

*Носов Михаил Александрович*

# *Физика цунами*

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

*Лекция №4*



**фото и  
видео  
съёмка в  
т.ч. с ЛА**

## **Способы регистрации волн цунами**

**отложения  
цунами  
(депозиты)**

**GPS буи**

**наблюдения  
очевидцев**

**глубоководные  
измерители  
давления**

**дрифтеры**

**береговые  
станции  
уровня моря**

**измерители  
течений**

**береговые  
радары**

**спутниковый  
альтиметр**

**по возмущениям  
в ионосфере**

## Отложения Курильского цунами 2006 г.

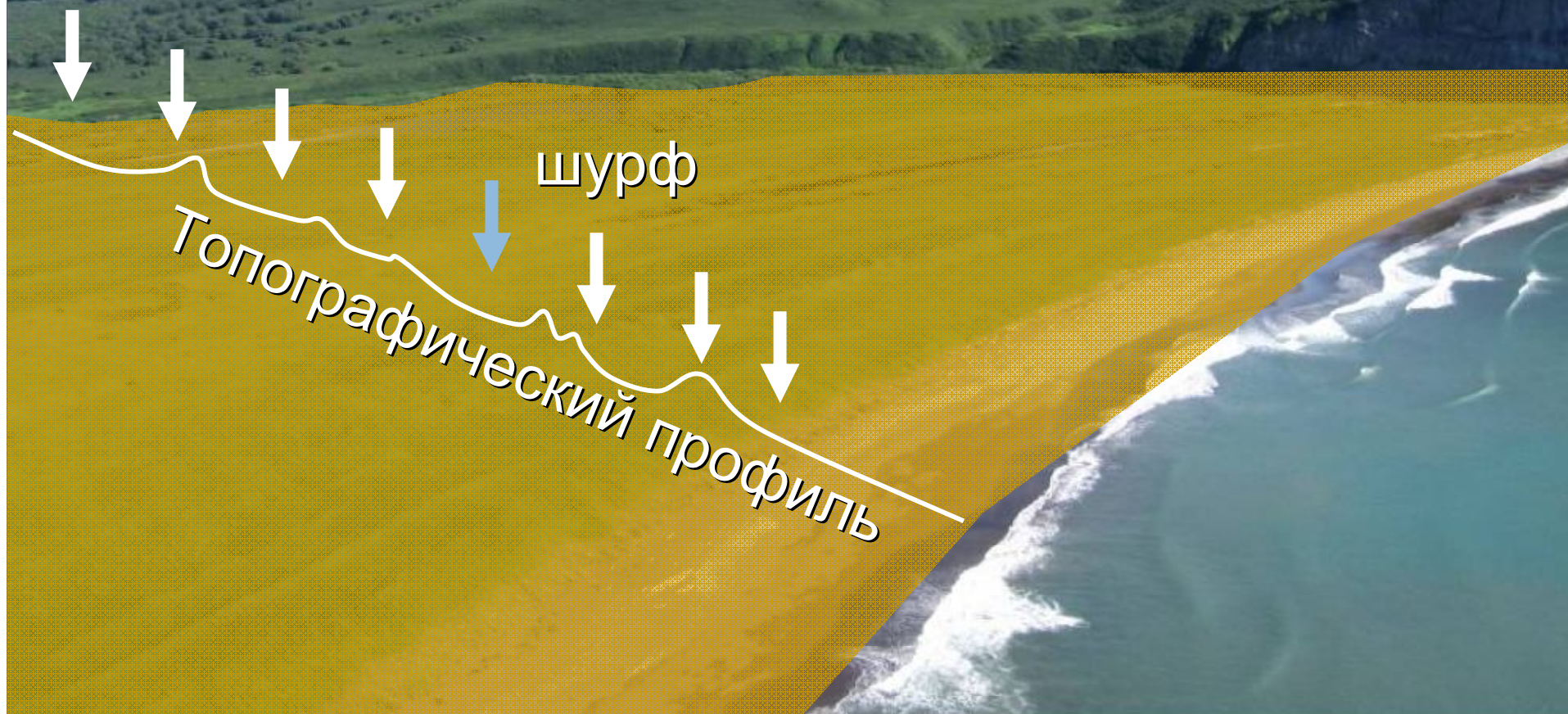


## Отложения Индонезийского цунами 2004 г.



Фото Н. Разжигачевой

# Изучение отложений цунами



# Использование вулканических пеплов (тефры) для корреляции и датирования отложений цунами

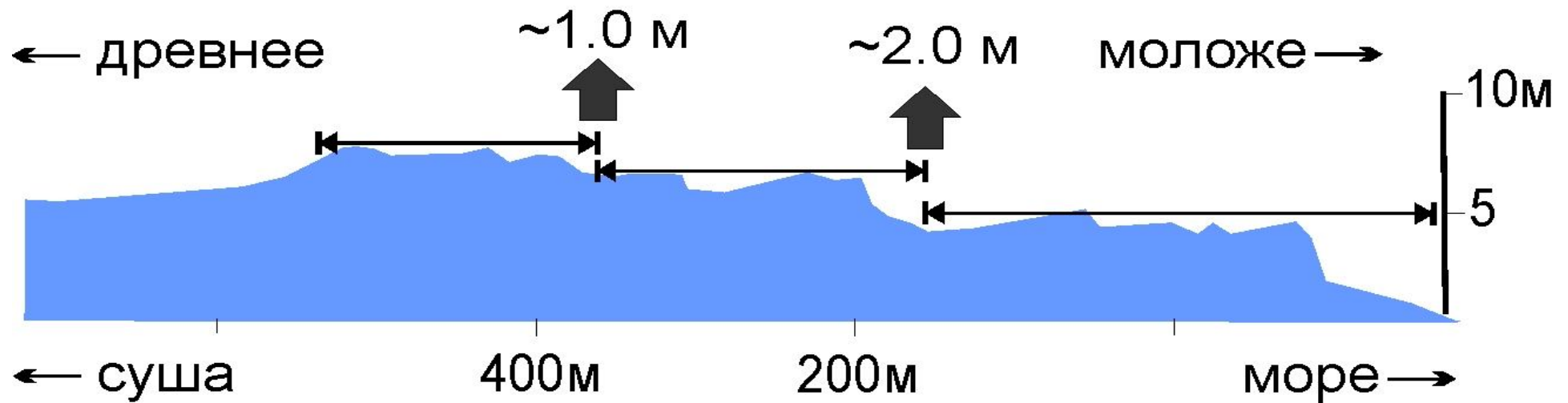


Разрез почвы морской аккумулятивной террасы

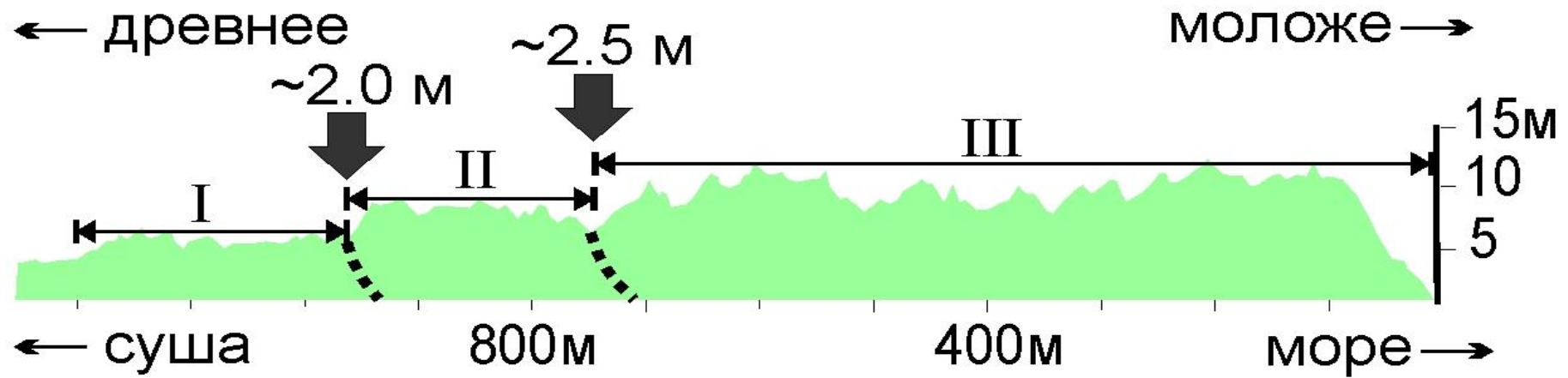




## косейсмическое поднятие



# косейсмическое опускание



**фото и  
видео  
съёмка в  
т.ч. с ЛА**

**Основные  
способы  
регистрации волн  
цунами**

**отложения  
цунами  
(депозиты)**

**GPS буи**

**наблюдения  
очевидцев**

**глубоководные  
измерители  
давления**

**дрифтеры**

**береговые  
станции  
уровня моря**

**измерители  
течений**

**береговые  
радары**

**спутниковый  
альтиметр**

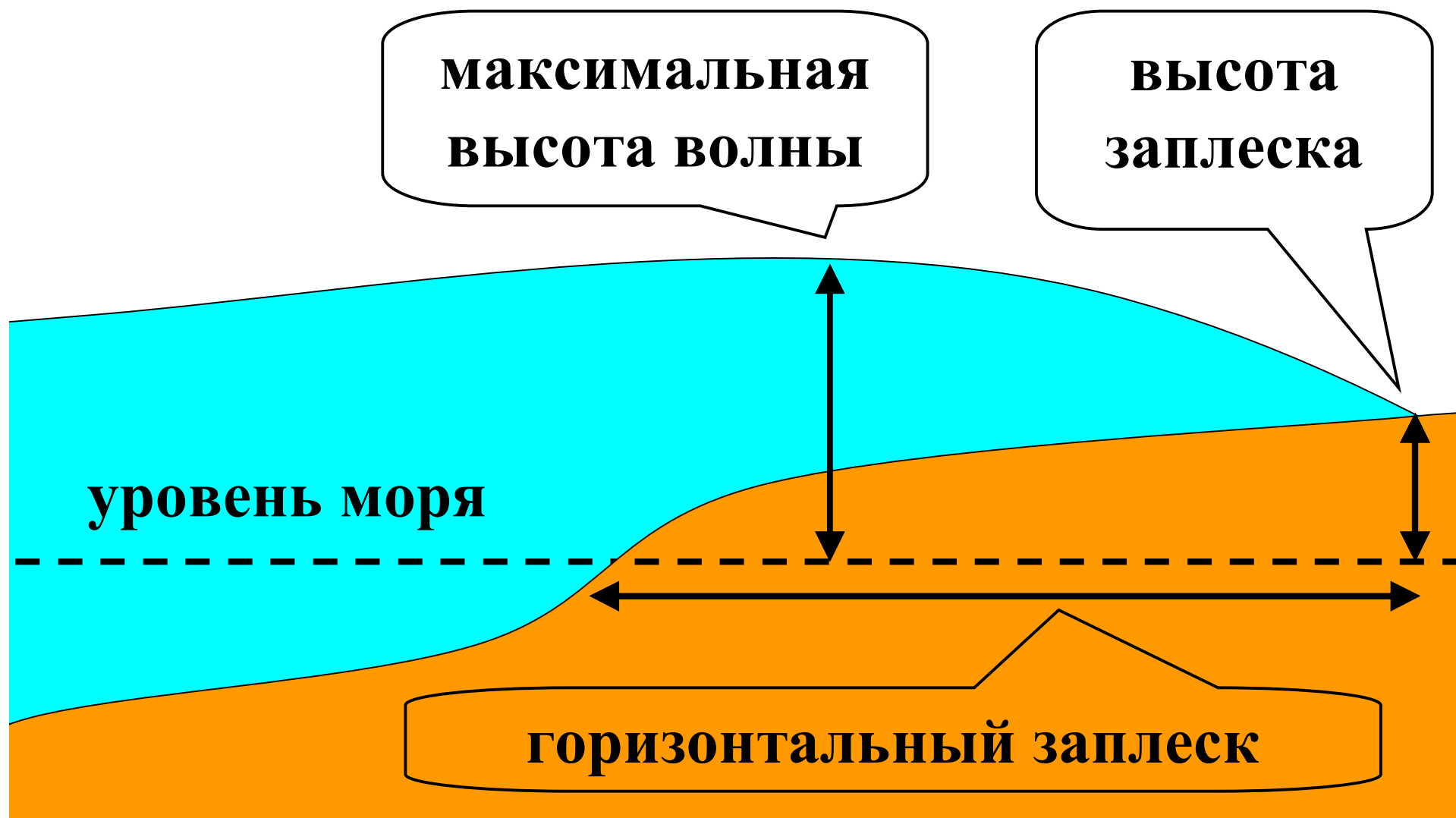
**по возмущениям  
в ионосфере**

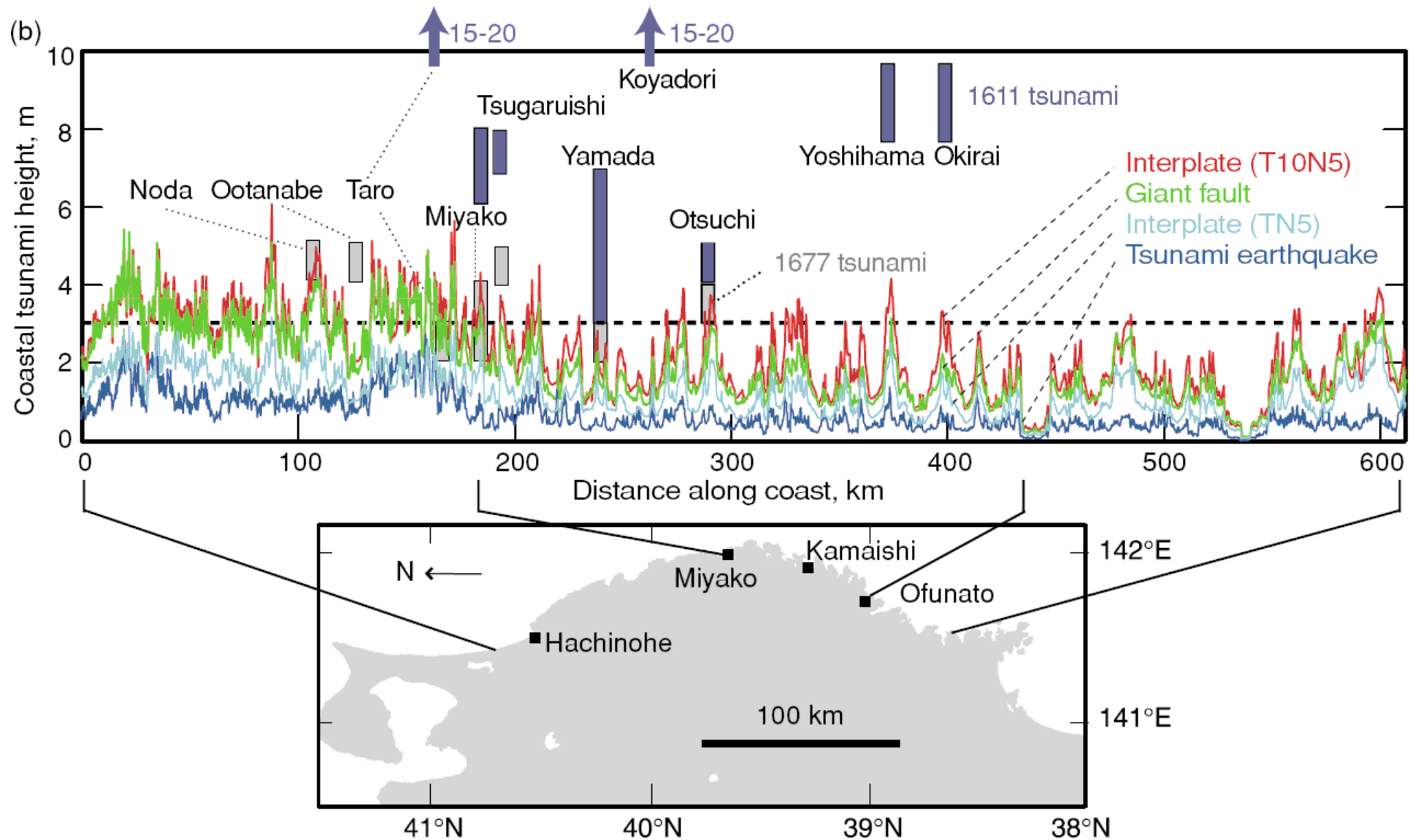


**Количественные  
характеристики  
«силы цунами»**

# Схема наката цунами на берег

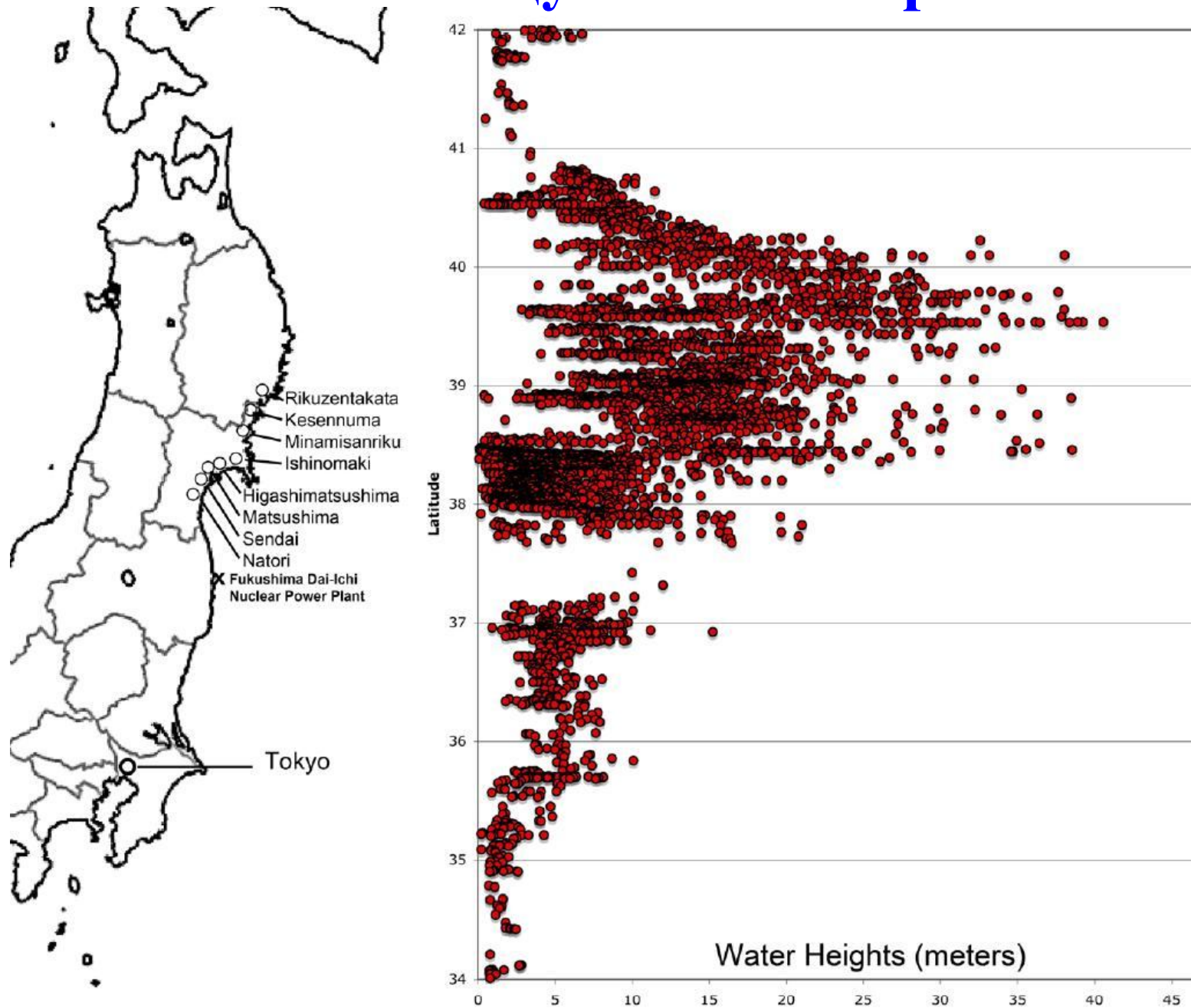
## Что измерять?





*[Satake et al., 2008]*

# Высоты заплеска цунами 11 марта 2011 г.



# «Сила цунами»

**Шкала  
интенсивности  
(описательная)**

**1. 6-балльная  
Зиберга-  
Амбразейса**

**2. 12-балльная  
Пападопулоса-  
Имамуры**

**Шкала магнитуд  
(физическая)**

**1. Имамуры-Ииды**

$$m = \log_2 N_{\max}$$

**2. Соловьева-Имамуры**

$$I = 0.5 + \log_2 \bar{N}$$

**3. Мурти-Лумиса**

$$ML = 2(\log_2 E[\text{эрг}] - 19)$$

# «Сила цунами»

**Шкала  
интенсивности  
(описательная)**

**Шкала магнитуд  
(физическая)**

**субъективная**

**интересна  
«потребителям»**

**?**

**объективная**

**интересна  
«исследователям»**

**соотношение шкал – актуальная тема!**

# Интенсивность цунами по шкале Соловьева-Имамуры

$$I = 0.5 + \log_2 \bar{H}$$

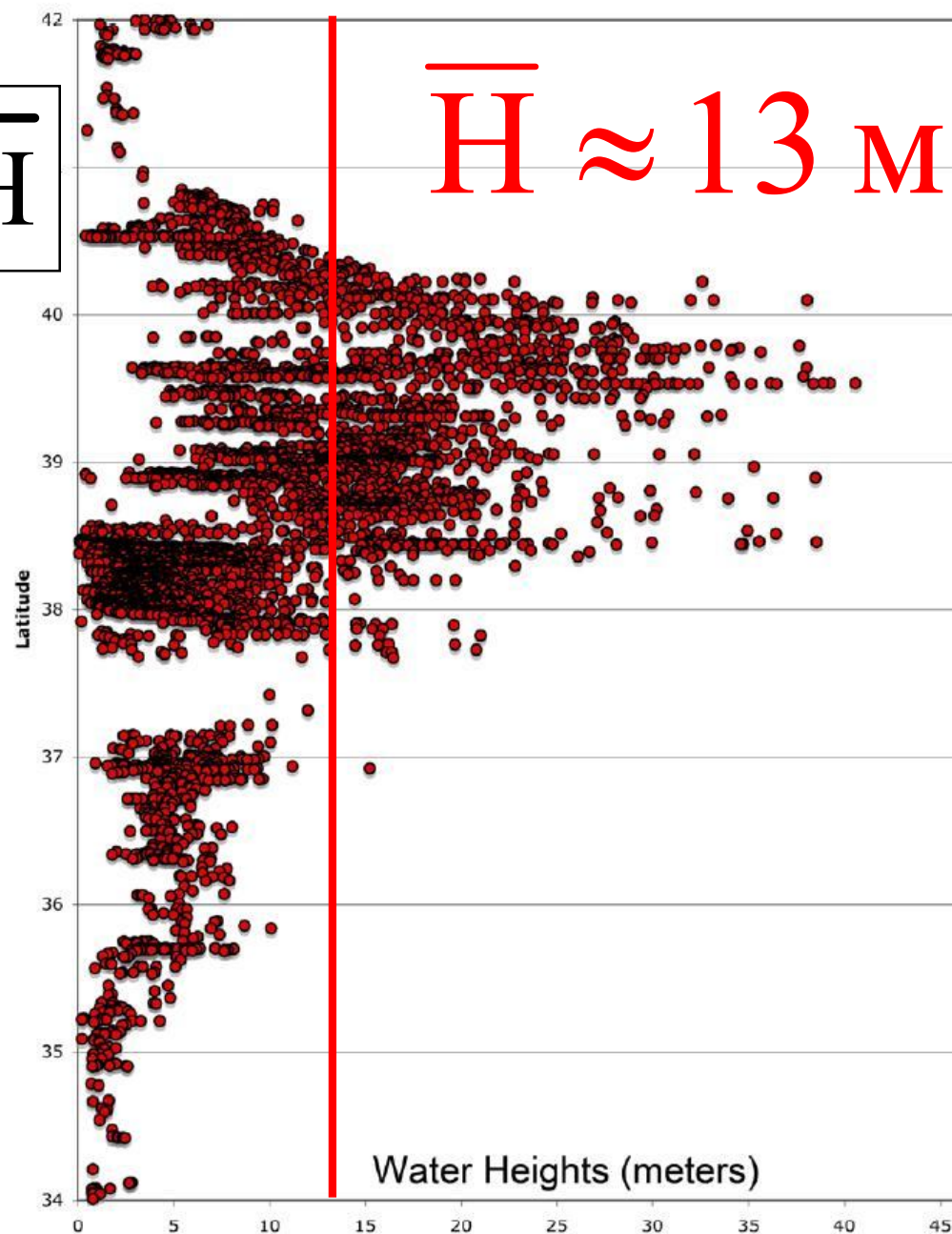
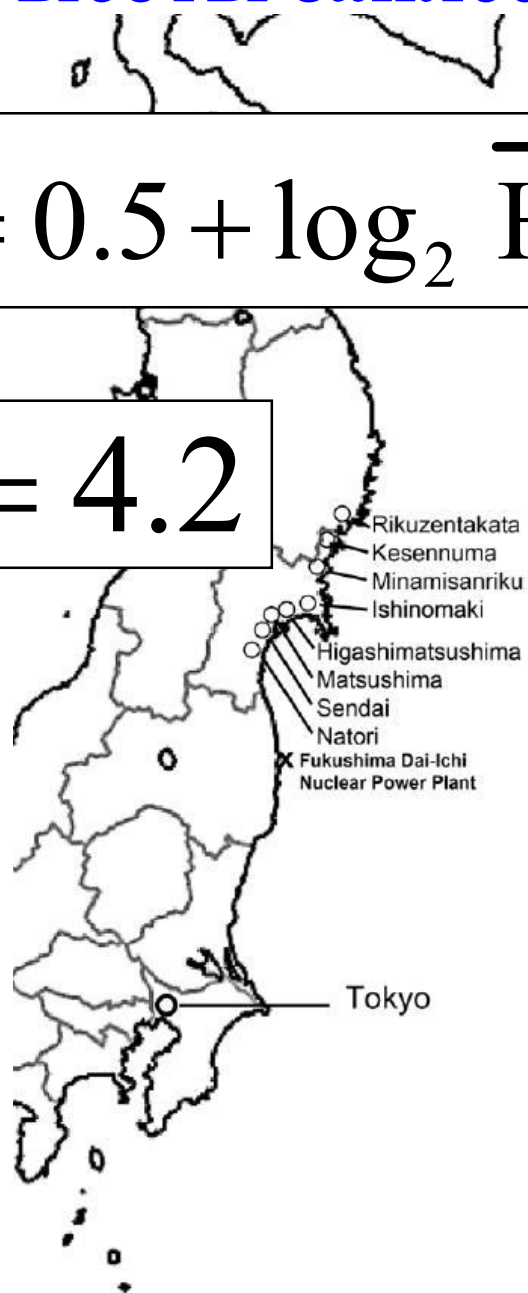
$\bar{H}$  - средняя высота волн на  
ближайшем к источнику побережье

$\bar{H}, \text{ м}$	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16
$I$	-2.5	-1.5	-0.5	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5

# Высоты заплеска цунами 11 марта 2011 г.

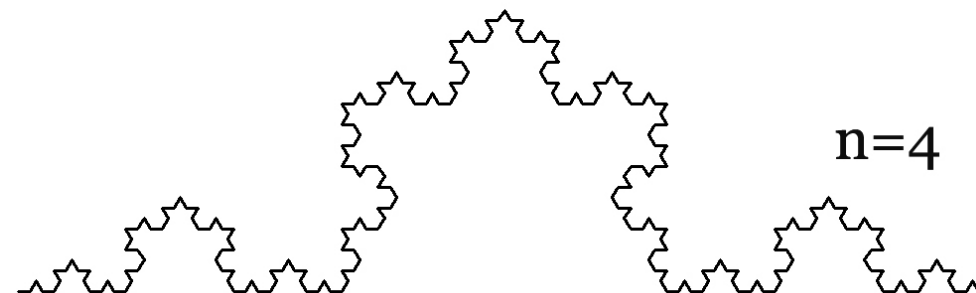
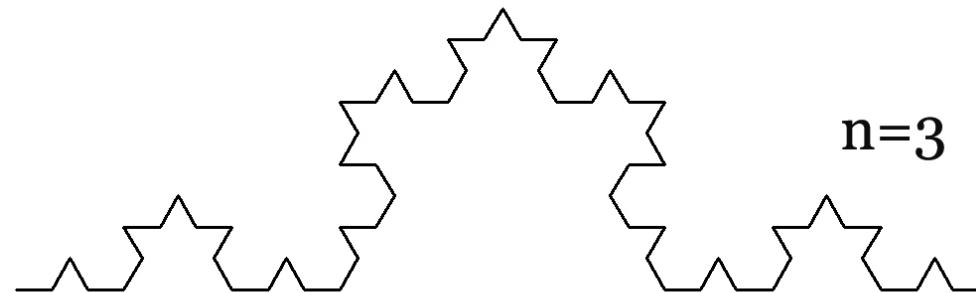
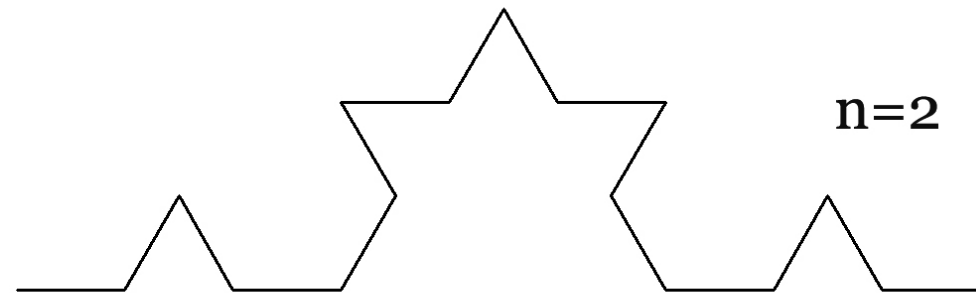
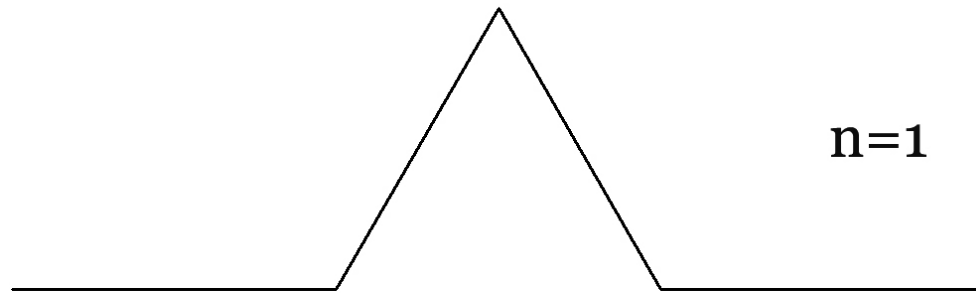
$$I = 0.5 + \log_2 \bar{H}$$

$$I = 4.2$$





# Кривая Коха – модель береговой линии



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

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:  —

Depth:  —

Magnitude:  —

Tsunami intensity:  —

Tsunami Magnitude:  —

Wave Height:  —

Moment magnitude:  —

Abe's tsunami magnitude  —

#### Cause of Tsunami:

(Ctrl+Click to select more than one):

- Volcanic
- Landslide
- Meteorological
- Seiches
- Explosion

#### Area Coordinates ('-' for southern latitude and western longitude):

Latitude:  —

Longitude:  —

Number of Run-ups:  —

Tsunami Region Code:

Basic reference code:

Source Region:

Damage:  None  Small  Medium  High

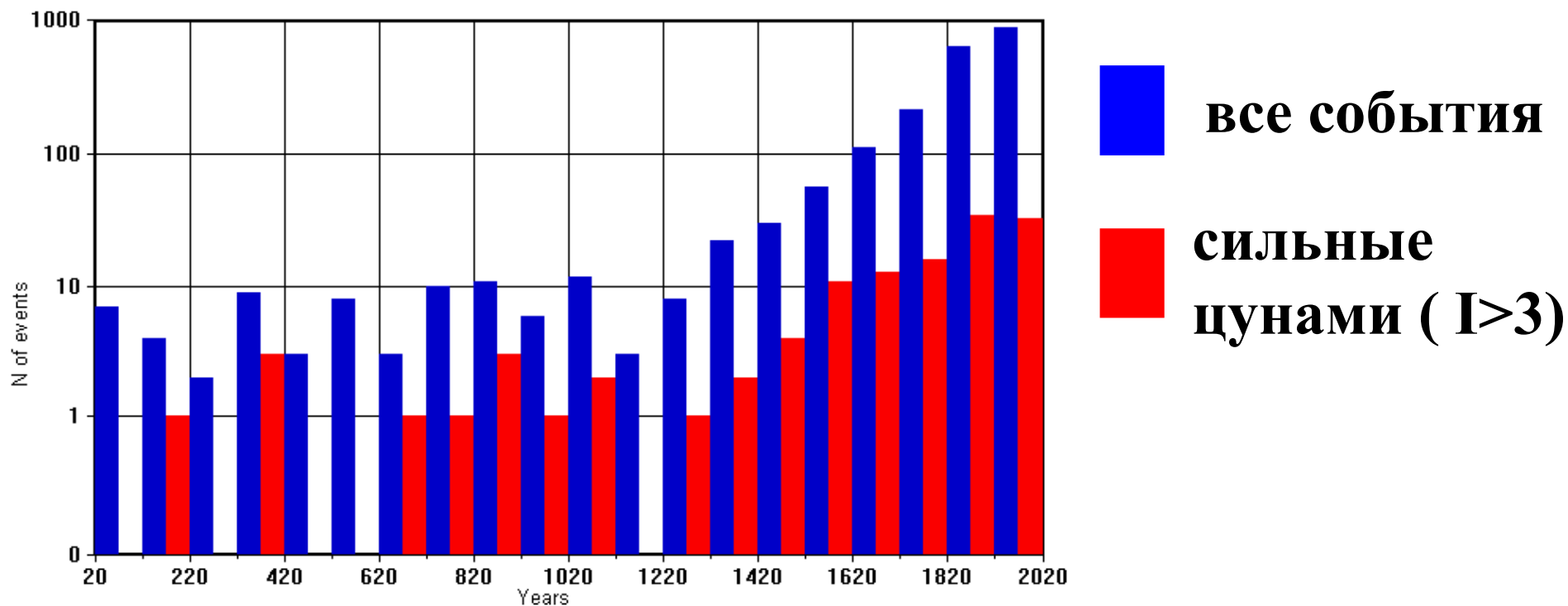
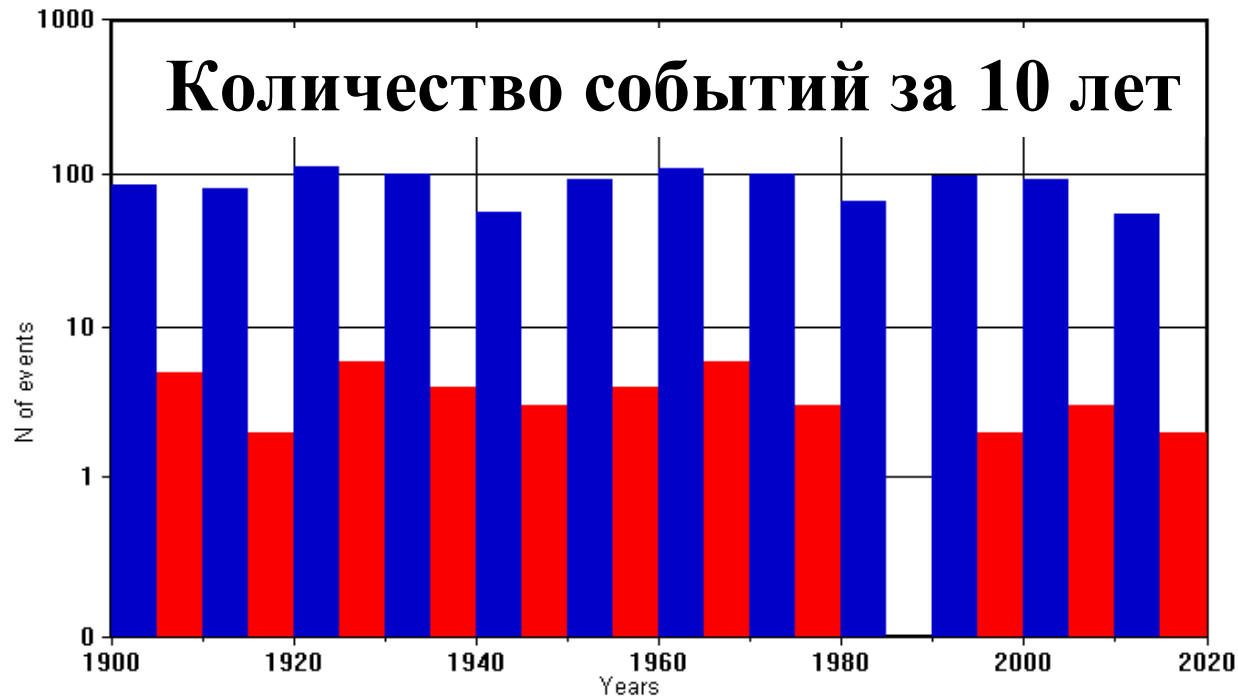
Validity:  —

Results per page:

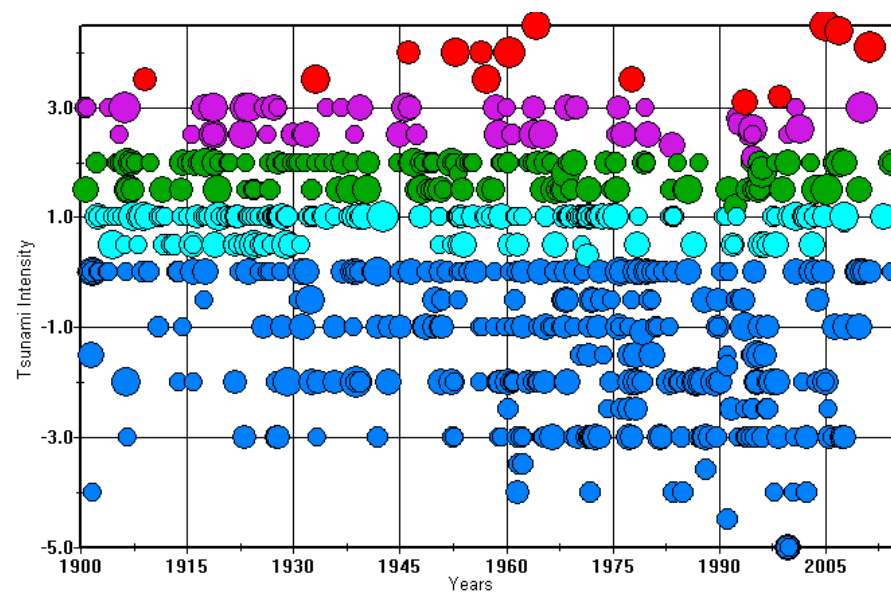
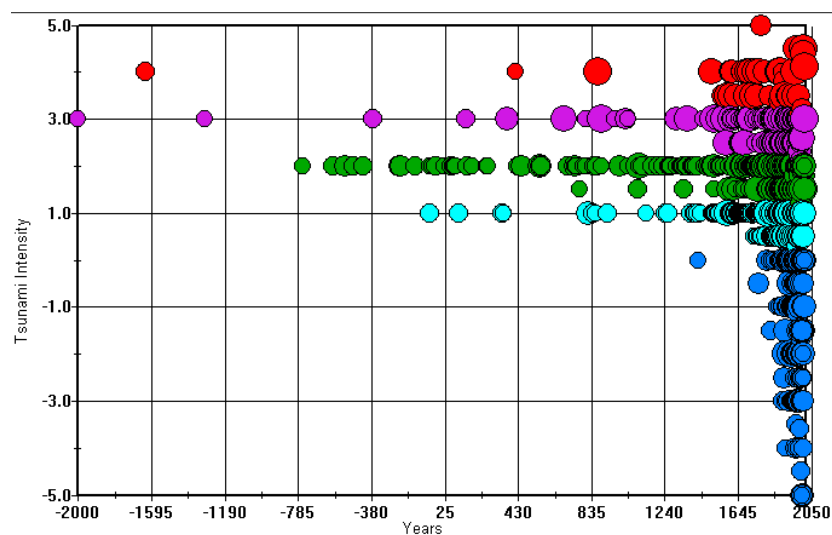
[Search Database](#) [Reset to Defaults](#) [Legend](#)

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

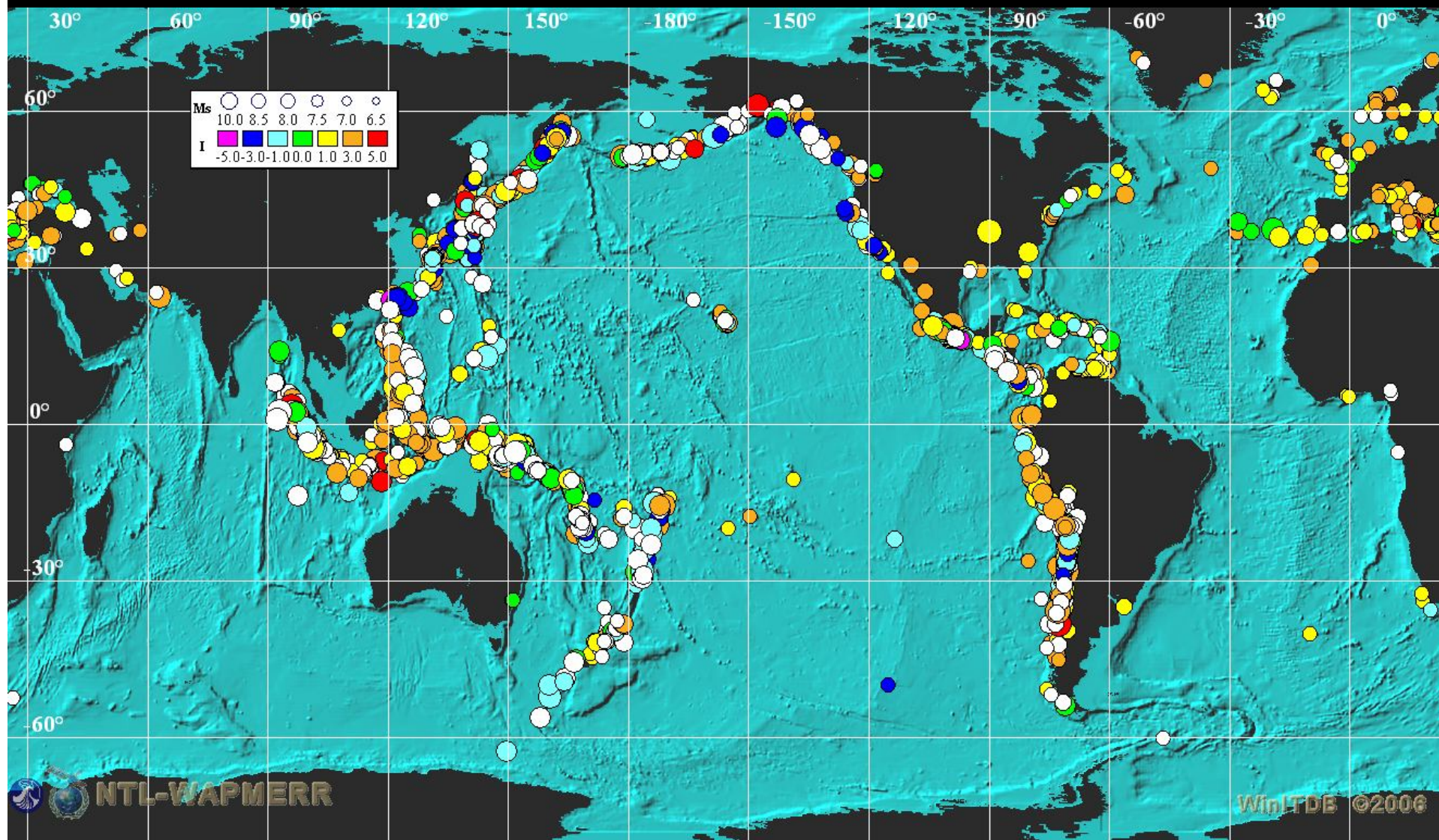
# Количество событий (цунами) за 100 лет



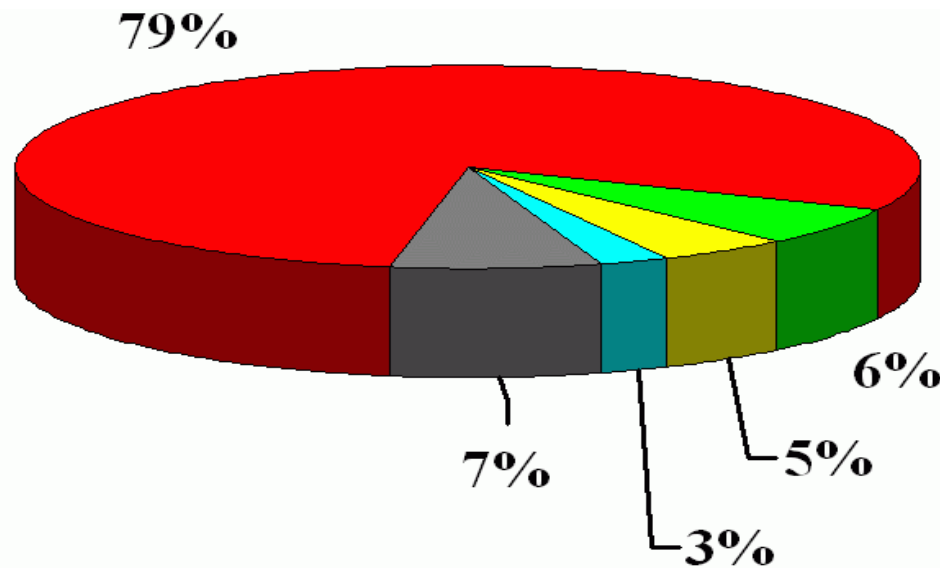
# Интенсивность цунами как функция времени (представительность базы данных NTDB/WLD)



# Источники цунами в Мировом океане за период 2000 В.С. – 2014 (2400 событий)



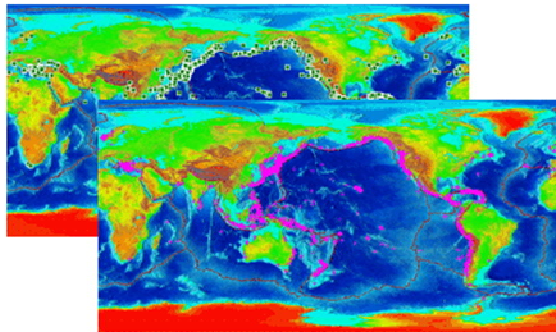
*Historical Tsunami Database for the World Ocean*



**HTDB/WLD**

- подводные землетрясения**
- оползни и обвалы**
- вулканические извержения**
- метеорологические причины**
- падение метеоритов (нет данных)**
- причина неизвестна**

# Global Historical Tsunami Database, National Geophysical Data Center / World Data Service / NOAA



[Natural Hazards Interactive Map](#)

[Database Introduction](#)

[Tsunami Source Event References](#)

[Tsunami Runup References](#)

Please cite this data/database as:  
[doi:10.7289/V5PN93H7](https://doi.org/10.7289/V5PN93H7)

## NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database

The **Global Historical Tsunami Database** consists of two *related* files containing information on tsunami events from 2000 B.C. to the present in the Atlantic, Indian, and Pacific Oceans; and the Mediterranean and Caribbean Seas.

1. **TSUNAMI SOURCE EVENT Search:** information on the **source** of the tsunami.  
Data include: source location, date, and time, event magnitude, maximum water height, total number of deaths, injuries and damage for the event.
  - [Advanced Tsunami Source Event Search](#)
  - [More Advanced Tsunami Source Event Search](#) (additional search fields for **total number of deaths** (earthquake, volcanic eruption, landslide, etc.)

**NOTE:** *Some events do not have runup information; other events have many locations where a runup height was recorded*

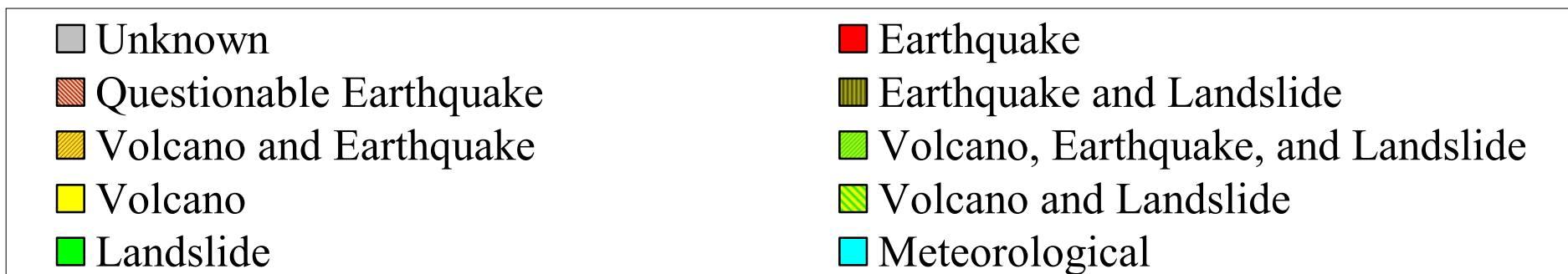
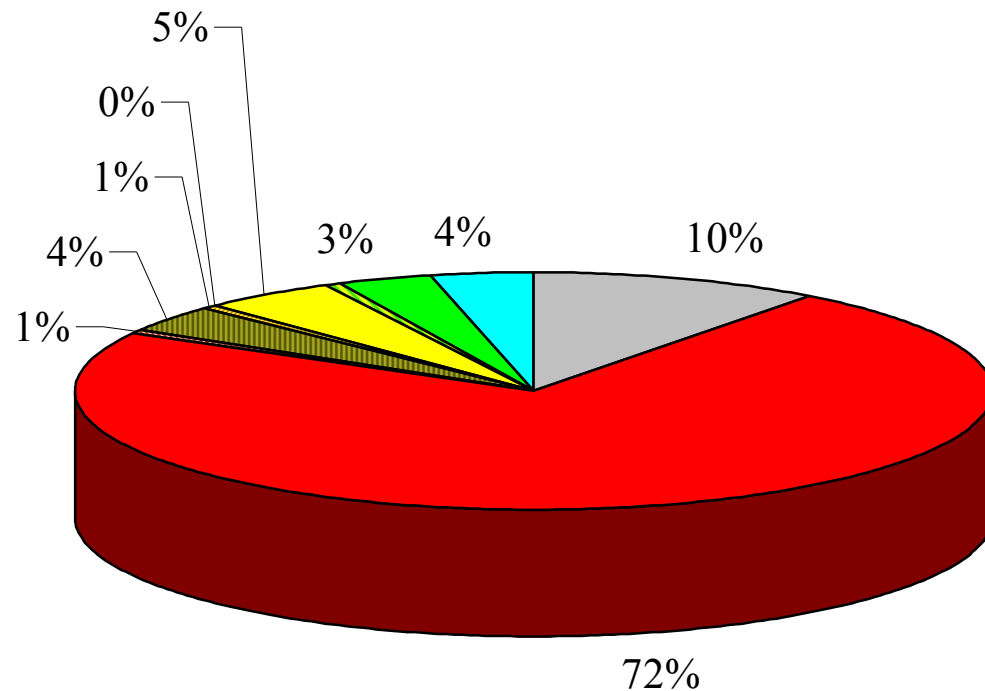
[Download tsunami event data](#) (tab-delimited); [Event Variable Definitions](#)

2. **TSUNAMI RUNUP Search:** information on locations where **tsunami effects** occurred.  
Data include: arrival date and time, travel time, maximum water heights, horizontal inundation distances, deaths, injuries, and damage for specific locations.
  - [Advanced Tsunami Runup Search](#)

[Download tsunami runup data](#) (tab-delimited); [Runup Variable Definitions](#)

[https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml)

# Распределение цунами по причинам возникновения по данным NGDC/GHTD





# Как измерить силу землетрясения?

## Шкала интенсивности

качественная, организована по трем признакам (MSK-64, 12-балльная) :

- а) воздействие на людей и их окружение
- б) воздействие на сооружения
- в) природные явления

## Шкала магнитуд или шкала Рихтера

# Как измерить силу землетрясения?

Описательная, субъективная шкала  
(используется для сейсмического районирования)

Шкала интенсивности качественная, организована по трем признакам (MSK-64, 12-балльная) :

- а) воздействие на людей и их окружение
- б) воздействие на сооружения
- в) природные явления

Шкала магнитуд или шкала Рихтера

Физическая, объективная шкала

# Шкала MSK-64

## I балл. Неощутимое землетрясение.

**а) Интенсивность колебаний лежит ниже предела чувствительности людей; сотрясение почвы обнаруживаются и регистрируются только сейсмографами;**

**б) –**

**в) –**

# Шкала MSK-64

## **V баллов. Пробуждение.**

**а) Землетрясение ощущается всеми людьми внутри помещения, под открытым небом - многими. Многие спящие просыпаются. Немногие лица выбегают из помещений. Животные беспокоятся. Висячие предметы сильно качаются. Картины сдвигаются с места. Некоторые неустойчивые предметы опрокидываются или сдвигаются. Незапертые двери и окна распахиваются и снова захлопываются. Из наполненных открытых сосудов в небольших количествах выплескивается жидкость. Ощущаемые колебания схожи с колебаниями, создаваемыми падением тяжелых предметов внутри здания.**

**б) Возможны тонкие трещины в штукатурке и откалывание небольших кусков штукатурки в отдельных зданиях.**

**в) В некоторых случаях меняется дебит источников.**

# Шкала MSK-64

## **IX баллов. Всеобщие повреждение зданий.**

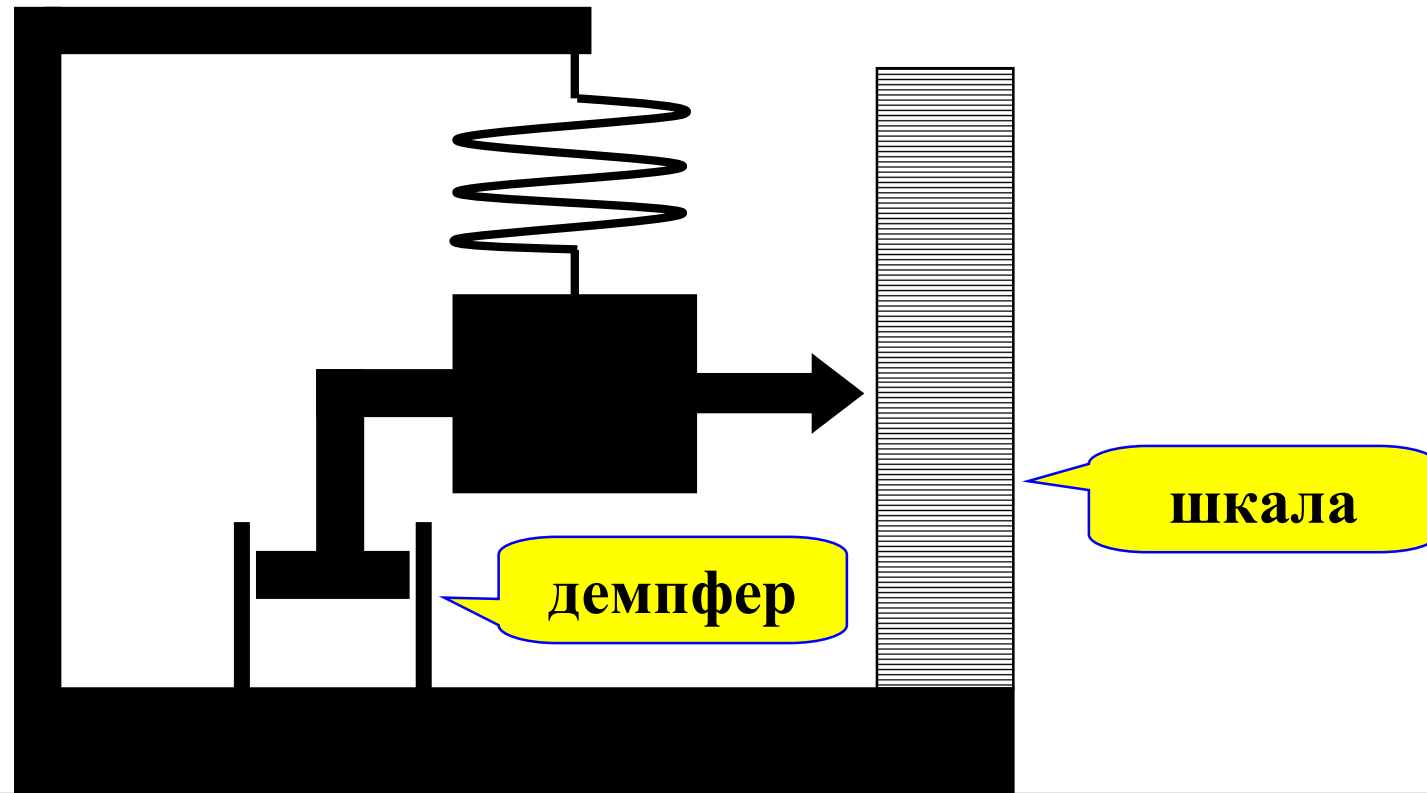
**а) Всеобщая паника; большие повреждения мебели. Животные мечутся и кричат.**

**б) Во многих зданиях большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб, в отдельных - сквозные трещины и проломы в стенах, обрушение частей зданий, обрушение внутренних стен. Некоторые здания полностью разрушены. Памятники и колонны опрокидываются. Значительные повреждения искусственных водоемов; разрывы части подземных трубопроводов. В отдельных случаях - искривление железнодорожных рельсов и повреждение проезжих частей дорог.**

**в) На равнинах наводнения. Трещины в грунтах достигают ширины 10 см, большое количество тонких трещин в грунтах. Скалы обваливаются; оползни и осыпания грунта. На поверхности воды большие волны.**

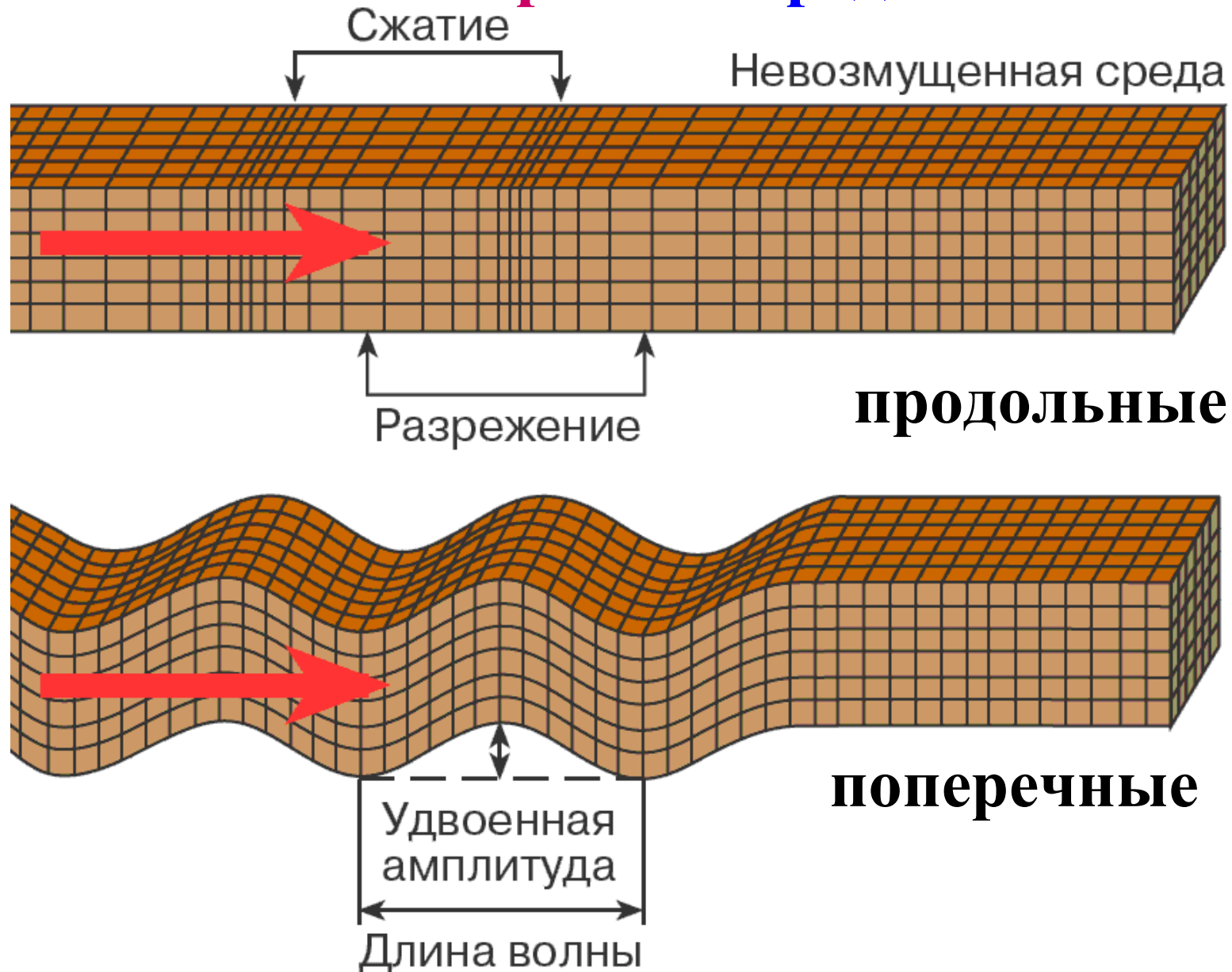
Интенсивность землетрясения, баллы	Характеристика по ШСИ-17	Характеристика по EMS-98	Характеристика по <a href="#">MSK-64</a>
	<b>Шкала сейсмической интенсивности</b>	<b>Европейская макросейсмическая шкала</b>	
1	Неощутимое	Not felt	Неощутимое
2	Едва заметное	Scarcely felt	Едва ощутимое
3	Слабое	Weak	Слабое
4	Ощутимое	Largely observed	Заметное
5	Умеренное	Strong	Пробуждение
6	Значительное	Slightly damaging	Испуг
7	Сильное	Damaging	Повреждения зданий
8	Очень сильное	Heavily damaging	Сильные повреждения зданий
9	Разрушительное	Destructive	Всеобщие повреждения зданий
10	Катастрофическое	Very destructive	Всеобщие разрушения зданий
11	Опустошительное	Devastating	Катастрофа
12	Сильнейшая природная катастрофа	Completely devastating	Изменения рельефа

**Инструментальная эпоха в сейсмологии  
началась в 1879-1890 гг. с появлением  
первых эффективных сейсмографов**



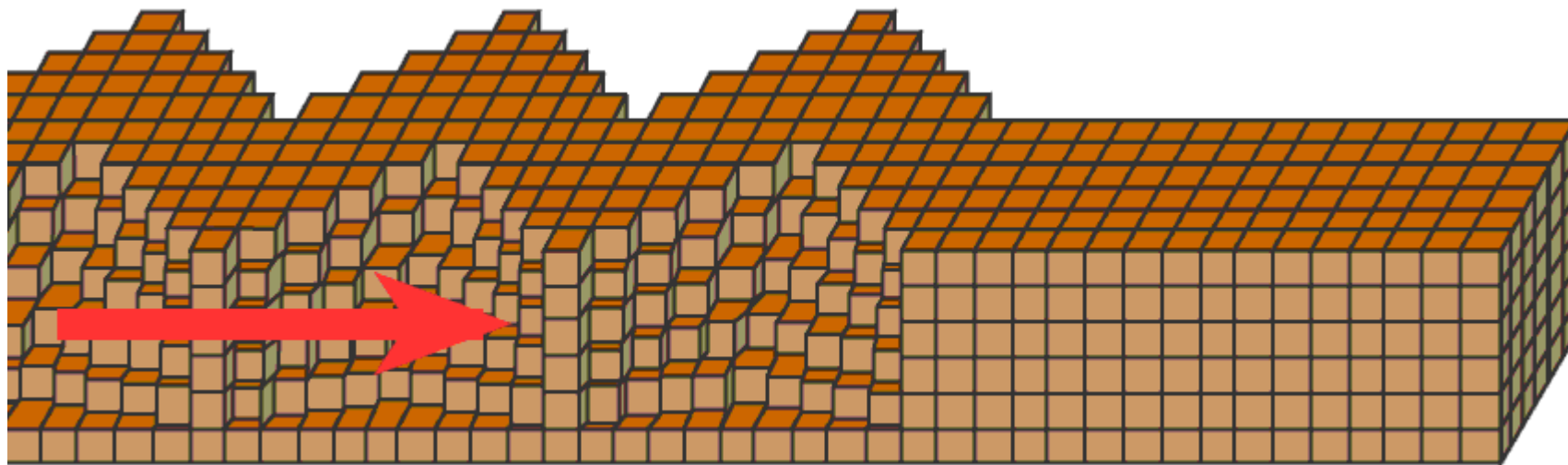
**Первый телескоп построен в 1609 г!!!**

# Типы упругих волн в безграничной однородной и изотропной среде

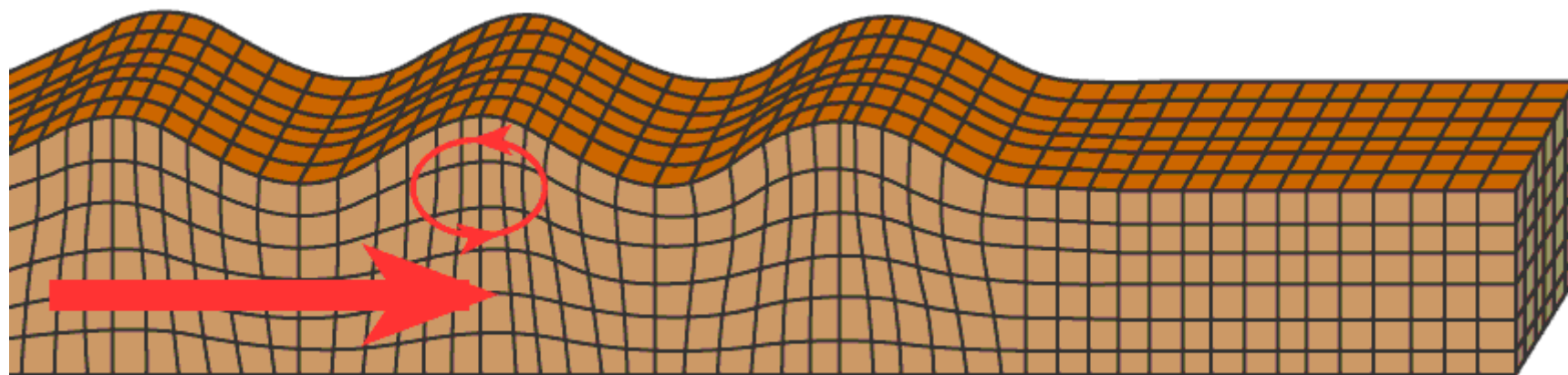




# Типы поверхностных упругих волн



**волны Лява**



**волны Рэлея**

# Типы сейсмических (упругих) волн

**объемные**

**продольные  
P (primary)**

**поперечные  
S (secondary)**

**недиспергирующие**

$$c_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$\mu$  – модуль сдвига

$K$  – модуль всестороннего сжатия

$$c_P > c_S$$

В коре Земли (PREM)

$$c_P \approx 5.8 - 6.8 \text{ км/с}$$

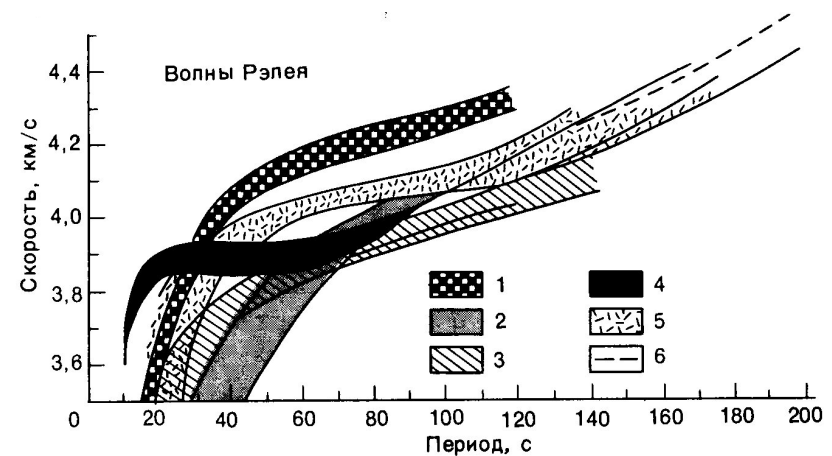
$$c_S \approx 3.2 - 3.9 \text{ км/с}$$

**поверхностные**

**волны  
Рэлея**

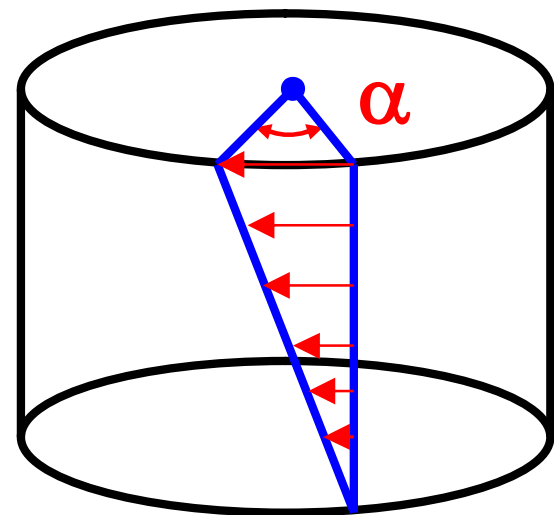
**волны  
Лява**

**диспергирующие**



# Типы деформаций:

1. сдвиг



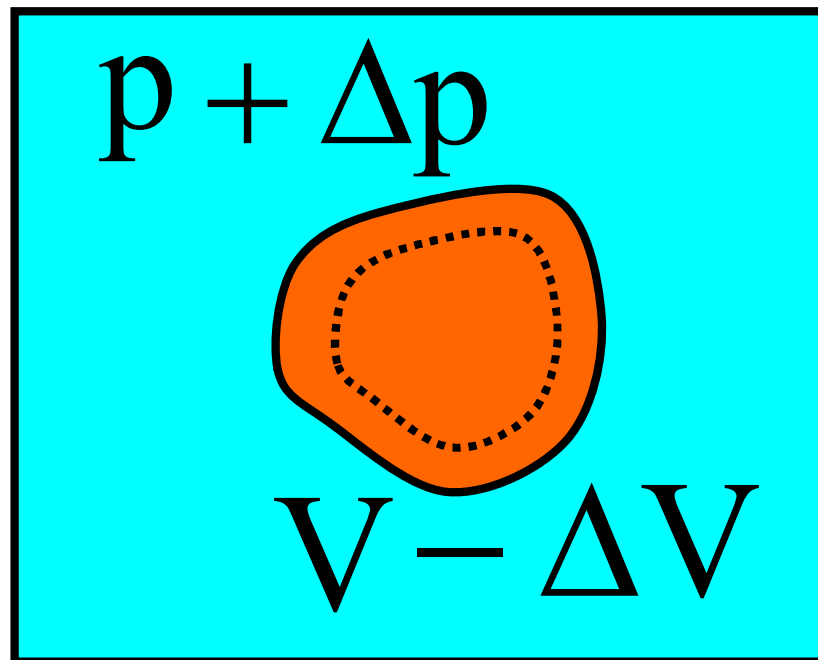
$$\tau = \mu \cdot \alpha$$

напряжение

угол сдвига

модуль сдвига

2. всестороннее сжатие

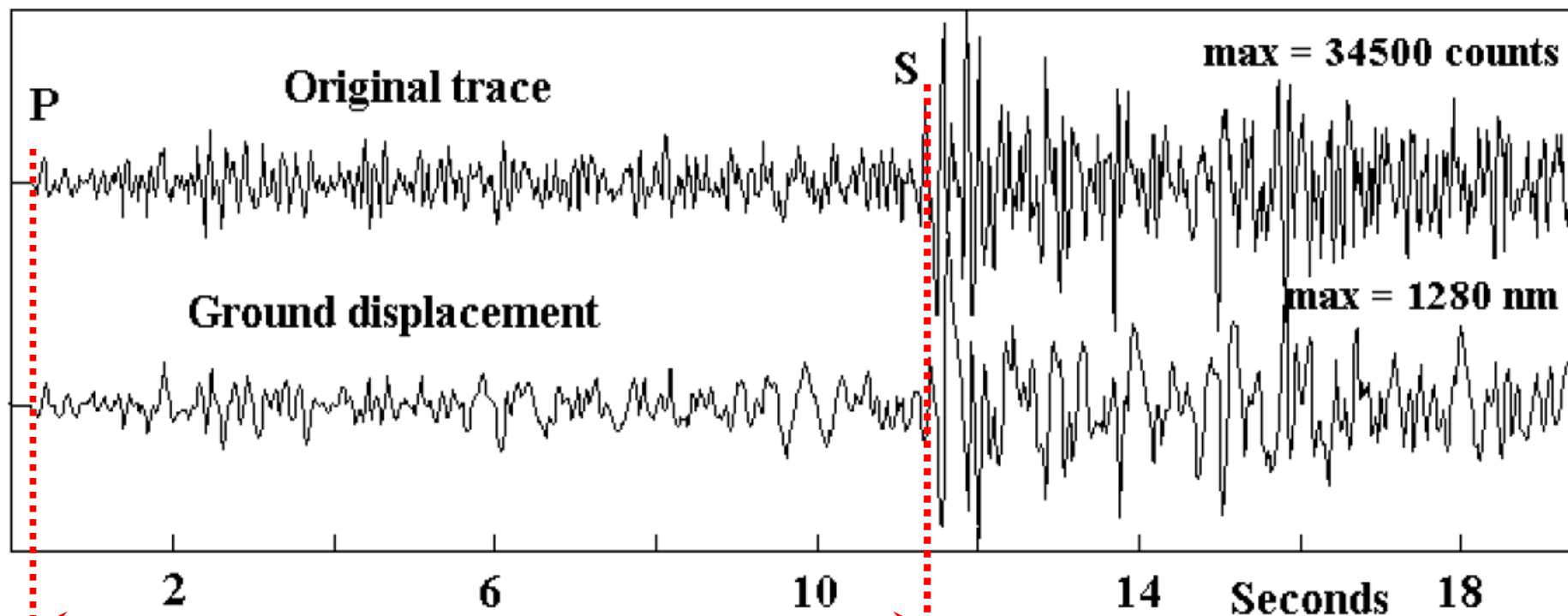


$$\Delta p = -K \frac{\Delta V}{V}$$

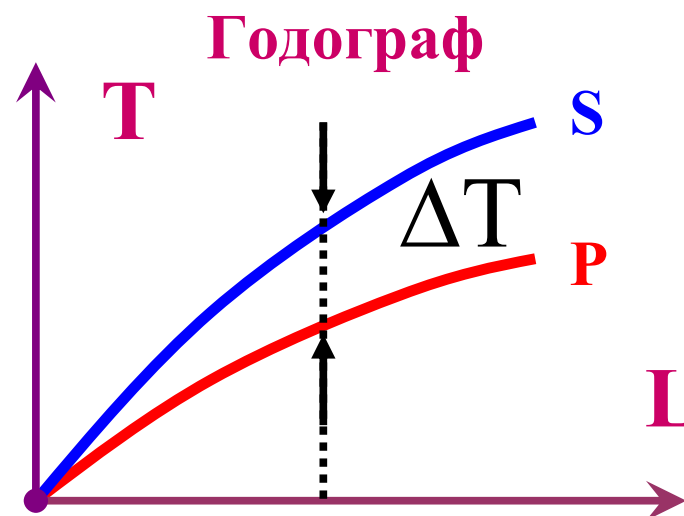
модуль всестороннего сжатия

Закон Гука

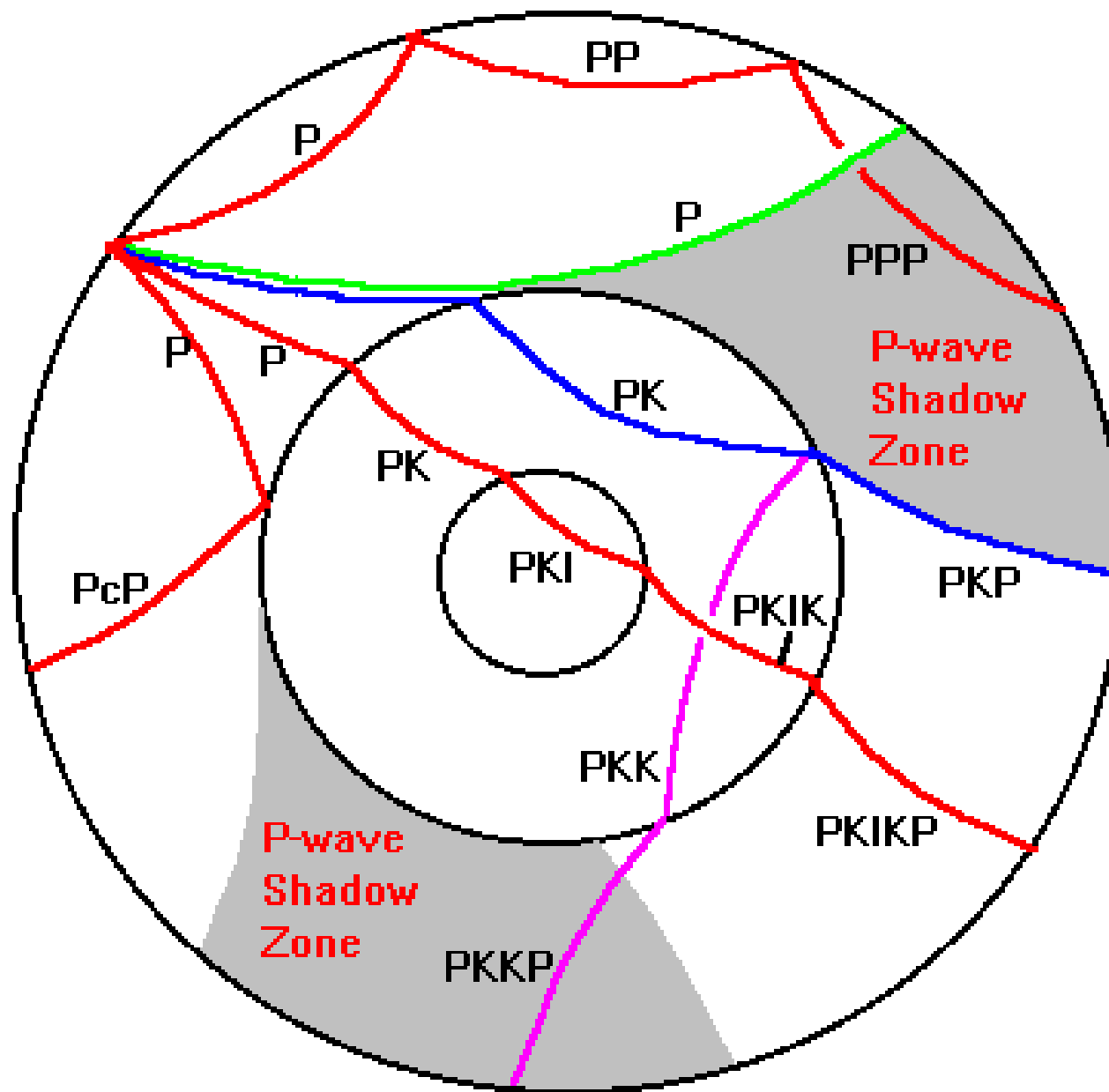
# Пример сейсмограммы (120 км, M=3)



~~$$L = (c_p - c_s) \Delta T$$~~



# Сейсмические волны (лучи) внутри Земли



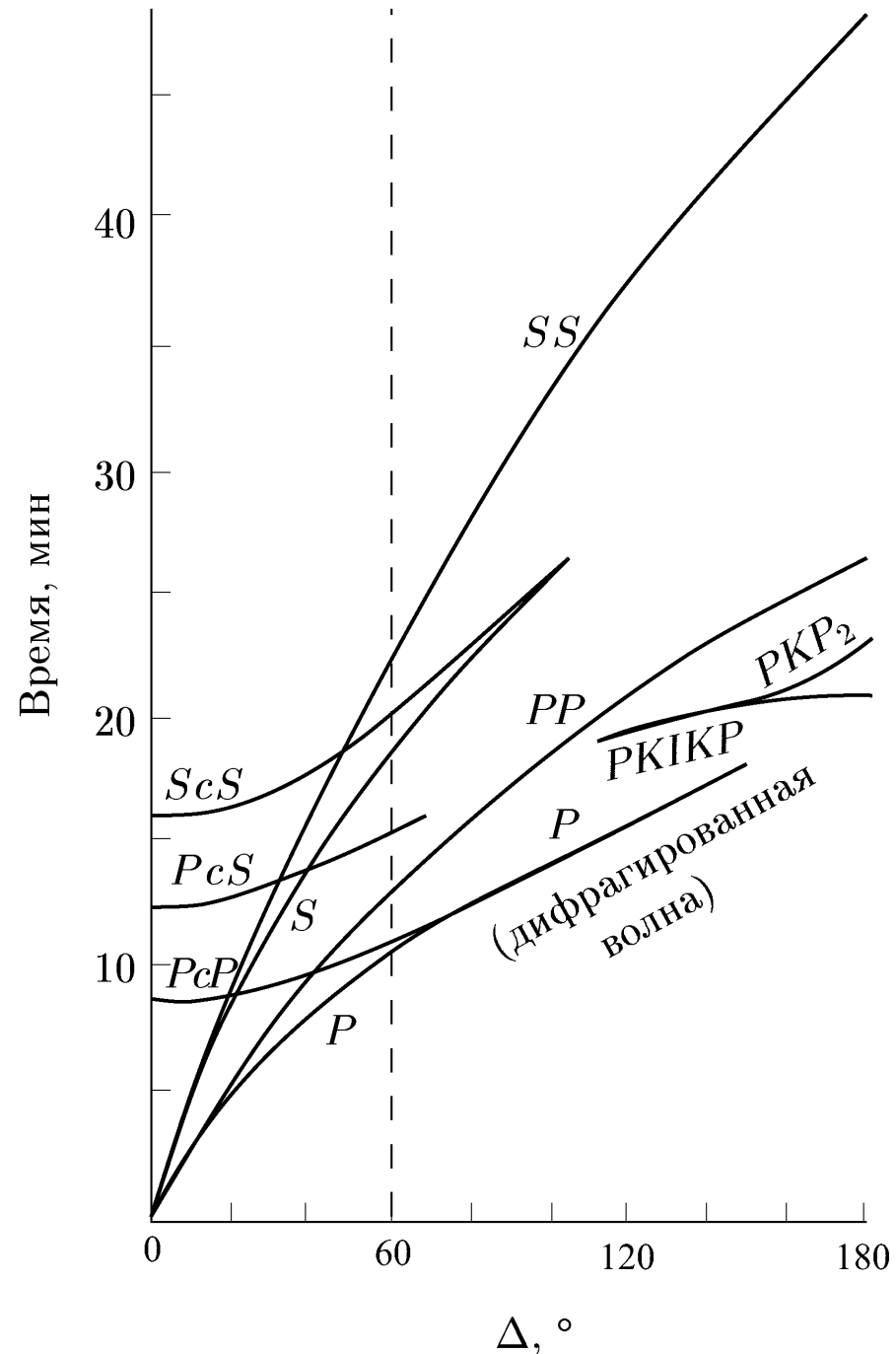
# Годографы

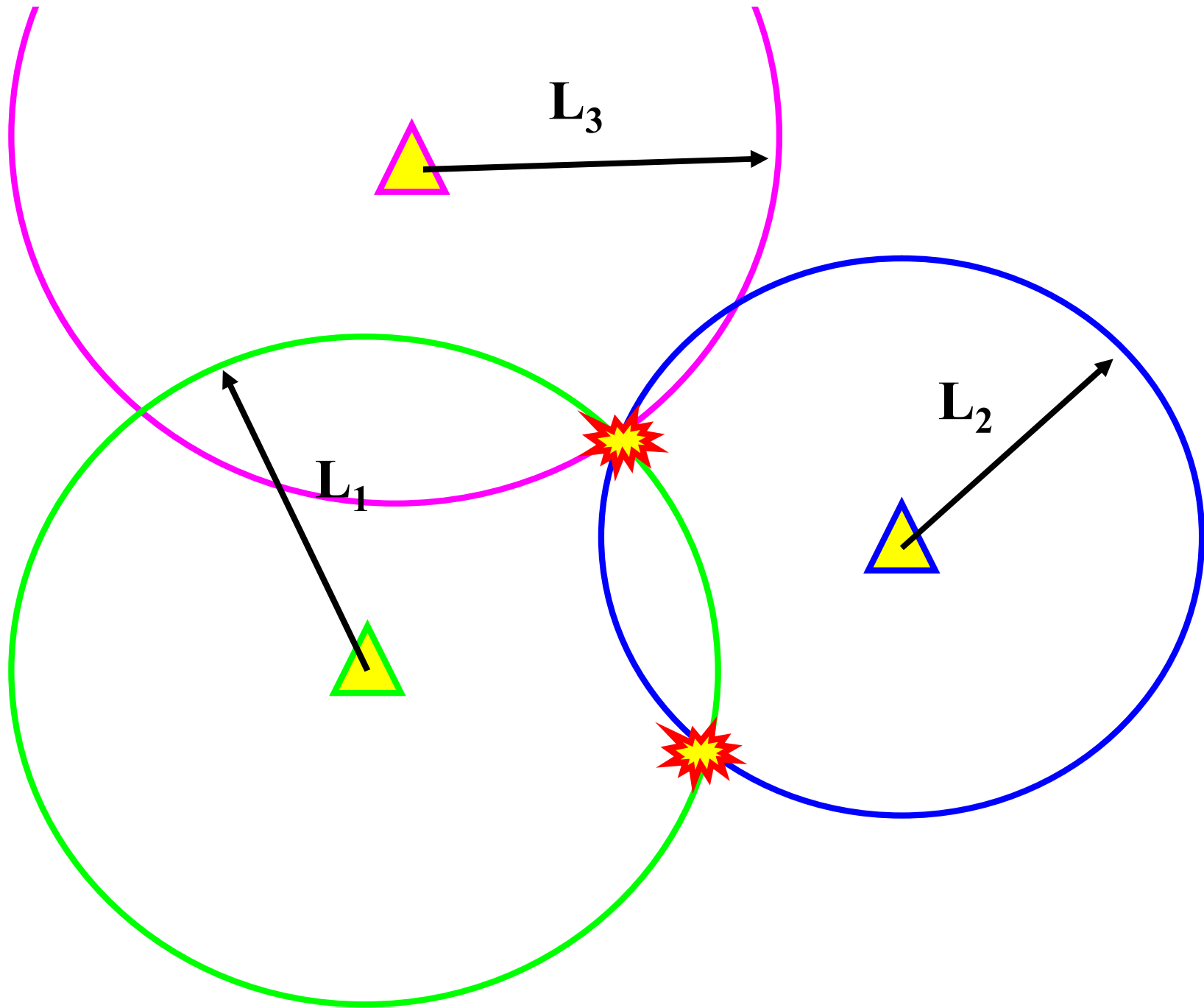
**с** – отражение от внешнего ядра

**К** – прохождение через внешнее ядро

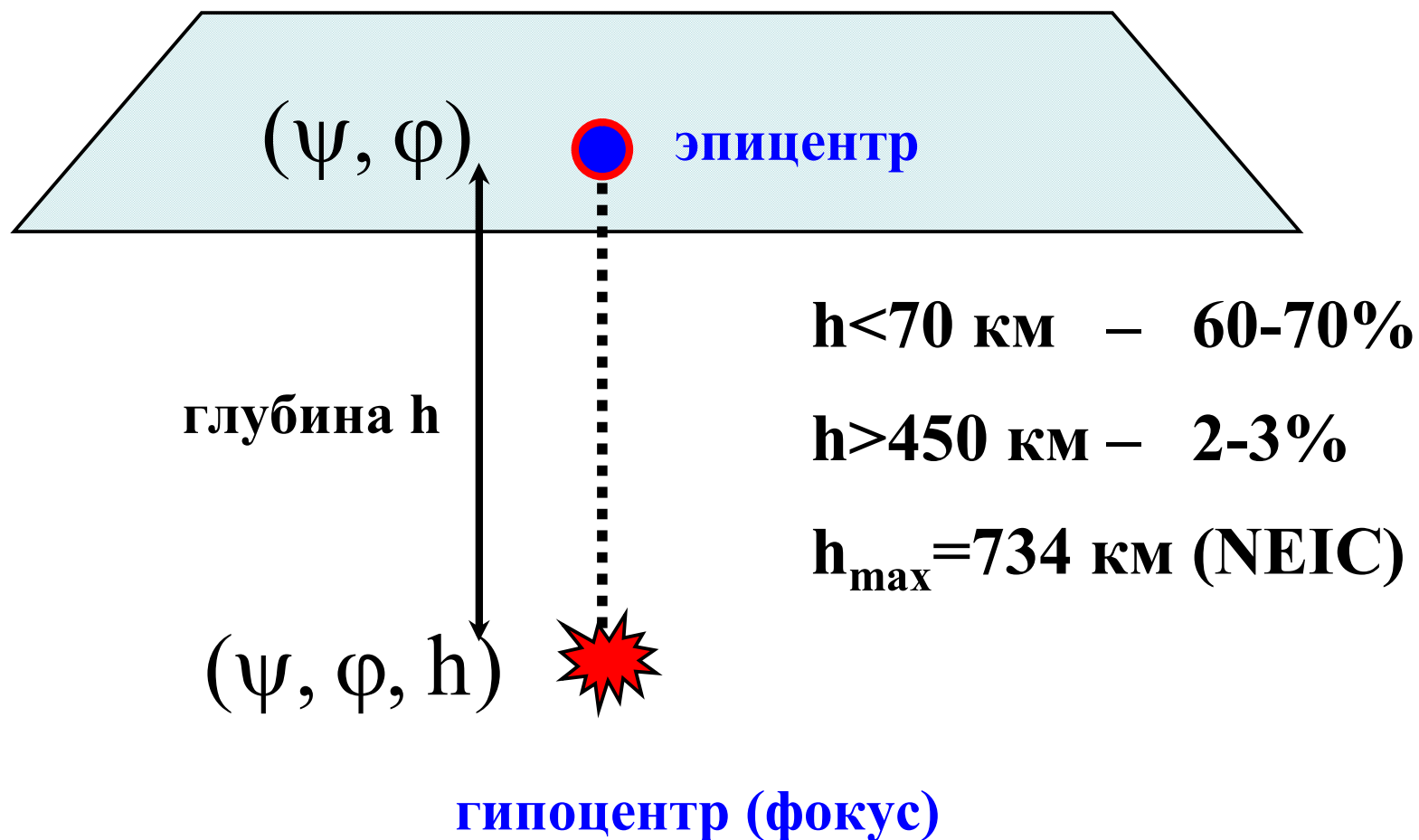
**і** – отражение вверх от внутреннего ядра

**I, J** – пути волн P и S во внутреннем твердом ядре



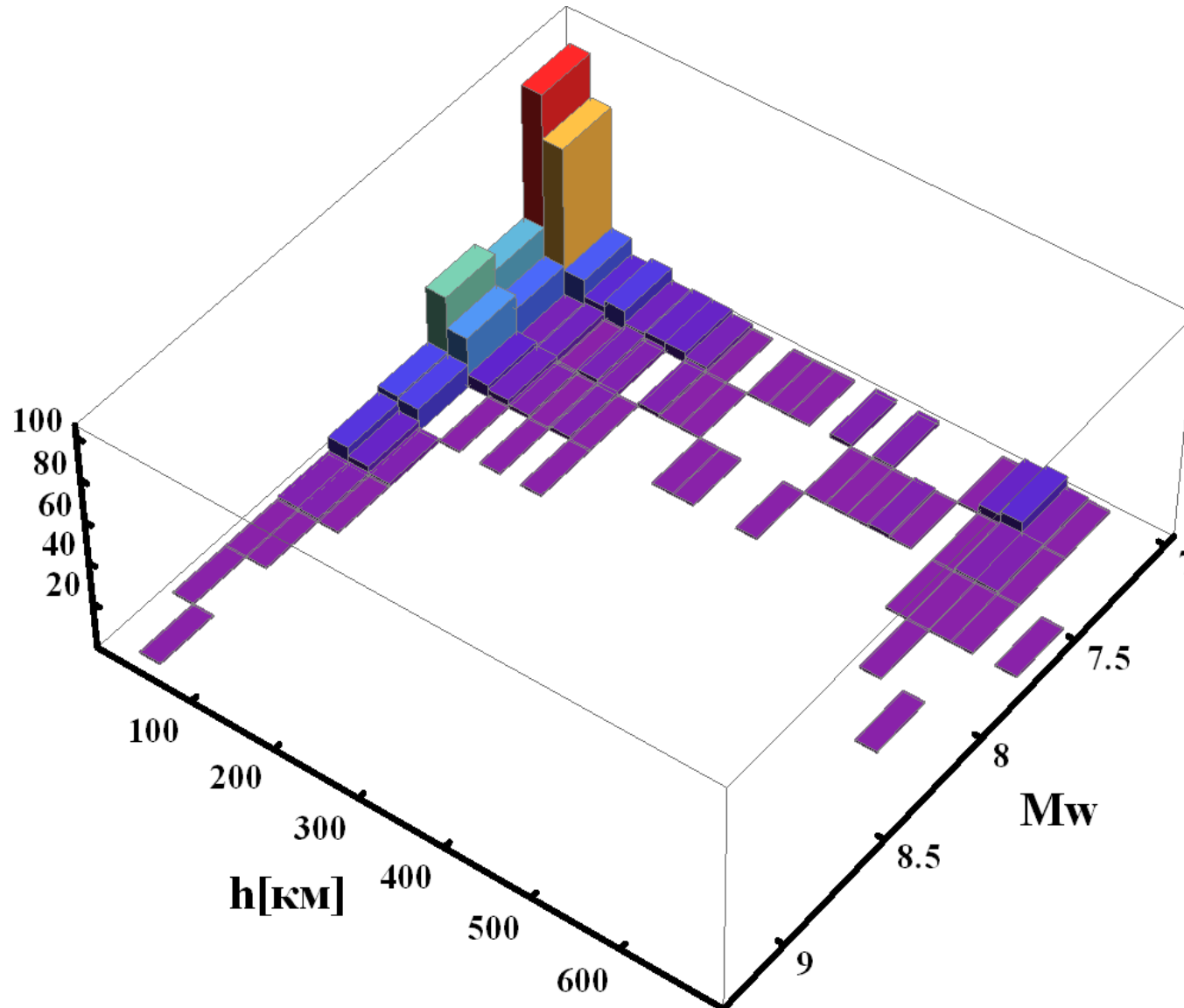


# Землетрясение: основные понятия

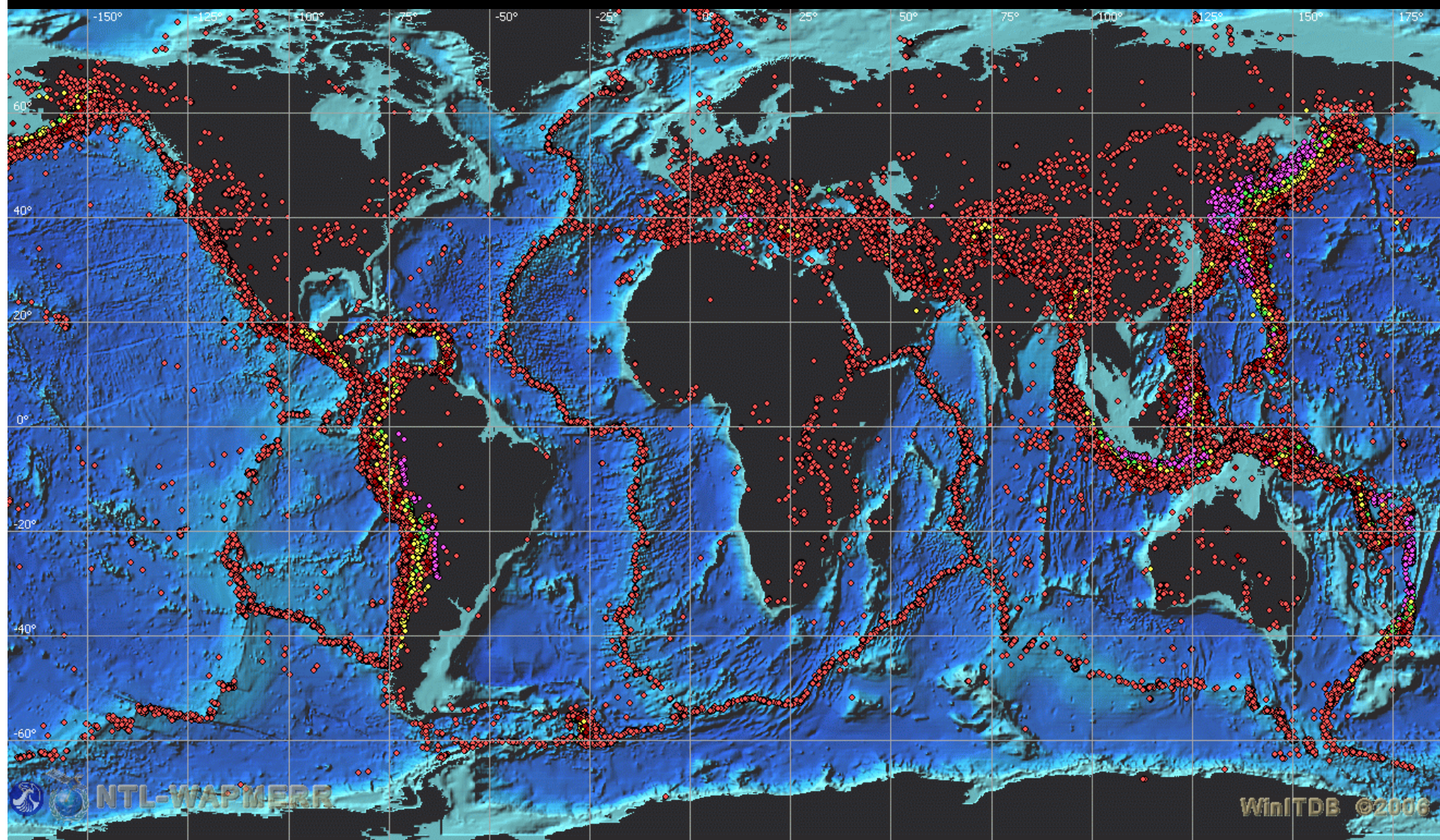


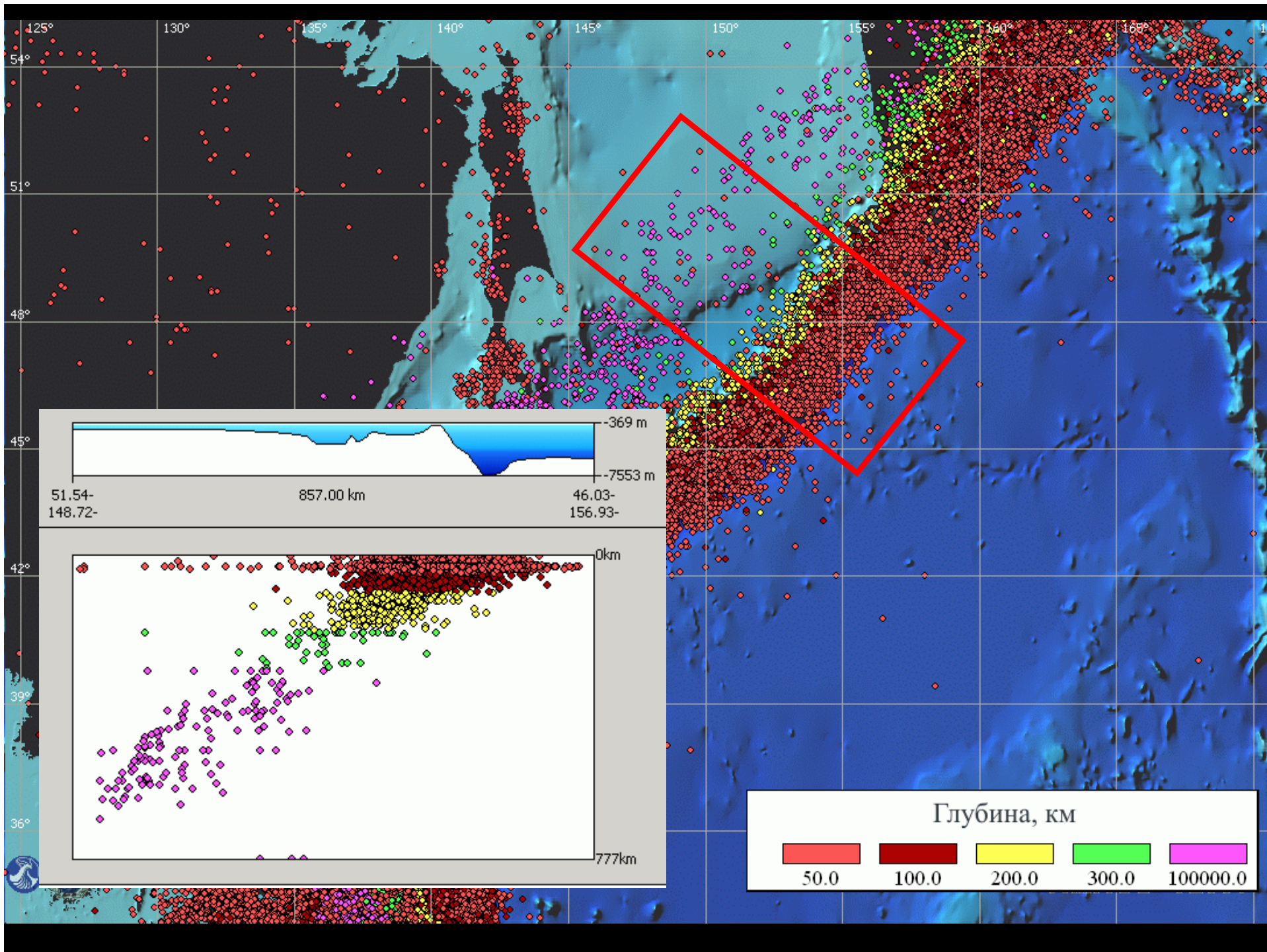


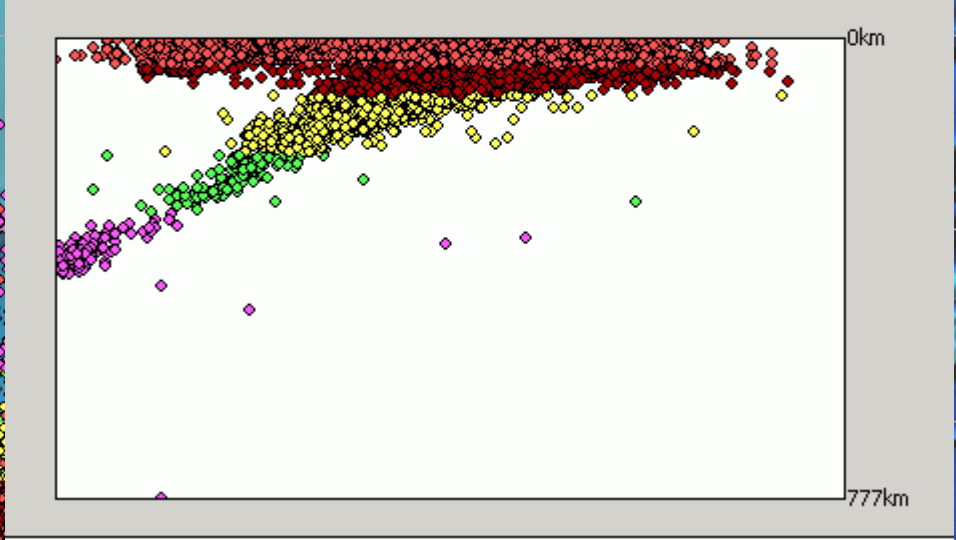
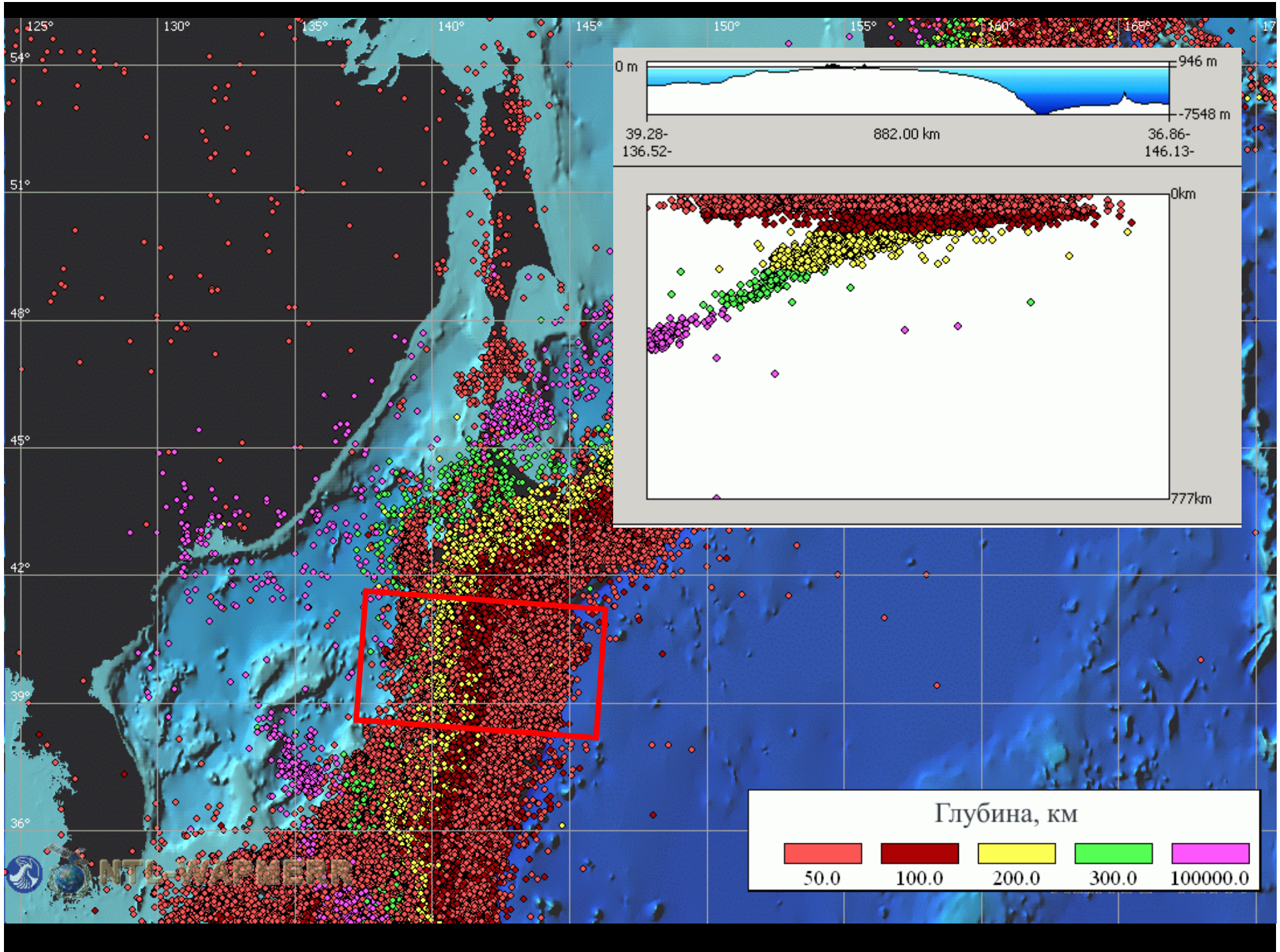
# Распределение реальных событий (1976-2012) по глубине $h$ и магнитуде $M_w$



# Эпицентры землетрясений (242 300 событий, WinITDB)

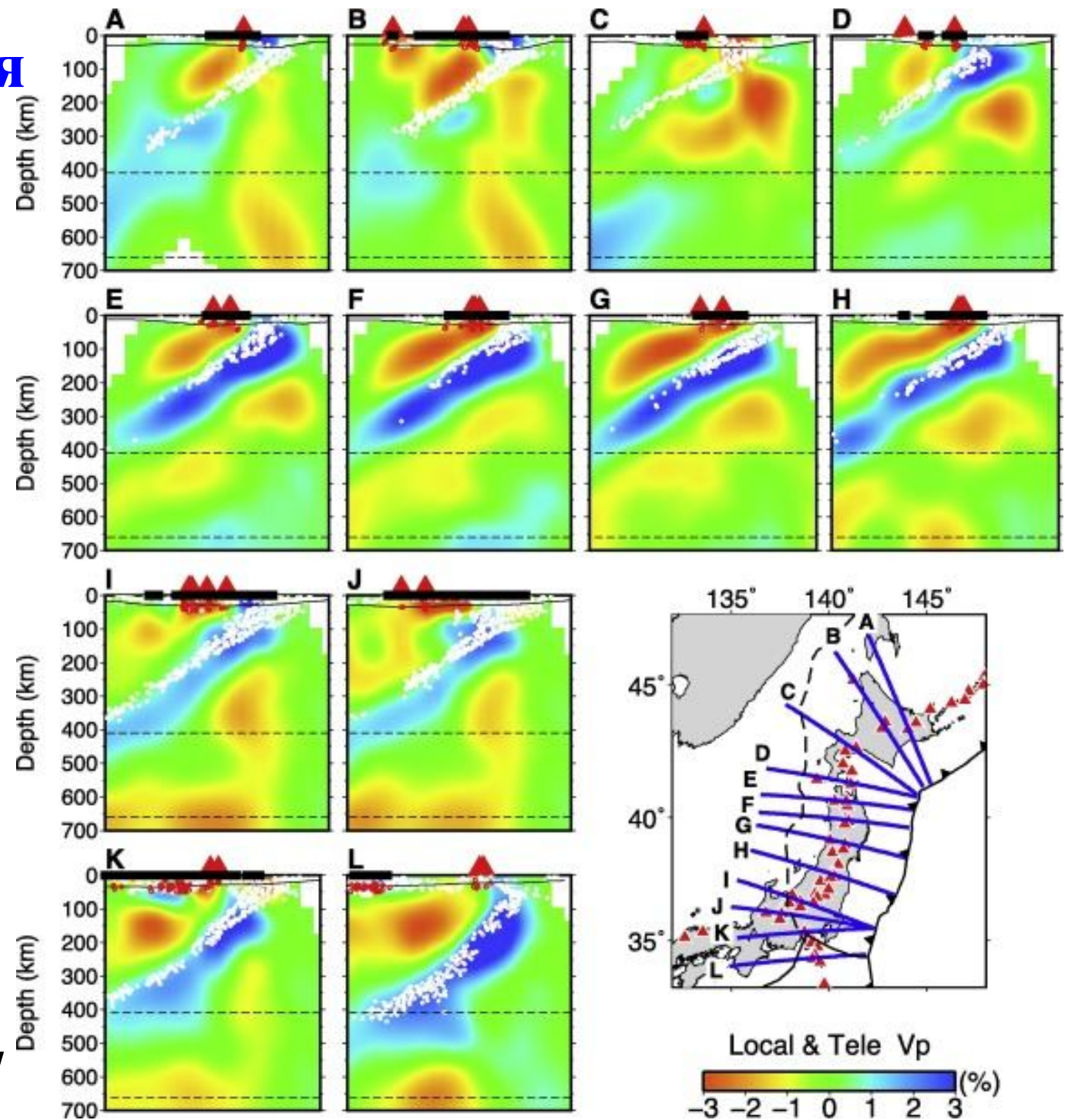




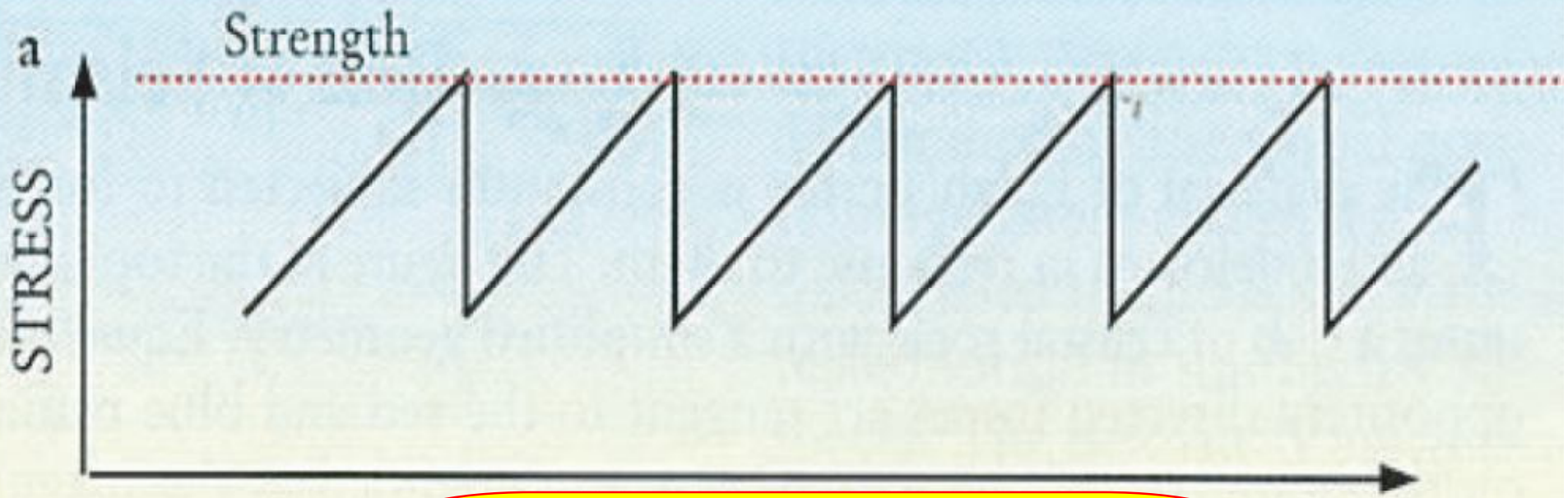


NTI-WAEMER

# Сейсмическая томография



[Liu, Zhao 2016]



Время между двумя последовательными землетрясениями и величина сбрасываемого напряжения варьируются от события к событию

