

*Носов Михаил Александрович*

*Прогноз цунами как  
задача физики*

*Всероссийская летняя  
школа учителей физики  
25 июня 2019*



# Отделение геофизики

кафедра  
физики  
атмосферы

кафедра  
физики моря и  
вод суши

кафедра  
физики  
Земли

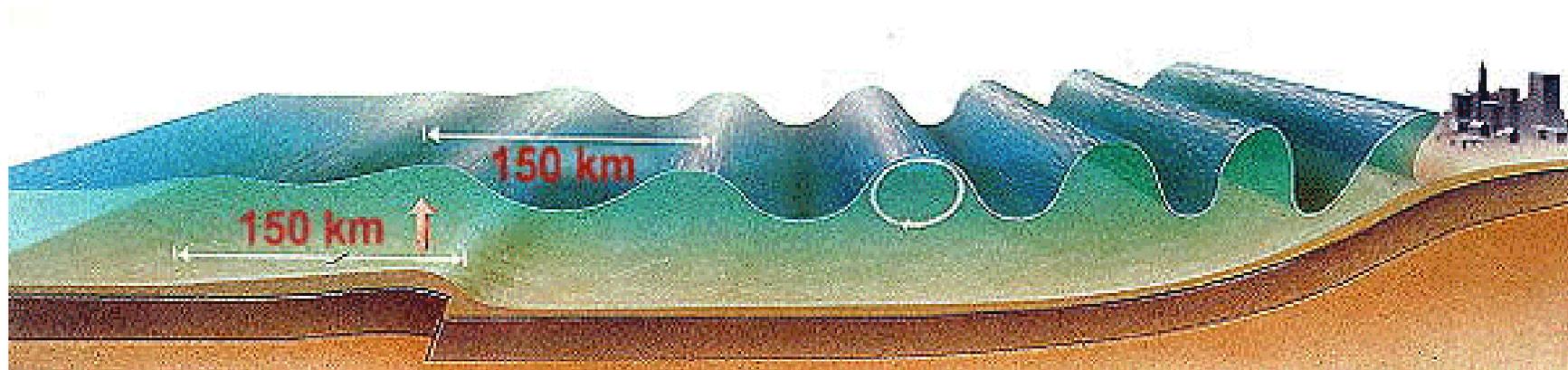
*Katsushika Hokusai (1830)*  
«The Great Wave of Kanagawa»



津波

**Волна в гавани**

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



**April 1, 1946**  
**M7.1 Aleutian Islands earthquake**

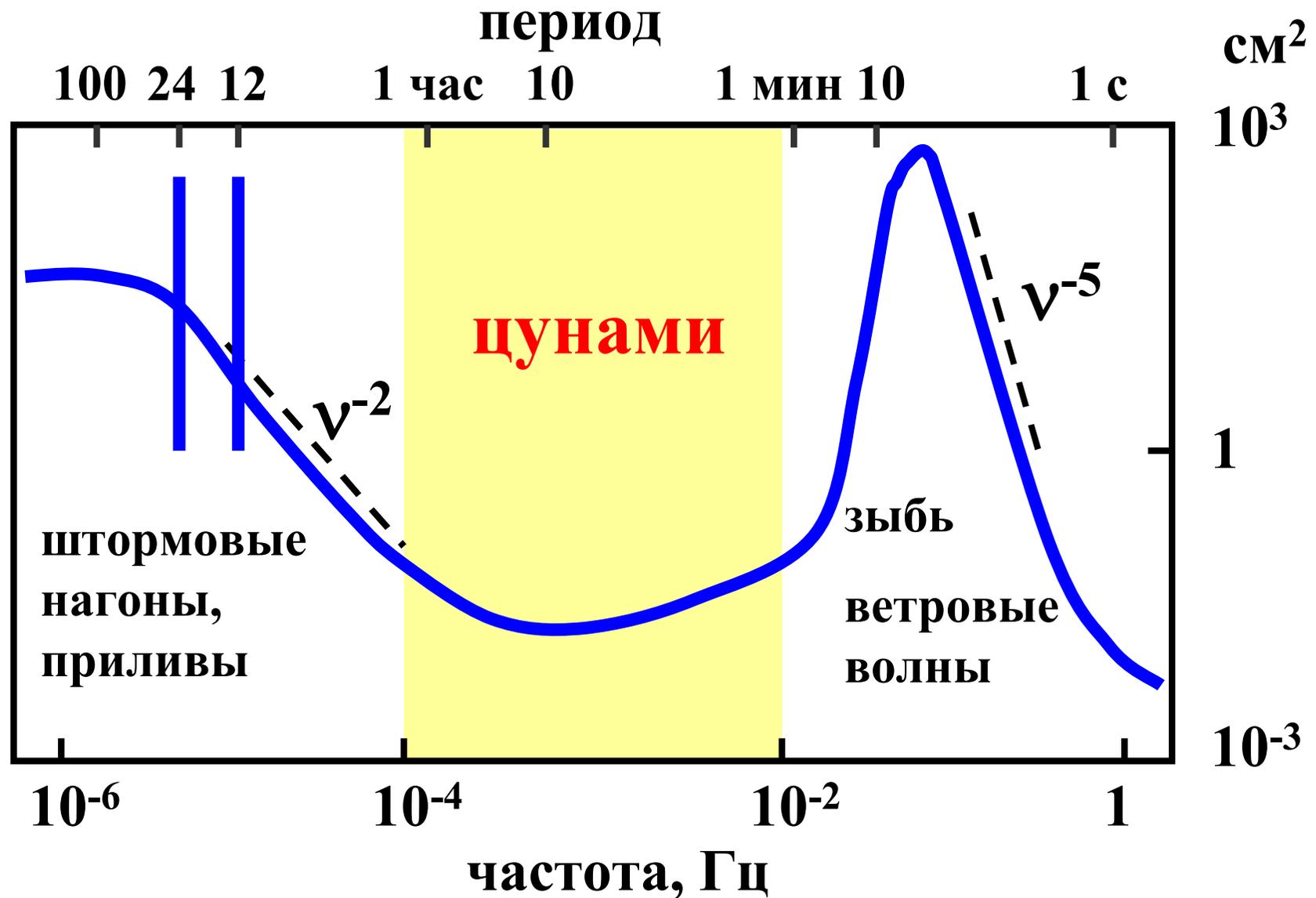


*Photo credit: Bishop Museum*

***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

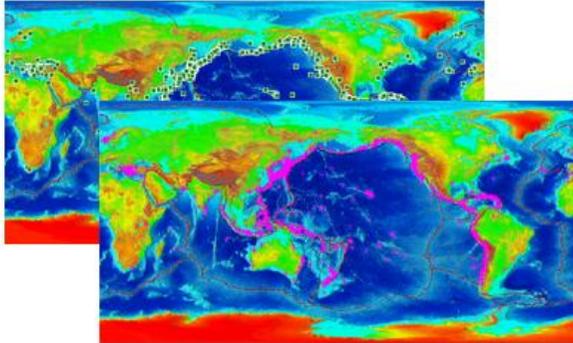


**Цунами – серия низкочастотных  
гравитационных поверхностных  
волн, вызванных мощным  
воздействием на водный слой**

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

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

# NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database



[Natural Hazards Interactive Map](#)  
[Database Introduction](#)  
[Tsunami Source Event References](#)  
[Tsunami Runup References](#)

**Please cite this data/database as:**  
doi: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.

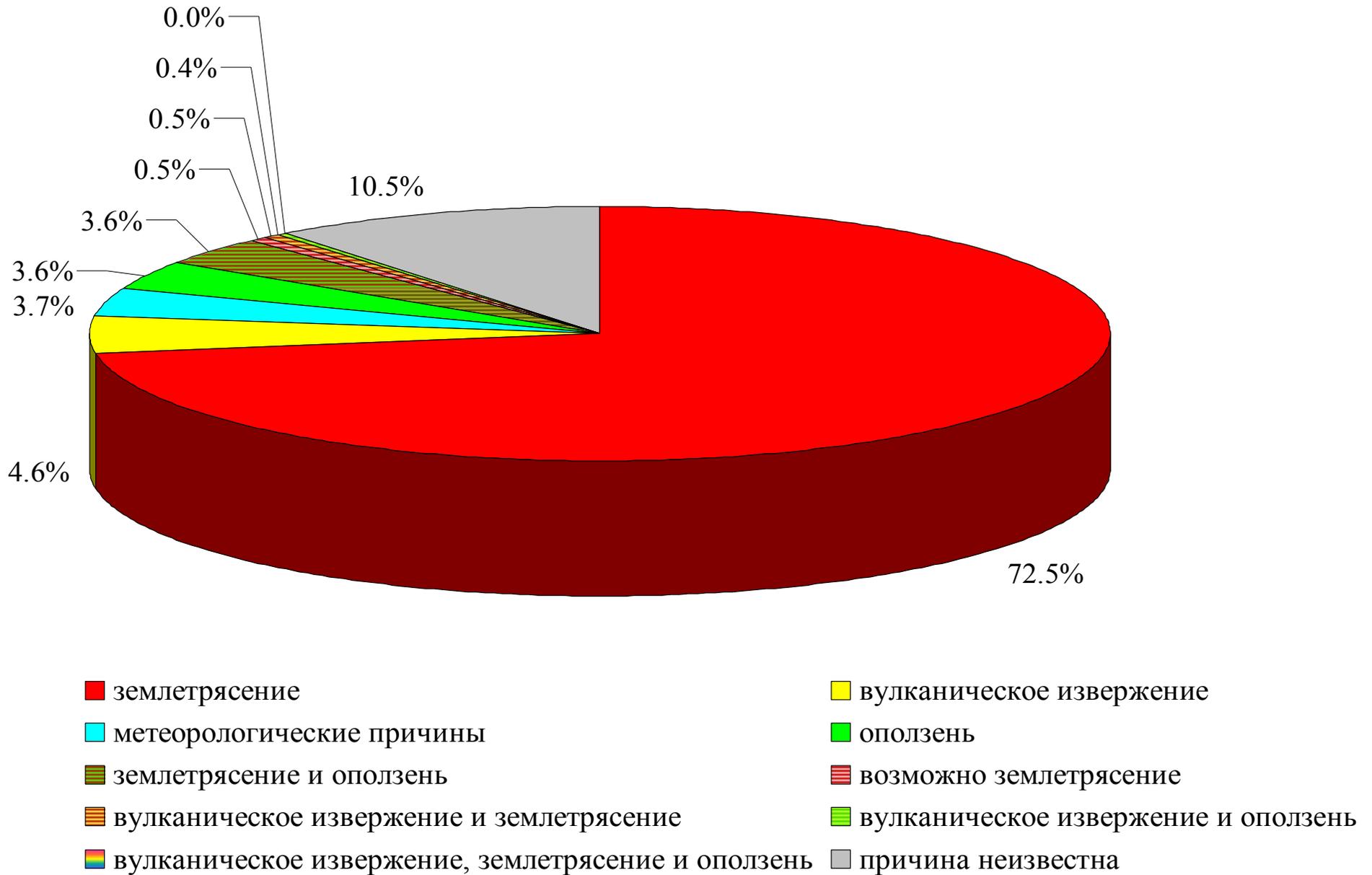
Data include: arrival date and time, travel time, maximum water heights, horizontal inundation distances, deaths, injuries, and damage for specific locations.

- [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 (NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database)



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

$$A \sim 1 / \sqrt{r}$$

- 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)

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

$$A \sim 1/H^{1/4} \quad U \sim 1/H^{3/4}$$

**Волна цунами опасна  
только на берегу или  
вблизи берега на  
мелководье**

# Мияко, Япония, 2011 г



Япония, Онагава, март 2012



# Чили, Кокимбо, 2015 г.



3 THE CHILEAN  
TSUNAMI



# **Необходимость прогноза волн 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

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»

# Прогноз цунами

```
graph TD; A[Прогноз цунами] --> B[Долгосрочный]; A --> C[Краткосрочный]; B --- D[задачи]; C --- D; D --- E[вероятностная оценка риска цунами]; D --- F[расчет времени добегаания]; D --- G[оценка высот заплеска];
```

Долгосрочный

Краткосрочный

*з а д а ч и*

вероятностная  
оценка риска  
цунами

расчет времени  
добегания

оценка высот  
заплеска

# 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

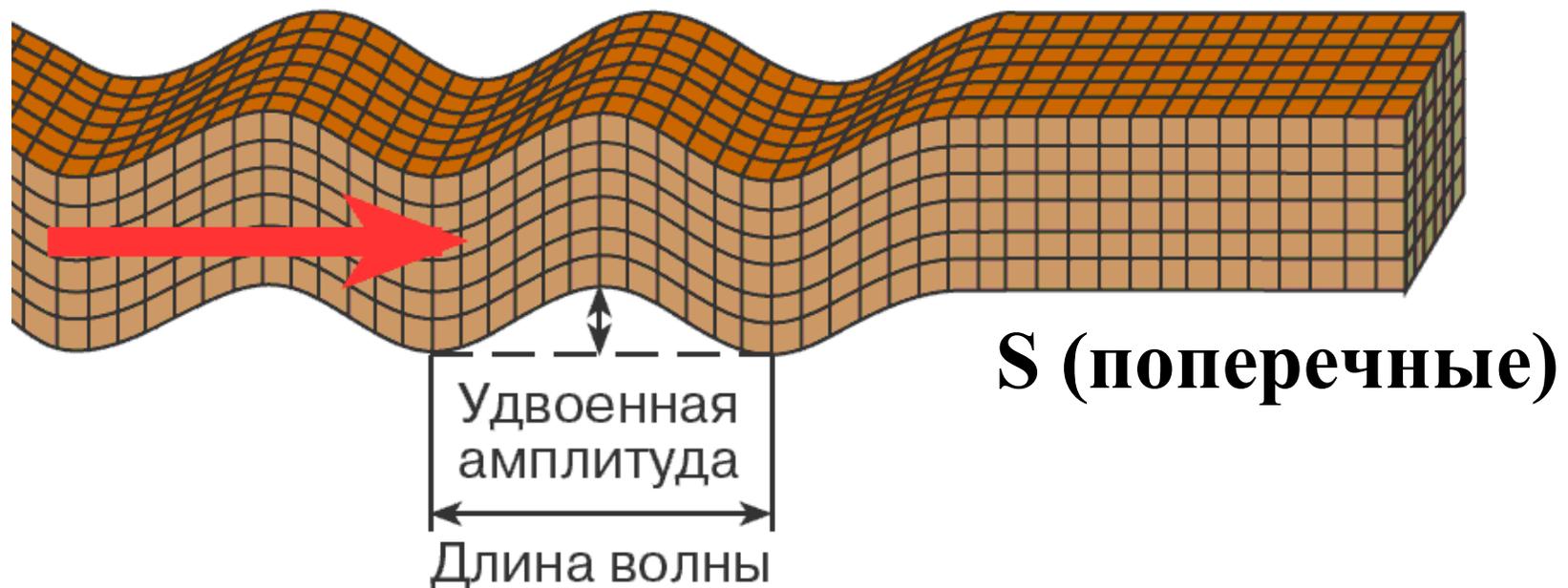
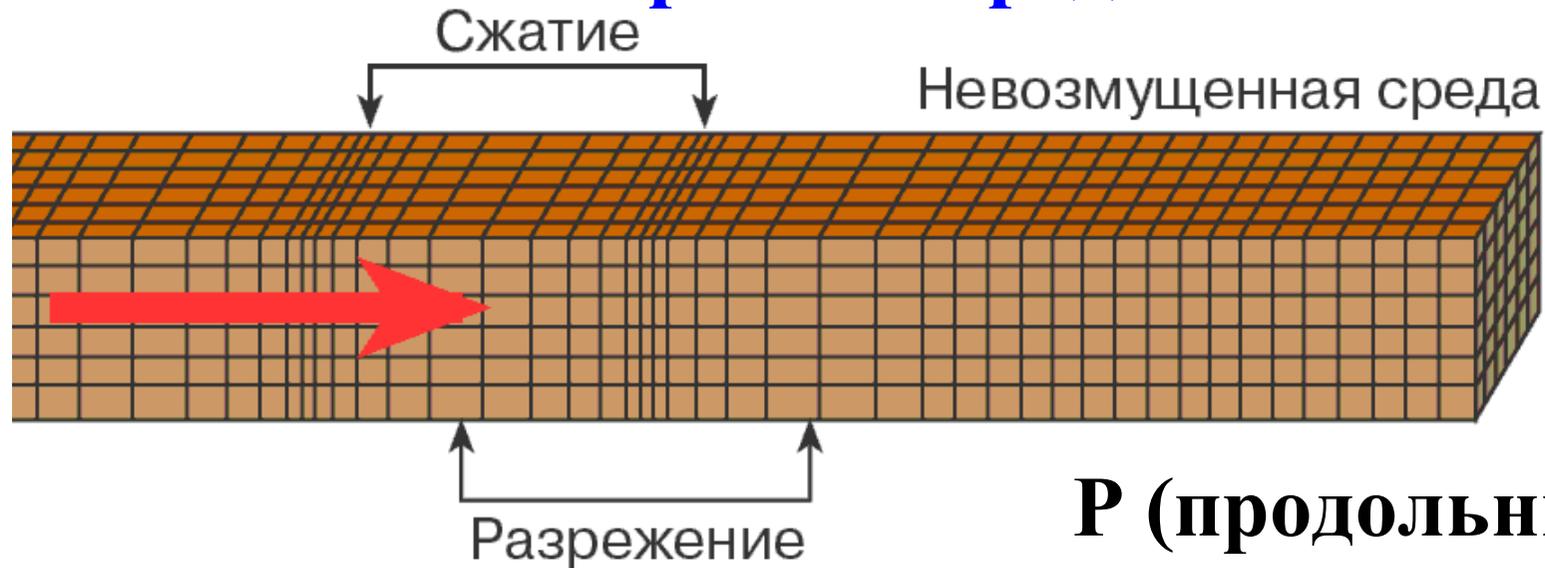
дата	источник	Mw	высота волн на Гавайях, м
11.11.1922	Чили	8.7	2.1
03.02.1923	Камчатка	8.4	6.1
02.03.1933	Санрику	8.4	3.3

ущерб 1.5 млн. USD, 1 погибший

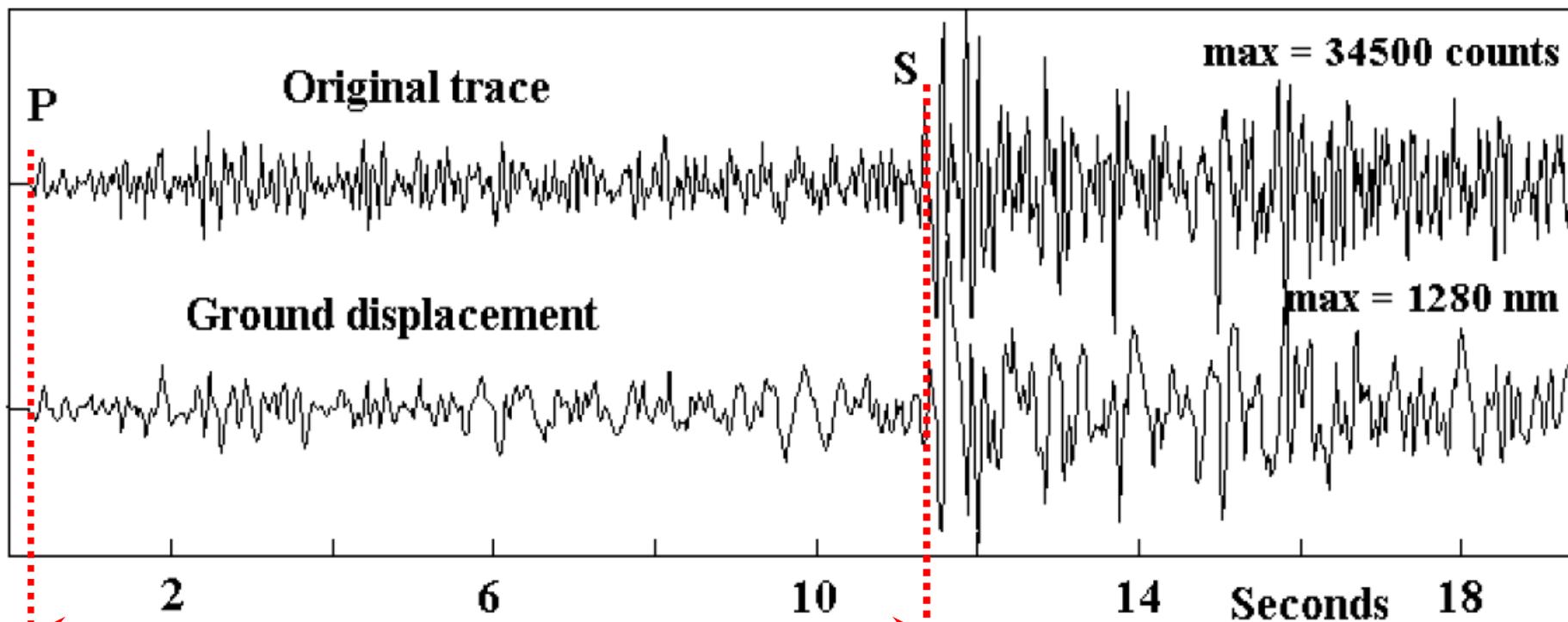


**Thomas Jaggar**  
1871 – 1953  
Founder Hawaiian  
Volcano Observatory

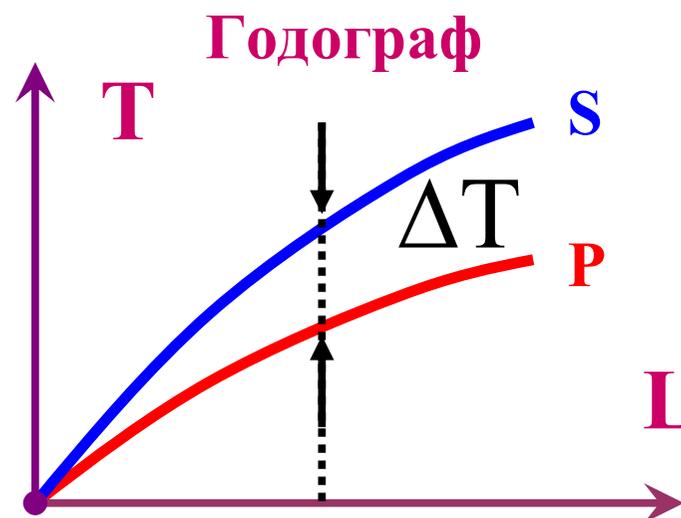
# Типы упругих волн в безграничной однородной и изотропной среде



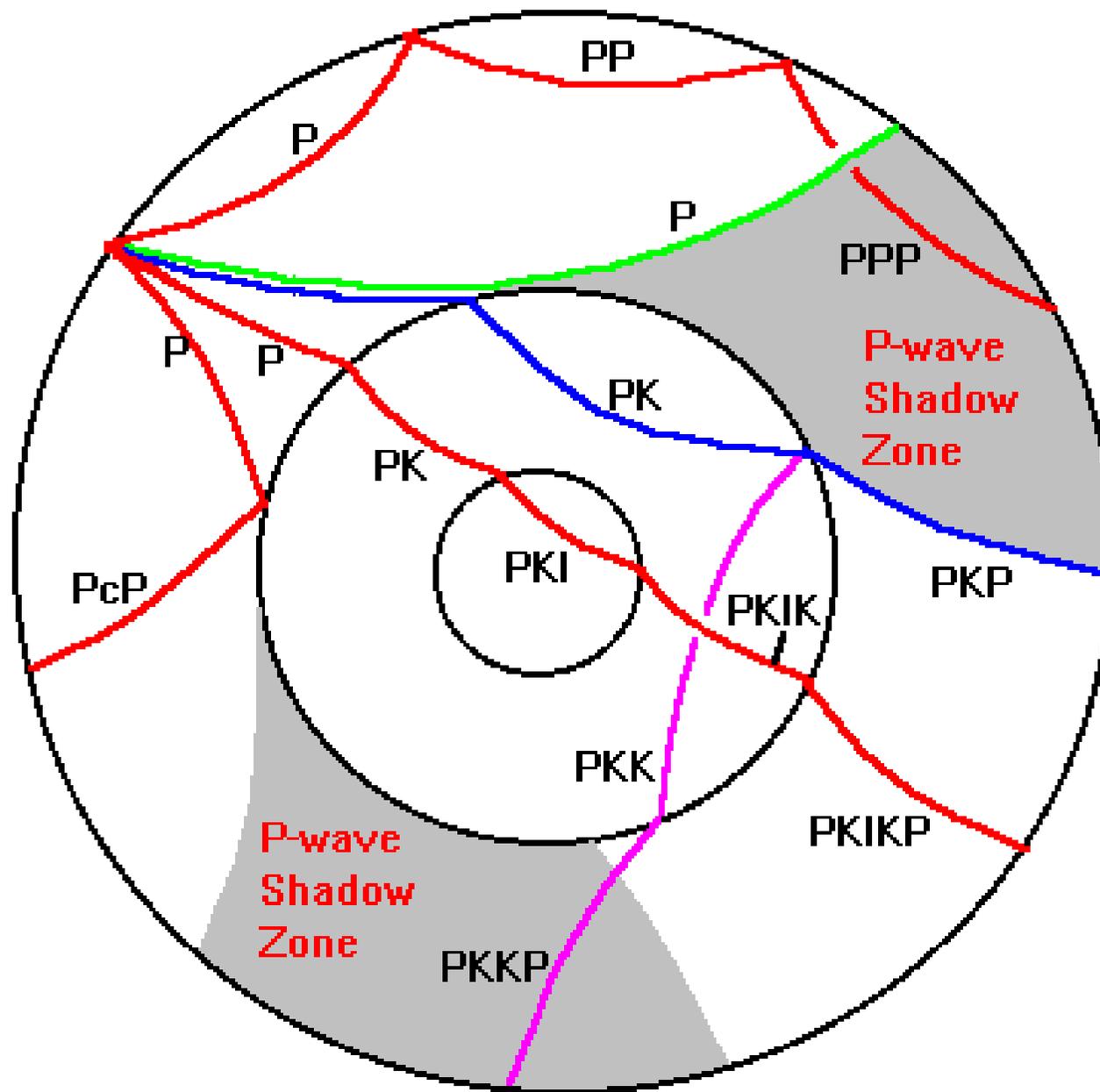
# Пример сейсмограммы (120 км, M=3)



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



# Сейсмические волны (лучи) внутри Земли



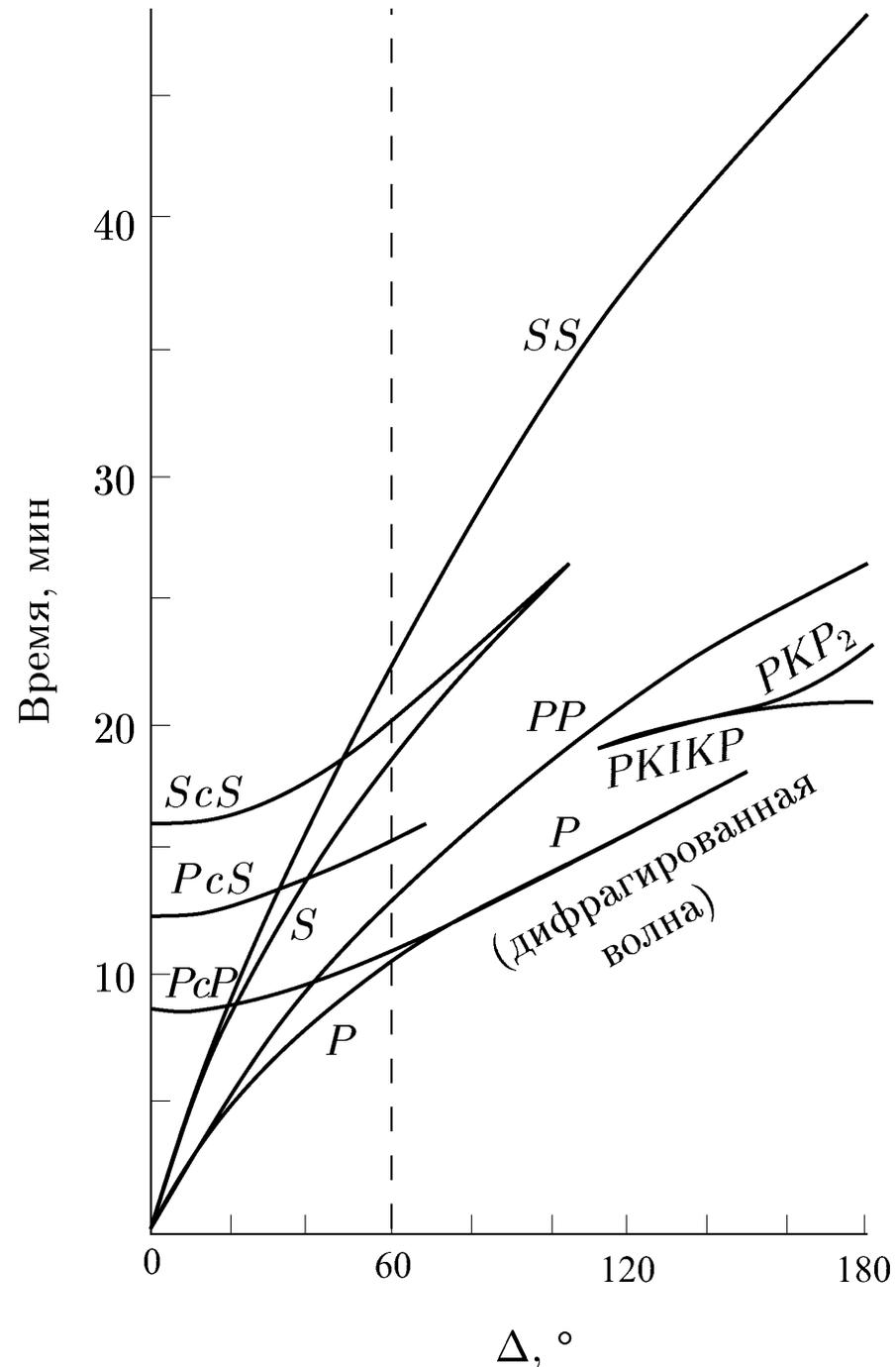
# Годографы

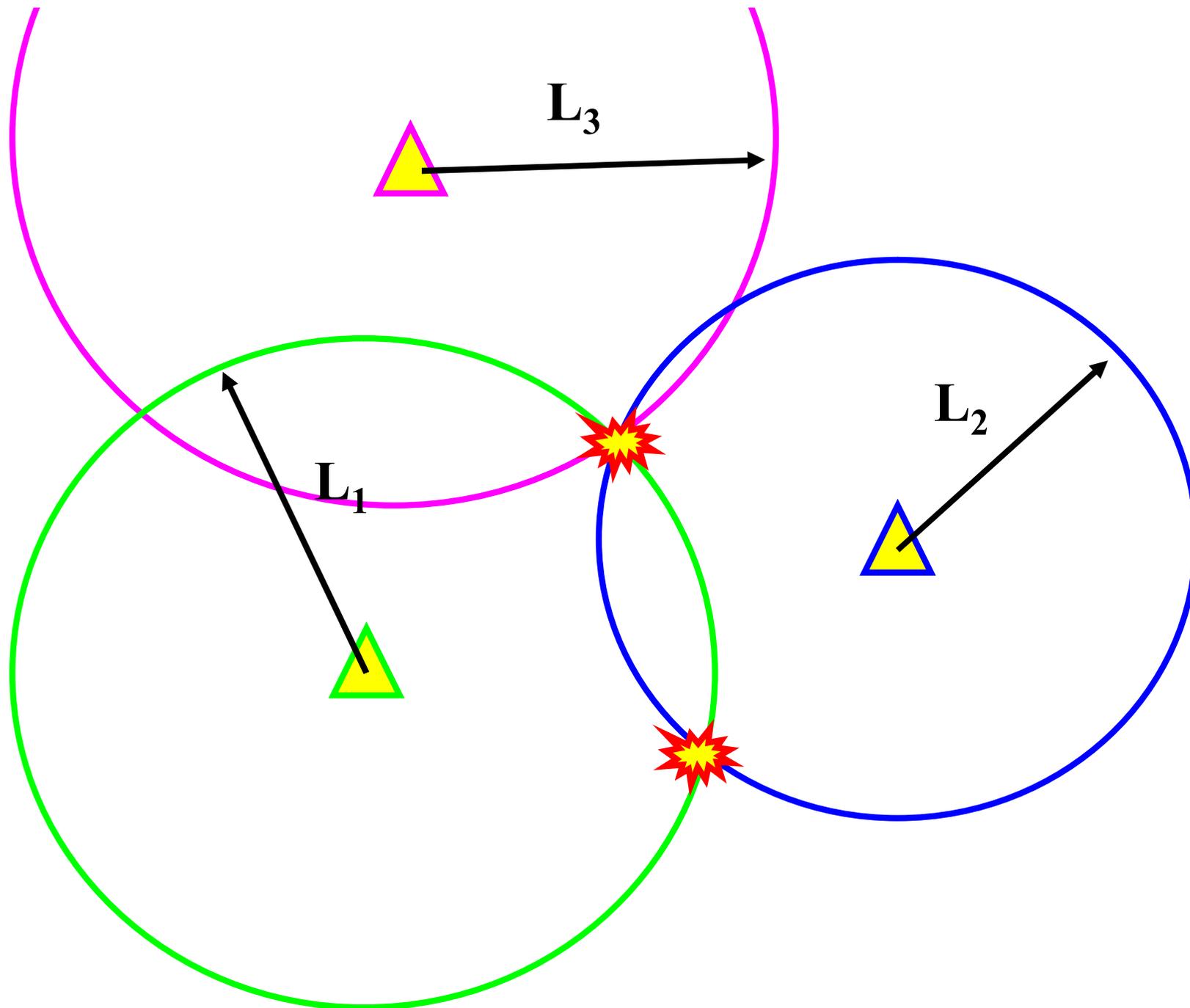
**с** – отражение от внешнего ядра

**К** – прохождение через внешнее ядро

**і** – отражение вверх от внутреннего ядра

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





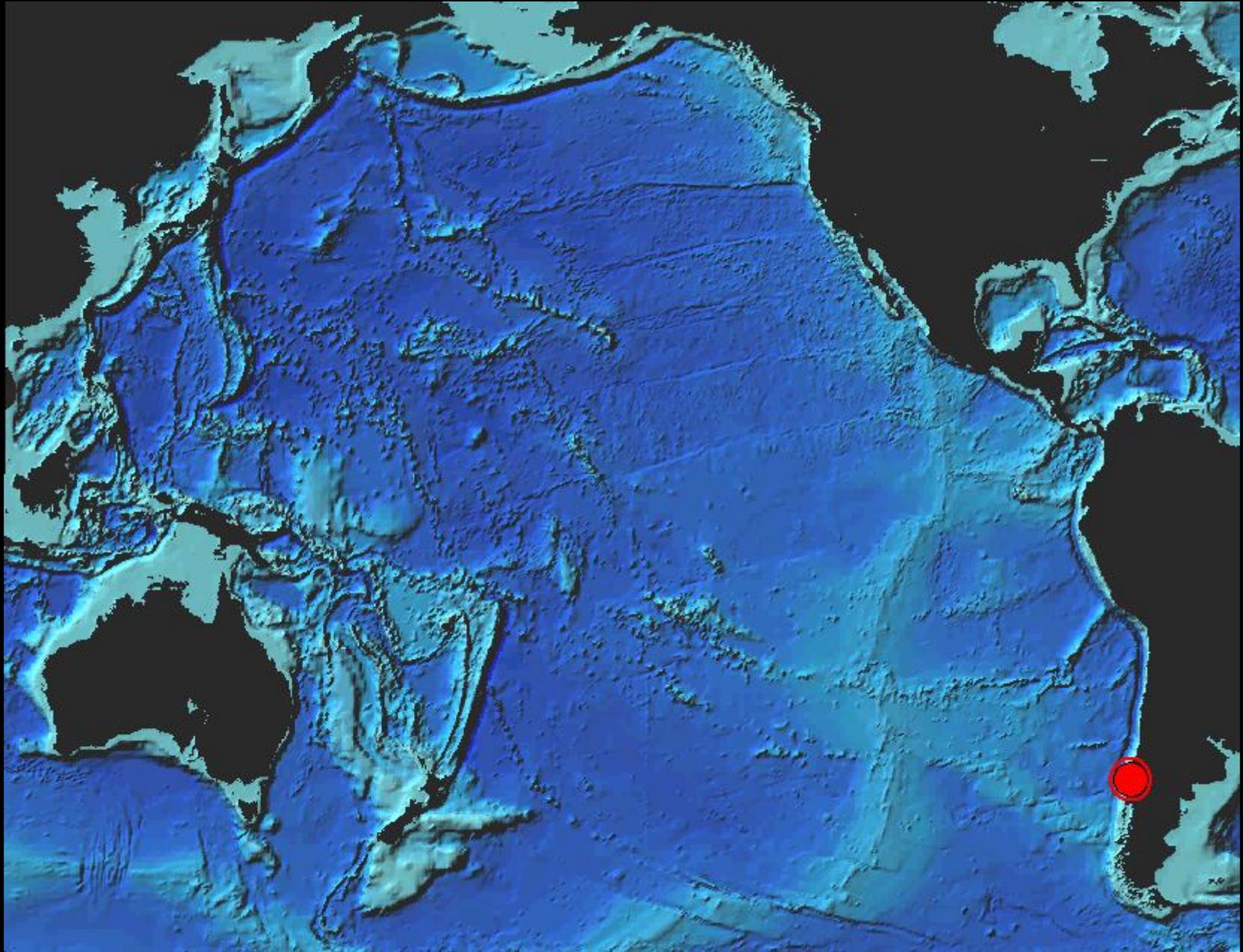
# Этапы прогноза цунами:

1. Определение времени и места землетрясения
2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья

*скорость распространения длинных волн*

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

$$9.8 \text{ м/с}^2 \quad 4000 \text{ м}$$



# **Этапы прогноза цунами:**

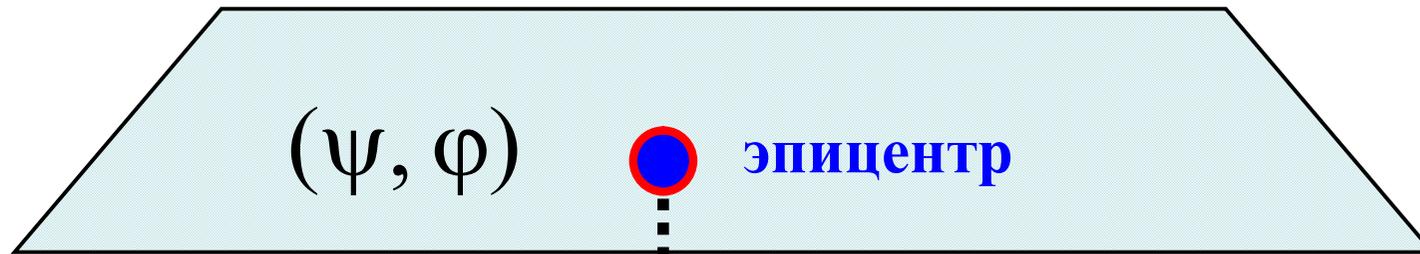
- 1. Определение времени и места землетрясения**
- 2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья**
- 3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)**

# Очаг землетрясения. Основные понятия

$$M_0 = \mu S |\vec{D}| \quad [\text{Н} \cdot \text{м}]$$

сейсмический момент

$\mu$  – модуль сдвига ( $\approx 3 - 8 \cdot 10^{10}$  Па)



$\vec{D}$

$S = LW$

$(\psi, \varphi, h)$

гипоцентр (фокус)

моментная магнитуда

$$M_w = \frac{\lg M_0}{1.5} - 6.07$$

# Этапы прогноза цунами:

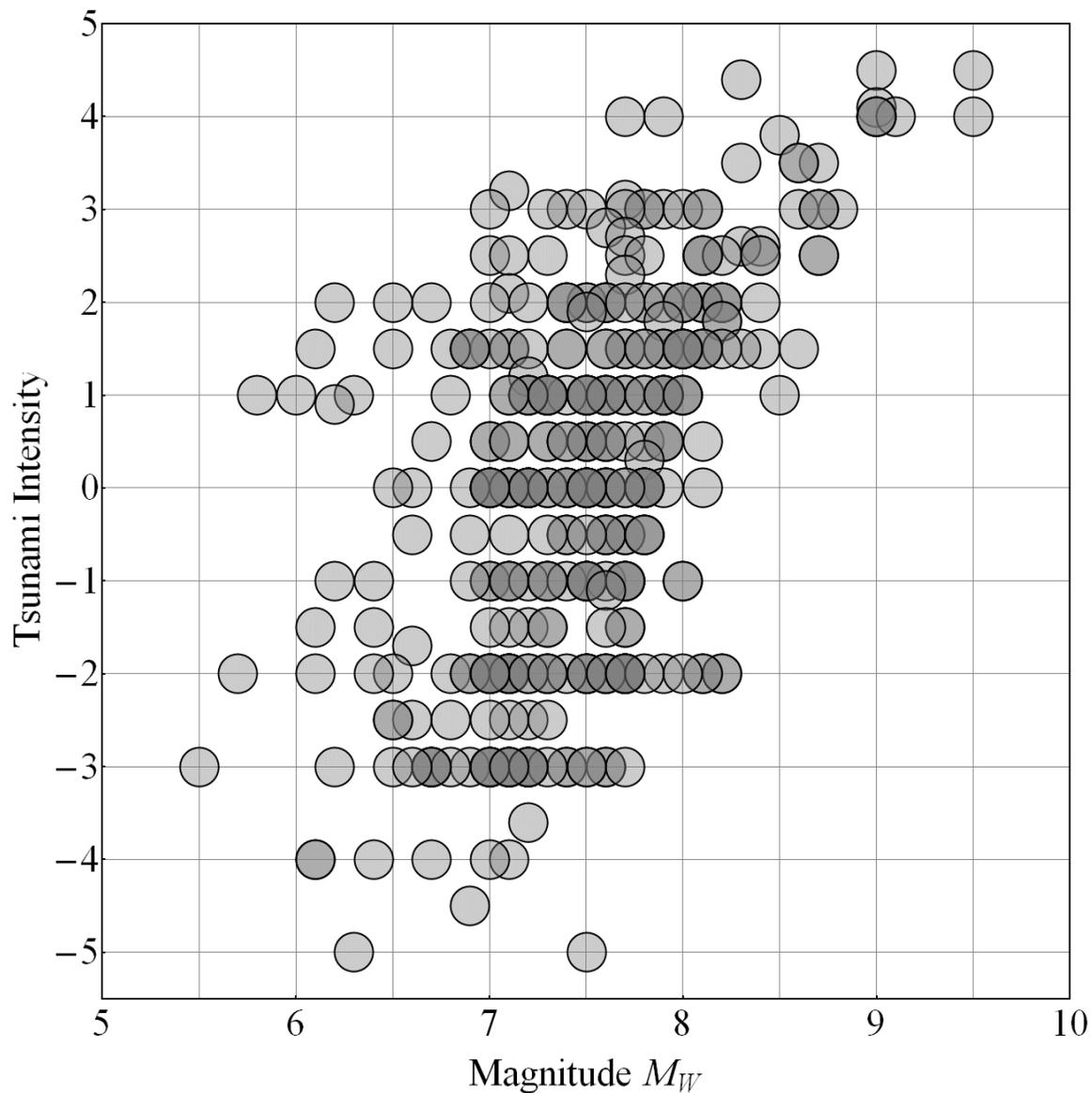
1. Определение времени и места землетрясения
2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья
3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)
4. Оценка «силы цунами» по «силе землетрясения»

интенсивность цунами  
по шкале Соловьева-  
Имамуры

$$I = 0.5 + \log_2 A$$

средняя высота заплеска на  
ближайшем побережье

# Связь между интенсивностью цунами и магнитудой землетрясения

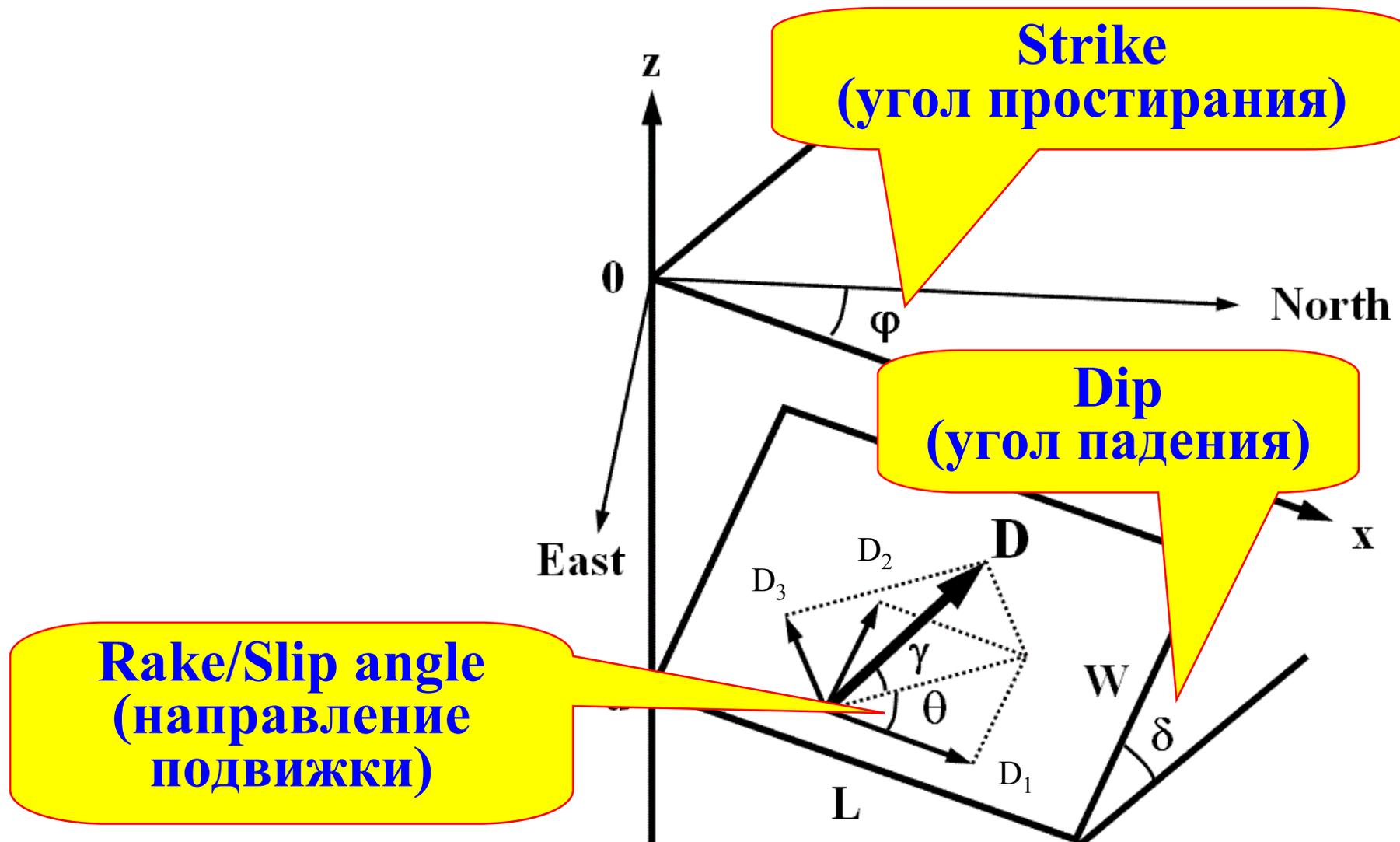


# **Этапы прогноза цунами:**

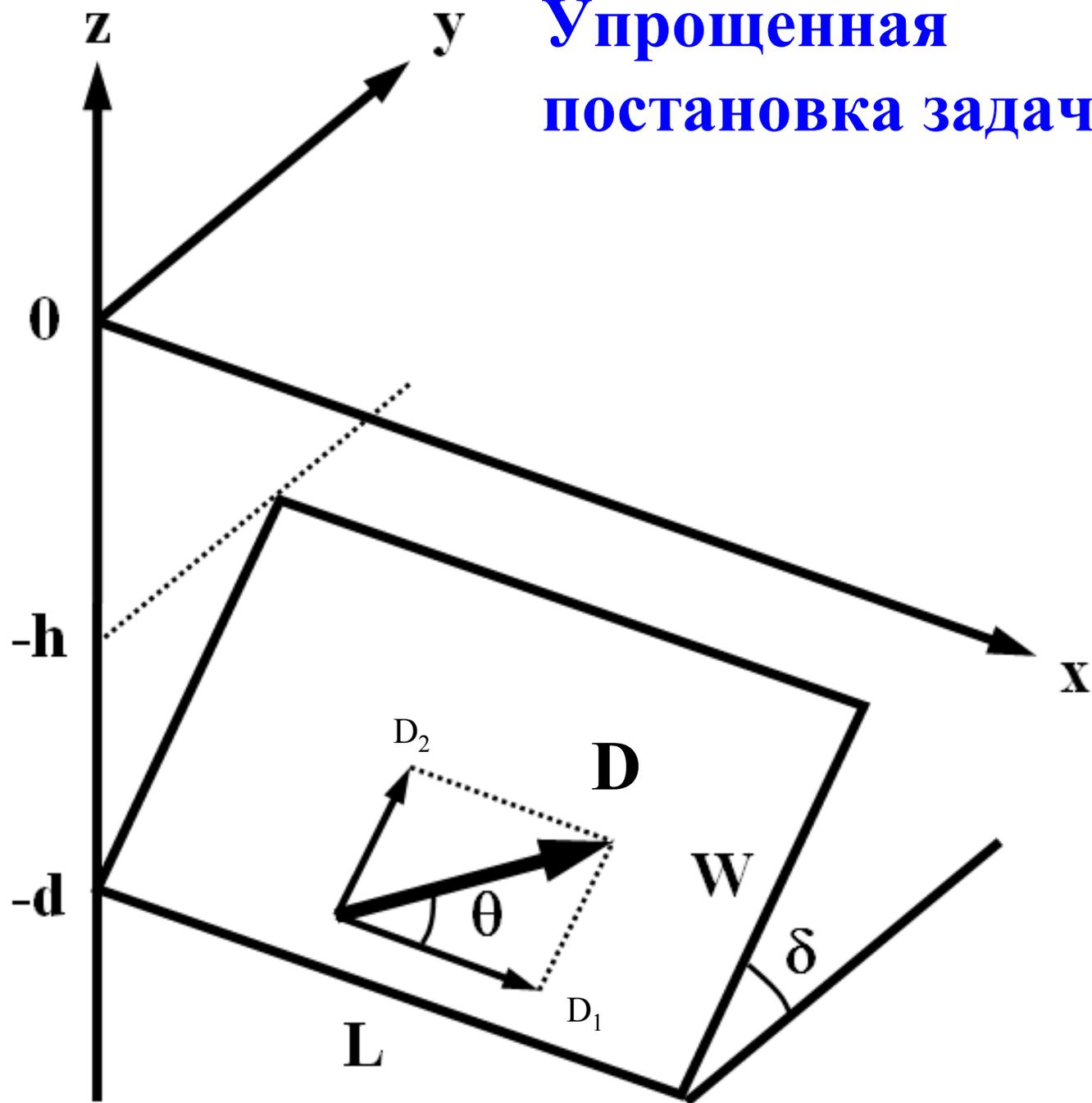
- 1. Определение времени и места землетрясения**
- 2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья**
- 3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)**
- 4. Оценка «силы цунами» по «силе землетрясения»**
- 5. Расчет цунами с учетом механизма очага, распределения подвижки и динамики вспарывания разрыва**

## Механизм очага землетрясения:

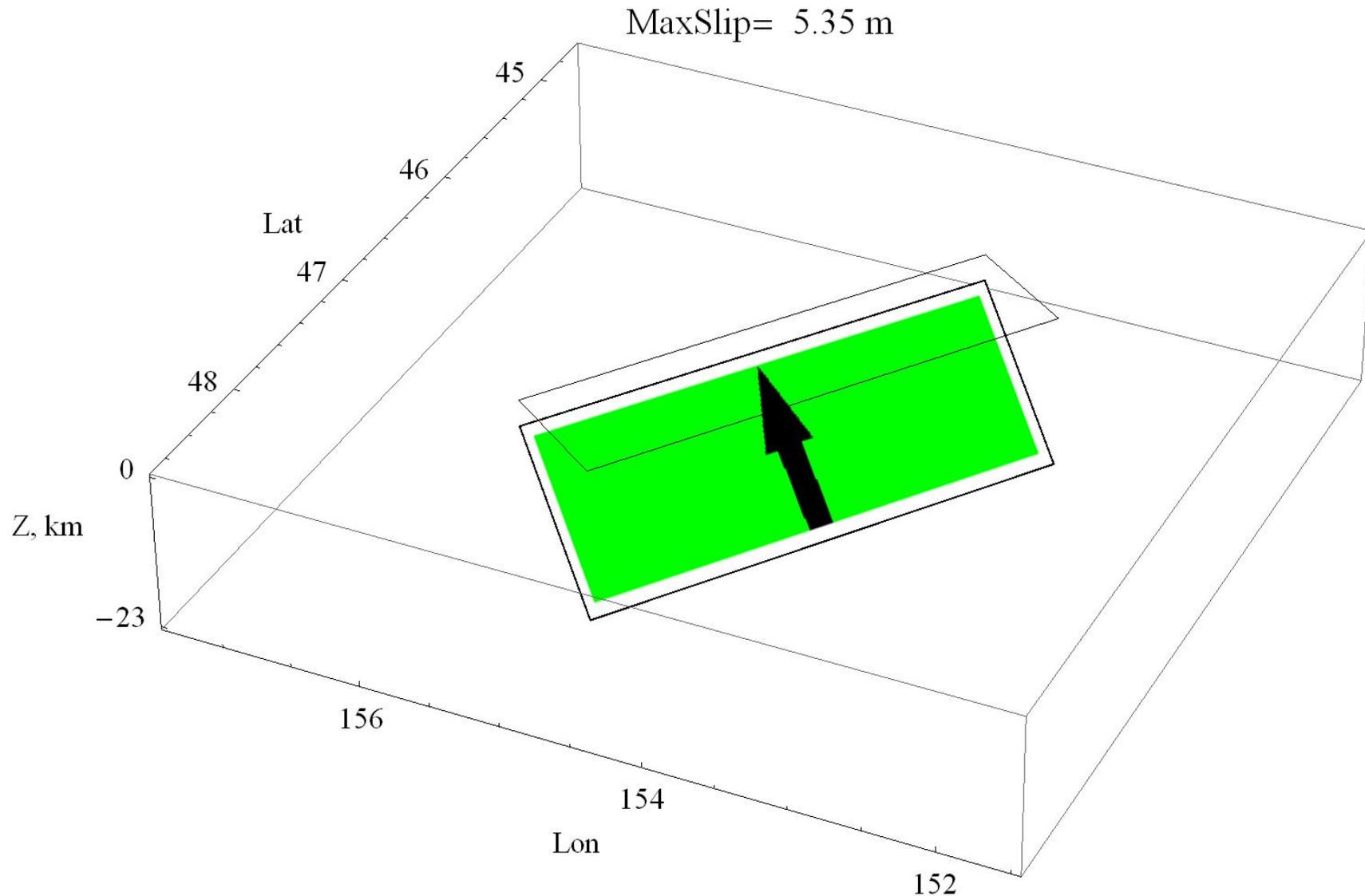
- ❑ Ориентация и глубина площадки разрыва
- ❑ Направление и длина вектора подвижки



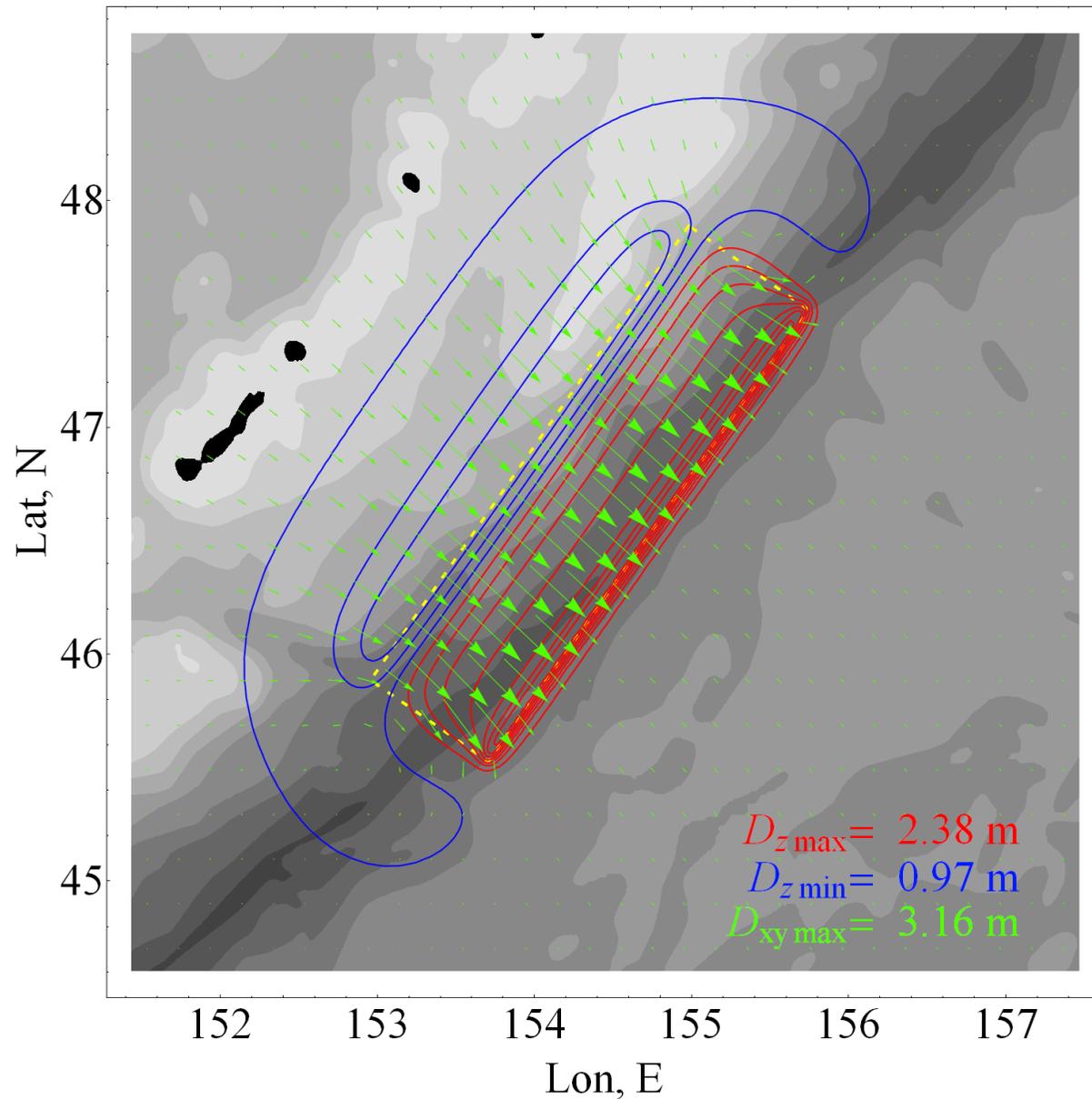
# Упрощенная постановка задачи



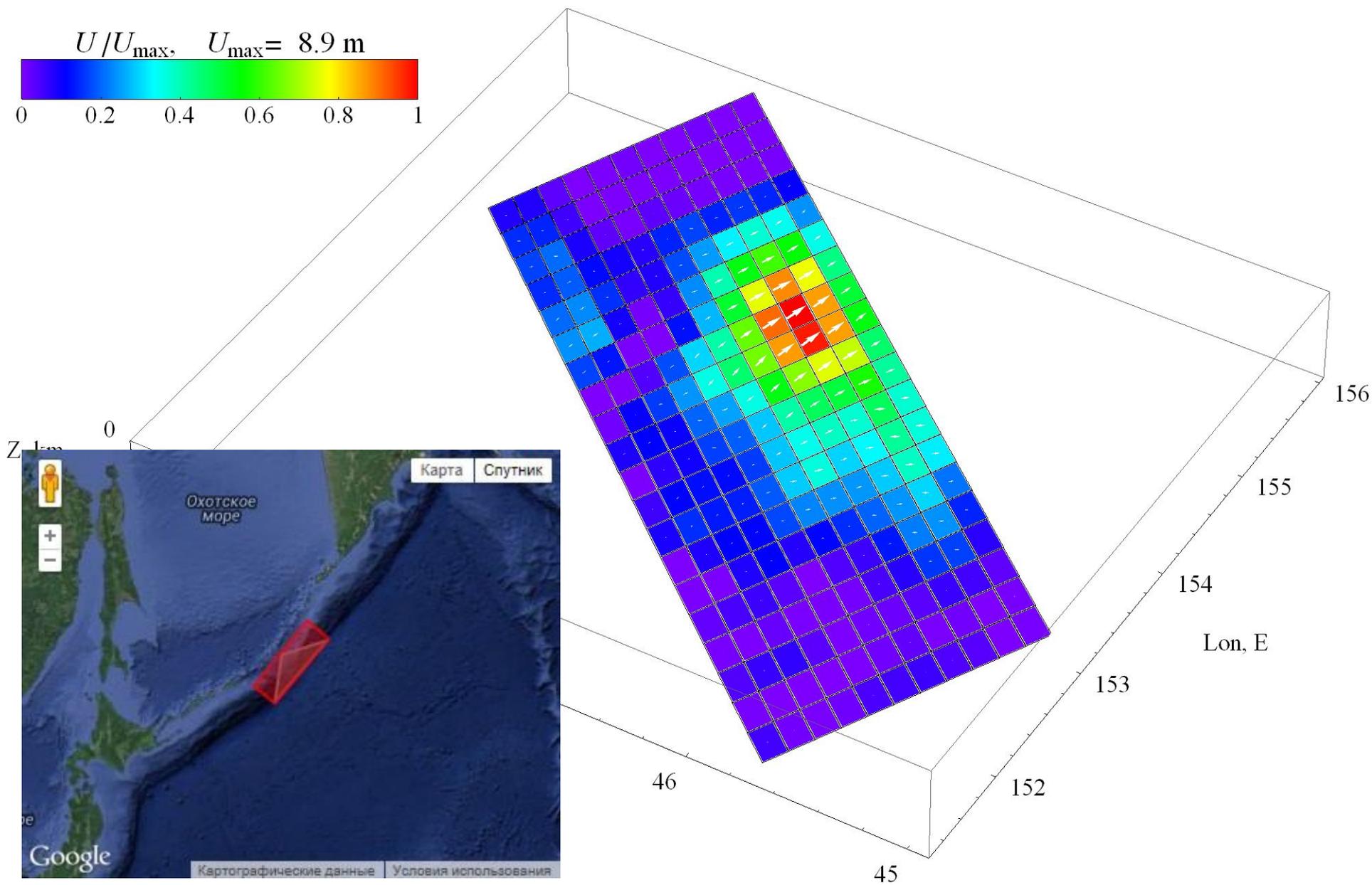
**Модельная прямоугольная площадка разрыва  
Центральные Курилы 15.11.2006  
(CMT: Rake=92, Strike=215, Dip=15, Depth=13.5 км)**



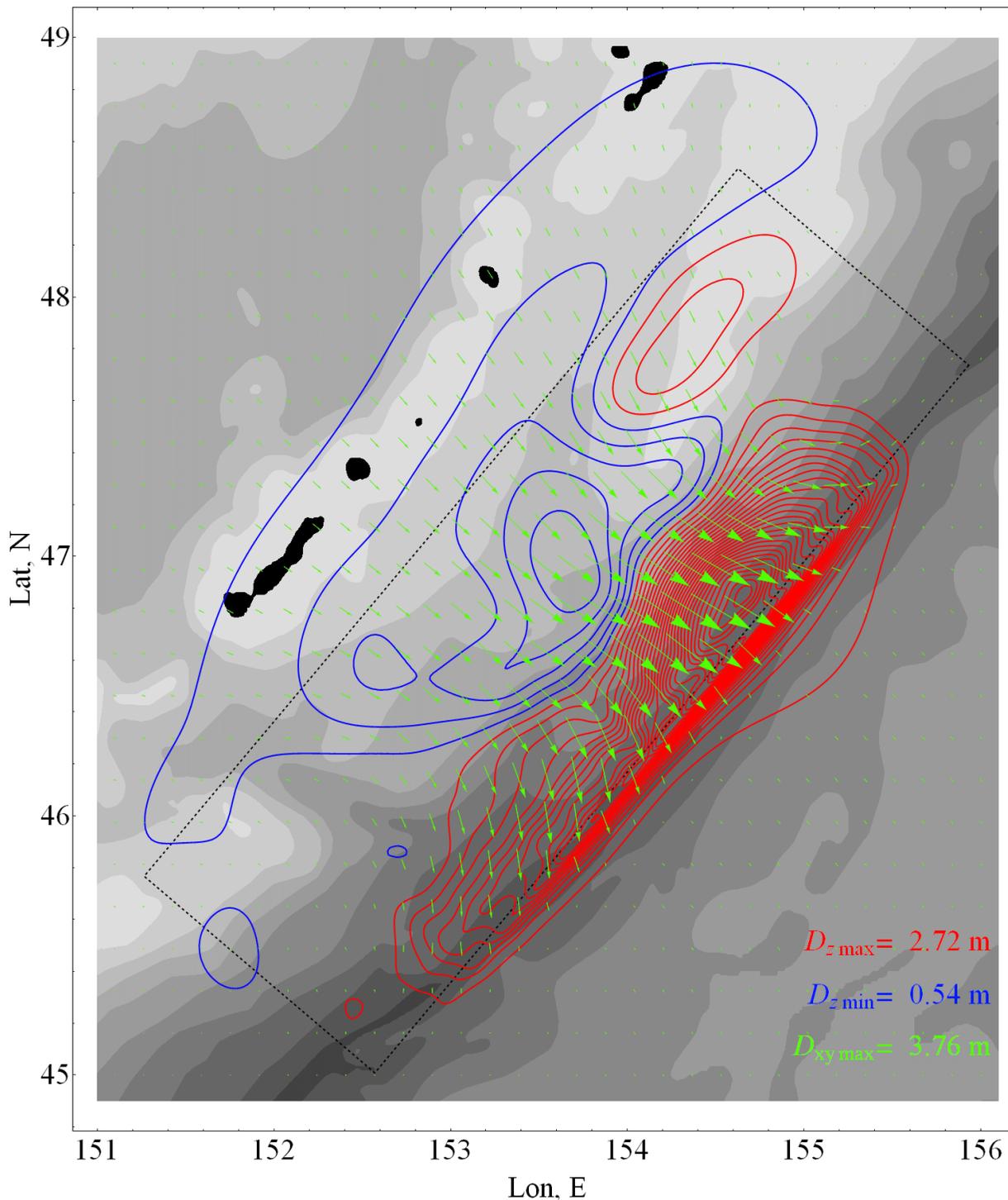
# Косейсмическая деформация дна, рассчитанная по формулам Окада

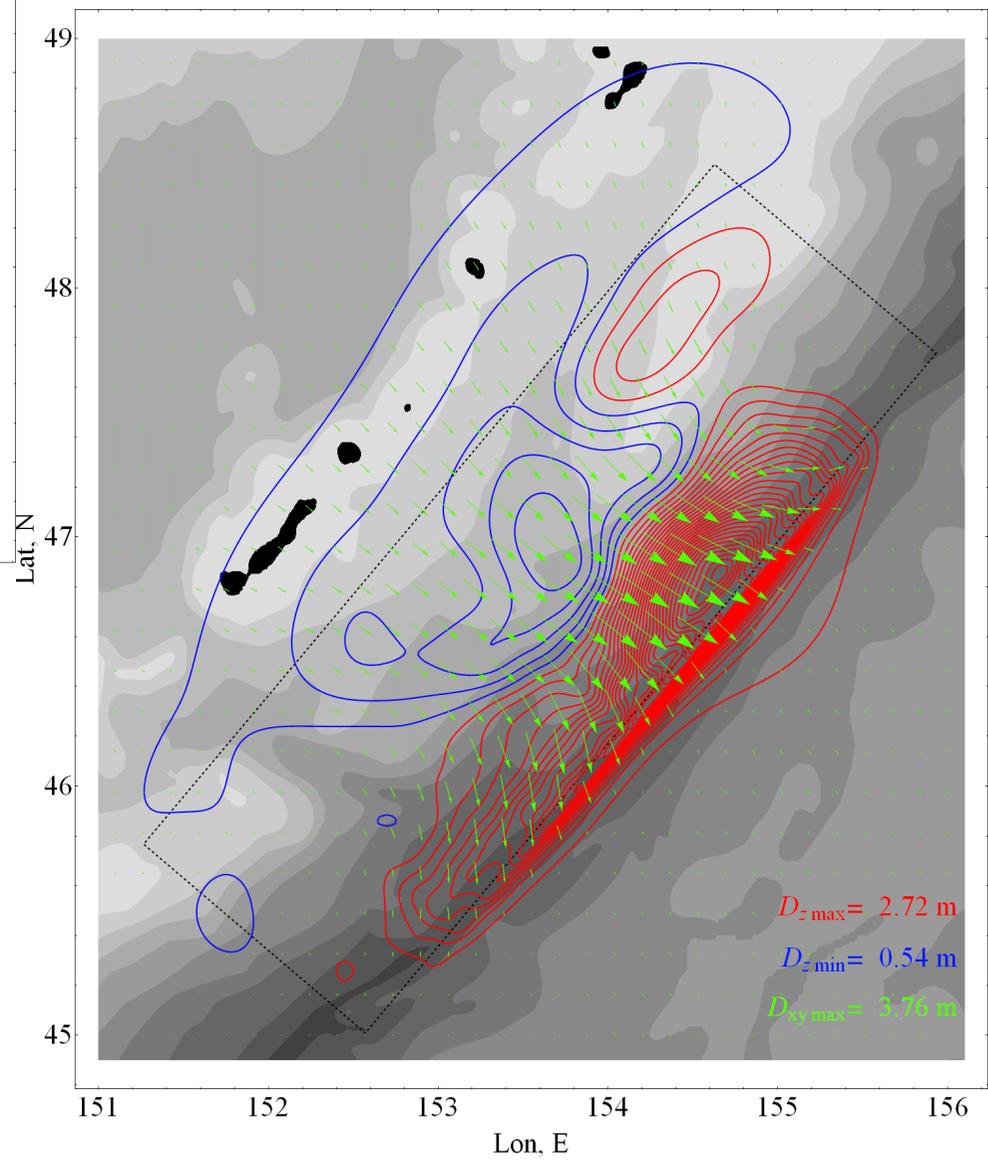
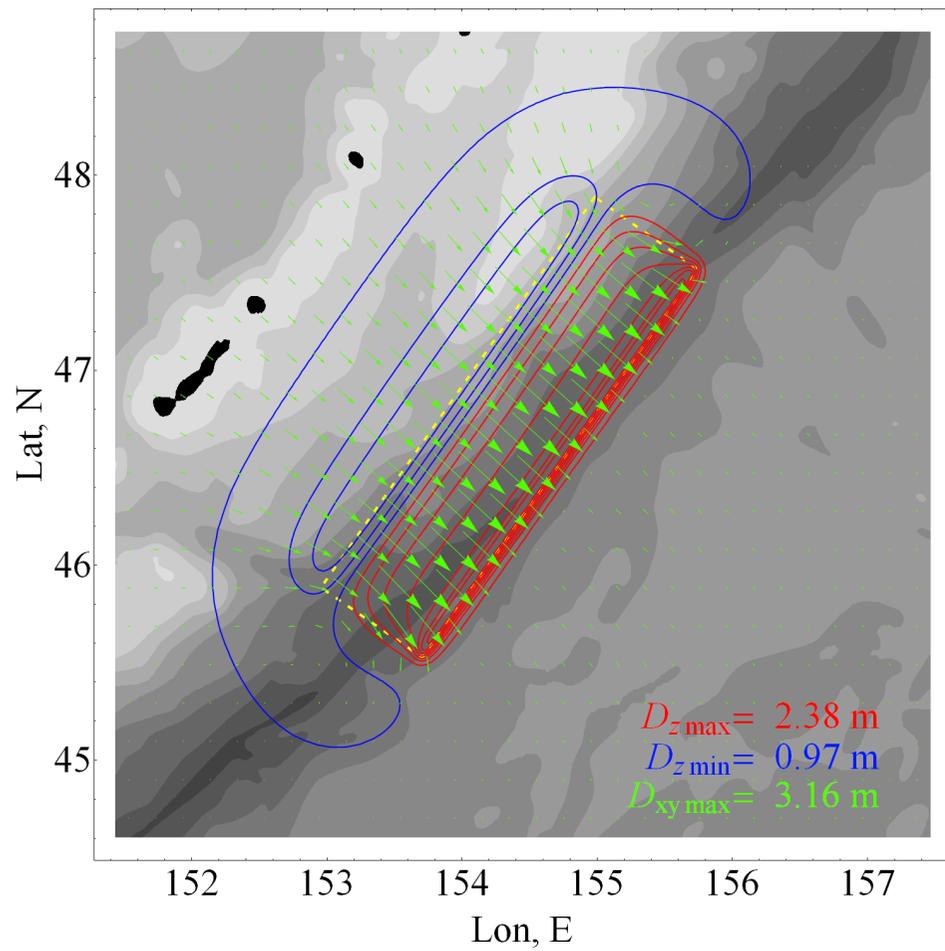


# Центральные Курилы, 15.11.2006 (Finite Fault Model)

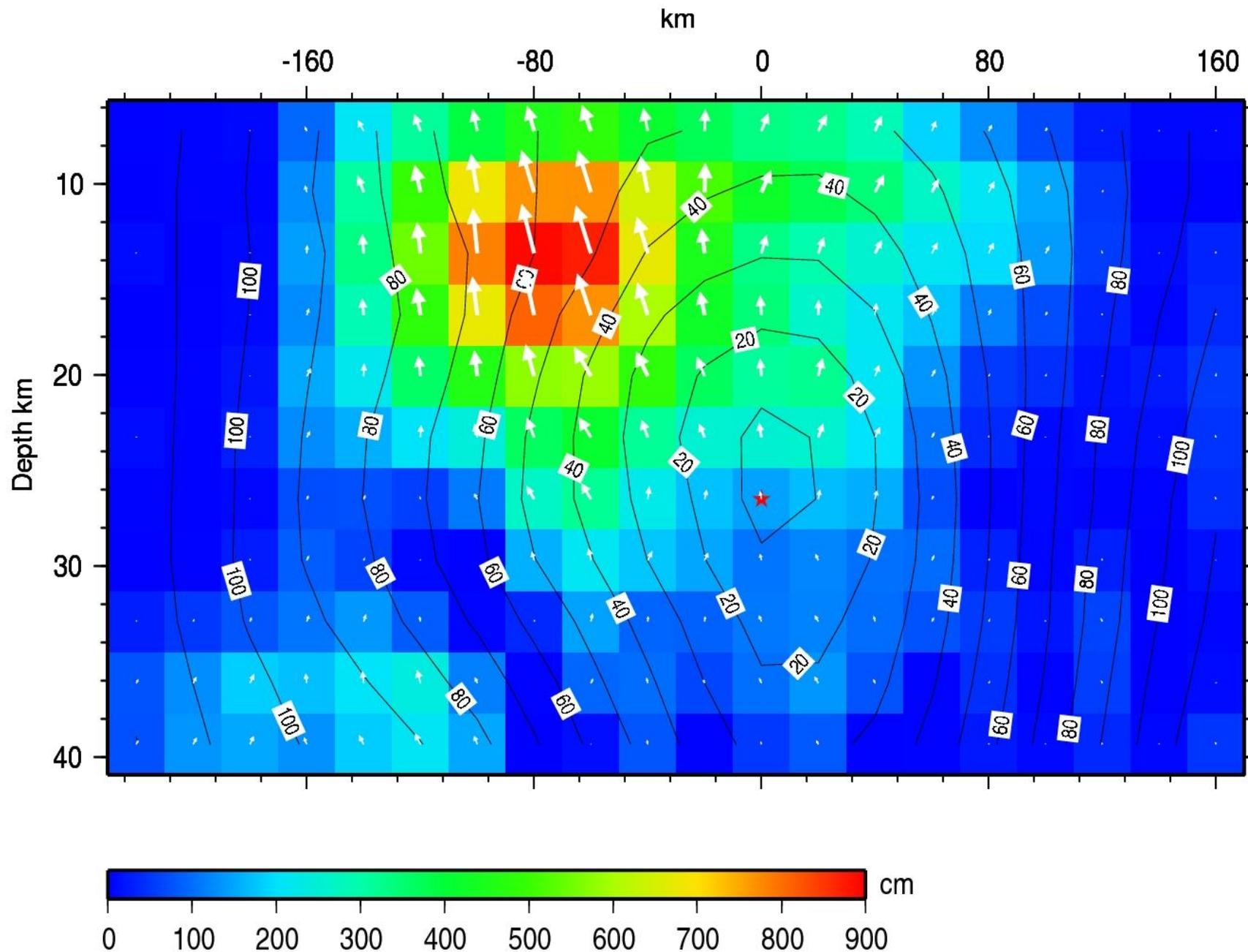


**Косейсмическая  
(остаточная)  
деформация дна  
океана в очаге  
цунами на  
Центральных  
Курилах  
15.11.2006**





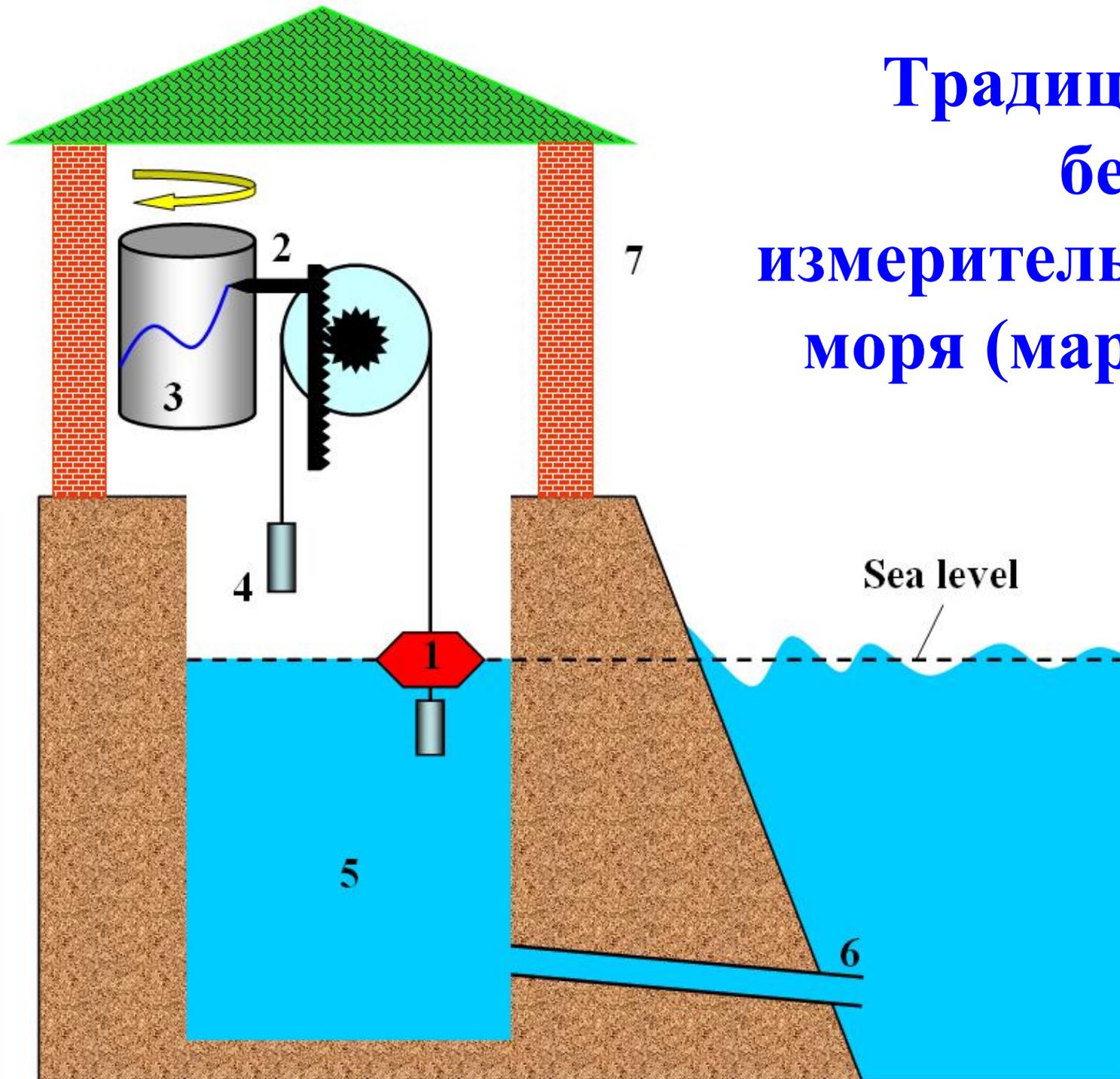
# Центральные Курилы, 15.11.2006 (Finite Fault Model)



# Этапы прогноза цунами:

1. Определение времени и места землетрясения
  2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья
  3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)
  4. Оценка «силы цунами» по сейсмическим данным
- 
- 5\*. Гидрофизический прогноз - по измерениям уровня моря

# Традиционный береговой измеритель уровня моря (мареограф)



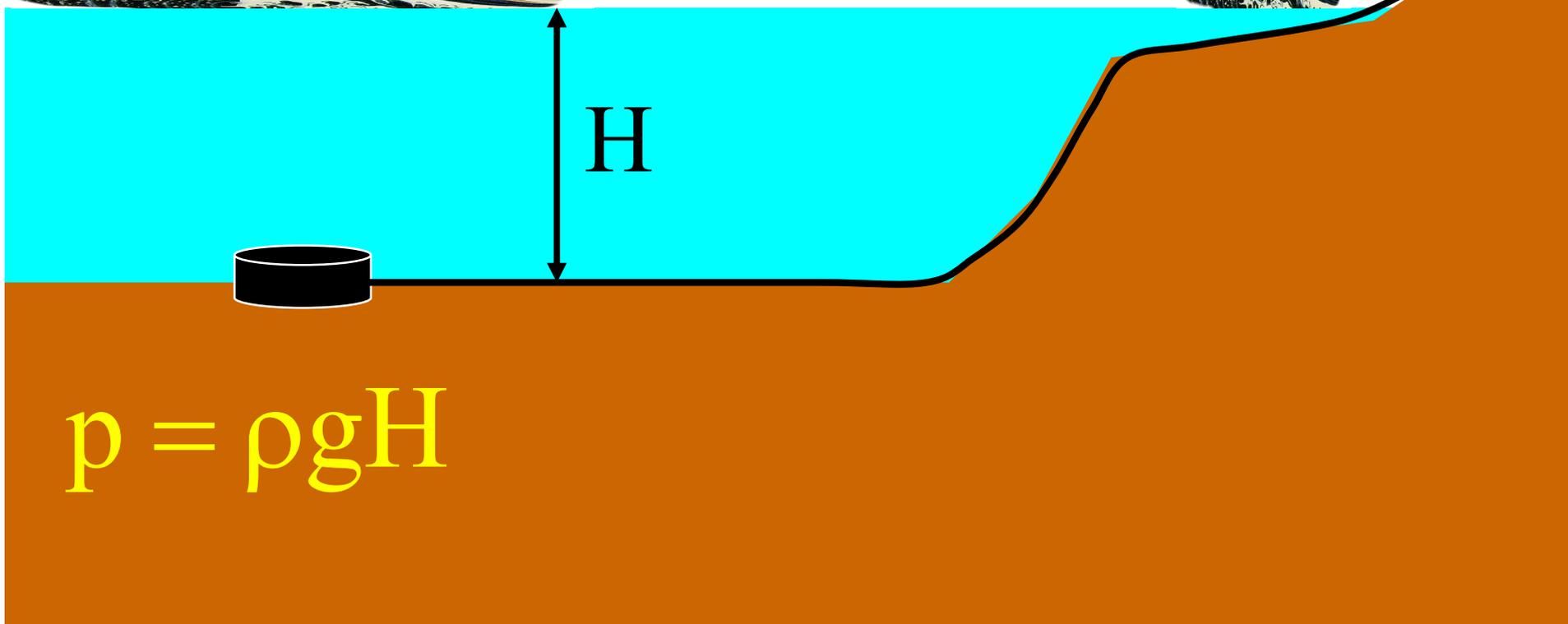
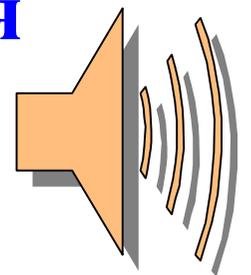
**Современные станции  
используют множество  
методов измерения  
уровня и спутниковую  
телеметрию для  
передачи данных**



Сергей  
Леонидович  
Соловьев  
(1930-1994)

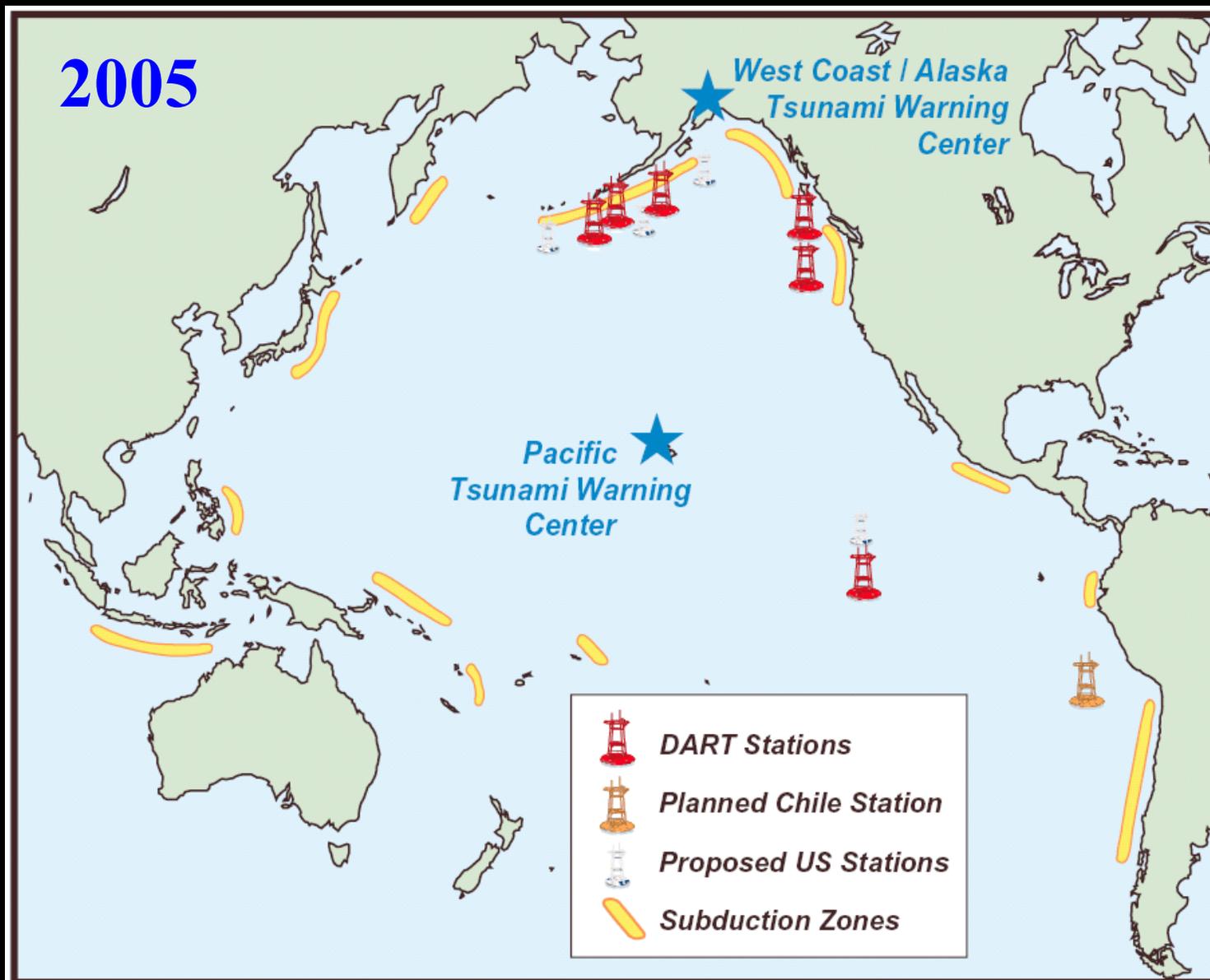


# Глубоководные измерители давления



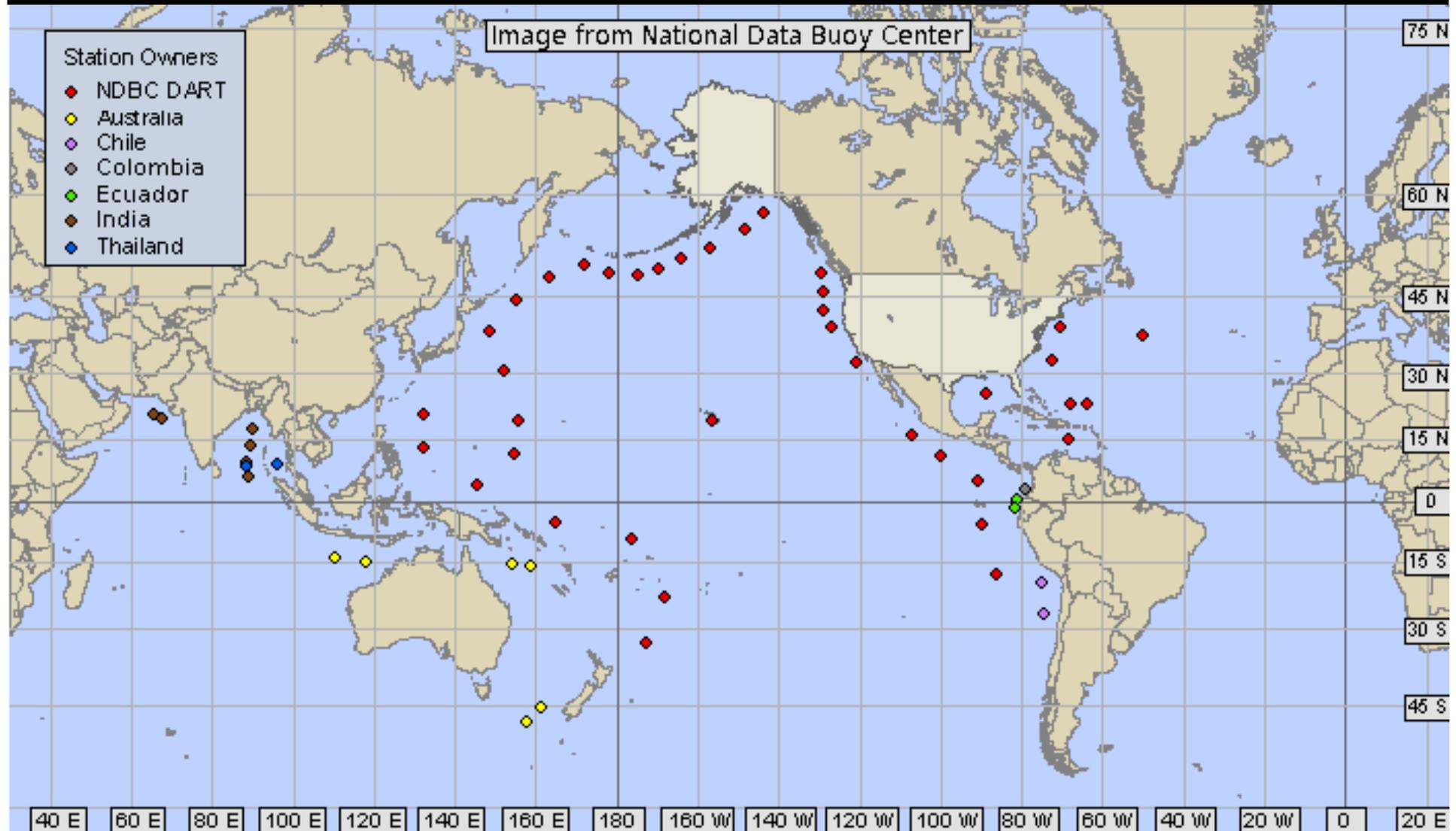
# DART 2005

## Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis

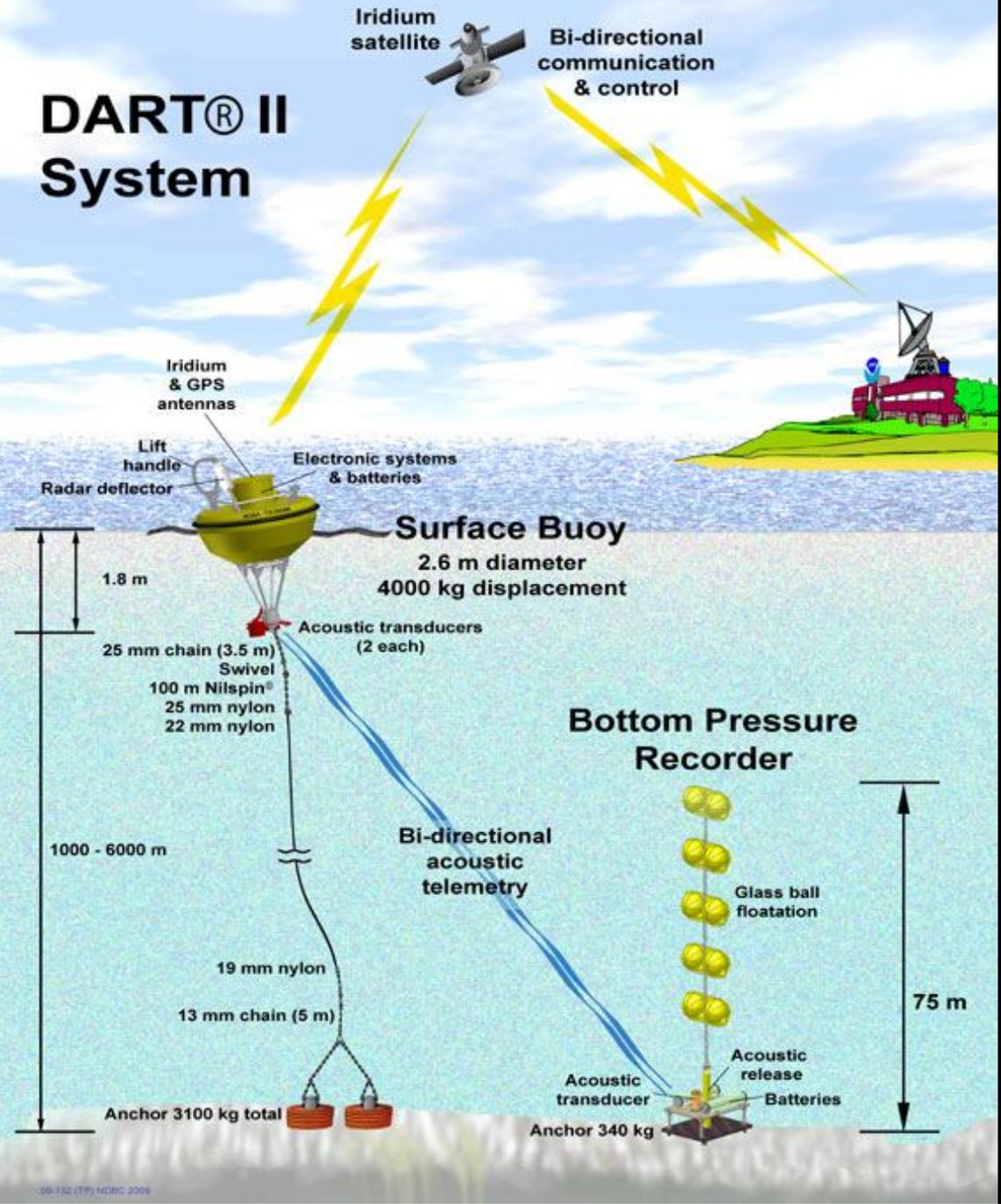


# DART 2017 (≈60)

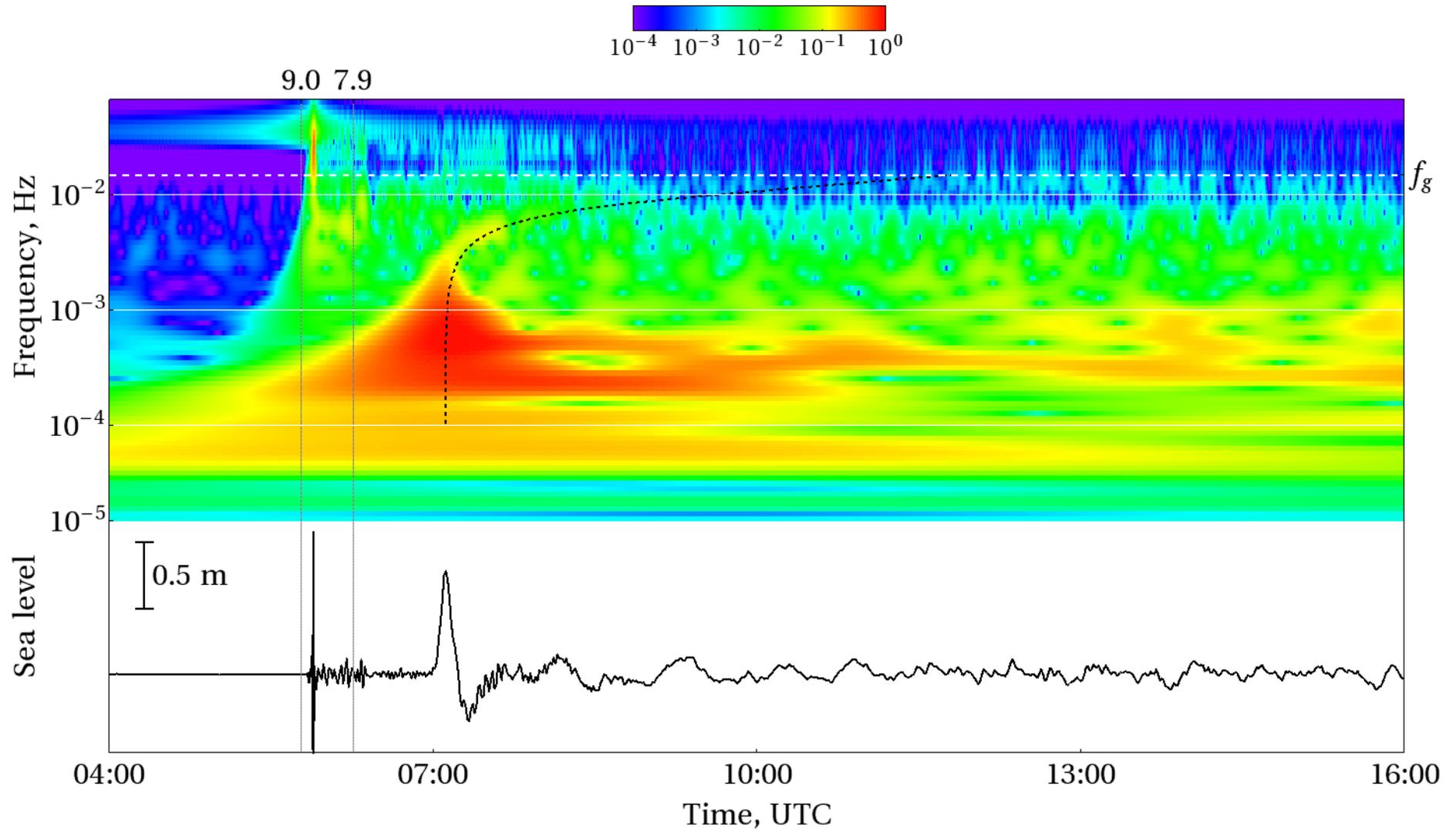
## Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis



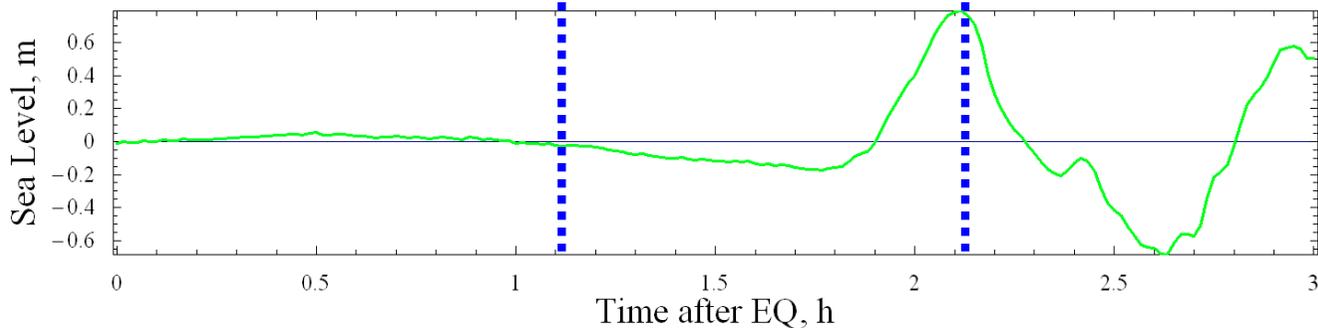
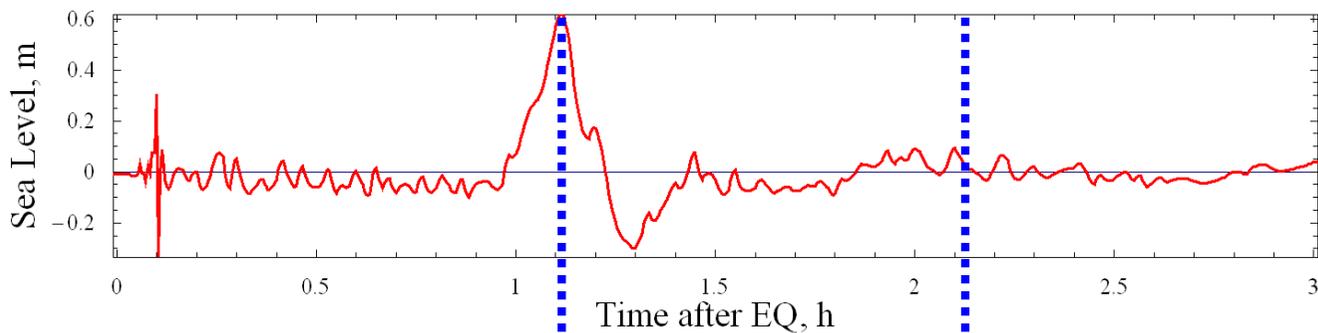
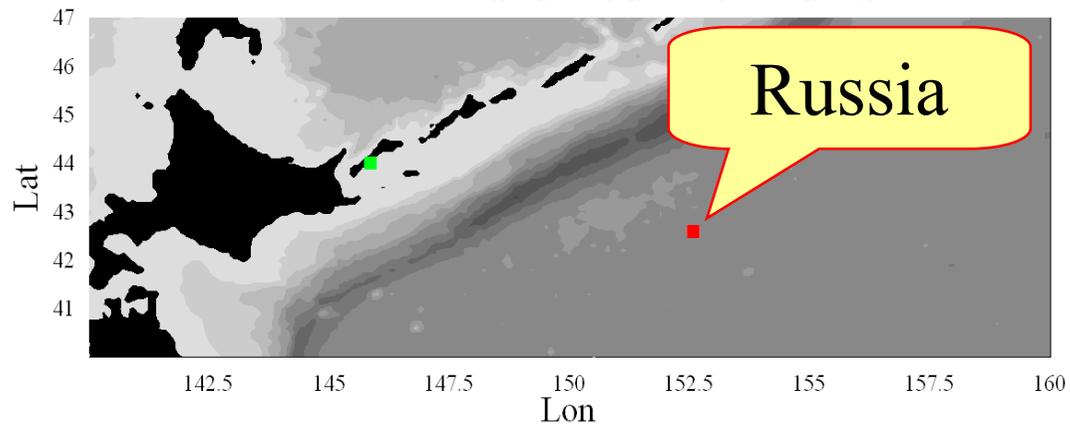
# DART® II System



# DART21413, 11.03.2011



# DART21401 and Youzhno-Kurilsk



# **Полезные ссылки:**

**Сайт кафедры физики моря и вод суши**

**<http://ocean.phys.msu.ru/>**

**В разделе «Учеба» см.курс «Физика цунами»**

**Автоматизированная система оценки  
цунамиопасности землетрясений**

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