

Стационарные стабилизированные буи и проблема раннего обнаружения цунами

Д.Г. Левченко¹, В.Д. Левченко²,

¹ *Институт Океанологии им. П.П. Ширшова, Москва*

² *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)

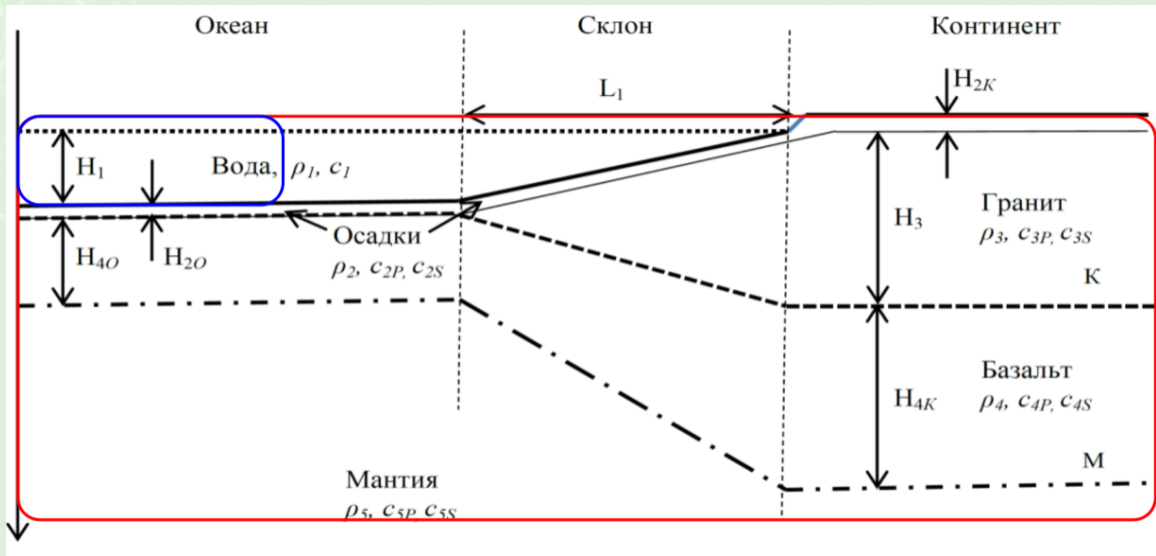
$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_s}{\partial x_s} = S,$$

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 $O(\Delta_x^{N_{\text{order}}})$;
- ▶ Рунге-Кутты (RK) или ADER для интегрирования по времени $O(\Delta_t^{N_{\text{ader}}})$.

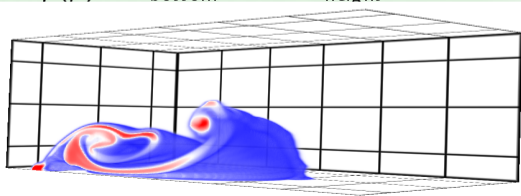


Постановка задачи моделирование: возбуждение гравитационных волн

Модель 2-х компонентного потока: уравнение Эйлера + адвекции

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} &= 0 & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F_i^{Eu}}{\partial x_i} &= S, & U &= (\rho, \rho u_j, \alpha) \\ \frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j + p \delta_{ij})}{\partial x_i} &= (\rho - \rho_0) \vec{g} \alpha & \rho & \text{— динамическое давление, } \nabla p_0 = \rho_0 \vec{g} & F_i^{Eu} &= [\rho u_i, \rho u_i u_j + p \delta_{ij}, u_i \alpha] \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} &= 0 & \alpha & \text{— объёмная доля воды } (\alpha_{\text{вода}} + \alpha_{\text{воздух}} = 1). & S &= (0, (\rho - \rho_0) \vec{g}, \alpha \frac{\partial u_i}{\partial x_i}) \text{— источники,} \\ & & & & & \text{Граничные условия: непротекания при } z = -z_{\text{bottom}} \\ & & & & & \text{свободного вытекания на остальных границах} \end{aligned}$$

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



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

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

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

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

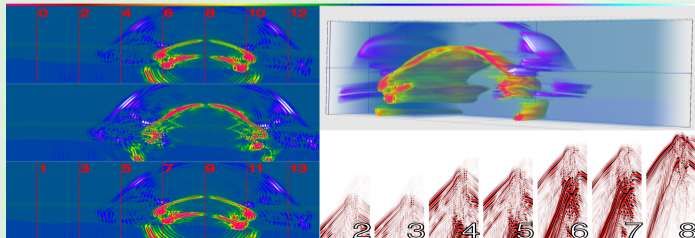
$$\frac{\partial U_p}{\partial t} + C_{pq}^i \frac{\partial U_q}{\partial x_i} = S_p.$$

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 Ξ , $\|\xi_k\|^2 = \int_L \xi_k^2 dV$):

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

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

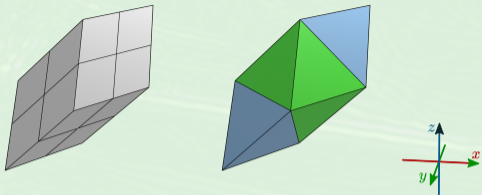
$$\mathcal{F}_s = \mathcal{F}_s(U_L, U_R) = \frac{1}{2} [F_s(U_L) + F_s(U_R) - |c_s|_{\max}(U_R - U_L)]. \quad (2)$$

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

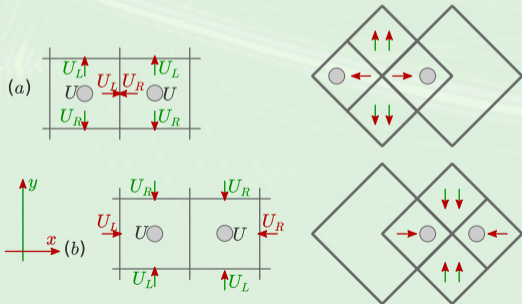
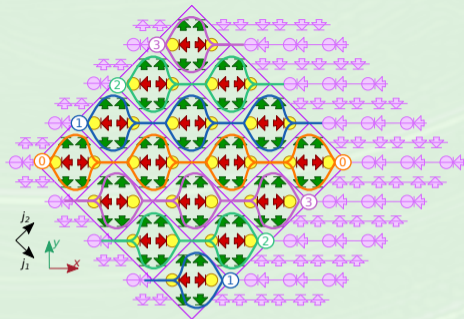
$|c_s|_{\max}$ — максимальное по абсолютному значению собственное число матрицы C^s .

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

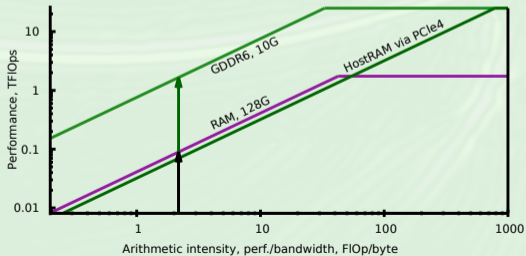
LRnLA алгоритмы DoReMincer:



LRnLA ячейка в 3D



компактное обновление ячейки

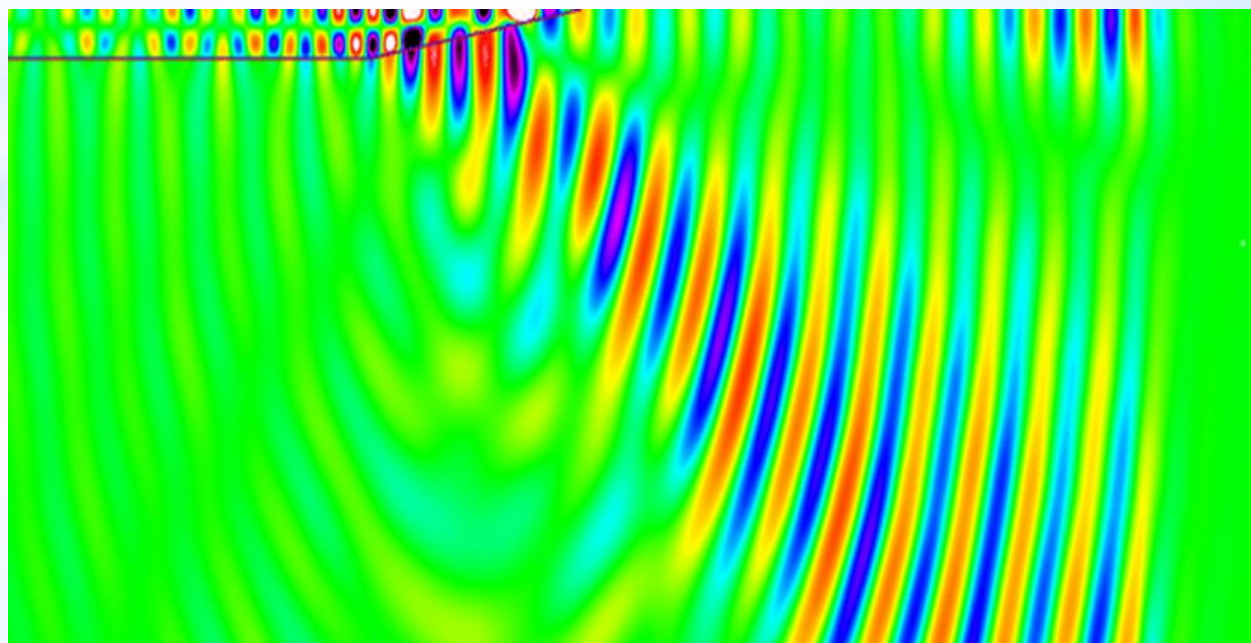


СТАЦИОНАРНЫЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ БУИ И ПРОБЛЕМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЦУНАМИ

Д.Г. Левченко¹, В.Д. Левченко²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

²Институт прикладной математики им М.В. Келдыша РАН



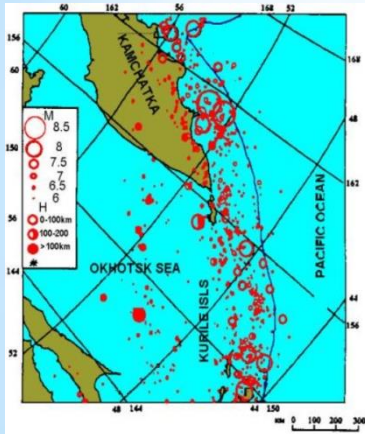
Системы предупреждения о цунами опасности

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



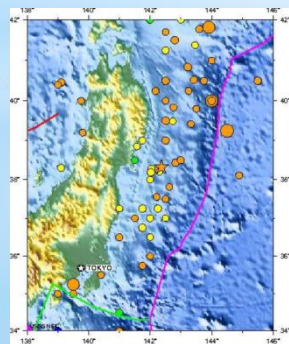
Вследствие геодинамических особенностей Северо-Восточных окраин Азии (Камчатка, Курильские и Японские острова) основная часть сильных цунамигенных землетрясений происходит между побережьем и осью глубоководного желоба, с расстоянием очагов от ближайшего берега до 100 – 200 км.

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.)

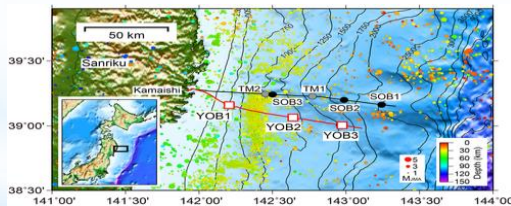
Землетрясения с магнитудой 7 и выше в центральной части Японских островов с 1900 по 2016 годы



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

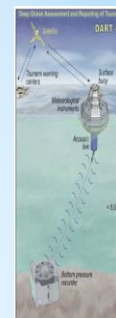
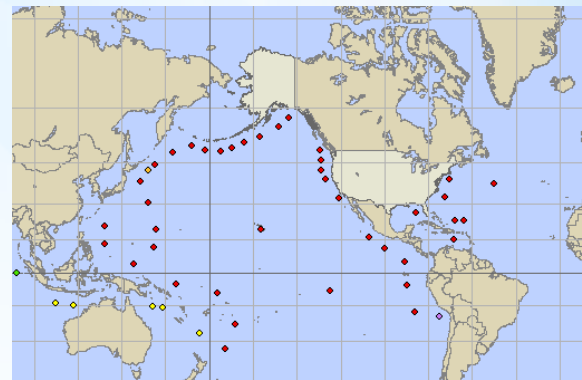
Система содержит акселерометр JA-5, с частным диапазоном 0,01 - 10 Гц, чувствительностью $\pm 1.0 \mu\text{G}$ и порогом 10^{-6} м/с^2

Содержит систему измерения давления для обнаружения волн цунами



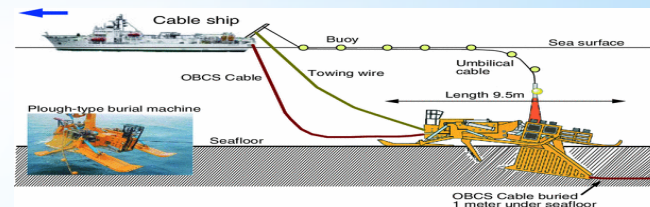
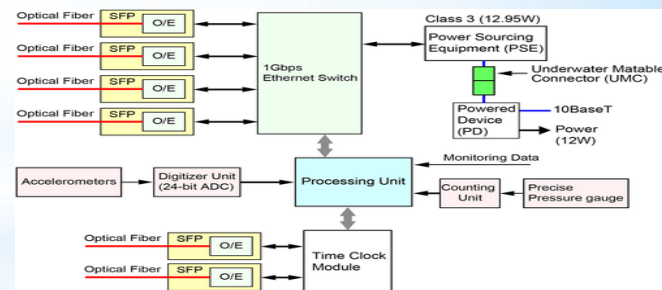
Система обнаружения волн цунами DART

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

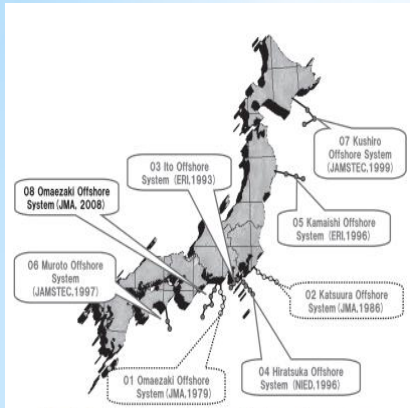
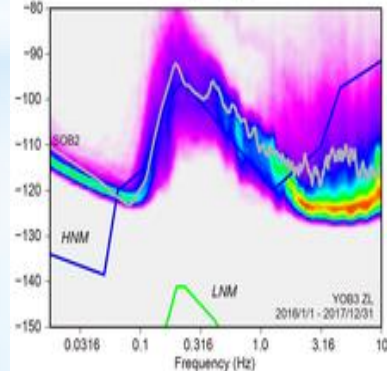
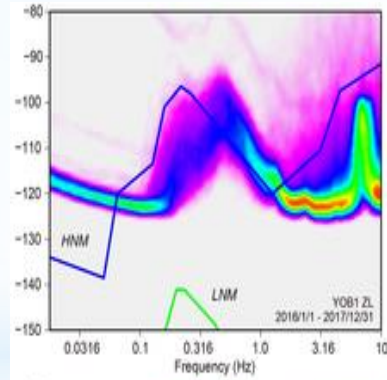


Fig. 1 Sea areas with seismographic observation systems.

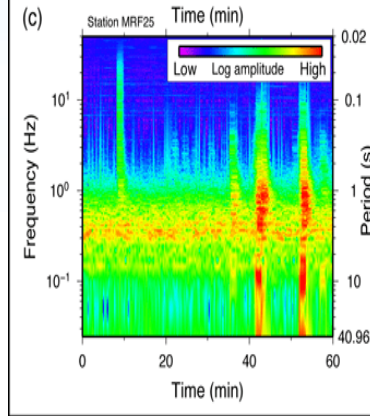
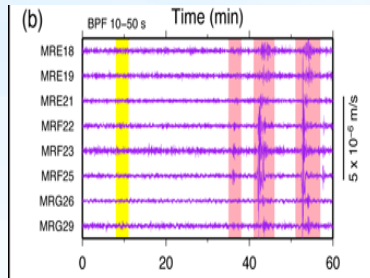
Table 1 Installation locations and organizing authority.

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

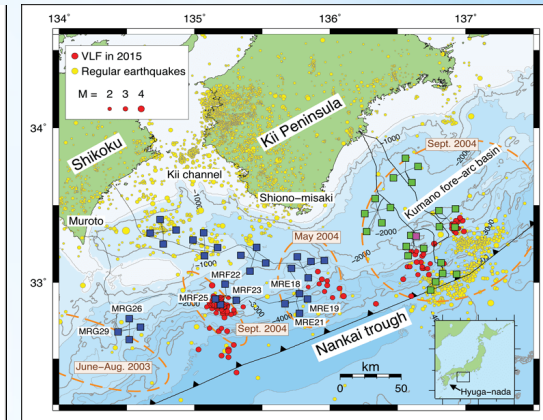
Уровень сейсмических шумов на станции Тохоку за 2017 и 2018 годы (сейсмографы 1 и 3)



Регистрация сверхнизкочастотных землетрясений



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



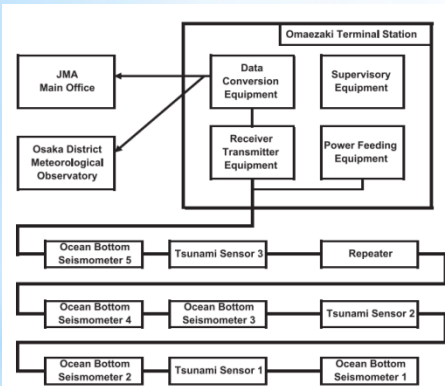
Станции DONET1 (зеленые квадраты), DONET2 (синие квадраты) и скважинная станция (фиолетовый квадрат в области сети DONET1)

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 $\pm 1.0 \mu\text{G}$



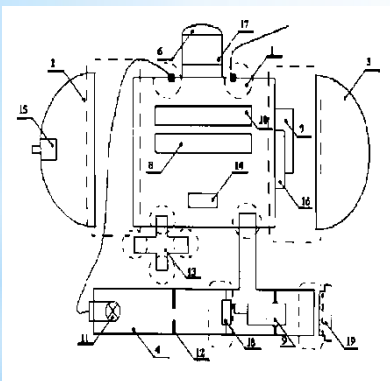
Донная гидрофизическая обсерватория для исследования возможных предвестников сильных морских землетрясений (ИО РАН 1995 – 1999гг. Договор с МЧС РФ)

Измеряемые величины

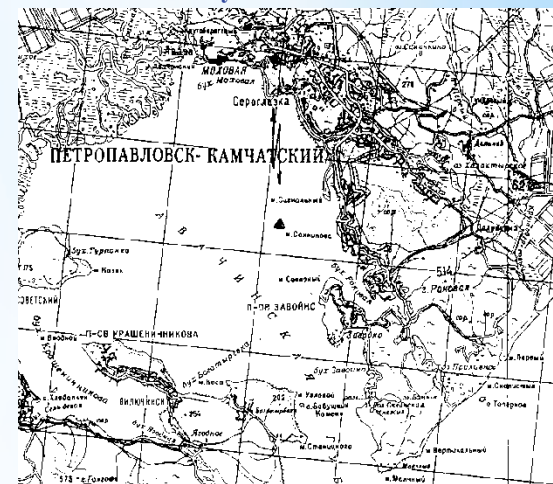
Наименование	Диапазон измерения	Погрешность
Датчик температуры (ТСП)	-1°C+25°C	0,03°C
Датчик электропроводности	2÷6,5См/м	0,05См/м
Датчик давления (тензометр)	8÷10МПа	0,05%
Датчик рН	6÷10ед.	0,1ед.
Датчик скорости течения (импеллер)	2,5÷150см/с	2,5см/с
Датчик скорости звука	1400÷1500м/с	±0,3м/с
Спектрометр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



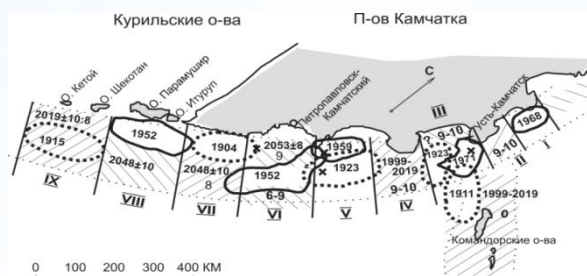
Структурная схема



Место установки обсерватории в Авачинской бухте Камчатки



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



Внешний вид перед постановкой

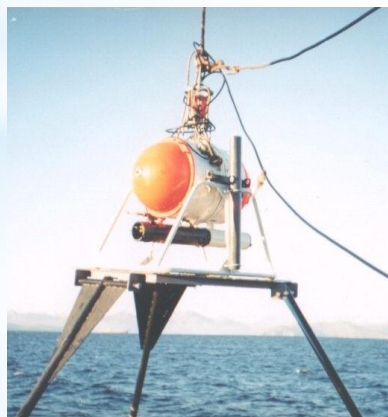
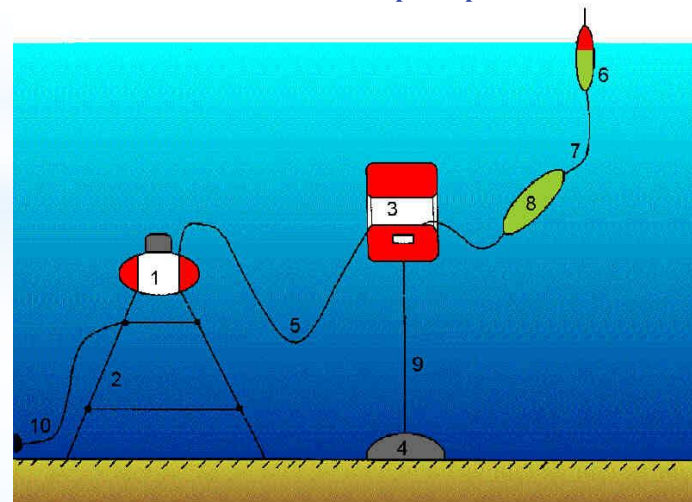
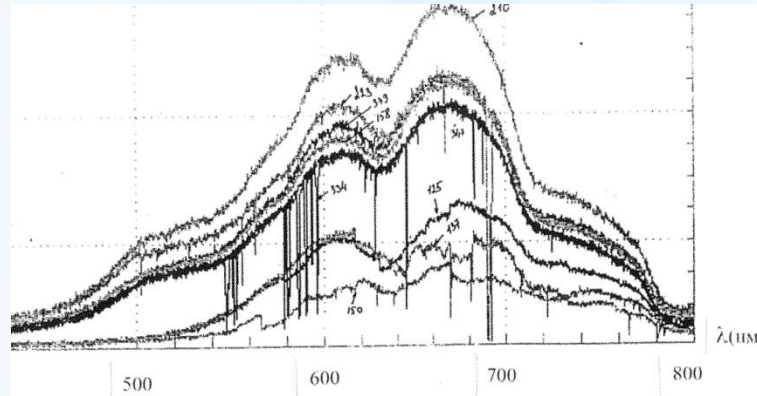


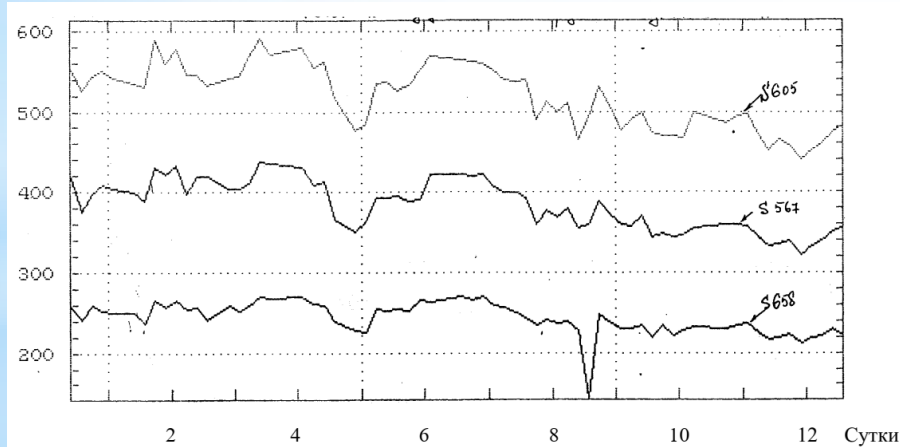
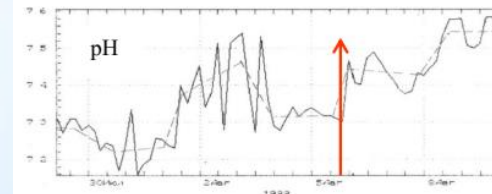
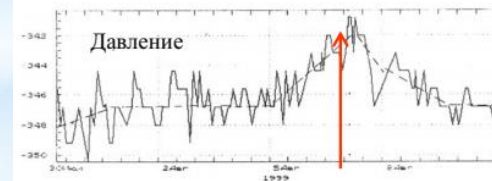
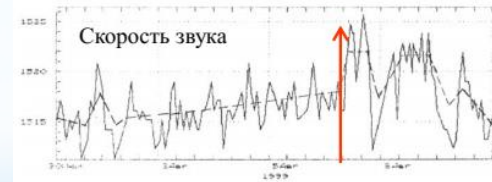
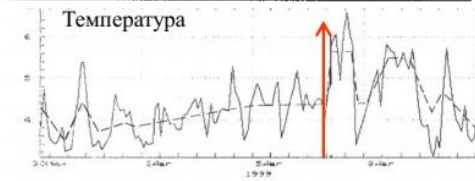
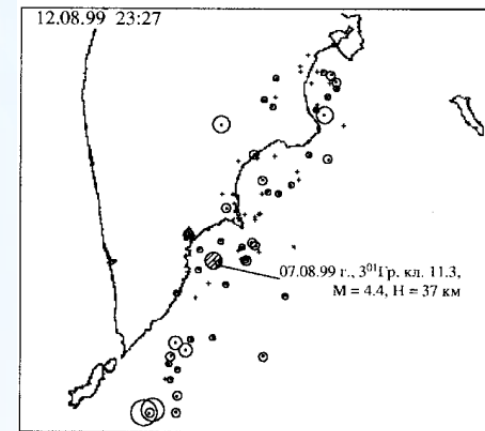
Схема постановки обсерватории на дно



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



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

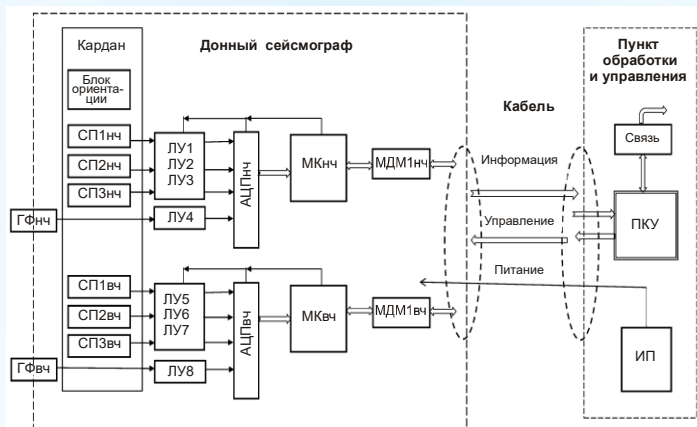
Широкополосный кабельный донный сейсмограф ИОРАН

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

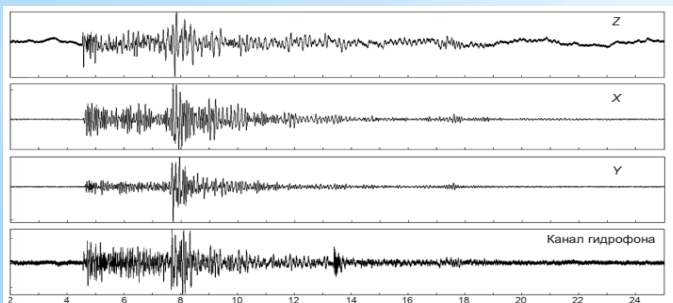
СМЕ4111 (НЧ)

MTSS2003 (ВЧ),

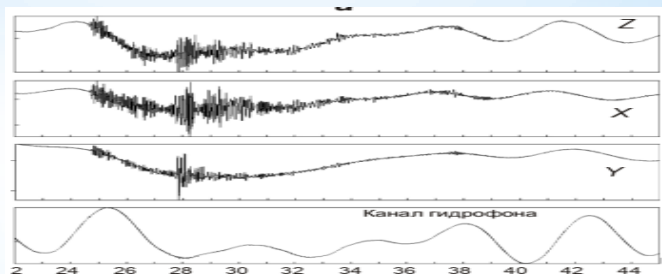


Число сейсмических каналов X, Y, Z	3 НЧ и 3 ВЧ
Число гидроакустических каналов	1 НЧ и 1 ВЧ
Частотный диапазон НЧ тракта	0.01–20 Гц
Частотный диапазон ВЧ тракта	1–500 Гц
Усиление аналогового сигнала (управляемое)	0–36 дБ (шаг 6 дБ)
Динамический диапазон (при усилении 0 дБ)	120 дБ
Разрядность АЦП	24 бит
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

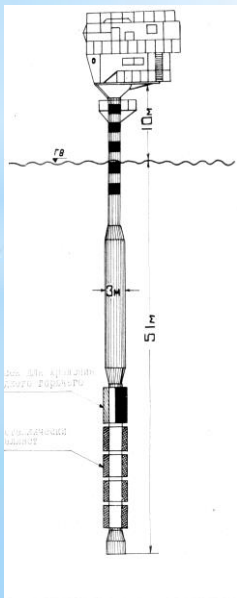
Новое предложение: Использовать напряженный железобетон для изготовления корпуса буя и основных элементов якорной системы

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.



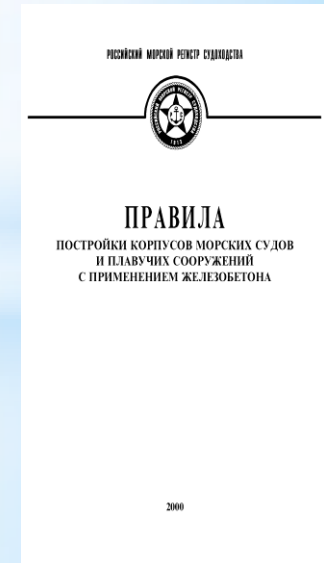
СССР, ИОАН
1974 – 1982 гг.



США, «FLIP»,
1962 г. – Наст. время



Возможность изготовления
из напряженного железобетона



Расчет и моделирование железобетонного стационарного стабилизированного буя

Расчет плавучести, устойчивости и основных размеров 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

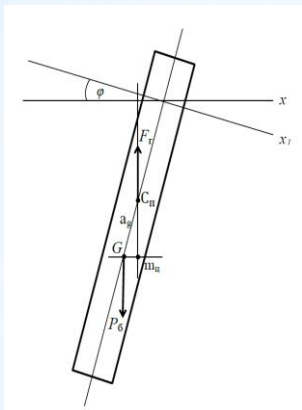
Событие	Длительность	$H_{1/3}$, м	T_{avg} , с	N	n
МРШ-3 ^а	3 часа	6.89	9.3	1162	3.5
МРШ-7 ^б	7 часов	6.00	9.057	2783	3.891
Дневное	24 часа	3.62	6.522	13 248	4.0
Недельное	7 дней	3.19 ^в / 1.99 ^г	6.561 ^в / 5.663 ^г	92 182	4.418
Месячное	30 дней	2.58 ^в / 1.41 ^г	6.043 ^в / 4.736 ^г	428 927	4.892
Годовое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

^а Наиболее активная фаза (3 часа) максимального расчётного шторма (МРШ)

^б Максимальный расчётный шторм (7 часов)

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

^г Определено как максимальное скользящее среднее для соответствующего периода



Основные параметры буя

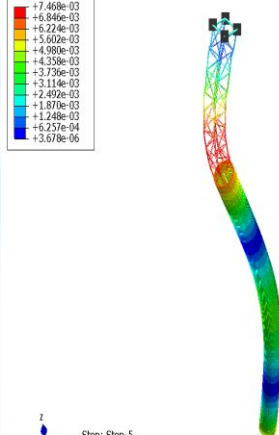
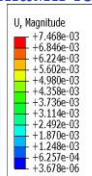
Железобетонная часть

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

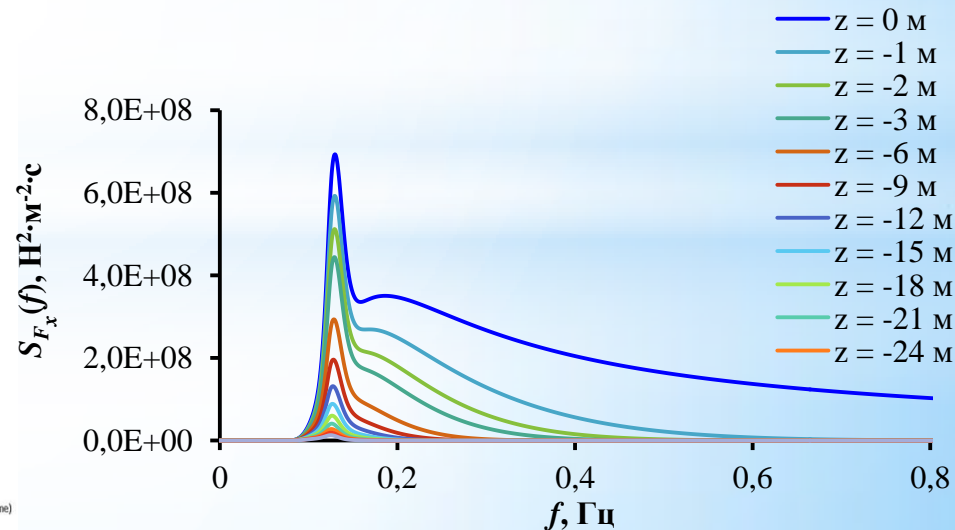
Высота – 12 м
Материал – сталь С345
Профили – L 250x20,
Общая масса буя – 103,6 т
Плавучесть – 31 т
Высота балласта (вода) – 10 м
Собственные частоты колебаний:
вертикальные – 0,09 Гц
наклонные – 0,05 Гц

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

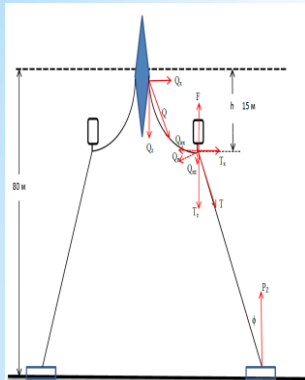
Спектральная плотность горизонтальной компоненты гидродинамической нагрузки для расчётного сценария МРШ-7



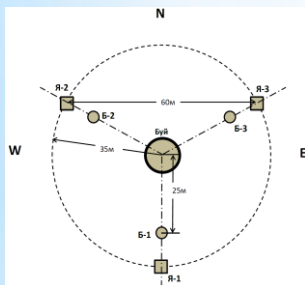
Разработка и испытание системы якорного крепления стабилизированного буй (2012 г.)

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

Схема приложения сил



Якорная система в плане



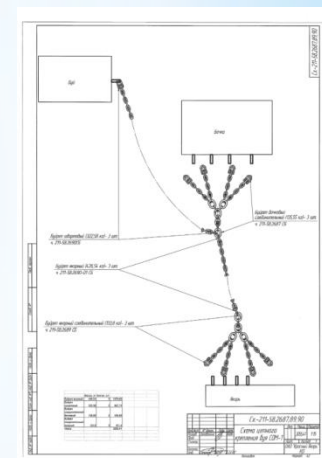
Промежуточные плавучести –
железобетонные «бочки» - демпферы



Плоские железобетонные якоря

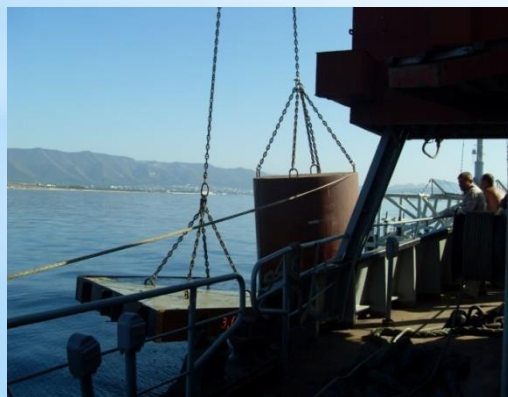


Цепные соединения



Буй – волновой генератор электроэнергии
(Очаковский комбинат ЖБИ)

Процесс постановки

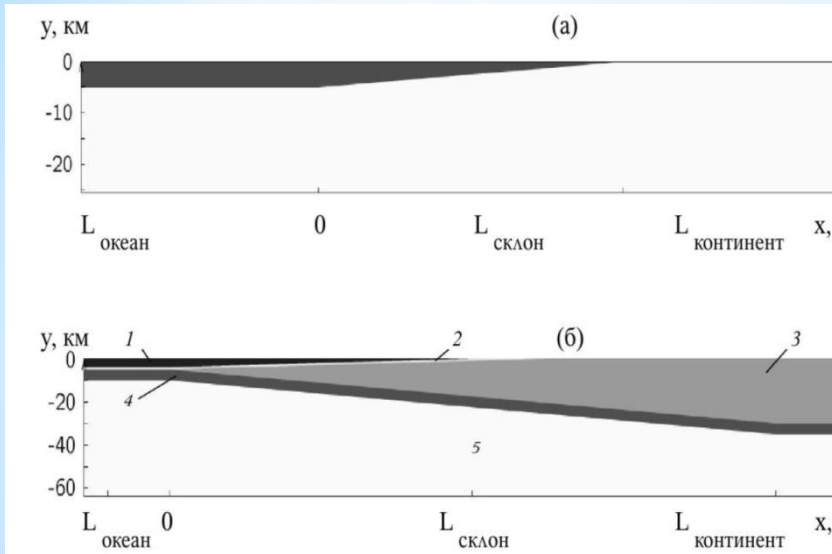


Конец постановки буй – генератора
плавучим краном



Полноволновое численное моделирование распространения сейсмоакустических полей по океаническому волноводу

Модели океанического волновода

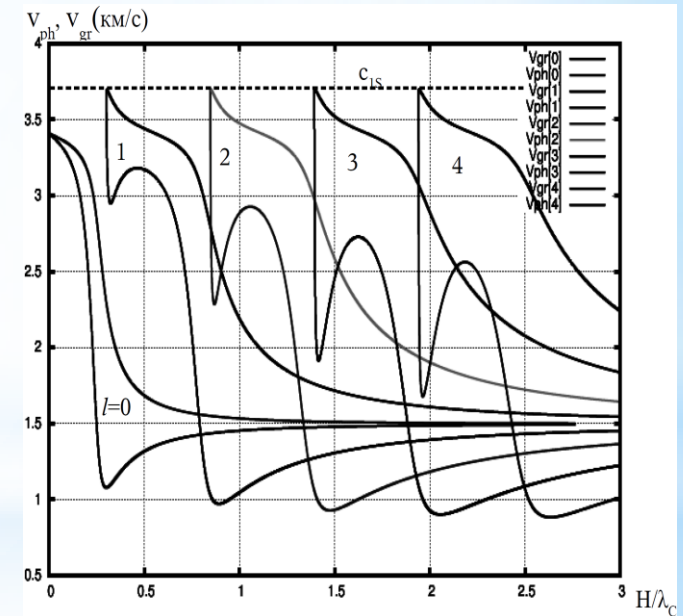


Простая модель (а). Сложная модель (б):
 1- водный слой, 2 — осадки, 3 — континент,
 4 — океаническая кора, 5 - основание

Дисперсионное уравнение

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

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



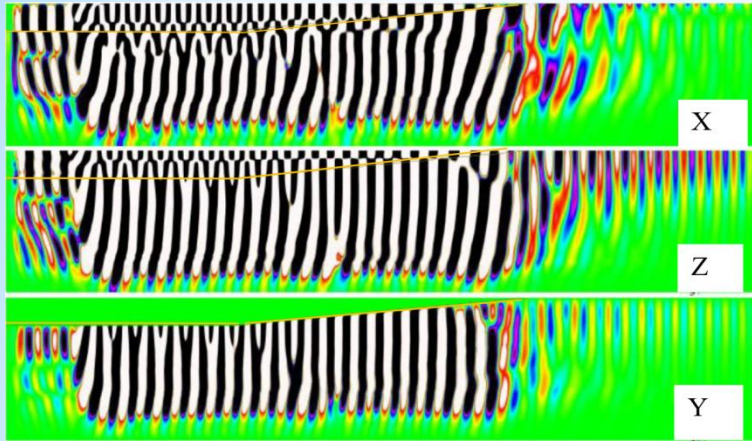
Критические частоты

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

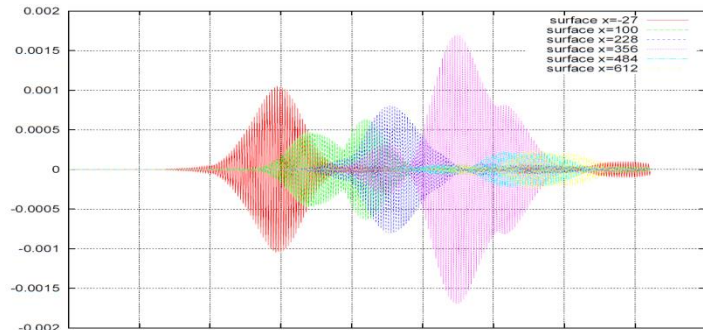
Номер моды l :	1	2	3	4
$f_{\text{кр}}$ (Тихий океан, $H = 4$ км)	0,103	0,307	0,512	0,713

Распространение сейсмоакустического поля на континентальном склоне

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



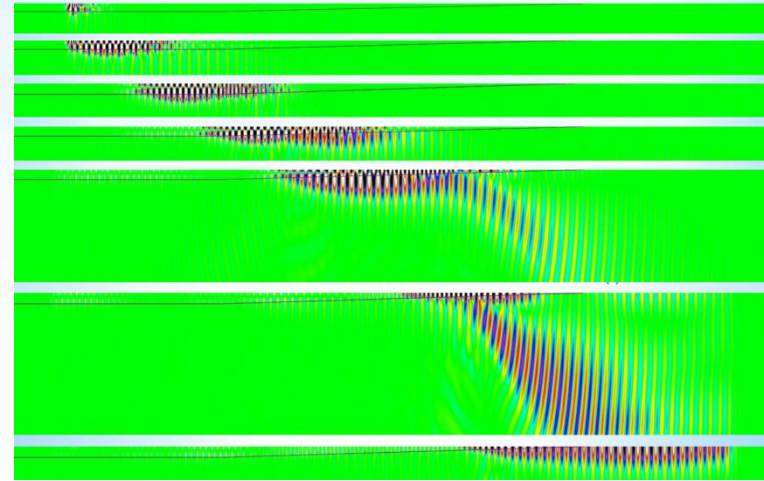
Синтетические сейсмограммы в сечениях континентального склона ($F=0,28 \text{ Гц}$, $H=5 \text{ км}$, $L_{\text{склона}} = 500 \text{ км}$, $\Delta X = 128 \text{ км}$)



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

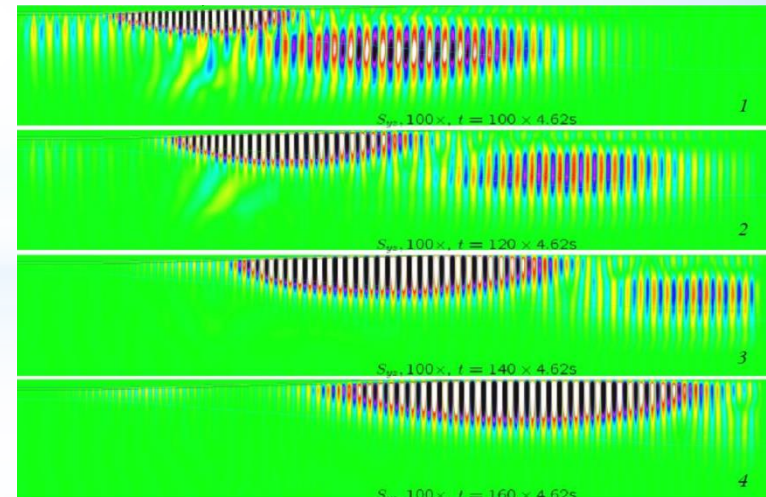
Распространение части поля в континентальный склон.

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 его 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

