

# Стационарные стабилизированные буи и проблема раннего обнаружения цунами

Д.Г. Левченко<sup>1</sup>, В.Д. Левченко<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> *Институт Океанологии им. П.П. Ширшова, Москва*

<sup>2</sup> *ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

## Особенности численного моделирования с использованием FrameWork DoReMincer, разрабатываемого в ИПМ им. М.В. Келдыша

- ▶ универсальность (уравнения, численные методы, размерность);
- ▶ производительность (ускорители GPU);
- ▶ эффективность (алгоритмы LRnLA с «компактным» обновлением ячейки).

Математическая модель: система уравнений законов сохранения (в потоках)

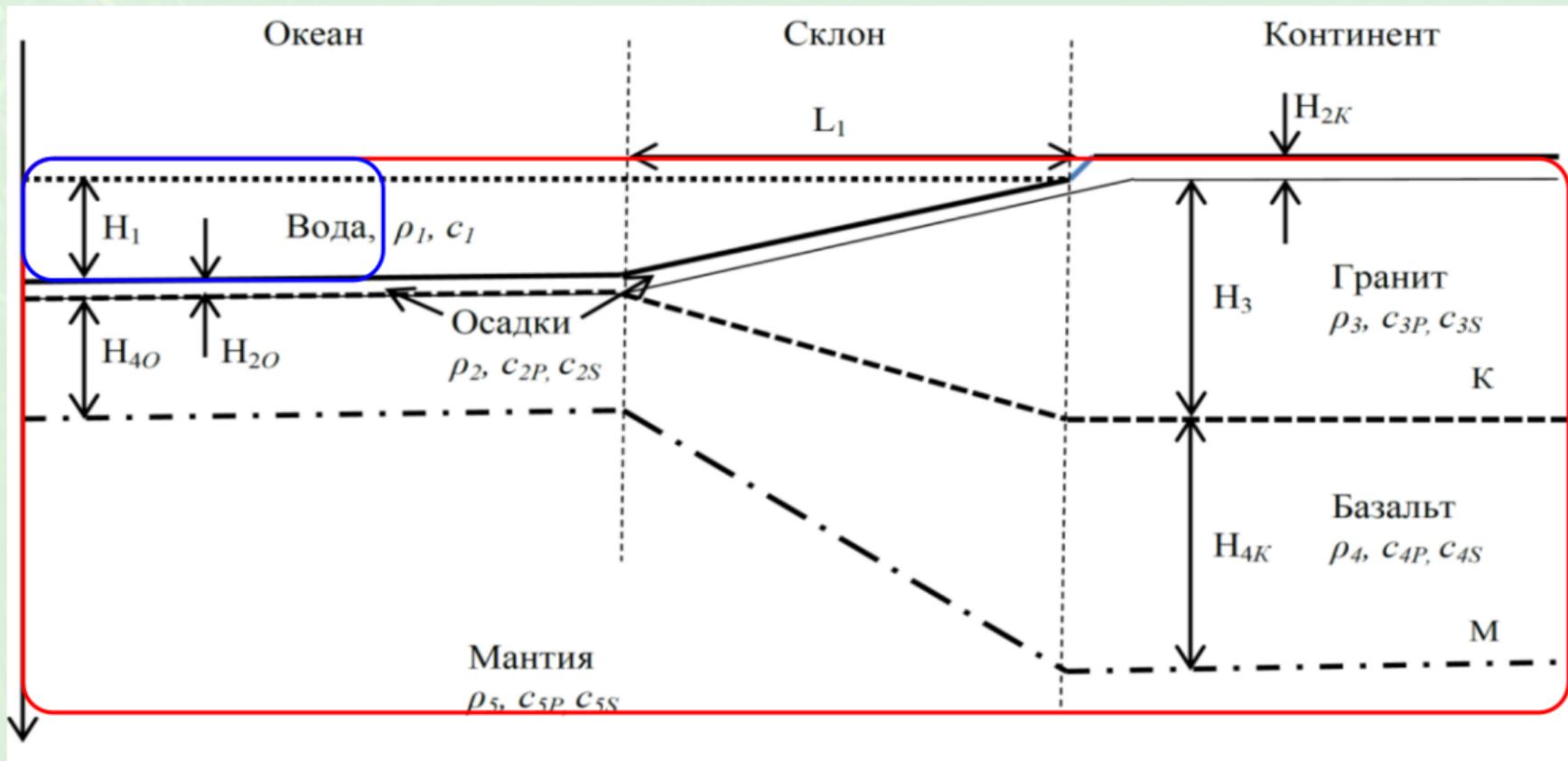
$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_s}{\partial x_s} = S,$$

$U$  — вектор  $N_Q$  неизвестных,  $q = 1, \dots, N_Q$ ,

$F_s$  — потоки,  $s = 1, \dots, d$ ,  $d$  — размерность задачи,

$S$  — недивергентные члены (источники/стоки).

- ▶ уравнения Эйлера / Навье-Стокса;
- ▶ уравнения упругости / акустики.
- ▶ Разрывный метод Галёркина (DG) для аппроксимации по пространству  $O(\Delta_x^{N_{order}})$ ;
- ▶ Рунге-Кутты (RK) или ADER для интегрирования по времени  $O(\Delta_t^{N_{ader}})$ .

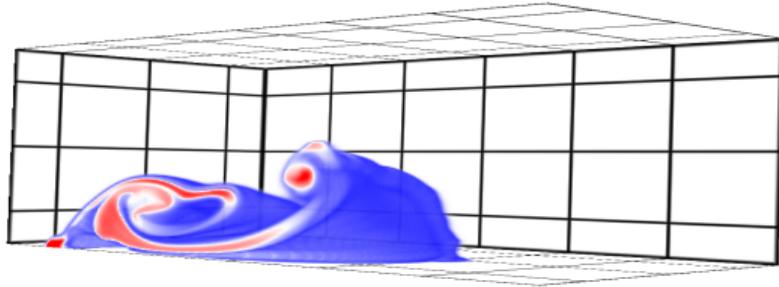


## Постановка задачи моделирование: возбуждение гравитационных волн

Модель 2-х компонентного потока: уравнение Эйлера + адвекции

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} &= 0 & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i^{Eu}}{\partial x_i} &= S, & U &= (\rho, \rho u_j, \alpha) \\ \frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j + p \delta_{ij})}{\partial x_i} &= (\rho - \rho_0) \vec{g} \alpha & \rho & - \text{динамическое давление, } \nabla \rho_0 = \rho_0 \vec{g} \\ & & \alpha & - \text{объёмная доля воды } (\alpha_{\text{вода}} + \alpha_{\text{воздух}} = 1). \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} &= 0 & S &= (0, (\rho - \rho_0) \vec{g}, \alpha \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) - \text{источники,} \\ & & & \text{Граничные условия: непротекания при } z = -z_{\text{bottom}} \\ & & & \text{свободного вытекания на остальных границах} \end{aligned}$$

$p = p(\rho)$ .  $-z_{\text{bottom}} \leq z \leq z_{\text{height}}$



Б.А. Корнеев, В.Д. Левченко *Эффективное решение трехмерных задач газовой динамики Рунге-Кутты разрывным методом Галеркина* // ЖВМиМФ, 2016, т.56, №3, с.465-475

# Постановка задачи моделирование: распространение сейсмических волн

## Модель линейно-упругой среды

$$\rho \frac{\partial v_1}{\partial t} = G_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_3}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_2}{\partial x_3},$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial t} = l_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \lambda_3 \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \lambda_2 \frac{\partial v_3}{\partial x_3},$$

$$\frac{\partial \tau_1}{\partial t} = \mu_1 \left( \frac{\partial v_3}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right).$$

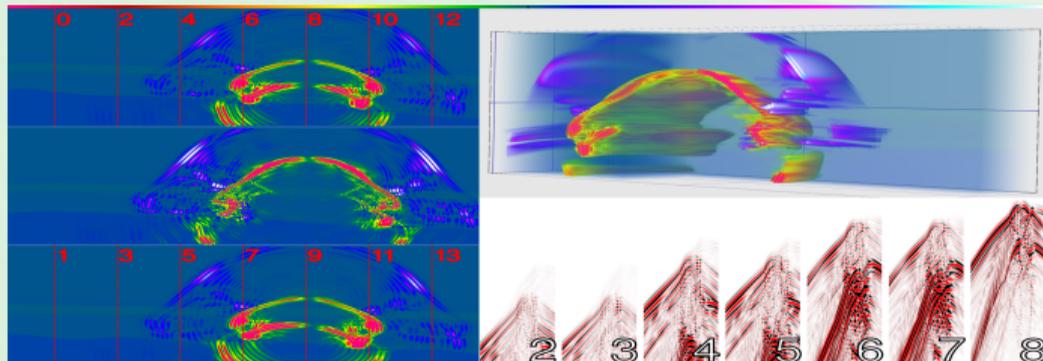
$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + C_{pq}^i \frac{\partial U_q}{\partial x_i} = S_p.$$

под дном:  $U_p = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3, v_1, v_2, v_3)^T$

ВС в толще: неотражающие

в воде ( $p = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ ):  $U_p = (p, v_1, v_2, v_3)^T$

ВС на поверхности:  $p = p_{\text{атм}} + \rho g \zeta$



А.В. Закиров, В.Д. Левченко и др.  
Высокопроизводительное 3D моделирование  
полноволнового сейсмического поля для задач  
сейсморазведки // Геоинформатика, 2017, № 3, с.34-45

## Численная схема DoReMincer: RKDG

В каждой ячейке  $L$  введем базис  $\Xi = \{\xi_k(\vec{x})\}$ ,  $k = \overline{0, K}$ . Будем искать решение в виде

$$U(\vec{x}, t) = \mathcal{U}^k(t)\xi_k(\vec{x}), \quad \vec{x} \in L$$

DG-дискретизация (для ортогонального базиса  $\Xi$ ,  $\|\xi_k\|^2 = \int_L \xi_k^2 dV$ ):

$$\frac{\partial \mathcal{U}^k}{\partial t} \|\xi_k\|^2 + \int_{\partial L} \mathcal{F}_s \xi_k n^s d\Sigma = \int_L \left( S \xi_k + F_s \frac{\partial \xi_k}{\partial x_s} \right) dV \quad (1)$$

Выражение для потока через границу ячейки  $\mathcal{F}_s$  вычисляется по потоку Рунанова

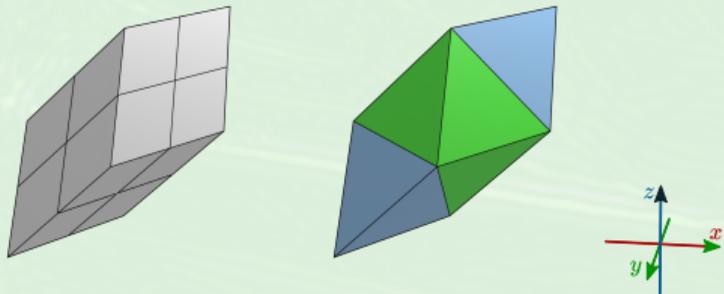
$$\mathcal{F}_s = \mathcal{F}_s(U_L, U_R) = \frac{1}{2} [F_s(U_L) + F_s(U_R) - |c_s|_{\max}(U_R - U_L)]. \quad (2)$$

$U_{L,R}$  — предельное значение на грани слева или справа,

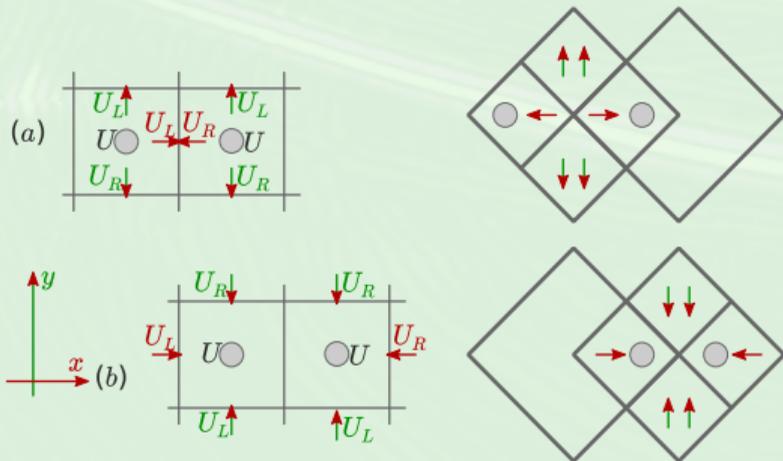
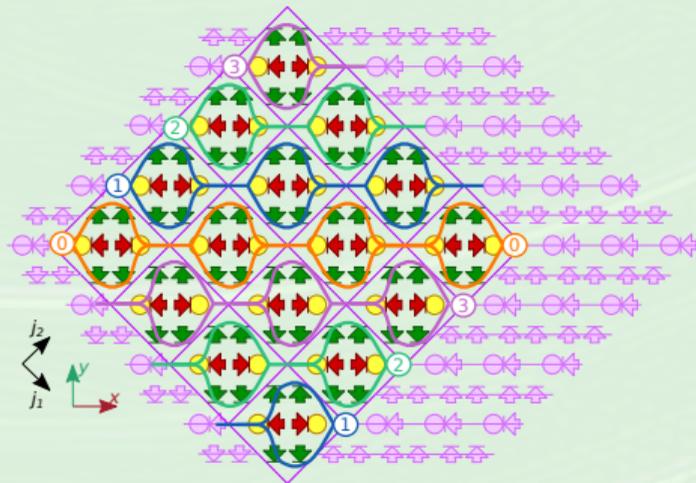
$|c_s|_{\max}$  — максимальное по абсолютному значению собственное число матрицы  $C^s$ .

ОДУ (1) интегрируется явным методом Рунге-Кутты со свойством strong stability preserving (SSP RK).

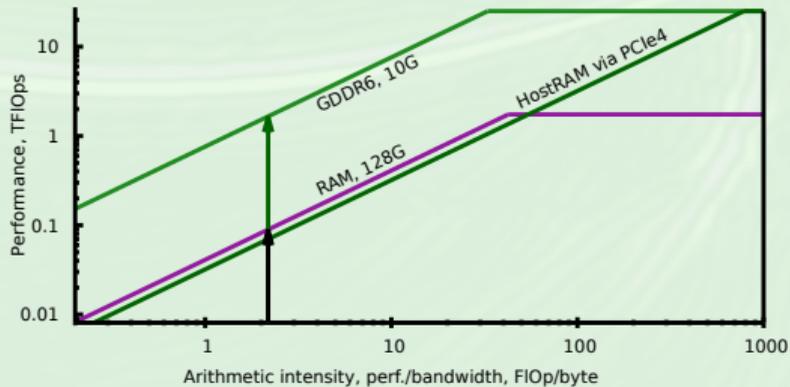
# LRnLA алгоритмы DoReMincer:



LRnLA ячейка в 3D



компактное обновление ячейки

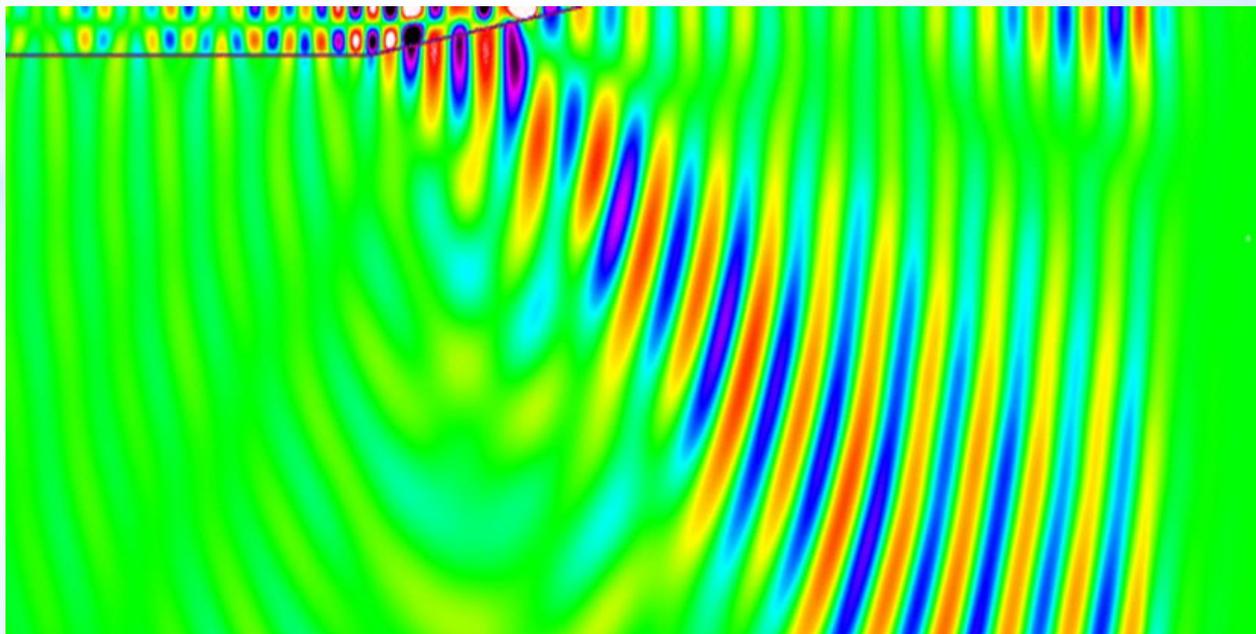


# СТАЦИОНАРНЫЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ БУИ И ПРОБЛЕМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЦУНАМИ

Д.Г. Левченко<sup>1</sup>, В.Д. Левченко<sup>2</sup>

*<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН*

*<sup>2</sup>Институт прикладной математики им М.В. Келдыша РАН*



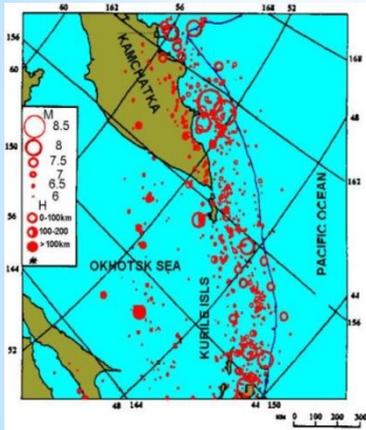
# Системы предупреждения о цунами опасности

## Сейсмические методы оценки цунамиопасности

**Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами:**

Неточность сейсмологических оценок цунамиопасности связана с погрешностями дистанционного определения  $M$  – магнитуды землетрясения,  $H$  – глубины и координат очага землетрясения. **Много ложных тревог**

### Зоны высокой сейсмической активности



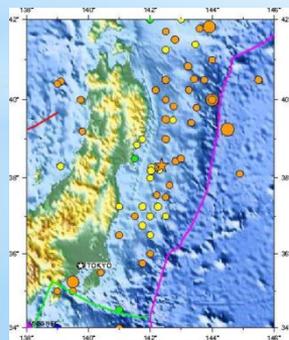
Вследствие геодинамических особенностей Северо-Восточных окраин Азии (Камчатка, Курильские и Японские острова) основная часть сильных цунамигенных землетрясений происходит между побережьем и осью глубоководного желоба, с расстоянием очагов от ближайшего берега до 100 – 200 км.

При скорости распространения цунами порядка 200 м/с это расстояние волна пройдет менее чем за 15 – 20 минут. За это время можно провести некоторые мобилизационные мероприятия, но его совершенно недостаточно для эвакуации населения и организации масштабных защитных мер.

В связи с этим особенно актуальными становятся поиски краткосрочных предвестников сильных мелкофокусных землетрясений – основных источников цунами в этом регионе

## Японская кабельная система обнаружения волн цунами (2015 г.)

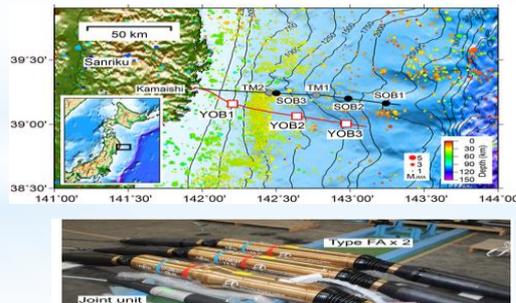
Землетрясения с магнитудой 7 и выше в центральной части Японских островов с 1900 по 2016 годы



Система Тохиоку расположена в районе эпицентра катастрофического землетрясения и цунами, произошедших 11 марта 2011 года.

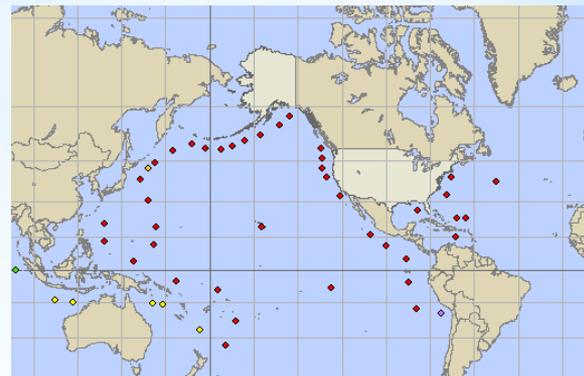
Система содержит акселерометр JA-5, с частотным диапазоном 0,01 - 10 Гц, чувствительностью  $\pm 1.0 \mu\text{G}$  и порогом  $10^{-6} \text{ м/с}^2$

Содержит систему измерения давления для обнаружения волн цунами



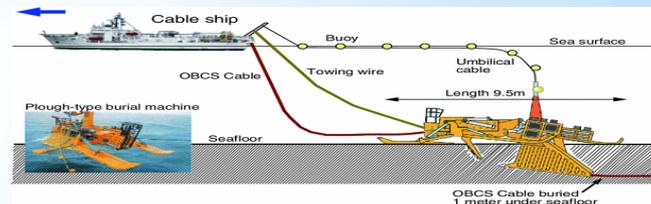
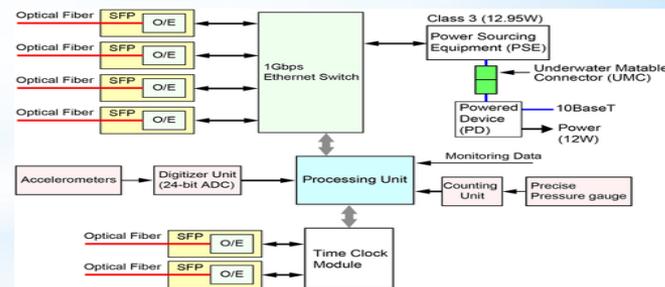
## Система обнаружения волн цунами DART

Размещение станций DART в Тихом океане



Станция DART II, способного обнаруживать волны цунами в открытом океане высотой до 1 см

Станция DART дорогая в эксплуатации и требует замены источников питания через 1 – 2 года



# Японские донные кабельные сейсмические сети (OBCSN)

## Регистрация регулярных землетрясений

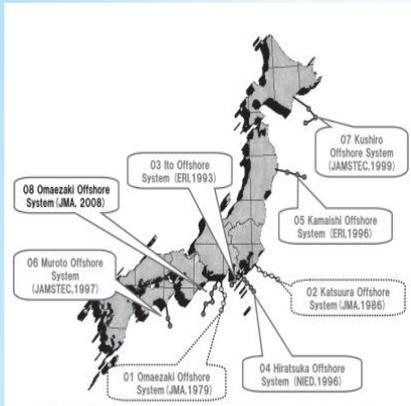
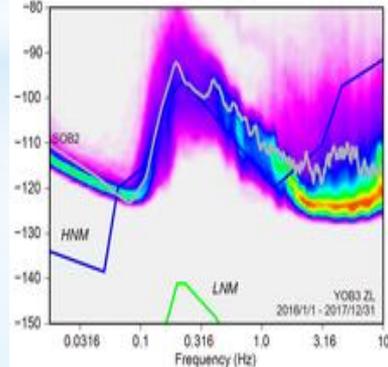
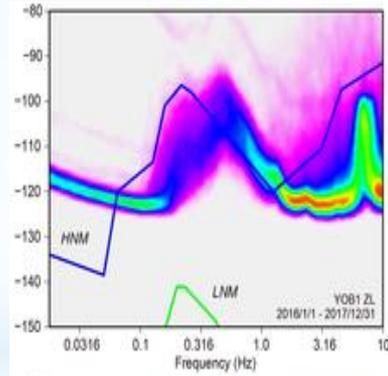


Fig. 1 Sea areas with seismographic observation systems.

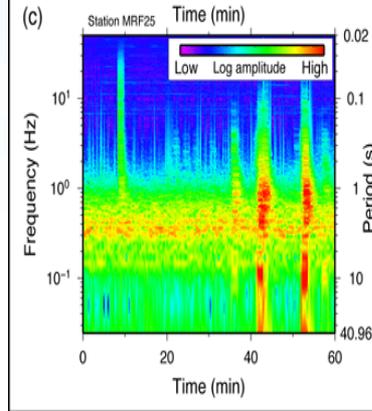
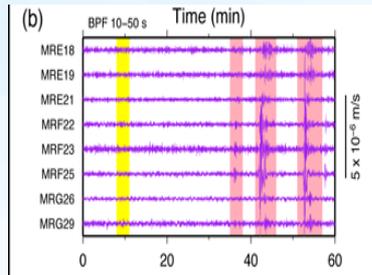
Table 1 Installation locations and organizing authority.

No.	Location	Organizing Authority	Year	System Length
1	Omaezaki, Shizuoka Pref.	Japan Meteorological Agency (JMA)	1979	120 km
2	Katsura, Chiba Pref.	JMA	1986	96 km
3	Ito, Shizuoka Pref.	Earthquake Research Institute (ERI), University of Tokyo	1993	28 km
4	Hiratsuka, Kanagawa Pref.	National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)	1993	127 km
5	Kamaishi, Iwate Pref.	ERI	1996	123 km
6	Maruo, Kochi Pref.	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)	1997	125 km
7	Kushiro, Hokkaido Pref.	JAMSTEC	1999	242 km
8	Omaezaki, Shizuoka Pref.	JMA	2008	210 km

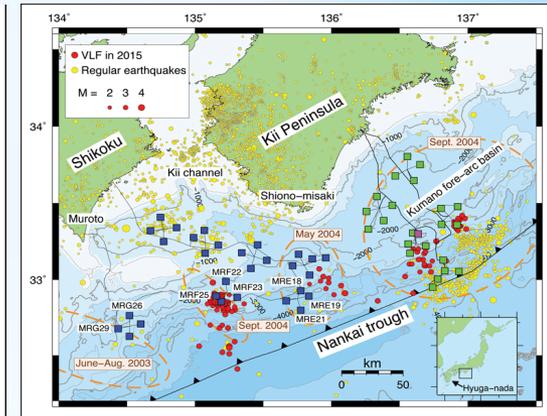
Уровень сейсмических шумов на станции Тохоку за 2017 и 2018 годы (сейсмографы 1 и 3)



## Регистрация сверхнизкочастотных землетрясений



Низкочастотные сигналы (VLF) с периодами от 10 до 50 секунд (b) и их текущие спектры (c)



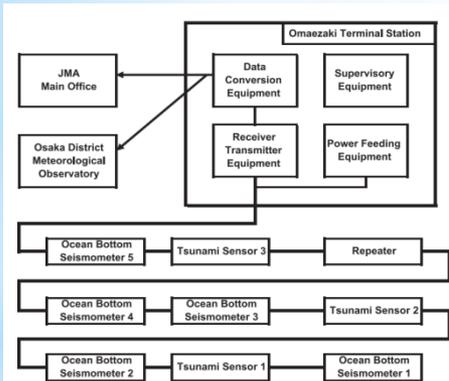
Станции DONET1 (зеленые квадраты), DONET2 (синие квадраты) и скважинная станция (фиолетовый квадрат в области сети DONET1)

Красные круги показывают местоположения эпицентров очень низкочастотных (VLF) землетрясений, а желтые - регулярных.

Каждая станция DONET оснащена сейсмометром сильных движений и высокочувствительным широкополосным сейсмометром для регистрации волн с периодами до 360 с, а также чувствительным манометром для обнаружения волн цунами или медленных деформаций дна

*Неглубокие ( $H < 10$  км) землетрясения с очень низкой частотой указывают на деформацию земной коры в зоне субдукции*

## Блок-схема донных сейсмографических наблюдений (система JMA)



## Донный кабельный сейсмограф (акселерометр)

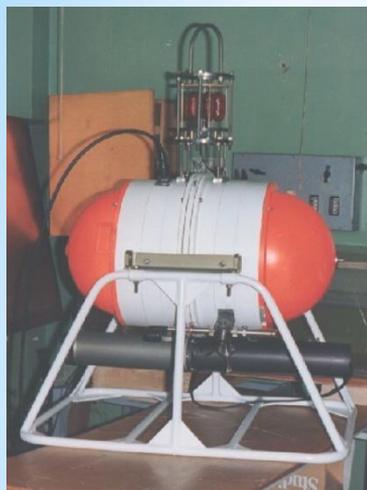
JA-5, Japan Aviation Electronics Industry, Ltd  
Scale 3.0 mA/G, Resolution  $\pm 1.0 \mu\text{G}$



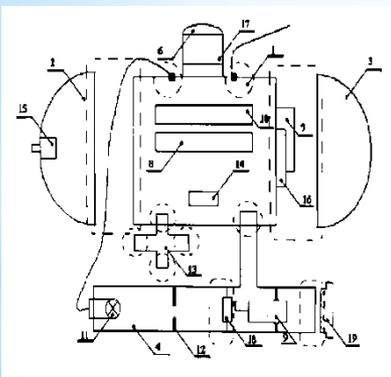
# Донная гидрофизическая обсерватория для исследования возможных предвестников сильных морских землетрясений (ИО РАН 1995 – 1999гг. Договор с МЧС РФ)

## Измеряемые величины

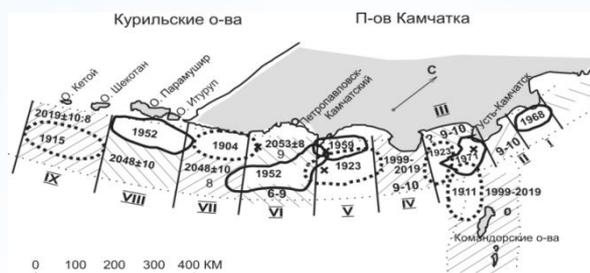
Наименование	Диапазон измерения	Погрешность
Датчик температуры (ТСП)	-1°C+25°C	0,03°C
Датчик электропроводности	2÷6,5См/м	0,05См/м
Датчик давления (тензометр)	8÷10МПа	0,05%
Датчик рН	6÷10ед.	0,1ед.
Датчик скорости течения (импеллер)	2,5÷150см/с	2,5см/с
Датчик скорости звука	1400÷1500м/с	±0,3м/с
Спектрометр (акустооптический)	300 – 800 нм	± 0,4 нм



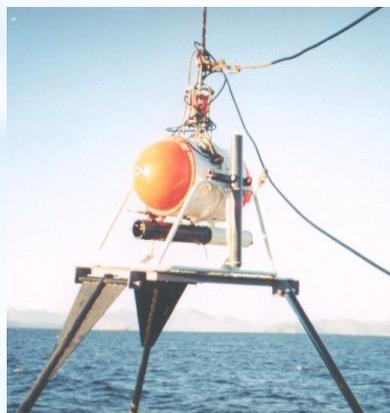
Структурная схема



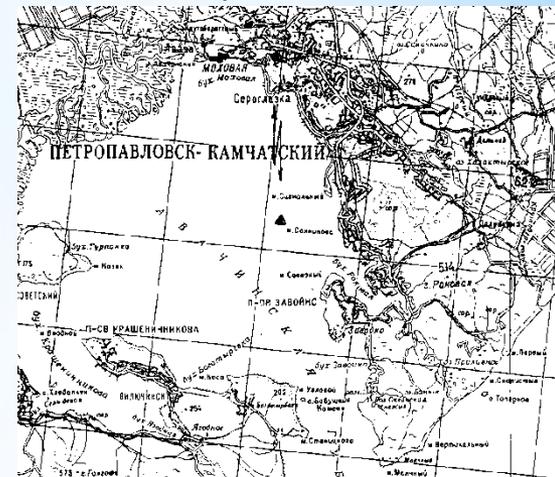
## Области произошедших и ожидаемых сильнейших землетрясений в районе полуострова Камчатки и Курильских островов



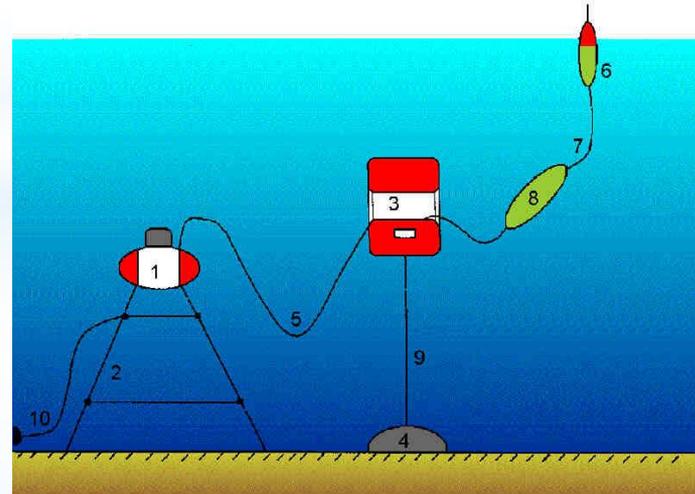
Внешний вид перед постановкой



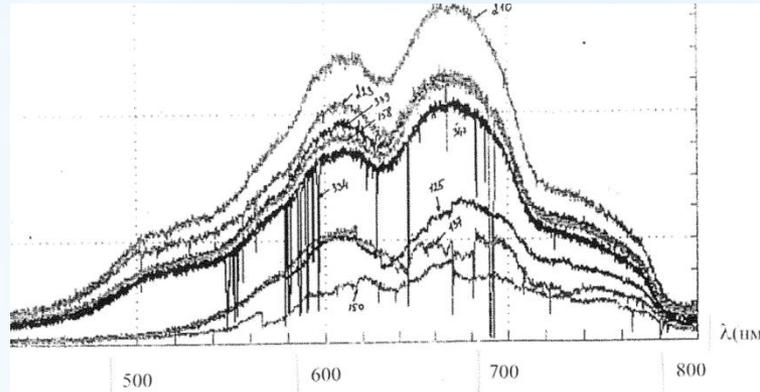
## Место установки обсерватории в Авачинской бухте Камчатки



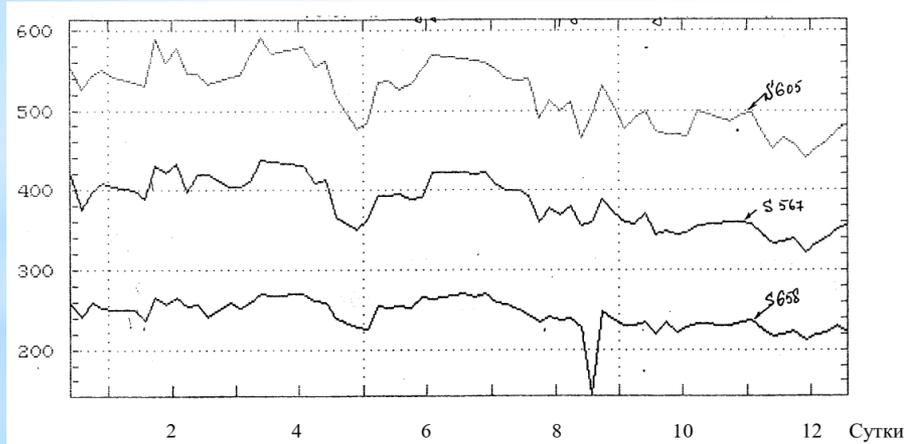
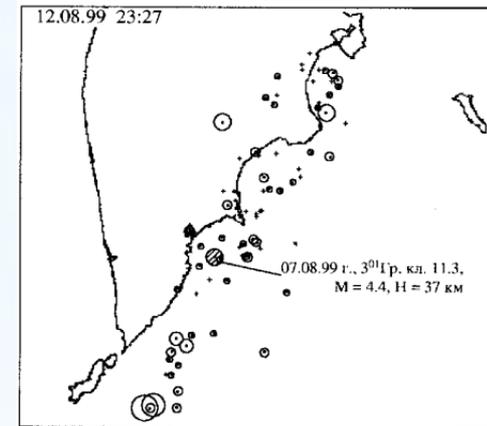
## Схема постановки обсерватории на дно



# Результаты испытаний донной гидрофизической обсерватории ИО РАН (1995 – 1999 гг.)



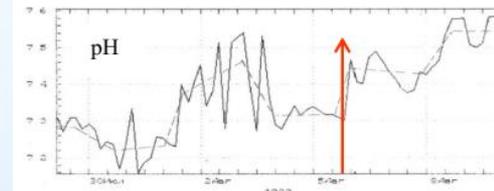
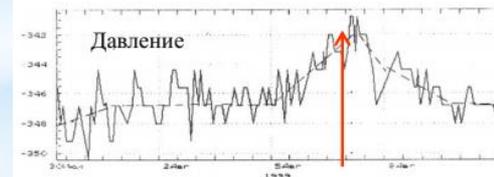
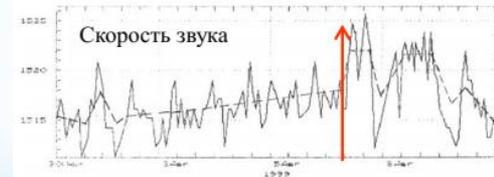
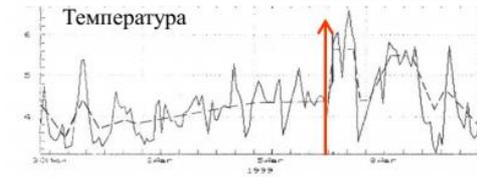
Оптические спектры прозрачности воды разного состава, полученные с помощью акустооптического спектрометра донной обсерватории ИО РАН



Временная изменчивость трех спектральных составляющих прозрачности воды в Авачинской бухте (Спектрометр донной обсерватории ИО РАН, 1997 г.).

Временные зависимости параметров придонного слоя в Авачинской бухте по данным гидрофизической обсерватории ИО РАН (Август 1999 г.)

Стрелкой указан момент землетрясения 07 августа 1999 г.,  $M = 4,4$ ,  $H = 37$  км,  $L = 50$  км



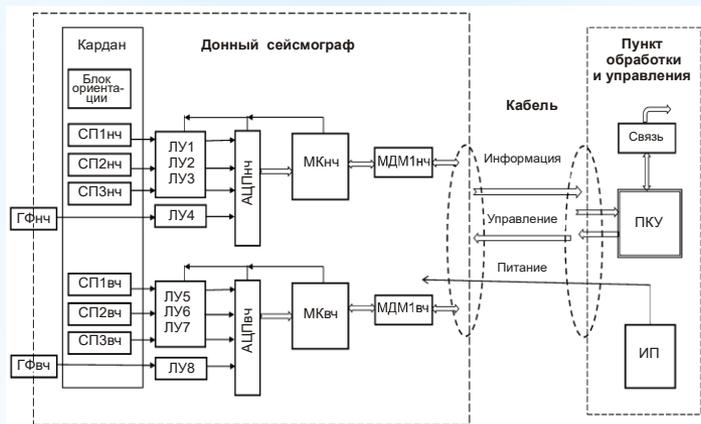
# Широкополосный кабельный донный сейсмограф ИОРАН

Широкополосная кабельная донная сейсмостанция КДСС (ИОРАН, 2014 г)



## ОСОБЕННОСТИ КДСС ИОРАН

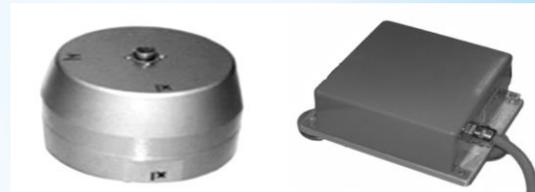
- Сверхширокая полоса частот: 0,01 - 500 Гц., что позволяет регистрировать как сейсмические сигналы местных и удаленных землетрясений, так и сигналы сейсмоакустической эмиссии – возможные предвестники сильных морских землетрясений
- Применение электрохимических сейсмоприемников СМЕ4111 (НЧ) и MTSS2003 (ВЧ), экономичных, устойчивых к ударам и наклонам
- Применение регистратора с дистанционно управляемыми параметрами (разработка ООО Геонод)
- Использование навигационной системы ГЛОНАС
- Применение надежной операционной системы «Линукс»
- Двухсторонняя связь через Интернет.



Электрохимические (молекулярнокинетические) сейсмоприемники, разработки ЦМЭ ФТУ

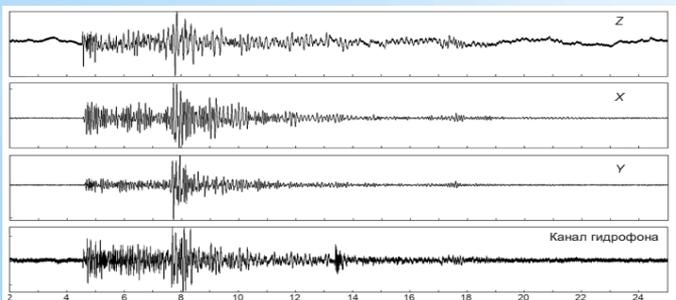
СМЕ4111 (НЧ)

MTSS2003 (ВЧ),

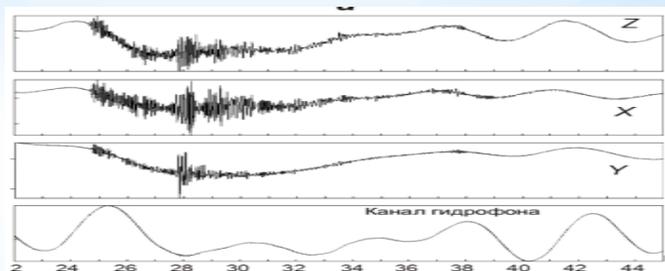


Число сейсмических каналов X, Y, Z	3 НЧ и 3 ВЧ
Число гидроакустических каналов	1 НЧ и 1 ВЧ
Частотный диапазон НЧ тракта	0.01–20 Гц
Частотный диапазон ВЧ тракта	1–500 Гц
Усиление аналогового сигнала (управляемое)	0–36 дБ (шаг 6 дБ)
Динамический диапазон (при усилении 0 дБ)	120 дБ
Разрядность АЦП	24 бит
Интервал дискретизации (управляемый)	0.5, 1, 2, 4 мс
Коэффициент нелинейных искажений регистратора	–120 дБ
Межканальное затухание	120 дБ
Диапазон входных напряжений и мощность питания донного модуля	9–20 В, 3 Вт
Максимальная рабочая глубина	500 м
Диапазон рабочих температур от	–5 °С до +35 °С

Запись КДСС местного землетрясения 1 сентября 2014 г. 00 ч 27 мин 24.5 с, Голубая бухта, г. Геленджик  
Высокочастотные каналы (1 – 500 Гц)



Низкочастотные каналы (0,01 – 20 Гц)



Место испытаний кабельной сейсмостанции ИОРАН



# Стационарные стабилизированные буи – носители морской исследовательской аппаратуры



**Преимущества:** - Высокая устойчивость к воздействию волн, ветра, течений ( $\sim \pm 5^\circ$ ,  $\pm 0,1$  м при волне 5 м), что повышает точность и надежность установленного оборудования

- Отсутствие вращения, что позволяет использовать кабельные донные и глубоководные приборы, направленные антенны связи
- Большие габариты и вес (вес – до 100 т, длина – до 100 м), повышают эффективность генераторов энергоснабжения, надежность средств навигации и связи
- Защита от хищений и вандализма (габариты, видео контроль, звуковое предупреждение)

**Недостатки:** - Большая стоимость металлических и пластиковых буйев, химическое их взаимодействие с морской средой, сложность постановки по сравнению с нестабилизированными буйами

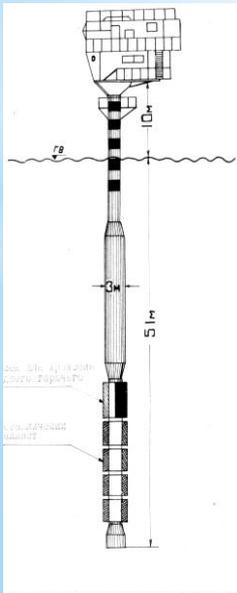
**Новое предложение:** Использовать напряженный железобетон для изготовления корпуса буйа и основных элементов якорной системы

**Преимущества:** Значительное удешевление по сравнению с металлом, устойчивость к морской воде, экологическая безопасность

**Преимущества по сравнению с кабельными системами:** Экономия от прокладки длинного оптоволоконного кабеля, отсутствие опасности обрыва кабеля в прибрежной зоне от штормов и волн цунами, возможность переноса системы в другой район.

## Примеры использования стационарных стабилизированных буйев

Франция  
1963 г.



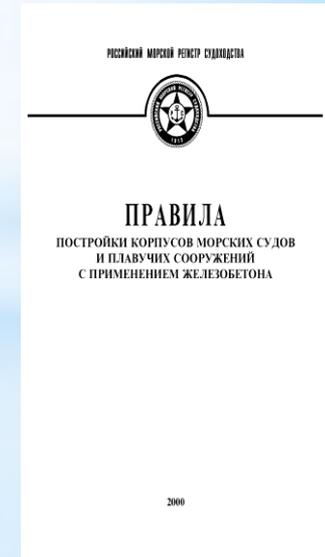
СССР, ИОАН  
1974 – 1982 гг.



США, «FLIP»,  
1962 г. – Наст. время



Возможность изготовления  
из напряженного железобетона



# Расчет и моделирование железобетонного стационарного стабилизированного буя

Работы выполнялись творческим коллективом в составе: сотрудник МГСУ *Вершинин В.В.*, сотрудники ИОРАН: *Бадюлин С.И., Зацепин А.Г., Ивонин Д.В., Левченко Д.Г., Островский А.Г.*

## Расчётные сценарии длительного воздействия моря

(для Северо-Восточной части Черного моря)

$H$  - высота волн,  $T$  - период,  $N$  - число циклов,  $n$  - границы доверительного интервала

Событие	Длительность	$H_{1/3}$ , м	$T_{avg}$ , с	$N$	$n$
МРШ-3 <sup>а</sup>	3 часа	6.89	9.3	1162	3.5
МРШ-7 <sup>б</sup>	7 часов	6.00	9.057	2783	3.891
Дневное	24 часа	3.62	6.522	13 248	4.0
Недельное	7 дней	3.19 <sup>в</sup> / 1.99 <sup>г</sup>	6.561 <sup>в</sup> / 5.663 <sup>г</sup>	92 182	4.418
Месячное	30 дней	2.58 <sup>в</sup> / 1.41 <sup>г</sup>	6.043 <sup>в</sup> / 4.736 <sup>г</sup>	428 927	4.892
Годовое	365 дней	1.45	4.836	6 521 092	5.327
Десятилетнее	10 лет	0.84	3.863	81 636 035	5.731

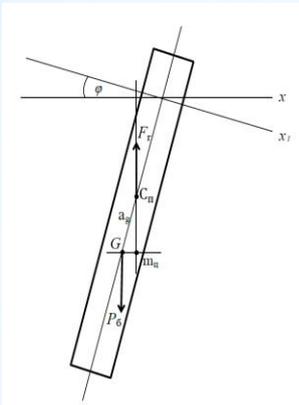
<sup>а</sup> Наиболее активная фаза (3 часа) максимального расчётного шторма (МРШ)

<sup>б</sup> Максимальный расчётный шторм (7 часов)

<sup>в</sup> Определено как среднее значение для, соответственно, 7 и 30 дней с наибольшими значениями  $H_{1/3}$

<sup>г</sup> Определено как максимальное скользящее среднее для соответствующего периода

Расчет плавучести, устойчивости и основных размеров буя



## Основные параметры буя

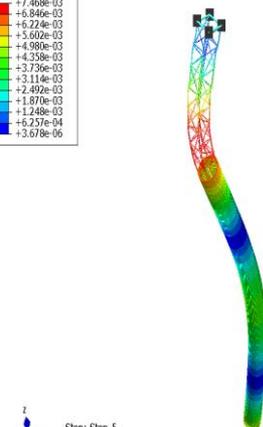
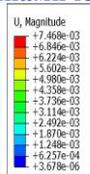
### Железобетонная часть

Длина – 33 м  
Осадка – 30 м  
Наружный диаметр – 2.4 м  
Толщина стенок – 0.15 м  
Материалы – бетон В80, арматура А1000, А500С

### Стальная надводная часть

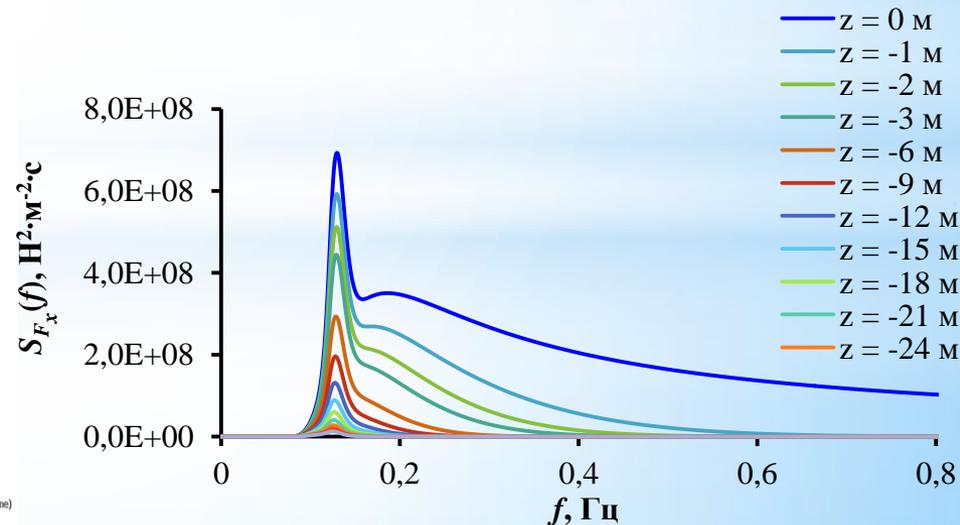
Высота – 12 м  
Материал – сталь С345  
Профили – L 250x20,  
Общая масса буя – 103,6 т  
Плавучесть – 31 т  
Высота балласта (вода) – 10 м  
Собственные частоты колебаний:  
вертикальные – 0,09 Гц  
наклонные – 0,05 Гц

## Расчет и моделирование устойчивости буя при динамических нагрузках



Step: Step-5  
Node: 6 Value = 3556.3 Freq = 9.4912 (cycles/time)  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +3.000e+02

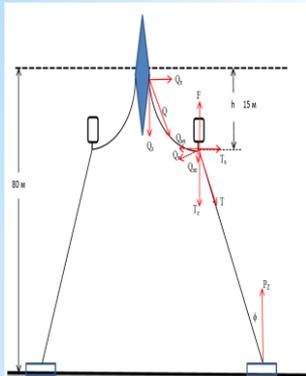
## Спектральная плотность горизонтальной компоненты гидродинамической нагрузки для расчётного сценария МРШ-7



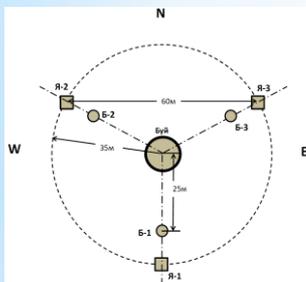
# Разработка и испытание системы якорного крепления стабилизированного буй (2012 г.)

Южное отделение ИОРАН, г. Геленджик -  
Очаковский комбинат ЖБИ, г. Москва

Схема приложения сил



Якорная система в плане



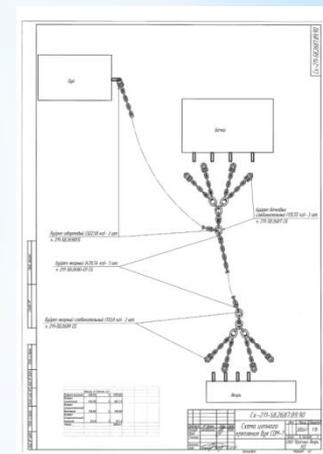
Промежуточные плавучести –  
железобетонные «бочки» - демпферы



Плоские железобетонные якоря

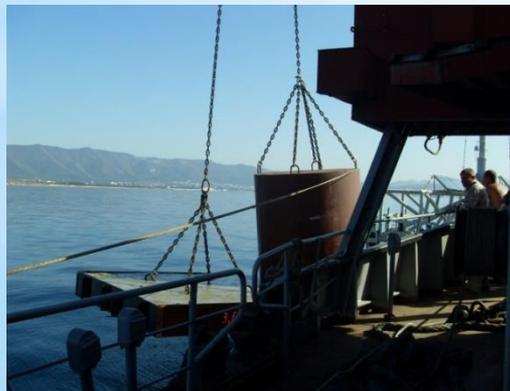


Цепные соединения



Буй – волновой генератор электроэнергии  
(Очаковский комбинат ЖБИ)

Процесс постановки

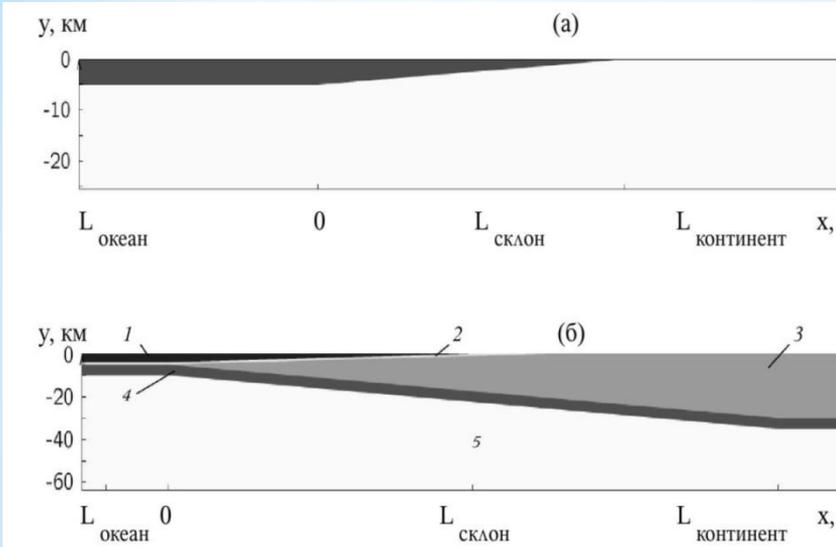


Конец постановки буй – генератора  
плавучим краном



# Полноволновое численное моделирование распространения сейсмоакустических полей по океаническому волноводу

## Модели океанического волновода

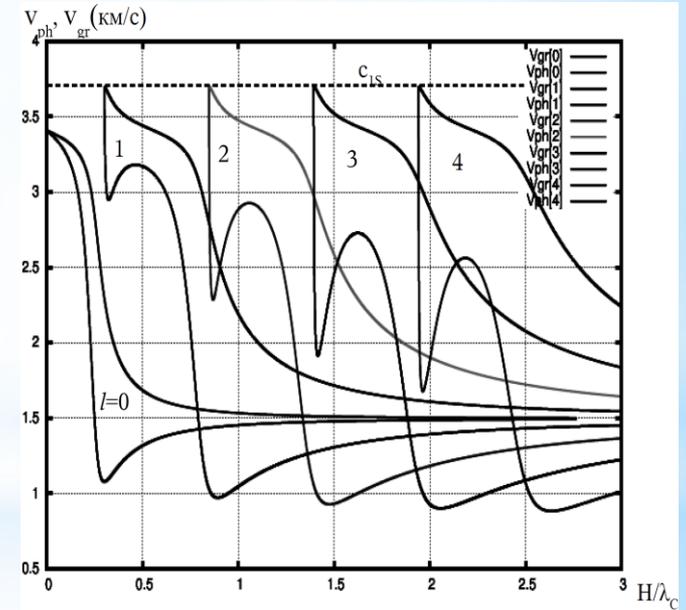


Простая модель (а). Сложная модель (б):  
 1- водный слой, 2 — осадки, 3 — континент,  
 4 — океаническая кора, 5 - основание

## Дисперсионное уравнение

$$\operatorname{tg} \left[ \frac{\omega}{v} H \left( v^2/c^2 - 1 \right)^{1/2} - l\pi \right] = \left( \rho_1/\rho \right) \left( c_{1S}^4/v^4 \right) v^2/c^2 - 1 \left( 1 - v^2/c_{1P}^2 \right)^{-1/2} \times \\ \times \left[ 4 \left( 1 - v^2/c_{1P}^2 \right)^{1/2} \left( 1 - v^2/c_{1S}^2 \right)^{1/2} - \left( 2 - v^2/c_{1S}^2 \right)^2 \right] = X$$

$$c_{1P} > c_{1S} > v_T > c$$



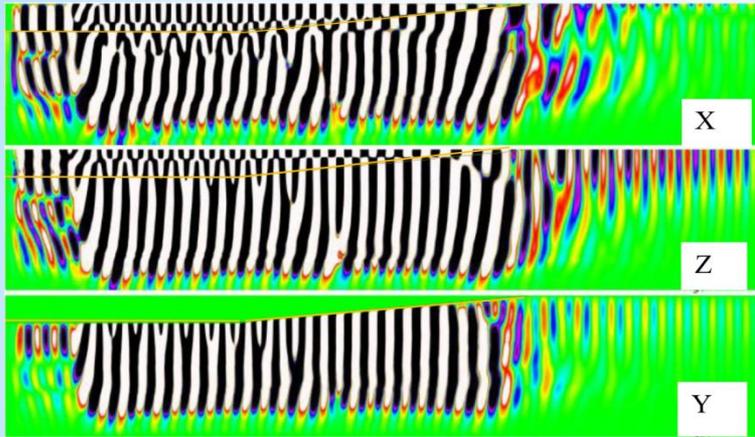
## Критические частоты

$$f_{l\text{кр}} = \frac{c}{2H \left( 1 - c^2/c_{1S}^2 \right)^{1/2}} \left[ l - \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\rho_1 \left( c_{1S}^2/c^2 - 1 \right)^{1/2}}{\rho \left( 1 - c_{1S}^2/c_{1P}^2 \right)^{1/2}} \right]$$

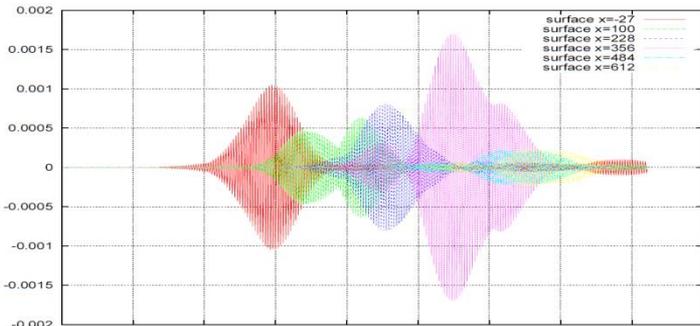
Номер моды $l$ :	1	2	3	4
$f_{\text{кр}}$ (Тихий океан, $H = 4$ км)	0,103	0,307	0,512	0,713

# Распространение сейсмоакустического поля на континентальном склоне

Склон  $L = 50 \text{ km}$ ;  $F = 0,3\text{Hz} > F_{kr} = 0,1\text{Hz}$



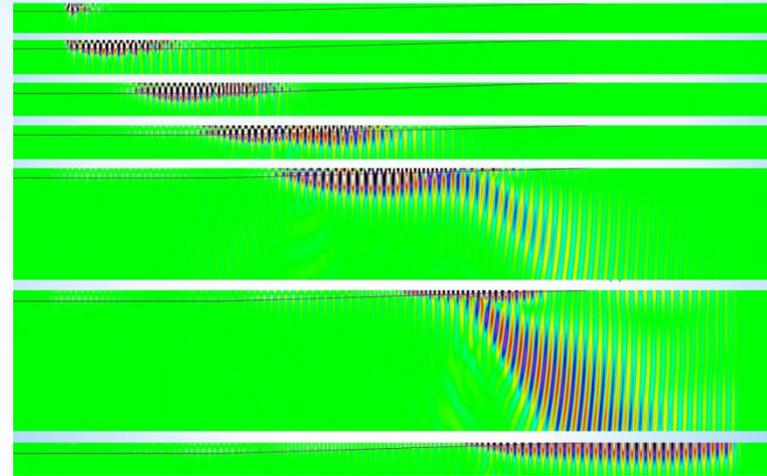
Синтетические сейсмограммы в сечениях континентального склона ( $F=0,28 \text{ Гц}$ ,  $H=5 \text{ км}$ ,  $L_{\text{склона}} = 500 \text{ км}$ ,  $\Delta X = 128 \text{ км}$ )



Расстояние (км)	- 27 + 100	100 + 228	228 + 356	356 + 484	484 + 612
Средняя групповая скорость (км/с)	1,43	1,13	1,28	1,28	3,4

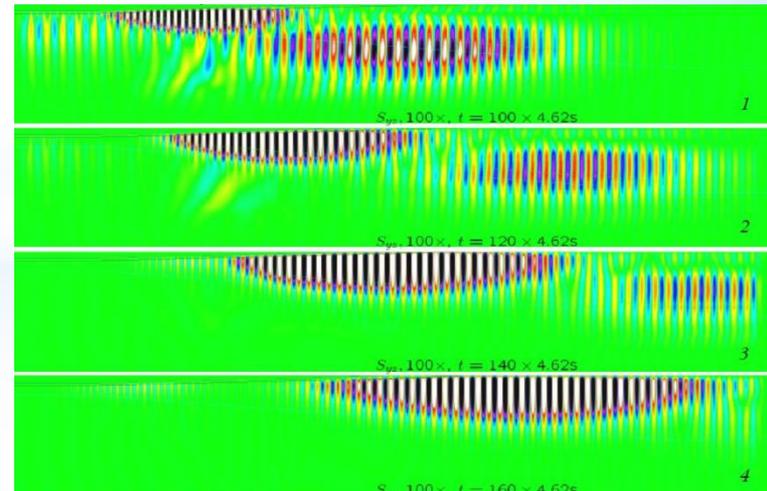
Распространение части поля в континентальный склон.

Простая модель среды.  $V_y$ ; Склон  $L = 500 \text{ км}$ ;  $F = 0,3\text{Hz} > F_{kr} = 0,1\text{Hz}$



Распространение части поля под континент.

Сложная модель среды.  $V_y$ ; Склон  $L = 500 \text{ км}$ ;  $F = 0,3\text{Hz} > F_{kr} = 0,1\text{Hz}$



# Выводы

\*В настоящее время в основном используются два принципиально различных метода для обнаружения волн цунами – специальные исследования сейсмических сигналов от землетрясений с целью оценки их цунамигенности и непосредственное измерение уровня океана донными станциями. В соответствии с первым методом для принятия решения об объявлении тревоги цунами руководствуются «магнитудно-географическим» критерием. Поскольку сейсмографы обычно находятся на суше в значительном удалении от очага землетрясения, регистрация сейсмических сигналов происходит с большими искажениями. Сильная зависимость параметров цунами от механизма очага землетрясения и его глубины, от глубины океана и тектонических особенностей региона делает этот критерий недостаточно надежным.

\*Основные недостатки систем измерения уровня океана состоят в значительной инерционности принятия решений и относительно большой стоимости эксплуатации в связи с необходимостью периодической замены как донных, так и надводных элементов (через 1-2 года). Время принятия решений здесь складывается из времени добегания волны цунами в район расположения измерительной системы и времени выделения характерного сигнала из помех. Сильные цунамигенные землетрясения чаще всего происходят в зонах субдукции, т.е. в относительной близости к берегу. Поэтому время обнаружения для локальных и части региональных цунами оказывается в ряде случаев недостаточным для принятия решений.

\*Основная часть сильных цунамигенных землетрясений в регионах Камчатки, Курильскими и Японскими островами происходит между побережьем и осью глубоководного желоба, с расстоянием очагов от ближайшего берега в пределах 100 – 200 км. При скорости распространения цунами порядка 200 м/с это расстояние волна пройдет менее чем за 15 – 20 минут. За это время можно провести некоторые мобилизационные мероприятия, но это совершенно недостаточно для эвакуации населения и организации масштабных защитных мероприятий. В связи с этим для данного региона необходимо, наряду с известными, разрабатывать и другие методы прогноза, в первую очередь, краткосрочного прогноза источников цунами - сильных морских землетрясений с неглубоким расположением очага.

\*Предлагается совмещать систему непосредственного обнаружения волн цунами с системой изучения возможных предвестников сильных цунамигенных землетрясений и располагать подобную обсерваторию в непосредственной близости к районам ожидаемых сильных морских землетрясений в зоне субдукции. Оснащать эти обсерватории кроме широкополосных низкочастотных сейсмографов с датчиками сильных движений, высокочастотными измерителями сейсмоакустической эмиссии, а также низкочастотными и высокочастотными гидрофонами. Для определения уровня океана использовать хорошо известный кварцевый измеритель давления. Для измерения параметров придонного слоя воды использовать стандартные измерители солености, температуры и давления, а также, измеритель прозрачности воды.

\*В качестве несущей платформы предлагается использовать стационарные стабилизированные буи. Такие буи мало подвержены воздействию ветра и волн, не вращаются, что позволяет соединять их кабелями с донной аппаратурой, имеют большую массу (до 100 т), поэтому могут быть оснащены источниками постоянного питания (волновыми, ветровыми и солнечными генераторами), качественными метеостанциями, измерителями течений и другой аппаратурой, надежными системами спутниковой связи. Подобные исследовательские буи для разных целей периодически разрабатывались и использовались в ряде стран (США, Франции, России). Ресурс такого буя может составлять до 10 – 20 лет. Стоимость в основном определяется оснасткой.

*Спасибо за внимание*

