

Носов Михаил Александрович

Физика цунами

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

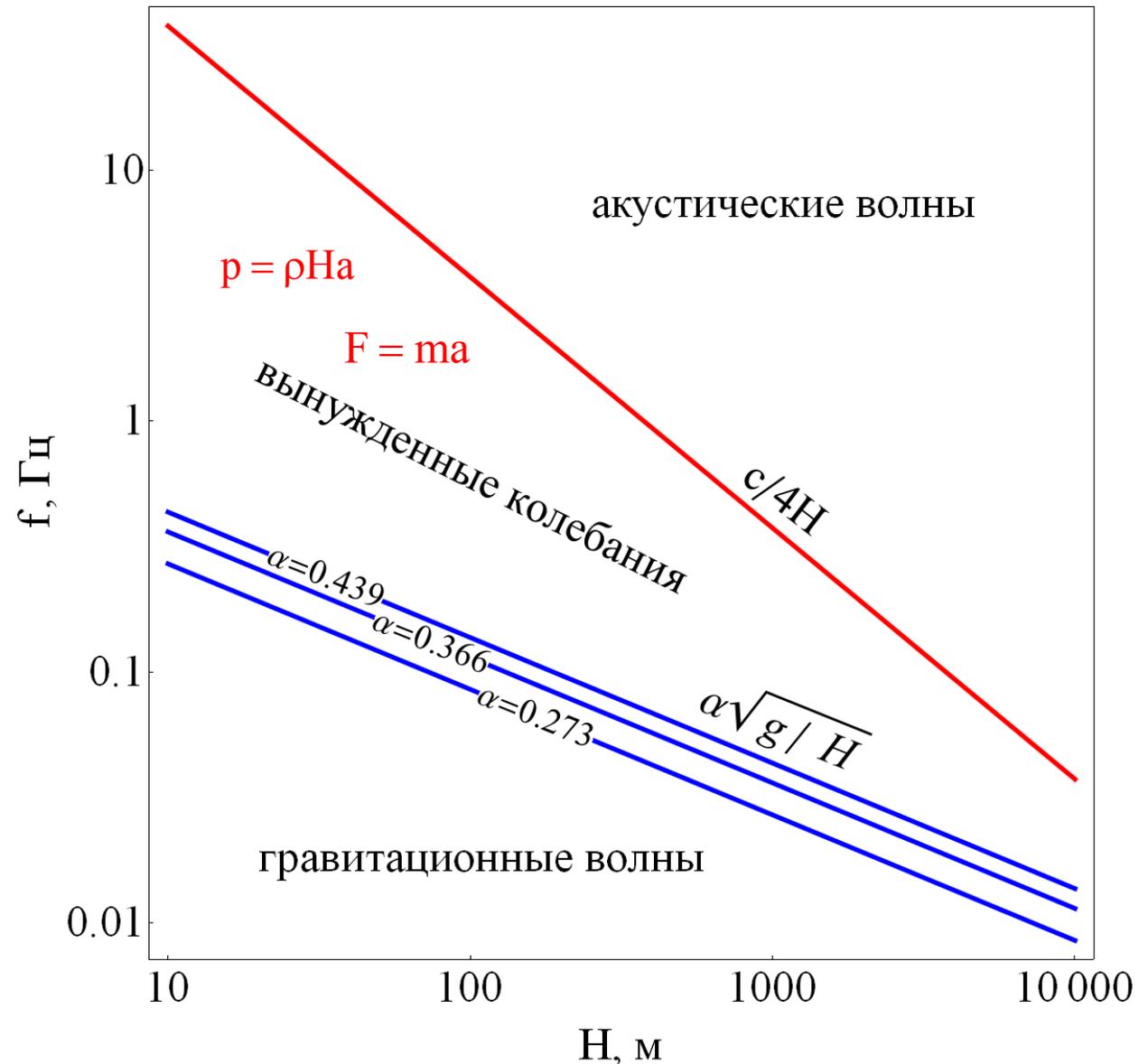
Лекция №12



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

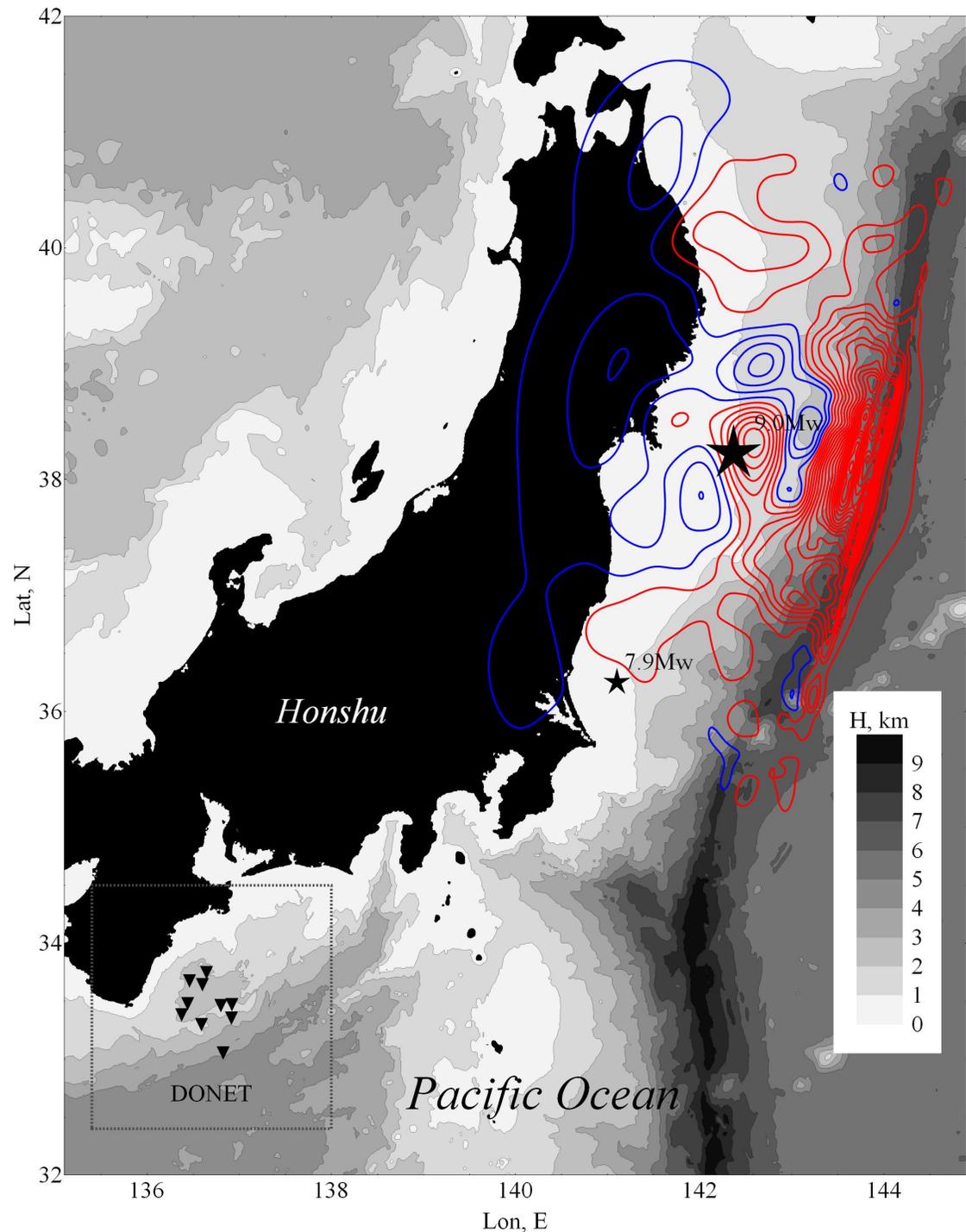
гравитац.
волны и
акустические
волны
принадлежат
разным
частотным
диапазонам!!!

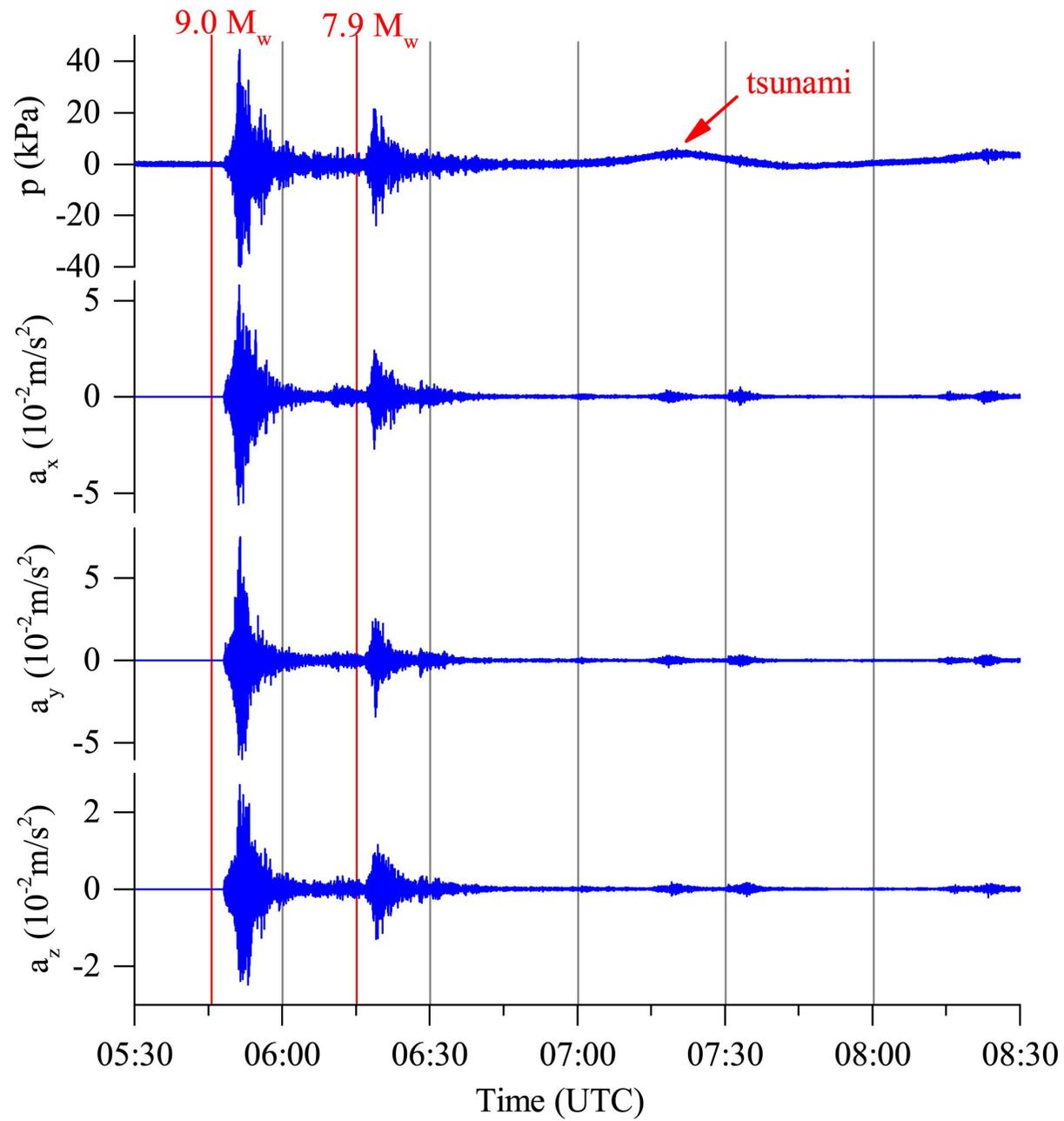
цунами можно
описывать как
движение
несжимаемой
жидкости



Эпицентр землетрясения, очаг цунами 11.03.2011 и донные обсерватории DONET

каждая
обсерватория
оборудована OBS
(акселерометры) и
PG (датчик
давления), которые
расположены на
расстоянии < 10 м

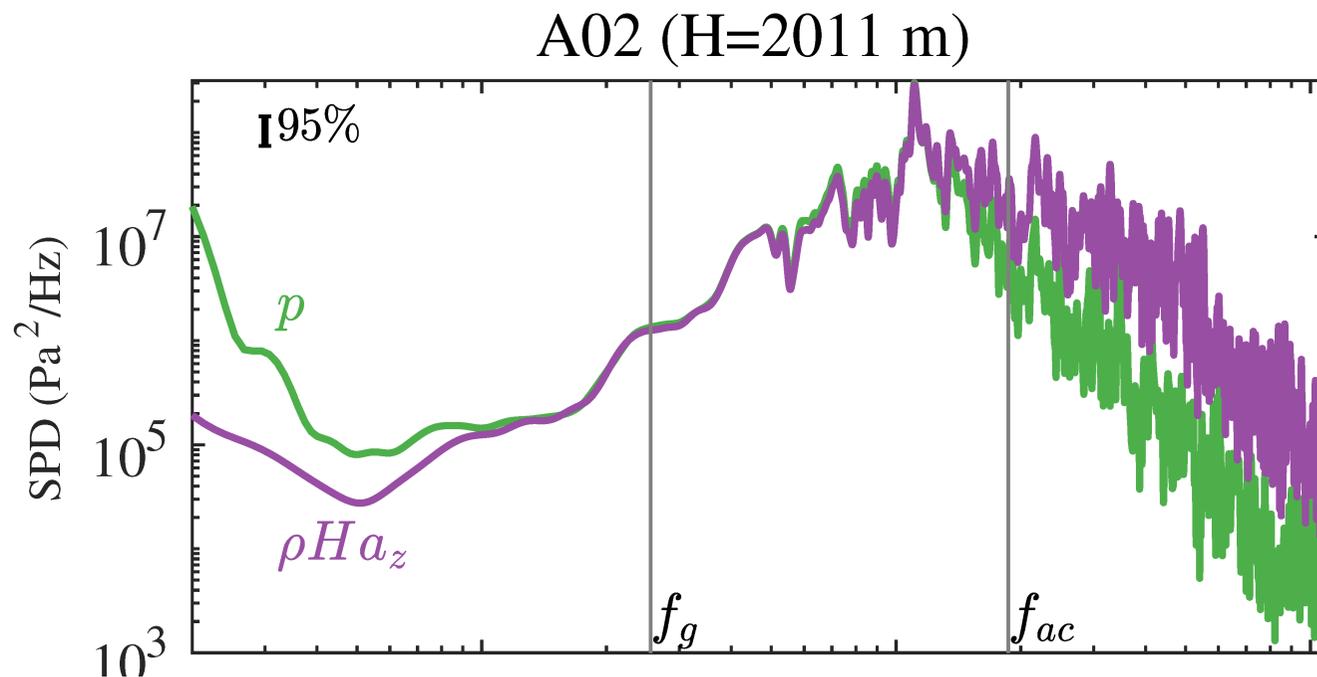




PG & OBS спектры

В частотном
диапазоне
«вынужденные
колебания»
выполняется
соотношение

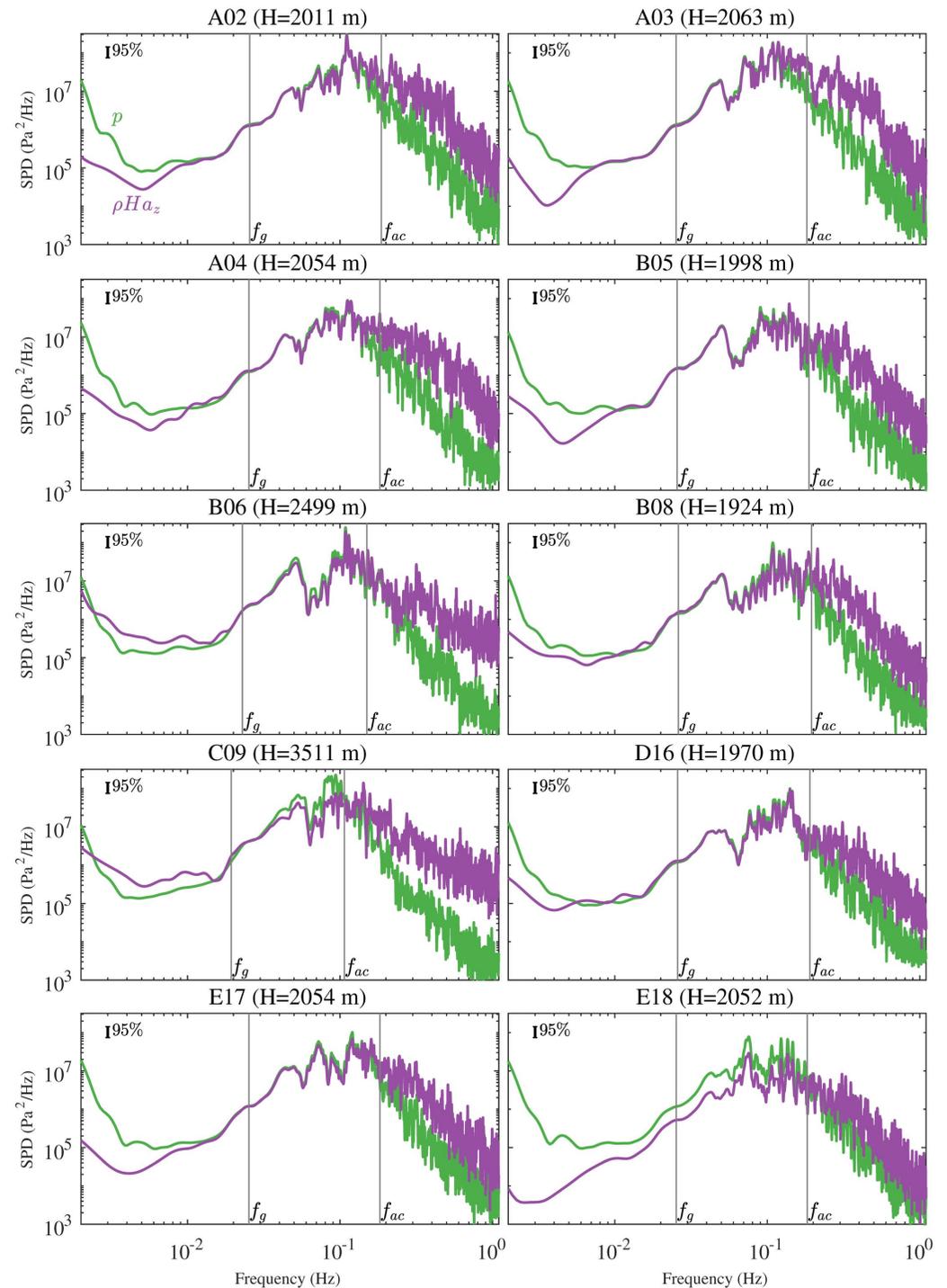
$$p = \rho N a_z$$



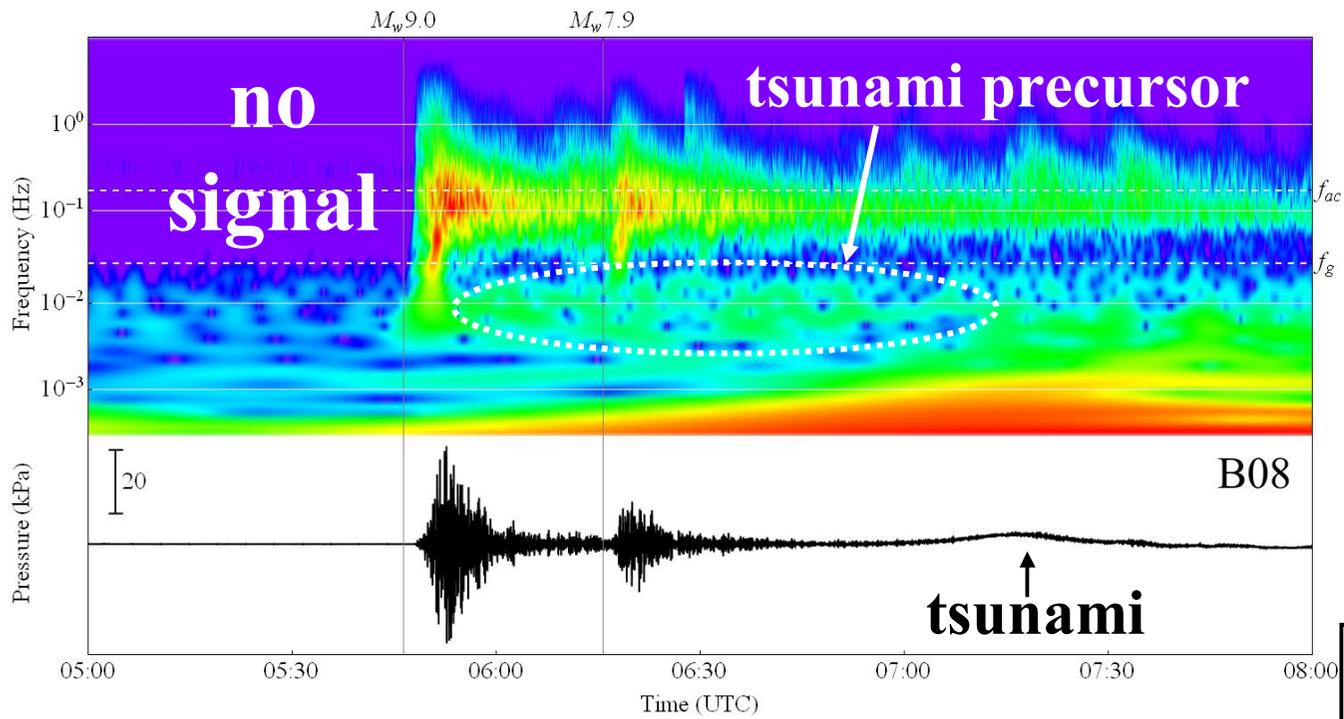
PG & OBS спектры

В частотном
диапазоне
«вынужденные
колебания»
выполняется
соотношение

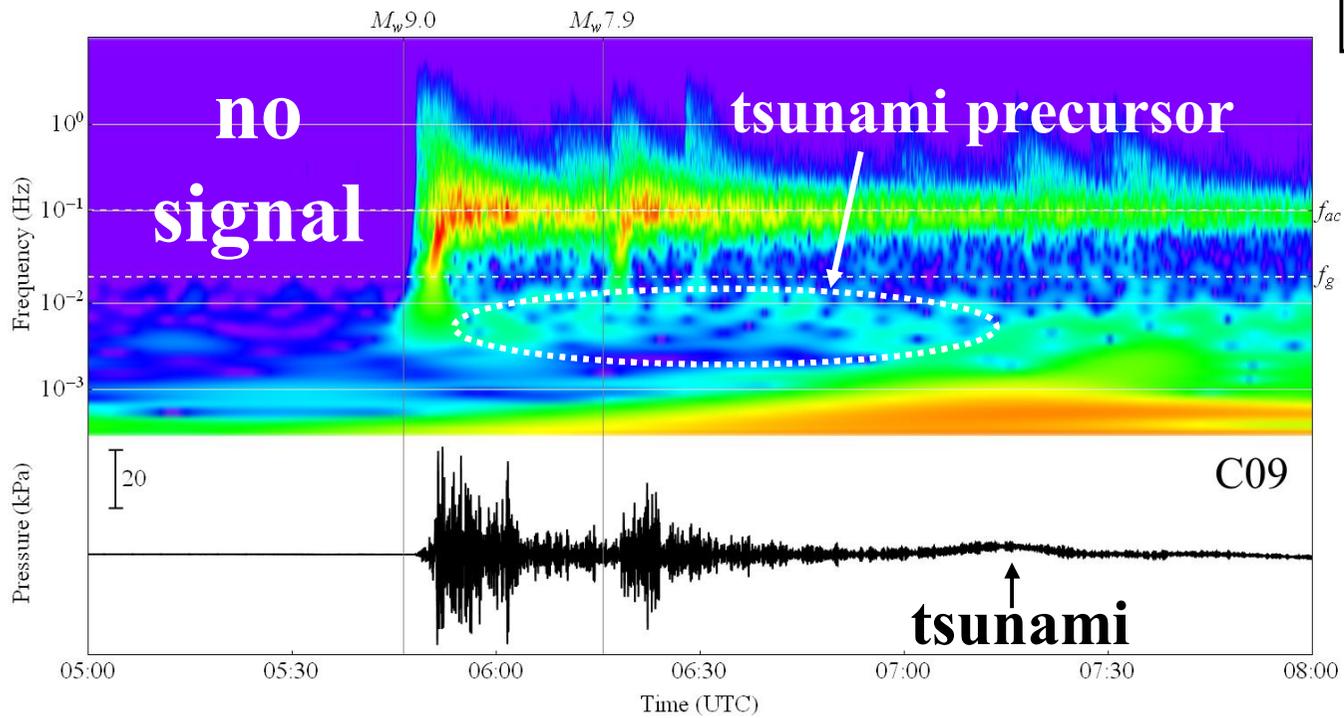
$$p = \rho N a_z$$



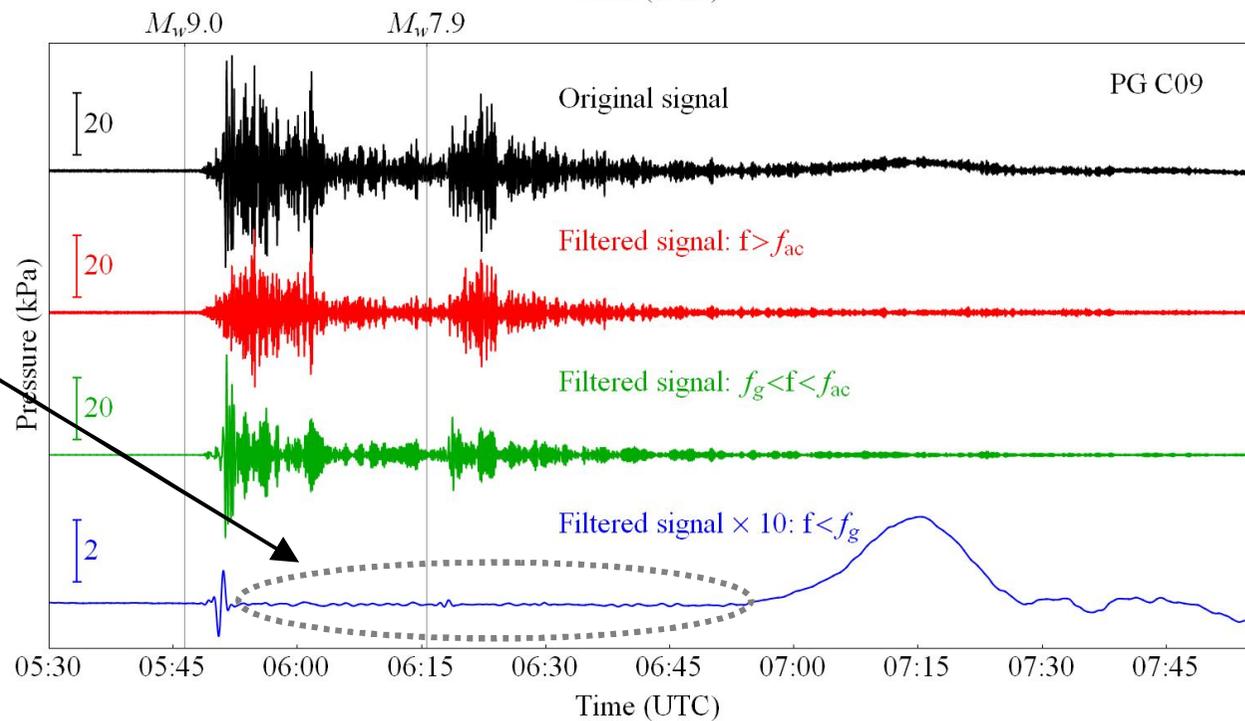
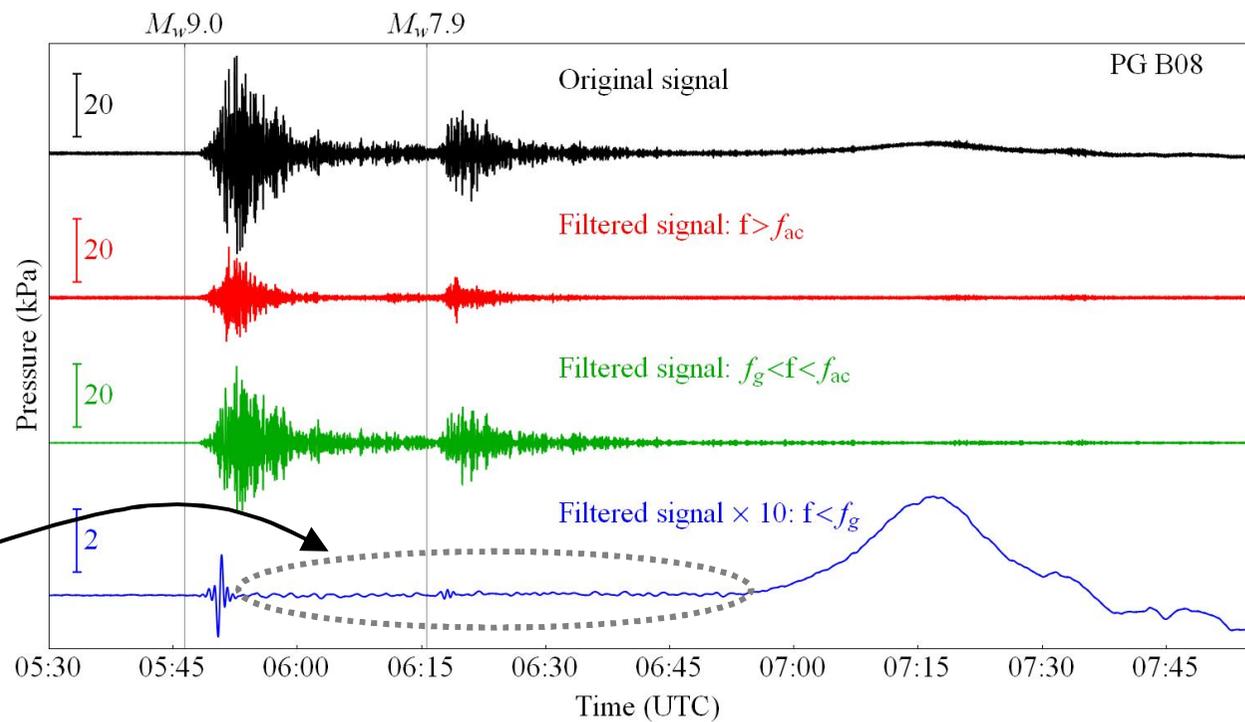
DONET-1: PG signals



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



tsunami precursor



**Численные
модели
динамики
цунами**

[Aida 1969, Abe 1978]

первые численные
модели цунами

[Марчук и др., 1983]

Неполный список существующих моделей...

TUNAMI [Imamura et al. 2006]

[Fine et al. 2005]

MOST [Titov et al. 2003]

[Fujii&Satake 2007]

COMCOT [Liu et al. 1998]

[Kowalik et al 2007]

NAMI DANCE [Zaytsev et al. 2010]

[Nicolisky et al. 2011]

MGC [Shokin et al. 2008]

[Nosov et al. 2012]

TsunAWI [Harig et al. 2008]

[Popinet 2012]

GeoClaw [LeVeque et al. 2011]

[Piatanesi et al. 1999]

FUNWAVE [Shi et al. 2001, 2012]

[Walters 2006]

COULWAVE [Lynett et al. 2003]

[Zhang&Baptista 2008]

GloBouss [Løvholt et al. 2010]

[Androsov et al. 2011]

JAGURS [Baba et al., 2017]

[Ma et al., 2012]

Численные модели цунами

2D

**вертикально-
интегрированные**

**широко
применяются для
практических целей**

3D

**вертикально-
разрешающие**

**редко используются,
преимущественно
для исследований**

2D

**Без учета
дисперсии**
*(длинные
волны)*

**TUNAMI
MOST
MGC
TsunAWI**

...

**Учет слабой
дисперсии**
*(приближение
Буссинеска)*

**FUNWAVE
COULWAVE
GloBouss
JAGURS**

...

Дисперсионное соотношение для гравитац. волн

$$\omega^2 = gk \tanh(kH)$$

масштаб
времени

$$(H/g)^{1/2}$$

$$\omega^* = \omega(H/g)^{1/2}$$

масштаб
длин

$$H$$

$$k^* = kH$$

Дисперсионное соотношение в безразмерном виде

$$\omega^{*2} = k^* \tanh(k^*)$$

знак * далее опустим

$$\omega^2 = k \tanh(k)$$

$$\omega = \sqrt{k \tanh(k)} \approx k - \frac{k^3}{6} + \dots$$

Длинные волны

**Приближение
Буссинеска**

$$C_{ph} = \frac{\omega}{k} \quad C_{gr} = \frac{d\omega}{dk}$$

**длинные
волны без
дисперсии**

$$\omega = k$$

$$C_{gr} = C_{ph} = 1$$

$$\omega = k - \frac{k^3}{6}$$

$$C_{gr} = 1 - k^2 / 2$$

$$C_{ph} = 1 - k^2 / 6$$

**длинные
волны со
слабой
дисперсией**

Уравнения нелинейной теории длинных волн

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} - \frac{C_B}{D} u \sqrt{u^2 + v^2} + fv$$

угловая скорость вращения Земли

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{C_B}{D} v \sqrt{u^2 + v^2} + fu$$

широта

$$f = 2\omega \sin \varphi$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [D u] + \frac{\partial}{\partial y} [D v] = 0$$

параметр Кориолиса

$$D(x, y, t) = H(x, y) + \xi(x, y, t)$$

коэффициент Маннинга

$$C_B = 0.0025 \text{ или } C_B = gn^2 / D^{1/3}$$

$$n = 0.025 \text{ с / м}^{1/3}$$

Начальные условия:

$$\xi(x, y, t = 0) = \xi_0(x, y)$$

$$u(x, y, t = 0) = 0$$

$$v(x, y, t = 0) = 0$$

**начальное
возвышение при
нулевом поле
скорости**

Граничные условия:

$$z = -H_0 : \quad (\vec{v}, \vec{n}) = 0$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial \vec{n}} = 0$$

**условие непротекания
(отражения) на
береговой линии**

Методы решения уравнений

Метод конечных разностей
(FDM)

структурированные (регулярные)
сетки & вложенные сетки

TUNAMI
MOST
NAMI DANCE
MGC
...

Метод конечных элементов
(FEM)

неструктурированные сетки

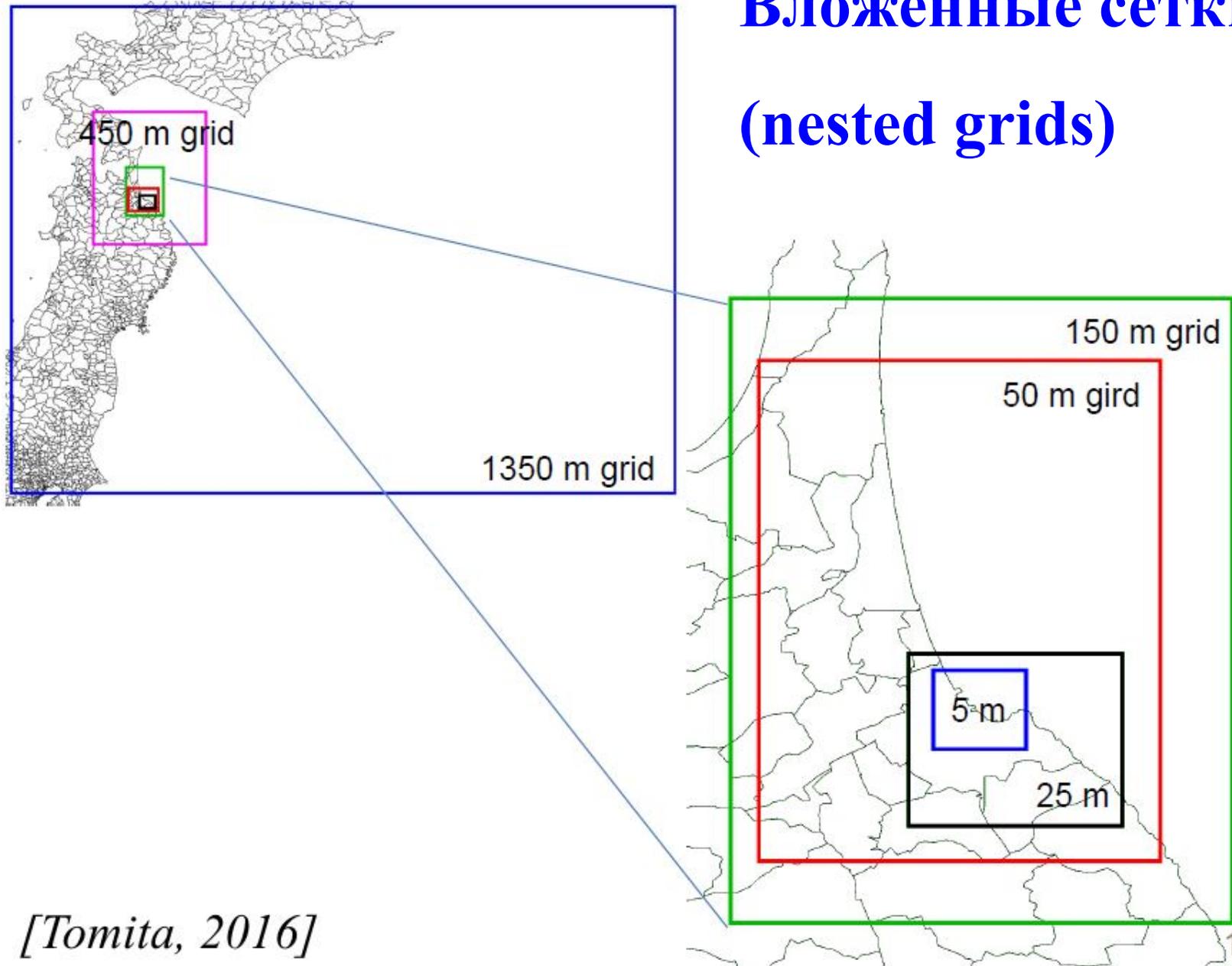
[Piatanesi et al. 1999]
[Walters 2006]
[Harig et al. 2008]
[Zhang&Baptista 2008]
[Androsov et al. 2011]
...

Адаптивные сетки

[LeVeque et al. 2011] [Popinet 2012]

динамически адаптивные сетки (адаптация под решение)

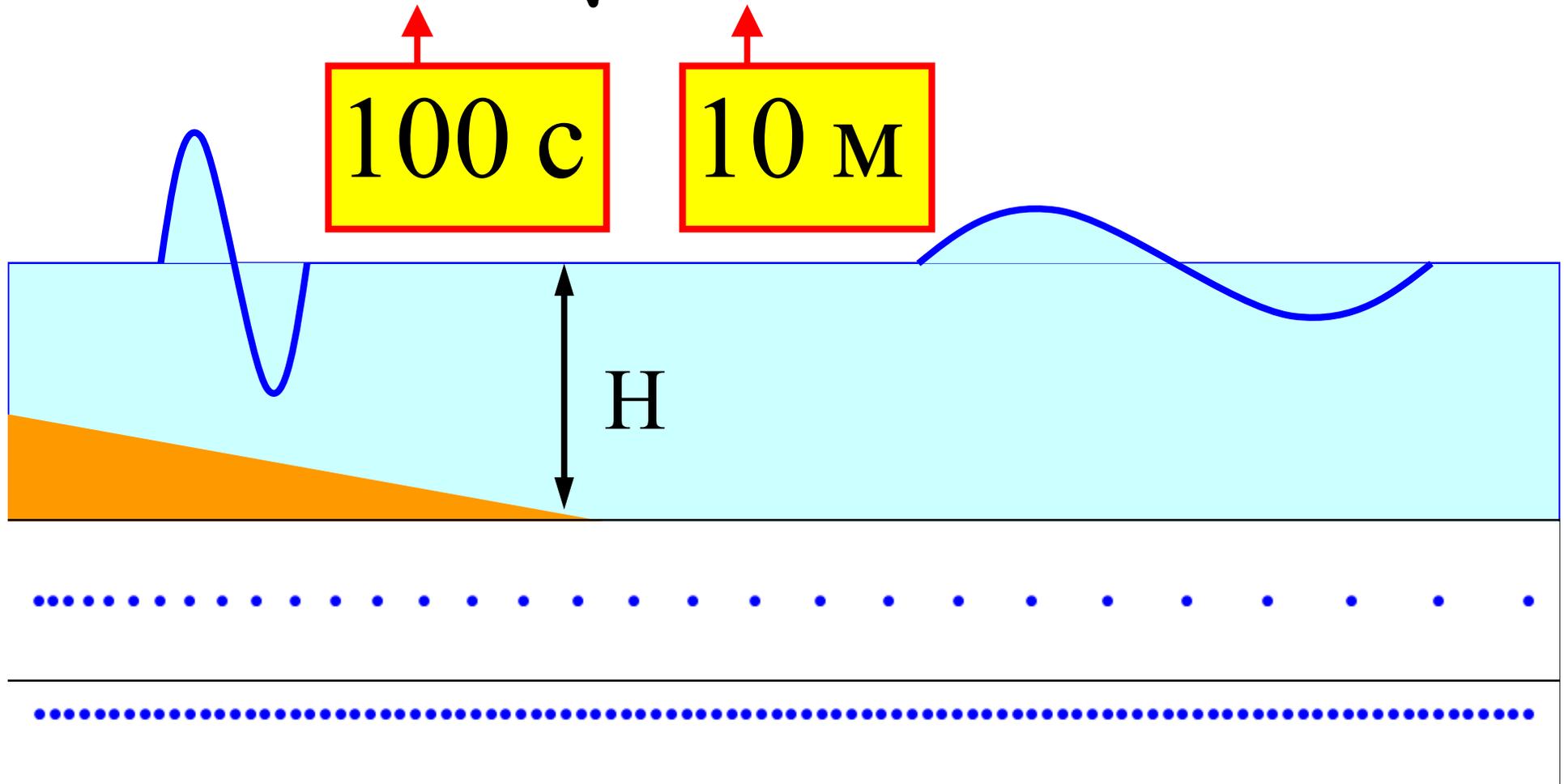
Вложенные сетки (nested grids)



[Tomita, 2016]

$$\lambda_{\min} = T_{\min} \sqrt{gH} \quad \Delta \leq \lambda_{\min} / 2$$

$$\Delta \leq T_{\min} \sqrt{gH_{\min}} / 2 \approx 500 \text{ M}$$



Вычислительная трудоемкость задачи

$$N = N_x N_y N_t$$

$$N_x N_y \sim (L / \Delta)^2$$

$$N_t \sim t_{\max} / \Delta t \sim L / \Delta$$

$$t_{\max} \sim L / \sqrt{gH_{\max}}$$

$$\Delta t < \Delta / \sqrt{gH_{\max}}$$

очень быстро
возрастает при

измельчении шага

равномерной

сетки

критерий
Куранта

$$N \sim (L / \Delta)^3$$

Как снизить вычислительную трудоемкость?

$$\Delta(H) = T_{\min} \sqrt{gH} / 2$$

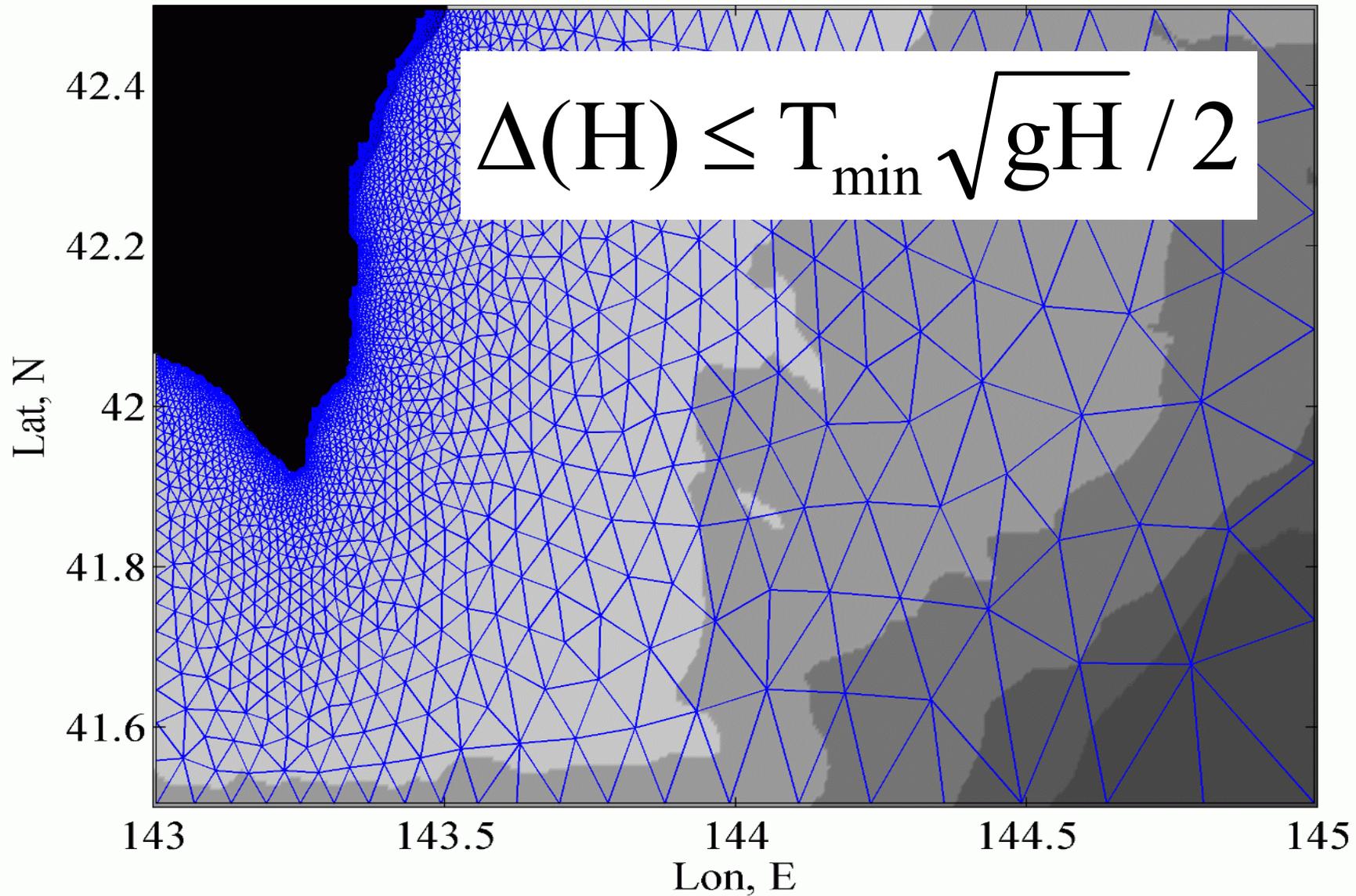
уменьшает число узлов сетки при сохранении необходимого пространственного разрешения

позволяет применять больший шаг по времени при сохранении устойчивости

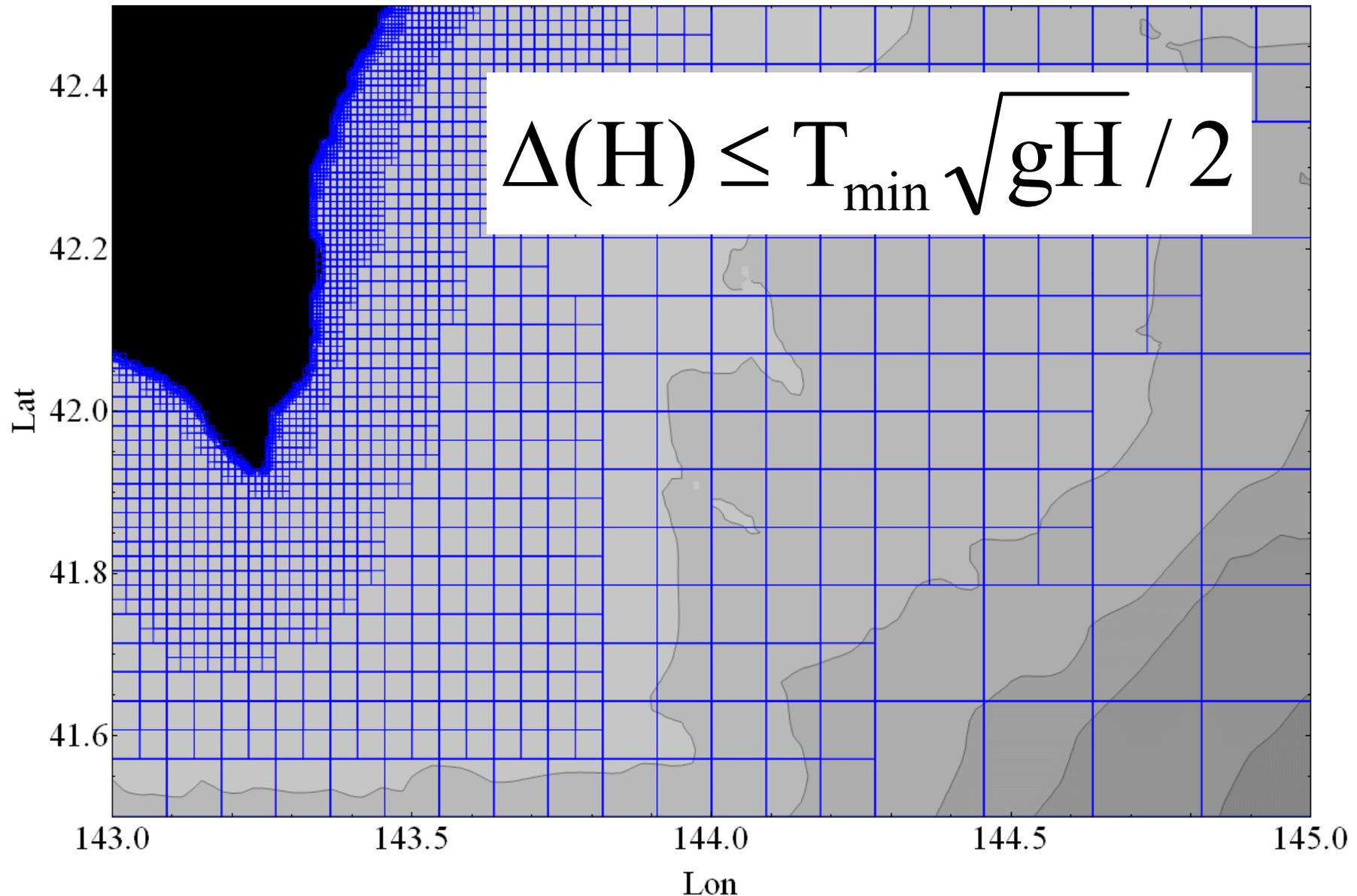
$$\Delta t < \frac{\Delta(H)}{\sqrt{gH}} = \frac{T_{\min}}{2} \gg \frac{T_{\min}}{2} \sqrt{\frac{H_{\min}}{H_{\max}}}$$

для сетки с постоянным шагом

Неструктурированная сетка с треугольным разбиением



Неструктурированная сетка с прямоугольным разбиением

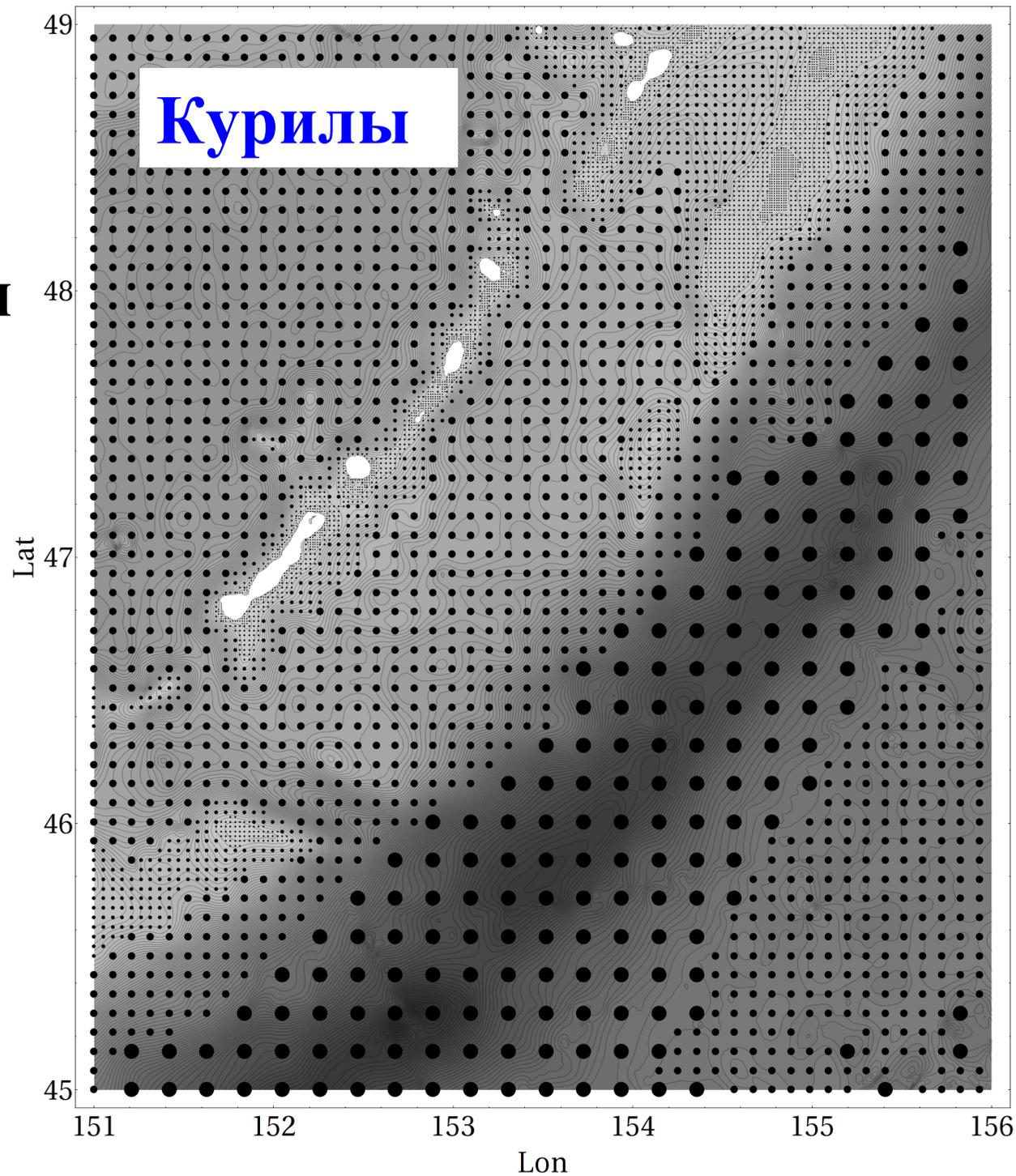


6 уровней сетки

$\Delta_{\min} = 500 \text{ м}$

$\Delta_{\max} = 16000 \text{ м}$

$N/N^U = 3648$



Прогноз цунами: успехи и проблемы

Инамура-но-хи

История о японском крестьянине, который 5 ноября 1854 года пожертвовал своим имуществом, чтобы спасти жизни жителей своей деревни: он поджег принадлежавшие ему снопы риса и тем самым быстро оповестил людей о цунами, благодаря чему они успели покинуть деревню, а затем приложил все силы для того, чтобы отстроить деревню заново.

Генеральная Ассамблея ООН в 2015 г объявила 5 ноября «Всемирным днем распространения информации о проблеме цунами»

Первый прогноз цунами в дальней зоне, основанный на интерпретации сейсмических данных

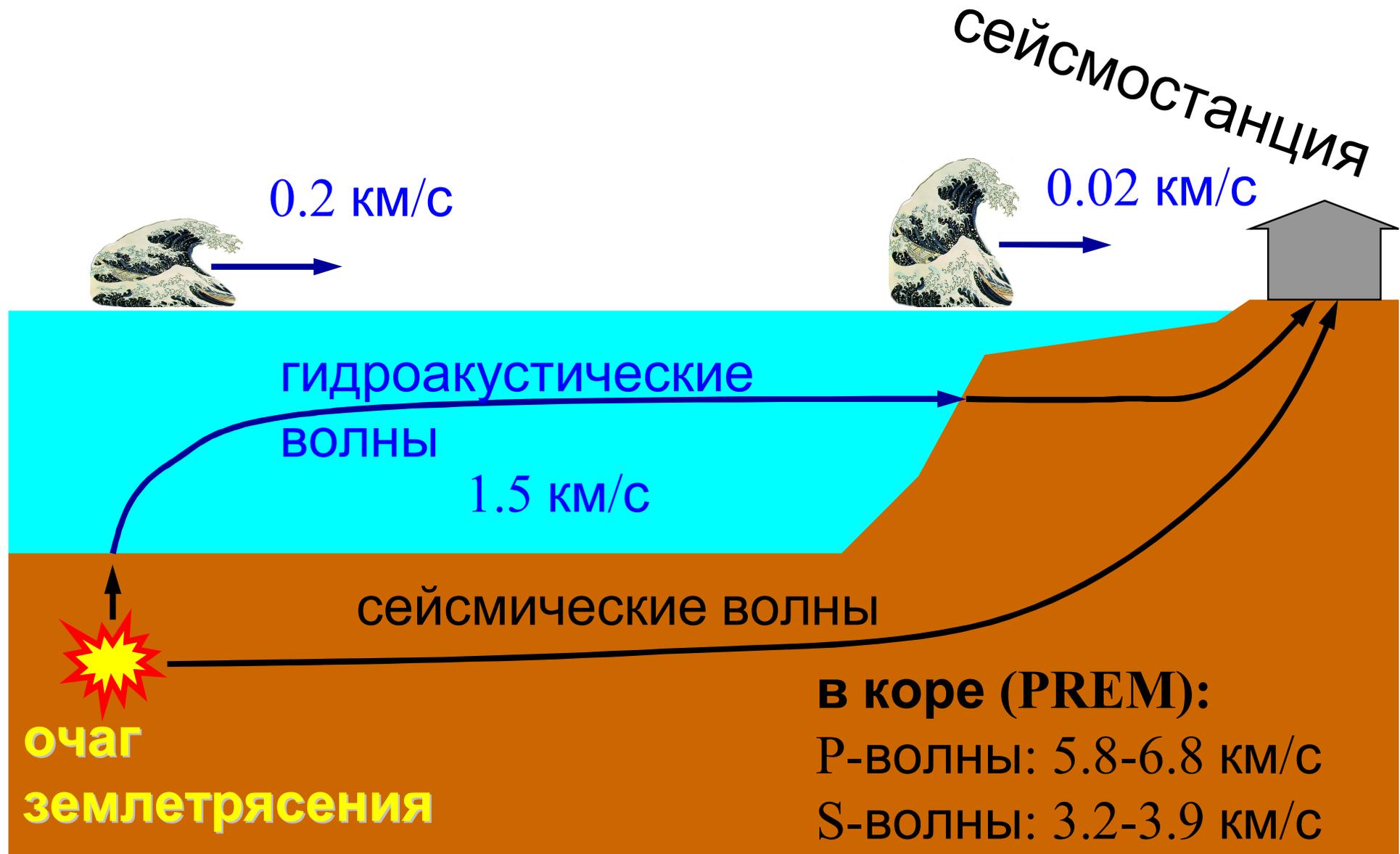
дата	источник	Mw	высота волн на Гавайях, м
11.11.1922	Чили	8.7	2.1
03.02.1923	Камчатка	8.4	6.1
02.03.1933	Санрику	8.4	3.3

ущерб 1.5 млн. USD, 1 погибший



Thomas Jaggar
1871 – 1953
Founder Hawaiian
Volcano Observatory

Сейсмогенные цунами можно прогнозировать в оперативном режиме!



Прогноз цунами

Долгосрочный

Краткосрочный

з а д а ч и

вероятностная
оценка риска
цунами

расчет времени
добегания;
 оценка высот
заплеска.

Прогноз цунами

```
graph TD; A[Прогноз цунами] --> B[Долгосрочный]; A --> C[Краткосрочный];
```

Долгосрочный

Краткосрочный

у с п е х и

**возможен детальный расчет
распространения цунами в
открытом океане**

Прогноз цунами

Долгосрочный

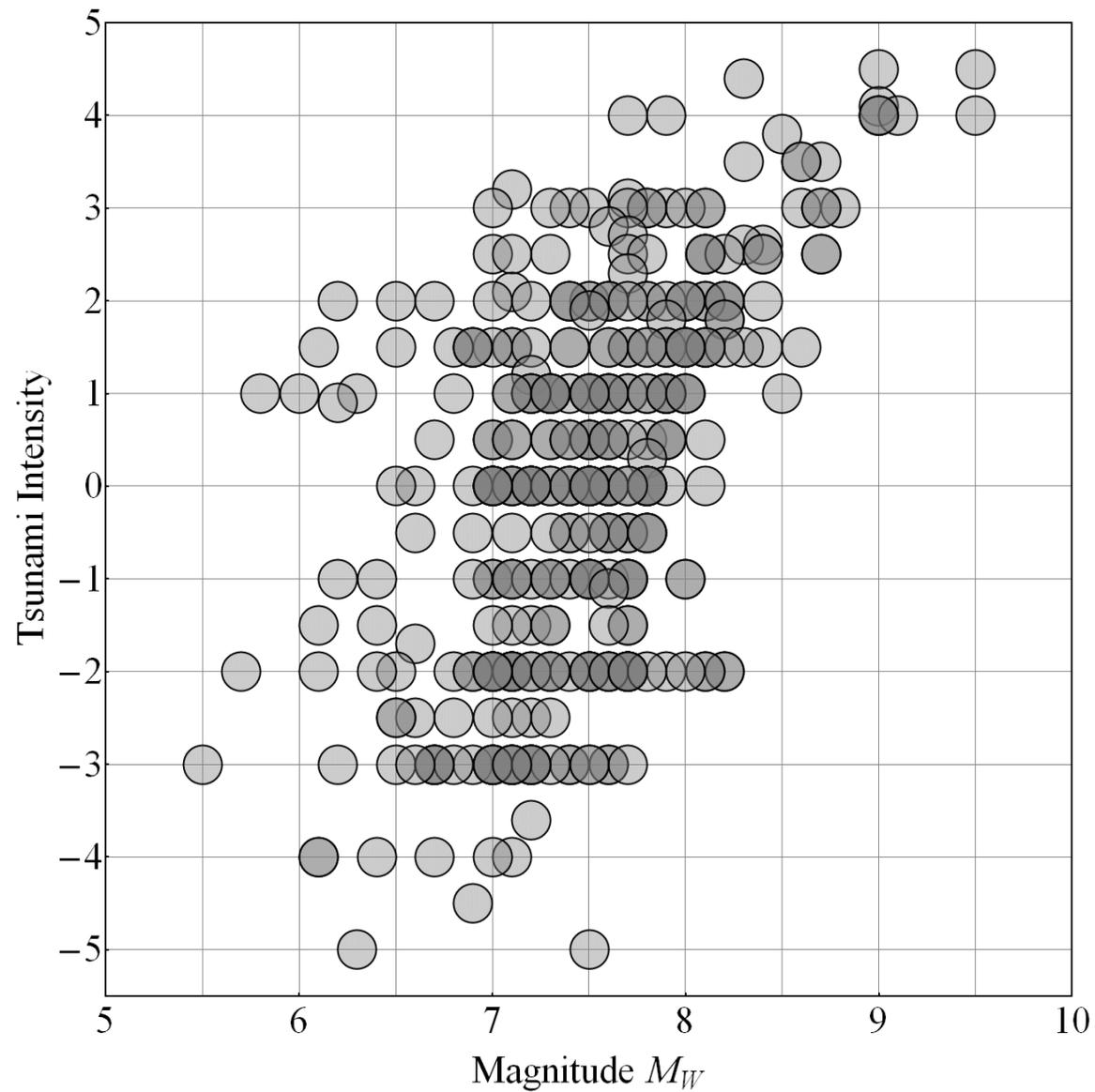
Краткосрочный

у с п е х и

- Известны потенциально опасные участки побережья;
- Известна вероятность появления волн заданной амплитуды;
- Возможен детальный расчет зон затопления.

- Возможен оперативный расчет времени появления цунами;
- Выработан магнитудный критерий;
- Оценка амплитуды волн по измерениям в открытом океане;
- Развитие густых сетей глубоководных станций;
- Предвычисление цунами от набора потенциальных источников.

Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения



Прогноз цунами

Долгосрочный

Краткосрочный

проблемы

- ❑ Плохая статистическая обеспеченность оценок;
- ❑ Детальные топографические данные для расчета зон затопления: отсутствие, неточность или сложность доступа;
- ❑ Человеческий фактор.

- ❑ Неточность оперативного определения процессов в источнике цунами;
- ❑ Ненадежность магнитудного критерия;
- ❑ Сложность оперативной оценки вклада в цунами оползней;
- ❑ Недостаточное число измерителей цунами в открытом океане;
- ❑ Локальные цунами.



TSUNAMI SAFETY RULES

1

ALWAYS BE PREPARED, A TSUNAMI MAY OCCUR ANYTIME

- Prepare a family emergency plan
- Prepare a safety backpack including medicine and first aid items
- Identify danger zones, assembly locations, designated evacuation routes or the quickest way to reach higher ground safely with the help of your local disaster management officials



2

IN CASE OF AN EARTHQUAKE PROTECT YOURSELF

- Drop
- Cover
- Hold on



DROP



COVER



HOLD

3



RUN TO HIGH GROUND IF ANY OF THESE WARNING SIGNS OCCUR AT THE COAST

- FEEL a very strong or long earthquake (it is difficult to walk, there are falling objects, damage to structures, earthquake lasts for about 1 minute or more)
- SEE a sudden rise or fall (exposing the ocean floor, reefs and fish) of the sea level
- HEAR a strange or loud noise (can be a roar) coming from the sea, or receive official tsunami warning messages by siren, radio, television, commercial radio or emergency alert radios



4

MOVE AWAY FROM HAZARDOUS AREAS (IN PREFERENCE ORDER DEPENDING ON YOUR LOCATION OR SITUATION)

- Run away from the coast to an assembly point or higher ground
- Go to the third floor of a building or higher
- Climb a tree
- If time permits, vessels should navigate offshore to waters 100-400 meters deep



5

STAY IN THE SAFE AREA UNTIL LOCAL AUTHORITIES INDICATE THAT THE DANGER HAS PASSED, THIS MAY TAKE MANY HOURS



Empowered lives.
Resilient nations.



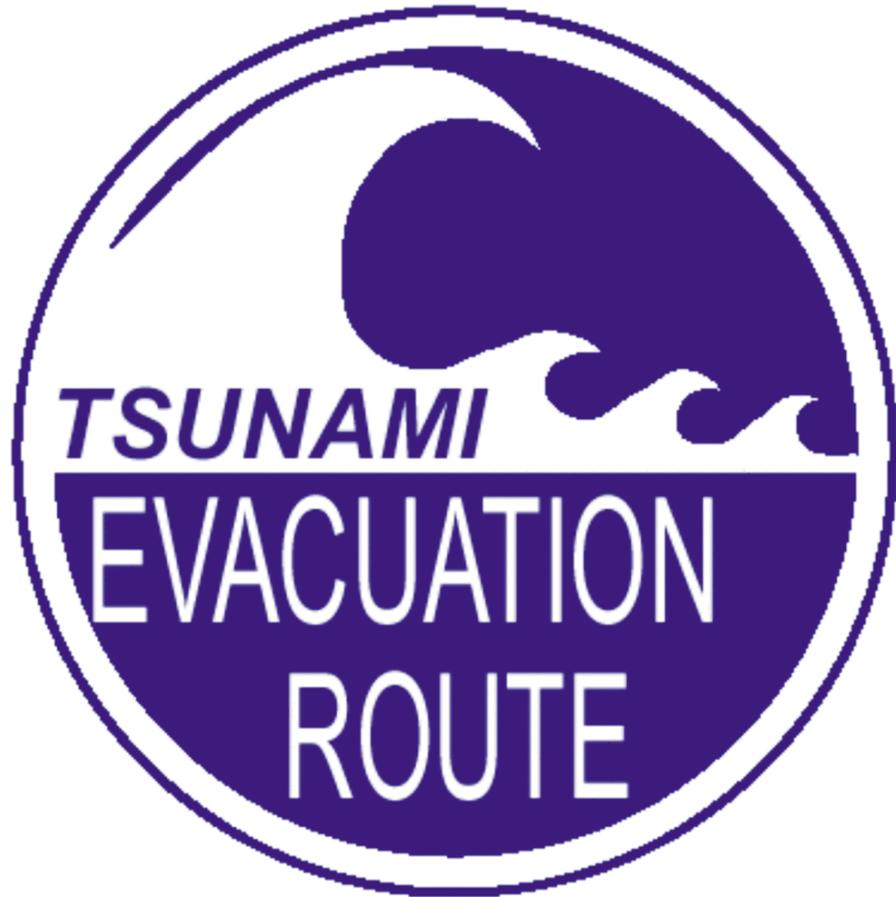
www.bb.undp.org

www.ioc.unesco.org

www.weready.org

www.tsunami.gov

(IOC/BRO/2012/8)



After an earthquake, a tsunami may follow.



Move quickly to higher ground.



International Tsunami Information Center
737 Bishop St., Ste 2200, Honolulu, HI 96822 USA
Ph: (800) 532-6432 E-mail: Itic.tsunami@noaa.gov URL: <http://www.pfb.noaa.gov/itic/>

