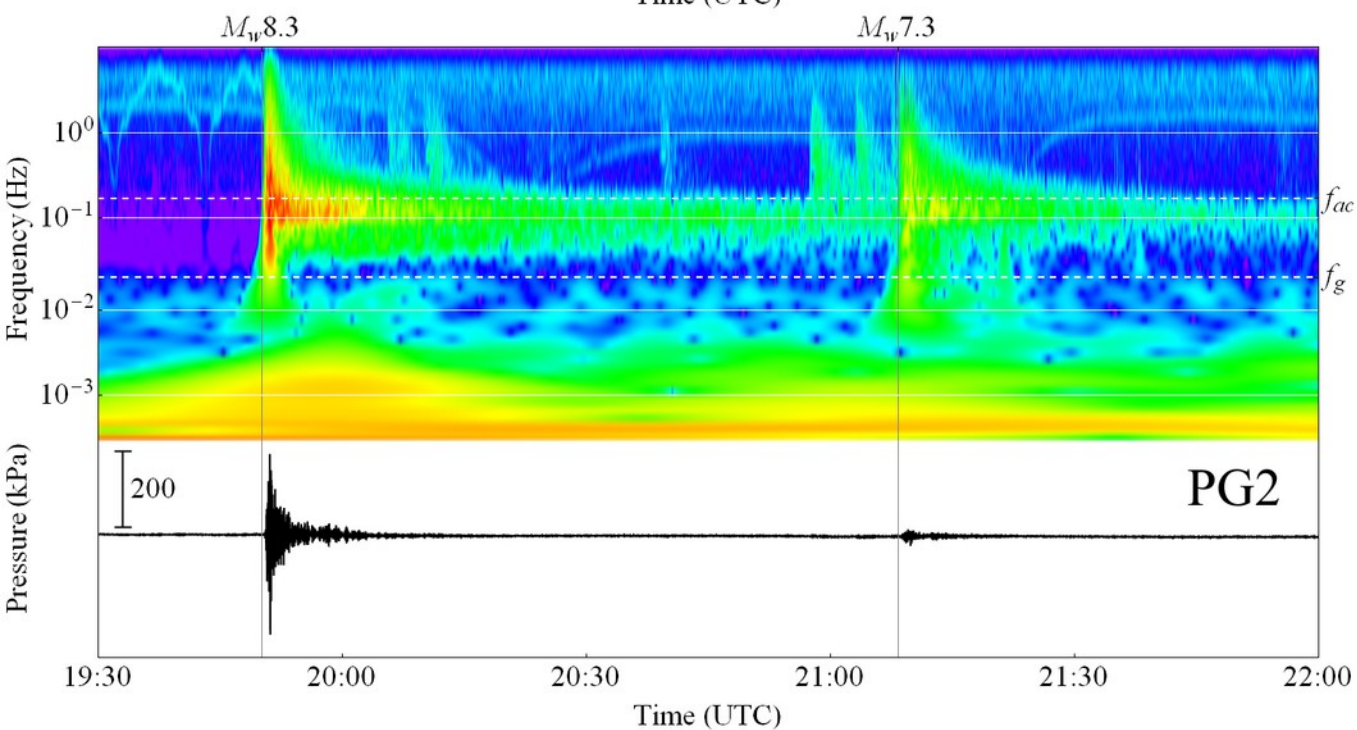
*Maximum
Water Height
4.4 m (GHTD)*

**Kushiro-Tokachi
(JAMSTEC)
ocean-bottom
sensors:**

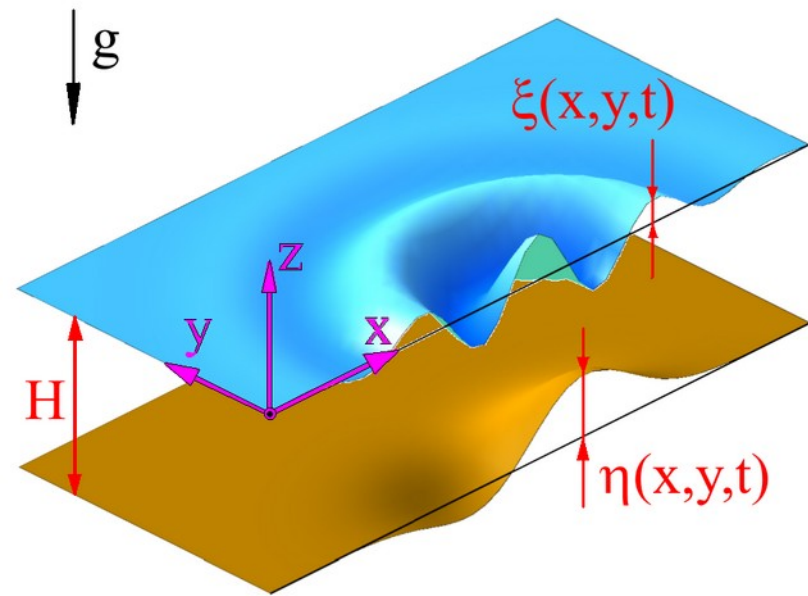
- **Pressure (PG)**
- **Seismometer (OBS)**



$$f_{ac} = \frac{c}{4H}$$



Модель несжимаемой жидкости



$$\frac{p}{\rho g \xi} = \frac{1}{\cosh(kH)}$$

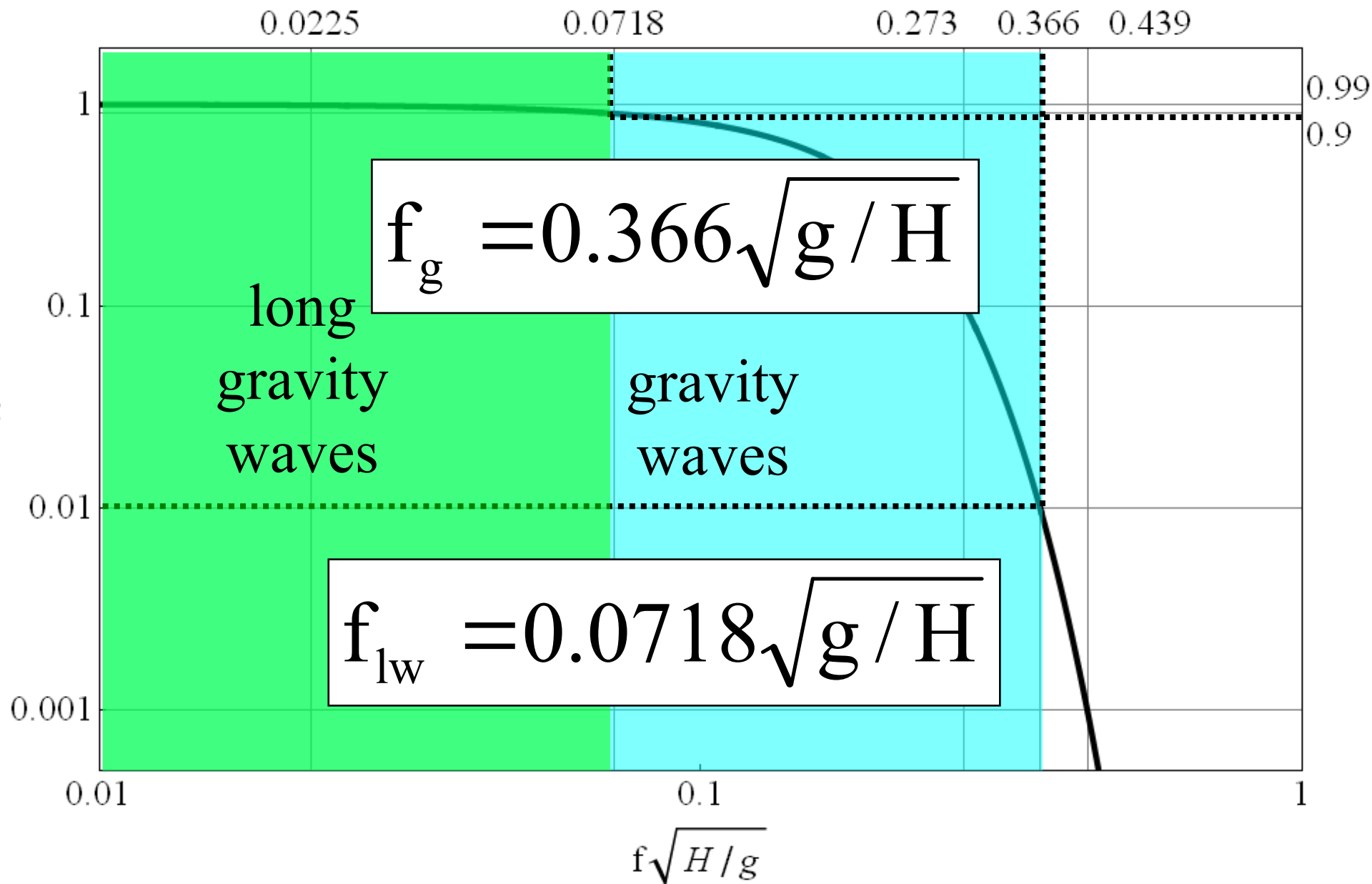
$$\xi(x, y, t) = \frac{1}{8\pi^3} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} dp \int_{-\infty}^{+\infty} dm \int_{-\infty}^{+\infty} dn \frac{p^2 \exp(pt - imx - iny) \Psi(p, m, n)}{\cosh(kH) [gk \tanh(kH) + p^2]}$$

where

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

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

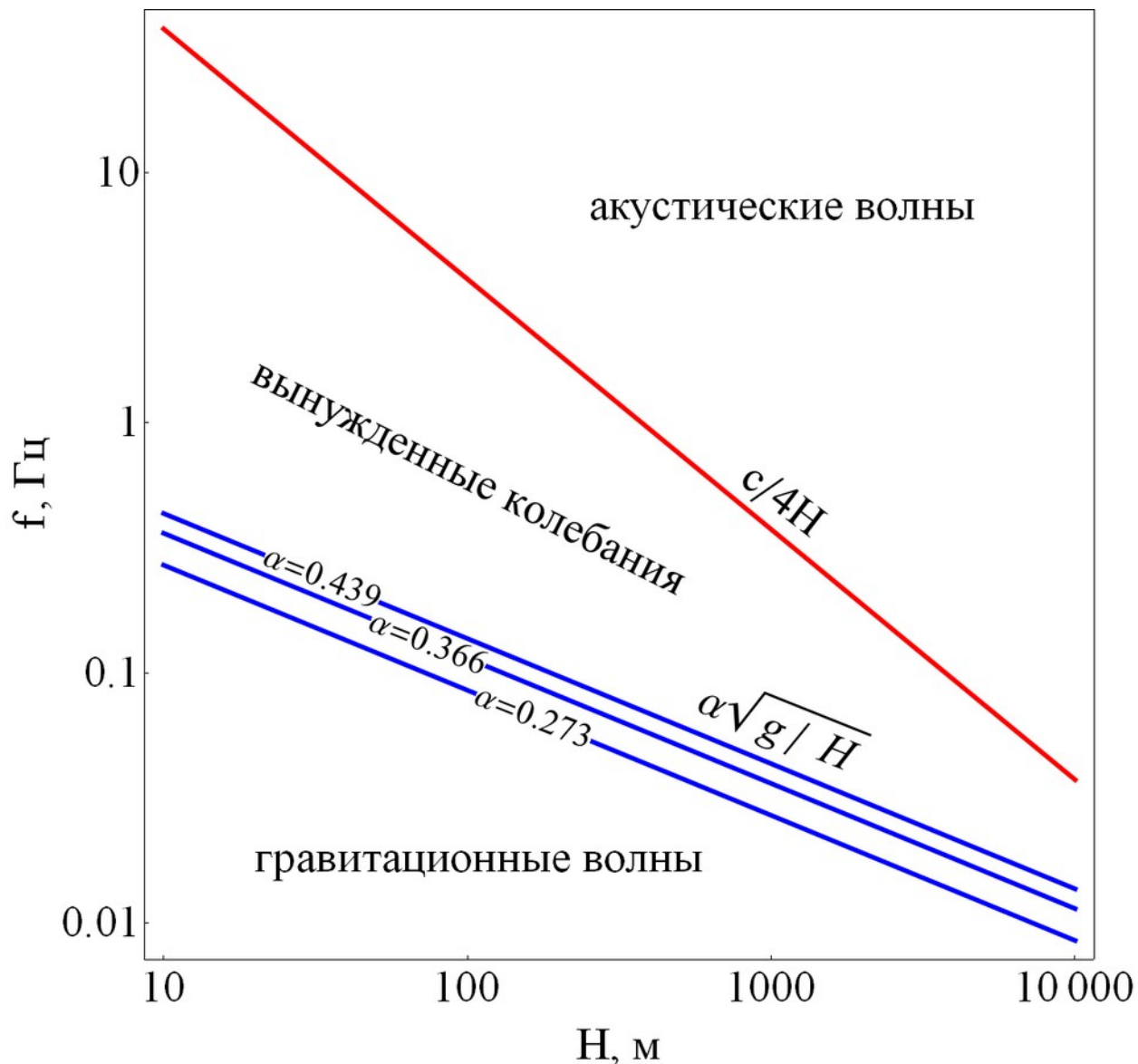
$1 / \cosh(kH)$



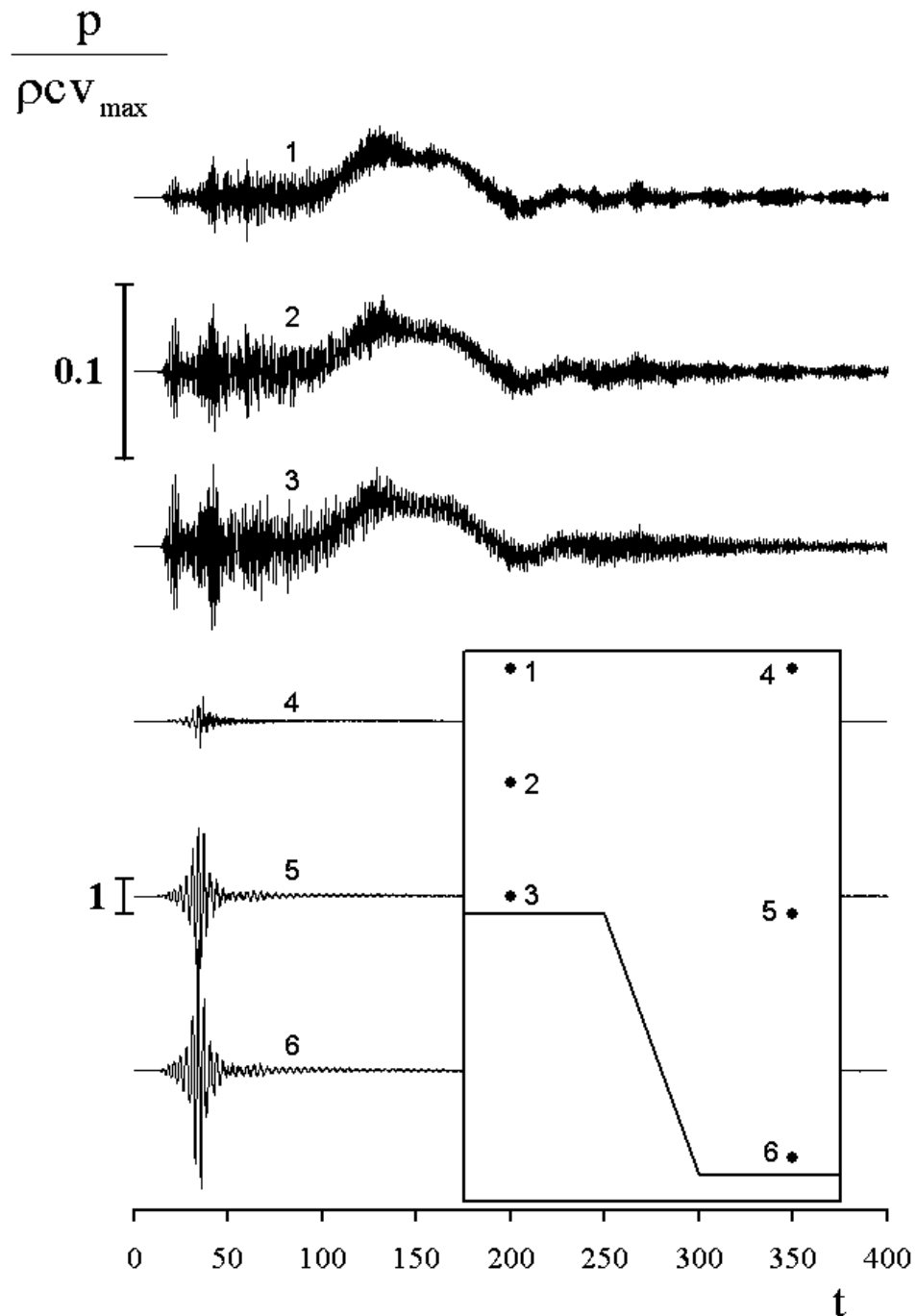
Характер отклика водного слоя на колебания дна в зависимости от частоты колебаний и глубины океана

гравитац.
волны и
акустические
волны
принадлежат
разным
частотным
диапазнам!!!

цунами можно
описывать как
движение
несжимаемой
жидкости

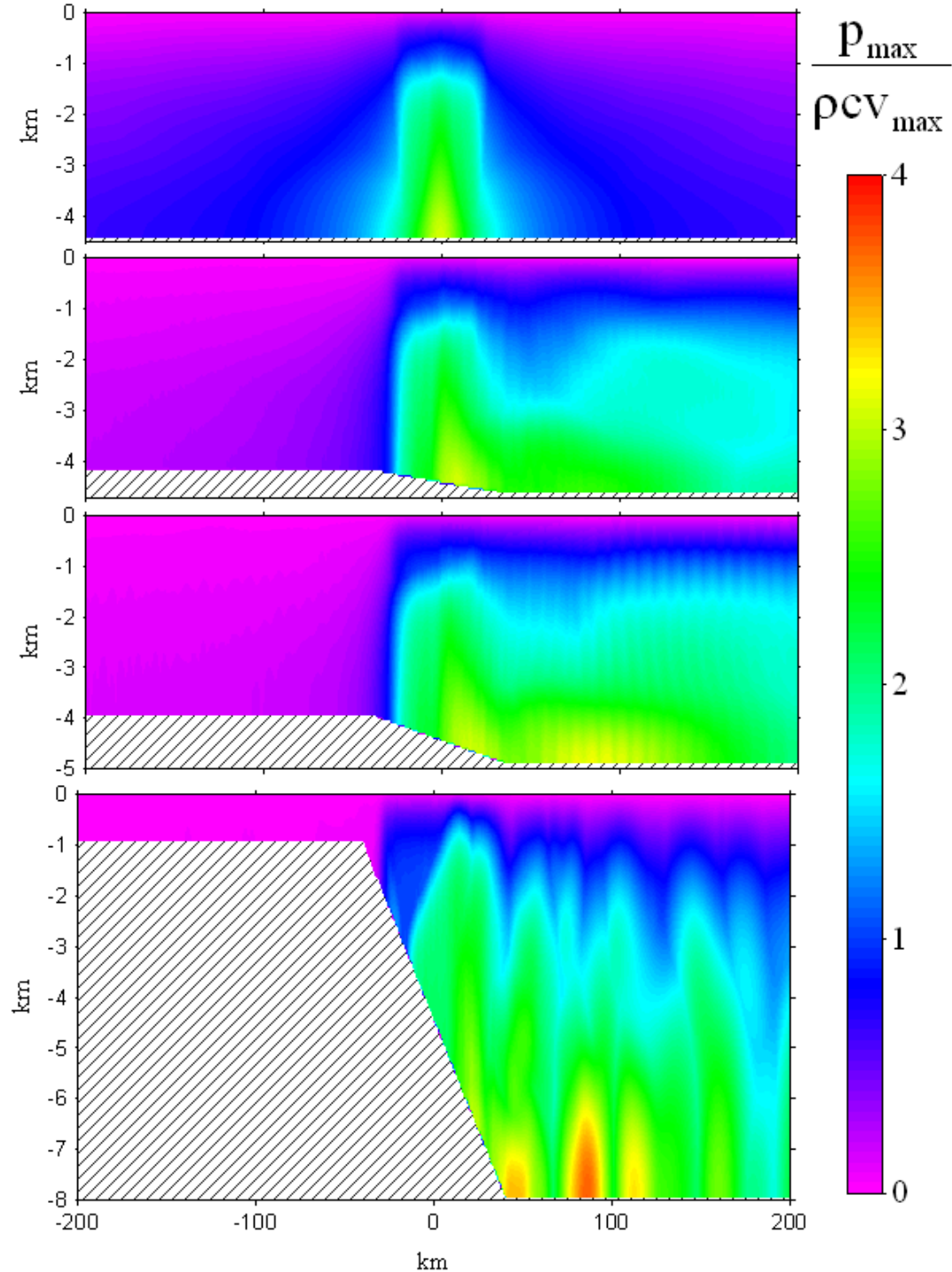


Динамическое
давление,
рассчитанное в
фиксированных
точках, как
функция времени



Распределение максимального динамического давления

на свободной
поверхности
воды амплитуда
давления
нулевая, а на
дне -
наибольшая



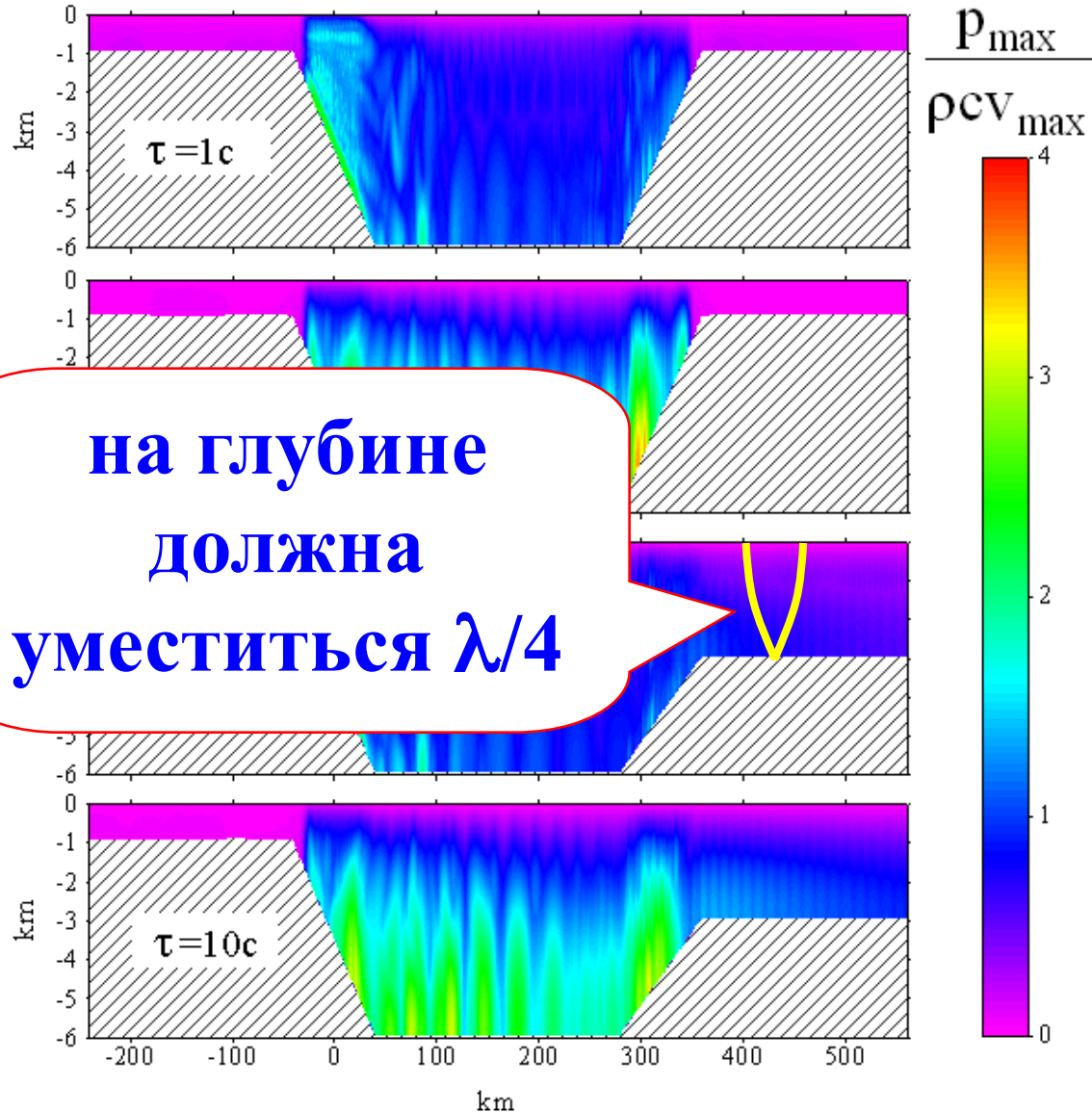
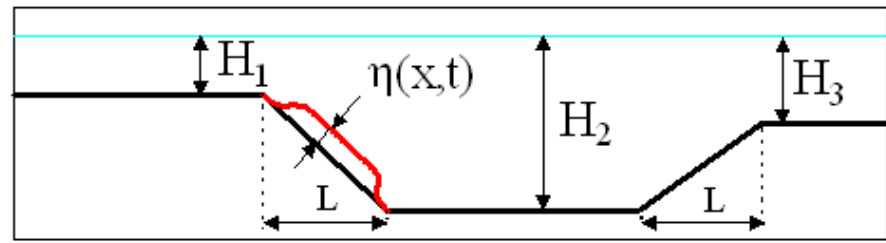
Распределение максимального динамического давления

$$\lambda = cT$$

$$\lambda = c / f$$

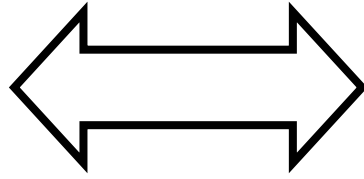
**частота
отсечки:**

$$f_{\min} = \frac{c}{4H}$$



Частота отсечки

$$f_{\min} = \frac{c}{4H}$$



$$H_{\min} = \frac{c}{4f}$$

Критическая глубина для данной частоты

Следствия существования частоты отсечки:

1. Низшая мода упругих колебаний ($k=0$), сформированных движениями дна, не может распространяться вверх по склону – к мелководью;
2. Упругие колебания водного слоя не могут внести прямого вклада в высоту волн на побережье;
3. Упругие колебания могут быть захвачены локальными понижениями дна.



1783, февраль. Калабрийская дуга.

Катастрофическое Калабрийское землетрясение, с которого начался длительный период сейсмической активности на юго-западе Италии продолжительностью в несколько лет.

Описаны необычные явления на море, которые можно рассматривать в качестве краткосрочных предвестников землетрясения. В первых числах февраля вблизи Мессины и в других местах у поверхности моря стала появляться в изобилии глубоководная рыбка чичирелла, обычно не покидающая дно и зарывающаяся в донный ил.

1887, февраль (март). Лигурийское море, Италия, Франция.

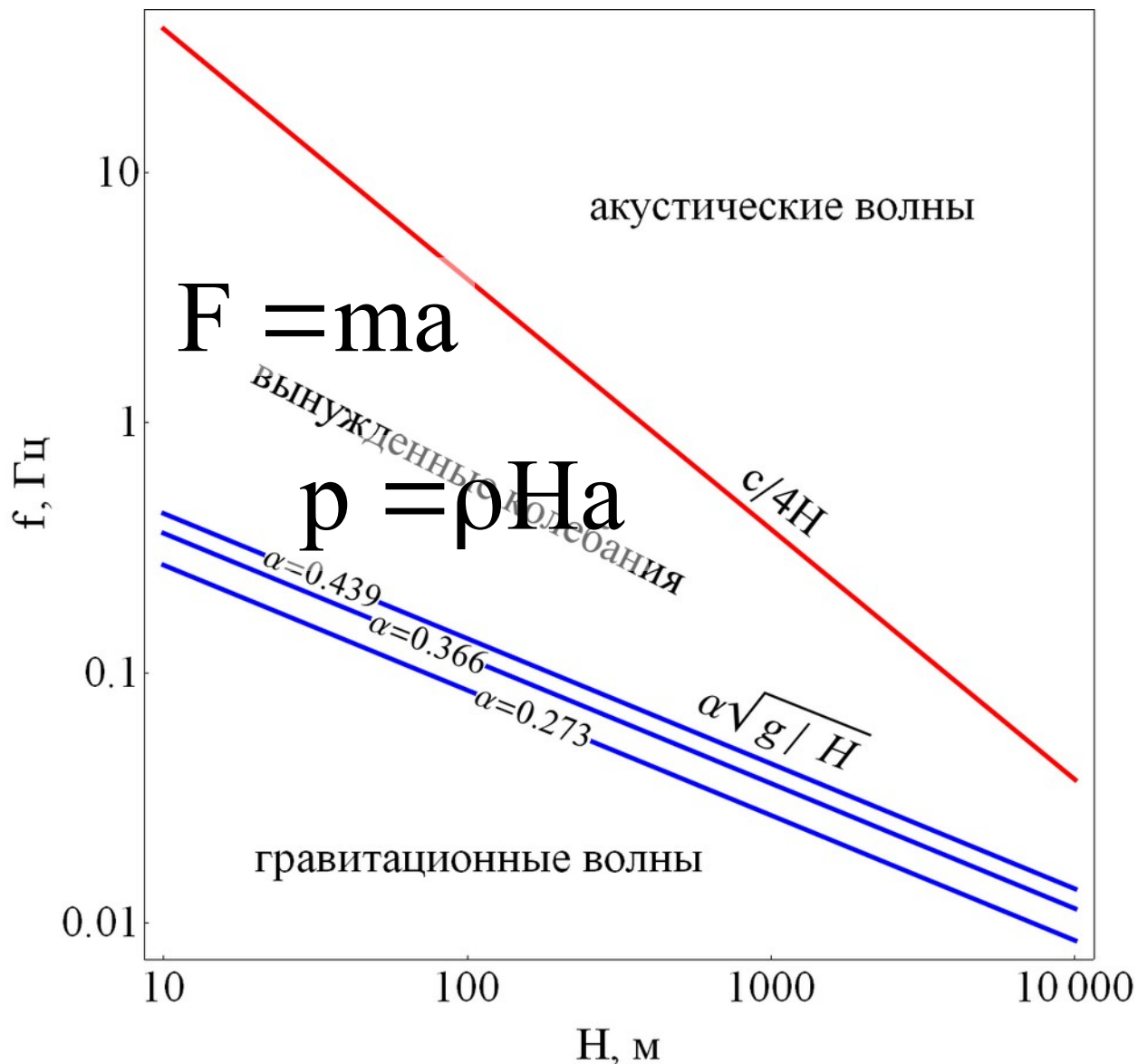
Сильное землетрясение, охватившее площадь 570 тыс. кв. км. На пляжах Ниццы, Сан-Ремо, Савоны находили выброшенных на берег глубоководных рыб или рыб, редких в зимний сезон.

[Соловьев и др. 1997]

Характер отклика водного слоя на колебания дна в зависимости от частоты колебаний и глубины океана

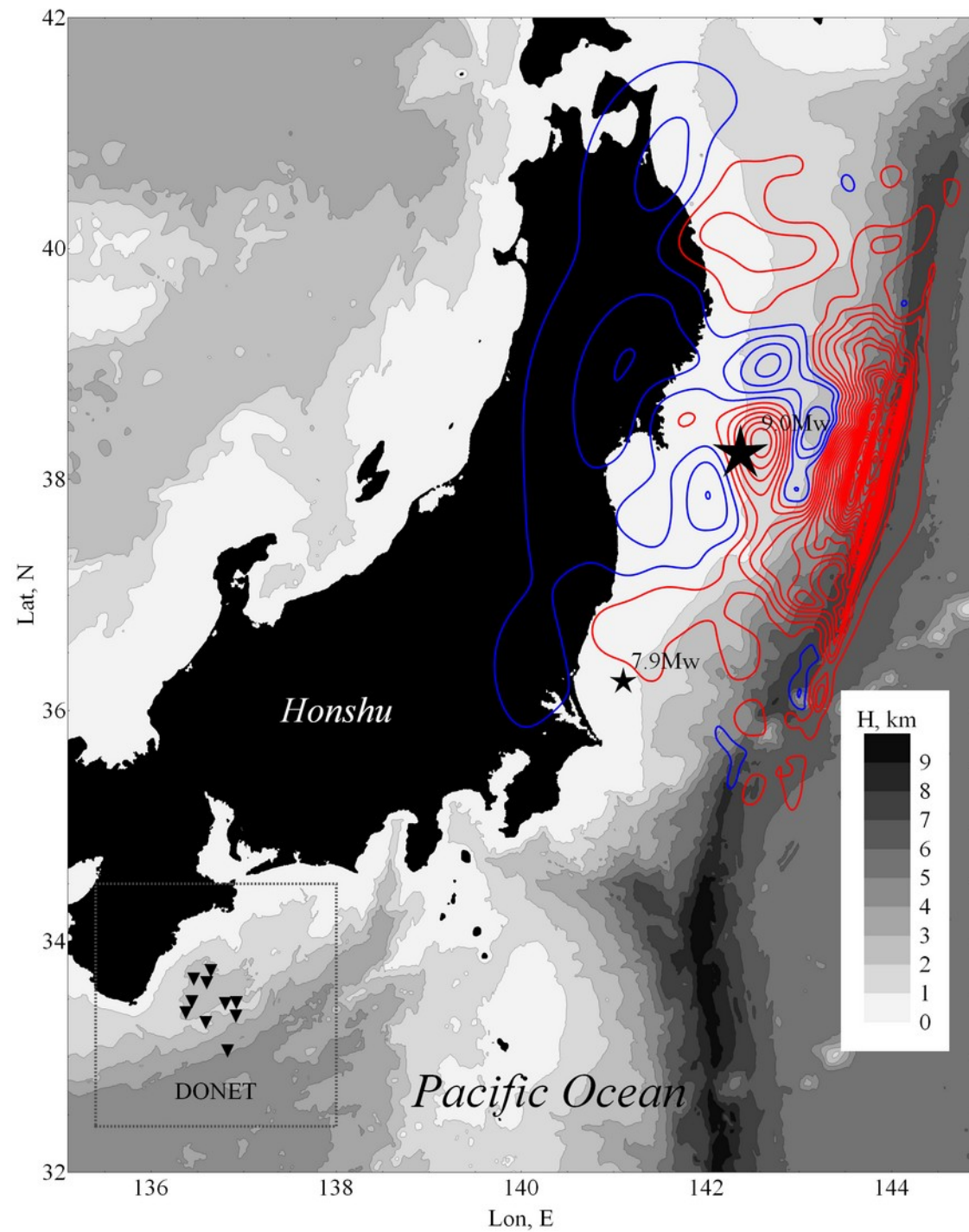
гравитац.
волны и
акустические
волны
принадлежат
разным
частотным
диапазонам!!!

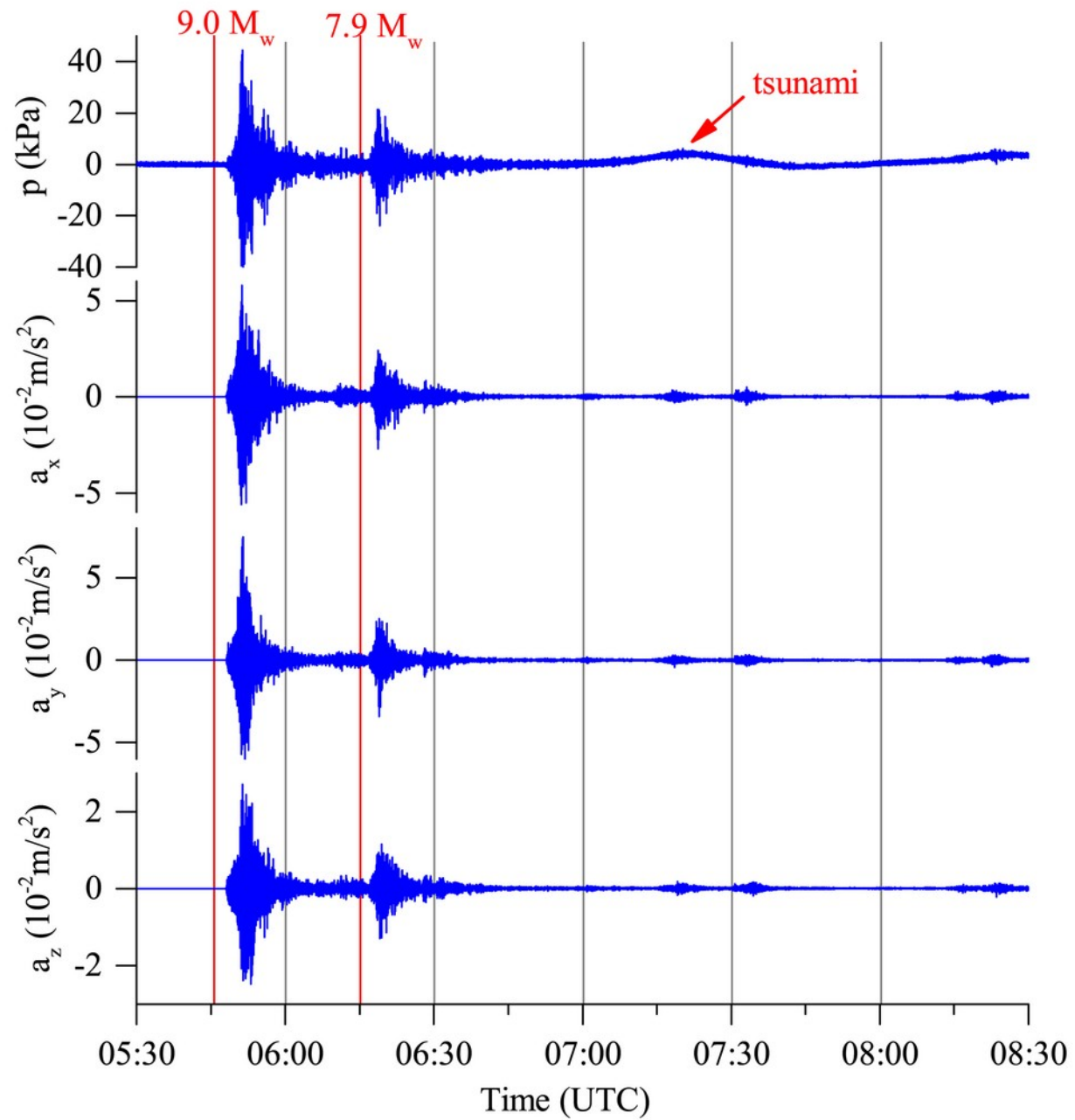
цунами можно
описывать как
движение
несжимаемой
жидкости



The 2011 Tohoku-oki earthquake and DONET-1 stations

Расстояние между
датчиками OBS и
PG < 10 m

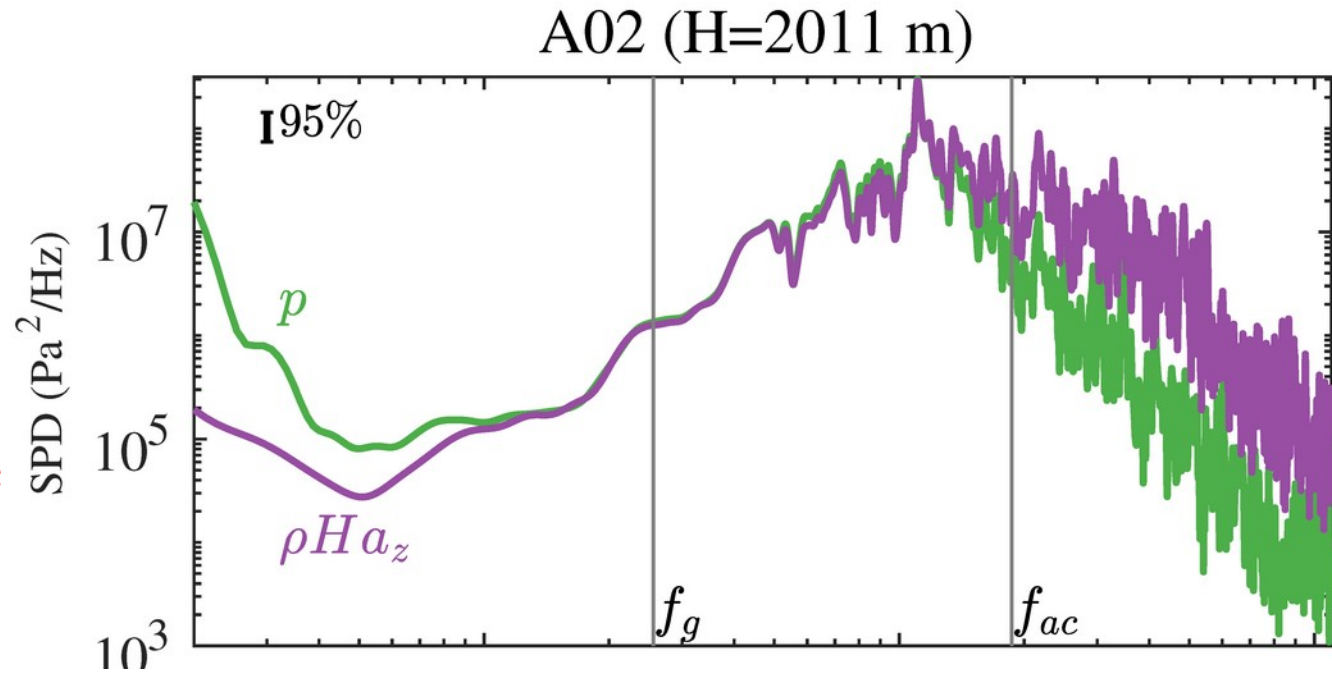




PG & OBS spectra

В частотном
диапазоне
«вынужденные
колебания»
выполняется
соотношение

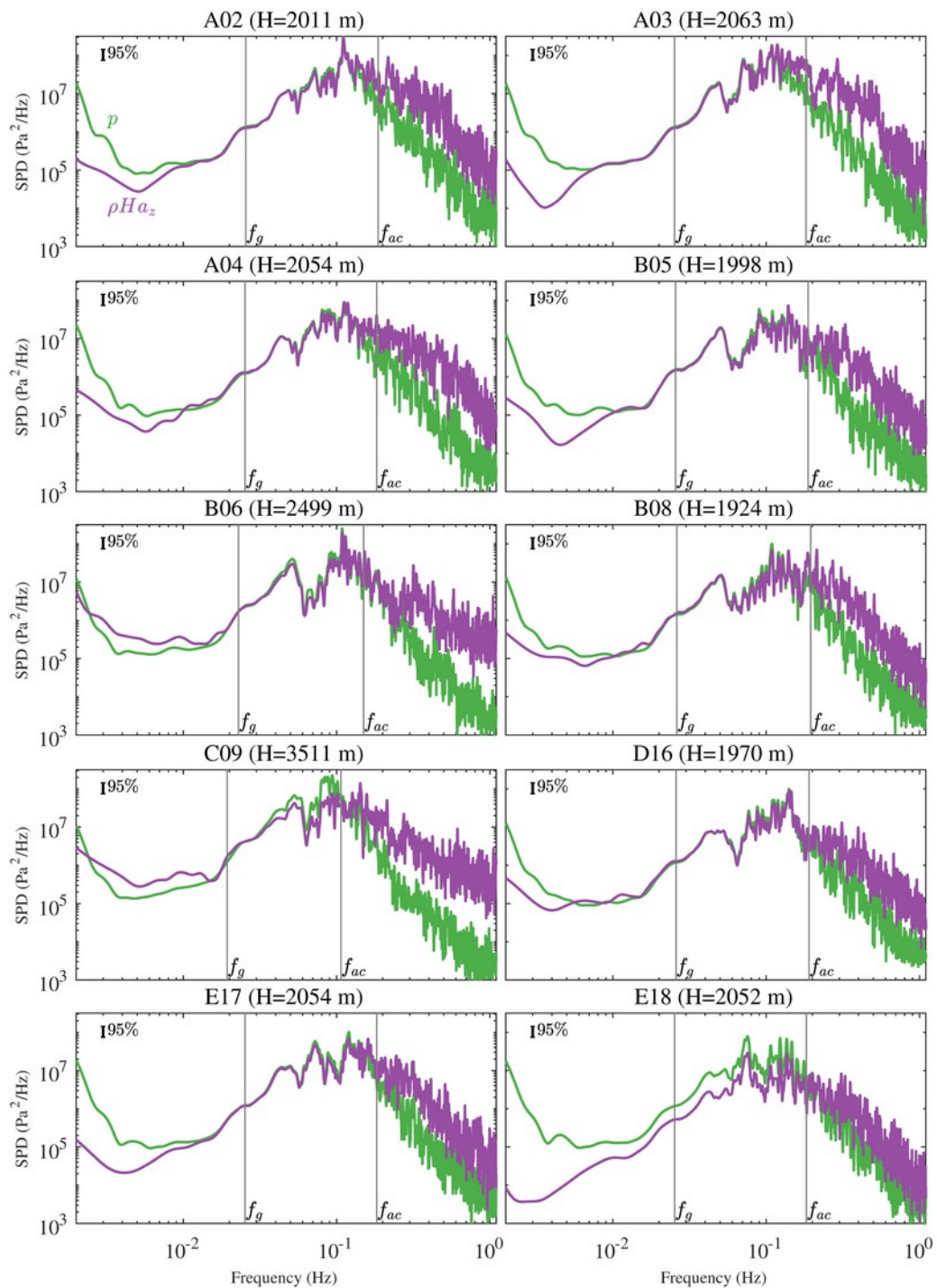
$$p = \rho N a_z$$

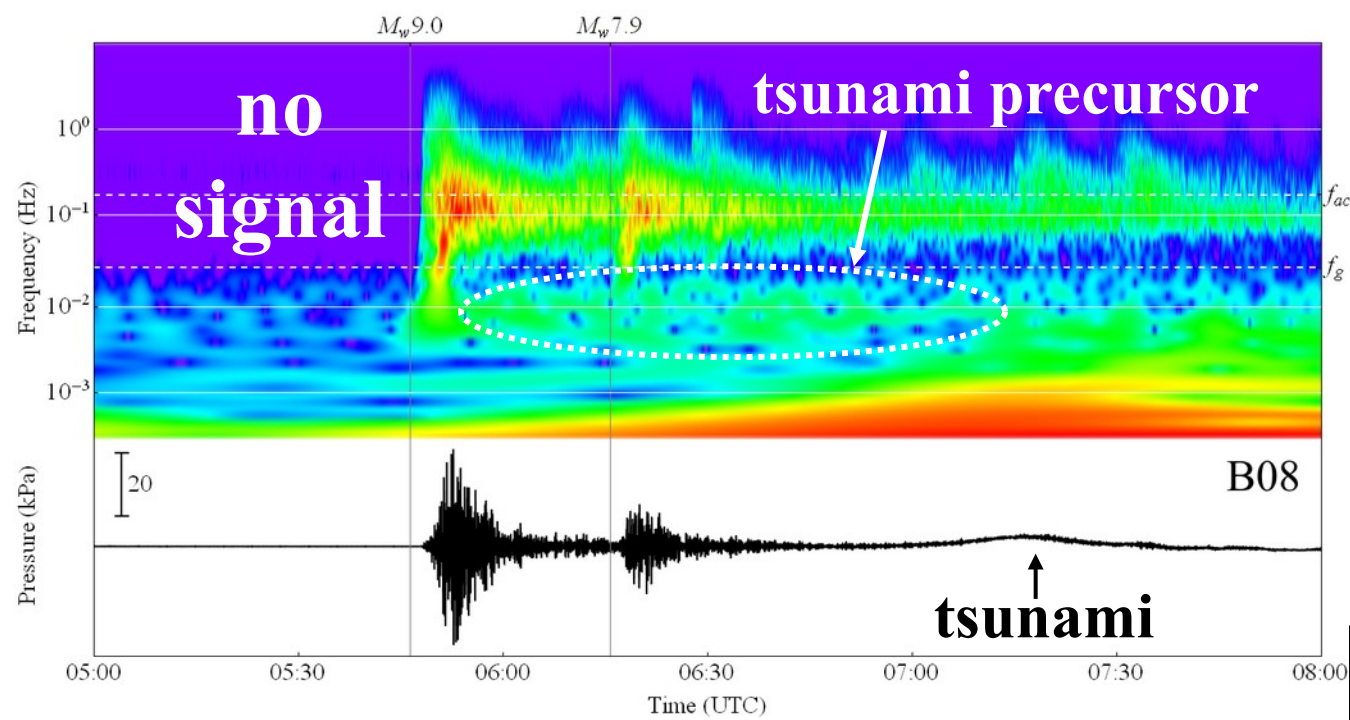


PG & OBS spectra

В частотном диапазоне «вынужденные колебания» выполняется соотношение

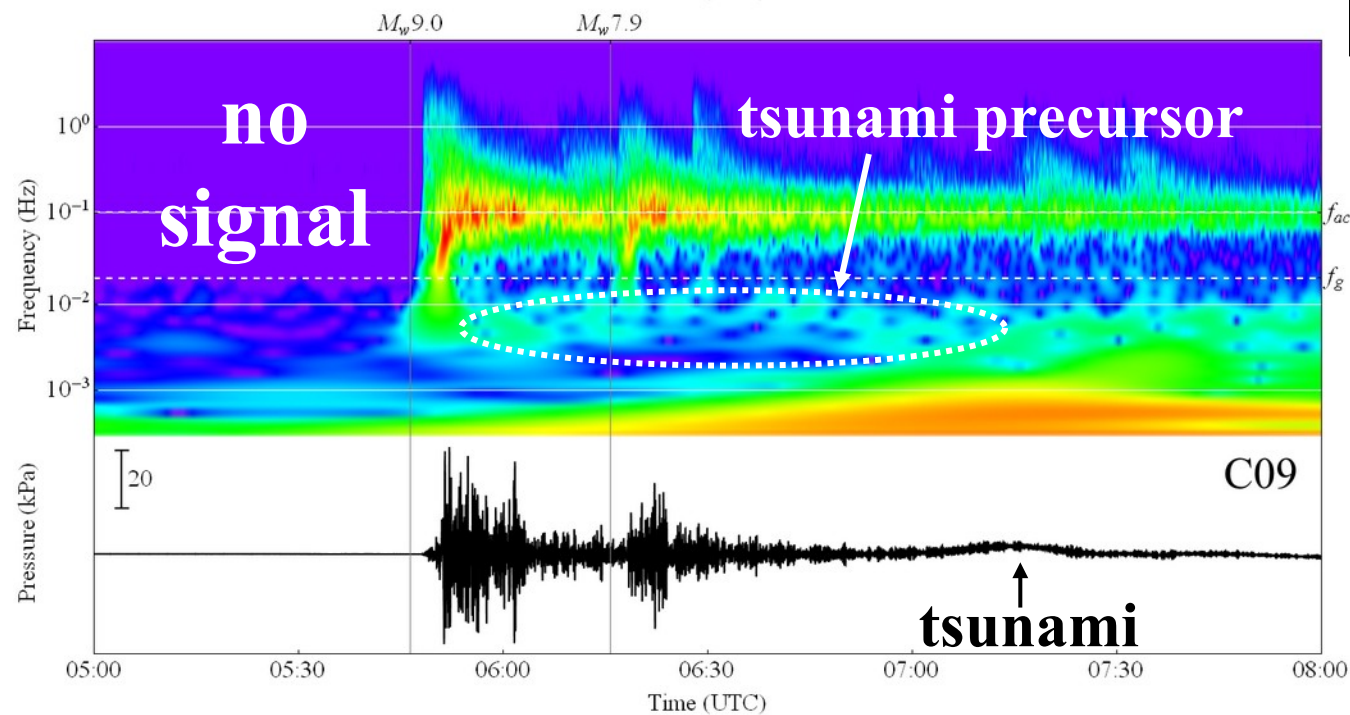
$$p = \rho H a_z$$





DONET-1: PG signals

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



**tsunami
precursor**

