

*Носов Михаил Александрович  
Колесов Сергей Владимирович*

# *Физика цунами*

*Межфакультетский учебный курс*

*Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова*

*Лекция №8*



**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  
длины

$$H$$

$$k^* = kH$$

## 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

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

$$\omega = k$$

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

длинные волны без дисперсии

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

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

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

длинные волны со слабой дисперсией

# Уравнения нелинейной теории длинных волн

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

угловая скорость  
вращения Земли

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

широта

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

параметр Кориолиса

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

коэффициент  
Маннинга

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

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

$$n = 0.025 \text{ с / м}^{1/3}$$

## 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:

$$z = -H_0 : (v, n) = 0$$

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

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

# Методы решения уравнений

Метод конечных  
разностей (FDM)

структурированные  
(регулярные) сетки &  
вложенные сетки

Метод конечных  
элементов (FEM)

неструктурированные  
сетки

[Piatanesi et al. 1999]

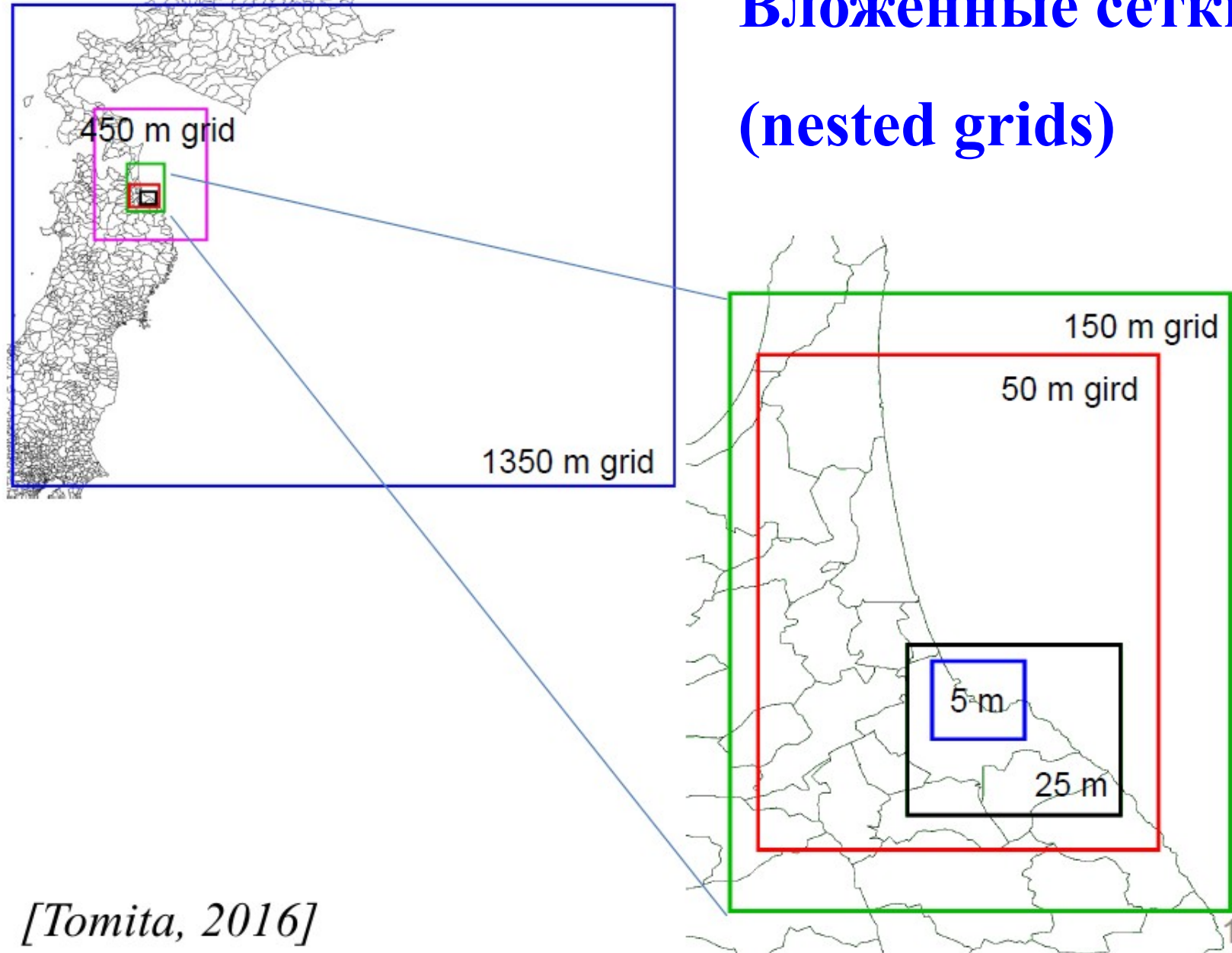
**Адаптивные сетки**

[LeVeque et al. 2011] [Popinet 2012]

\*\*\*

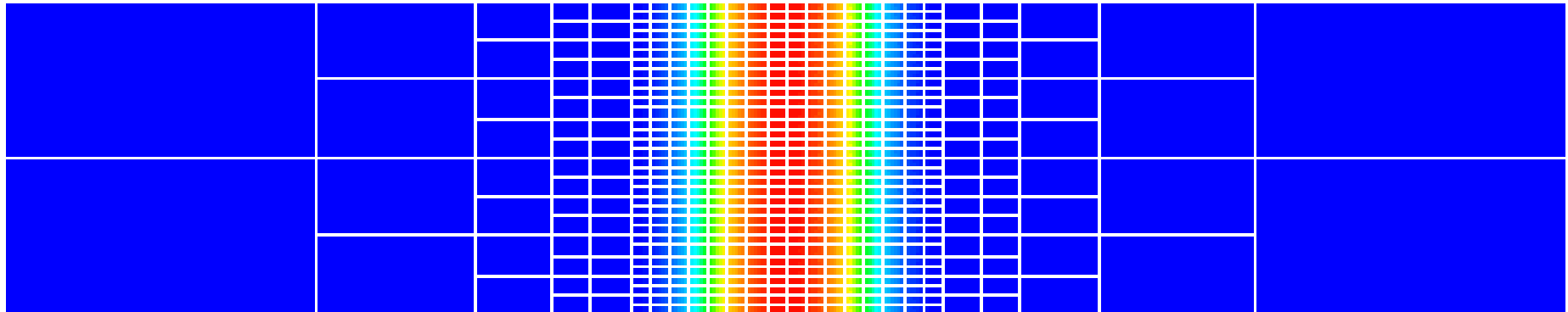
*динамически адаптивные сетки  
(адаптация под решение)*

# Вложенные сетки (nested grids)



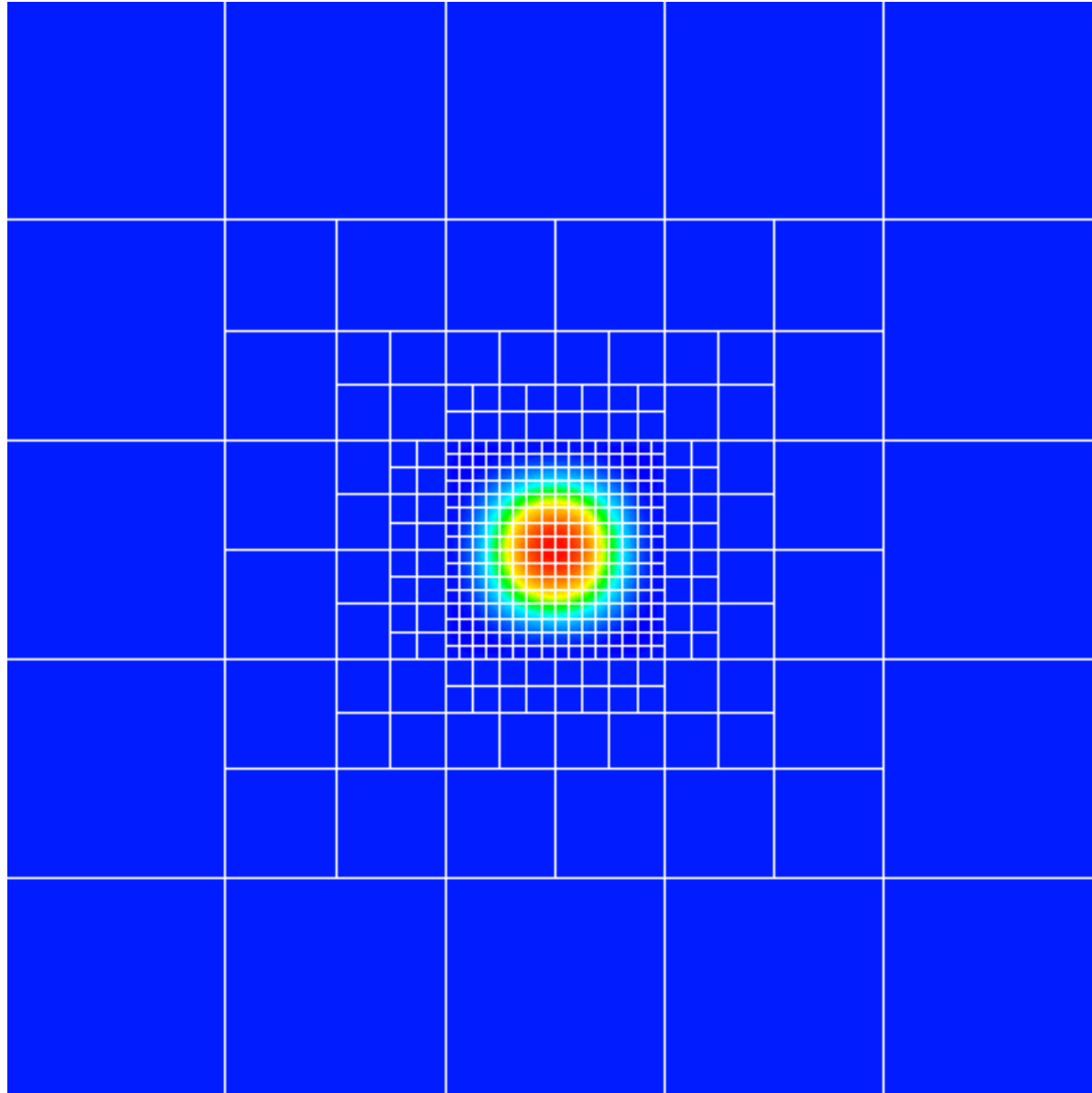
[Tomita, 2016]

# Адаптивные сетки (adaptive grids)



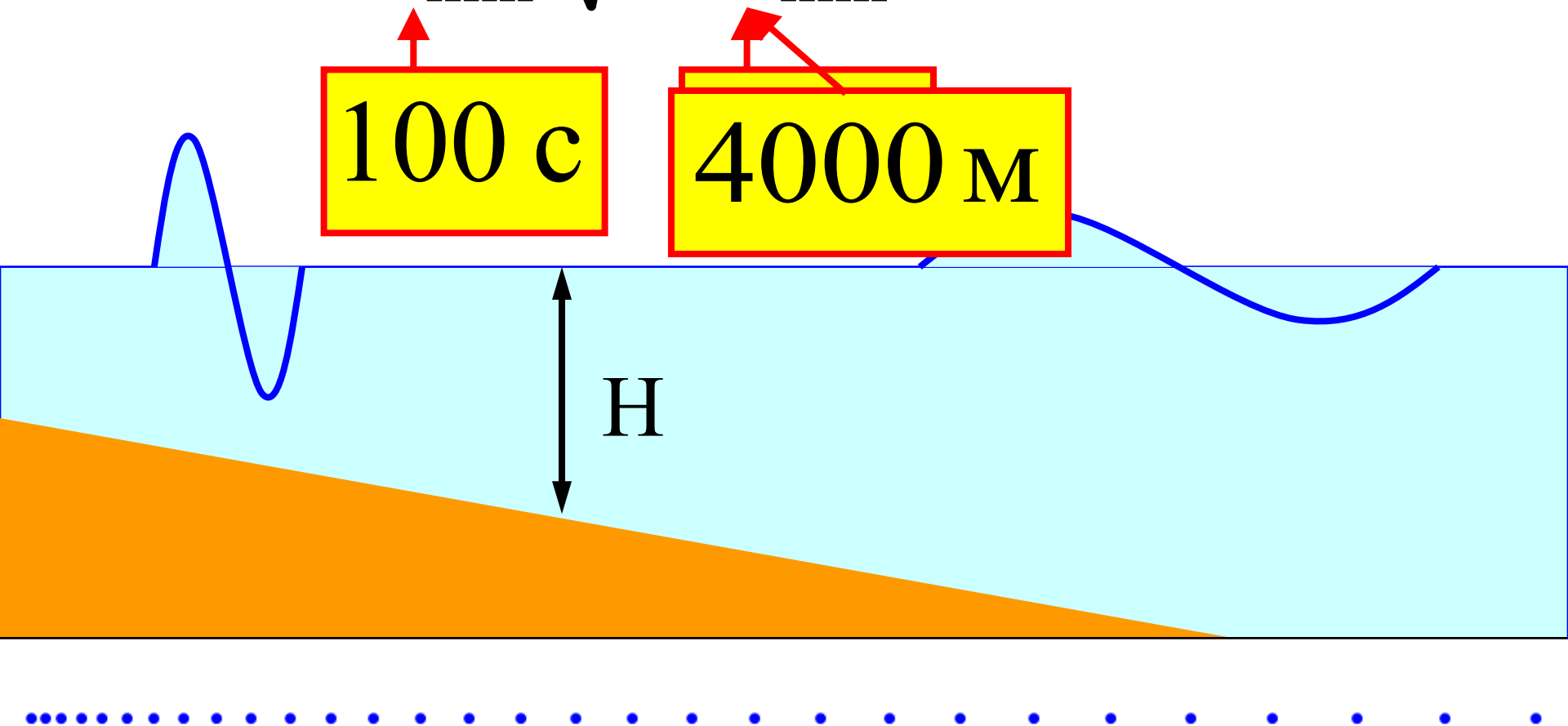


# Адаптивные сетки (adaptive grids)



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

$$\Delta \leq T_{\min} \sqrt{gH_{\min}} / 2 \approx 150000 \text{ M}$$



# 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?

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

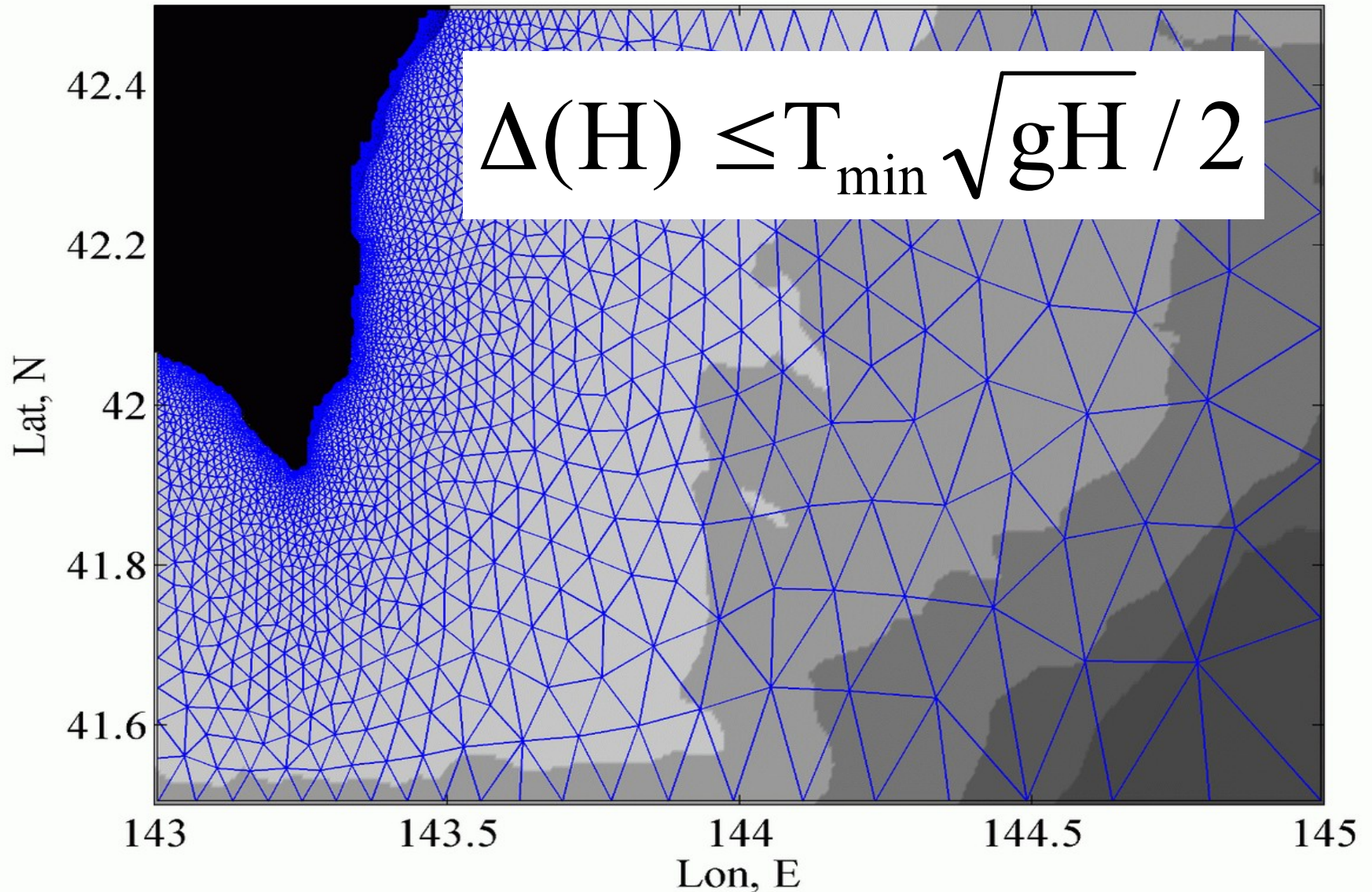
уменьшает число узлов сетки при сохранении необходимого пространственного разрешения

позволяет применять больший шаг по времени при сохранении устойчивости

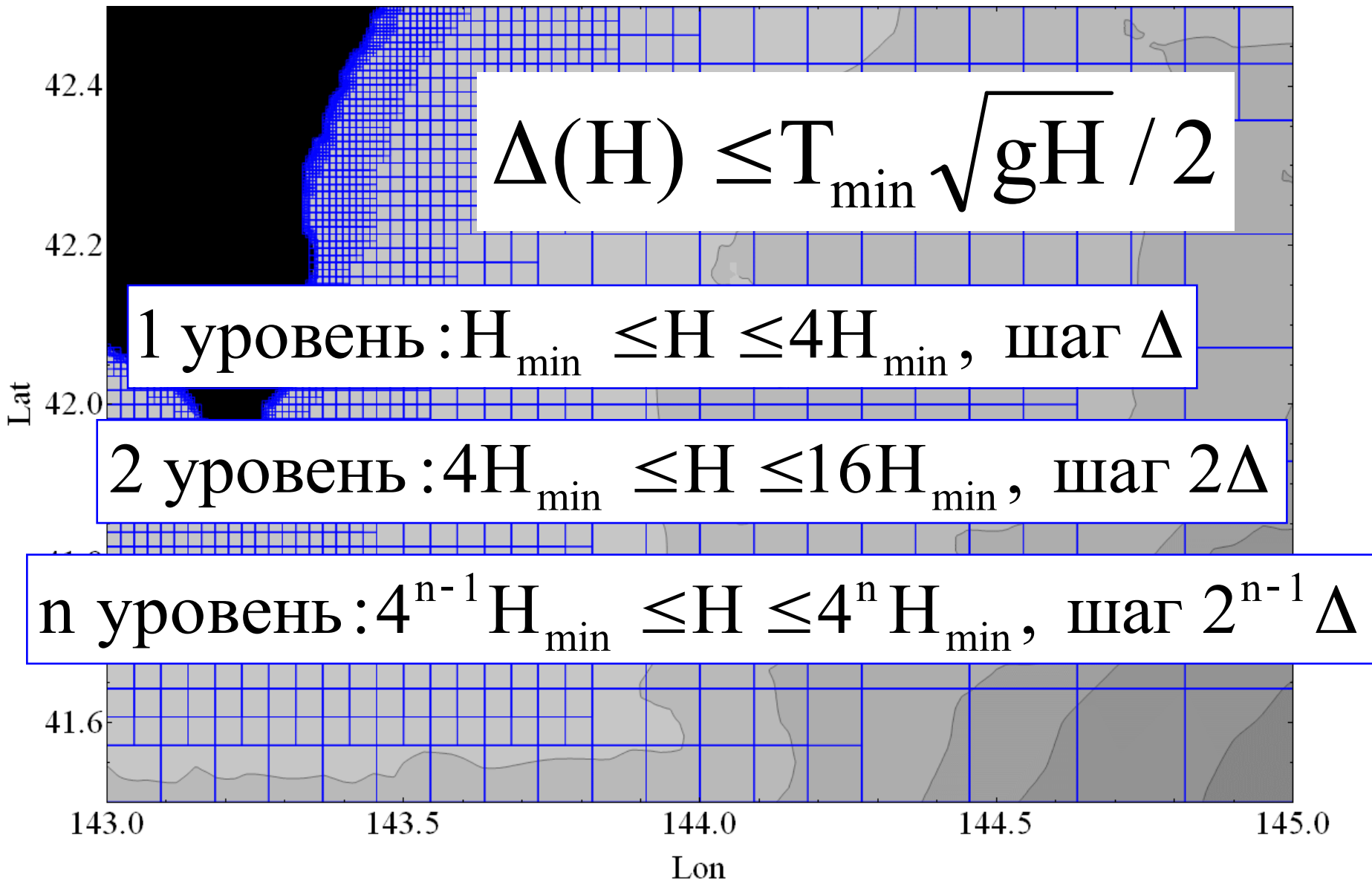
$$\Delta t < \frac{\Delta(H)}{\sqrt{gH}} = \frac{T_{\min}}{2} \gg \frac{T_{\min}}{2} \sqrt{\frac{H_{\min}}{H_{\max}}}$$

для сетки с постоянным шагом

# Неструктурированная сетка с треугольным разбиением



# Неструктурированная сетка с прямоугольным разбиением



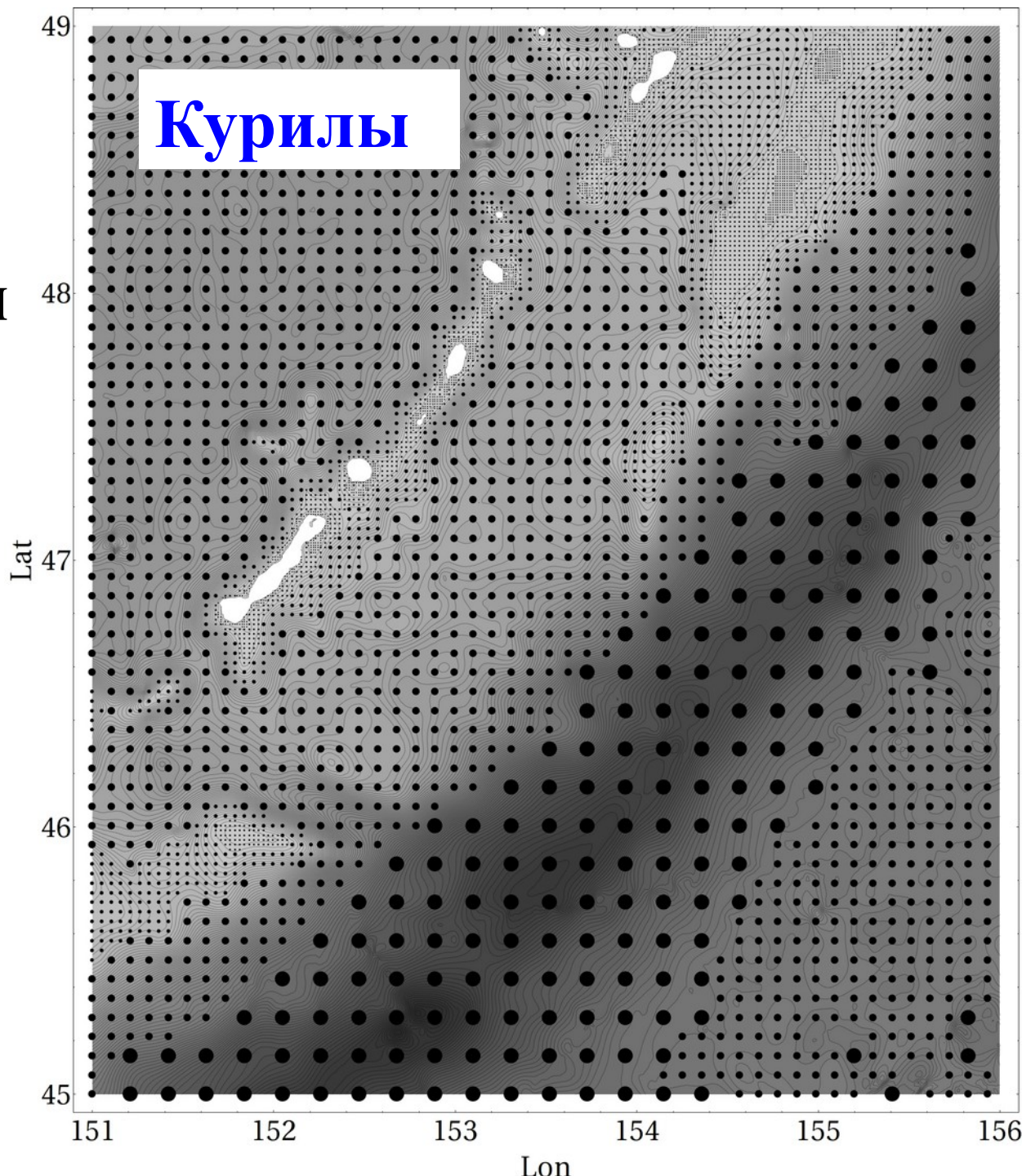


**6 уровней сетки**

$\Delta_{\min} = 500 \text{ м}$

$\Delta_{\max} = 16000 \text{ м}$

$N/N^U = 3648$



# Прогноз цунами: успехи и проблемы



# UP-TO-THE-MINUTE MEGA-TSUNAMI FORECAST

WE'RE DEFINITELY EXPECTING SOME KIND OF TSUNAMI, SOMEWHERE AROUND HERE, SOMETIME IN THE FUTURE-----

BUT DON'T HOLD US TO THAT...



WILLIAMS ©1995  
SAN JOSE  
MERCURY NEWS

# Инамура-но-хи

История о японском крестьянине Горё Хамагучи, 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»**



# Инамура-но-хи



Из книги "Ansei monroku", иллюстрация Furuta Shōemon (Furuta Eisho)

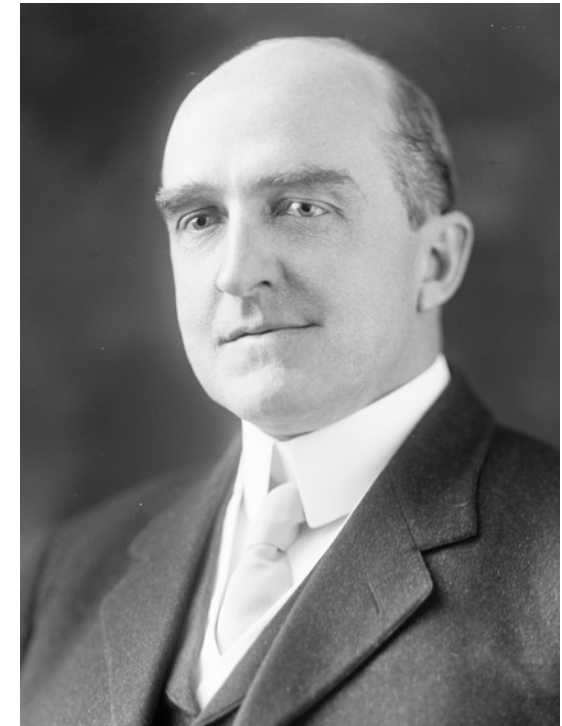


# Хирогава



# 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

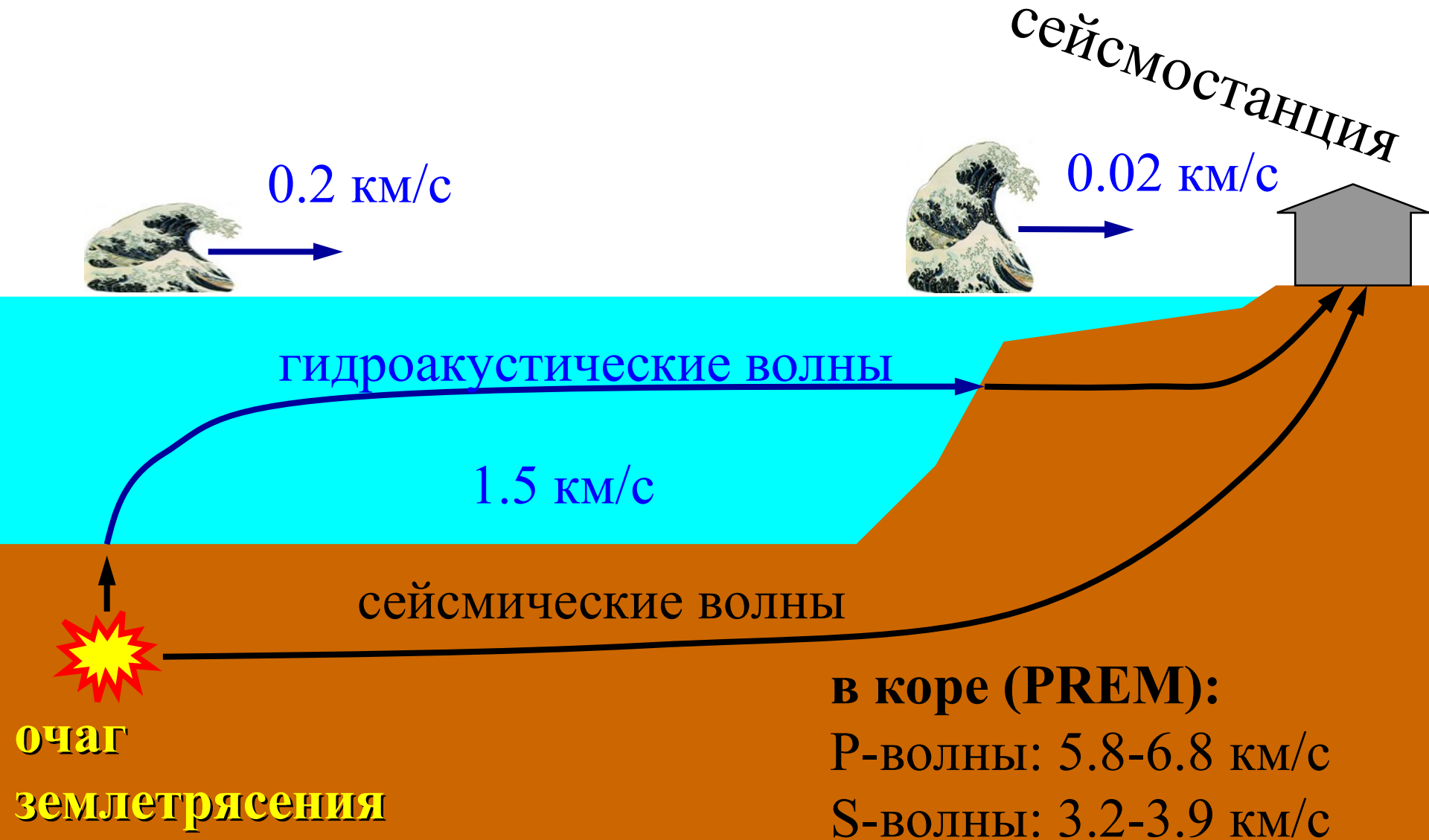


**Thomas Jaggar**  
1871 – 1953

**Founder Hawaiian  
Volcano Observatory**

**ущерб 1.5 млн. USD, 1 погибший**

# 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.



**Лучевая теория дает оценку  
времени прибытия первой  
волны!**

**Но первая волна далеко не  
всегда бывает самой сильной.**



Прогноз цунами



Долгосрочный

Краткосрочный

*у с п е х и*

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

# Прогноз цунами

Долгосрочный

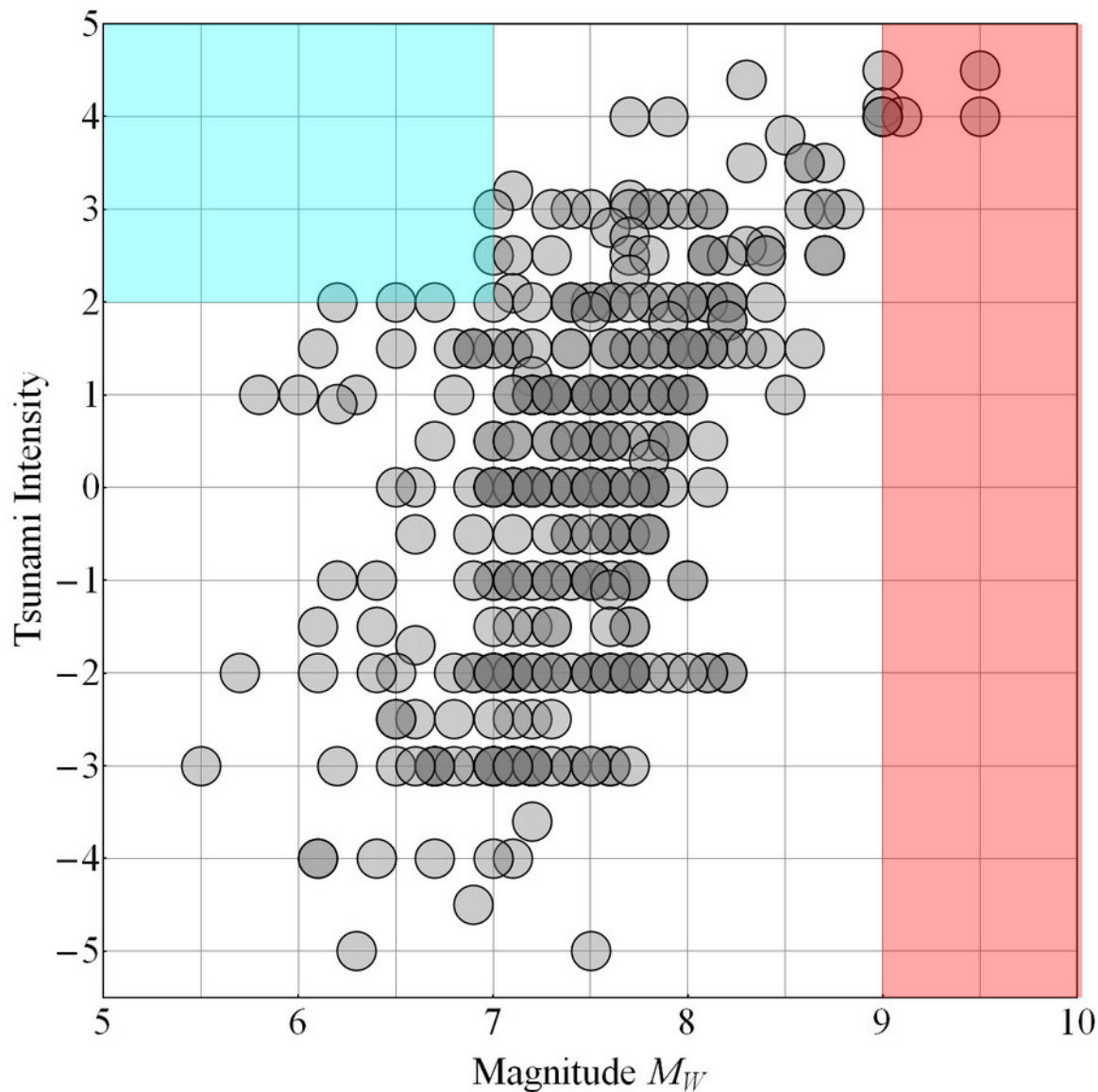
Краткосрочный

*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

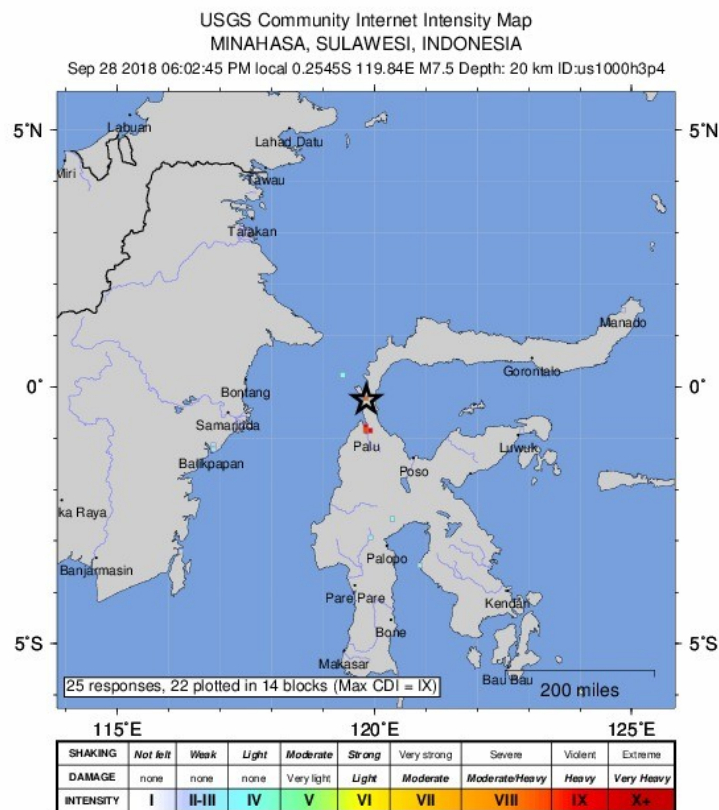
## *проблемы*

- ❑ 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.

# Sulawesi (Palu) 2018-09-28 10:02:45 (UTC)

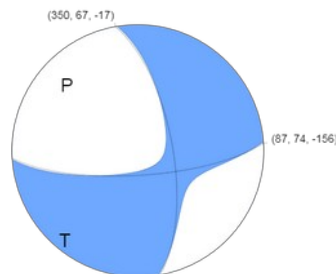
**Mw=7.5**

**h=13.5 km**



**UNESCO:** The earthquake and subsequent tsunami that hit Palu and Donggala in Central Sulawesi Indonesia has killed at least **2,100** people (as on 15 October 2018). Further, some **680** people are missing, **4,612** injured and **78,994** are displaced in over three most affected areas.

механизм: «strike-slip»



цунами  
обычно не  
вызывает

# Sulawesi (Palu) 2018-09-28 10:02:45 (UTC)

18:02 WITA - mainshock

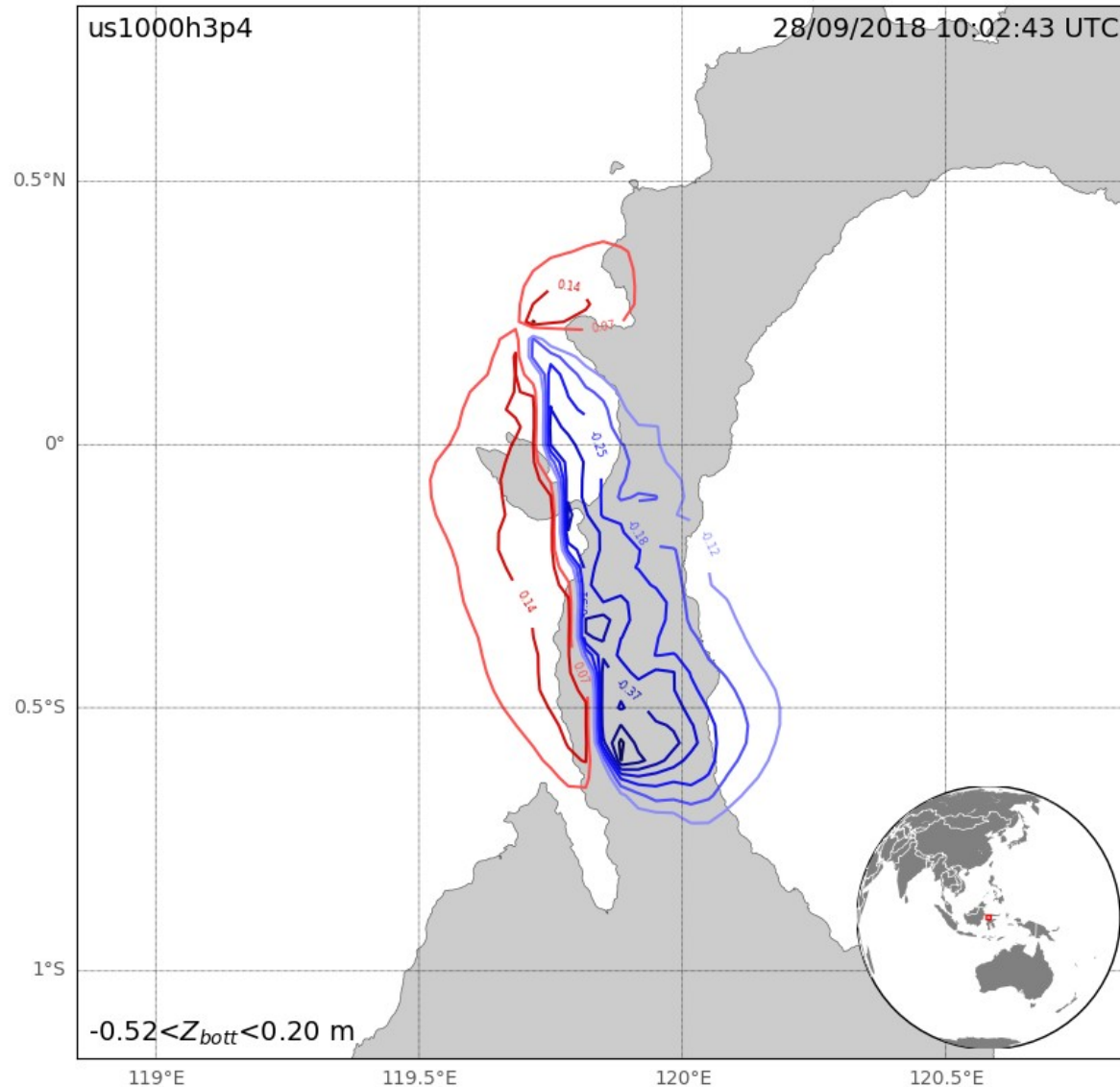
18:07 WITA - tsunami warning (0.5-3 m)

18:36 WITA - the warning was canceled...

The **head of Indonesia's disaster mitigation agency** has said that a key part of the country's warning system - a series of buoys connected to seafloor sensors designed to detect tsunamis - had not been working since 2012. He blamed a lack of funding.

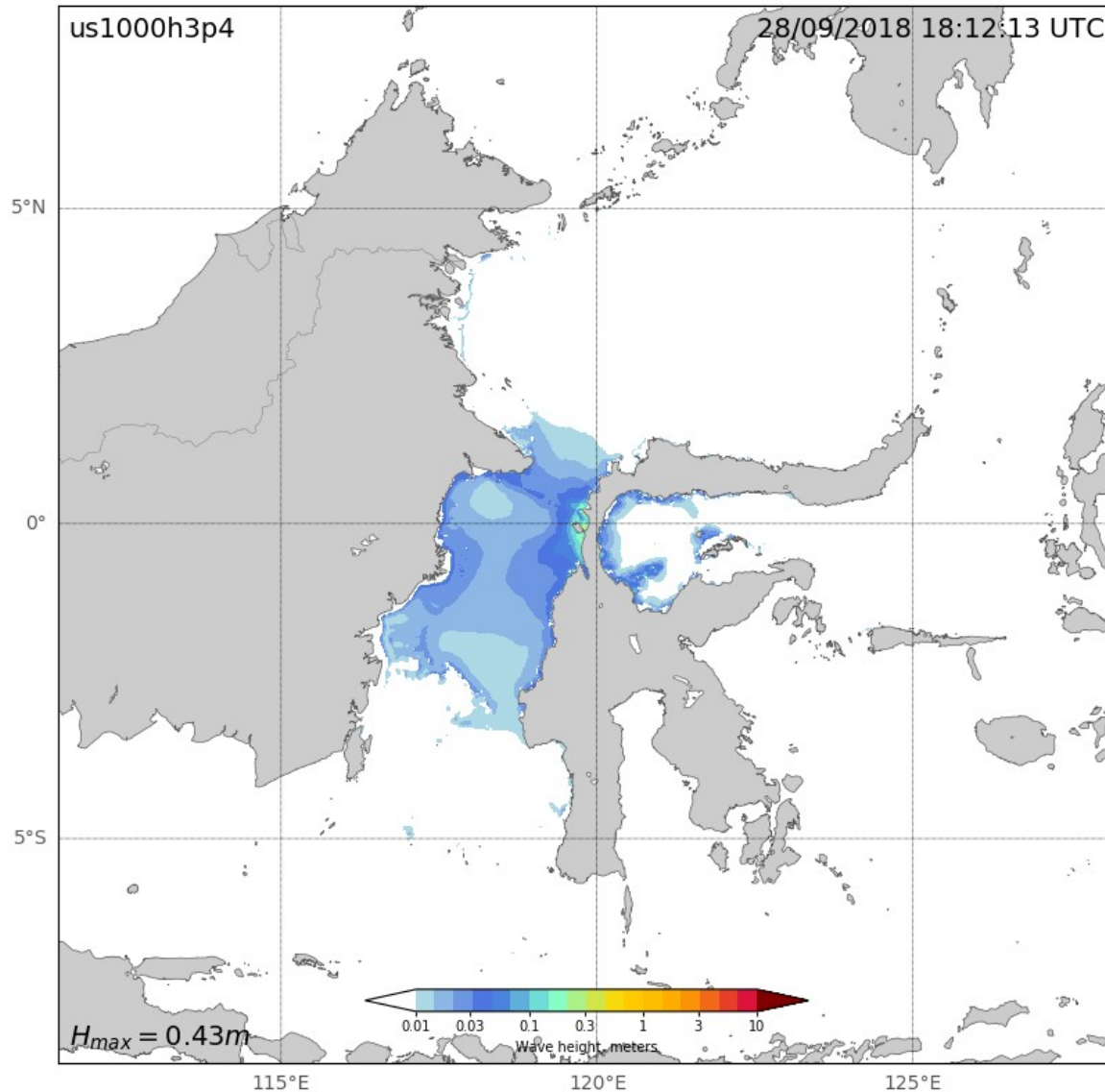
**Prof Comfort (University of Pittsburgh):** In the Sulawesi incident, BMKG (the meteorology and geophysics agency) cancelled the tsunami warning too soon, because it did not have data from Palu. This is the data the tsunami detection system could provide. None of the 22 buoys are functioning.

# Tsunami-observer



<http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/>

# Tsunami-observer



<http://ocean.phys.msu.ru/projects/tsunami-observer/>

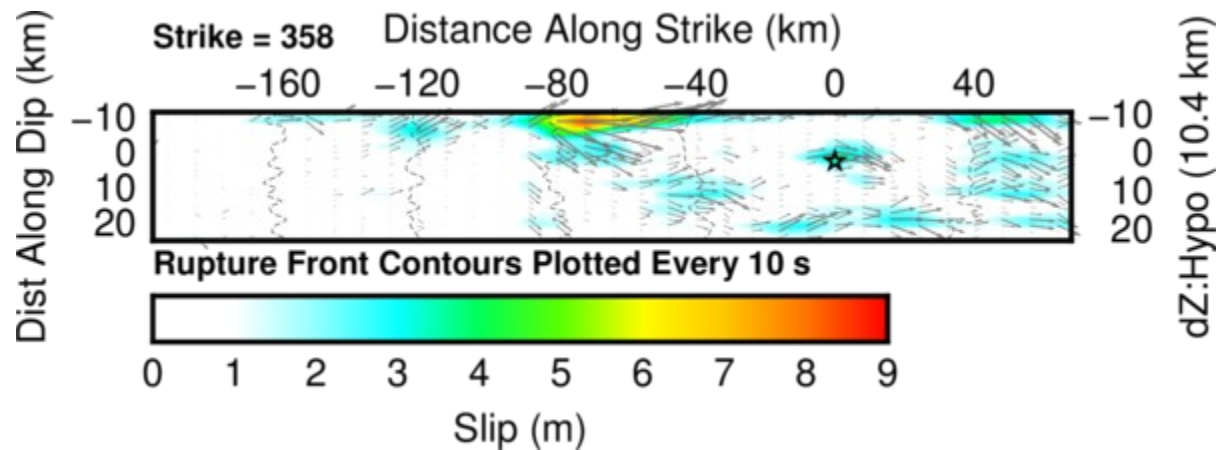


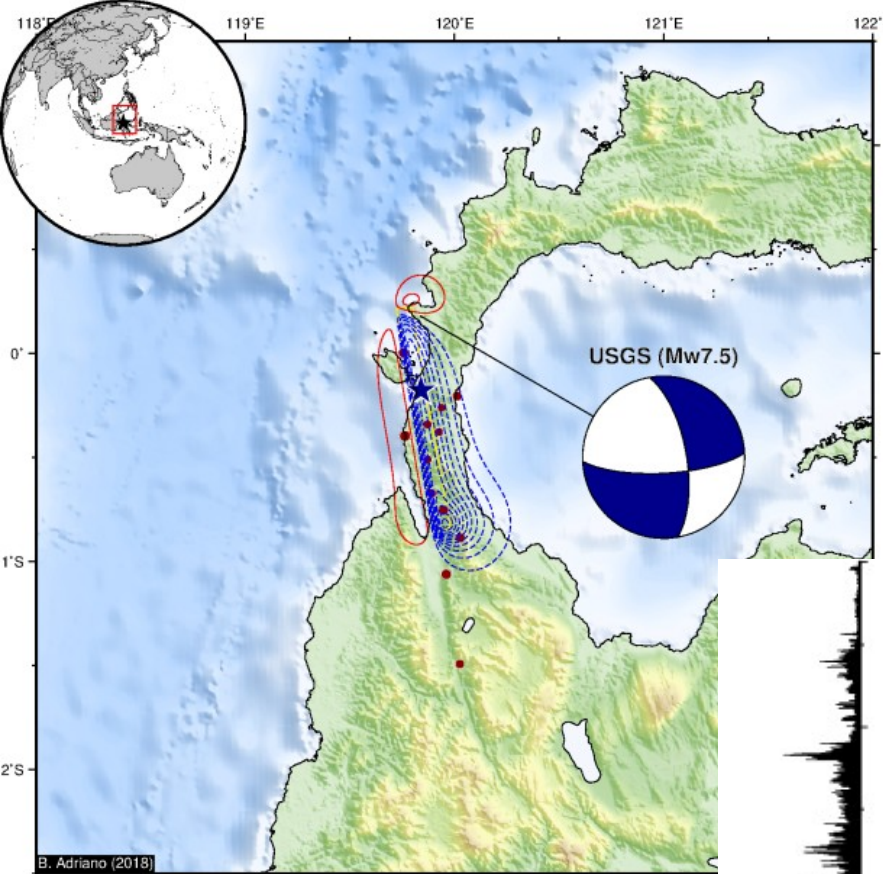
# Finite Fault (USGS)



**Surface  
projection of the  
slip distribution**

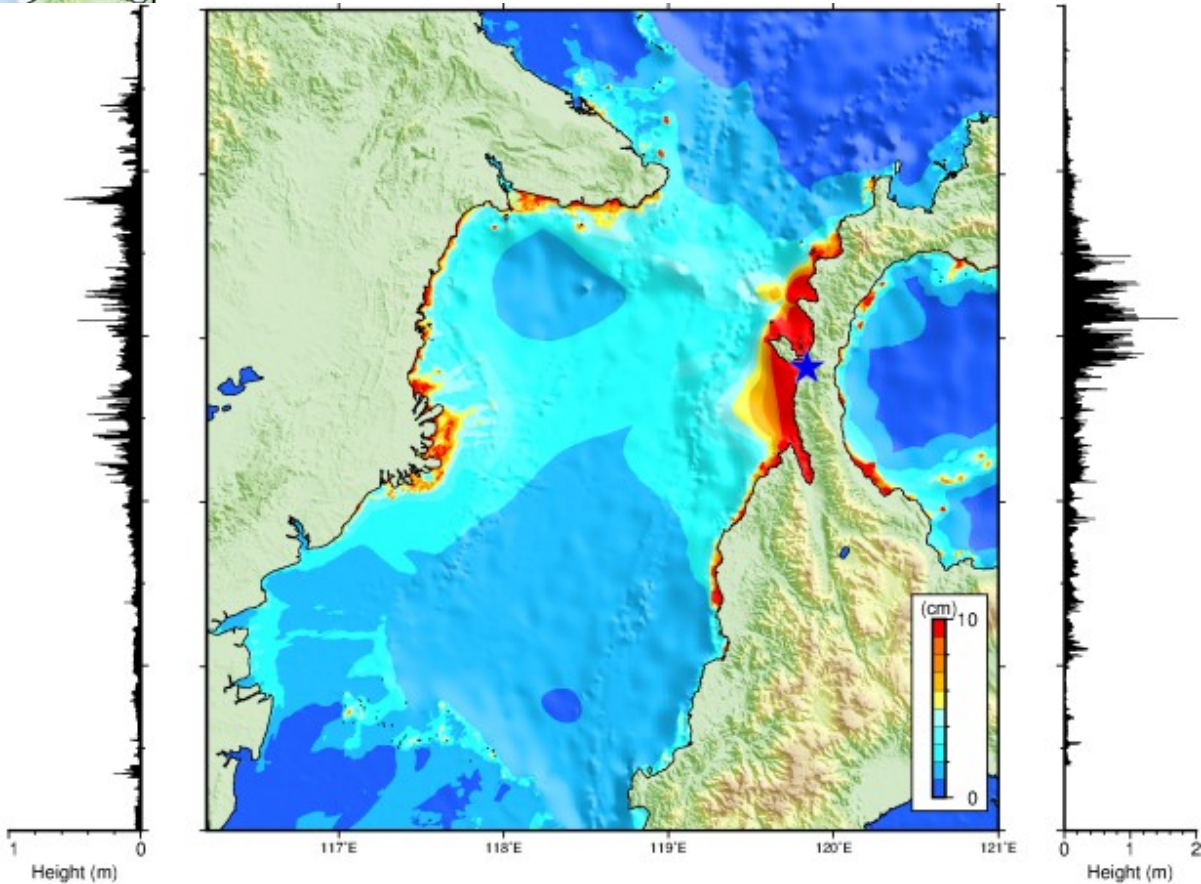
## Cross-section of slip distribution





# Numerical Simulation

by B. Adriano and  
S. Koshimura (IRIDeS,  
Tohoku University)







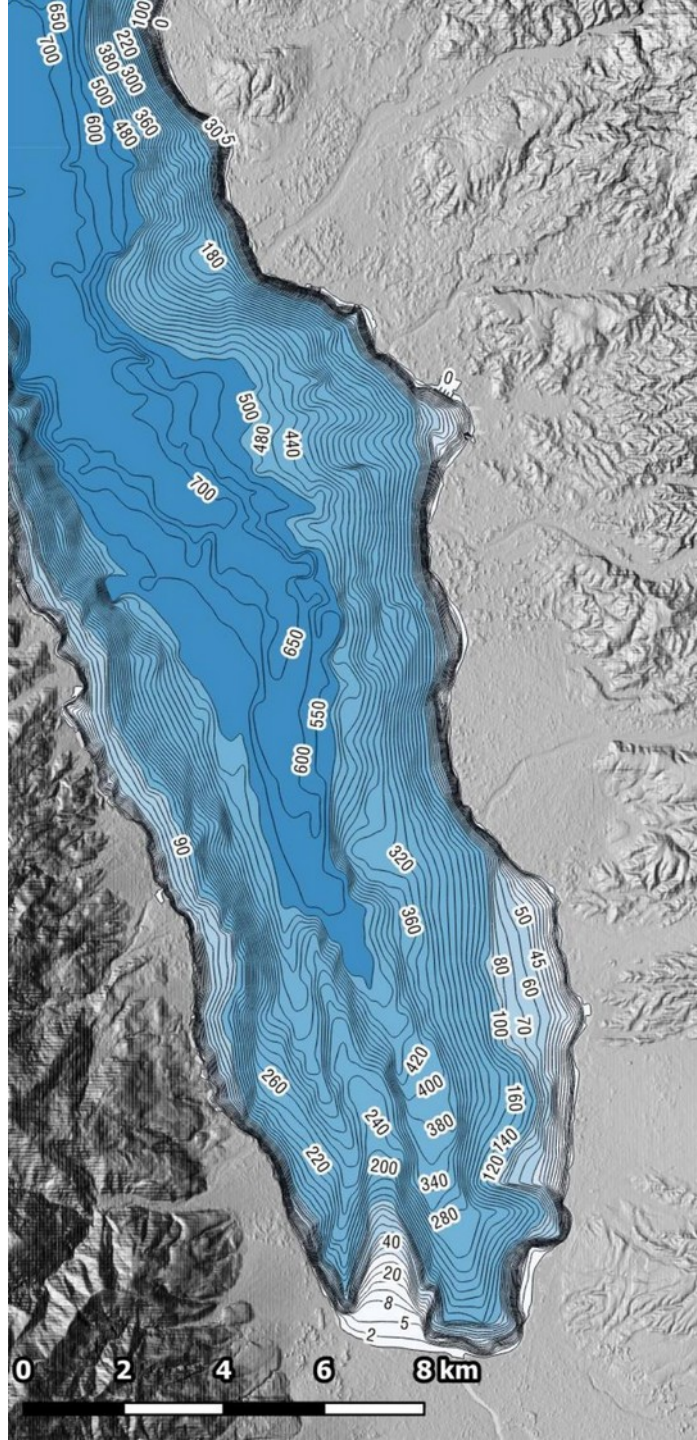
## The earthquake caused a tsunami to sweep into Palu



Source: BMKG

BBC

Оползень?







# 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**



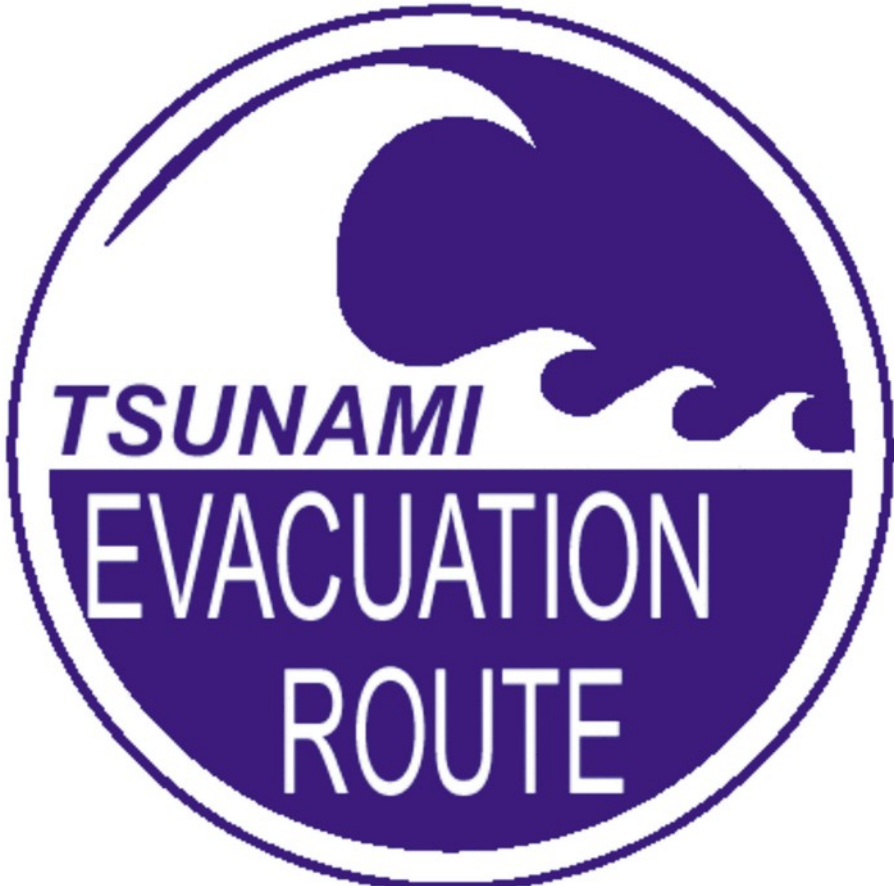
[www.bb.undp.org](http://www.bb.undp.org)

[www.ioc.unesco.org](http://www.ioc.unesco.org)

[www.weready.org](http://www.weready.org)

[www.tsunami.gov](http://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: (808) 532-6422 E-mail: [itc.tsunami@noaa.gov](mailto:itc.tsunami@noaa.gov) URL: <http://www.pih.noaa.gov/itc/>







Зачёт по курсу состоится  
через неделю  
20 апреля в 15:10  
в дистанционном формате