

Физика цунами

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ



Летняя школа учителей физики в МГУ

1 июля 2016 г

Katsushika Hokusai (1830)
«The Great Wave of Kanagawa»



*“...В мире есть такое диво:
Море вздуется бурливо,
Закипит, поднимет вой,
Хлынет на берег пустой...”*

А.С. Пушкин



Цунами 26 декабря 2004 г











widelac.org







NHK WORLD
NHK WORLD
NHK WORLD

視聽者撮影 岩手 陸前

午後3時

Катастрофическое цунами в Японии 11.03.2011



NEXT NEWSLINE at 16:00

for earthquake. The Chinese Embassy helpline numbers for Chinese who are

**The fishing boat Kyotoku-maru
NO 18 - famous post tsunami
landmark in the city of Kesenuma**



Япония, март 2012

Япония, март 2012



Япония, март 2012



Япония, Онагава, март 2012



Япония, март 2012



Япония, март 2012



Япония, март 2012



津波

Harbor wave

Волна в гавани

Необходимость изучения цунами обусловлена

**Многочисленными
человеческими
жертвами**

**Колоссальным
материальным
ущербом**

**Ущерб от цунами 11.03.2011
в Японии 0.25 трлн USD**

Бюджет РФ на 2011 г 8.8 трлн руб.

Природные катастрофы в XX веке унесли 4 млн. человеческих жизней

1. Землетрясения
2. Наводнения
3. Тайфуны/ураганы
4. Вулканические извержения
5. Цунами (~1%)
6. ...

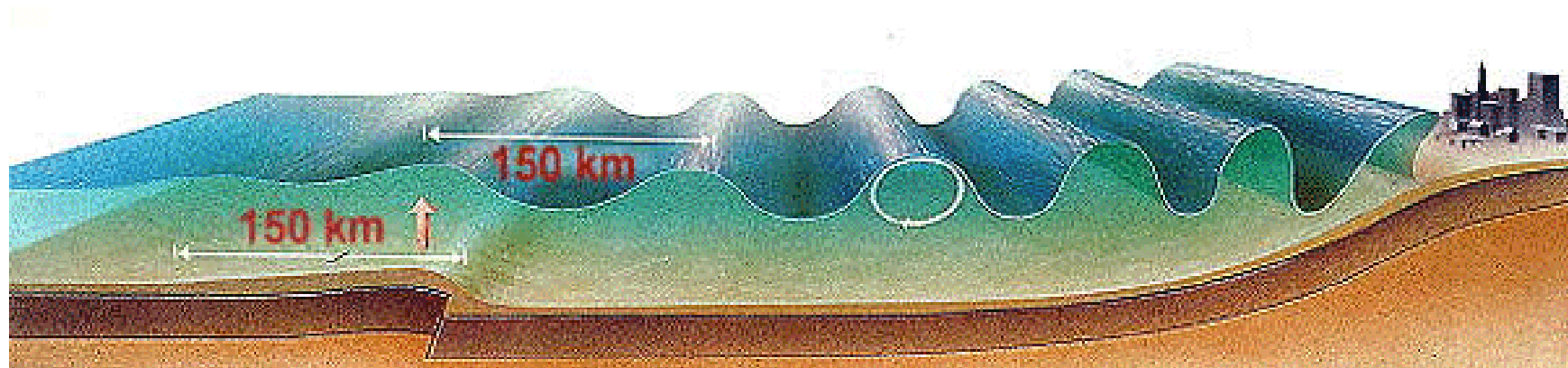
Степень
готовности
«max»

Цунами в
Индийском
океане
26.12.2004:
228 000
погибших

Цунами в
Японии
11.03.2011:
20 000
погибших

Степень
готовности
«0»

Цунами – серия низкочастотных гравитационных поверхностных волн, вызванных мощным воздействием на водный слой



April 1, 1946
M7.1 Aleutian Islands earthquake

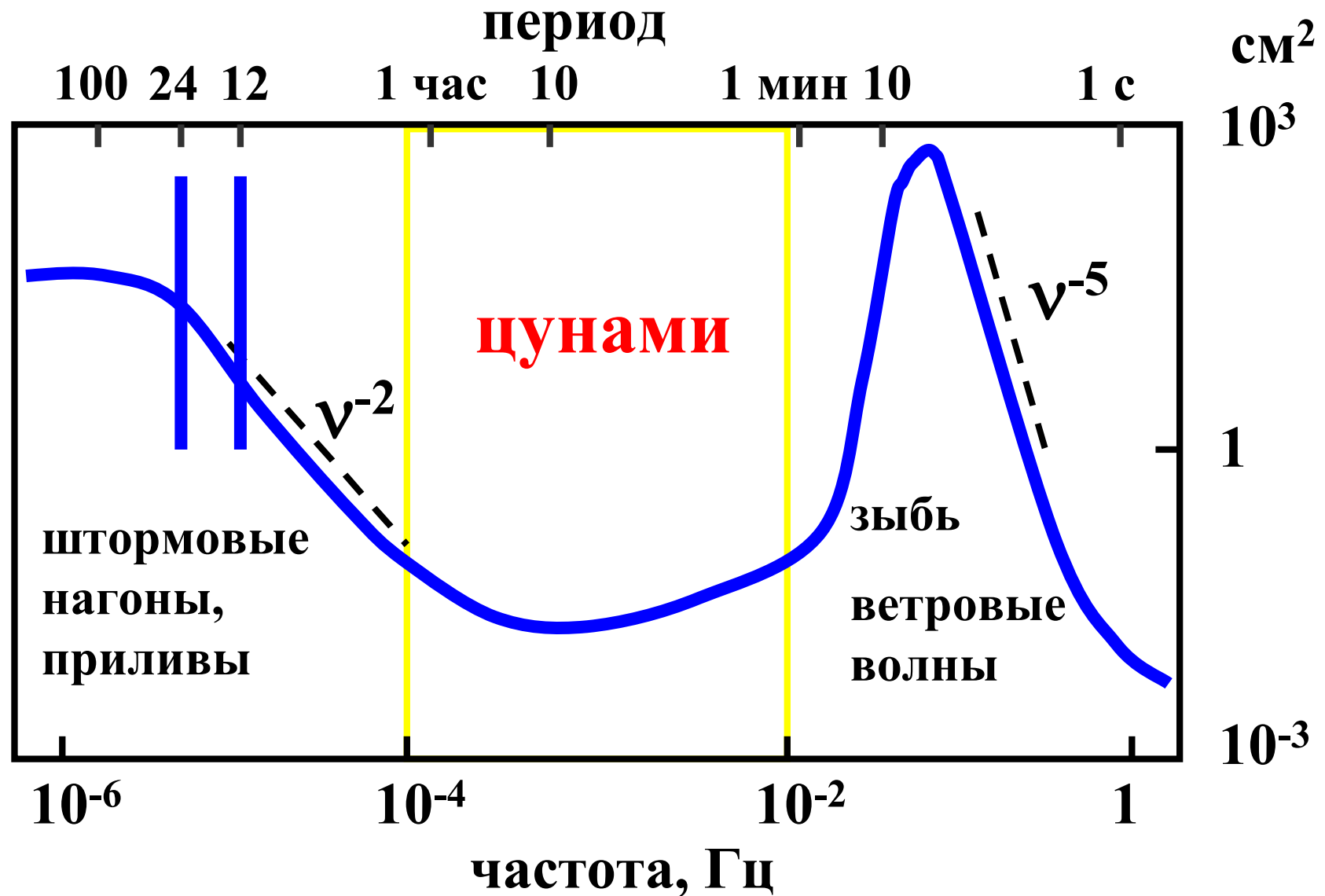


Photo credit: Bishop Museum

**Note water and debris on road in Hilo town ...
Don't be fooled, a tsunami is a series of waves.
This was NOT the 1st wave!**

**Цунами – серия низкочастотных
гравитационных поверхностных
волн, вызванных мощным
воздействием на водный слой**

Спектр гравитационных поверхностных волн в океане



Цунами – серия низкочастотных гравитационных поверхностных волн, вызванных **мощным воздействием** на водный слой

- **подводные землетрясения**
- **оползни и обвалы**
- **вулканические извержения**
- **метеорологические причины**
- **падение метеоритов**

Historical Tsunami Database for the World Ocean (HTDB/WLD)



Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS
Tsunami Laboratory, Novosibirsk, Russia

English ▾

Web Encyclopedia on Natural Hazards

Search

Web Encyclopedia » Online Catalogs » HTDB

Online Database Search

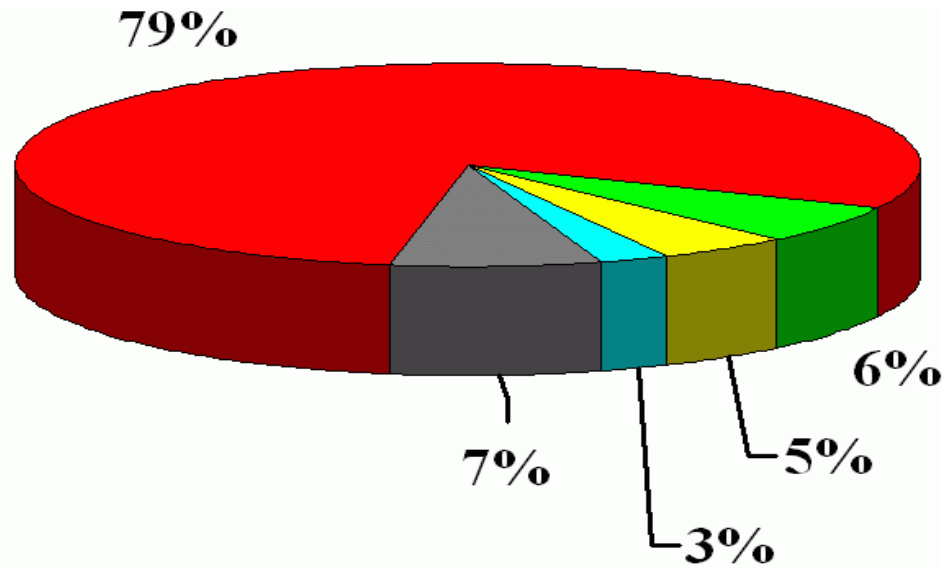
Historical Tsunami Database for the World Ocean (HTDB/WLD)

Choose parameters for tsunami data search

To view the whole database click "search database" button, without modifying any parameters

Year:	<input type="text" value="-6000"/> — <input type="text" value="2015"/>	Area Coordinates ('-' for southern latitude and western longitude):	
Depth:	<input type="text" value="0"/> — <input type="text" value="600"/>	Latitude:	<input type="text" value="-90"/> — <input type="text" value="90"/>
Magnitude:	<input type="text" value="3.2"/> — <input type="text" value="9.3"/>	Longitude:	<input type="text" value="-180"/> — <input type="text" value="180"/>
Tsunami intensity:	<input type="text" value="-5"/> — <input type="text" value="4.5"/>	Number of Run-ups:	<input type="text" value="0"/> — <input type="text" value="5772"/>
Tsunami Magnitude:	<input type="text" value="-4"/> — <input type="text" value="9"/>	Tsunamiogenic Region Code:	<input type="text" value="Any"/>
Wave Height:	<input type="text" value="0"/> — <input type="text" value="525"/>	Basic reference code:	<input type="text" value="Any"/>
Moment magnitude:	<input type="text" value="4.9"/> — <input type="text" value="9.6"/>	Source Region:	<input type="text"/>
Abe's tsunami magnitude	<input type="text" value="6"/> — <input type="text" value="9.4"/>	Damage:	<input checked="" type="checkbox"/> None <input checked="" type="checkbox"/> Small <input checked="" type="checkbox"/> Medium <input checked="" type="checkbox"/> High
Cause of Tsunami:	(Ctrl+ Click to select more than one):	Validity:	<input type="text" value="0"/> — <input type="text" value="4"/>
<input type="checkbox"/> Volcanic		Results per page:	<input type="text" value="25"/>
<input type="checkbox"/> Landslide			
<input type="checkbox"/> Meteorological			
<input type="checkbox"/> Seiches			

<http://tsun.sccc.ru/tsunami-database/index.php>



HTDB/WLD



■ **подводные землетрясения**

■ **оползни и обвалы**

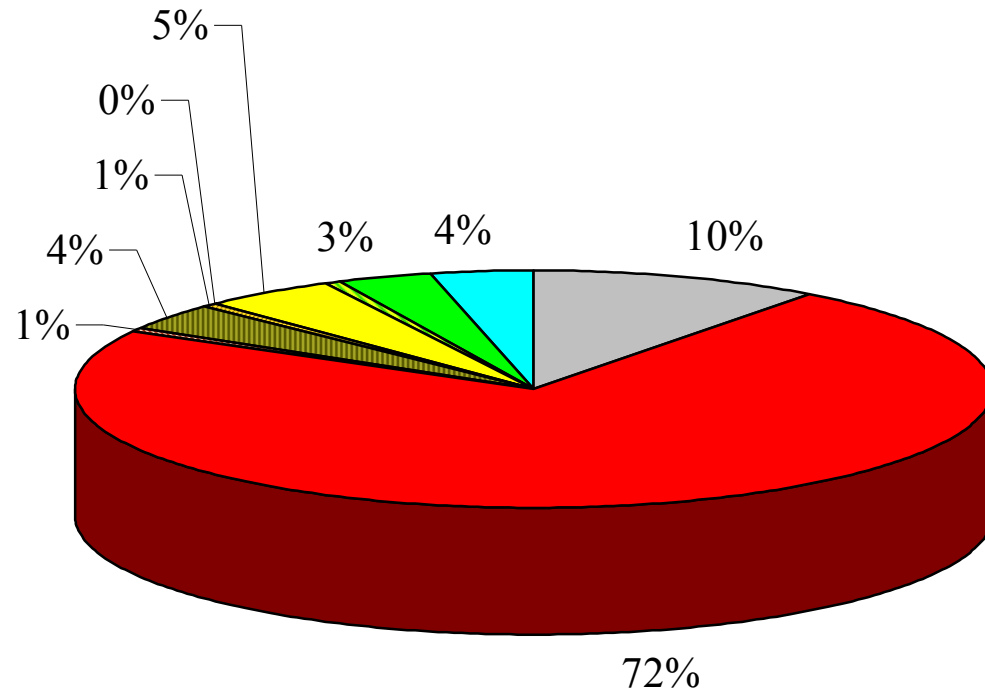
■ **вулканические извержения**

■ **метеорологические причины**

■ **падение метеоритов (нет данных)**

■ **причина неизвестна**

NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database



https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

Смотри,
волна
цунами!!



А я не вижу
никакой
волны!!!



100 - 1000 км



$A \sim 1 \text{ м}$

$H \approx 4 \text{ км}$

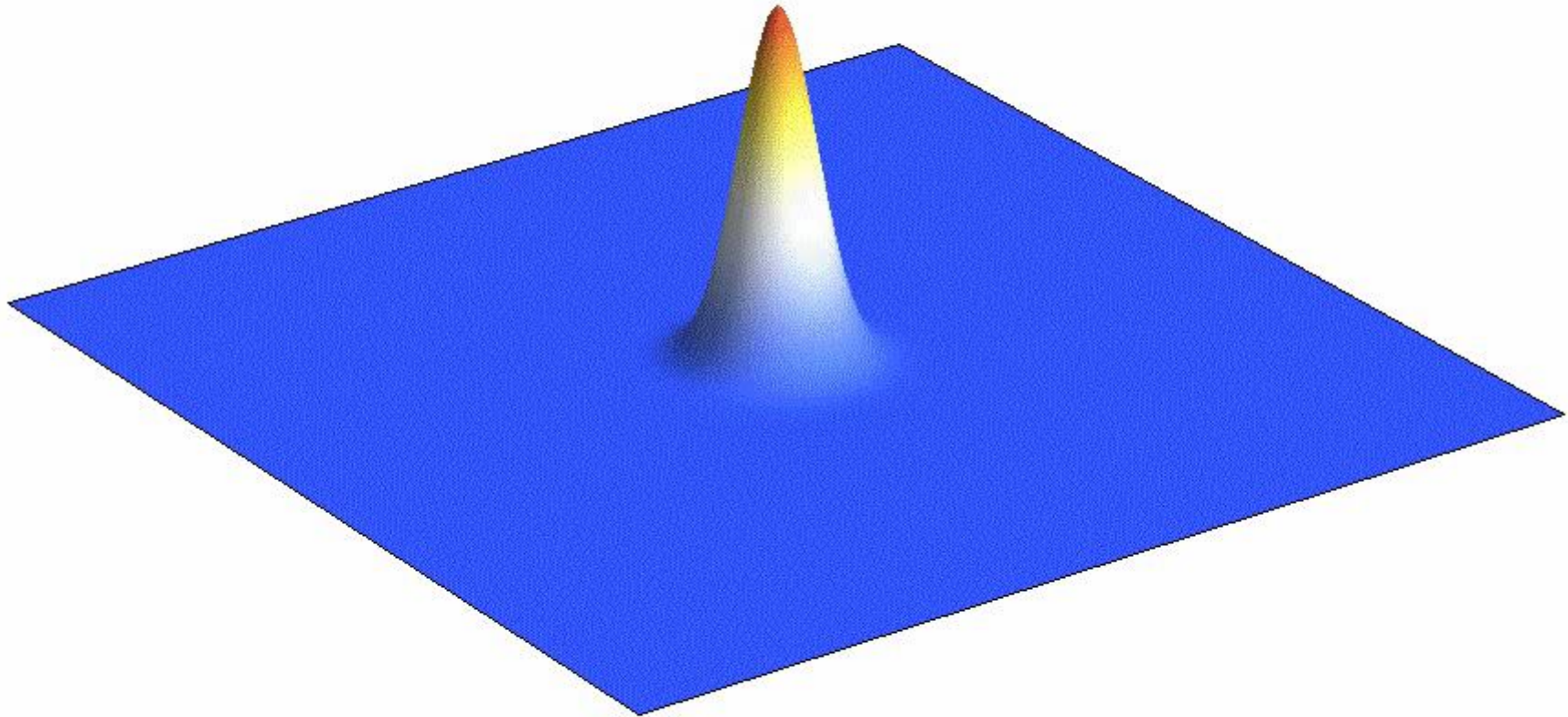
$$c = \sqrt{gH} \approx 200 \text{ м/с}$$

$$U_{\text{гориз}} = A \sqrt{g/H} \approx 0.05 \text{ м/с}$$

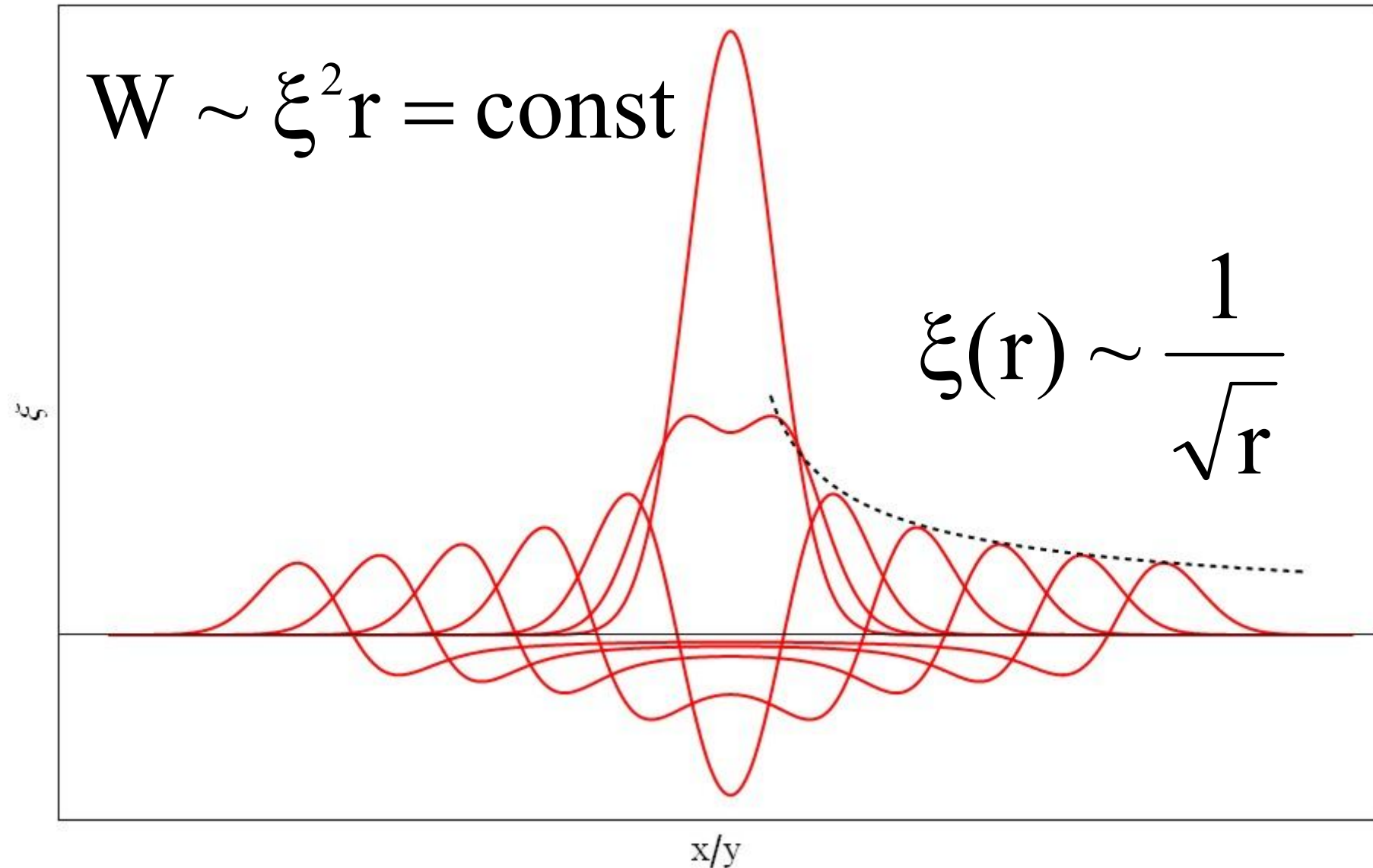
Особенность цунами №1 – способность волны сохранять разрушительный потенциал при распространении на трансокеанские расстояния (более 10 тыс.км)

- **Чилийское цунами 1960 г. пересекло Тихий океан (17 тыс.км) и проявилось с амплитудой 4-6 м в Японии (138 погибших, \$50 млн. ущерб) и на дальневосточном побережье СССР (30 млн.руб. ущерб)**
- **Алеутское цунами 1946 г., преодолев 16 тыс.км разрушило экспедиционную хижину на острове Винтер (вблизи Земли Грэхема в Антарктиде)**

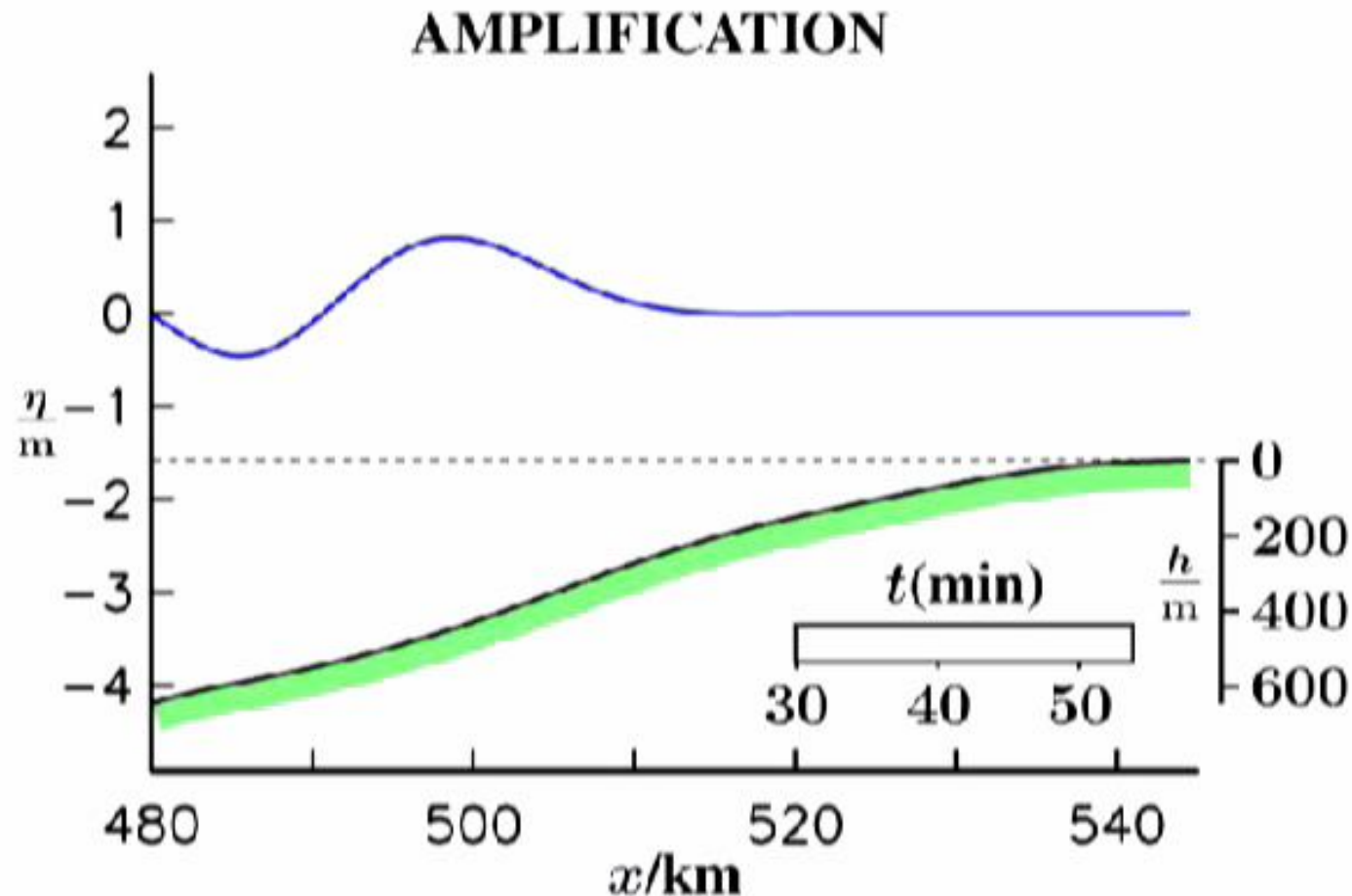
$a/b=1$, time=000 s



Профили волн в последовательные моменты времени (0, 50, 100, 200, 300, 400 и 500 с)

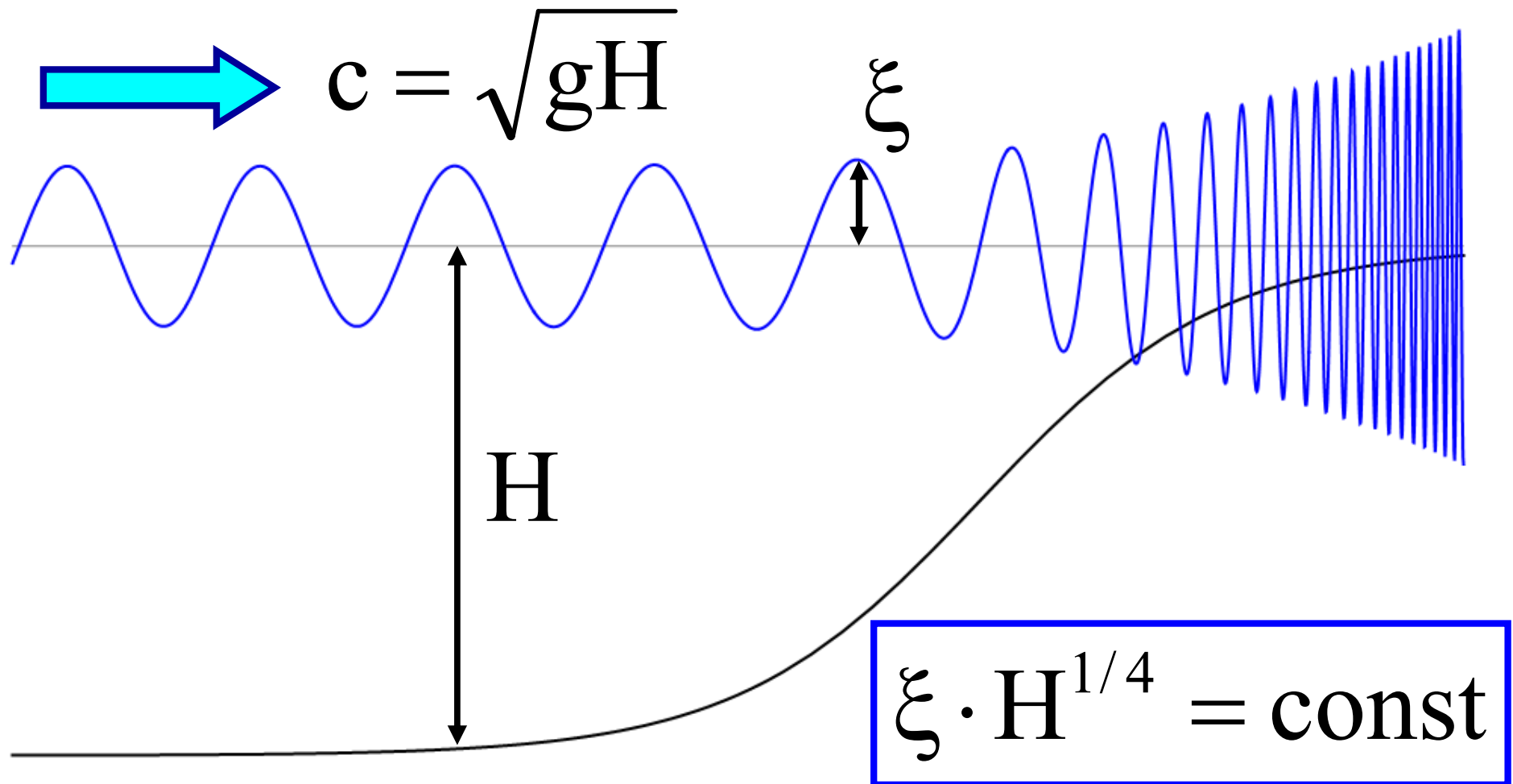


Особенность цунами №2 – увеличение амплитуды смещения поверхности и скорости горизонт. течений при уменьшении глубины



Закон Грина (закон "1/4")

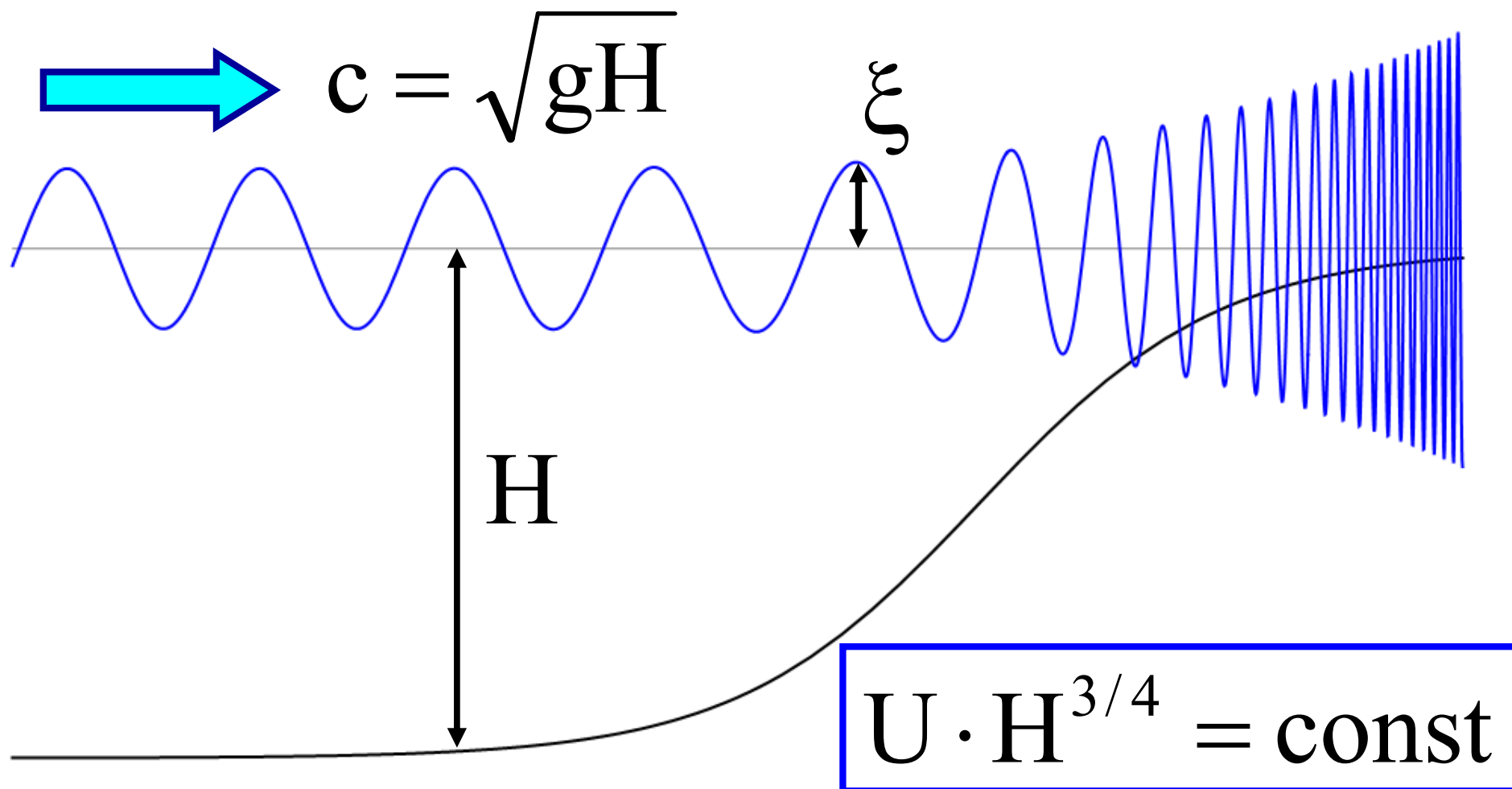
$$W \sim \xi^2 \quad Q \sim \xi^2 c \sim \xi^2 \sqrt{H} = \text{const}$$



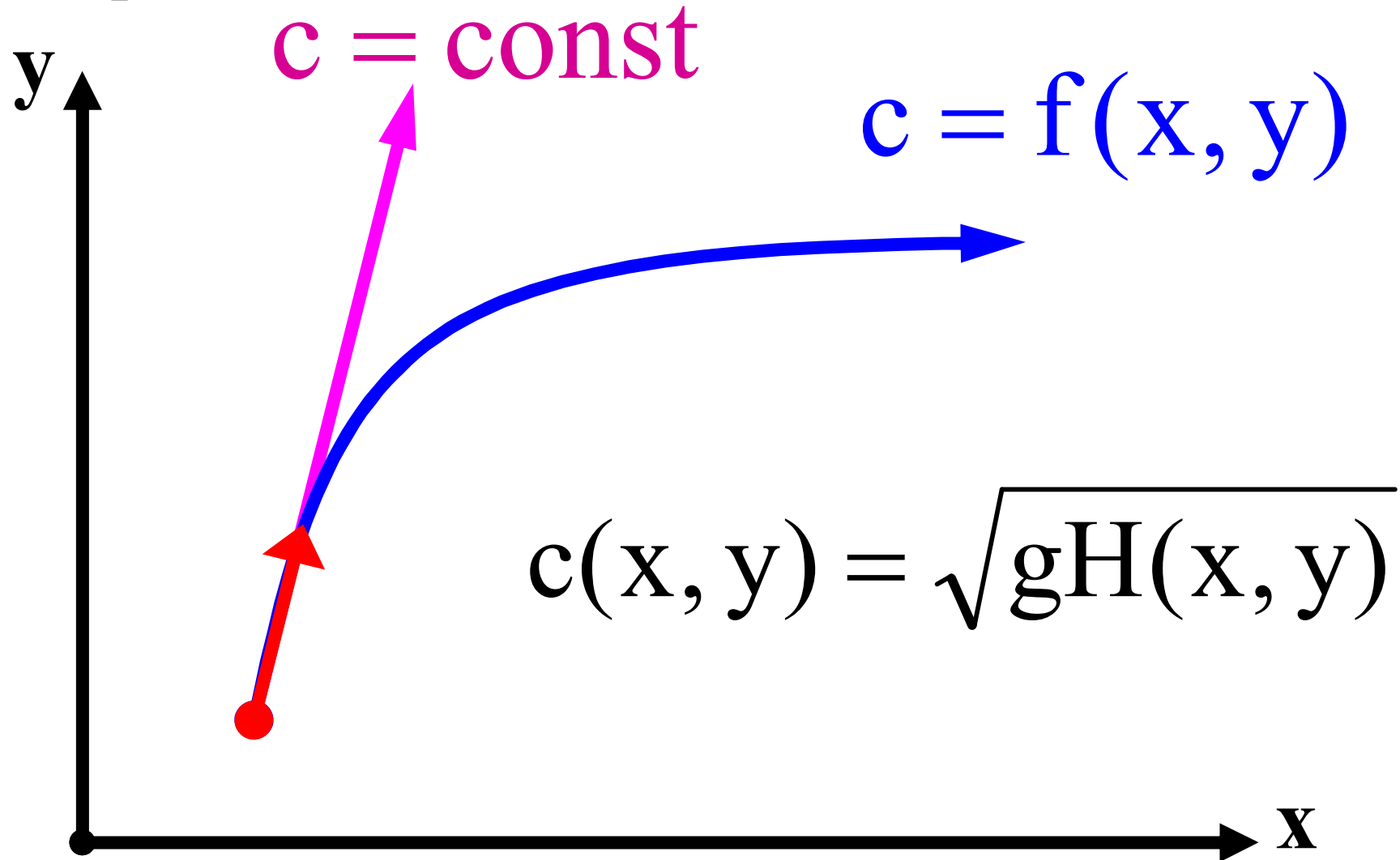
Закон для скорости течения (закон «3/4»)

$$W \sim U^2 H$$

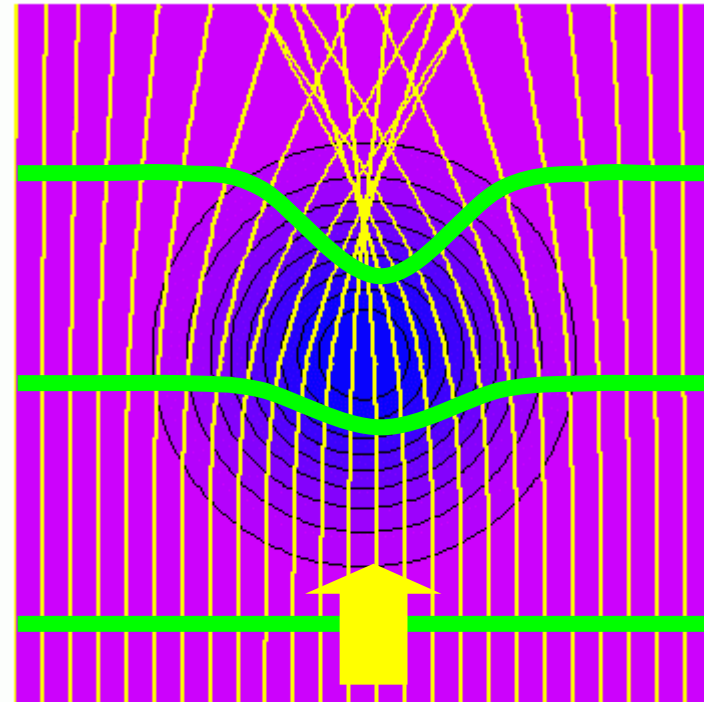
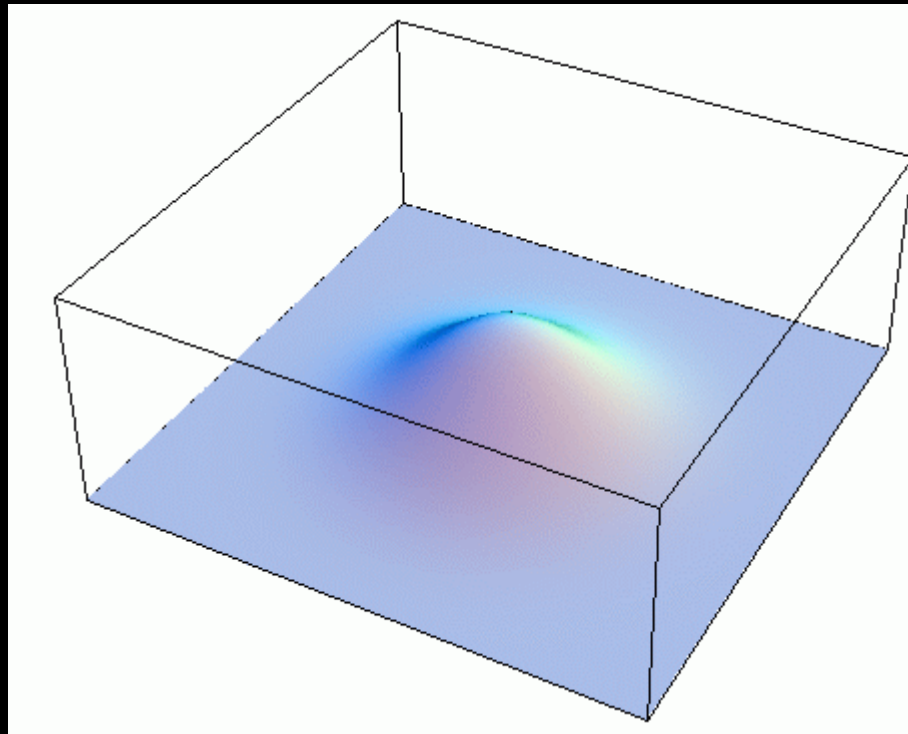
$$Q \sim U^2 H c \sim U^2 H^{3/2} = \text{const}$$



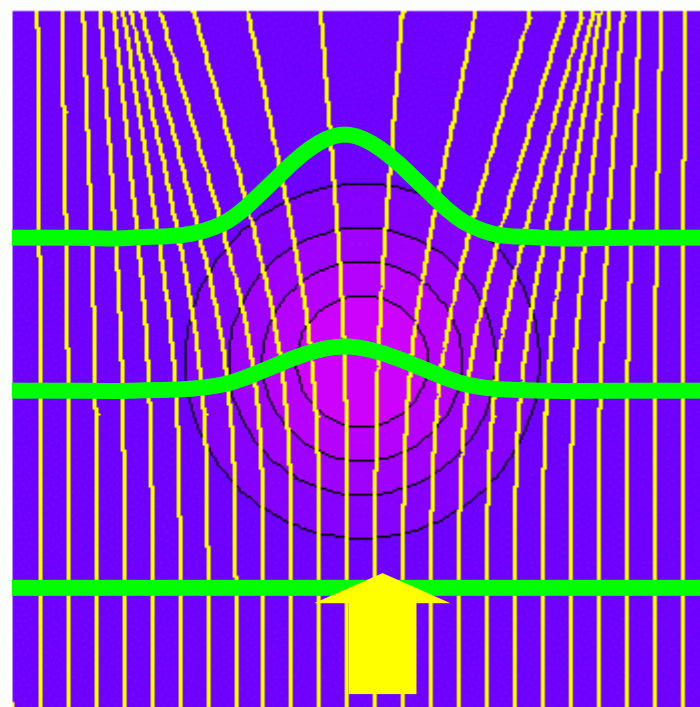
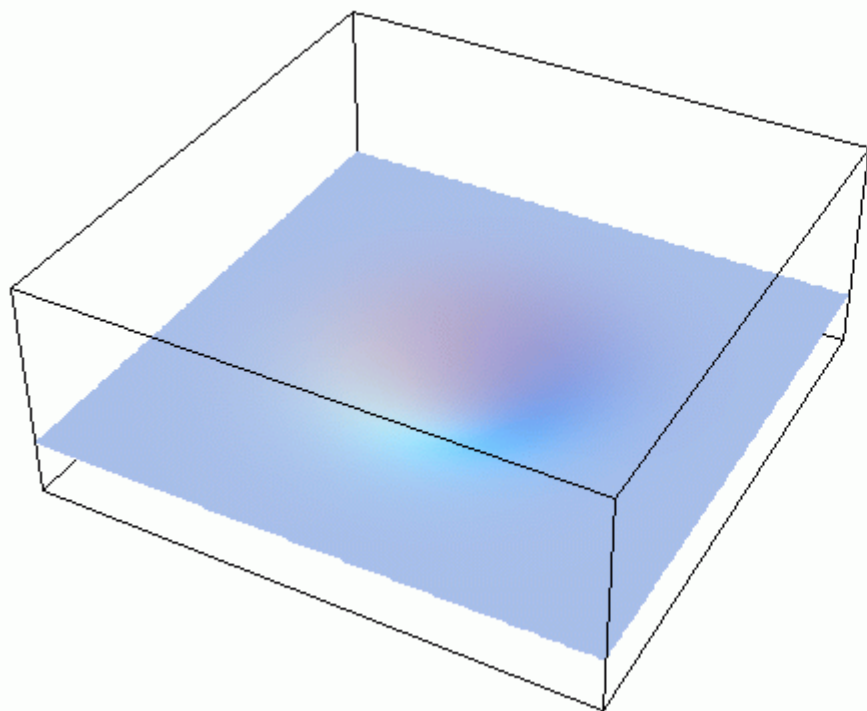
Особенность цунами №3 – волны фокусируются (дефокусируются) и захватываются формами рельефа дна океана



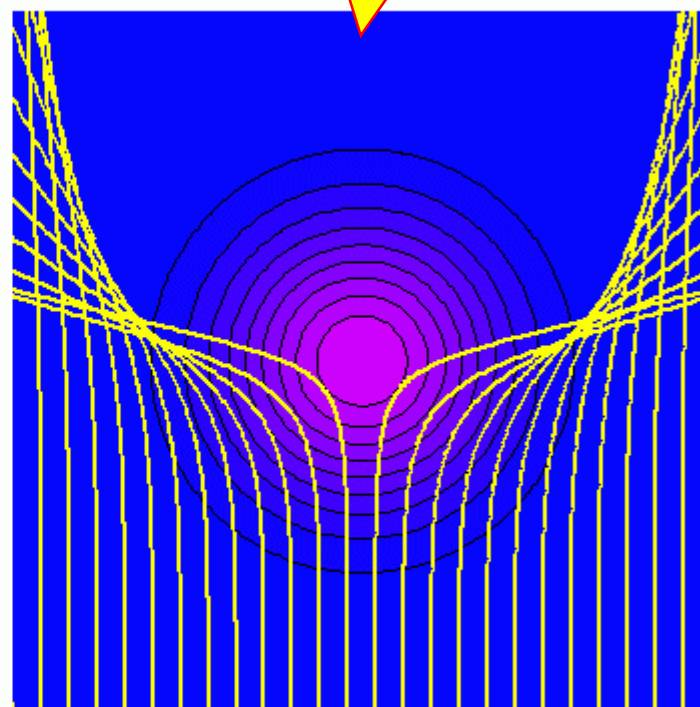
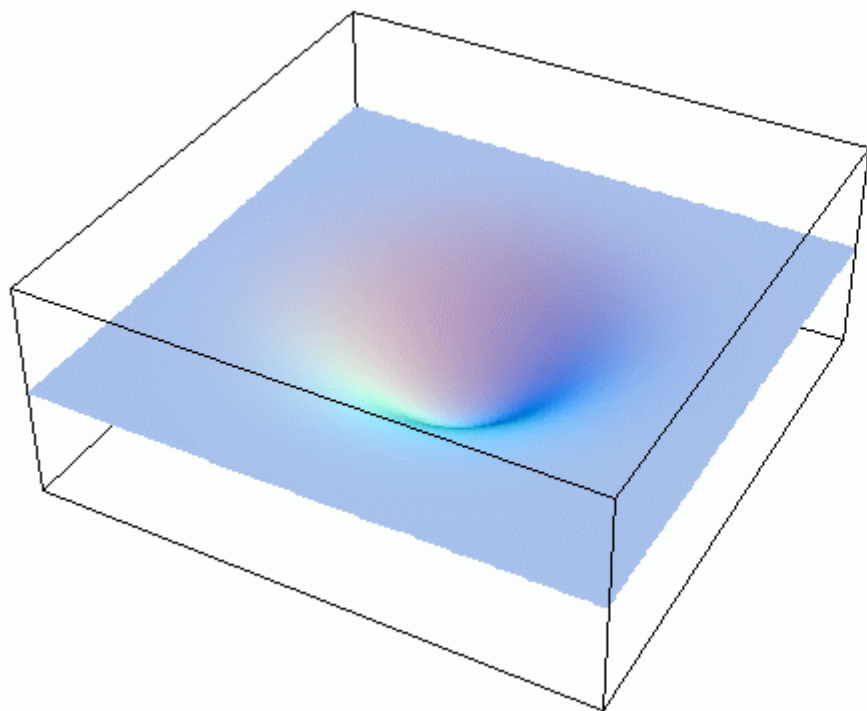
Фокусировка лучей областью с пониженной скоростью распространения волн



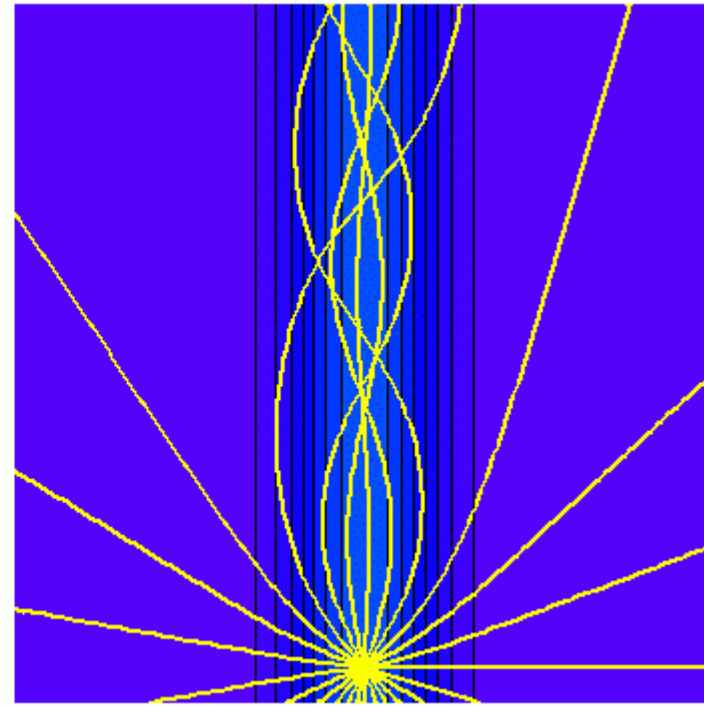
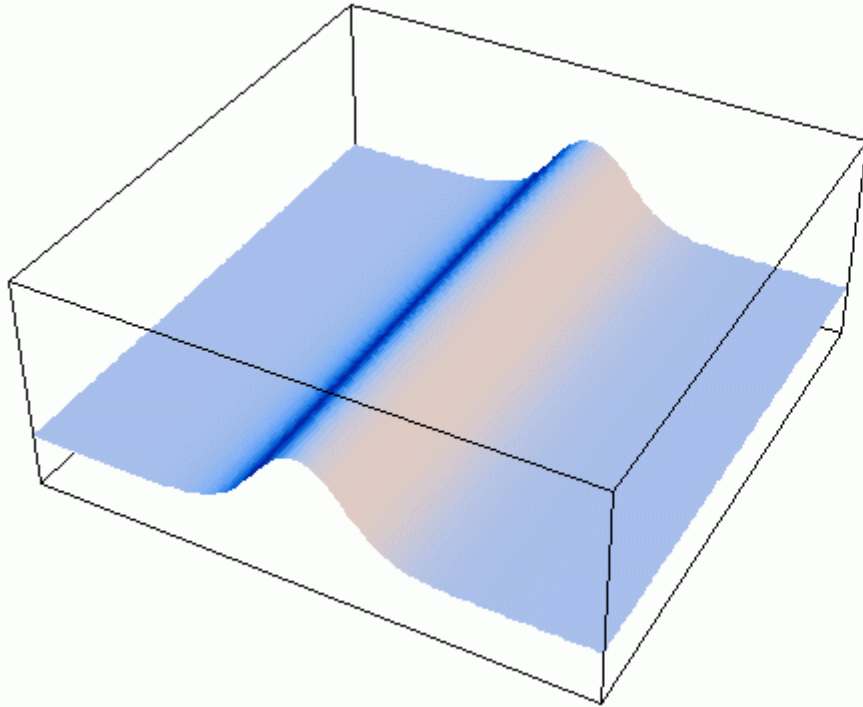
Дефокусировка лучей областью с повышенной скоростью распространения волн



Зона тени

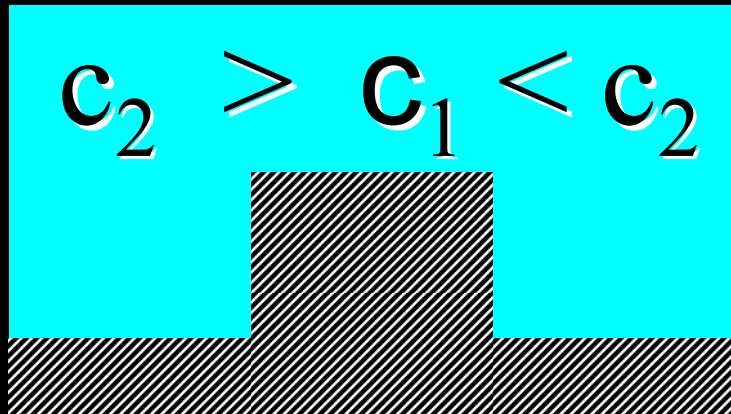


Захват волн подводными хребтами

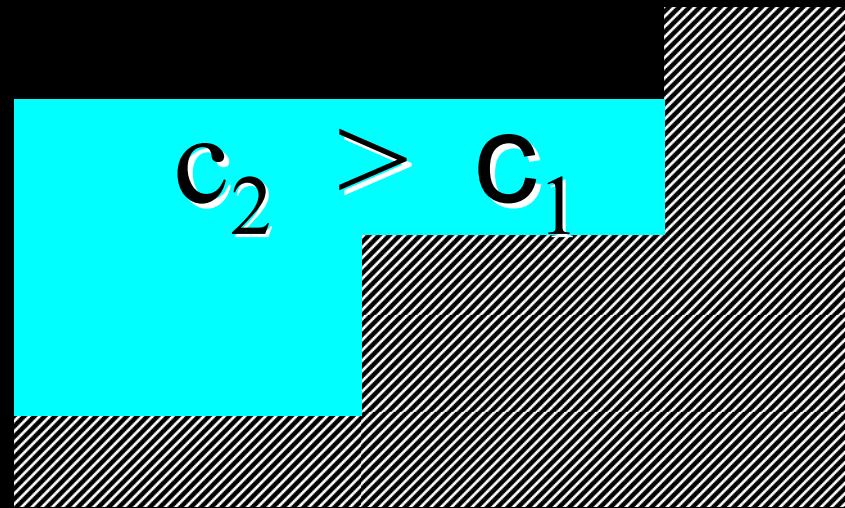


Захваченные волны

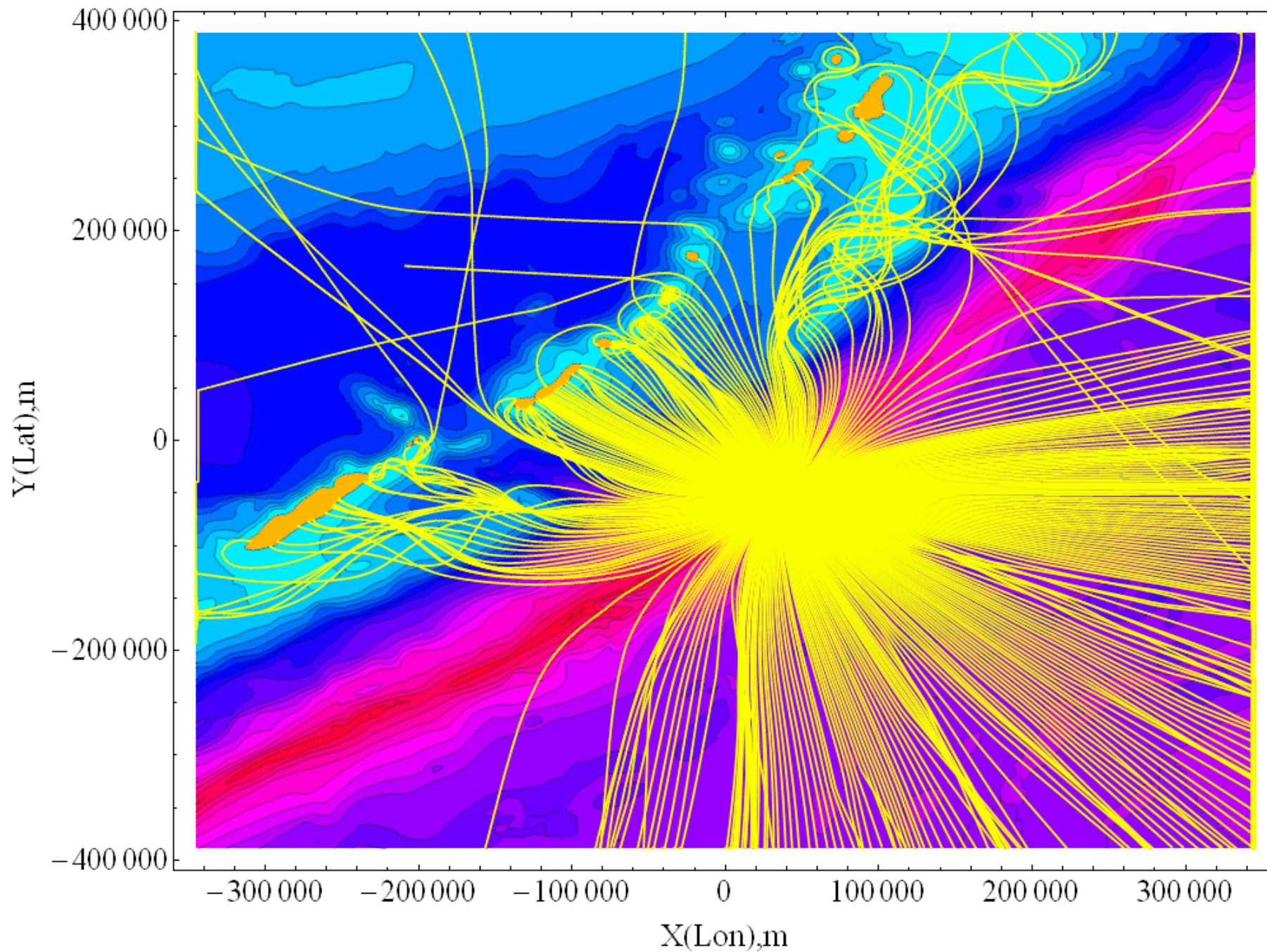
ПОДВОДНЫЙ
хребет



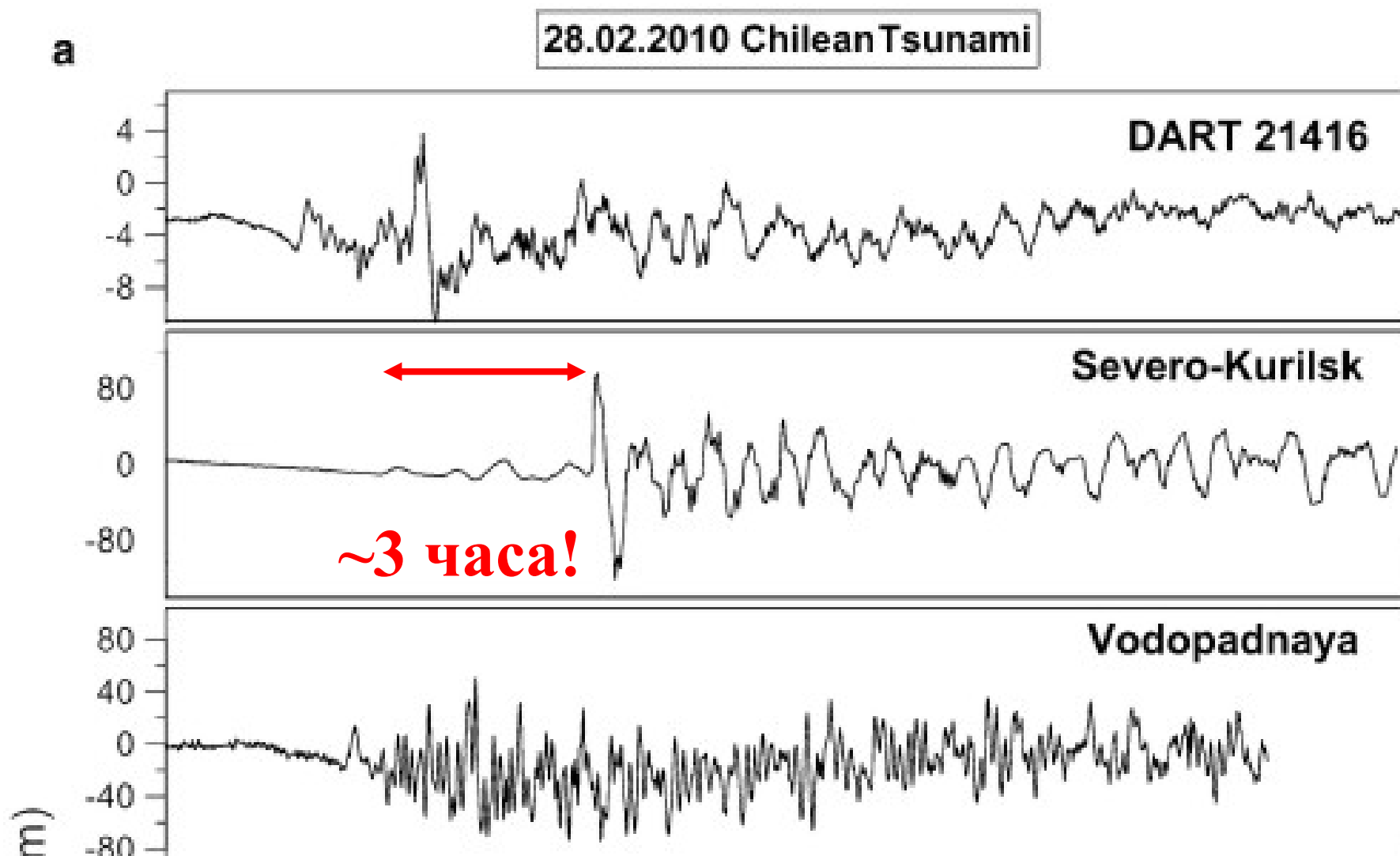
МАТЕРИКОВЫЙ
склон и берег



Лучи от точечного источника на реальной батиметрии (Центральные Курилы)

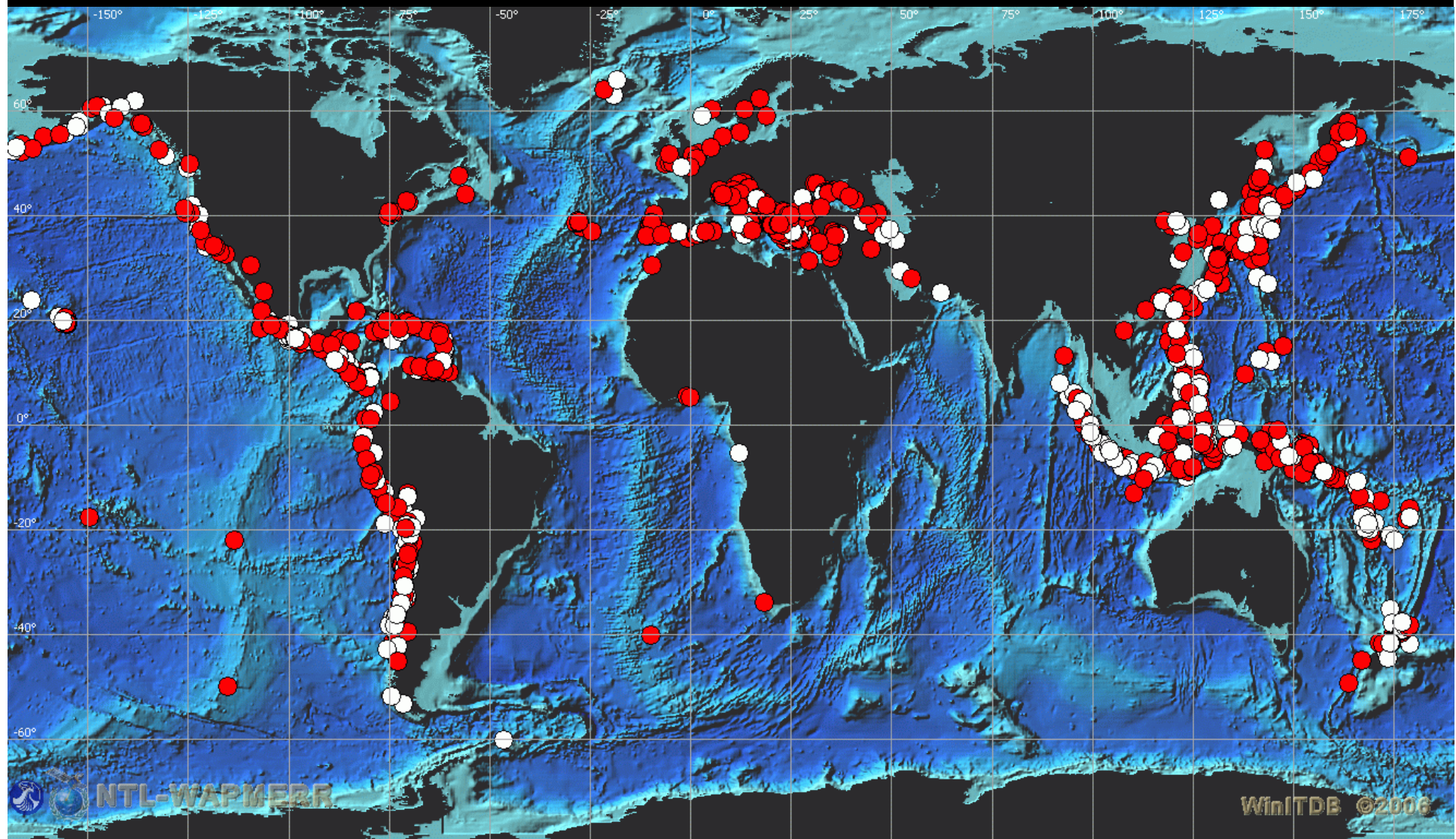


Особенность цунами №4 – первая волна далеко не всегда бывает самой сильной (эффект запаздывания максимальной волны)

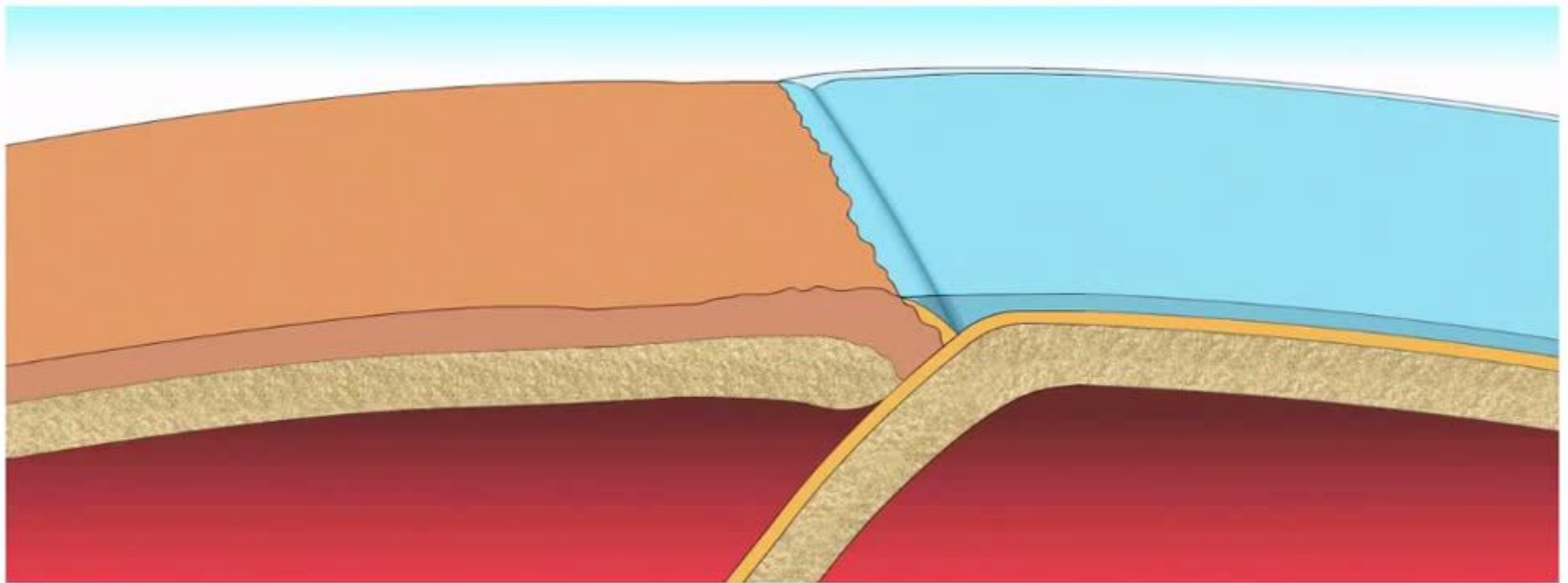


**Генерация
цунами
землетрясением**

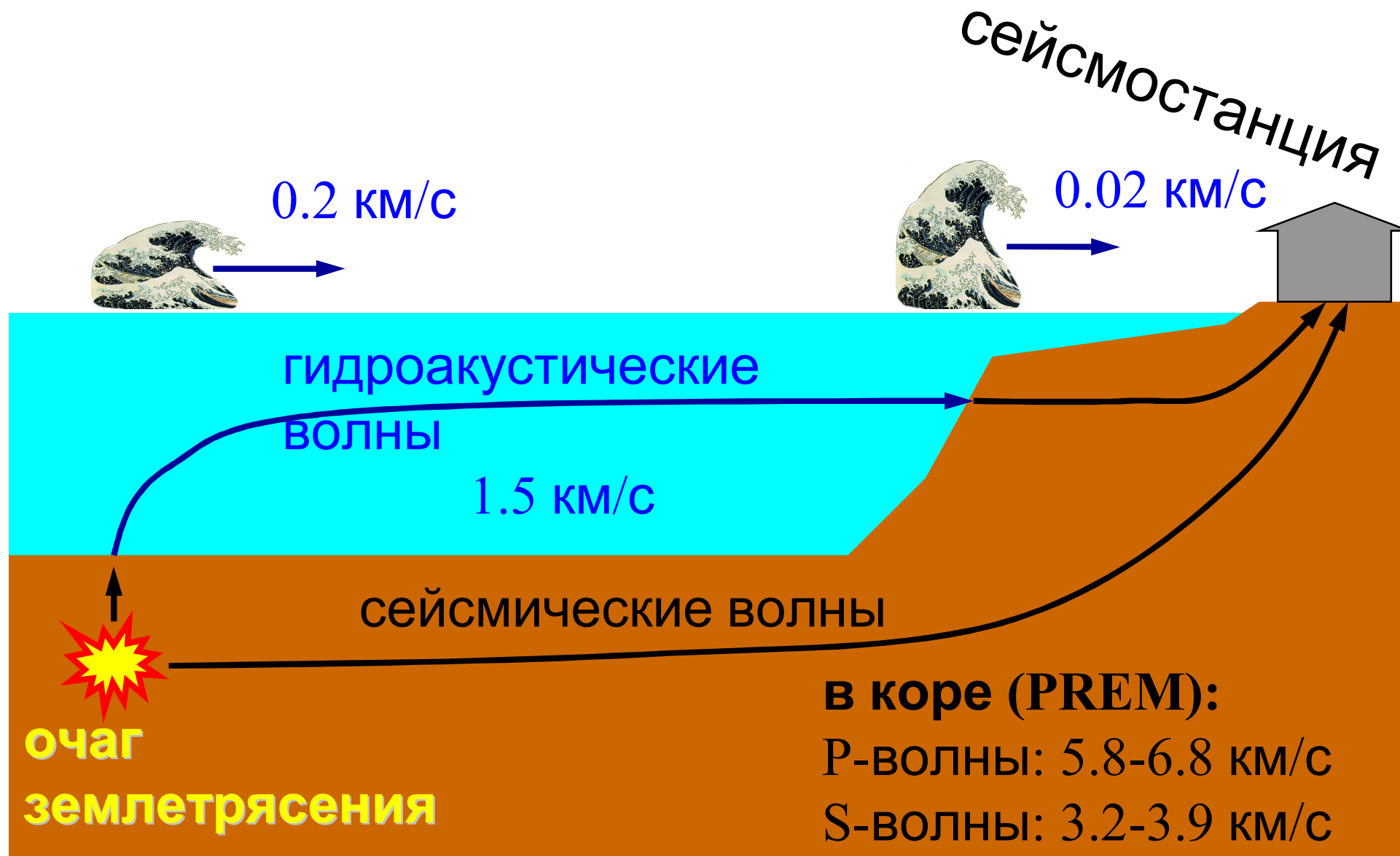
Очаги сейсмотектонических цунами



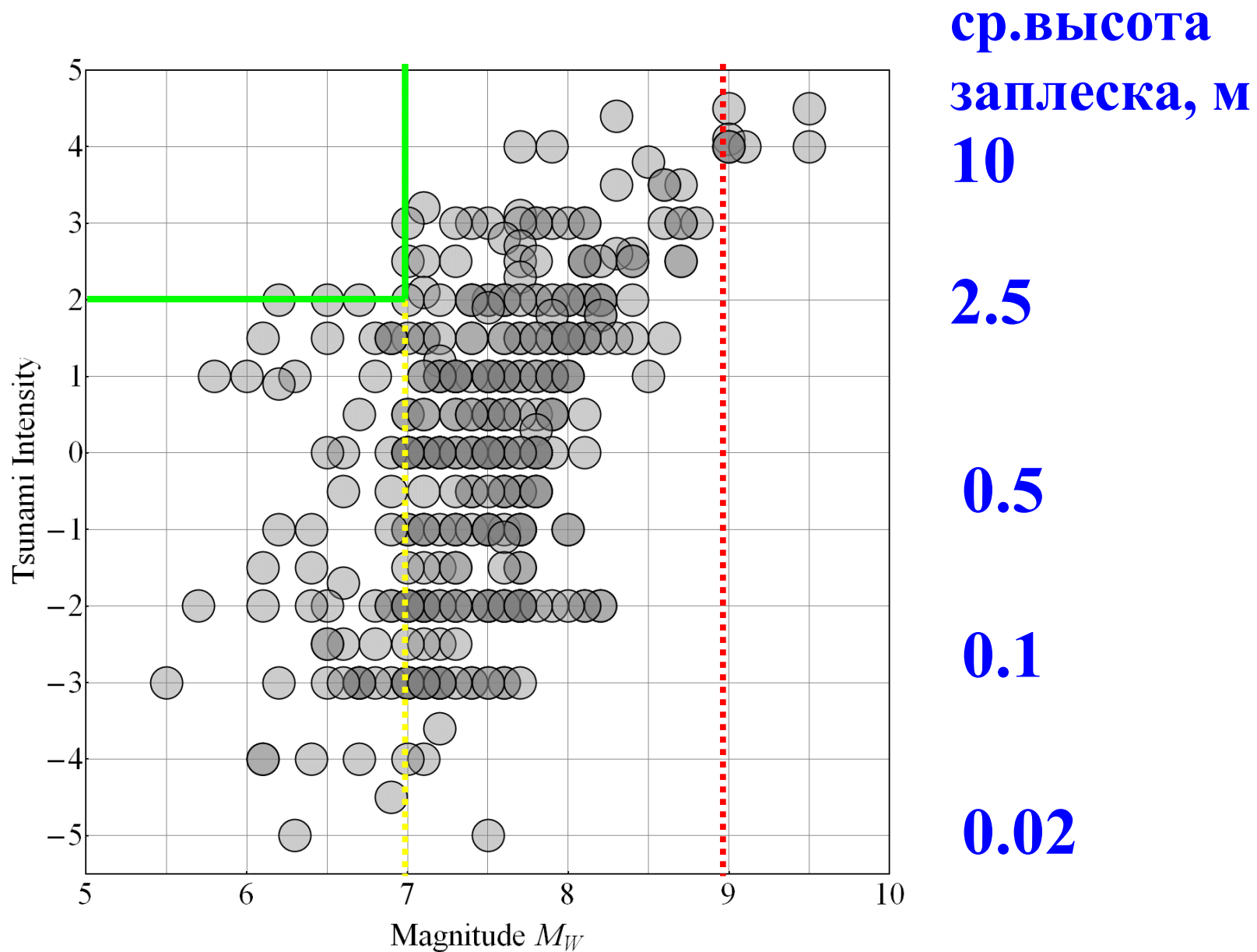
Subduction Zone



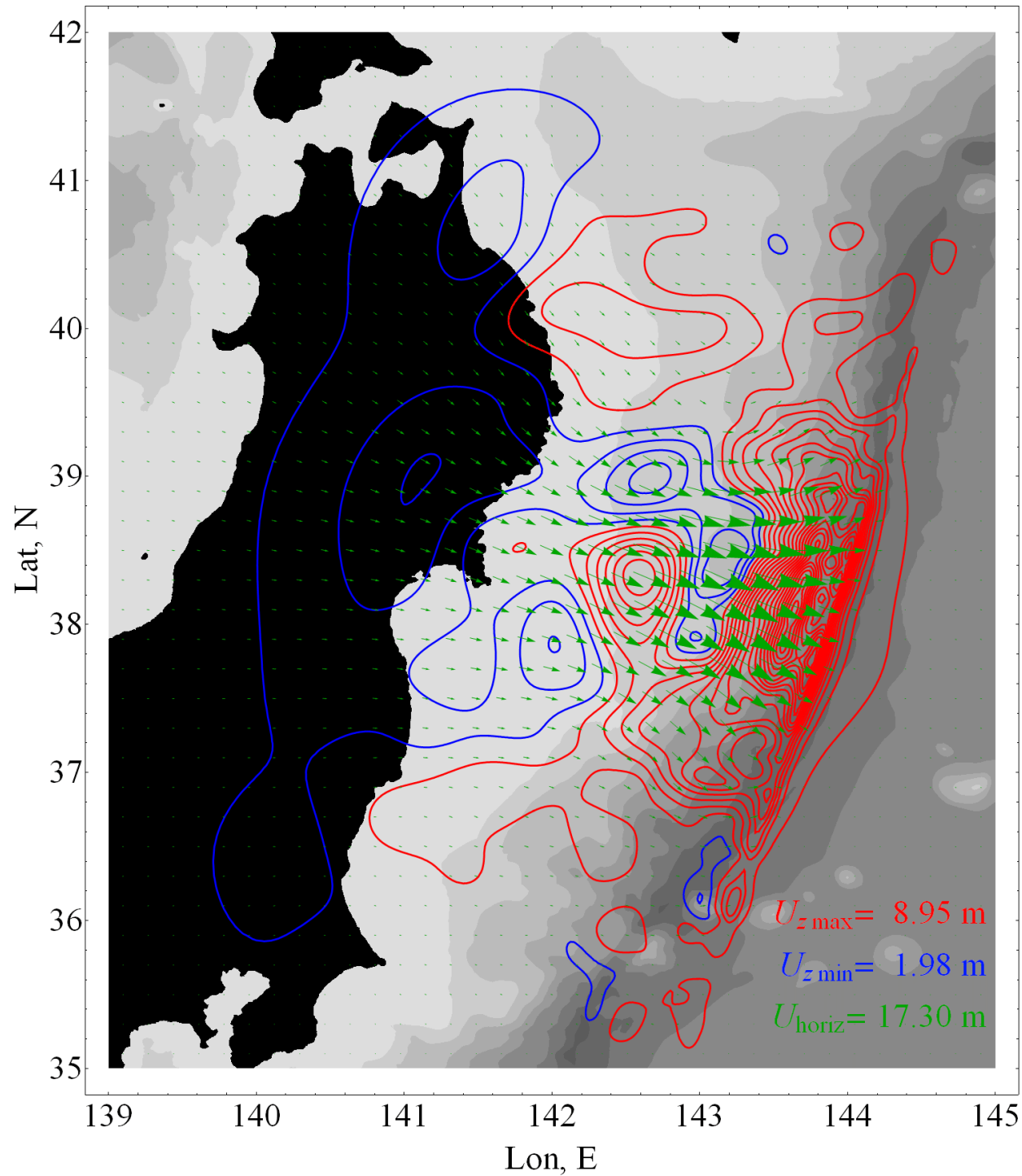
Сейсмогенные цунами можно прогнозировать!



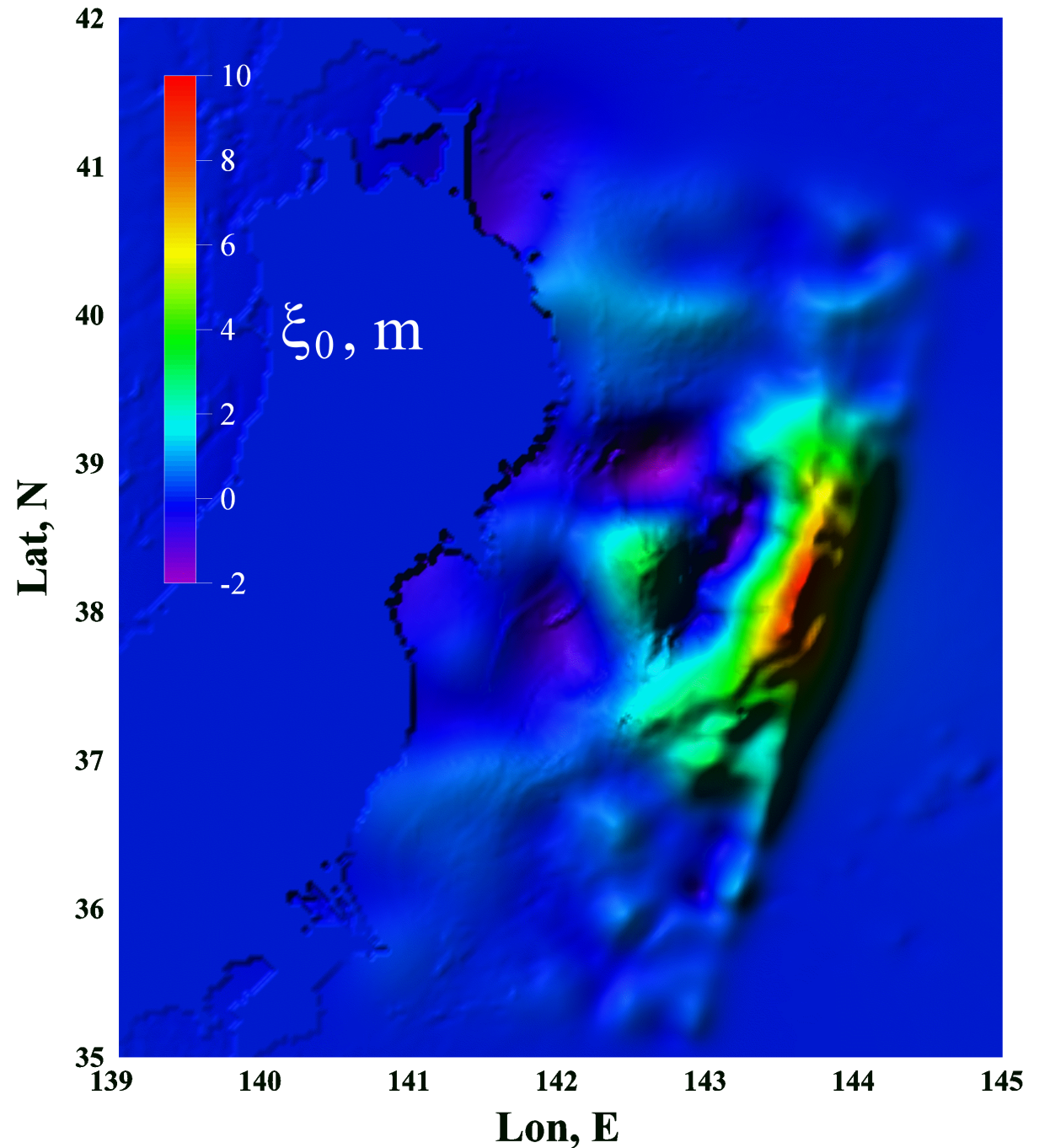
Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения M_W



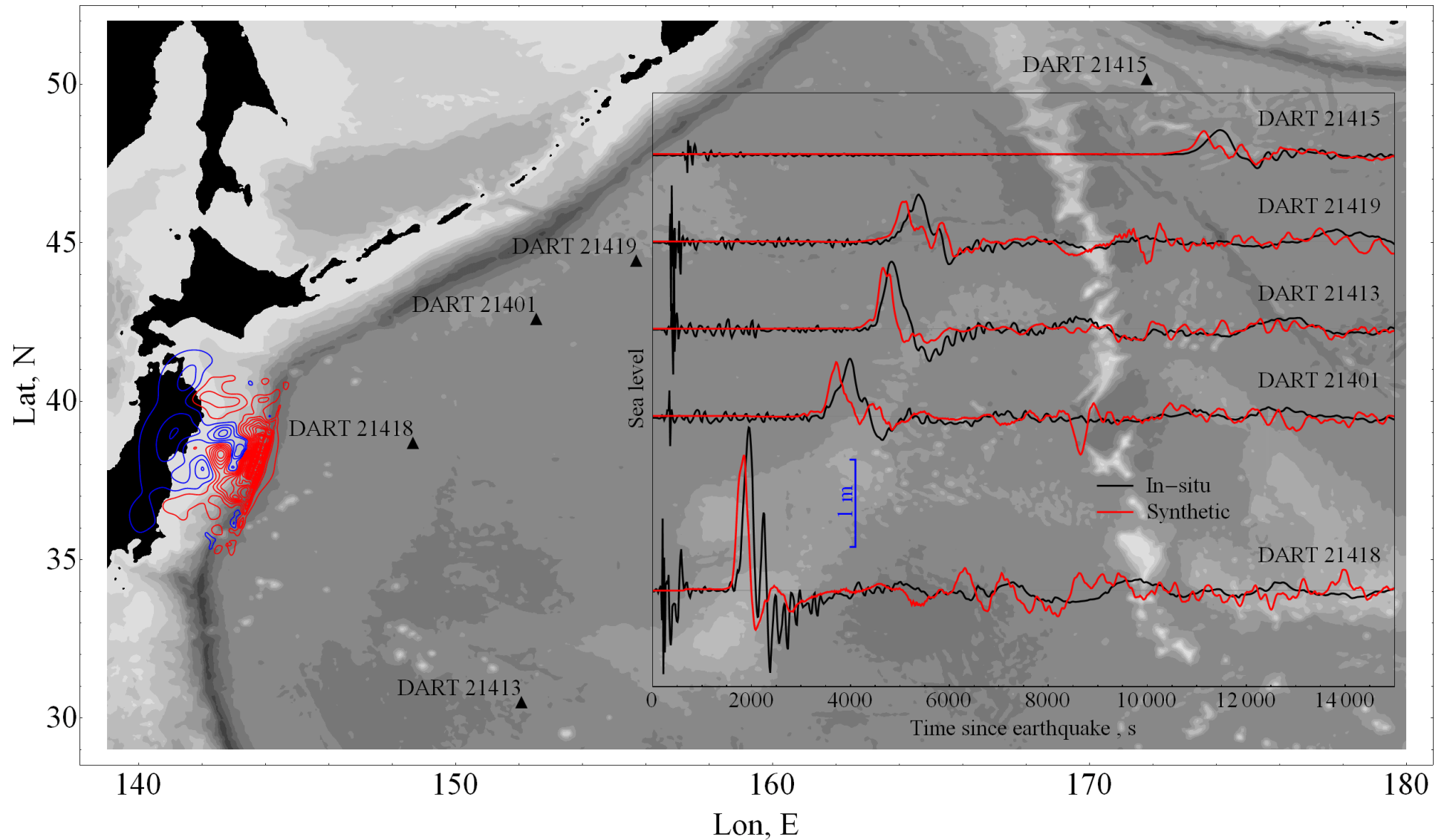
Остаточная деформация дна после землетрясения 11 марта 2011 г



**Смещение
поверхности
воды в очаге
цунами,
восстановленное
по остаточной
деформации дна**

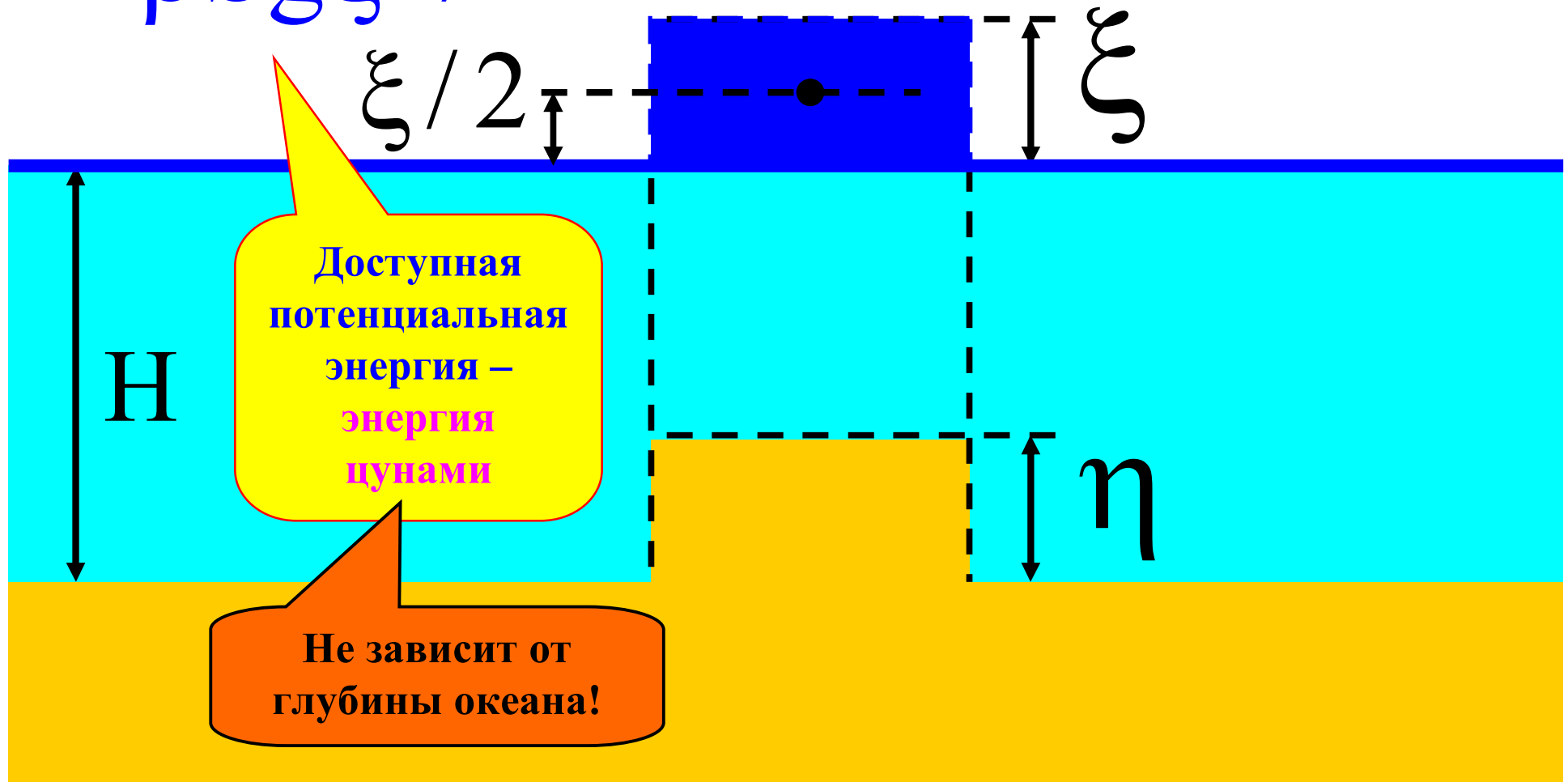


Синтетические и измеренные волновые формы



$$\xi = \eta$$

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

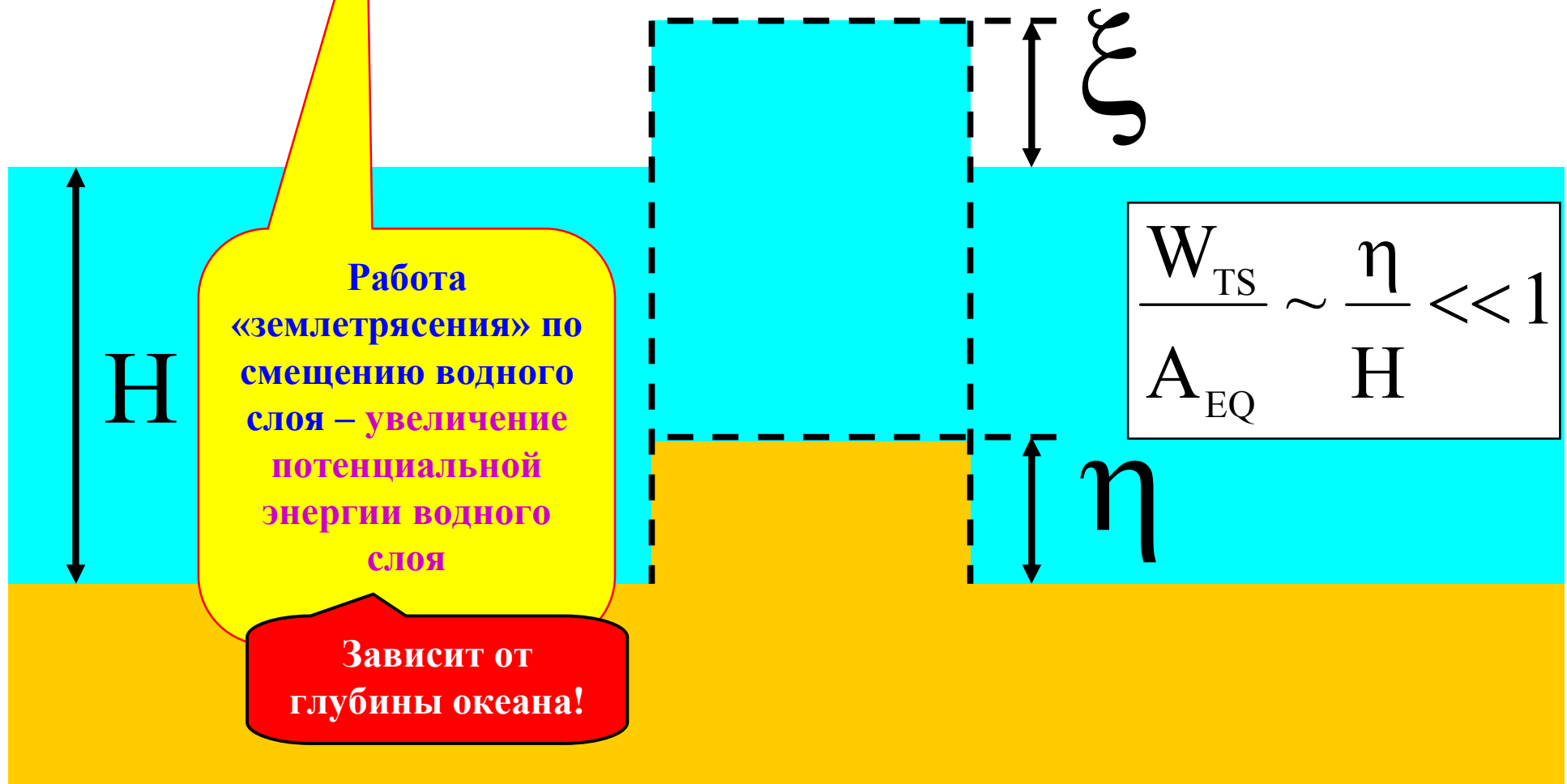


Доступная
потенциальная
энергия –
энергия
цунами

Не зависит от
глубины океана!

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

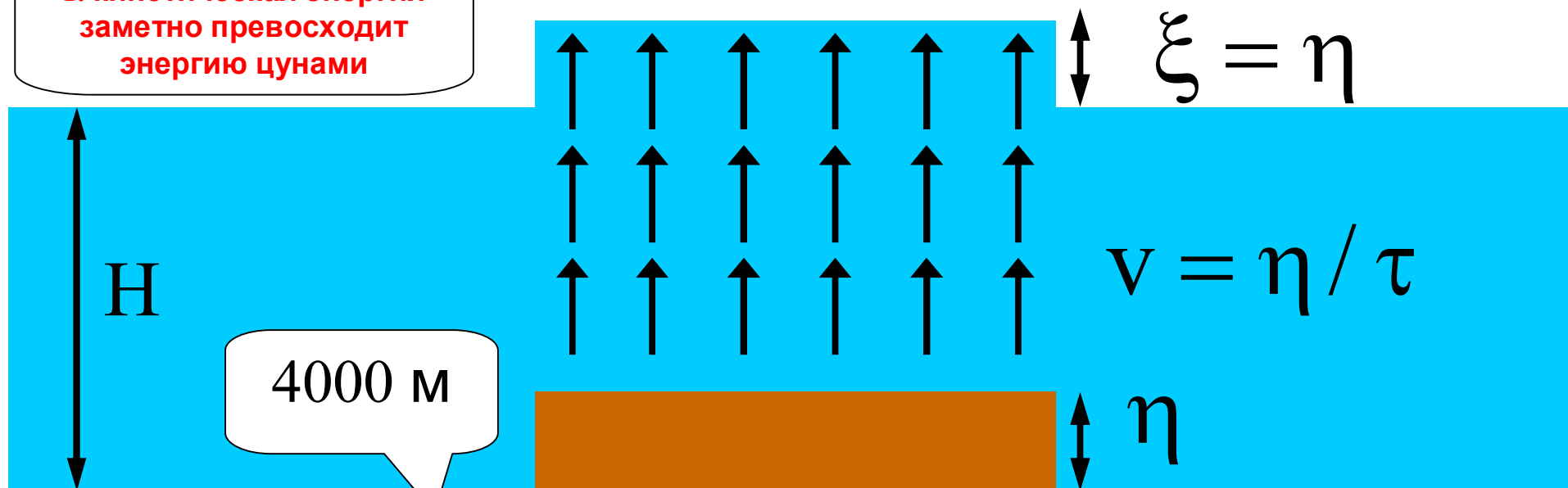
$\xi = \eta$



Парадокс теории несжимаемой жидкости

$$W_k = \underbrace{\rho HS}_m \frac{v^2}{2} = \rho HS \frac{\eta^2}{2\tau^2} \quad W_{TS} = \frac{\rho g \xi^2 S}{2} = \frac{\rho g \eta^2 S}{2}$$

1. кинетическая энергия заметно превосходит энергию цунами



$$W_k / W_{TS} = H / g\tau^2 \approx 4$$

9.8 м/с²

10 с

2. в рамках теории несжимаемой жидкости после завершения подвижки кинетическая энергия исчезает!

Оценка энергии акустических волн

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

F

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

$$\updownarrow \xi = \eta$$

H

1500 м/с

$\updownarrow \eta$

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

9.8 м/с²

10 с

**Акустические волны
доминируют!**

Обитатели морских глубин, стремясь избежать некомфортных перепадов давления, вызываемых подводными землетрясениями, уходят на мелководье или к поверхности воды. В итоге они часто оказываются выброшенными на берег волной цунами.



Генерация

цунами

ОПОЛЗНЯМИ

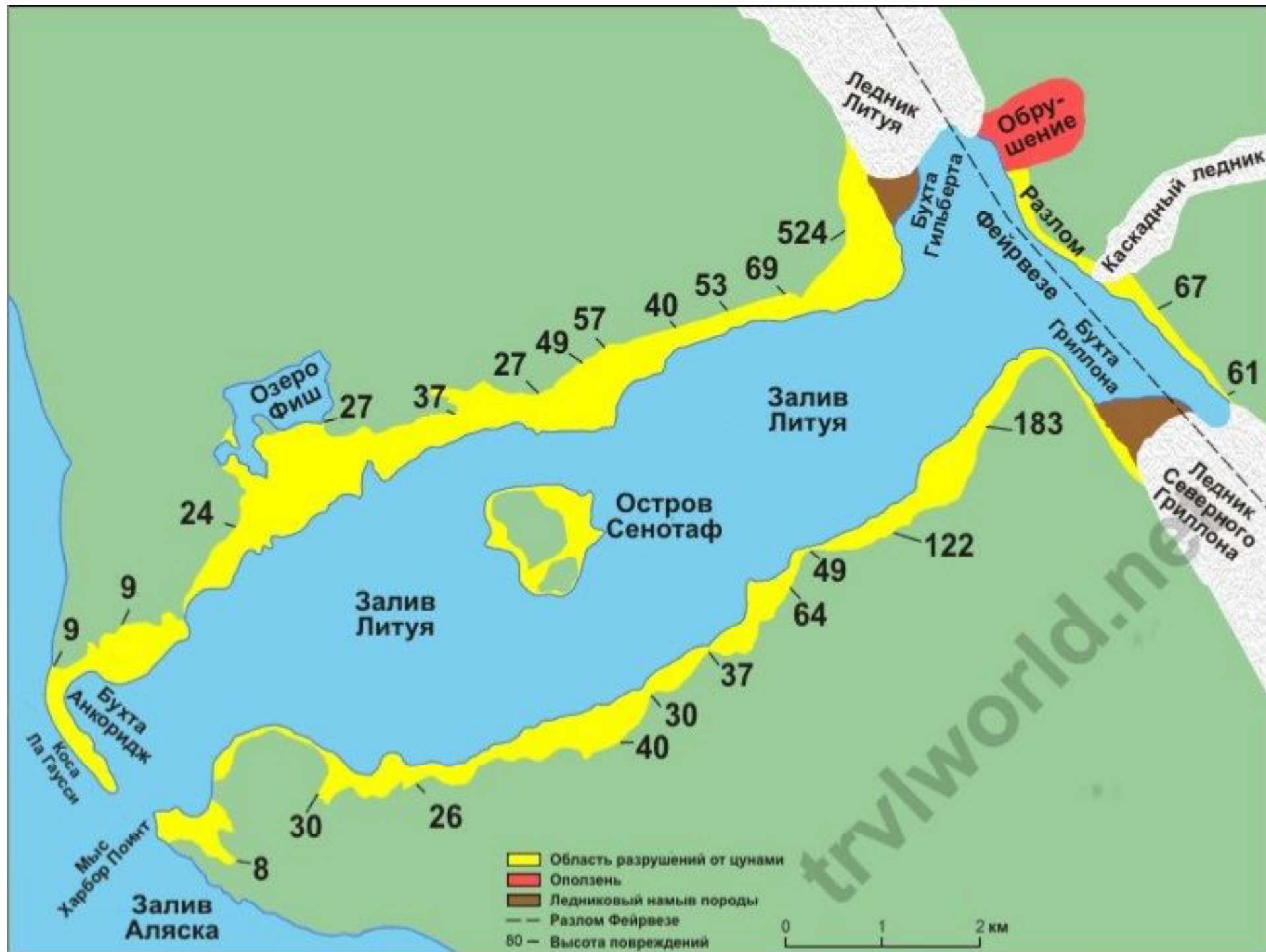
Бухта Литуйя, Аляска, 9 июля 1958 г
оползень объемом $\sim 0.3 \text{ км}^3$

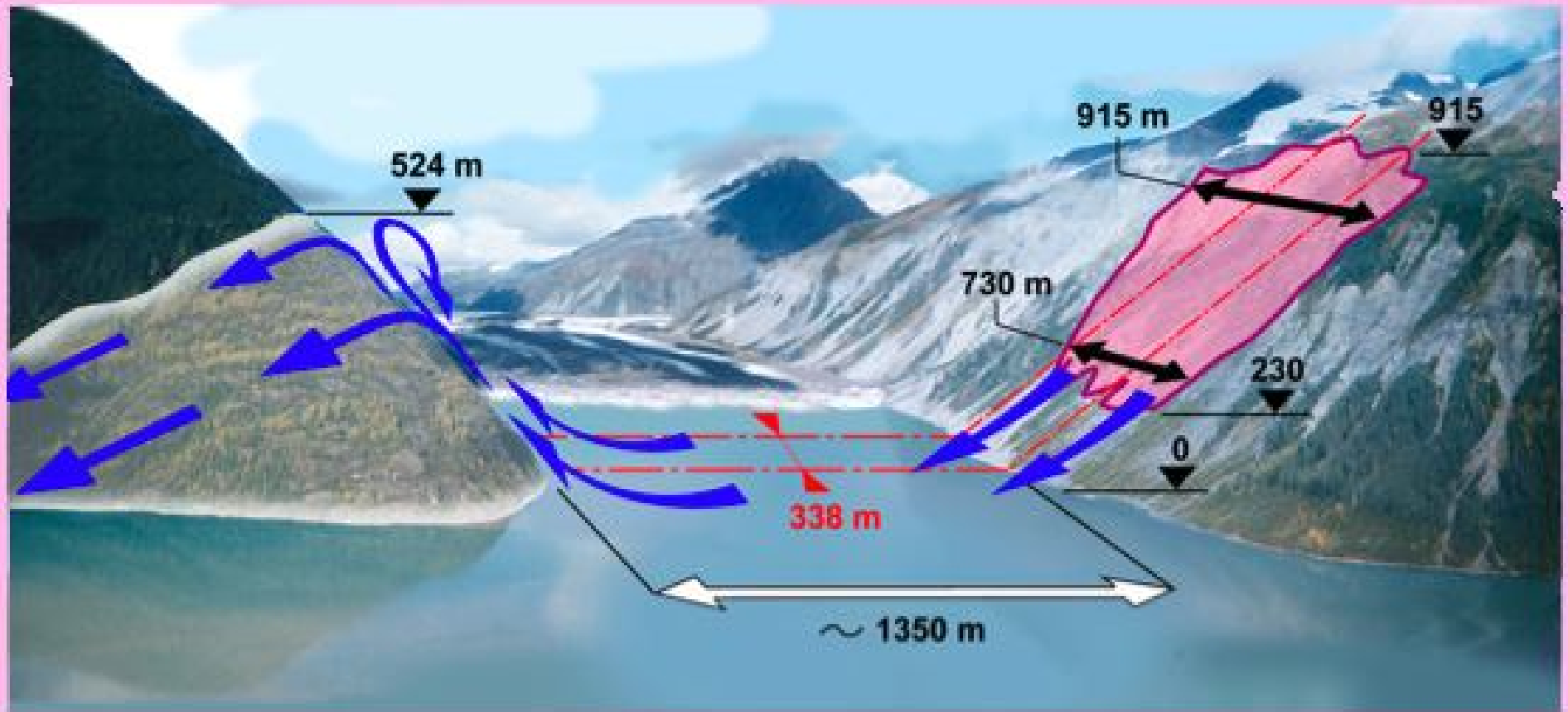


524 m



300m





**На холме между заливом
Литуя и бухтой Гильберта
деревья уничтожены вплоть
до высоты 524 метра**





**Следы воздействия
цунами по берегам
залива Литуя**

«...Верстах в двухстах от устья Иртыша мы видели шкуну, лежавшую беспомощно на боку в песках. Она проходила в версте от правого берега как раз в момент обвала. От падения такой массы земли с вековыми деревьями вода отпрянула от берега, образовав на реке волнение, и настолько сильное, что опрокинуло плоскодонную шкуну, ... отбросив ее к левому берегу... Из экипажа и пассажиров шкуны несколько человек погибли в реке, несколько были изувечены...»

К.М. Станюкович «В далекие края»

«Цунами Коровьева»

«...земля покрылась трещинами до самой реки. Огромный пласт берега, вместе с пристанью и рестораном, высадило в реку. Вода в ней вскипела, взметнулась, и на противоположный берег, зеленый и низменный, выплеснуло целый речной трамвай с совершенно невредимыми пассажирами.»

Мастер и Маргарита, Гл. 31. На Воробьевых горах

Генерация

цунами

вулканическими

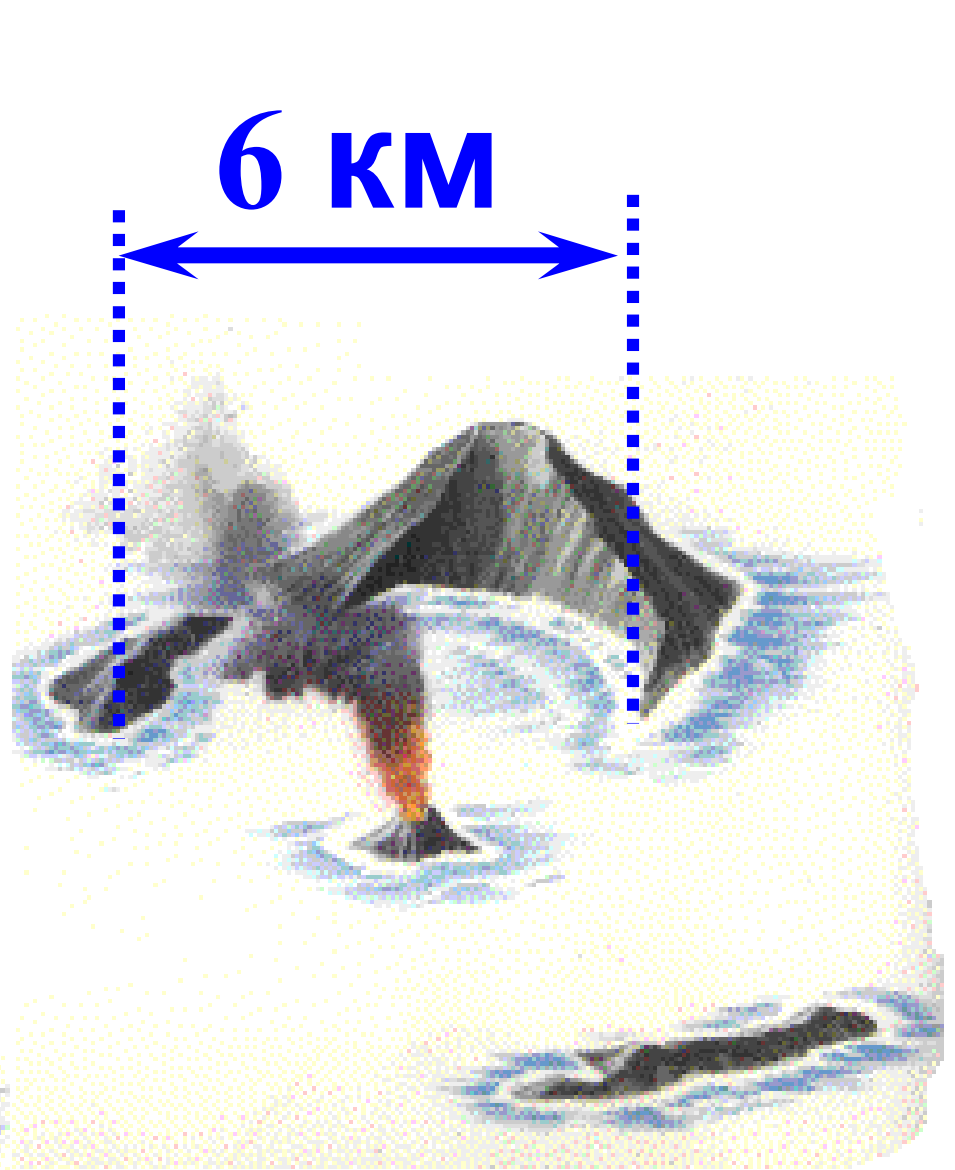
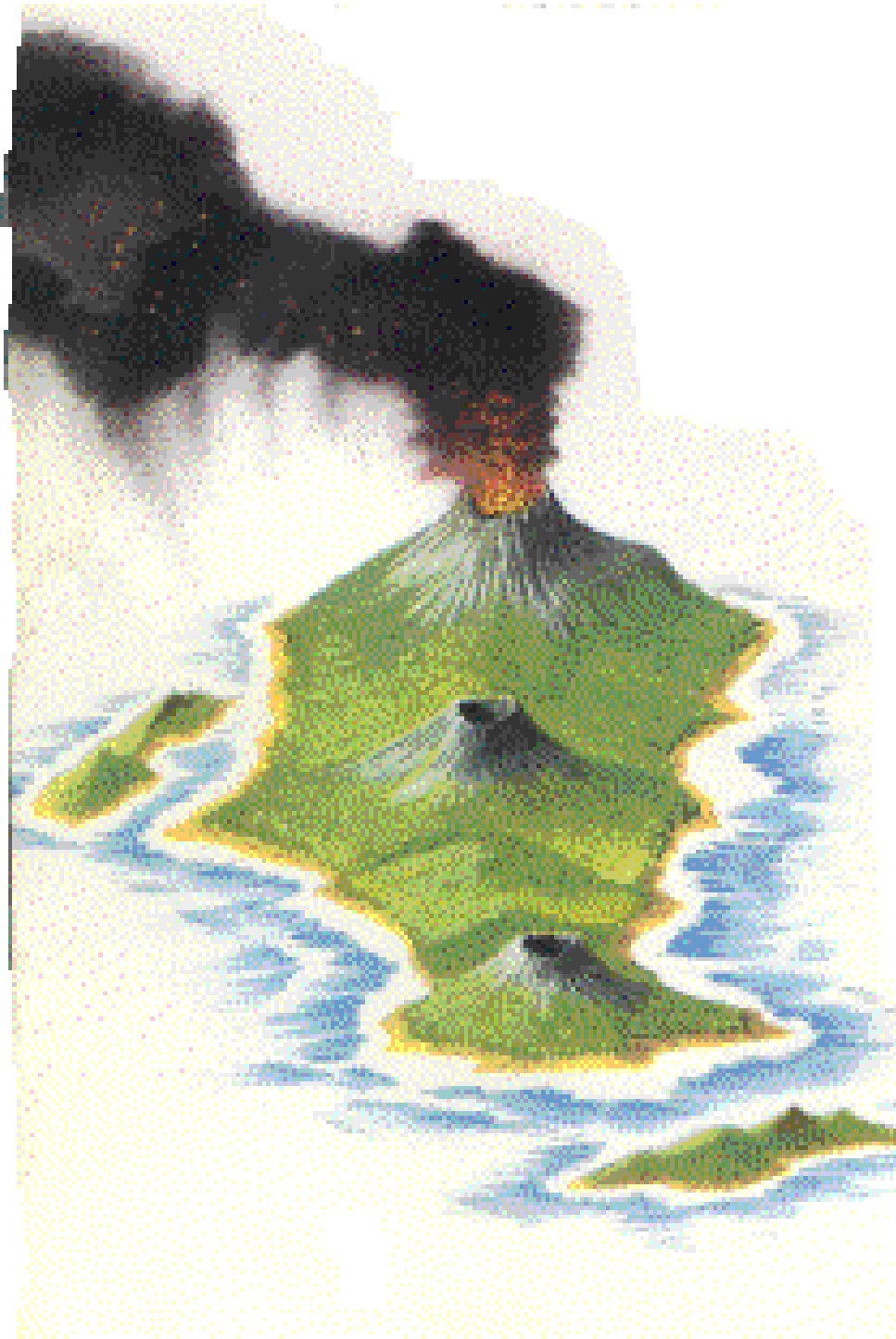
извержениями

Кракатау, 1883



Объем
извергнутого
материала **30 км³**

Максимальная
высота волн
цунами **42 м**





Санторин (Тира), ~1600 г. до н.э., $H_{max} = 30m$

Гибель
цивилизации
на острове
Крит



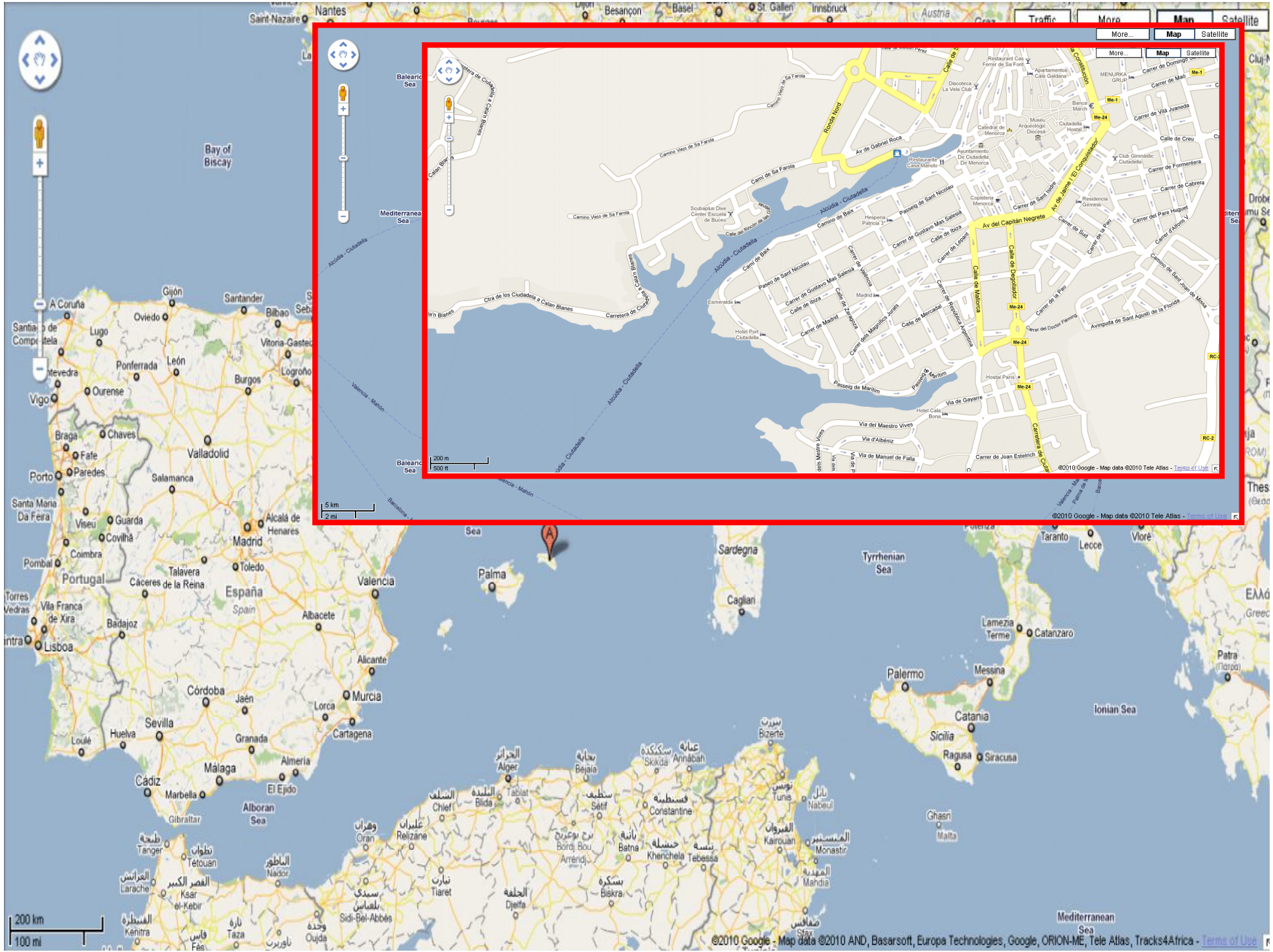
Метеоцунами – результат воздействия на водный слой подвижных неоднородностей атмосферного давления или напряжения трения ветра

- ❑ Метеоцунами принципиально отличаются от ветровых волн за счет механизма формирования и большого периода
- ❑ Это единственный вид цунами, формирование которого обязано резонансным эффектам

Риссага

бухта Сьютаделла





Риссага



Риссага



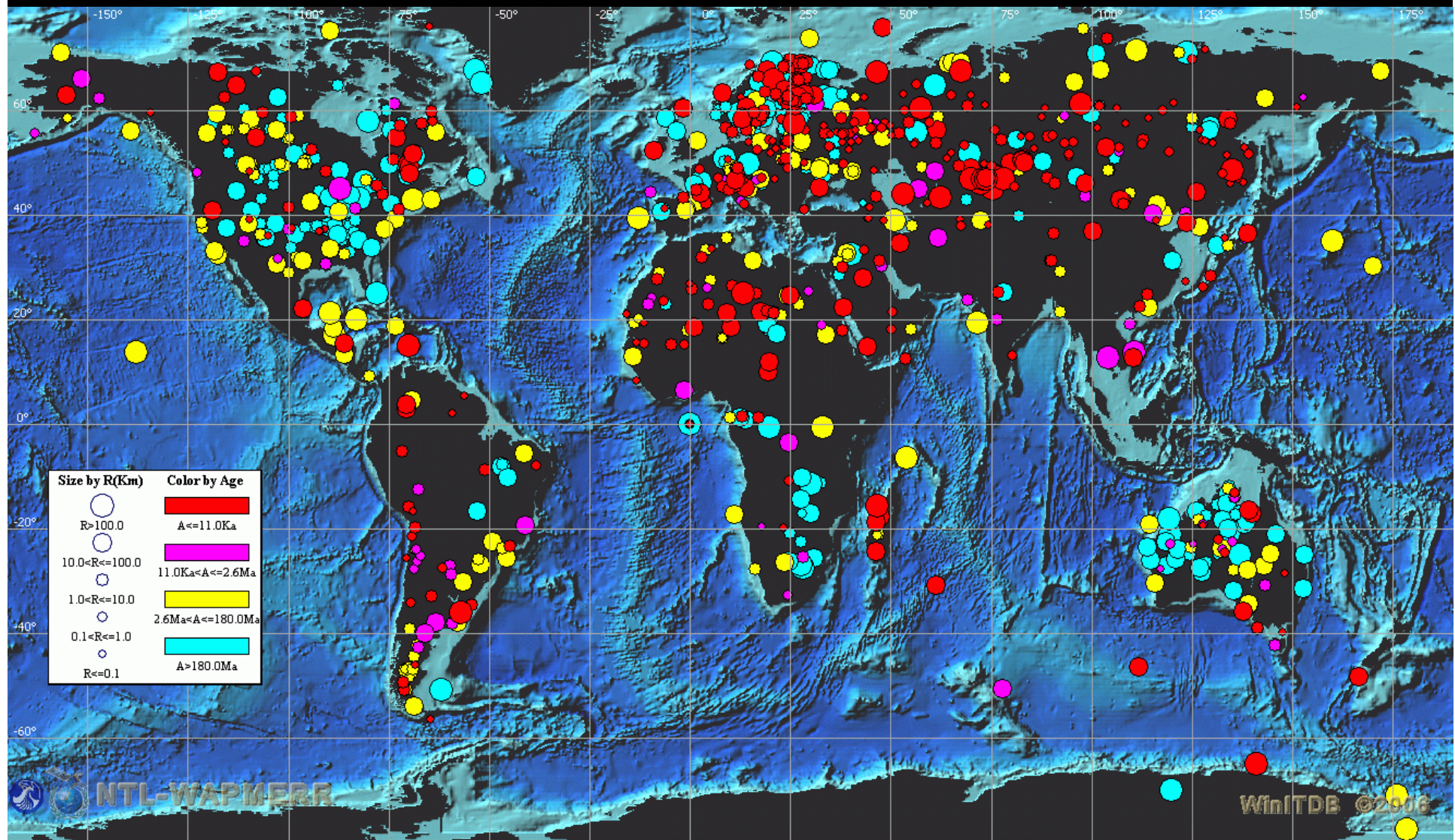


Космогенные цунами

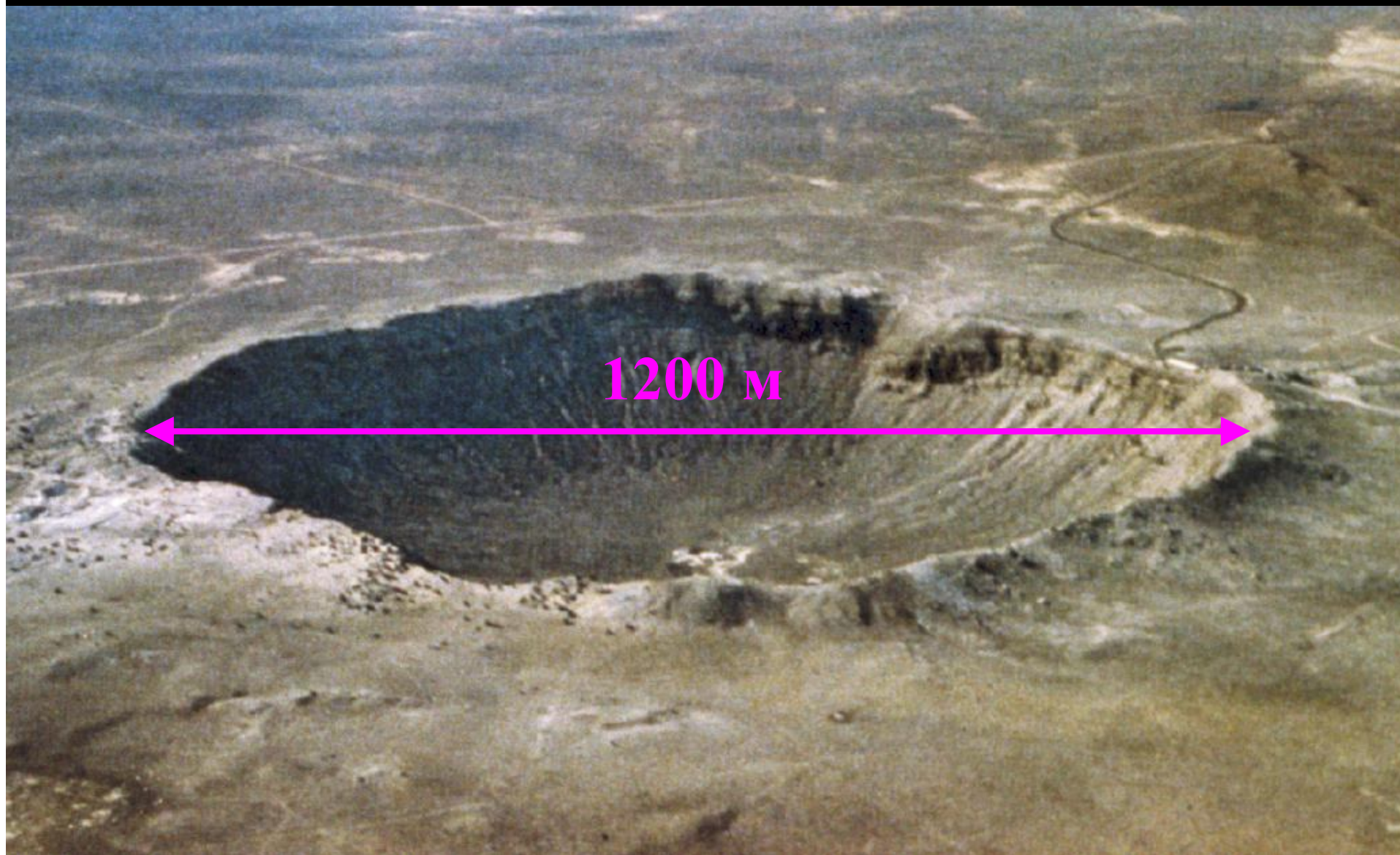


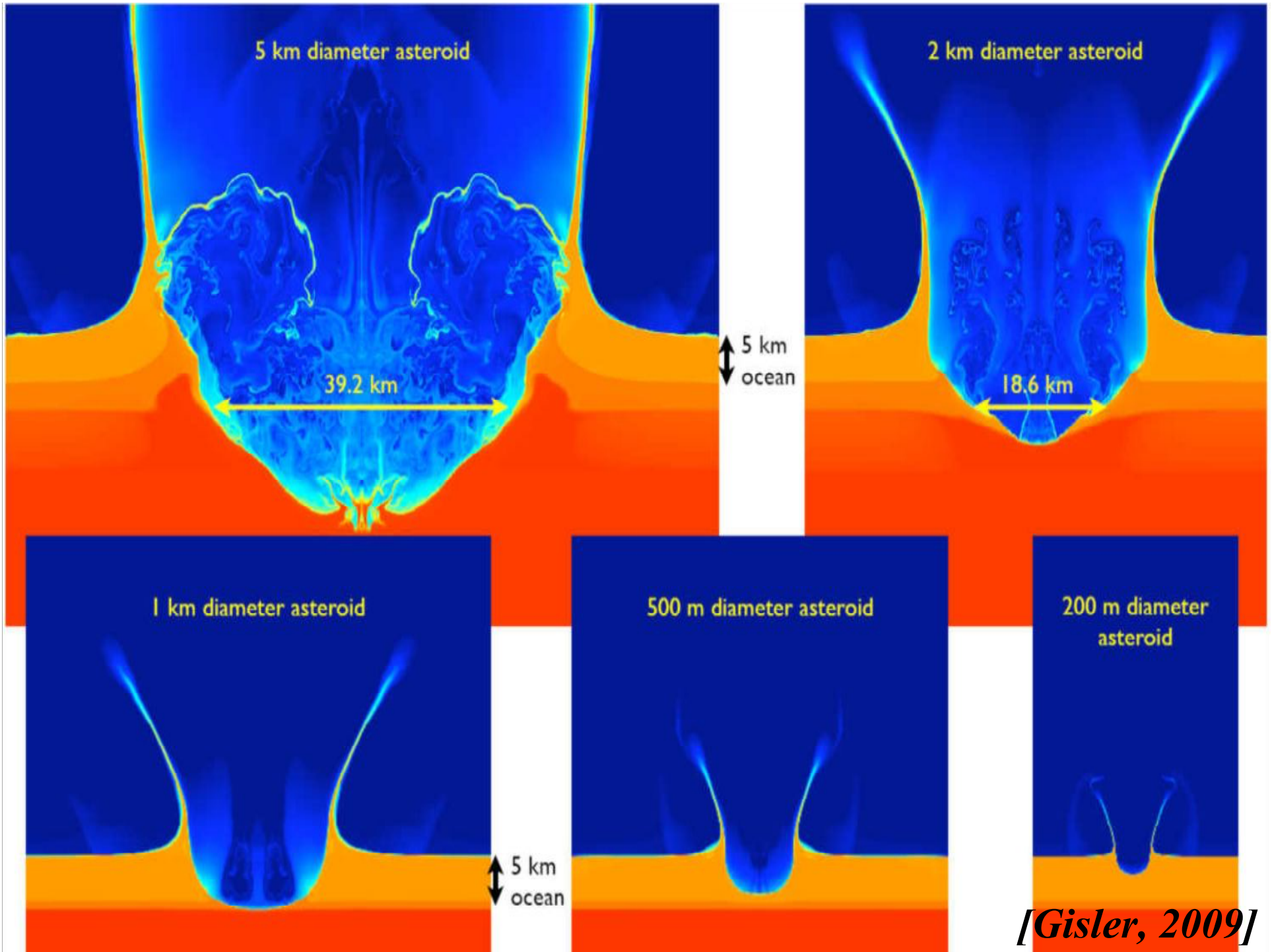
by Donalde Davis

«Звездные раны» на поверхности Земли (932, WinITDB)

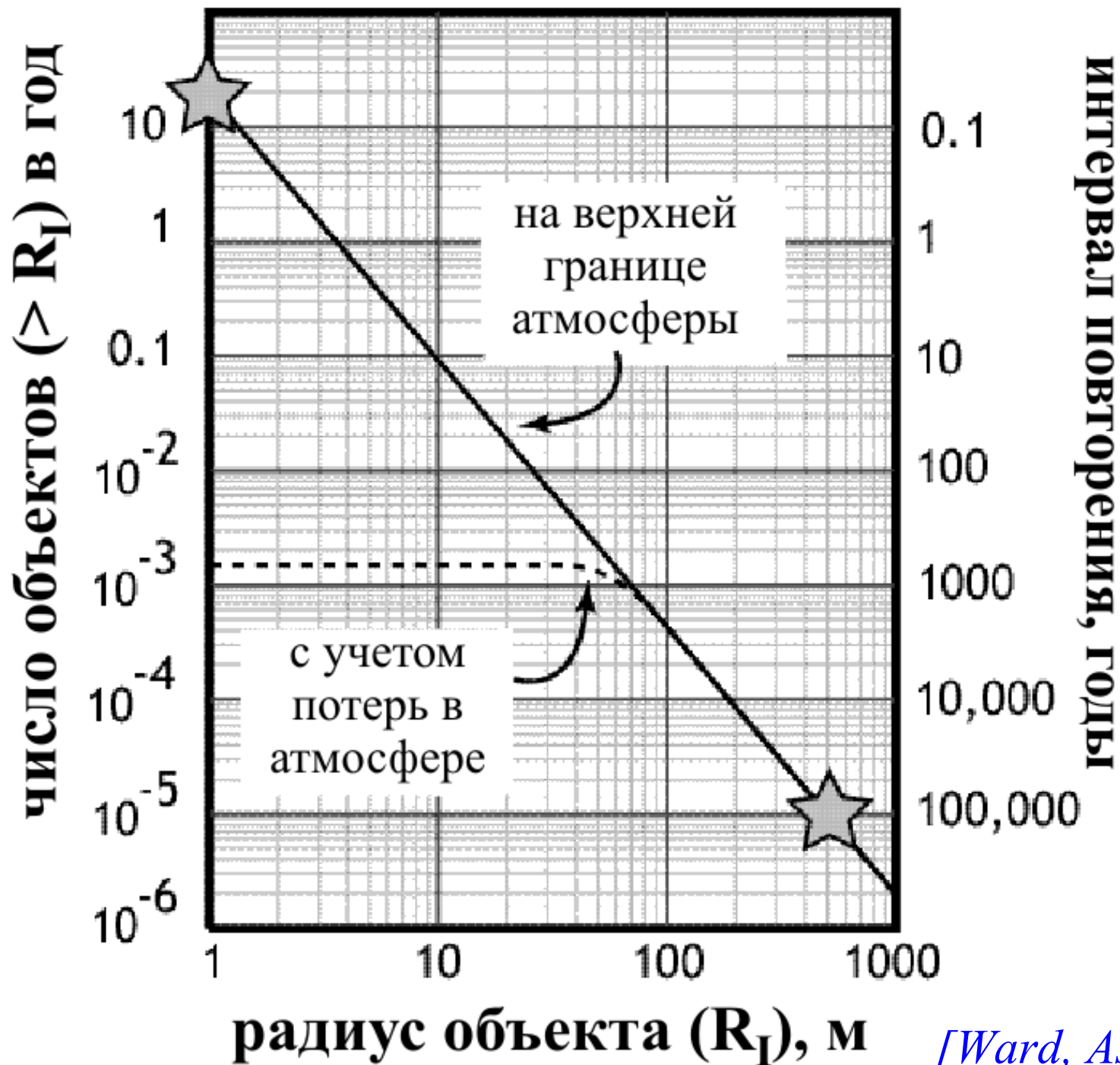


Кратер от метеорита в Северной Аризоне (возраст 50 000 лет)

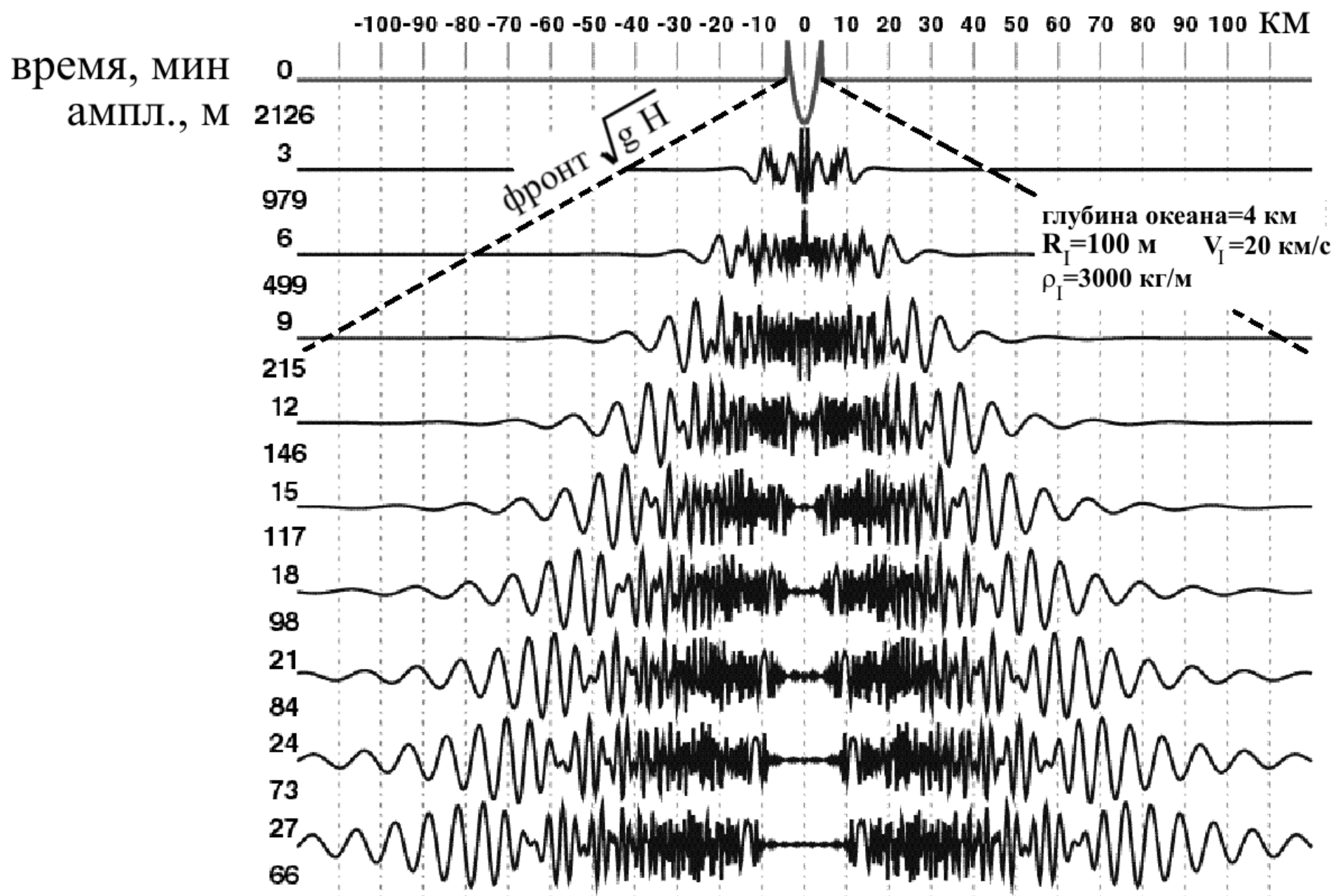


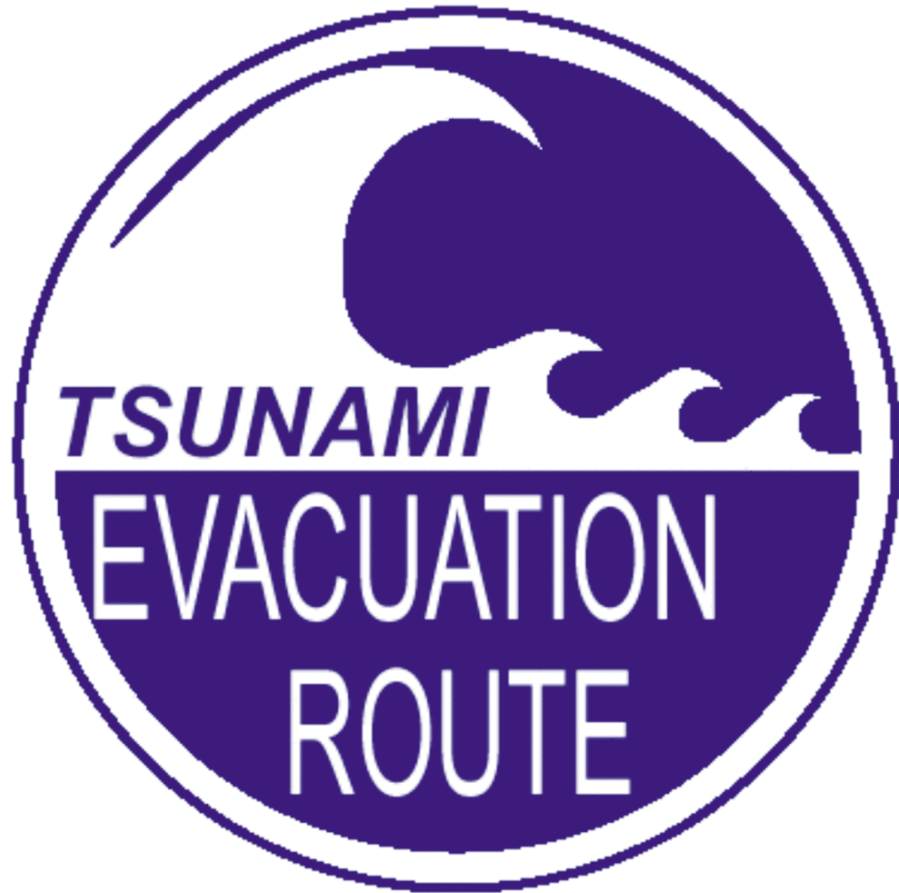


[Gisler, 2009]



[Ward, Asphaug, 2000]





After an earthquake, a tsunami may follow.



Move quickly to higher ground.



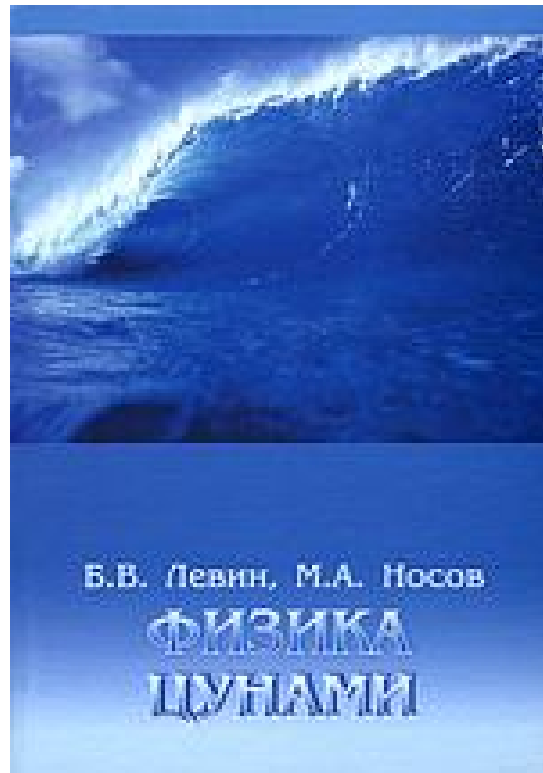
International Tsunami Information Center
737 Bishop St., Ste 2200, Honolulu, HI 96822 USA
Ph: (800) 533-6432 E-mail: Itic.tsunami@noaa.gov URL: <http://www.pfbc.noaa.gov/itic/>



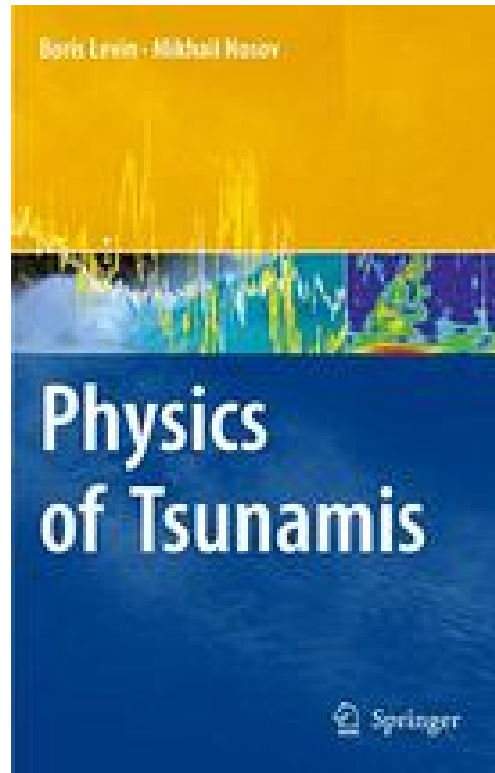


December 26th, 2004, foreign tourists who had ventured far out on the sand after the water receded react as the first of six tsunamis starts to roll towards Hat Rai Lay Beach, near Krabi in southern Thailand. (AFP/AFP/Getty Images)

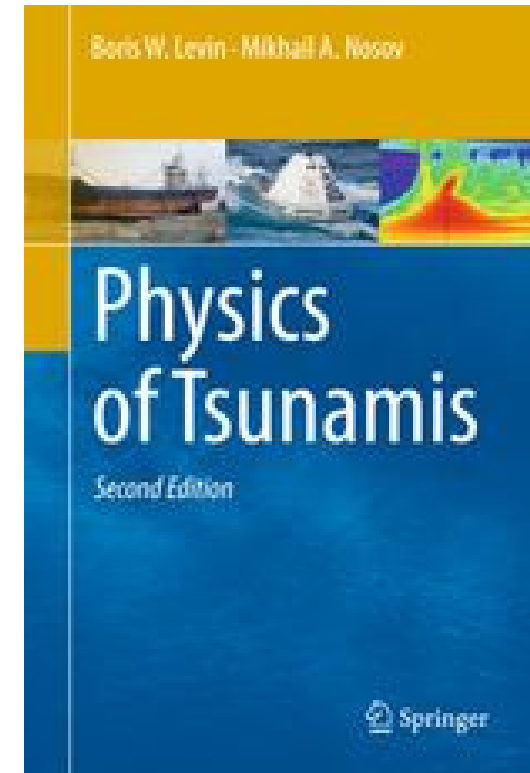
http://ocean.phys.msu.ru/courses/phys_tsu/



2005



2009



2016