

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

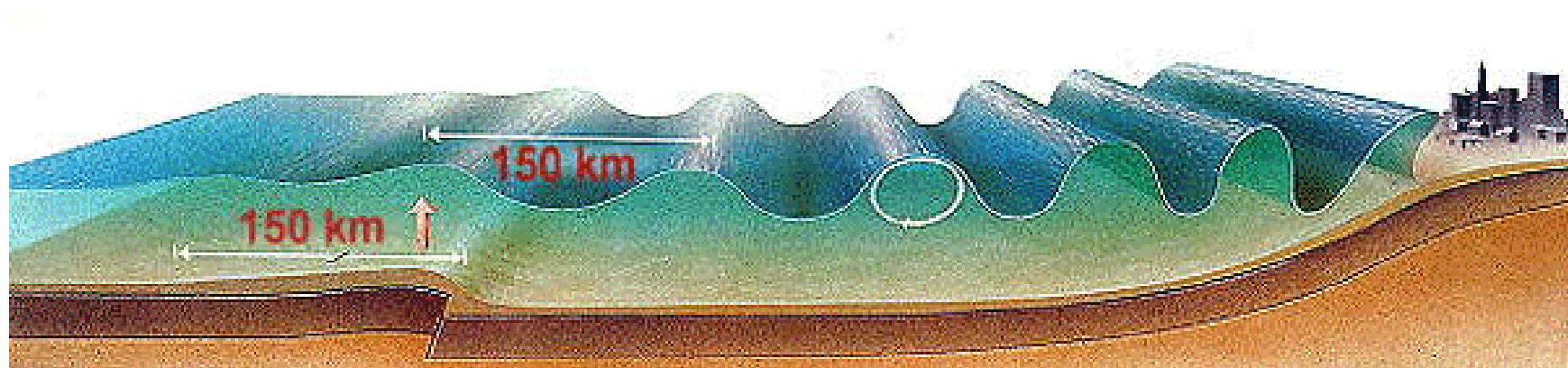
Katsushika Hokusai (1830)
«The Great Wave of Kanagawa»



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

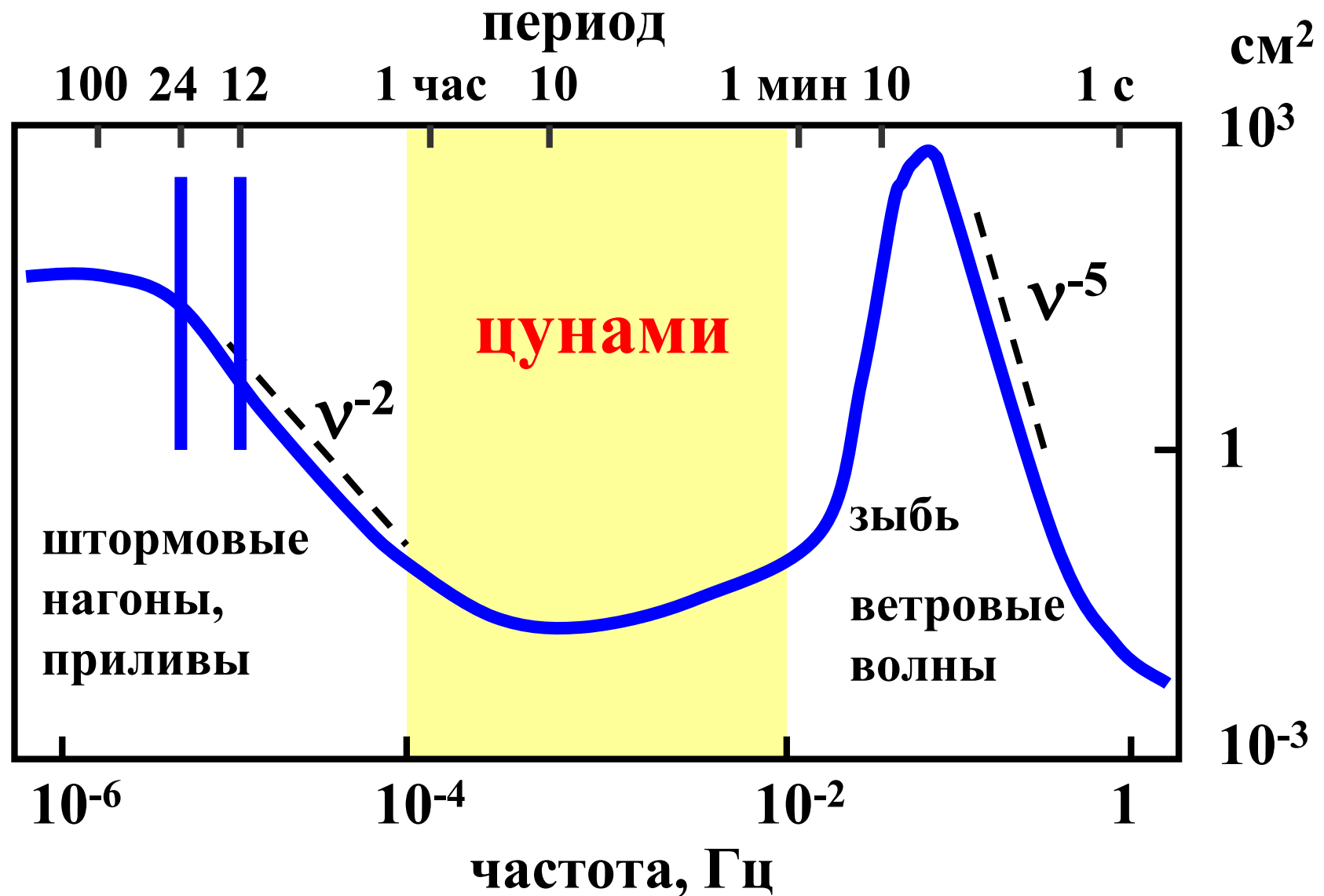


Photo credit: Bishop Museum

***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

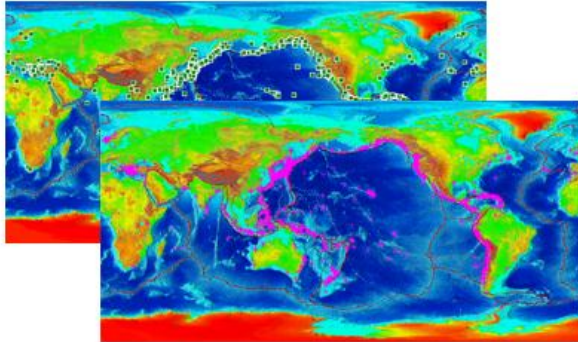


**Цунами – серия низкочастотных
гравитационных поверхностных
волн, вызванных мощным
воздействием на водный слой**

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.

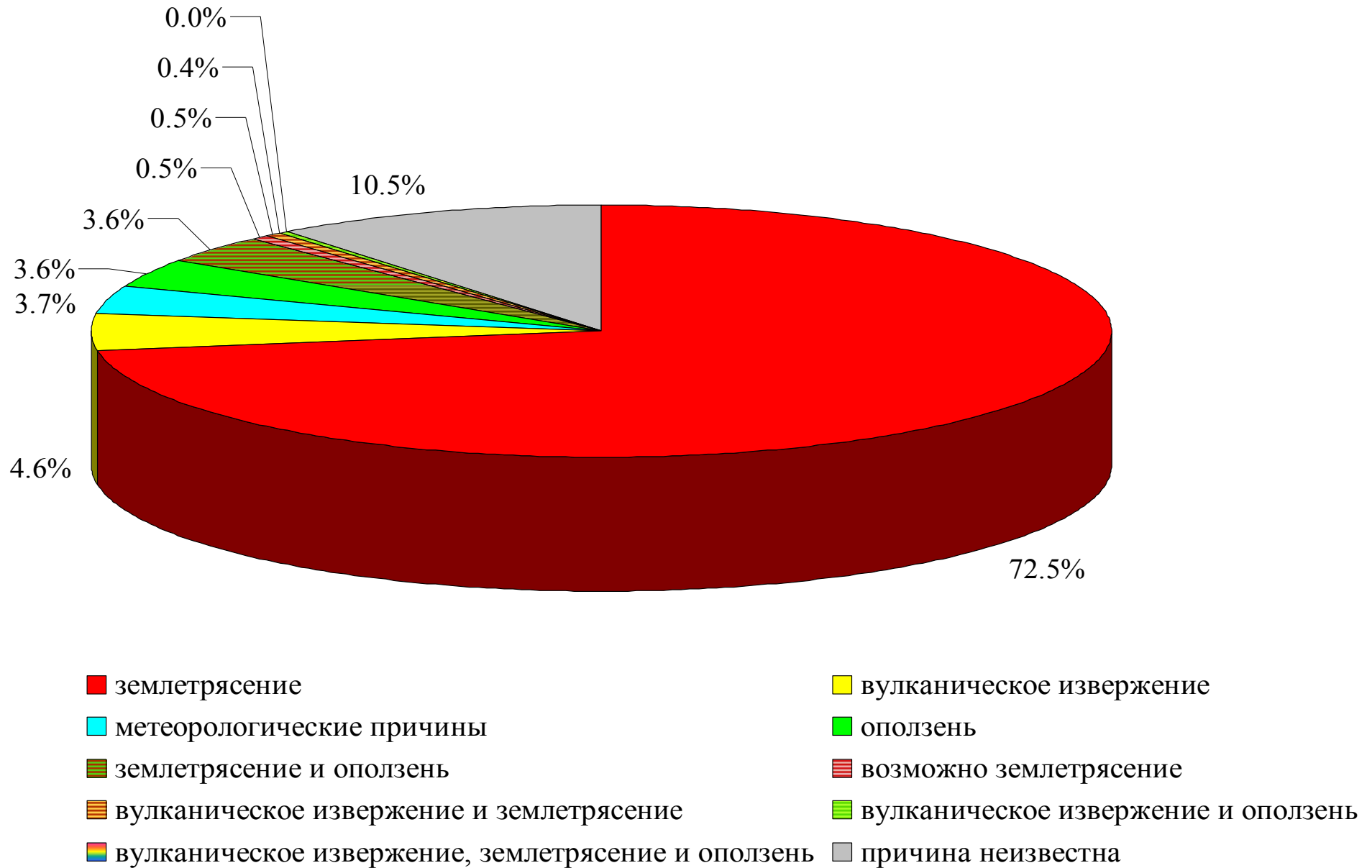
Data include: arrival date and time, travel time, maximum water heights, horizontal inundation distances, deaths, injuries, and damage for specific locations.

- [Advanced Tsunami Runup Search](#)

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

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

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 добегания]; 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

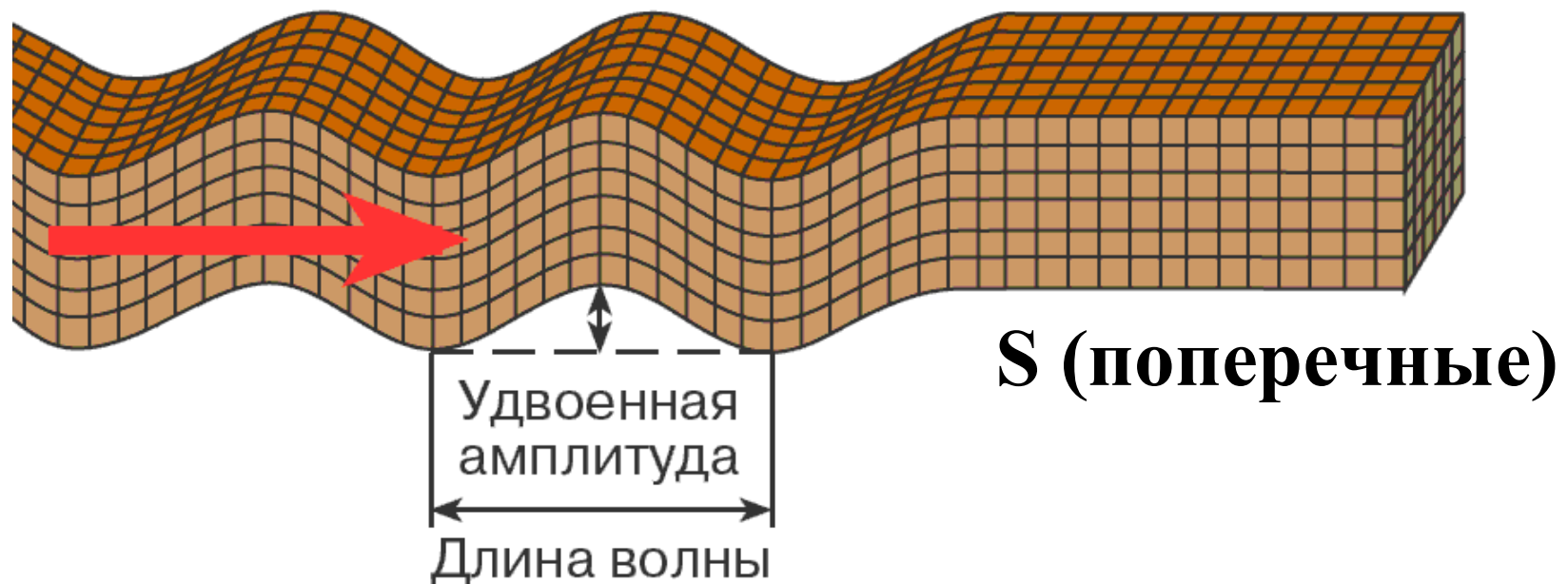
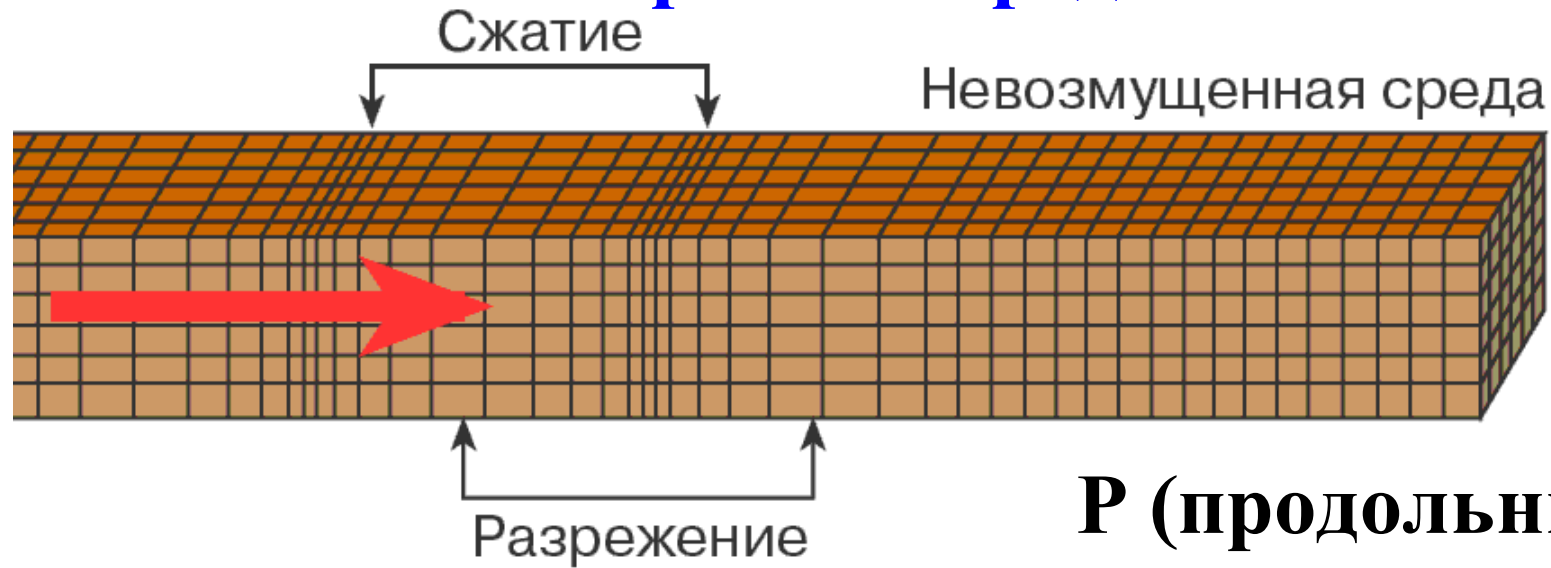
дата	источник	Mw	высота волн на Гавайях, м
11.11.1922	Чили	8.7	2.1
03.02.1923	Камчатка	8.4	6.1
02.03.1933	Санрику	8.4	3.3

ущерб 1.5 млн. USD, 1 погибший

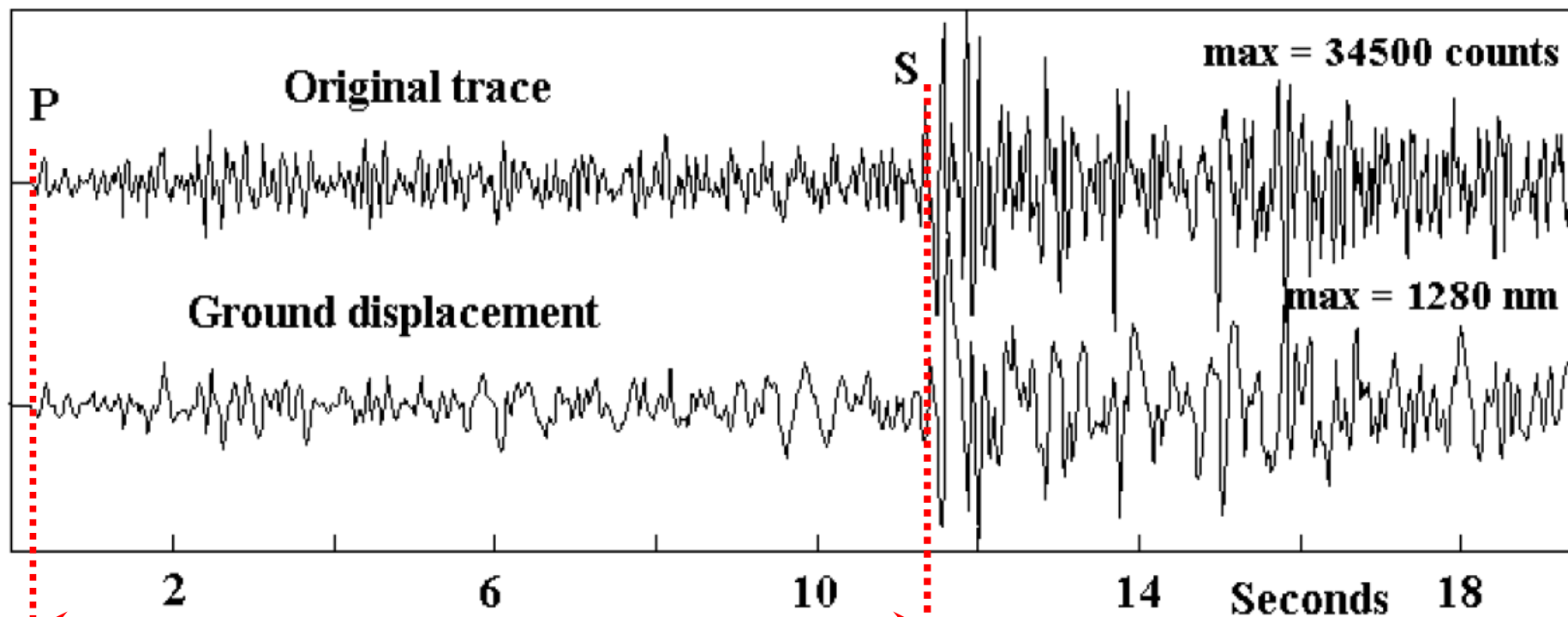


Thomas Jaggar
1871 – 1953
Founder Hawaiian
Volcano Observatory

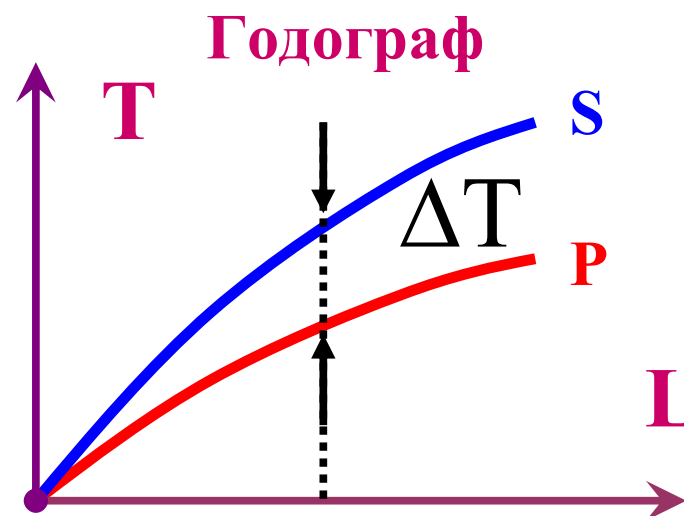
Типы упругих волн в безграничной однородной и изотропной среде



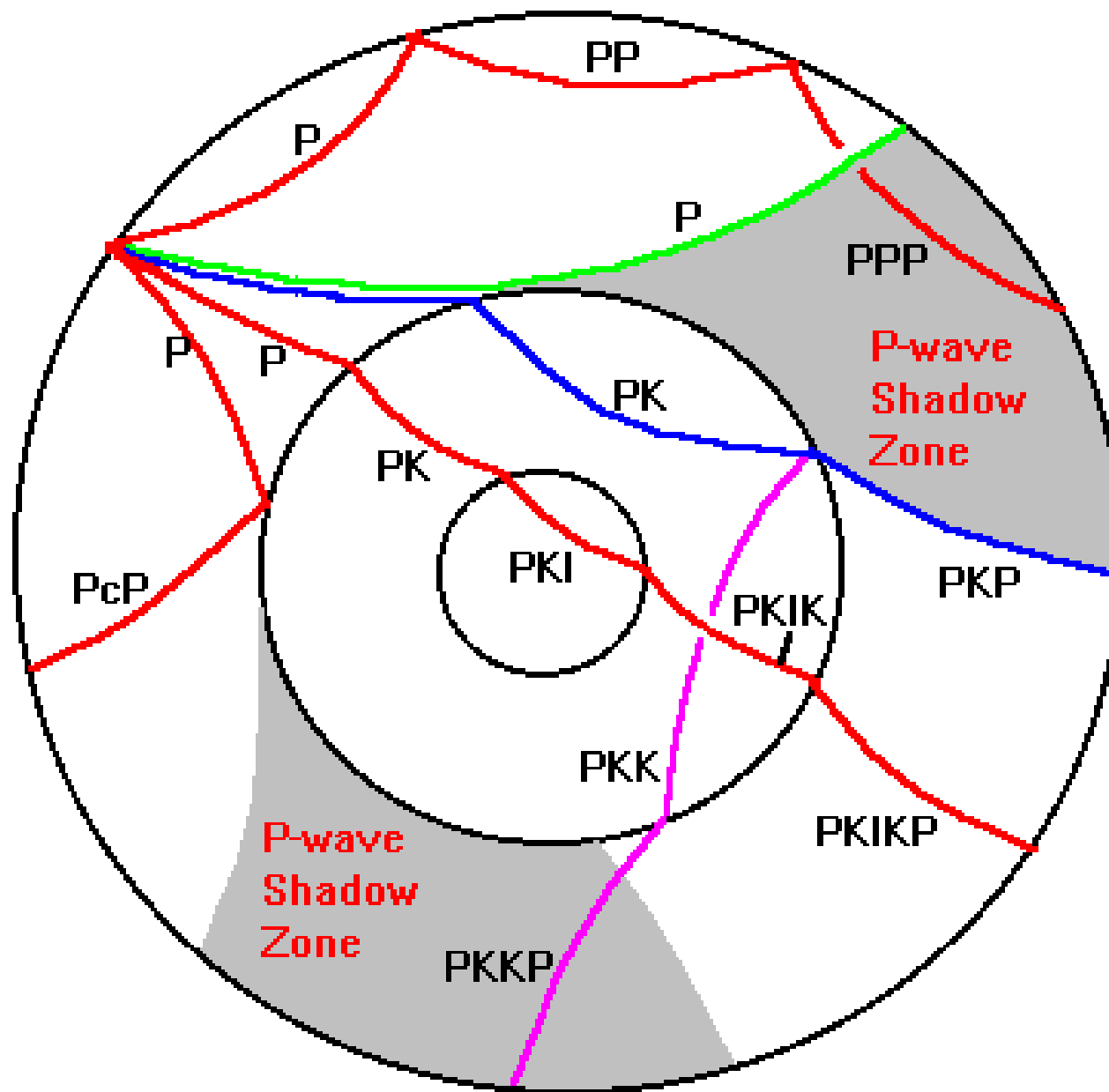
Пример сейсмограммы (120 км, M=3)



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



Сейсмические волны (лучи) внутри Земли



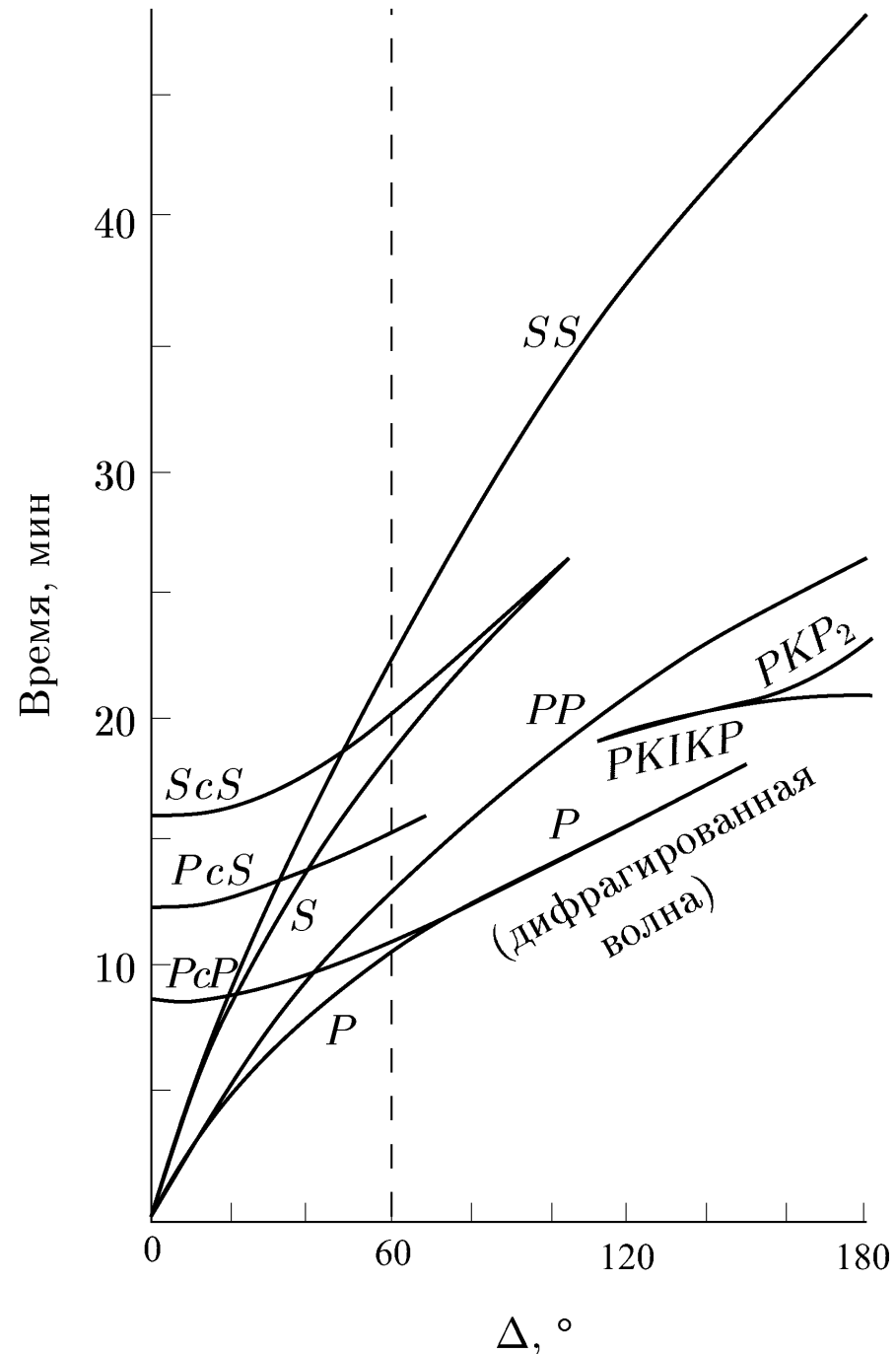
Годографы

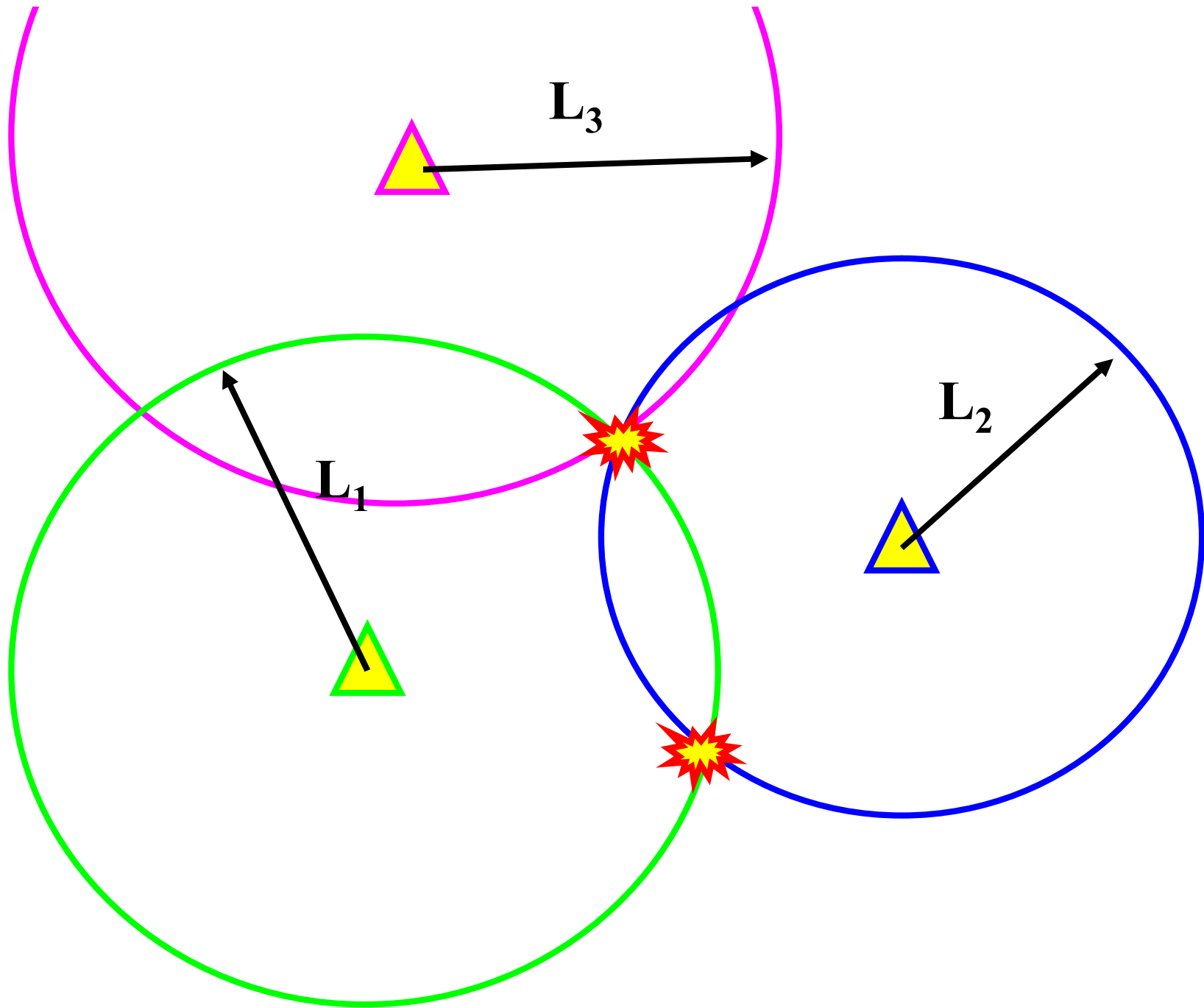
с – отражение от внешнего ядра

К – прохождение через внешнее ядро

і – отражение вверх от внутреннего ядра

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





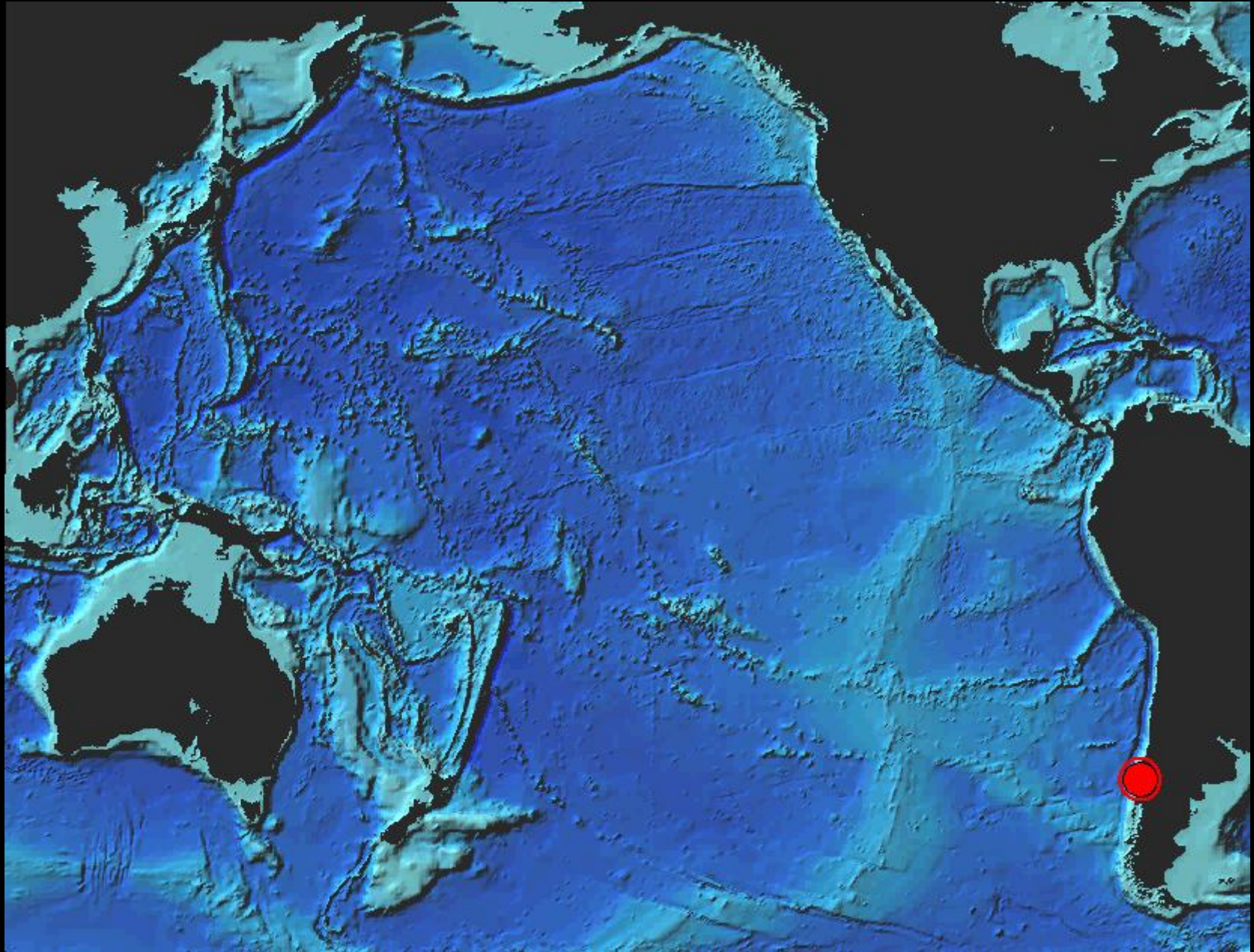
Этапы прогноза цунами:

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:

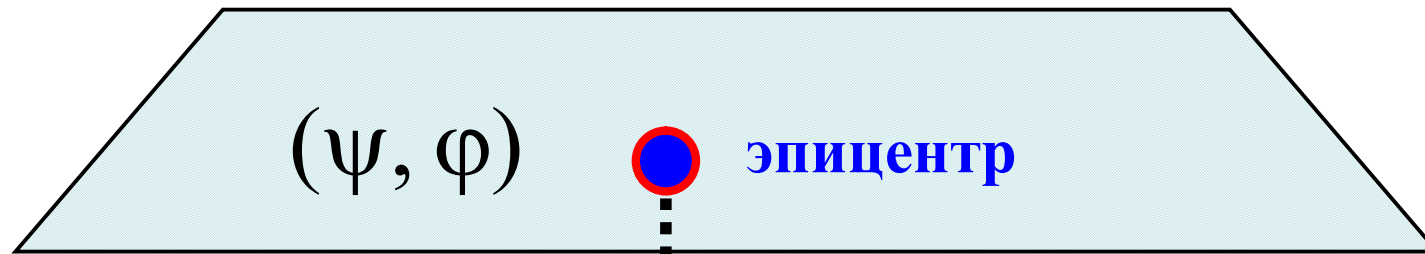
- 1. Определение времени и места землетрясения**
- 2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья**
- 3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)**

Очаг землетрясения. Основные понятия

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

сейсмический момент

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



\vec{D}

$S = LW$

(ψ, φ, h)

гипоцентр (фокус)

моментная магнитуда

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

Этапы прогноза цунами:

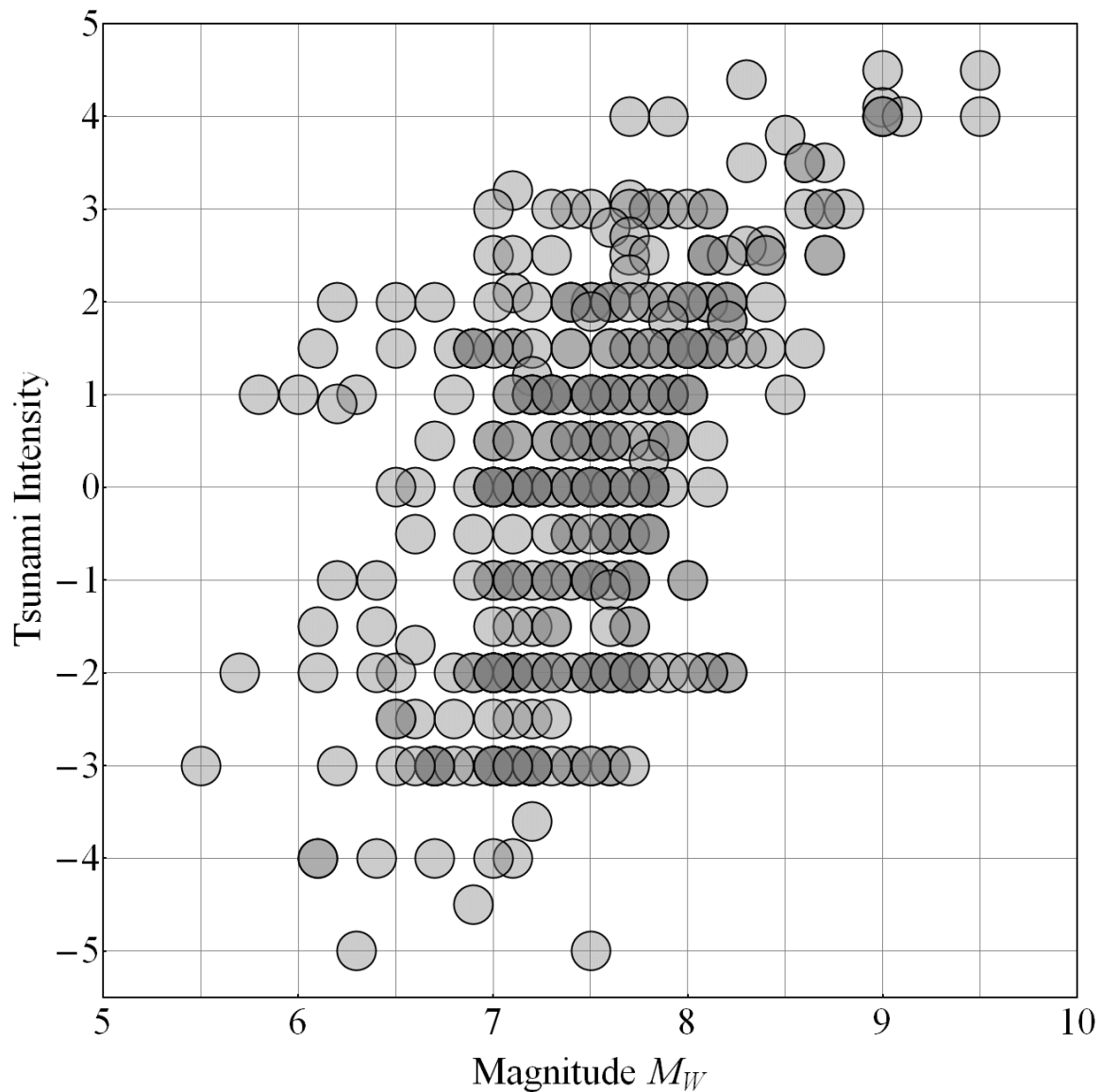
1. Определение времени и места землетрясения
2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья
3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)
4. Оценка «силы цунами» по «силе землетрясения»

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

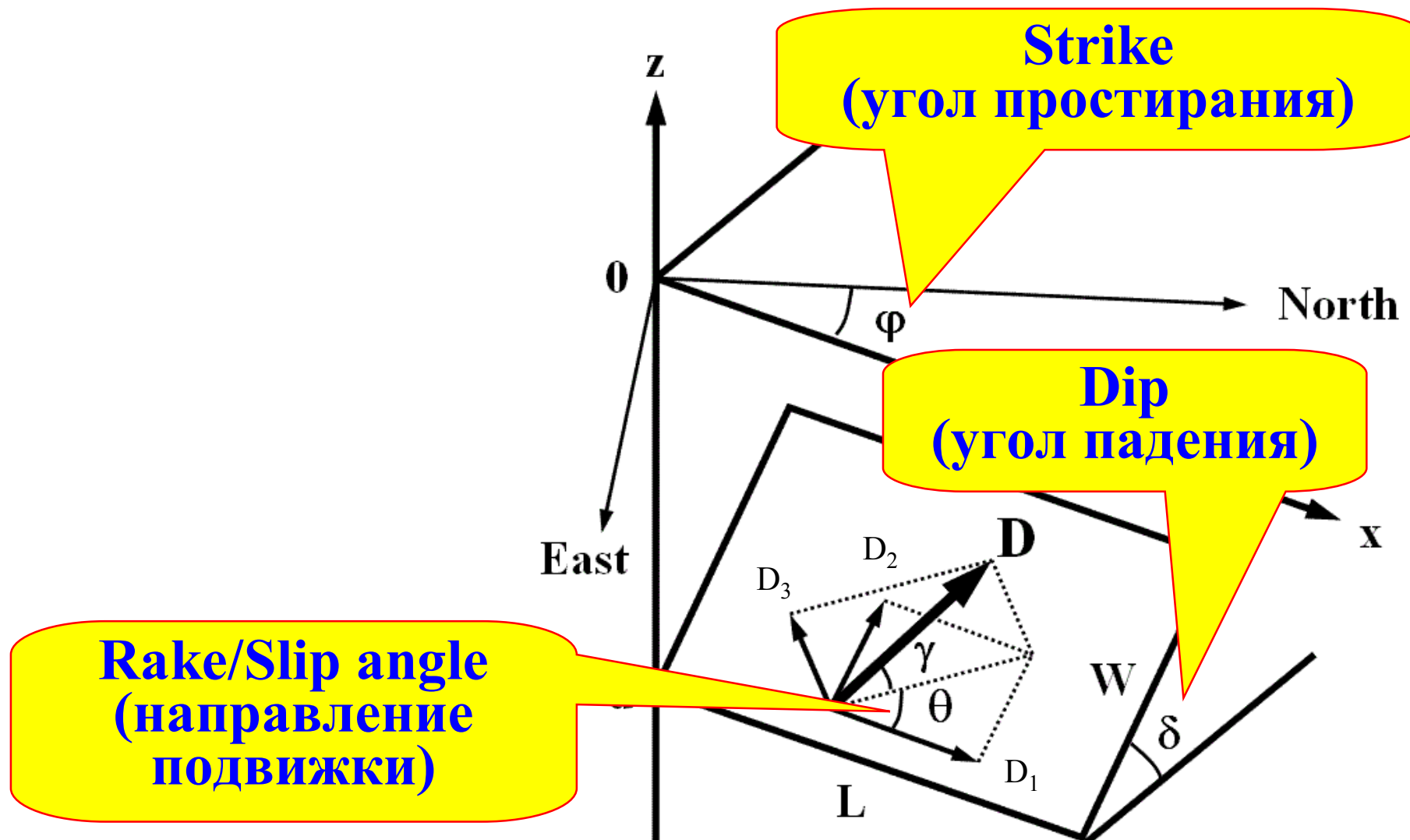


Этапы прогноза цунами:

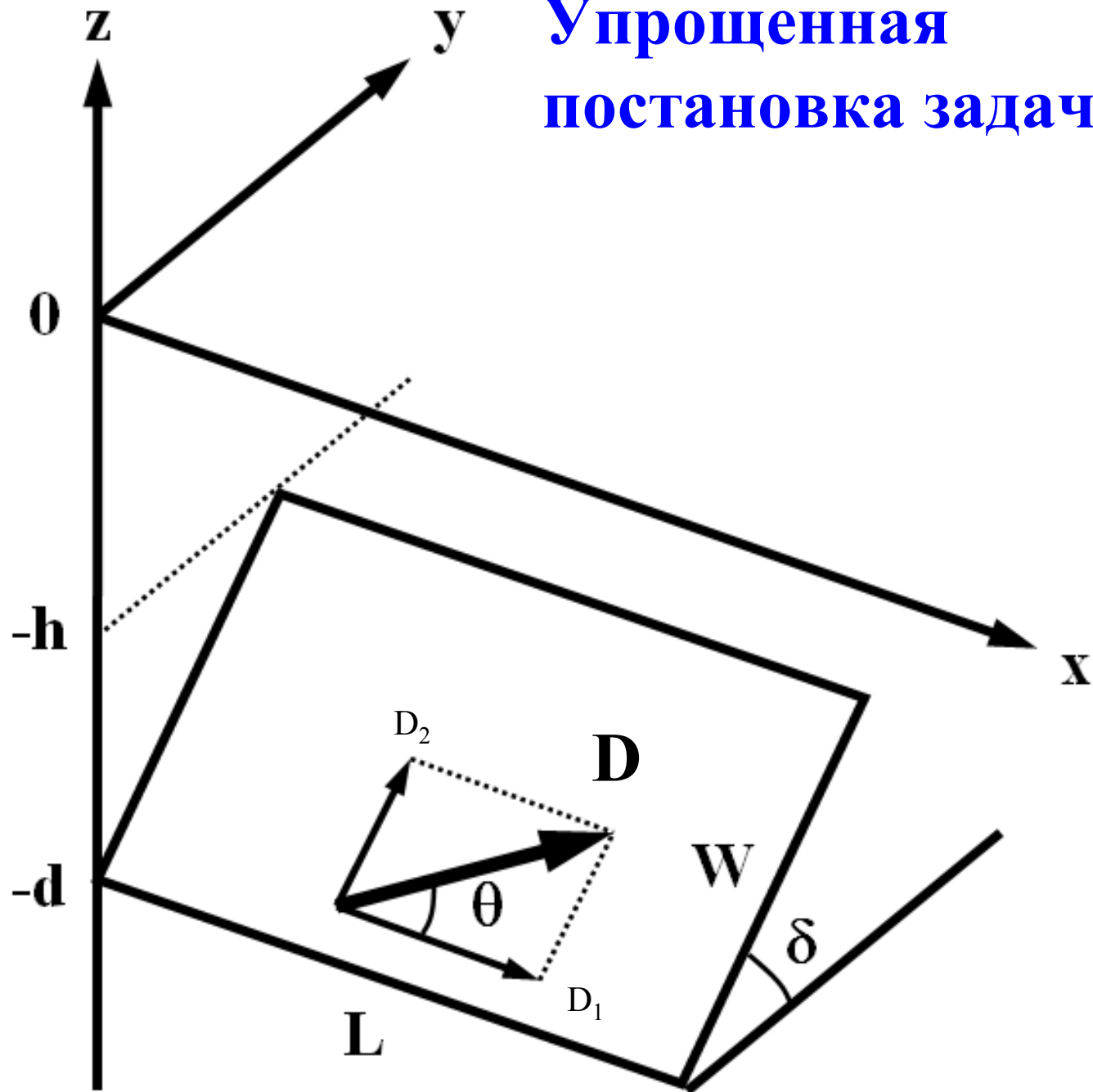
- 1. Определение времени и места землетрясения**
- 2. Определение времени добегания волны цунами до защищаемой точки побережья**
- 3. Определение «силы землетрясения» (магнитуды)**
- 4. Оценка «силы цунами» по «силе землетрясения»**
- 5. Расчет цунами с учетом механизма очага, распределения подвижки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

Механизм очага землетрясения:

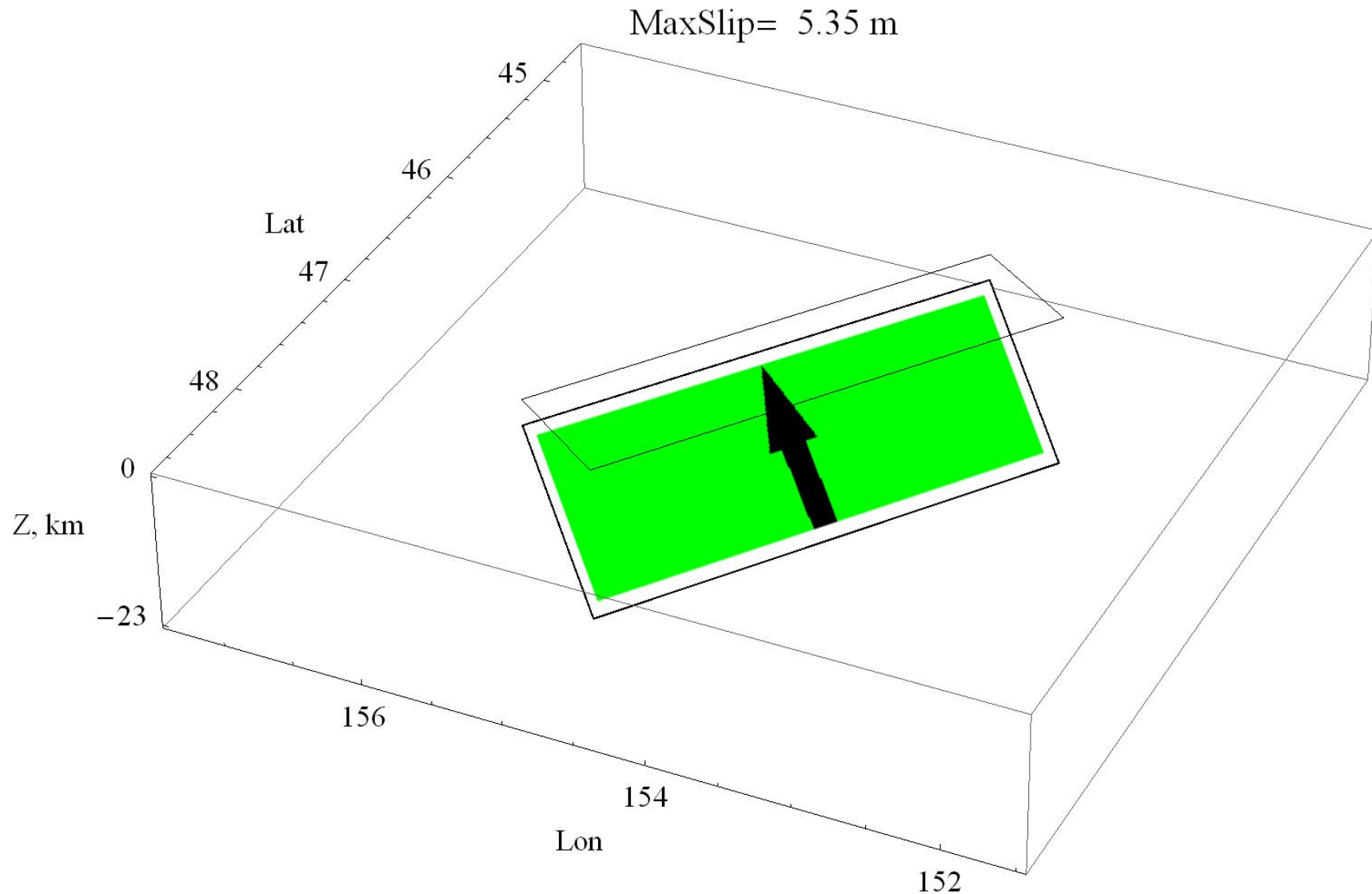
- ❑ Ориентация и глубина площадки разрыва
- ❑ Направление и длина вектора подвижки



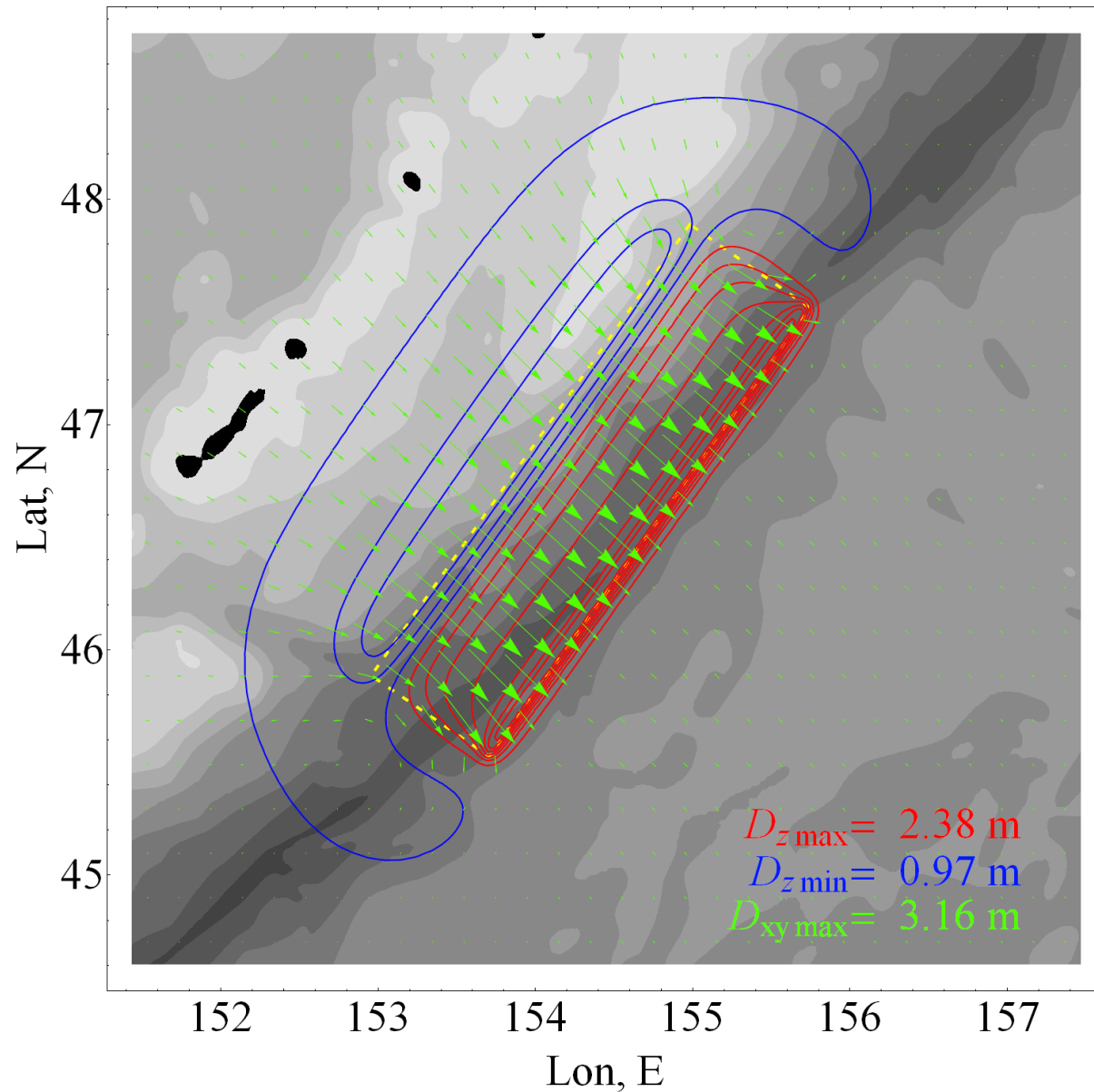
Упрощенная постановка задачи



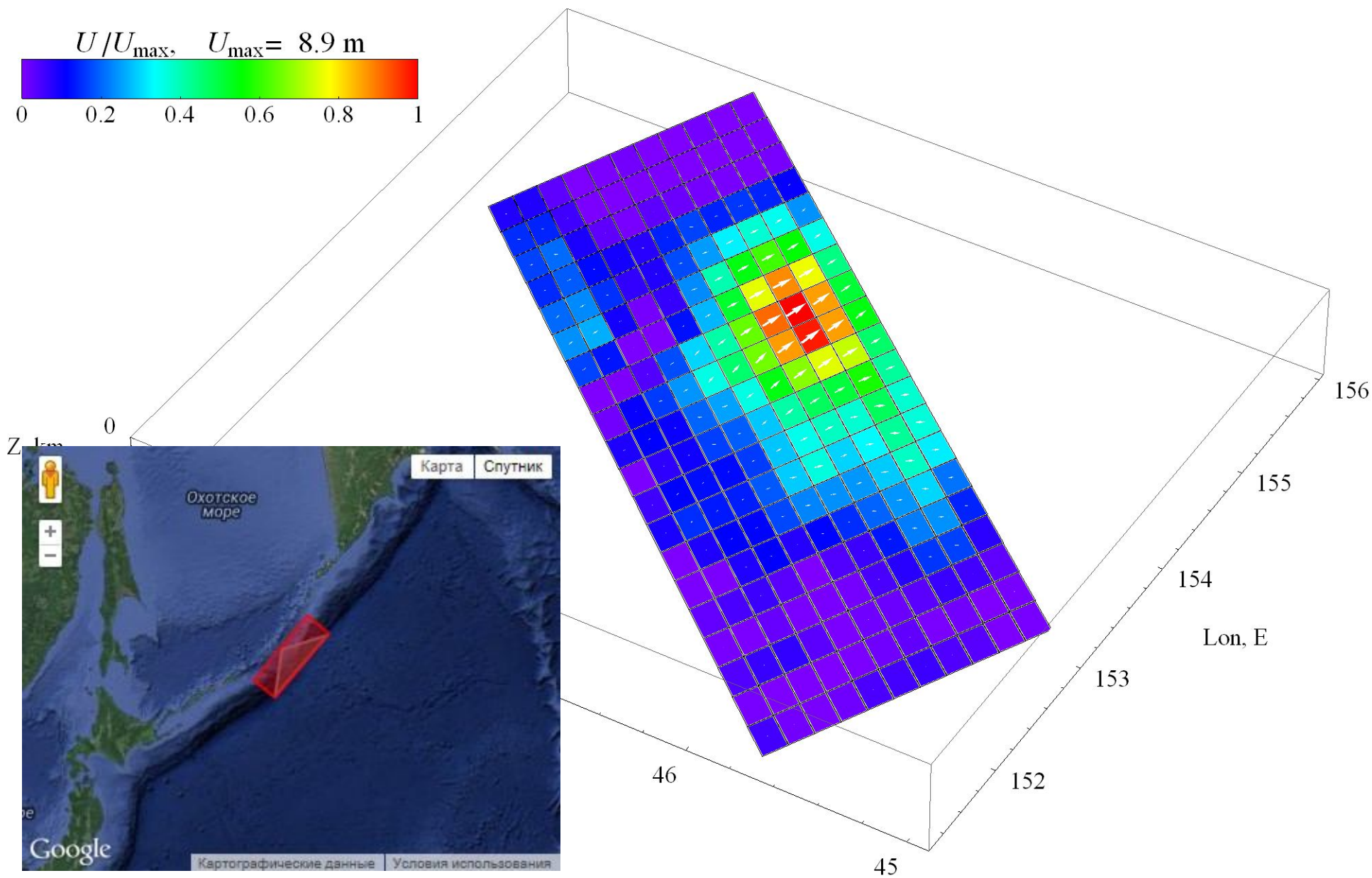
**Модельная прямоугольная площадка разрыва
Центральные Курилы 15.11.2006
(CMT: Rake=92, Strike=215, Dip=15, Depth=13.5 км)**



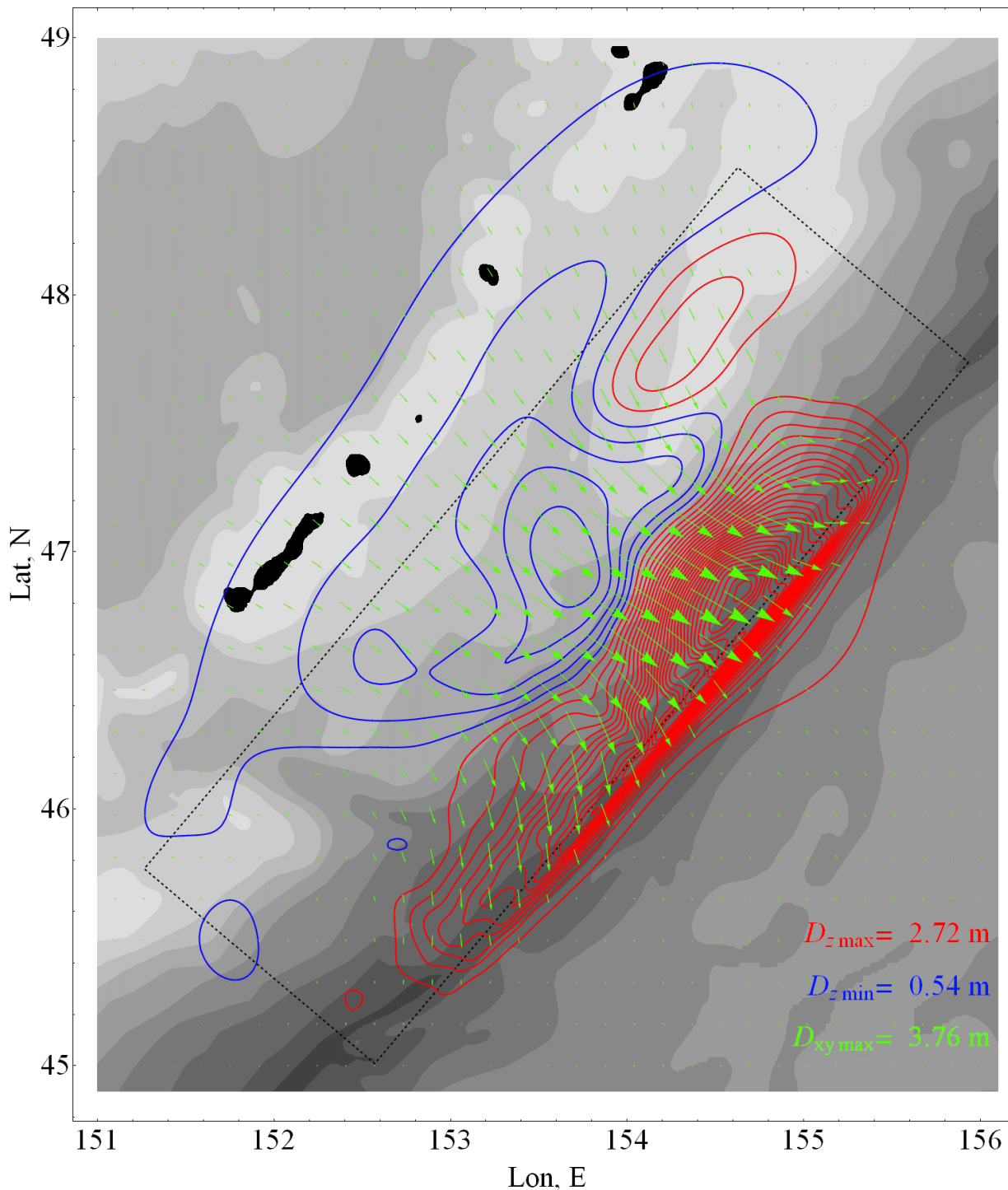
Косейсмическая деформация дна, рассчитанная по формулам Окада

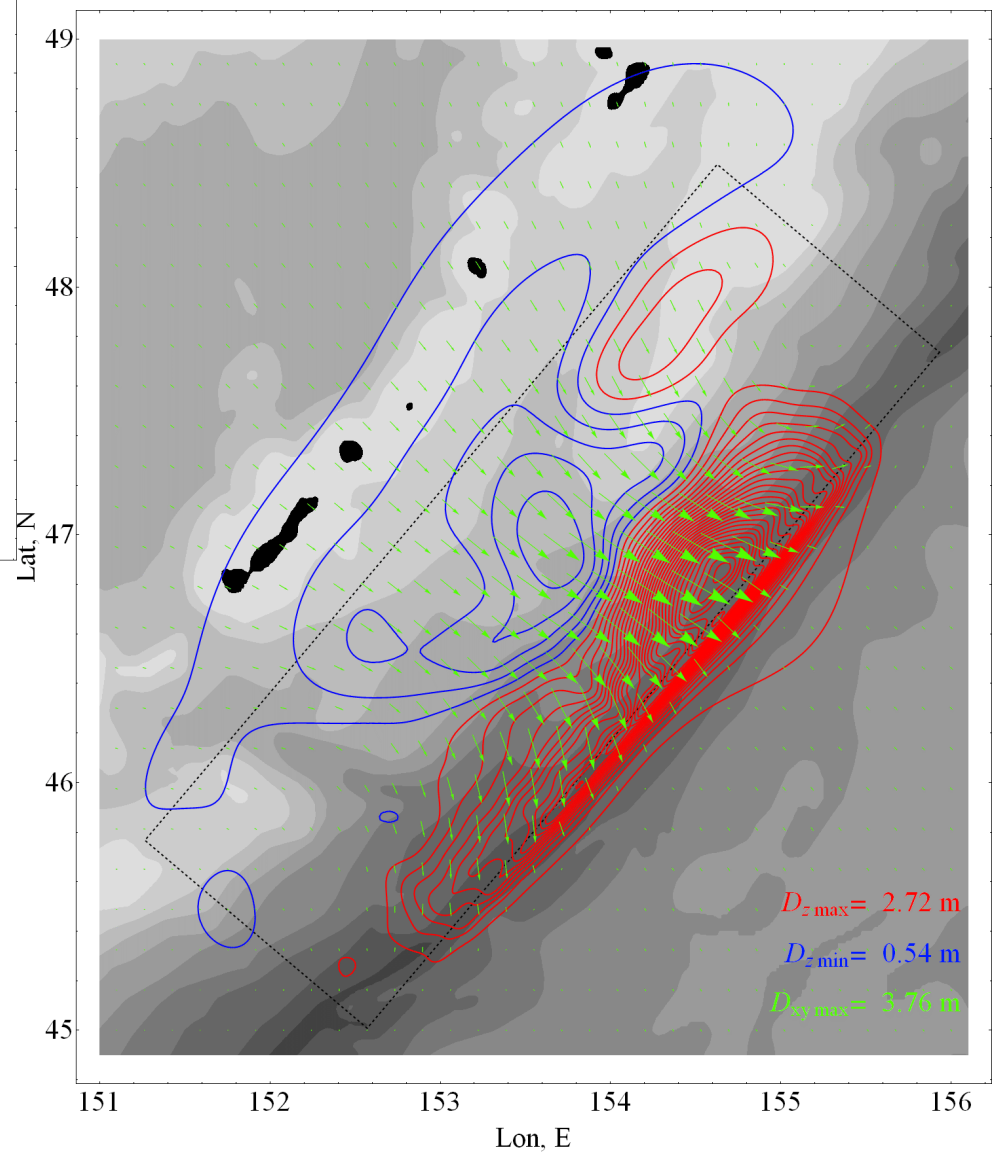
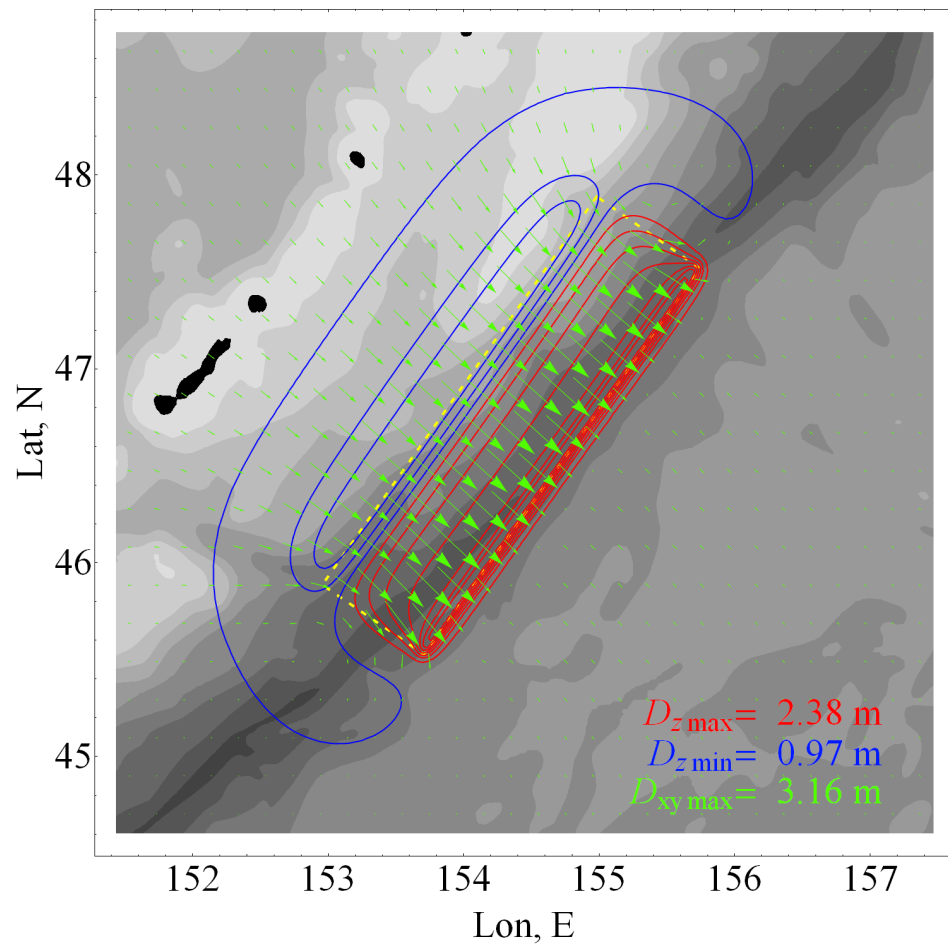


Центральные Курилы, 15.11.2006 (Finite Fault Model)

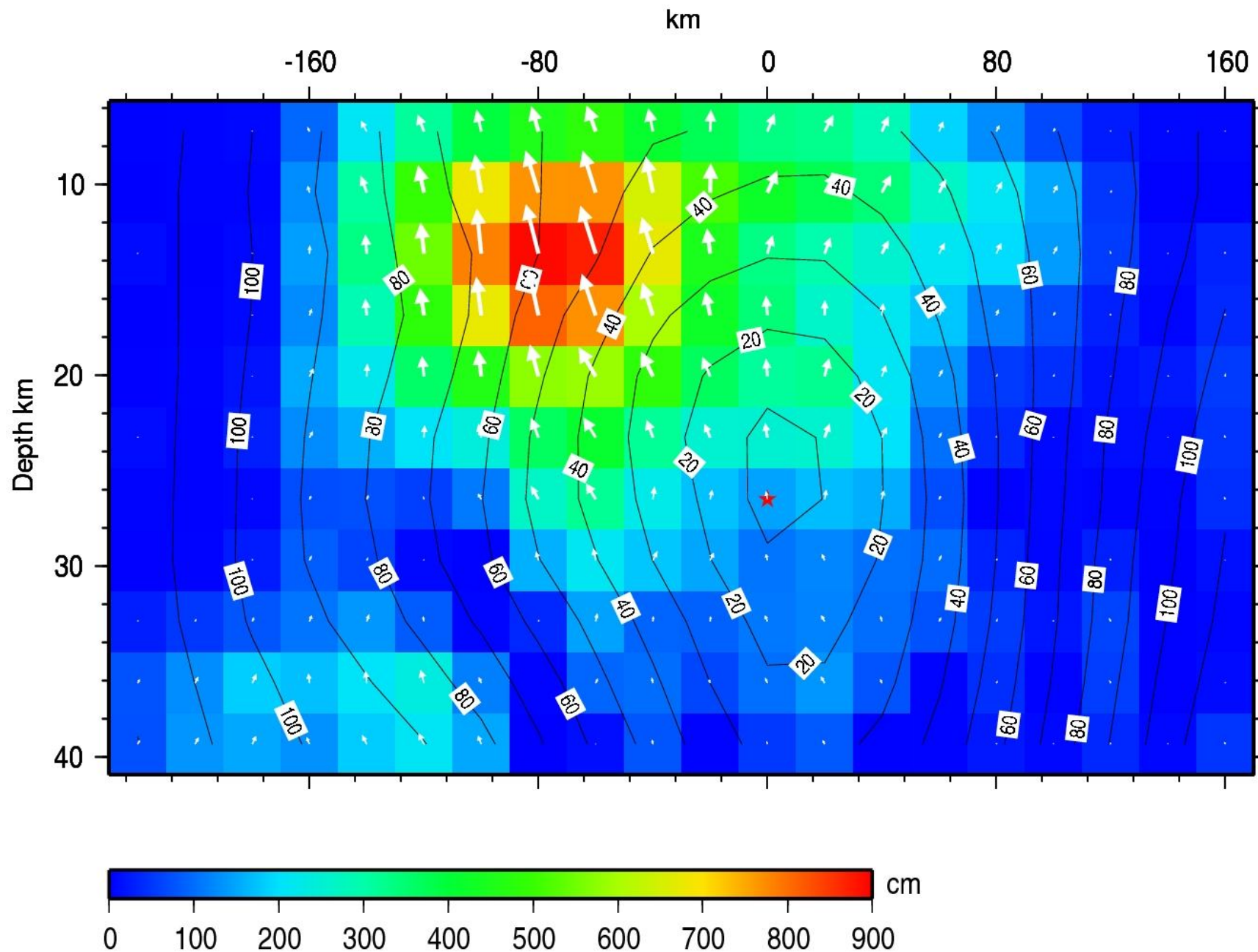


**Косейсмическая
(остаточная)
деформация дна
океана в очаге
цунами на
Центральных
Курилах
15.11.2006**





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)



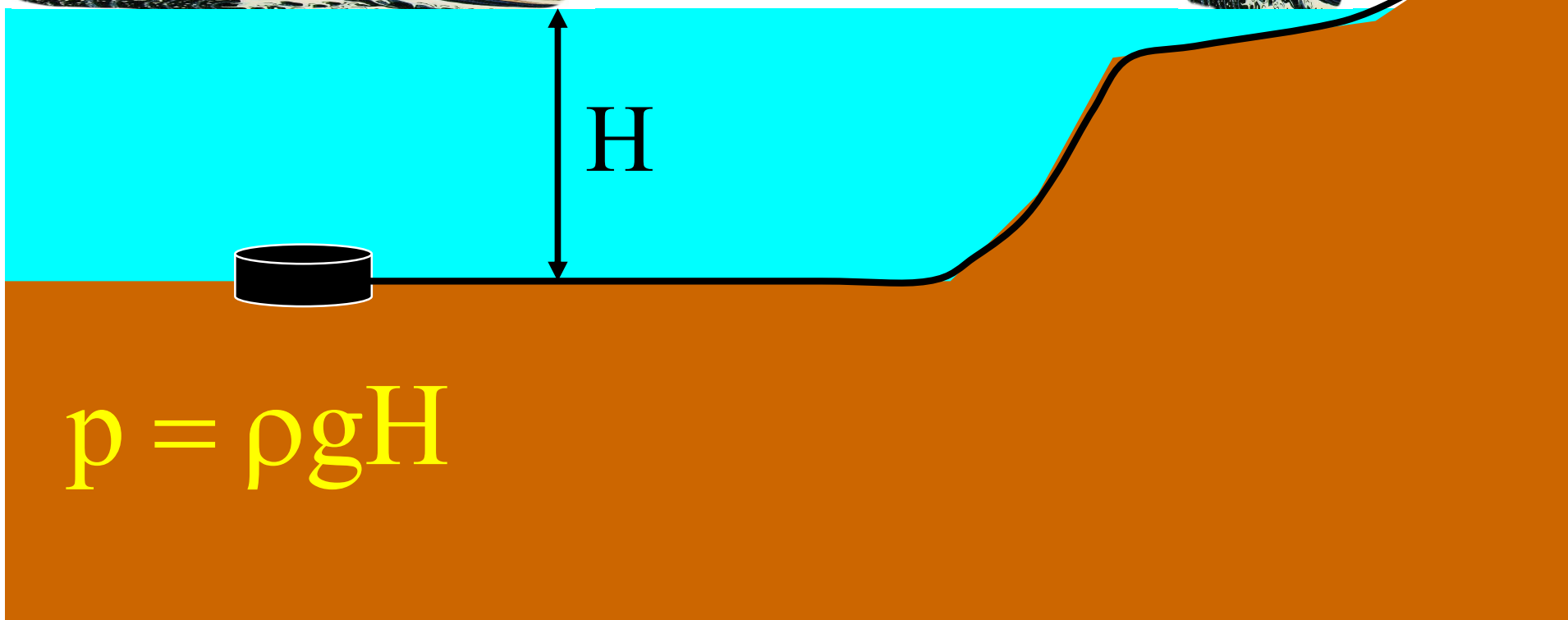
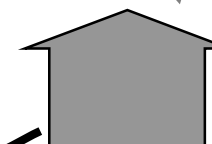
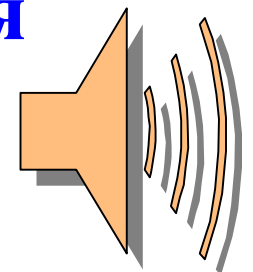
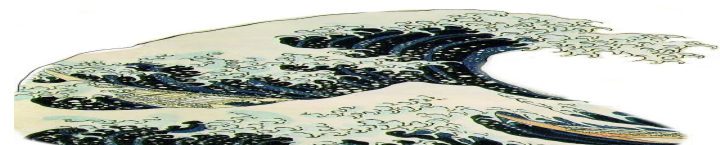
**Современные станции
используют множество
методов измерения
уровня и спутниковую
телеметрию для
передачи данных**



Сергей
Леонидович
Соловьев
(1930-1994)

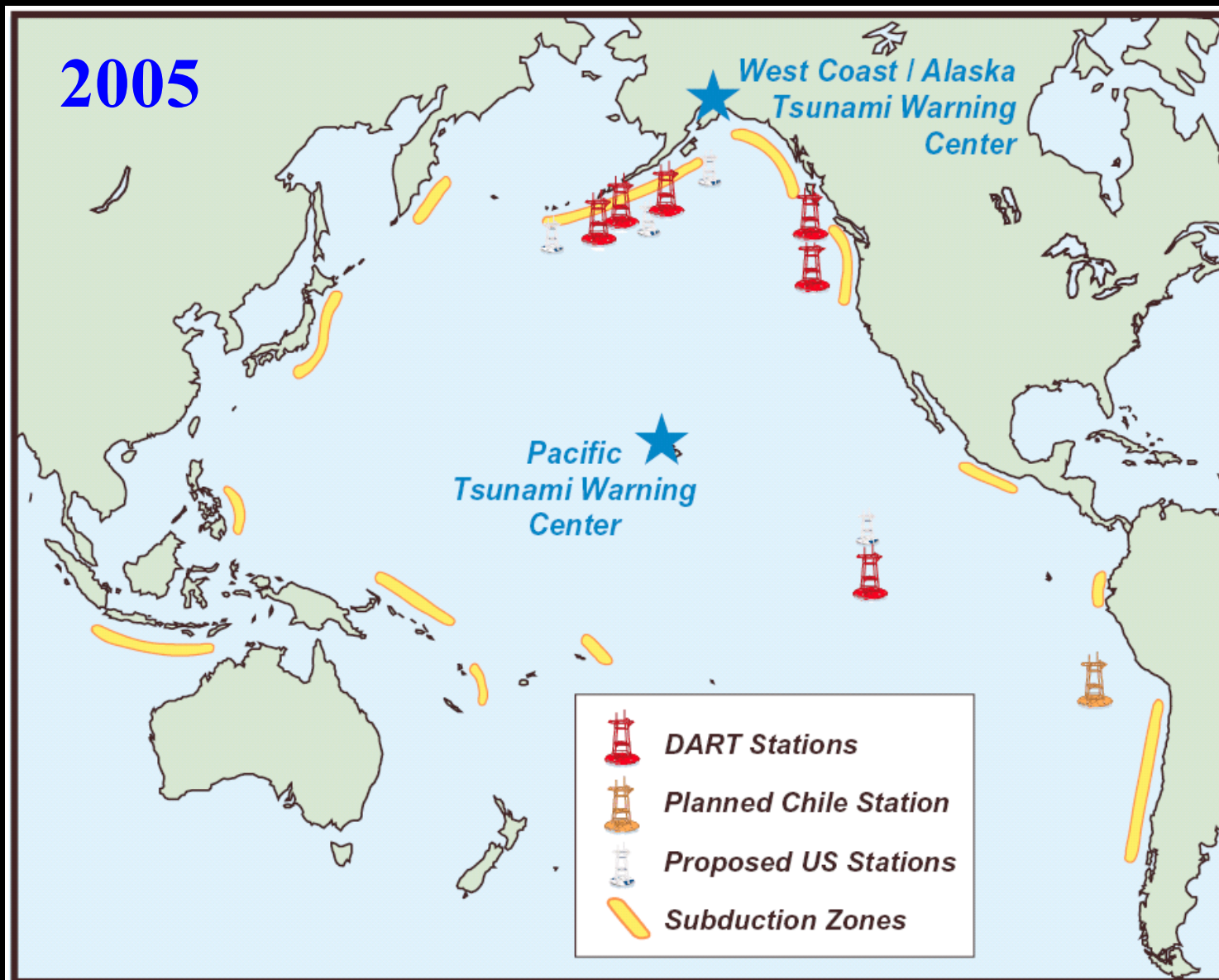


Глубоководные измерители давления



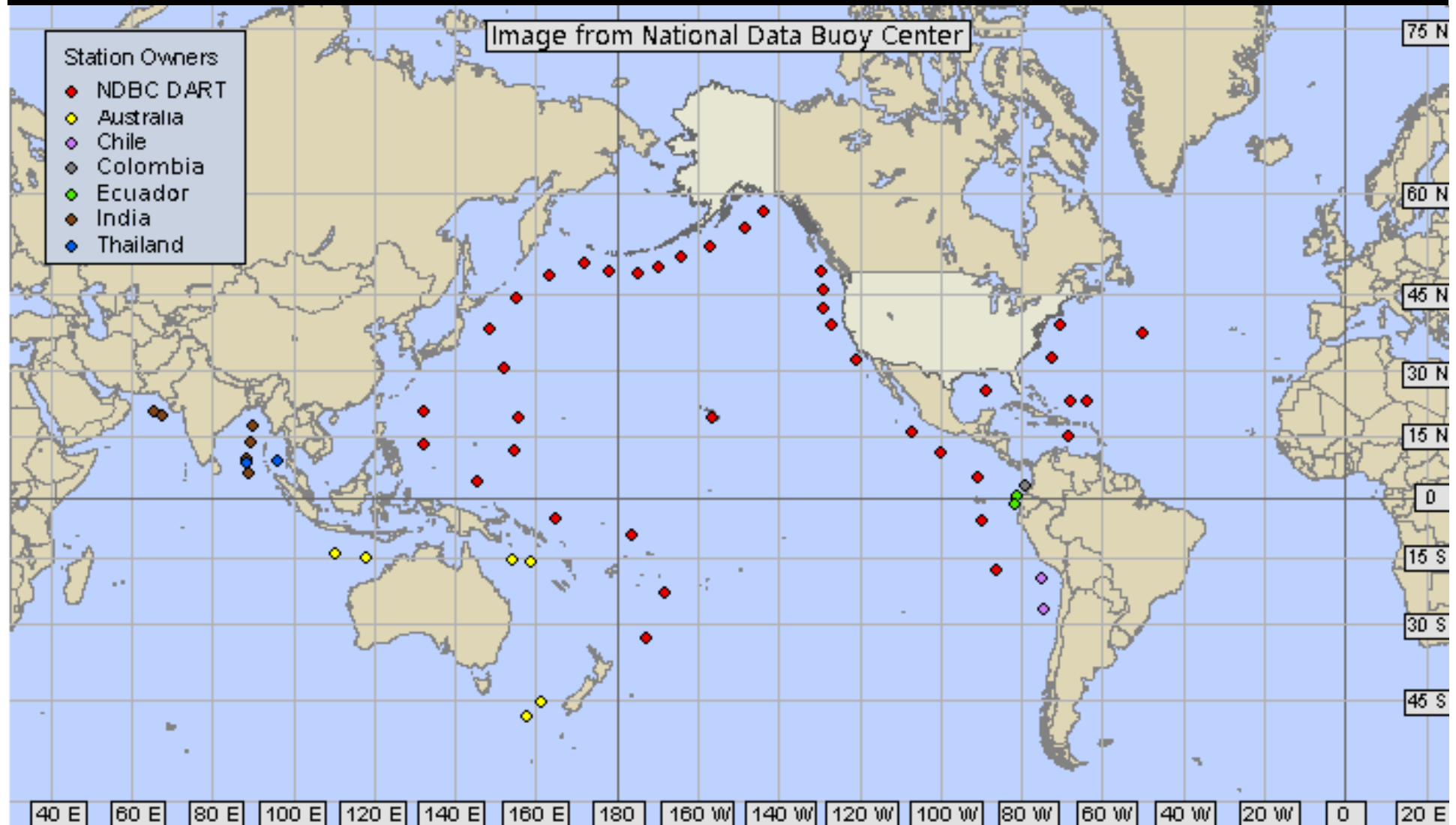
DART 2005

Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis

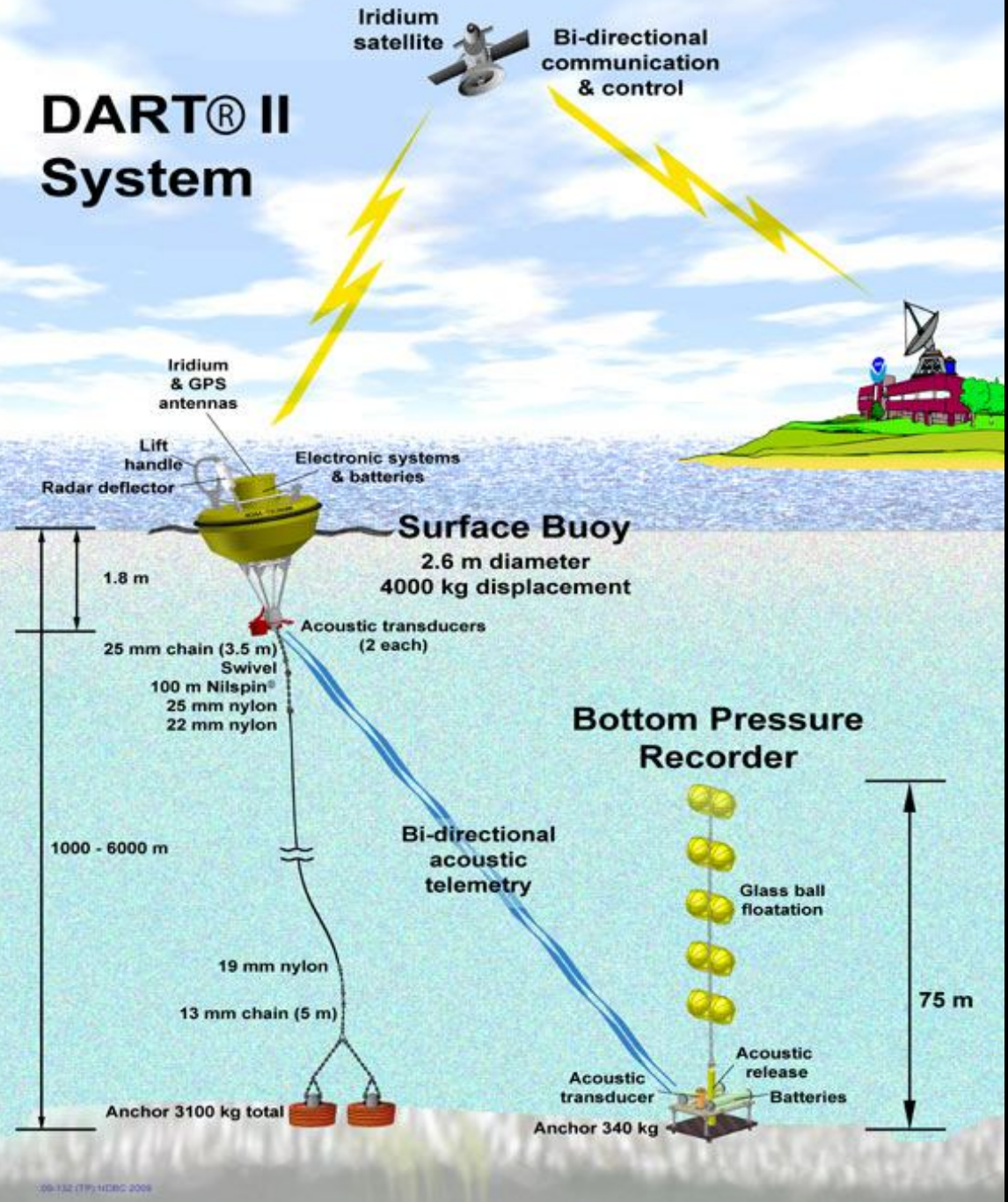


DART 2017 (≈60)

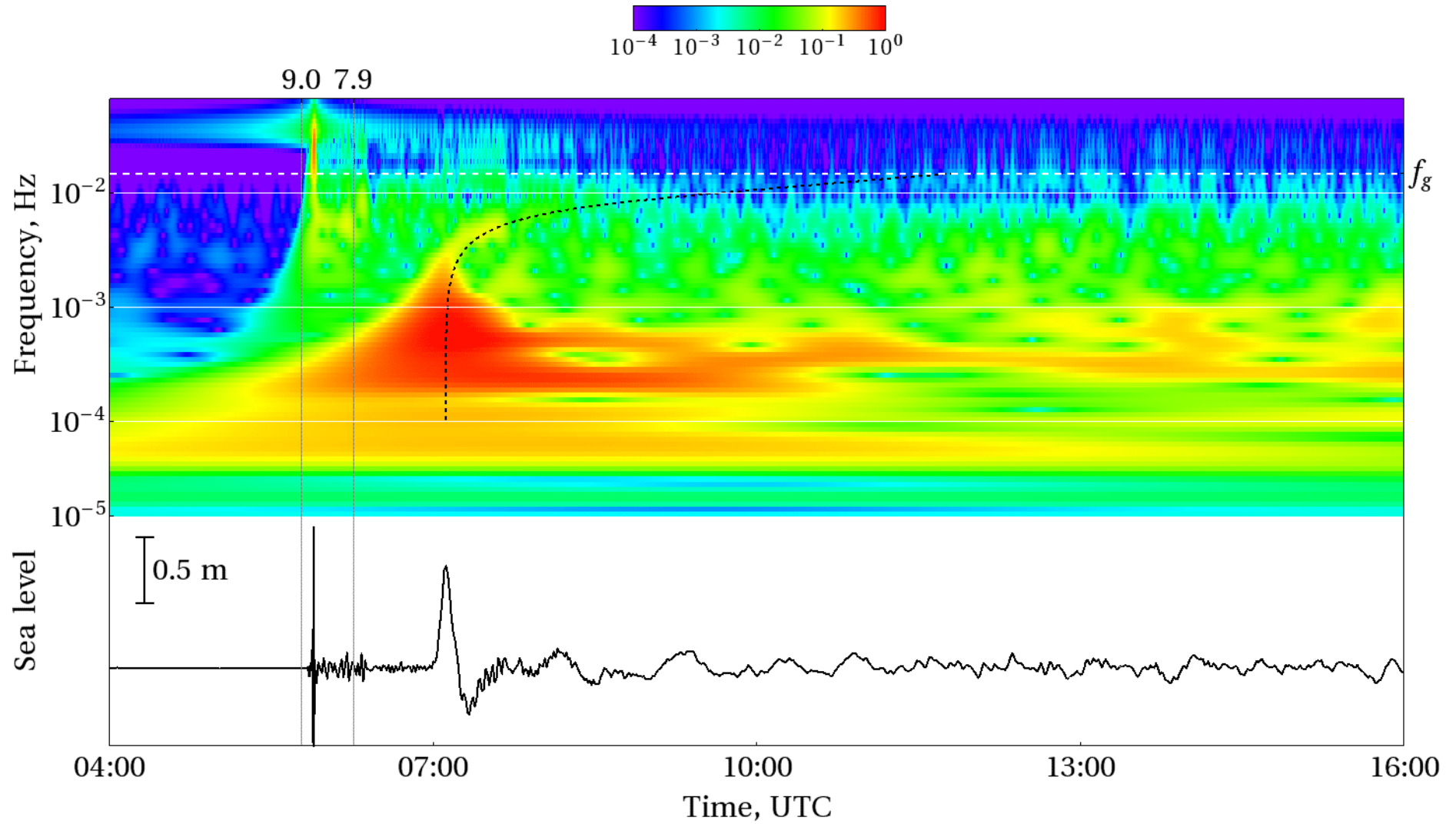
Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis



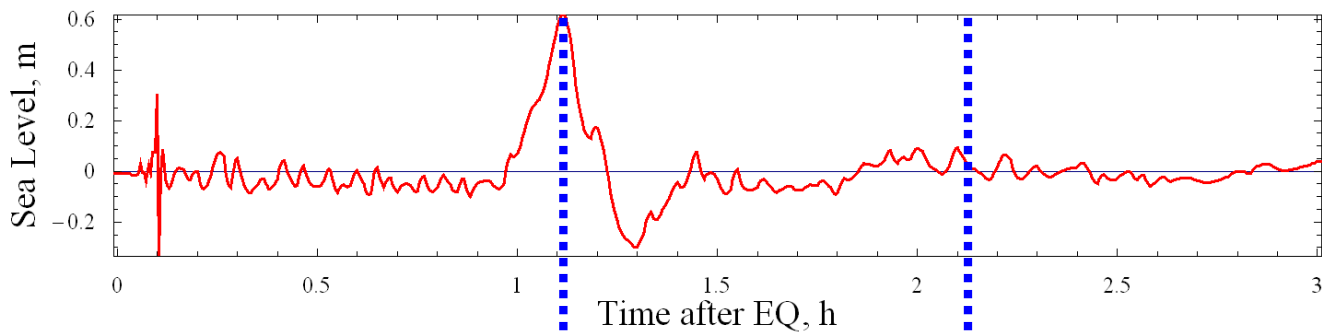
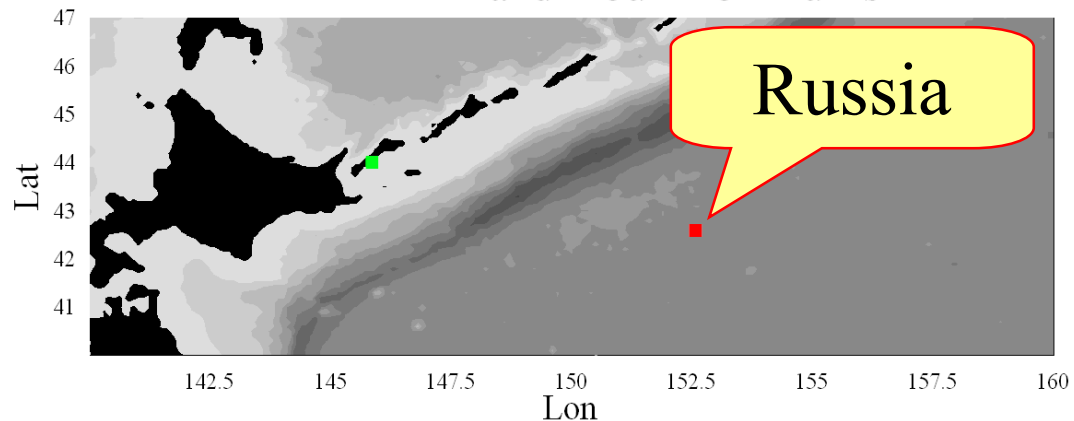
DART® II System



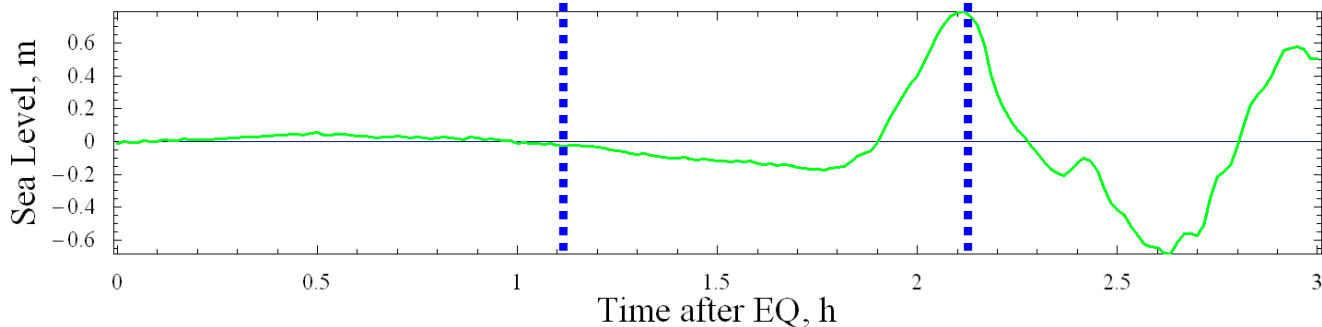
DART21413, 11.03.2011



DART21401 and Youzhno-Kurilsk



60 min



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/>