



Численное моделирование в задачах оценки волнового воздействия на заякоренный гидротехнический объект

*С.А.Бейзель¹⁾, О.И.Гусев^{1),2)}, В.А.Кихтенко¹⁾,
Г.С.Хакимзянов^{1),2)}, Л.Б.Чубаров^{1),2)}*

*¹⁾Федеральный исследовательский центр
информационных и вычислительных технологий*

²⁾Новосибирский государственный университет



- Одна проблема:
 - Цунамибезопасное размещение важного технического объекта (ПХГ) в бухте
- Две задачи:
 1. Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта
 2. Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами



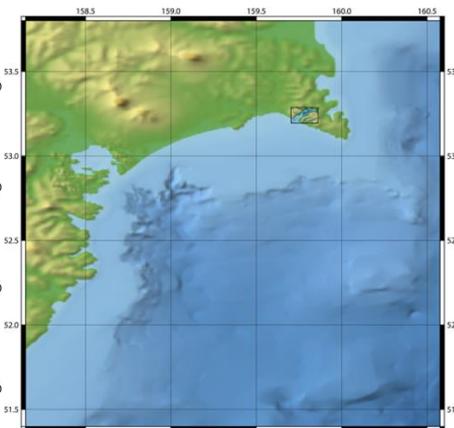
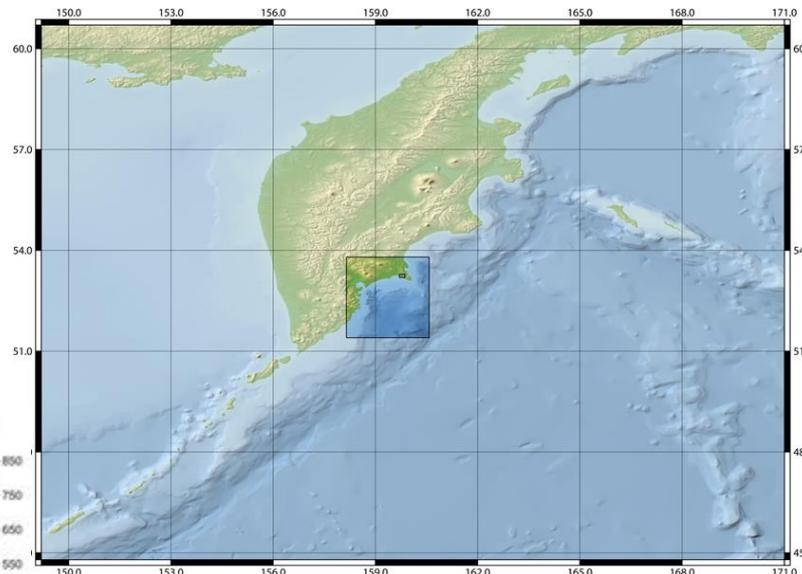
Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта (постановка задачи)



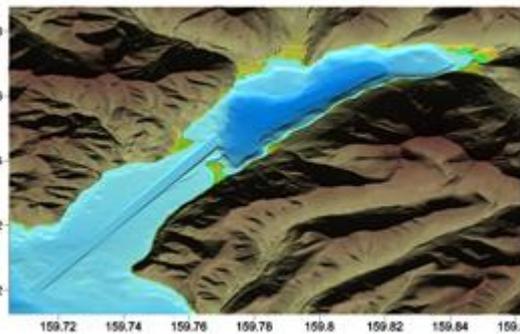


Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта (постановка задачи)

«Глобальная» расчетная область: шаг оцифровки 30 угловых секунд

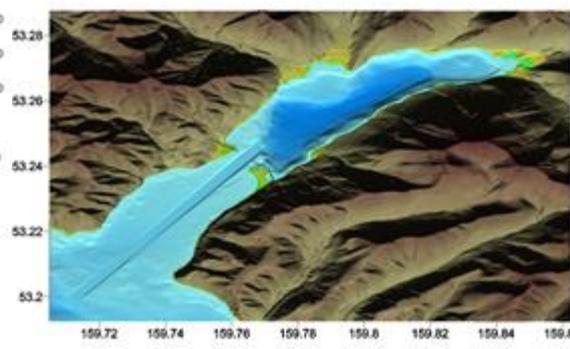


«Промежуточная» расчетная область: шаг оцифровки 5 угловых секунд

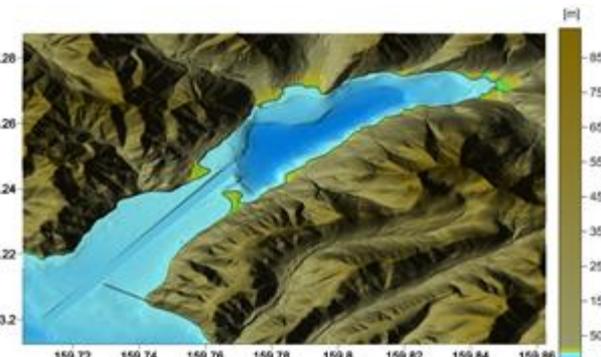


«канал»

«Локальная» расчетная область: шаг оцифровки 0.5 угловых секунд



«стена-1»



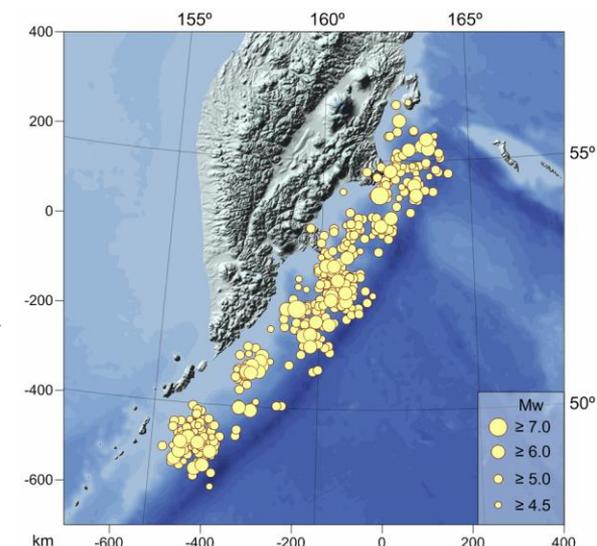
«стена-2»



Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта (построение каталога модельных землетрясений)

При генерации выборки источников (выборе распределения по магнитудам) учитывались следующие факторы:

1. *Ограниченность* области размещения очагов потенциально опасных для «защищаемого» пункта цунамигенерирующих землетрясений;
2. *Необходимость* учёта полного (по магнитудам) набора источников;
3. *Прямая связь* между магнитудой землетрясения и его «цунамиопасностью» (при фиксировании остальных параметров) и, следовательно, его значимостью;
4. *Логарифмическая связь* между магнитудой землетрясения и размерами соответствующих площадок разлома (очаги с магнитудами 9.0 и 8.9 имеют гораздо бóльшую разницу в размерах, чем с магнитудами 8.0 и 7.9);
5. *Сужение интервалов изменения параметров* источников землетрясений с ростом их магнитуд (в первую очередь положения очага).



Пункты **2, 3 и 4** говорят о том, что источников с большой магнитудой должно быть довольно много, а **5-й** – что источников с малой магнитудой должно быть тоже достаточно для того, чтобы полноценно представить всевозможное многообразие их параметров.

Так не будут пропущены те из них, которые в силу своего «удачного» расположения являются опасными.



Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта (построение каталога модельных землетрясений, особенности методики)

Так как размер созданной выборки довольно мал, то при использовании равномерного распределения для магнитуд и координат эпицентров с большой вероятностью появятся области явного сгущения и разрежения.

Чтобы обойти этот эффект, «случайность» генерируемой выборки была несколько нарушена с помощью метода районированной выборки (stratified sampling), следуя которому вся область генерируемых магнитуд разбивалась на подобласти (интервалами по 0.2 балла) и в каждую подобласть случайным образом помещалось равное число значений.

Для определения координат эпицентров (центроидов площадки разрыва, без учета глубины) использовался несколько модифицированный алгоритм Митчелла (Mitchell 1991):

1. Некоторым случайным образом генерируется выборка S размером n .
2. Генерируются $t*n$ новых равномерно распределенных точек.
3. Для каждой новой точки рассчитывается минимальное расстояние до точек из S с учётом расстояния (по геодезической на сфере) не до всех точек из S , а только до источников с близкими магнитудами. Без этого вблизи источников с большой магнитудой не окажется источников с малой. Для того чтобы учесть логарифмичность шкалы магнитуд, близость определяется по значениям сейсмических моментов, а не самих магнитуд. Максимальная разница между сейсмическими моментами, при которой точки еще влияют друг на друга в алгоритме Митчелла, выбрана равной $5.2*10^{21}$. Вначале источники упорядочиваются по убыванию магнитуды.
4. Выбирается новая точка с наибольшим таким расстоянием, такая точка добавляется к множеству S .
5. шаги 1 – 4 повторяются до получения выборки S нужного размера.

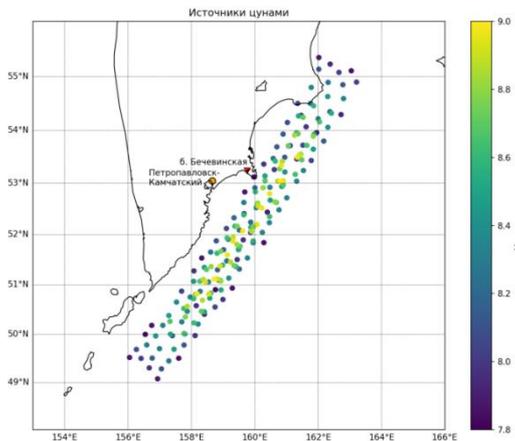


Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта

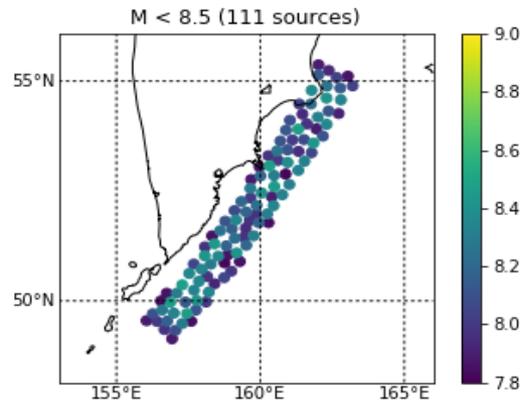
(построение каталога модельных землетрясений)

Схемы расположения центровидов модельных цунамигенерирующих землетрясений

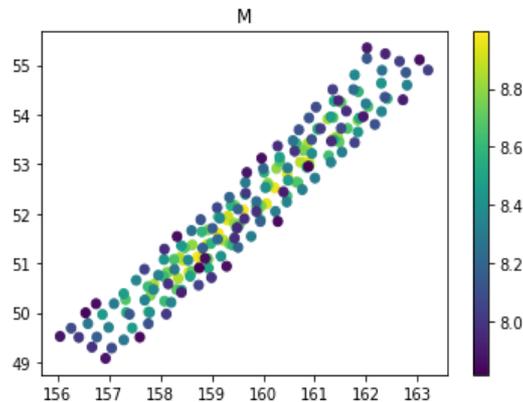
Дополнительный источник данных – результаты исследований палеоцунамими (Т.К.Пинегина)



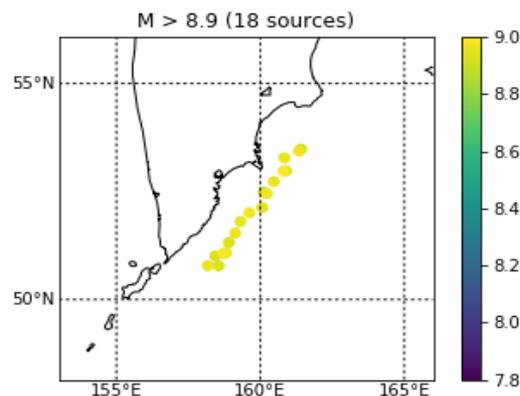
Для всех модельных землетрясений



Для землетрясений с магнитудой < 8.5.



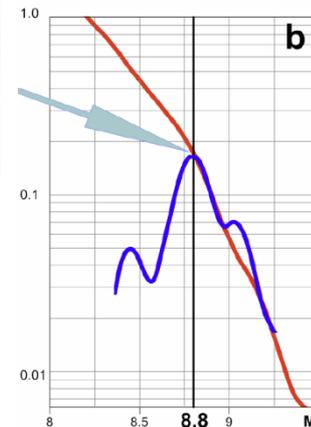
Распределение по магнитудам



Для землетрясений с магнитудой > 8.9.



повторяемости по горизонтальным заплескам и по сильнейшим землетрясениям



- по наклону плоскости разлома (*dip*)
- по направлению подвижки в плоскости разлома (*rake*)
- по азимуту площадки разлома (*strike*)

С привлечением экспертных оценок А.В.Ландера



Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта



(определение повторяемости сейсмических источников)

Плотность повторяемости источников представляется в виде: $w(Q) = W_{all} \cdot p_M(M) \cdot p_\Omega(Q|M)$,

где: W_{all} – суммарная повторяемость всех источников цунами в исследуемой области, которая определяется по данным исторических каталогов и/или палеоисследований;

$p_M(M)$ – плотность вероятности для магнитуд землетрясений, соответствует закону Гутенберга-Рихтера, определяется на следующих этапах исследования, соответствует наклону графика в законе повторяемости;

Плотность распределения остальных параметров при фиксированной магнитуде определяется с помощью специализированного генератора соответствующих случайных величин

(random_quakes_upper_slab.exe, **А.В. Ландер**).

Величина $p_M(M)$. Для непараметрической оценки плотности распределения выбран алгоритм Kernel density estimator из пакета scipy (https://docs.scipy.org/doc/scipy-0.15.1/reference/generated/scipy.stats.gaussian_kde.html) с использованием данных из каталога ISC.

«Мы не предполагаем априори какой-либо определенной параметрической формы этого закона [повторяемости]», (Пинегина и Ландер 2018).

$$W_{all} \approx \frac{N_{paleo} \cdot N}{T_{paleo} \cdot \sum_{i=1}^N b(I_i, I_{paleo}) \cdot P_i} \approx 0.0777.$$

Величина W_{all} определялась с использованием данных исследований палеоцунами (**Т.К.Пинегина, А.В.Ландер, 2018**):

T_{paleo} – глубина данных палеоисследований в защищаемом регионе (4200 лет); N_{paleo} – число (33) выявленных цунами с амплитудами на урезе, превышающими I_{paleo} (5 м) – выбрана путем экспертных оценок при сравнении данных палеоисследований (**Т.К.Пинегина, А.В.Ландер, 2018**) с результатами численного моделирования:

Leonid Chubarov, Vladimir Kikhtenko, Alexandr Lander, Oleg Gusev, Sonya Beisel, Tatiana Pinegina. 2020. Technique of near-field probabilistic tsunami zoning applied to the Bechevinskaya Cove (the Kamchatka Peninsula) Preprint on <https://essoar.org> (2020) DOI: 10.1002/essoar.10503252.1



Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта

(определение повторяемости события цунами)

После вычисления величин $p_M(M)$ и W_{all} можно вычислять интегралы цунамиопасности для **любой** характеристики $I(Q)$:

- максимальный уровень свободной поверхности (амплитуда волны) для всех узлов локальной области;
- максимальный размах уровня свободной поверхности (высота волны) для всех узлов локальной области;
- максимальная скорость потока в узле расчетной области для всех узлов локальной области;
- максимальная высота заплеска в точке линии уреза (для всей линии уреза локальной области с разрешением 10 м на точку);
- максимальная дальность заплеска по нормали к начальному положению линии уреза в некоторой ее точке.

Интеграл цунамиопасности вычисляется методом Монте-Карло.

Для этого он представляется в виде математического ожидания некоторой случайной величины, которое оценивается по некоторой конечной выборке:

$$W(I > I_{thre}) = \int_{\Omega} b(I(Q), I_{thre}) \cdot w(Q) = W_{all} \int_{\Omega} \frac{b(I(Q), I_{thre}) \cdot p_M(M)}{p_{uni}(M)} \cdot p_{uni}(M) \cdot p_L(Q|M) dQ =$$

$$W_{all} E \frac{b(I(Q), I_{thre}) \cdot p_M(M)}{p_{uni}(M)} \approx \frac{W_{all}}{N} \sum_{i=1}^N \frac{b(I(Q_i), I_{thre}) \cdot p_M(M_i)}{p_{uni}(M_i)} \approx \frac{W_{all}}{N} \sum_{i=1}^N b(I_i, I_{thre}) \cdot p_i.$$

Здесь $\{M_i, Q_i\}$ – некоторая выборка размера N случайной величины с плотностью $p_{uni}(M) \cdot p_L(Q|M)$, $p_{uni}(M)$ – плотность равномерного распределения по магнитудам, $I_i = I(Q)$, $p_i = p_M(M)/p_{uni}(M_i)$.

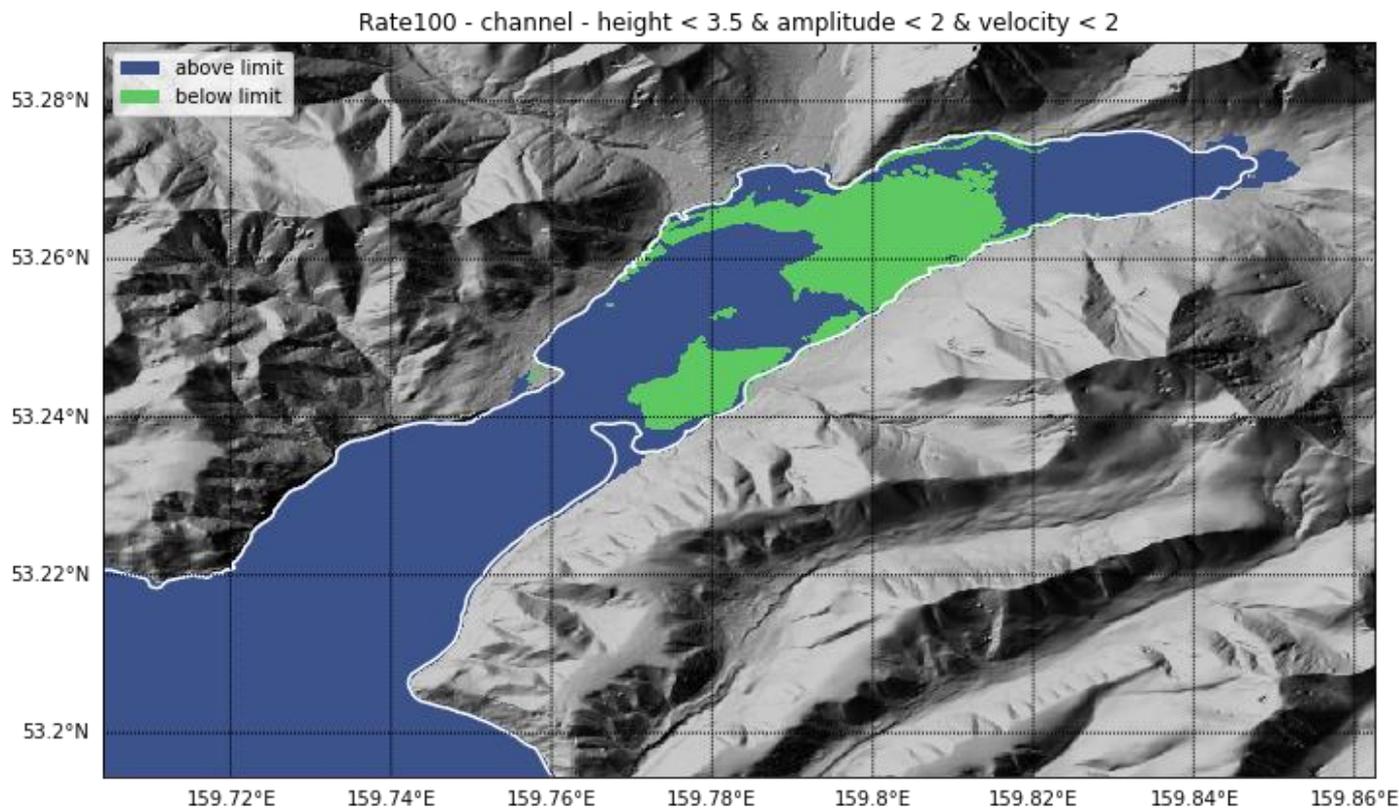


Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта (главный результат)

В изложенной выше постановке интеграл цунамиопасности позволяет определить **повторяемость превышения** некоторой пороговой характеристики.

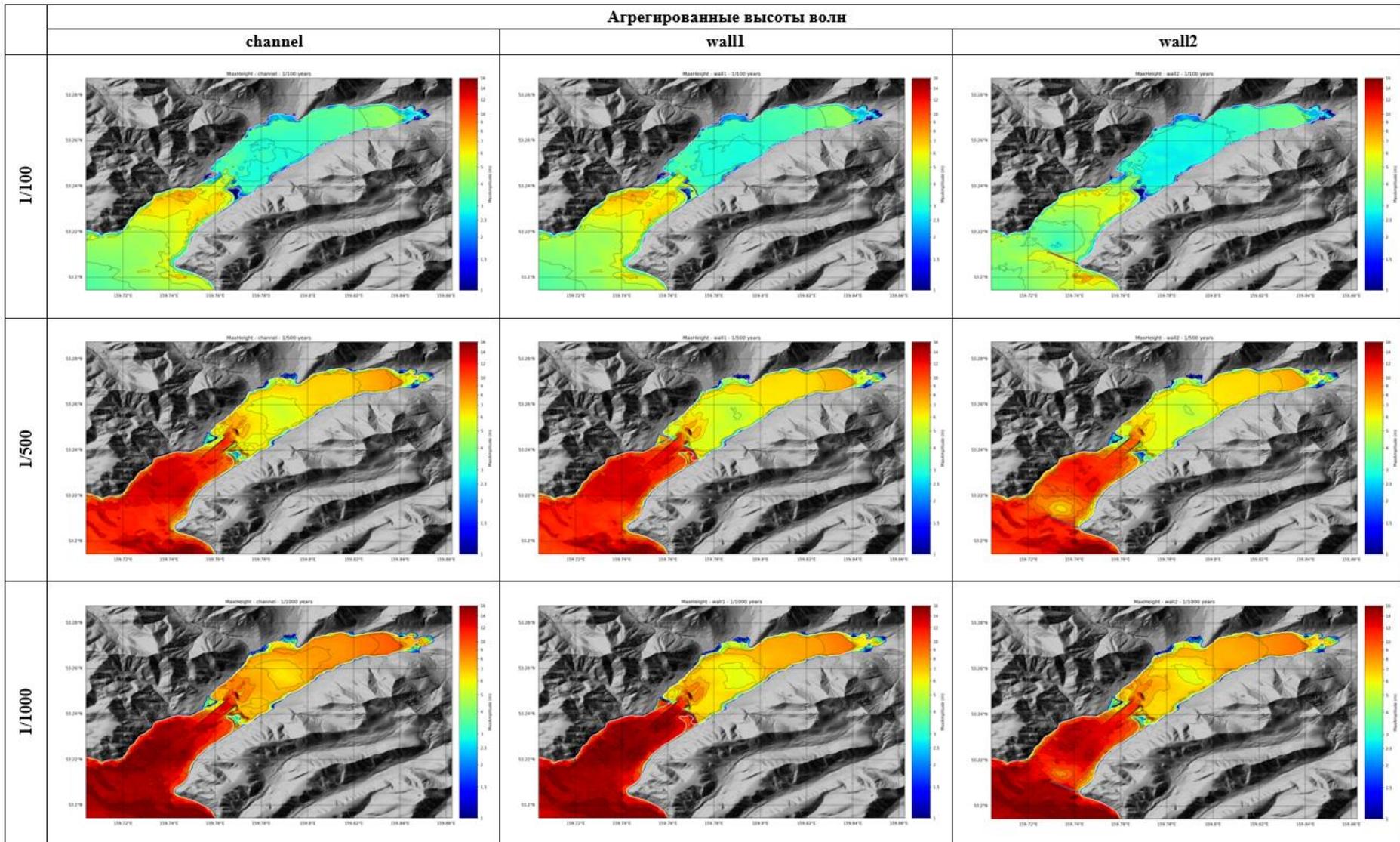
Возможна постановка задачи, в которой необходимо найти такие **значения пороговых характеристик**, которые **превышаются с заданной повторяемостью**.

Для нахождения этих значений полученная зависимость обращается.





Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта (главный результат – выбор конфигурации)





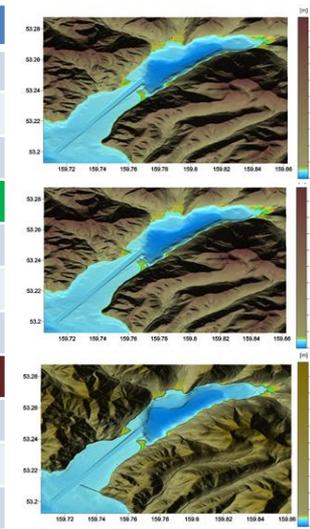
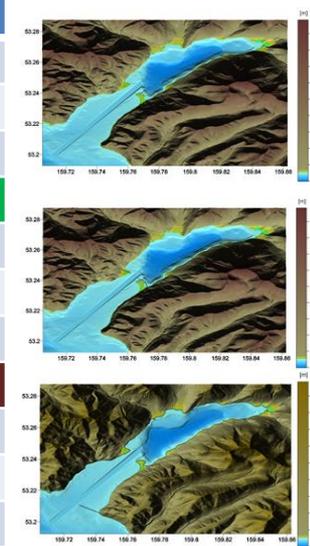
Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта



(главный результат – количественные оценки)

Вариант акватории channel:			
Повторяемость	W=1/100	W=1/500	W=1/1000
На внешней акватории бухты	4 ÷ 7	10 ÷ 17	20
На внутренней акватории бухты	3 ÷ 4	5 ÷ 7,5	7 ÷ 9
Вариант акватории wall1:			
Повторяемость	W=1/100	W=1/500	W=1/1000
На внешней акватории бухты	4 ÷ 7,5	12 ÷ 18	14 ÷ 20
На внутренней акватории бухты	3 ÷ 4	5 ÷ 7	5,5 ÷ 9
Вариант акватории wall2:			
Повторяемость	W=1/100	W=1/500	W=1/1000
На внешней акватории бухты	3 ÷ 6	18	до 20
На внутренней акватории бухты	3 ÷ 4	4,5 ÷ 6,5	5 ÷ 8
Вариант акватории channel:			
Повторяемость	W=1/100	W=1/500	W=1/1000
На внешней акватории бухты	1,7 ÷ 8	8 ÷ 11	8 ÷ 15
На внутренней акватории бухты	1,0 ÷ 2,7	1,5 ÷ 5	1,5 ÷ 7
Вариант акватории wall1:			
Повторяемость	W=1/100	W=1/500	W=1/1000
На внешней акватории бухты	1,7 ÷ 8	7 ÷ 10	8 ÷ 15
На внутренней акватории бухты	1,0 ÷ 2,7	1,5 ÷ 5	1,5 ÷ 5
Вариант акватории wall2:			
Повторяемость	W=1/100	W=1/500	W=1/1000
На внешней акватории бухты	1,7 ÷ 6,5	7 ÷ 10	до 12 ÷ 14
На внутренней акватории бухты	0,5 ÷ 2,1	1,5 ÷ 5	1,5 ÷ 4,5

Максимальная
высота волн [М]



Максимальный
модуль скорости
[М/сек]

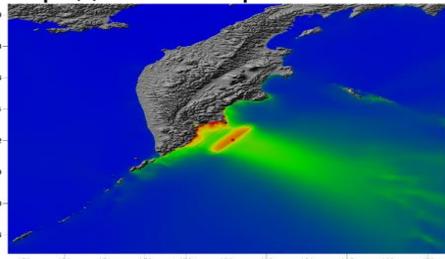


Задача 1: Вероятностная оценка цунамиопасности отдельных участков акватории бухты для выбора наименее опасного размещения объекта

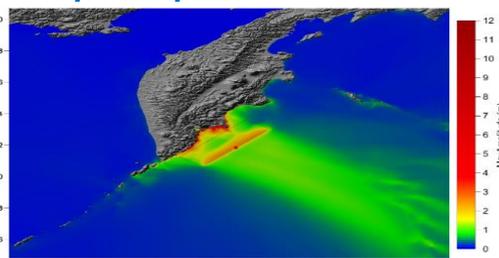


(главный результат – качественные оценки)

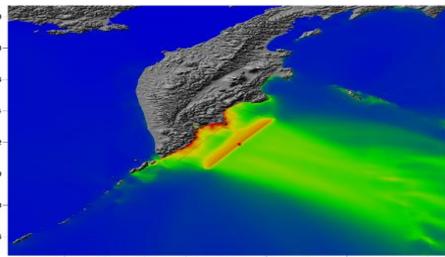
средняя повторяемость 1/100



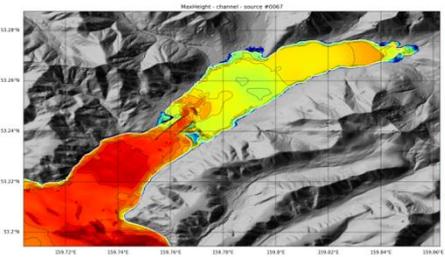
«Свечения» максимальных высот волн, рассчитанные для характерных источников



средняя повторяемость 1/500



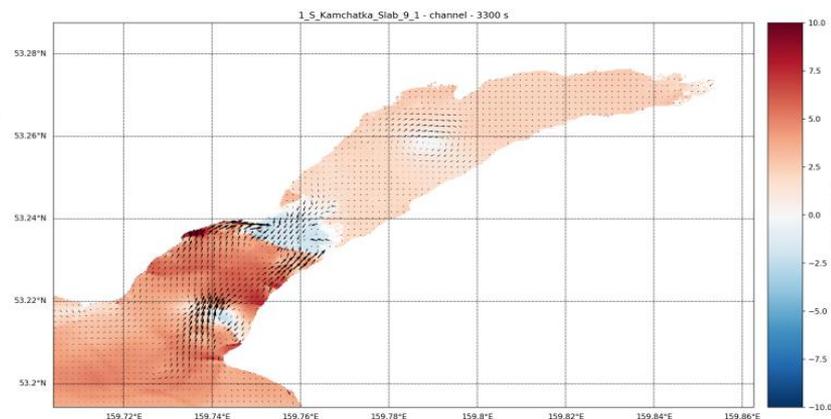
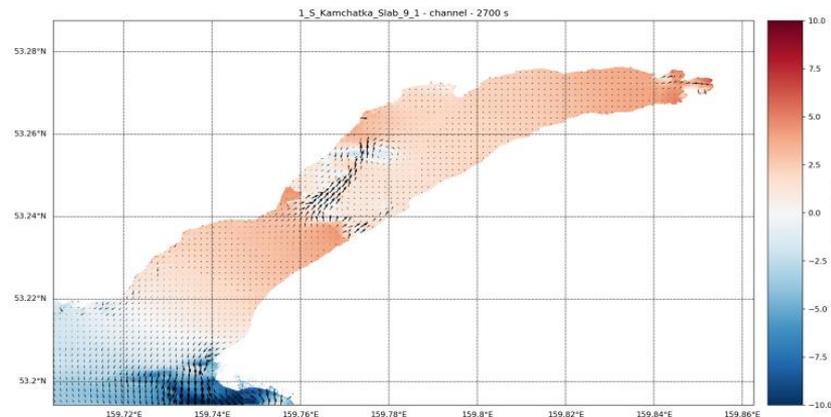
средняя повторяемость 1/1000



Максимальные высоты волн, рассчитанные для «характерного» источника (средняя повторяемость 1/500, компоновка «канал»)

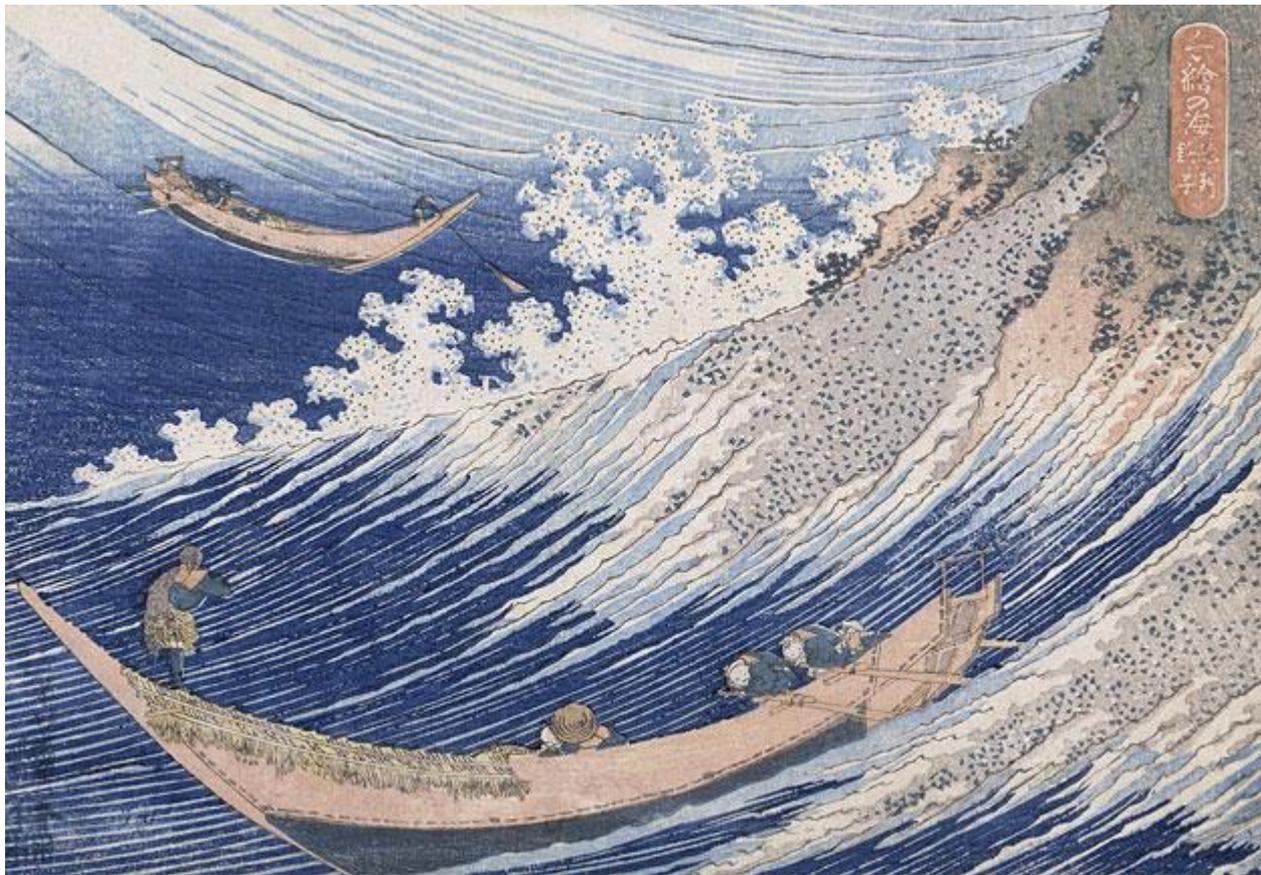
«Агрегированные» максимальные высоты волн (средняя повторяемость 1/500, компоновка «канал»)

Течения в бухте, рассчитанные для «модельного» источника с магнитудой 9.1



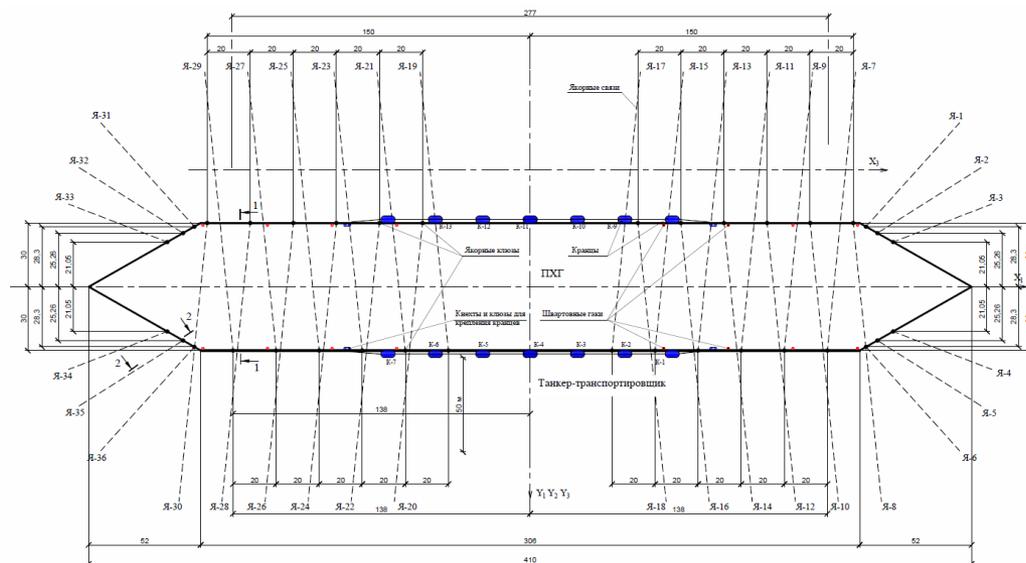
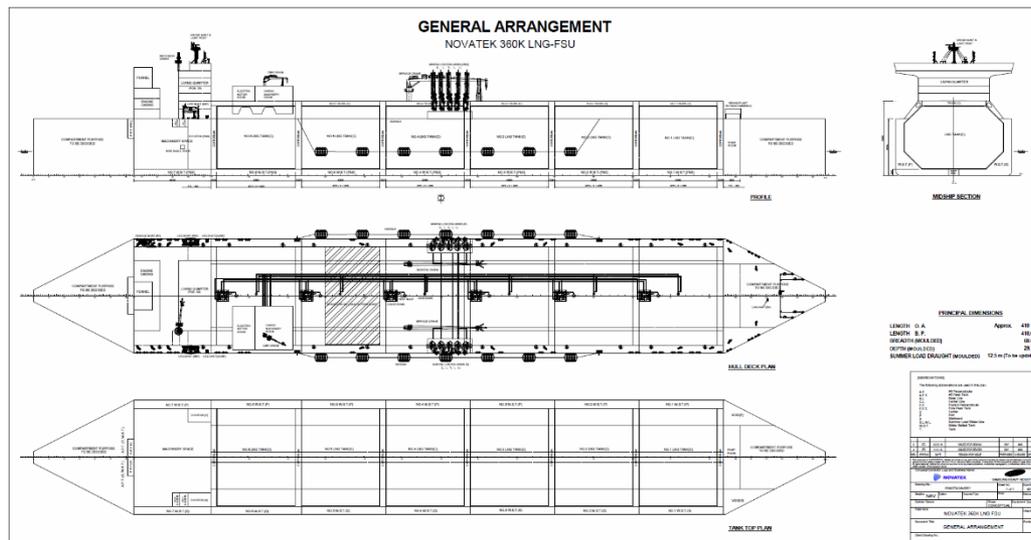
16.11.2020

Москва, МГУ, Цунами





Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами (постановка задачи)





Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами (модель потенциальных течений «Pot-модель» 2D)

Постановка задачи в рамках Pot-модели потенциальных течений предусматривает:

- решение уравнения Лапласа для потенциала вектора скорости;
- задание кинематического и динамического условий на свободной границе вне тела;
- условий непротекания на границе тела и границе «численного» гидроволнового бассейна.

$$\Phi_{xx} + \Phi_{yy} = 0, \quad (\eta_t + U\eta_x - V)|_{y=\eta(x,t)} = 0, \quad x \in D_e, \quad \left(\Phi_t + \frac{U^2 + V^2}{2} + g\eta \right) \Big|_{y=\eta(x,t)} = 0, \quad x \in D_e, \quad \text{где } U = \Phi_x, \quad V = \Phi_y.$$

Условия непротекания на границах:

$$\Phi_y \Big|_{y=-h_0} = 0, \quad x \in D, \quad \Phi_y \Big|_{y=d_0} = 0, \quad x \in D_i, \quad \Phi_x = 0, \quad x \in \Gamma_0, \quad -h_0 \leq y \leq \eta(x,t), \quad \Phi_x = 0, \quad x \in \Gamma, \quad d_0 \leq y \leq \eta(x,t).$$

Условие для свободной поверхности вблизи вертикальной непроницаемой границы: $\eta_x = 0$.

Масса вытекающей жидкости слева равна массе вытекающей справа: $Hu \Big|_{x_r-0} = Q = Hu \Big|_{x_r+0}$.

Из условия непрерывности давления на границе подобластей:

$$p \Big|_{x_r+0} = gS_0 \left(h_0 - \frac{S_0}{2} + \eta \Big|_{x_r-0} \right) + S_0 \frac{(S_0^2 - 3H^2)\varphi}{2H^3} \Big|_{x_r-0}, \quad p \Big|_{x_r-0} = gS_0 \left(h_0 - \frac{S_0}{2} + \eta \Big|_{x_r+0} \right) + S_0 \frac{(S_0^2 - 3H^2)\varphi}{2H^3} \Big|_{x_r+0}.$$

$$\text{Следовательно, } \dot{Q}(t) = -\frac{1}{L} (p \Big|_{x_r-0} - p \Big|_{x_r+0}) = -\frac{S_0}{L} \left[\left(g\eta + \frac{S_0^2 - 3H^2}{2H^3} \varphi \right) \Big|_{x_r+0} - \left(g\eta + \frac{S_0^2 - 3H^2}{2H^3} \varphi \right) \Big|_{x_r-0} \right],$$

Khakimzyanov G.S., Dutykh D. Long wave interaction with a partially immersed body. Part I: Mathematical models // Communications in Computational Physics. 2020. Vol. 27. pp. 321-378 .



Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(модель потенциальных течений «Pot-модель» 2D, вычисление силовых характеристик)

Для вычисления давления p в потенциальных течениях жидкости с постоянной плотностью используется интеграл Коши — Лагранжа:

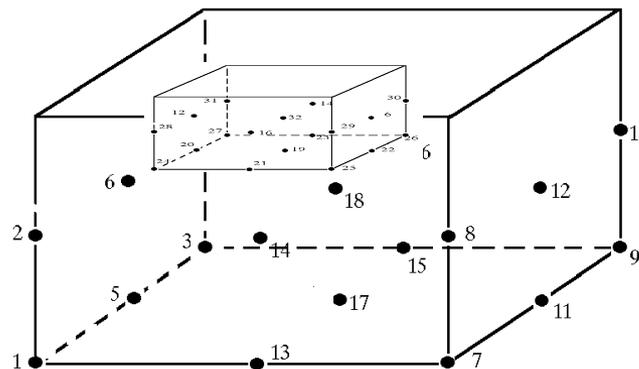
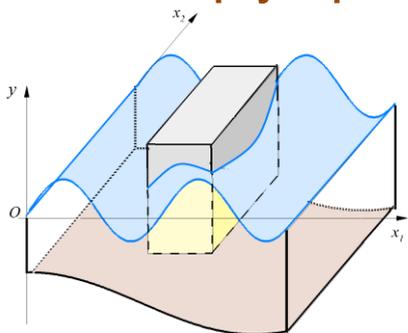
$$\frac{p(x, y, t)}{\rho} = - \left(\Phi_t(x, y, t) + \frac{1}{2} U^2(x, y, t) + \frac{1}{2} V^2(x, y, t) + gy \right), \quad (x, y) \in \Omega(t),$$

с помощью которого можно определить давление в любой точке жидкости, в частности, лицевой, тыльной и нижней граней тела.

Суммарная сила, действующая на тело единичной ширины: $F(t) = - \iint_{S(t)} p(x, y, t) \mathbf{n} dS,$

а её горизонтальная составляющая $F(t) = \int_{d_0}^{\eta(x_l, t)} p(x_l, y, t) dy - \int_{d_0}^{\eta(x_r, t)} p(x_r, y, t) dy.$

Переход к новой постановке задачи в подвижной криволинейной системе координат, в которой все участки границы (подвижные и неподвижные) физической области лежат на неподвижных координатных линиях новой системы координат, а физическая область взаимно-однозначно отображается на неподвижную вычислительную область простой формы – единичный куб с вырезанным сверху параллелепипедом.





Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

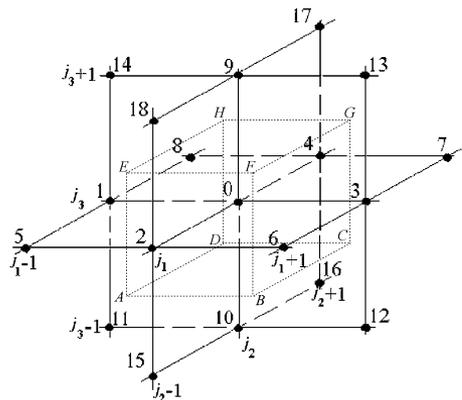
(модель потенциальных течений «Pot-модель» 2D, шаблоны конечно-разностной схемы)

Множество расчетных узлов разбито на **непересекающиеся классы**, каждому из которых приписан уникальный номер (**тип**) в зависимости от того, являются ли узлы из этого класса внутренними или принадлежат определенным частям границы. **Общее количество типов 31.**

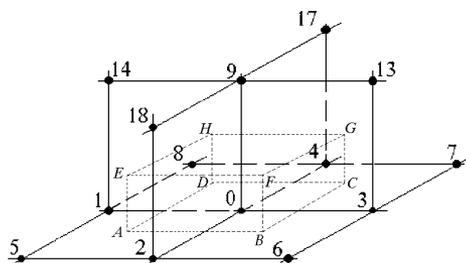
Узлам расчетной сетки приписывается тип класса, к которому они принадлежат.

От типа узла **зависит** контур интегрирования и шаблон разностного уравнения в этом узле.

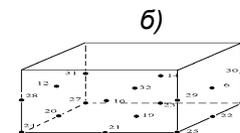
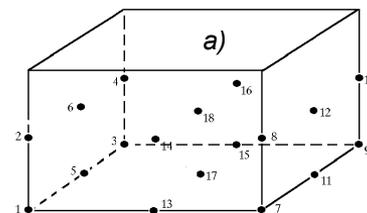
Шаблоны разностных уравнений могут содержать от 8 до 19 узлов в зависимости от типа узла .



Шаблон внутреннего узла (тип 18)



Шаблон граничного узла (тип 17)



Типы узлов сетки в вычислительной области:

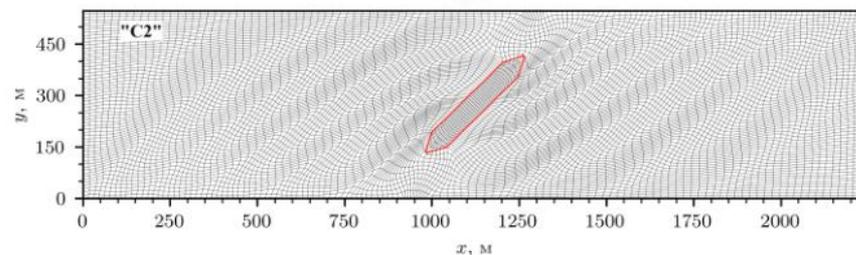
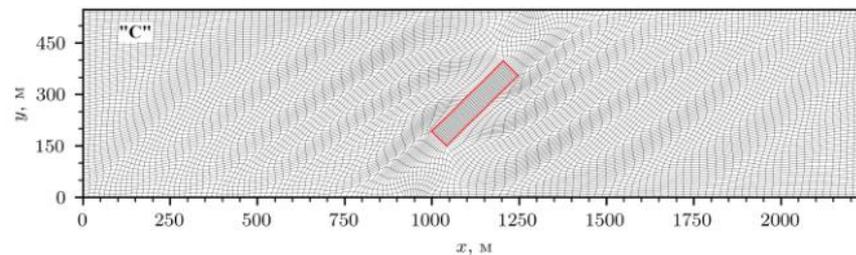
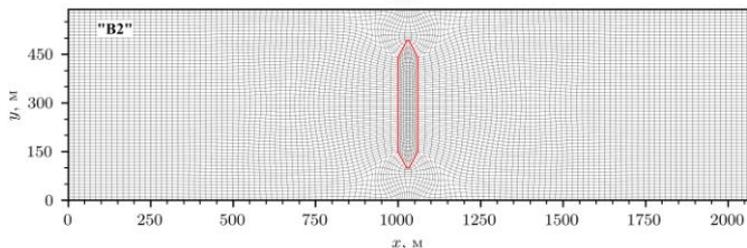
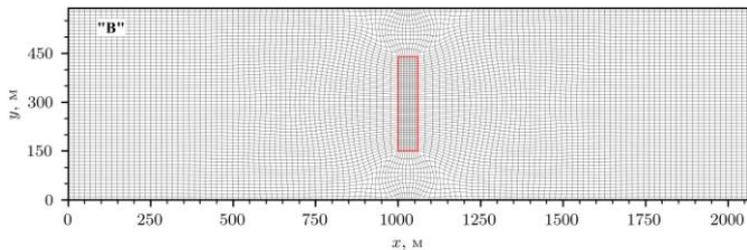
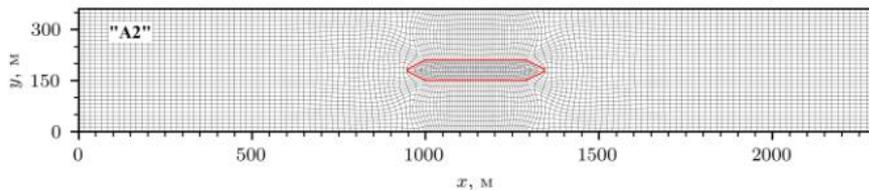
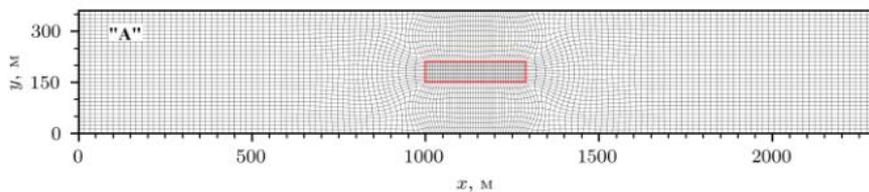
а) - узлы вне полупогруженного тела;

б) - узлы, принадлежащие полупогруженному телу

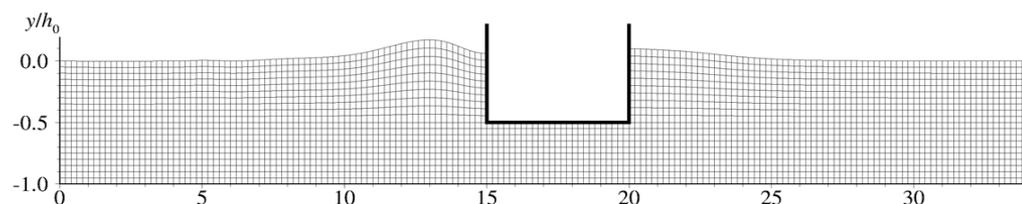


Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(адаптивные сетки для 3D-модели потенциальных течений «Pot-модель»)



Координатные линии трехмерной сетки в плоскости горизонтального дна тела,

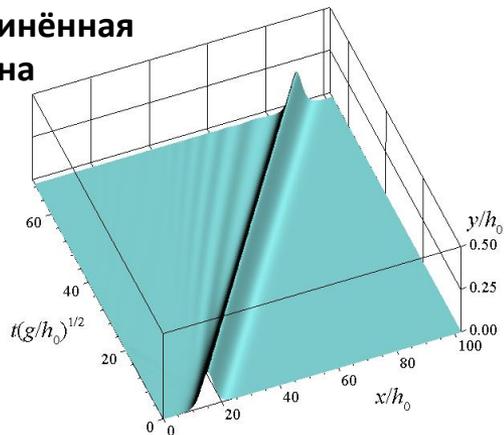


Координатные линии трехмерной сетки в вертикальной плоскости

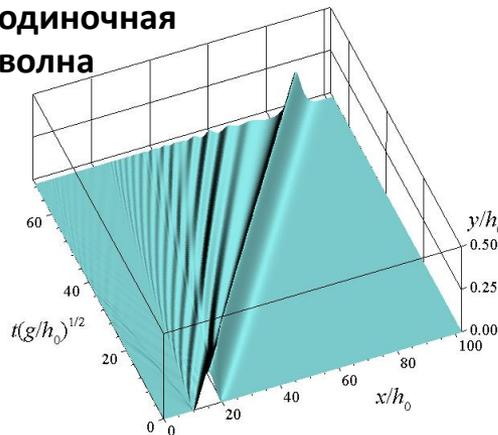


Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами (модельные расчеты)

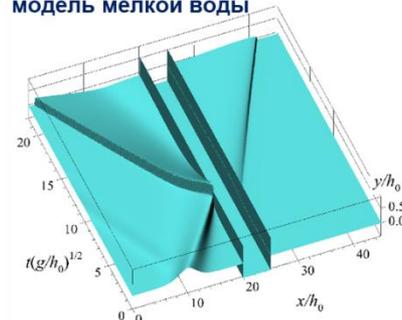
уединённая волна



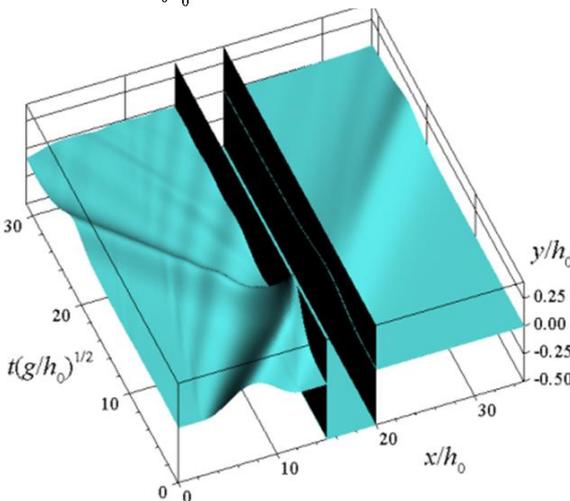
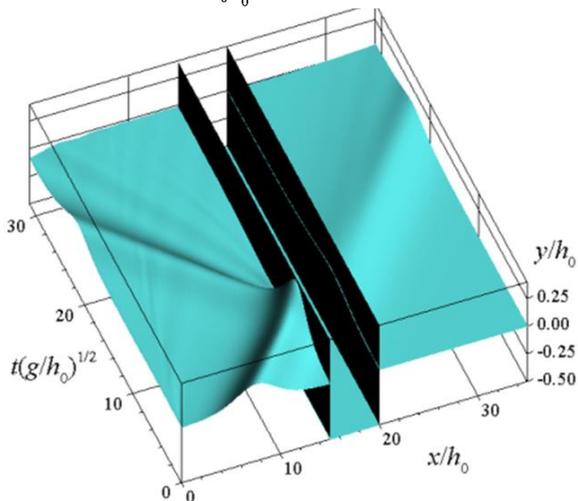
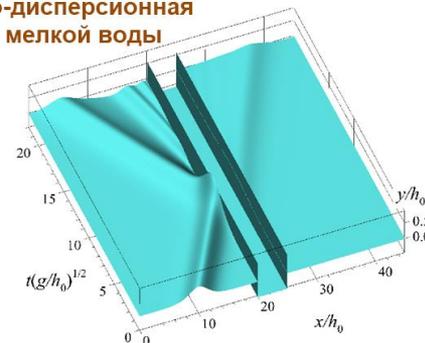
одиночная волна



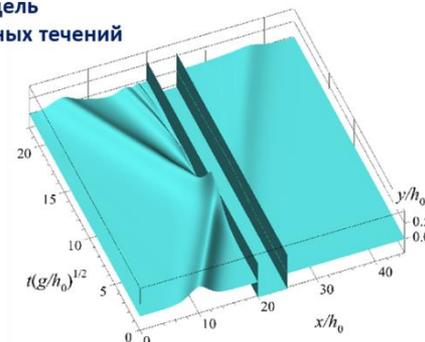
Бездисперсионная модель мелкой воды



Нелинейно-дисперсионная модель мелкой воды



Модель потенциальных течений



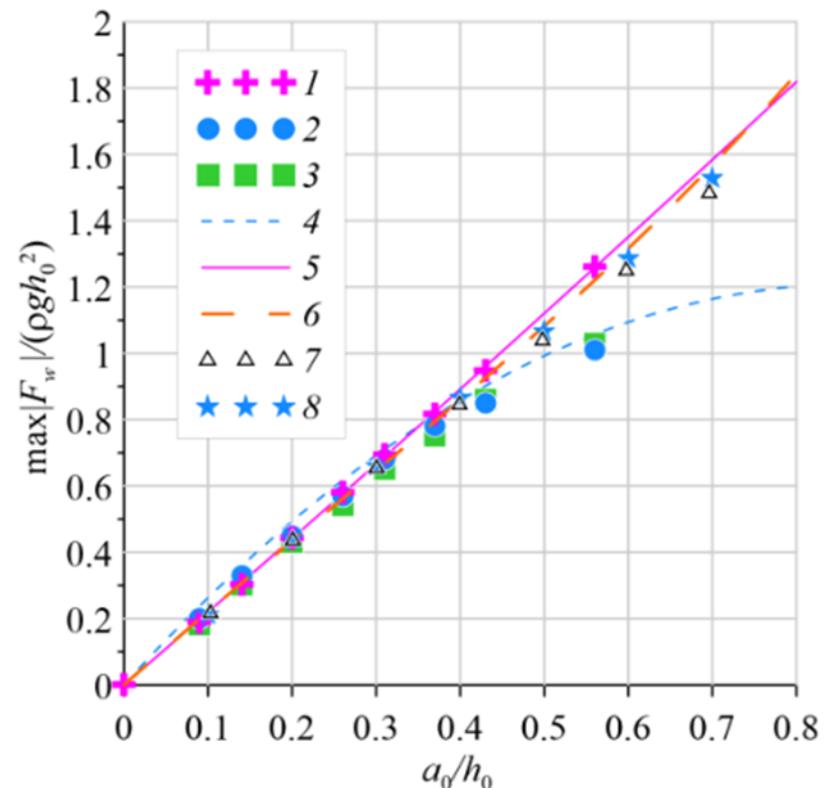
Динамика свободной границы $y = \eta(x, t)$ при распространении в бассейне с горизонтальным дном **уединённой** (а) и **одиночной** (б) (с длиной $\lambda/h_0 = 10$ волн, взаимодействующих с частично погруженным неподвижным телом.

$$a_0/h_0 = 0.2, L/h_0 = 5.0, d_0/h_0 = -0.5, x_1/h_0 = 15.0, x_0 = x_1/2$$



Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(модельные расчеты, вертикальная стенка, сравнение с экспериментами и другими моделями)



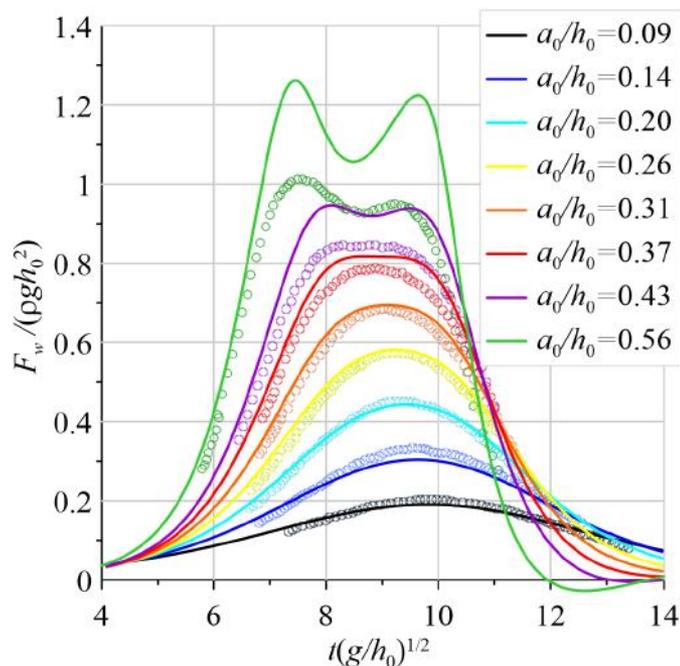
Зависимости максимальной (за всё время расчёта) волновой силы, действующей на неподвижную вертикальную стенку, от амплитуды набегающей волны

- 1 - результаты Pot-модели;
- 2 - экспериментальные данные [Chen et al. \(2019b\)](#);
- 3 - расчёты по модели Навье – Стокса [Chen et al. \(2019b\)](#);
- 4 - кривая, соответствующая формуле (27) аппроксимирующей данные 2 (после вычета гидростатической компоненты давления);
- 5 - кривая, соответствующая формуле-1, аппроксимирующей расчётные данные 1;
- 6 и 7 результаты расчётов из работ [Cooke et al. \(1997\)](#) и [Zheleznyak \(1985\)](#) соответственно;
- 8 - результаты расчётов, выполненных с использованием НЛД-модели ([Khakimzyanov and Dutykh, 2020](#))

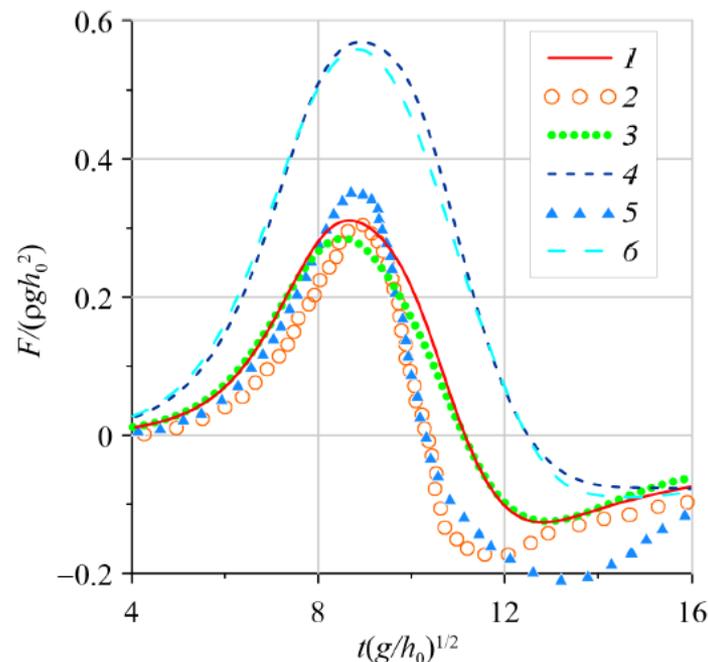


Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(модельные расчеты, вертикальная стенка, полупогруженное тело, сравнение с экспериментами и другими моделями)



Хронограмма суммарной горизонтальной составляющей силы воздействия на **вертикальную неподвижную стенку** для волн различной амплитуды, рассчитанные с помощью Pot-модели (сплошные линии) и определенные в лабораторных экспериментах (Chen et al., 2019)



Хронограмма суммарной горизонтальной составляющей силы воздействия на тело Погруженное на глубину $d_0/h_0 = -0.5$ (1, 2, 3) и $d_0/h_0 = -0.9$ (4, 5, 6): 1, 4 – Pot-модель, 2, 5 – результаты расчетов (Lu and Wang, 2015); 3, 6 – результаты расчетов по НЛД-модели (Хакимзянов и Dutykh, 2020).
 $a_0/h_0 = 0.3$, $L/h_0 = 4$.



Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

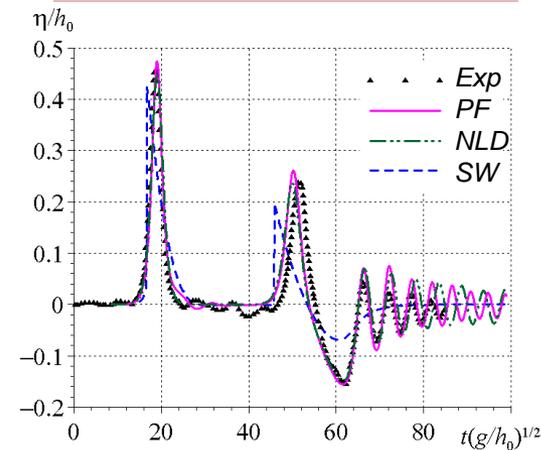
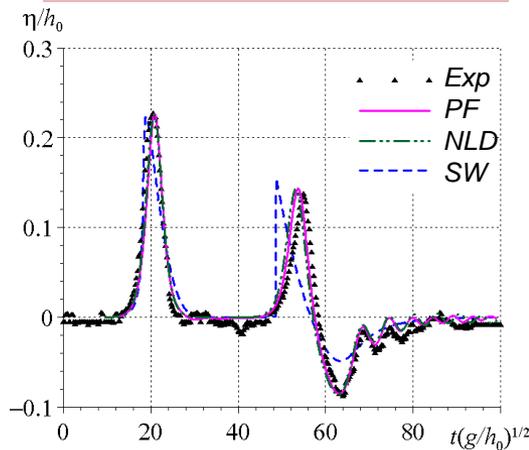
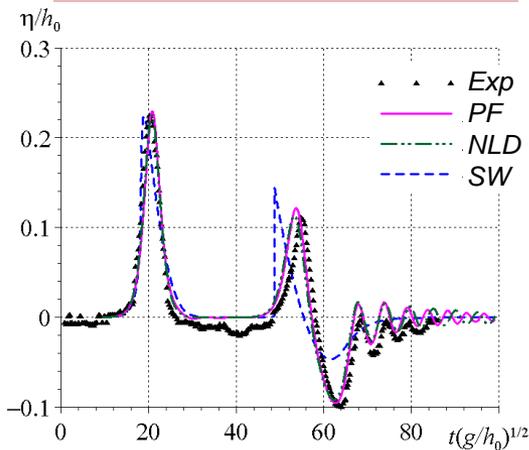
(модельные расчеты, сравнение с экспериментами и другими моделями)

$$|d_0|/h_0 = 0.5; a_0/h_0 = 0.23; L/h_0 = 4$$

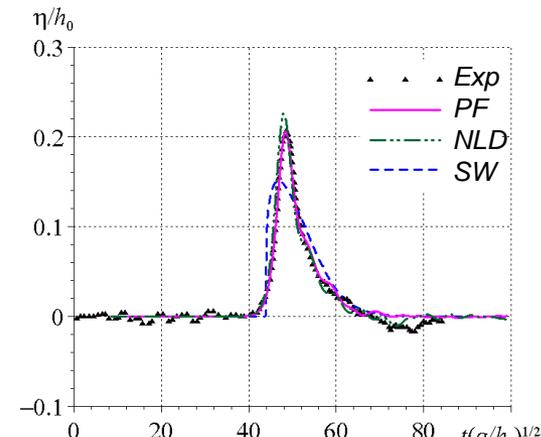
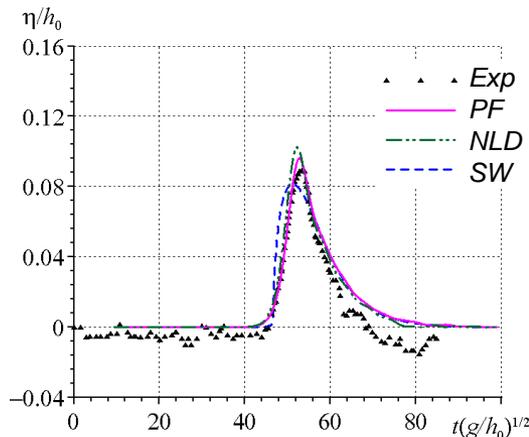
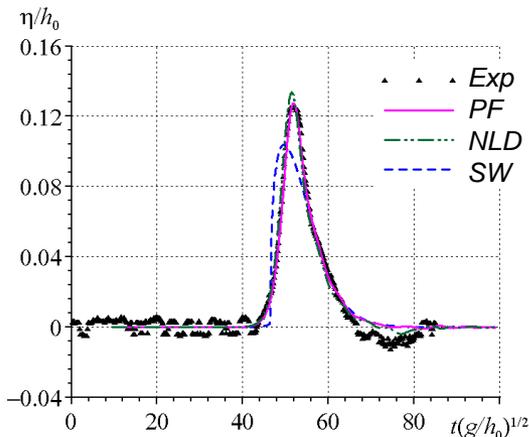
$$|d_0|/h_0 = 0.7; a_0/h_0 = 0.23; L/h_0 = 4$$

$$|d_0|/h_0 = 0.5; a_0/h_0 = 0.45; L/h_0 = 4$$

Мареограммы
слева от тела



Мареограммы
справа от тела

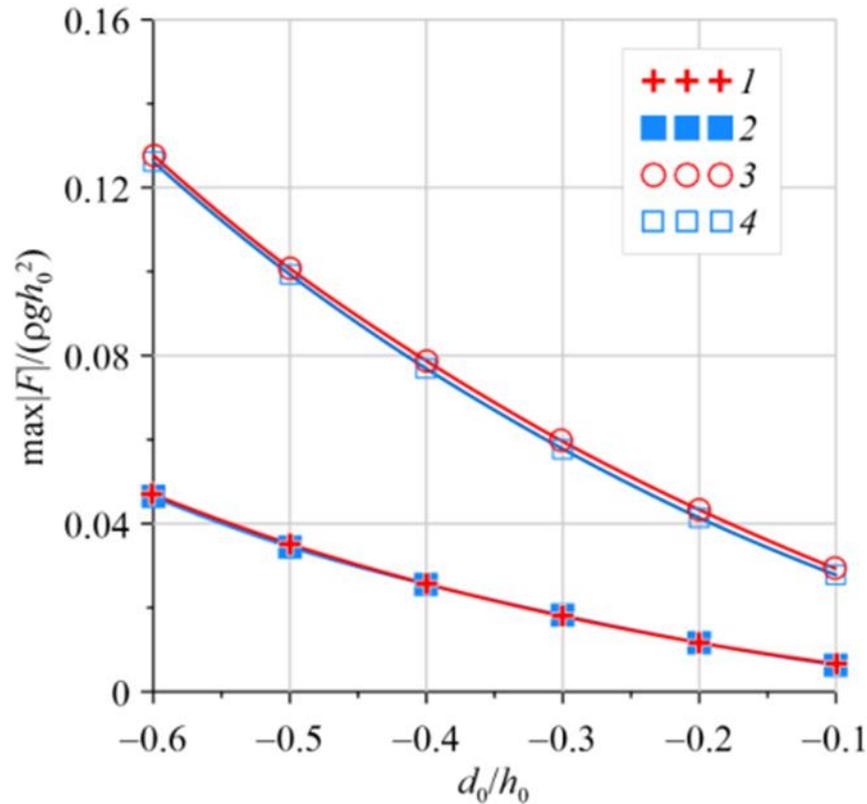


Lu X., Wang K.-H. Modeling a solitary wave interaction with a fixed floating body using an integrated analytical-numerical approach // Ocean Engineering. 2015. Vol. 109. P. 691-704.

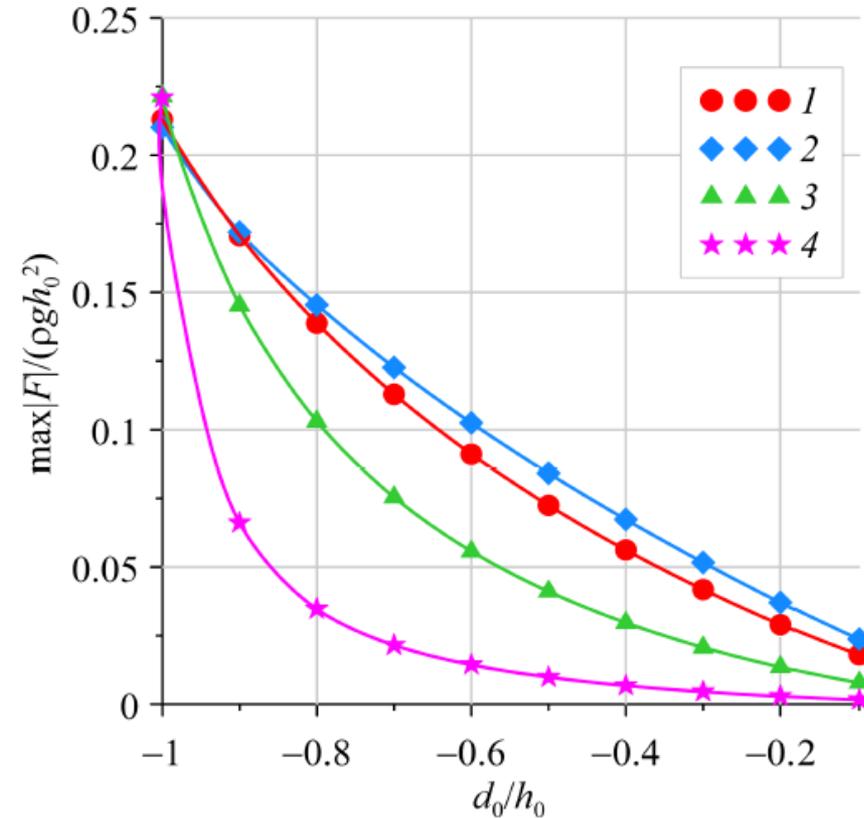


Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(модельные расчеты, полупогруженное тело, зависимость от заглубления и амплитуды)



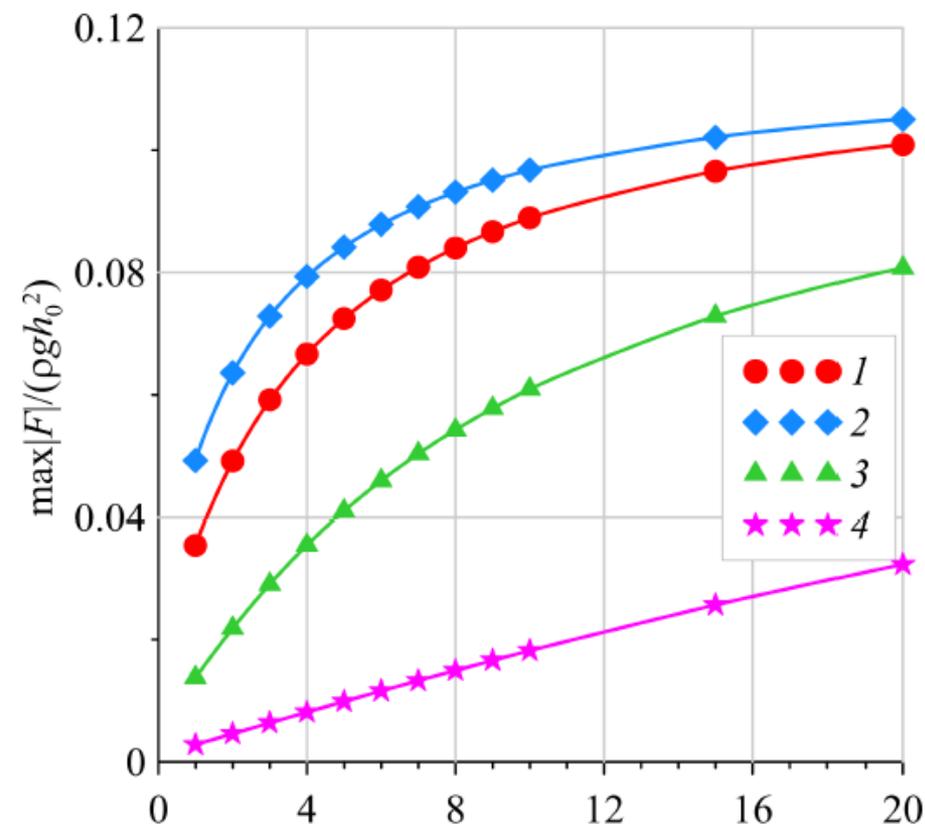
Зависимости суммарной горизонтальной составляющей силы воздействия на тело от его заглубления d_0 для **уединенной** волны (Sun et al. 2015) с **амплитудой** $a_0/h_0 = 0.1$ (1, 2) и $a_0/h_0 = 0.2$ (3, 4).
 1, 3 – результаты расчетов (Sun et al. 2015);
 2, 4 – результаты расчётов по Pot-модели.



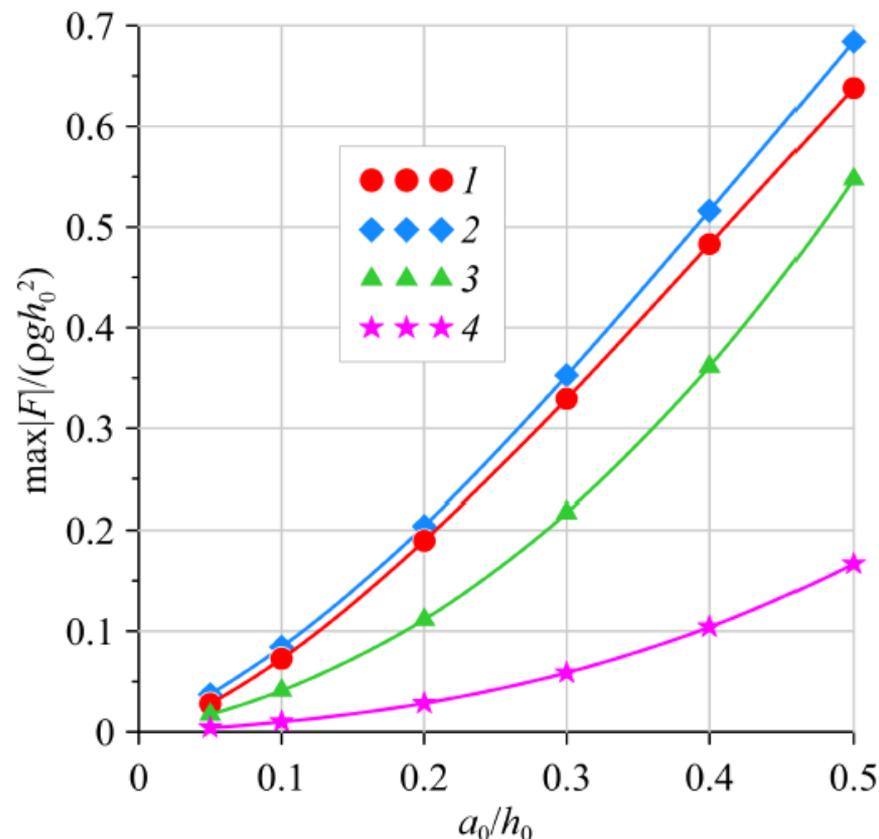
Зависимость суммарной горизонтальной составляющей силы воздействия на тело от его заглубления d_0 для **уединенной** волны (1) и **одиночных** волн с **длиной** $\lambda/h_0 = 10$ (2), 50 (3) и 250 (4). $a_0/h_0 = 0.1$, $L/h_0 = 5.0$

Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(модельные расчеты, полупогруженное тело, зависимость от его протяженности, амплитуды и длины волны)



Зависимость суммарной горизонтальной составляющей силы воздействия на тело от его **протяженности** L для уединенной волны (1) и одиночных волн с **длиной** $\lambda/h_0 = 10$ (2), 50 (3) и 250 (4). $a_0/h_0 = 0.1$, $d_0/h_0 = -0.5$

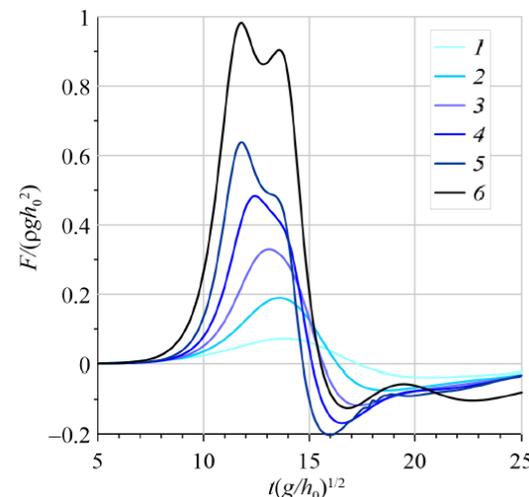
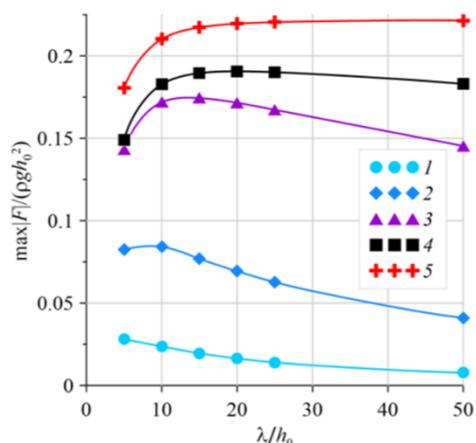


Зависимость суммарной горизонтальной составляющей силы воздействия на тело от **амплитуды** a_0 **уединенной** волны (1) и **одиночных** волн с длиной $\lambda/h_0 = 10$ (2), 50 (3) и 250 (4). $L/h_0 = 5.0$, $d_0/h_0 = -0.5$



Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

(модельные расчеты, полупогруженное тело, зависимость от его протяженности, заглубления, амплитуды и длины волны)



Зависимость суммарной горизонтальной составляющей **силы** воздействия на различные препятствия от **длины** одиночной **волны** λ при $a_0/h_0 = 0.1$: 1–4 – накат набегающей волны на

полупогруженное тело при $L/h_0 = 5.0$, $d_0/h_0 = -0.1$ (1); $L/h_0 = 5.0$, $d_0/h_0 = -0.5$ (2); $L/h_0 = 5.0$, $d_0/h_0 = -0.9$ (3);

$L/h_0 = 20.0$, $d_0/h_0 = -0.9$ (4); 5 - накат на **вертикальную** стенку

Хронограммы суммарной горизонтальной составляющей **силы** воздействия уединенных волн с **амплитудами** $a_0/h_0 = 0.1$ (1), 0.2 (2), 0.3 (3), 0.4 (4) и 0.5 (5, 6) на полупогруженное тело: $d_0/h_0 = -0.5$ (1–5), -0.9 (6). $L/h_0 = 5.0$

Выявлен характер **увеличения** силового воздействия с увеличением **заглубления** и **протяжённости** тела, **амплитуды** набегающей волны.

Замечено, что при **больших амплитудах** волн и **заглублении** тела в хронограммах силового воздействия появляется **второй локальный максимум**, также как в задаче о взаимодействии волны с вертикальной стенкой.

Одним из важнейших параметров задачи является длина волны:

при **малых заглублениях** тела **силовое воздействие монотонно уменьшается с увеличением** длины волны, в то время как **воздействие на вертикальную стенку монотонно увеличивается**.

В остальных случаях **зависимость силового воздействия от длины волны немонотонна**, существует максимум силы при некоторой длине волны. Эта «**резонансная**» длина волны увеличивается с ростом заглубления и протяжённости тела.

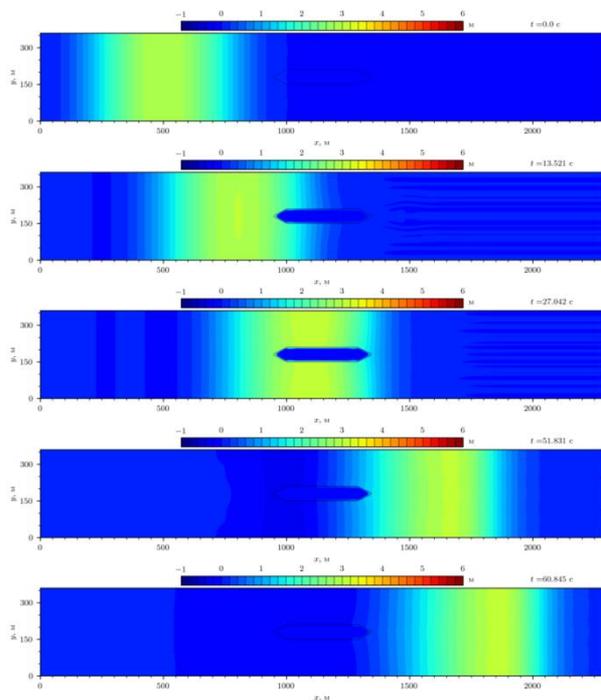


Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами

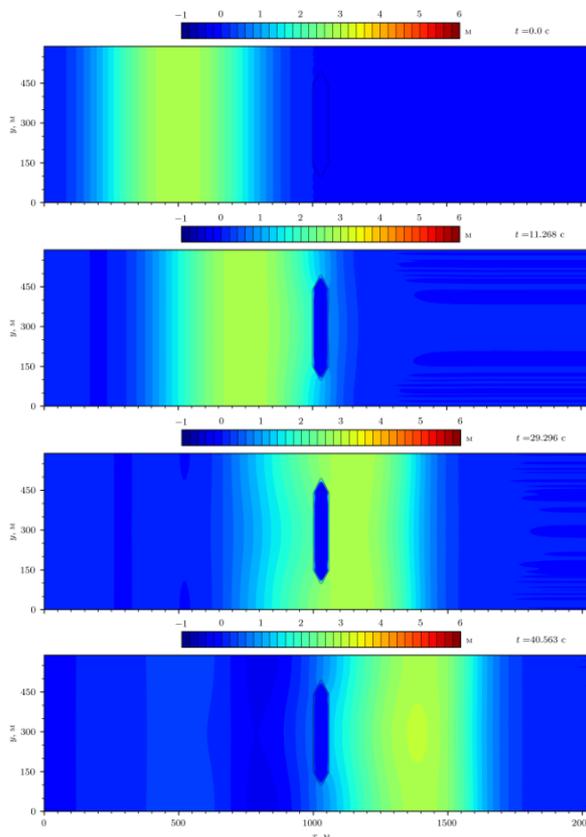
(модель реального объекта, зависимость от его расположения относительно фронта набегающей волны)



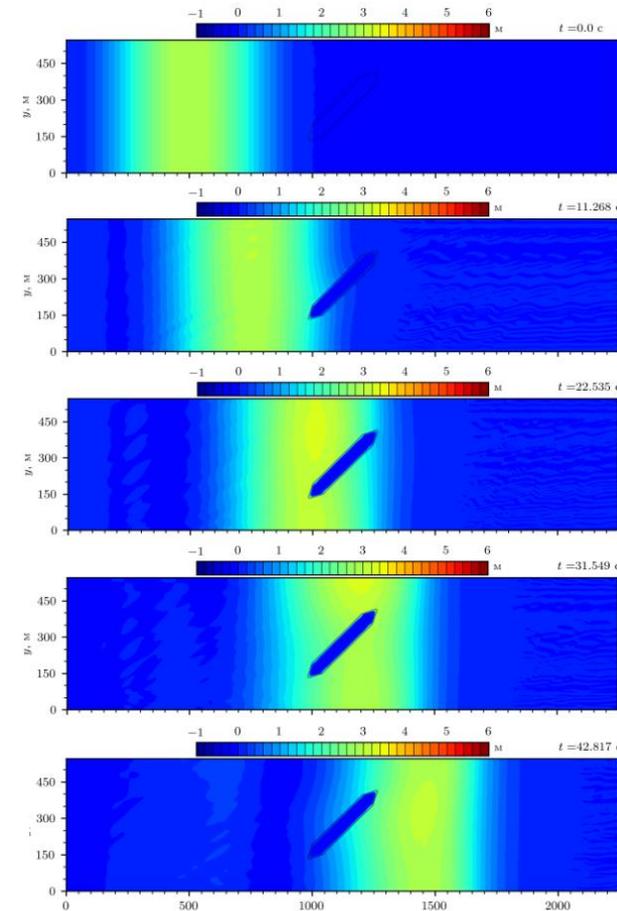
длина волны 1000 м,
амплитуда 3 м,



расположение тела «А2»

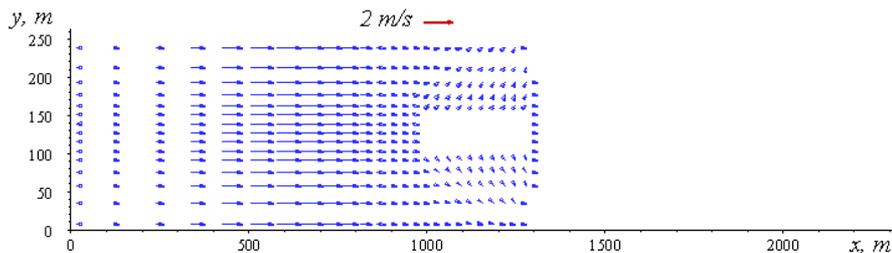


расположение тела «В2»



расположение тела «С2»

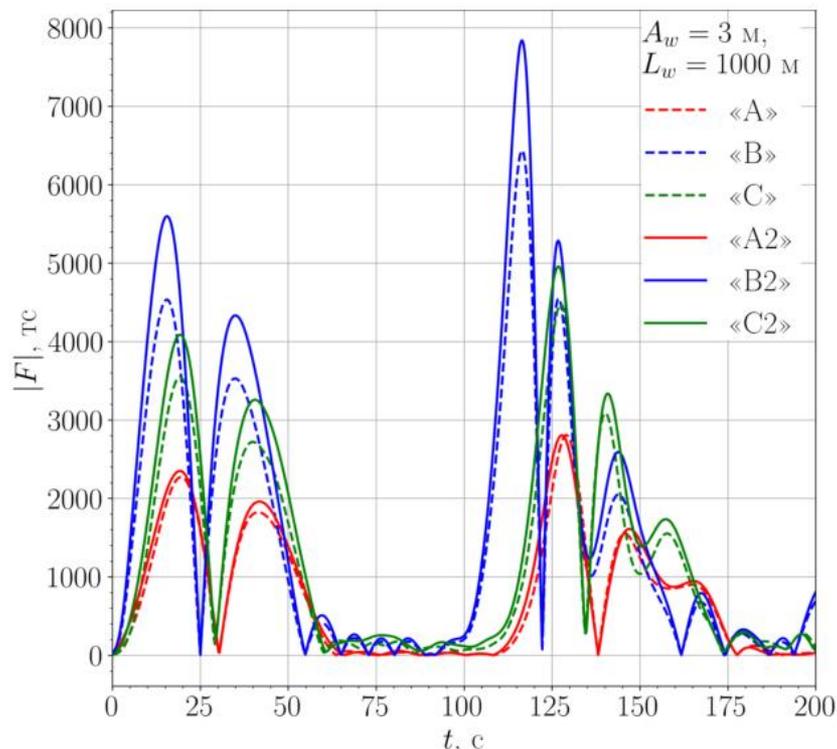
поле
вектора скорости
на уровне
выше дна
расположение тела
«А»





Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами (модель реального объекта, зависимость от наличия или отсутствия обтекателей)

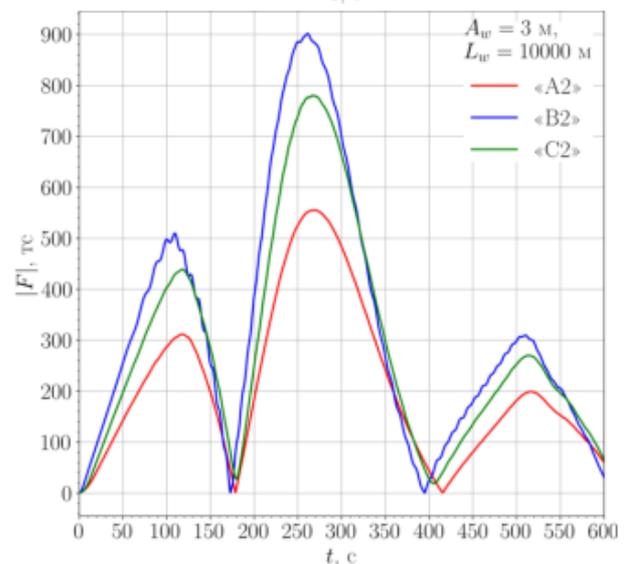
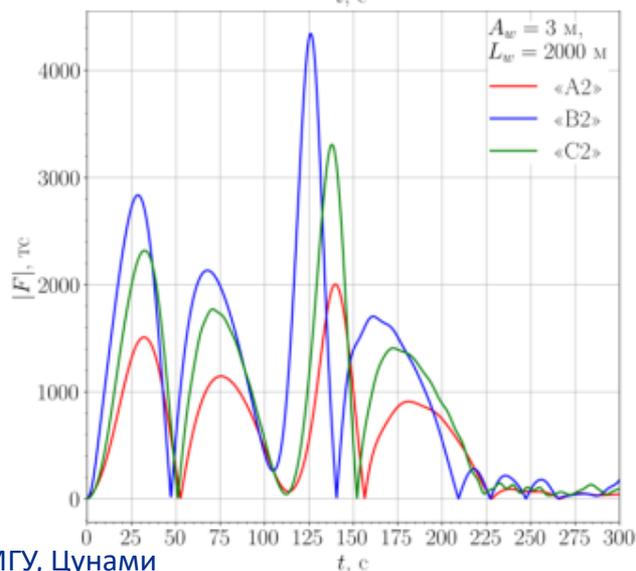
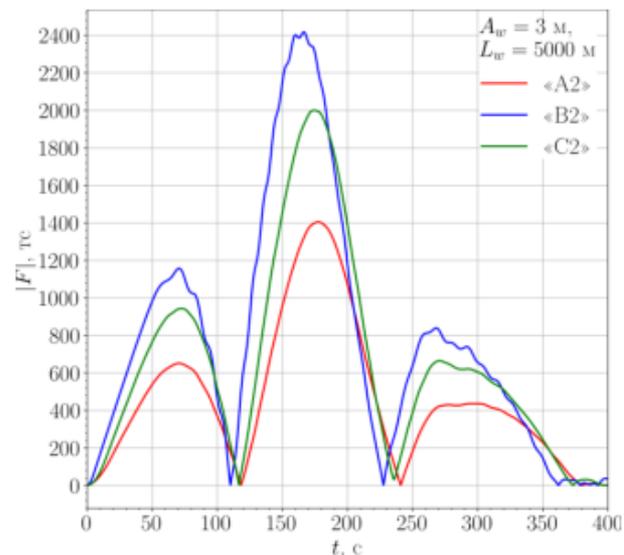
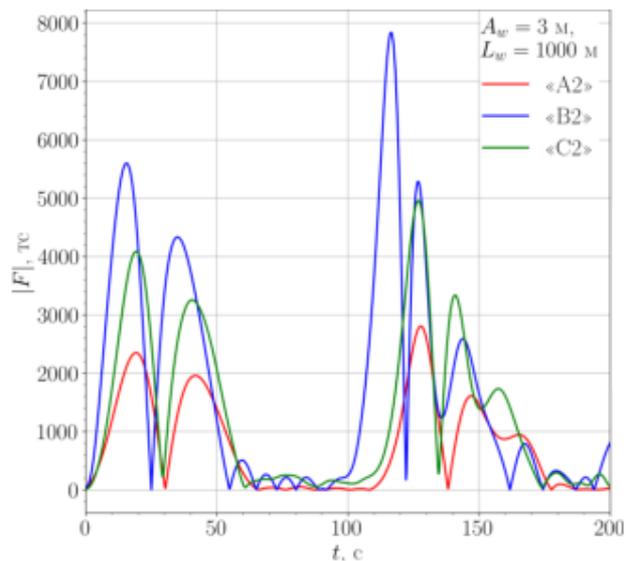
- При сравнении вариантов «А» и «А2» оказалось, что обтекатели практически не изменяют максимальную силу;
- в варианте «В2» обтекатели увеличивают волновую силу примерно на 22%;
- в варианте «С2» обтекатели увеличивают волновую силу примерно на 11%.



Хронограммы модуля суммарной волновой силы в расчётах с обтекателями и без них для волны с амплитудой $a_0=3$ м и длиной $\lambda=1000$ м.



Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами (модель реального объекта, зависимость от длины набегающей волны)





Задача 2: Оценка возможного силового воздействия на объект «характерной» волны цунами (резюме)

- Созданы **алгоритмы** для расчёта силового воздействия длинных поверхностных волн на частично погруженные конструкции, основанные на модели потенциальных течений (и моделях мелкой воды первого и второго приближения);
- выполнены **верификация** и **валидация** моделей и алгоритмов путем помощи сравнения полученных результатов с экспериментальными данными и результатами расчётов других авторов;
- в 2D-постановке исследованы зависимости силового воздействия от заглубления и протяженности тела, амплитуды и длины волны;
- В 3D постановке выполнены расчёты силового воздействия волн на модель объекта сложной формы, оценено влияние обтекателей и угла поворота объекта относительно фронта волны.

