

Трёхмерное моделирование воздействия волн на побережье, включая плавающие объекты

А.С. Козелков, В.В. Курулин, К.С. Плыгунова, Д.А. Уткин

Нижегородский государственный технический университет
им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

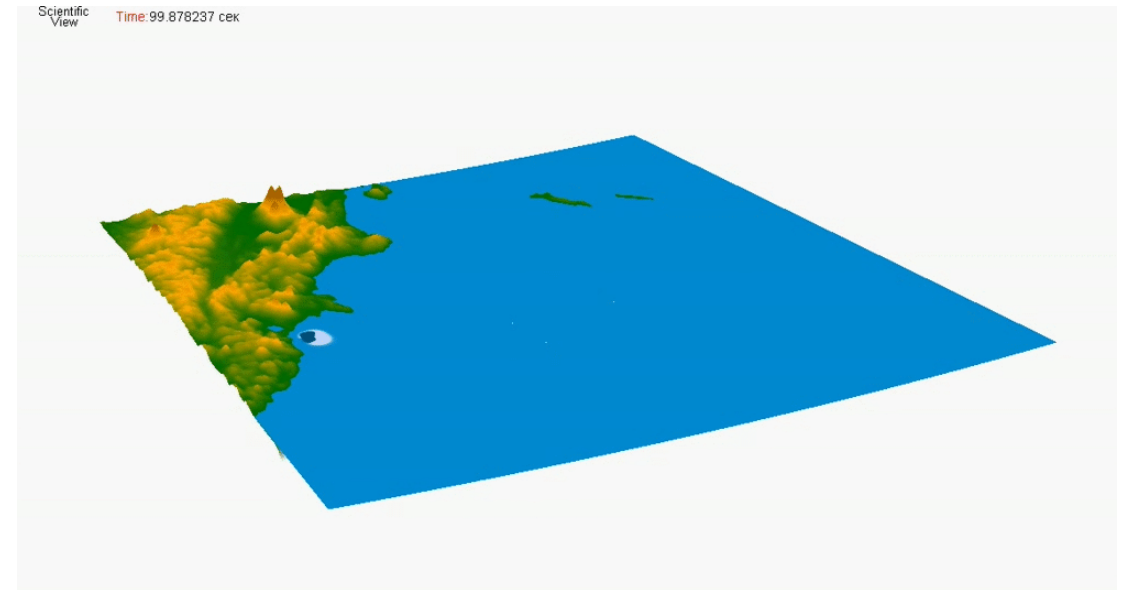
*Результаты получены при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодёжных лабораторий (научная тема: «**Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания гидродинамических характеристик жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования промышленных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах петафлопсного класса**»)*

Актуальность

В настоящее время уровень развития численных методов и мощность вычислительных ресурсов позволяет напрямую моделировать обрушение и накат океанических волн на берег с использованием полной трехмерной гидродинамической системы уравнений – системы уравнений Навье-Стокса.

Это дает полноценный инструмент для исследования особенностей распространения волны, ее усиление и ослабление в зависимости от конфигурации шельфовой зоны, а также воздействие волны на инфраструктуру побережья, включая плавающие объекты.

Методика подобного класса реализована в российском пакете программ ЛОГОС, который используется для настоящего исследования.



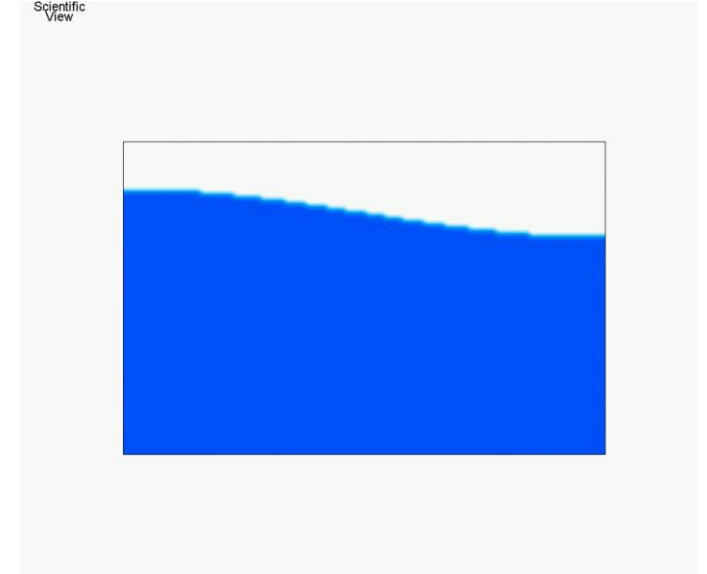
Математическая модель

Метод VOF (Volume of Fluid)

Уравнения Навье-Стокса + уравнение переноса объёмной доли α_ξ

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i \\ \frac{\partial \rho_\xi \alpha_\xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i \rho_\xi \alpha_\xi) = 0 \end{cases}$$

t — время;
 u_i — вектор скорости;
 x_i — пространственный вектор;
 p — давление;
 α — объёмная доля;
 ξ — индекс фазы;
 g_i — вектор ускорения свободного падения.



Для турбулентных течений используются уравнения Рейнольдса с моделью турбулентности k- ω SST.

$\begin{cases} \alpha_\varepsilon = 1 \leftarrow \text{целиком занимает ячейку} \\ \alpha_\varepsilon = 0,5 \leftarrow \text{свободная поверхность} \\ \alpha_\varepsilon = 0 \leftarrow \text{отсутствует в ячейке} \end{cases}$	0	0	0
	0.3	0.5	0.7
	1	1	1

Основные особенности метода VOF:

- Основан на использовании **маркер-функции** «объёмная доля фазы»
- Удобен для практического использования **на неструктурированных сетках**
- Требует решения **уравнения переноса фаз**
- Требуется использование специальных численных схем для точного отслеживания межфазной границы

Дискретизация уравнений: Метод конечных объёмов

Дискретизация на примере уравнения переноса скаляра φ

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varphi u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij}$$

Нестационарное слагаемое – по схеме второго порядка:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \rightarrow \frac{3\varphi_i^{n+1} - 4\varphi_i^n + \varphi_i^{n-1}}{2\Delta t}$$

Конвективное – интегрирование по объёму ячейки i и переход к интегралу по поверхности:

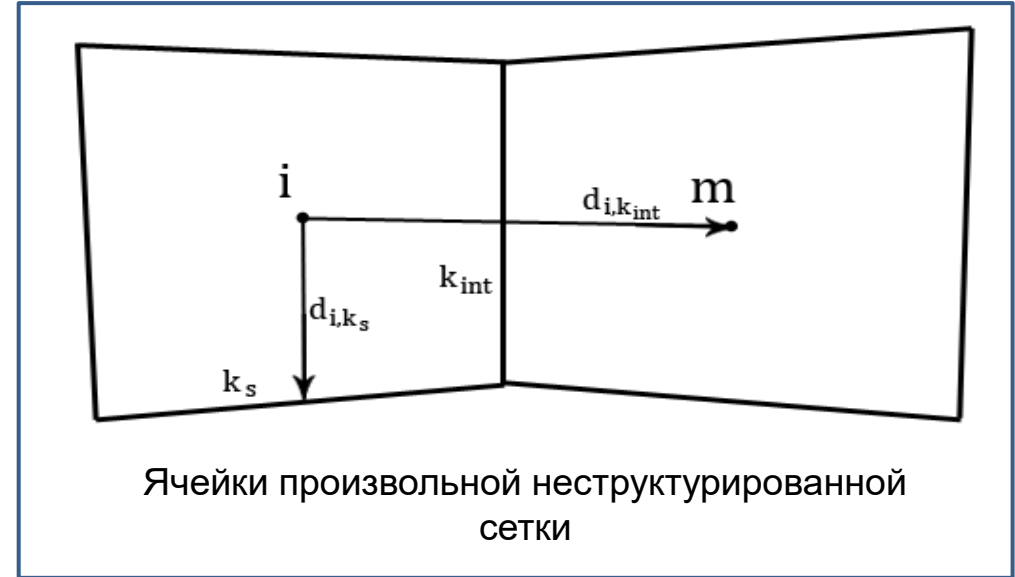
$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varphi) = \int_{V_i} \nabla (\rho u_j \varphi) dV_i = \oint_{S_i} \rho \varphi u_j dS_j \approx \sum_k \rho_k \varphi_k u_{j,k} S_{j,k} = \sum_k \rho_k \varphi_k F_k$$

$$\text{UD: } \begin{cases} \varphi_k = \varphi_i, & \text{при } F_k > 0 \\ \varphi_k = \varphi_m, & \text{при } F_k < 0 \end{cases} \quad \text{LUD: } \begin{cases} \varphi_k = \varphi_i + \nabla \varphi_i \cdot \mathbf{r}_i, & \text{при } F_k > 0 \\ \varphi_k = \varphi_m + \nabla \varphi_m \cdot \mathbf{r}_m, & \text{при } F_k < 0 \end{cases}$$

Диффузионное слагаемое (на примере первого слагаемого тензора τ_{ij}) – применяется разложение «over-relaxed approach»:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dV \approx \sum_k \left(\mu_k \left(\frac{\partial u_i}{\partial n_k} \right)_k S_k \right) = \sum_k (\mu_m u_m S_k^*) - \sum_k (\mu_i u_i S_k^*) + \sum_k (\mu_k \langle \nabla u \rangle_k S_{k,i}^a); \quad S_k^* = \frac{S_{k,i} S_{k,i}}{d_{k,j} S_{k,j}}, \quad S_{k,i}^a = S_{k,i} - S_k^*$$

Для дискретизации конвективного слагаемого в уравнении переноса объемной доли применяются «сжимающие» схемы высокого порядка типа HRIC и MCICSAM, предотвращающие сильное размытие межфазной границы.



SIMPLE-алгоритм решения системы уравнений

Дискретизированные уравнения записываются в **СЛАУ**. Для ячейки i :

$$A_i \varphi_i + \sum_{k_{int}} A_{m,k_{int}} \varphi_{m,k_{int}} = R_i$$

A_i – диагональный коэффициент;

k_{int} – внутренние грани ячейки;

$A_{m,k_{int}}$ – внедиагональные коэффициенты;

R_i – компонент вектора правой части.

Процедура повторяется с обновлёнными p_i , u_i и F_k до достижения заданной точности

Метод **SIMPLE** (схема предиктор-корректор)

Предиктор (уравнение сохранения импульса в дискретном виде):

$$A_i u_i + \sum_{k_{int}} A_{m,k_{int}} u_{m,k_{int}} = R_i^j - \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_i V_i + g_i \sum_{\xi=1}^N \rho_{\xi,i} \alpha_{\xi,i}$$

Корректор (из предыдущего уравнения выражается u_i и подставляется в уравнение сохранения массы):

$$u_i = \frac{1}{A_i} \left(R_i - \sum_{k_{int}} A_{m,k_{int}} u_{m,k_{int}} \right) - \frac{1}{A_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_i V_i = H_i - \frac{1}{A_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_i V_i$$

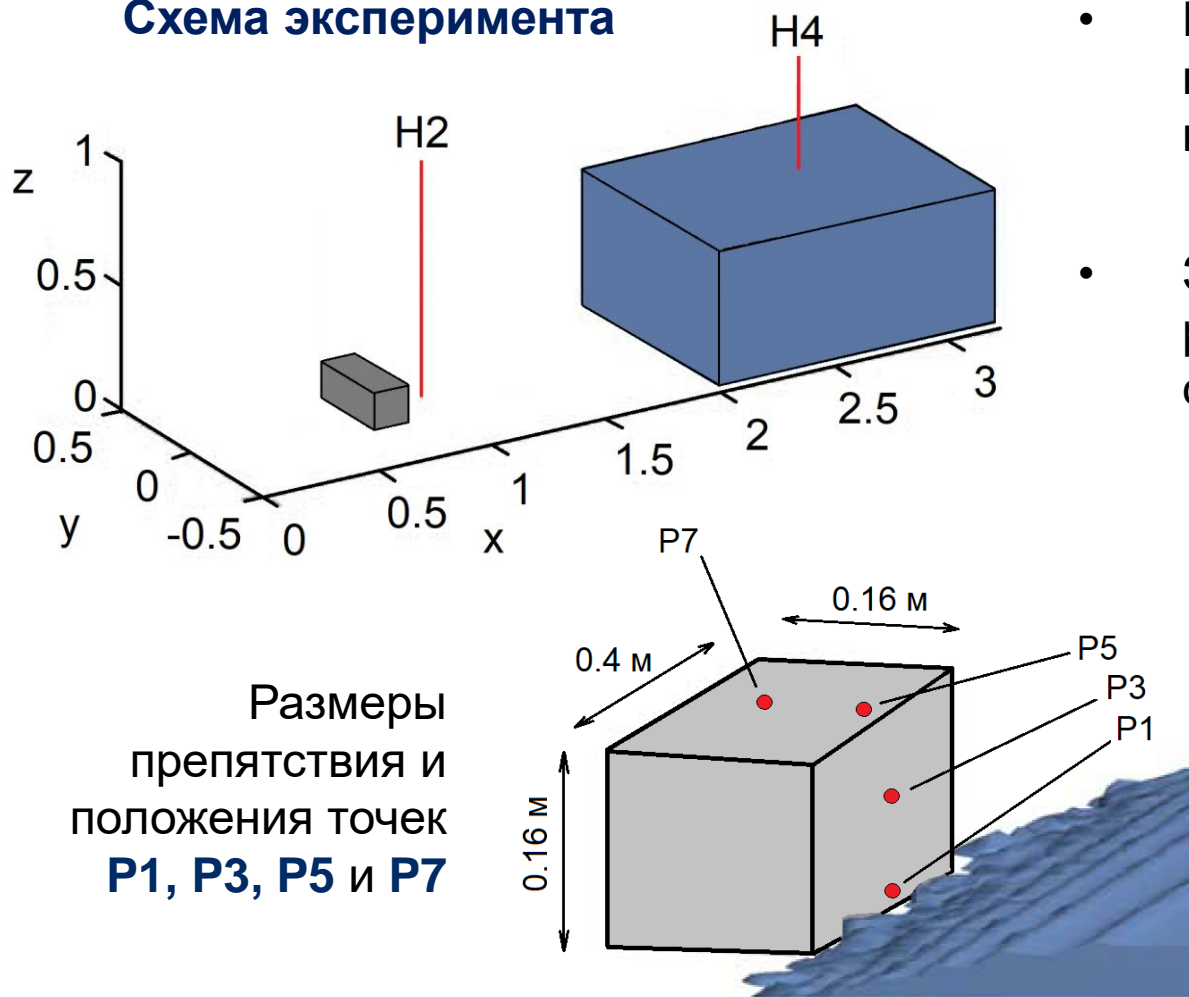
$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(H_i - \frac{1}{A_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_i V_i \right) = - \sum_{\xi} \left(\frac{\alpha_{\xi}}{\rho_{\xi}} \frac{d \rho_{\xi}}{dt} \right)$$

$$B_i p_i^{n+1} + \sum_{k_{int}} B_{m,k_{int}} p_{m,k_{int}}^{n+1} = M_i \xrightarrow[\text{объёмные потоки}]{\text{пересчитываются}} F_k = \left(H_{i,k} - \frac{V_{i,k}}{A_k} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_k \right) S_{i,k}$$

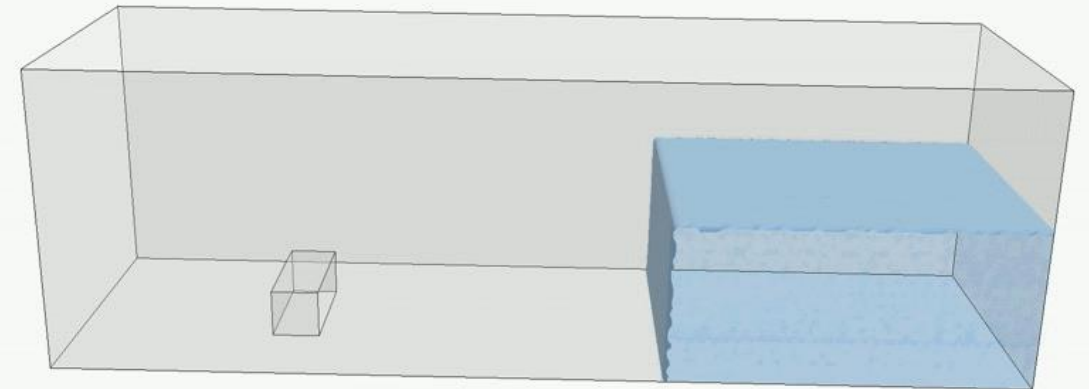
Валидация

Задача о натекании жидкости на одиночное препятствие

Схема эксперимента



- Проводятся измерения зависимости от времени высоты воды над точками **2 (H2)** и **4 (H4)**, находящимися на дне резервуара.
- Замеряется давление в четырех точках, расположенных на препятствии, в плоскости симметрии: **P1**, **P3**, **P5** и **P7**.



Визуализация пространственного положения жидкости

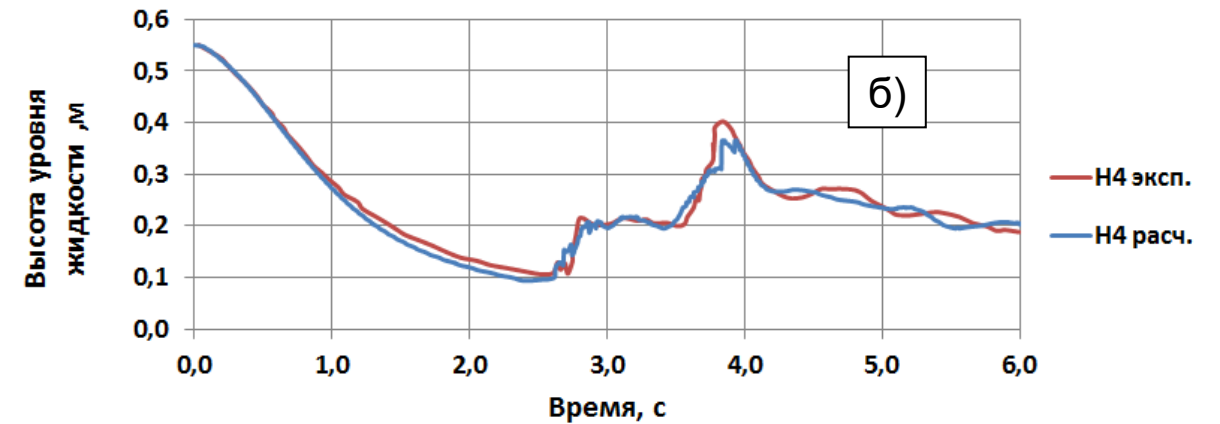
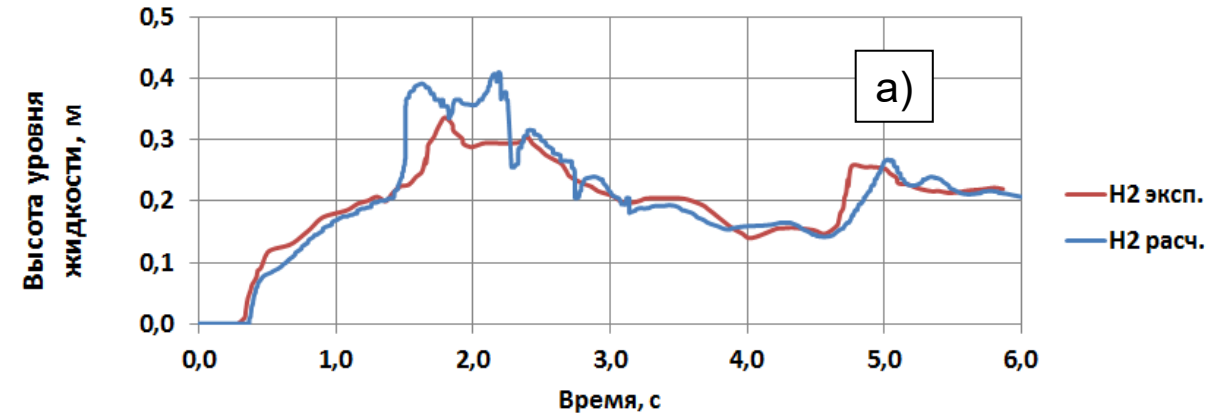
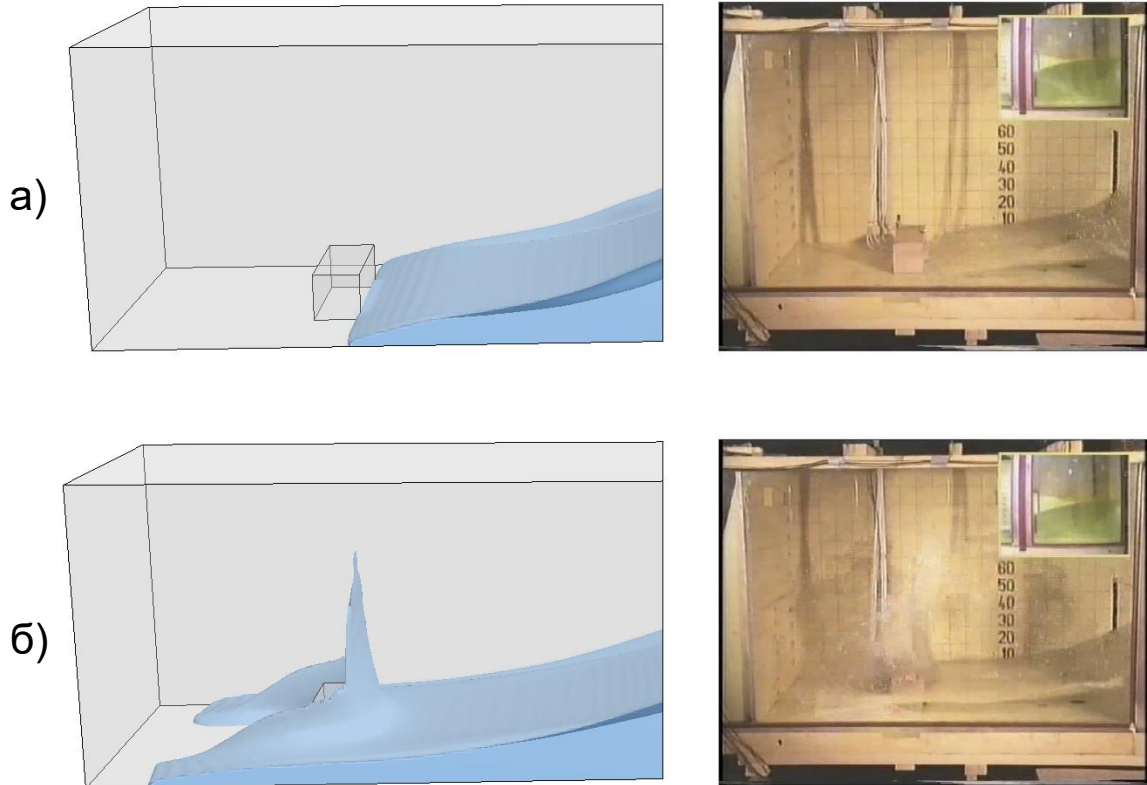
Валидация

Задача о натекании жидкости на одиночное препятствие

Визуализация пространственного положения жидкости в моменты времени 0,4 с (а) и 0,56 с (б):

Слева – результаты, полученные в ПП ЛОГОС;

Справа – фото эксперимента

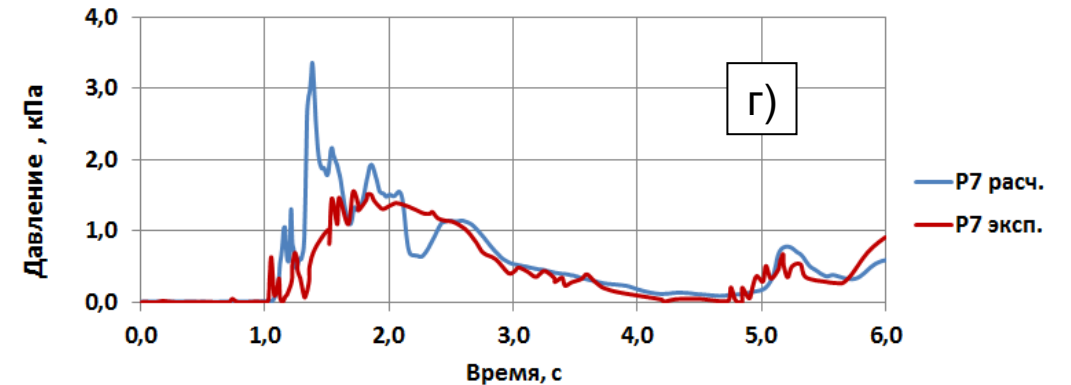
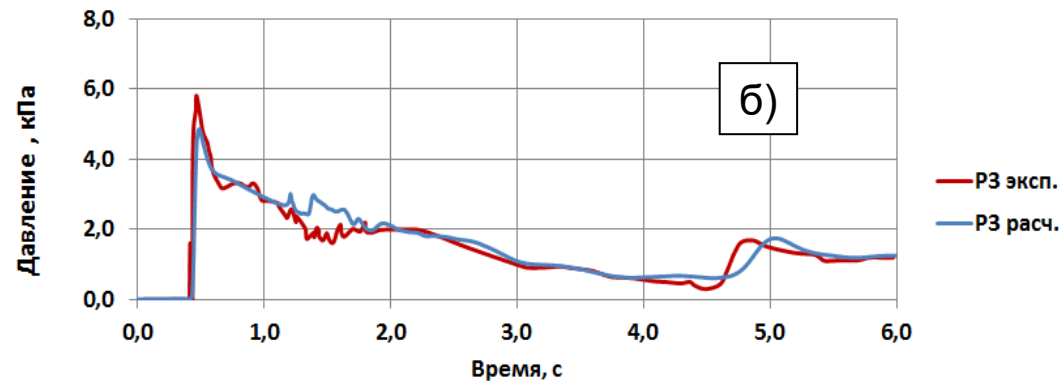
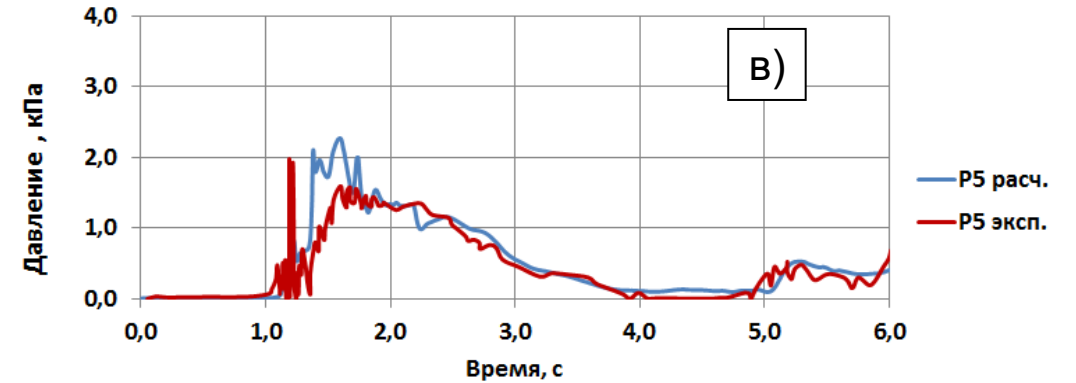
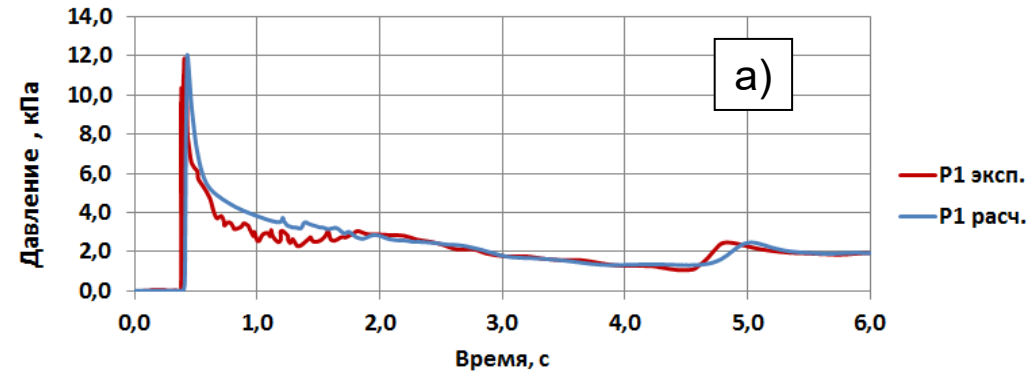


Зависимость высоты свободной поверхности от времени:

а) над точкой 2; б) над точкой 4. Красная линия – экспериментальные данные, синяя линия – результаты расчёта с помощью ПП ЛОГОС

Валидация

Задача о натекании жидкости на одиночное препятствие



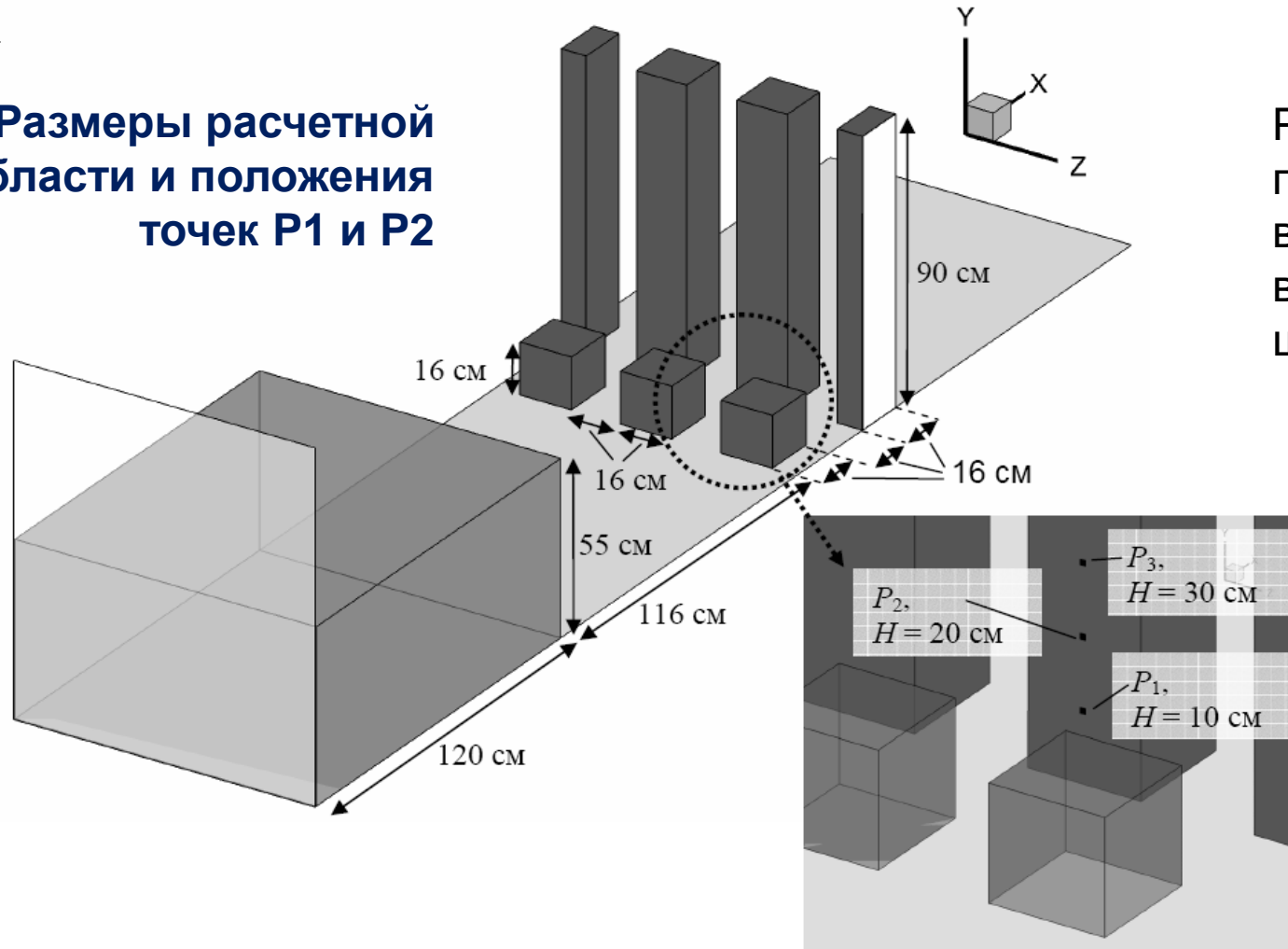
Давление в точках 1 (а), 3 (б), 5 (в) и 7 (г) от времени.

Красная линия – экспериментальные данные, синяя линия – результаты расчета с помощью пакета программ ЛОГОС

Валидация

Задача о натекании жидкости на множественные препятствия

Размеры расчетной области и положения точек P_1 и P_2

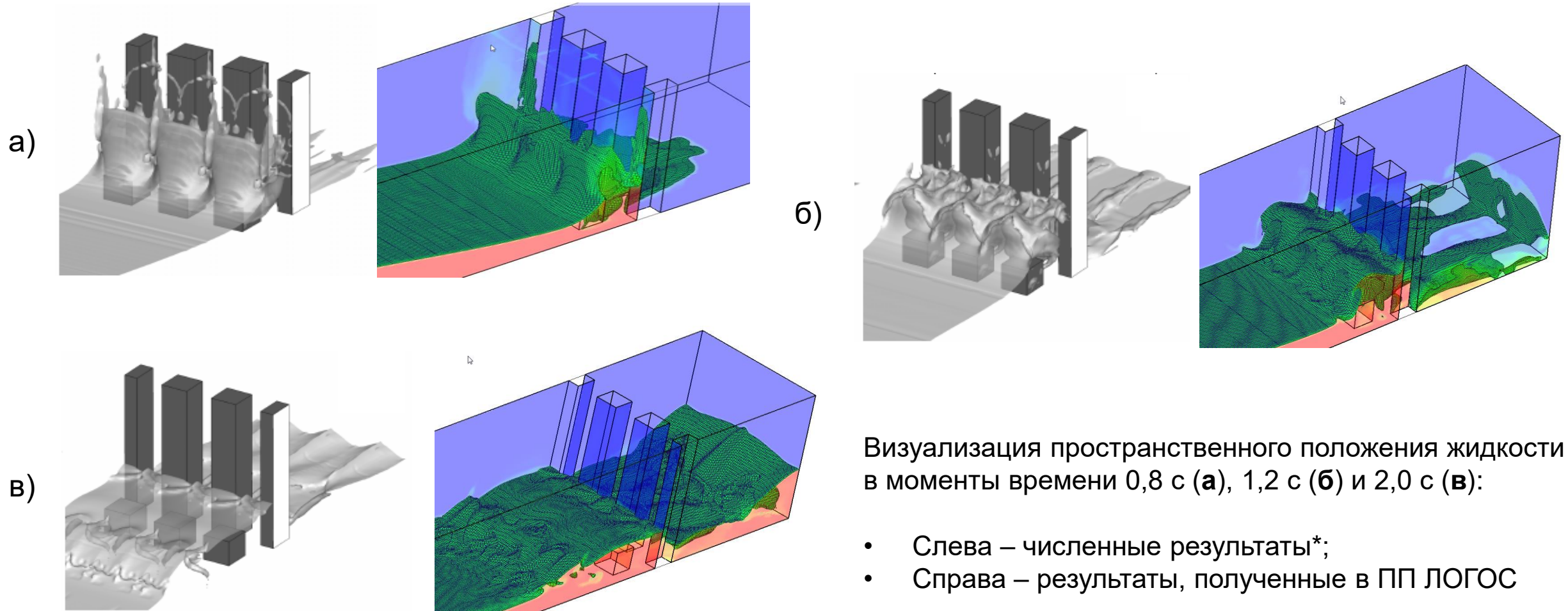


Рассматривается натекание потока на группу домов, выстроенных поперек потока в один ряд или в два ряда в шахматном порядке

Давление замеряется в двух точках - P_1 и P_2 , находящихся на линии симметрии наветренной стороны препятствия

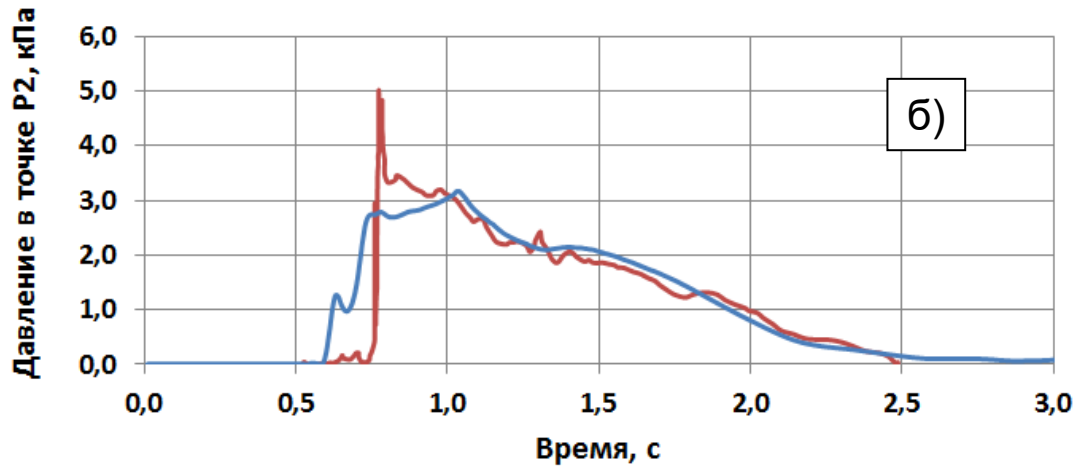
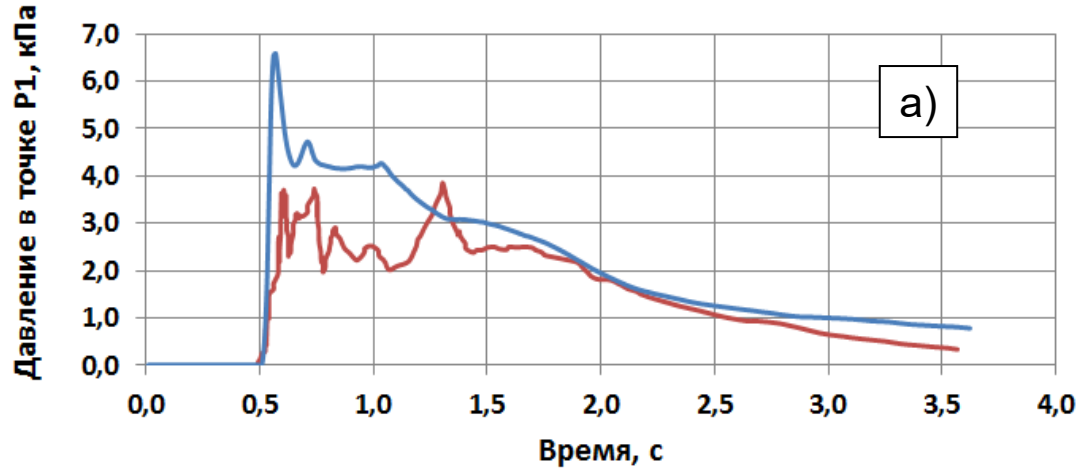
Валидация

Задача о натекании жидкости на множественные препятствия



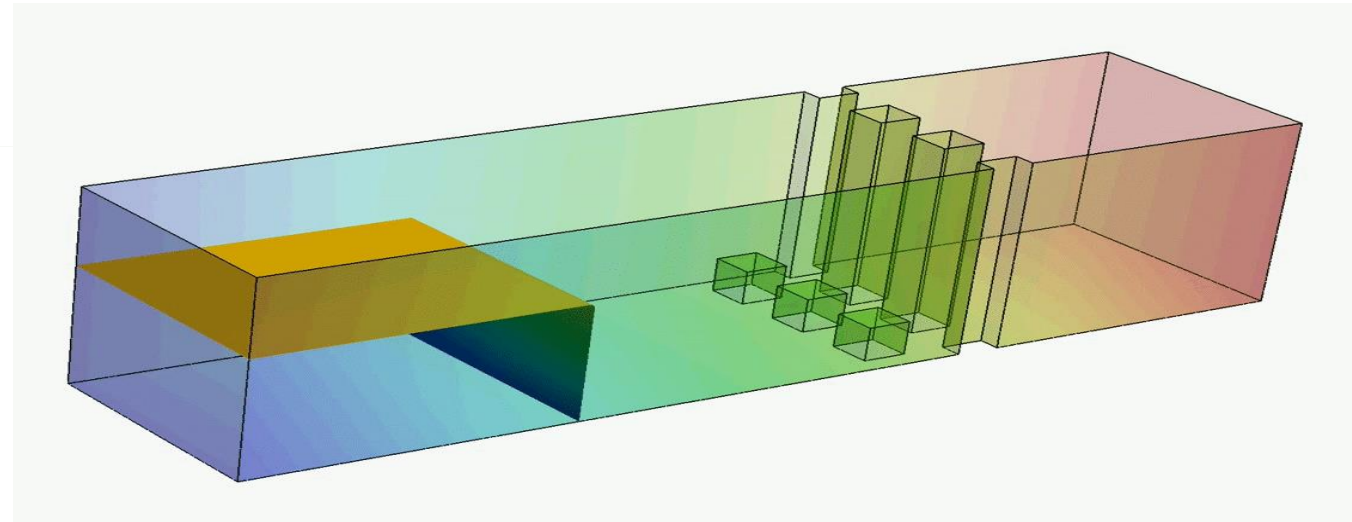
Валидация

Задача о натекании жидкости на множественные препятствия



Графики зависимости давления в точках 1 (а) и 2 (б) от времени:

- Красная линия – численные результаты*;
- Синяя линия – ПП ЛОГОС.

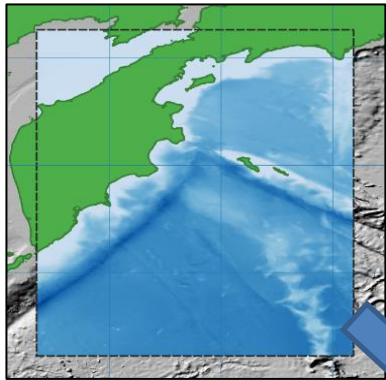


Визуализация пространственного положения жидкости

Моделирование процесса возбуждения и распространения цунами, возникших в результате оползней* и их воздействие на подвижные объекты

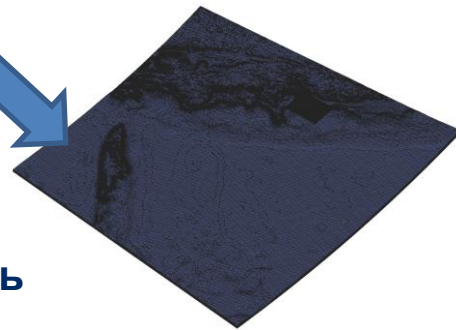
Построение трехмерных сеточных моделей акваторий проводилось с использованием разработанной методики, которая была реализована на базе пакета программ ЛОГОС

Акватория вблизи полуострова Камчатка



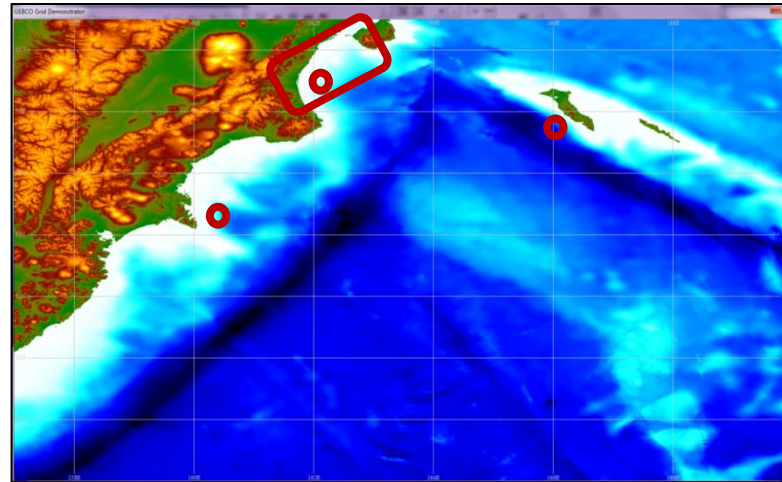
Исходная батиметрия

Трехмерная сеточная модель

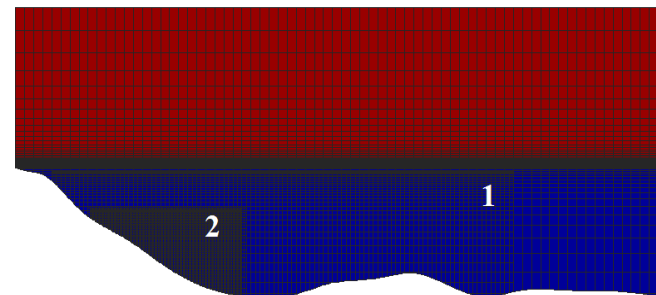


Камчатка, Камчатский залив

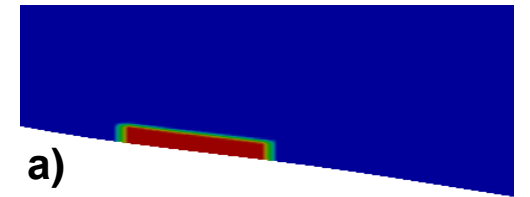
Карта акватории, место размещения потенциального оползня и мареографов



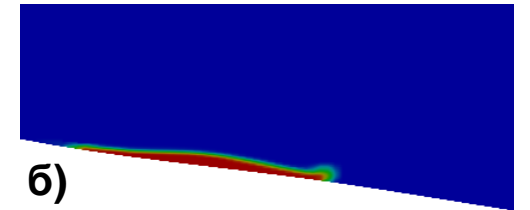
Фрагмент расчетной сетки с блоками детализации



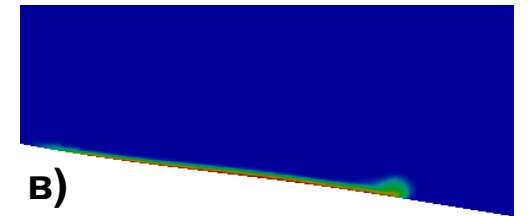
Объем оползневой массы составляет от 12 до 30 км³



а)



б)



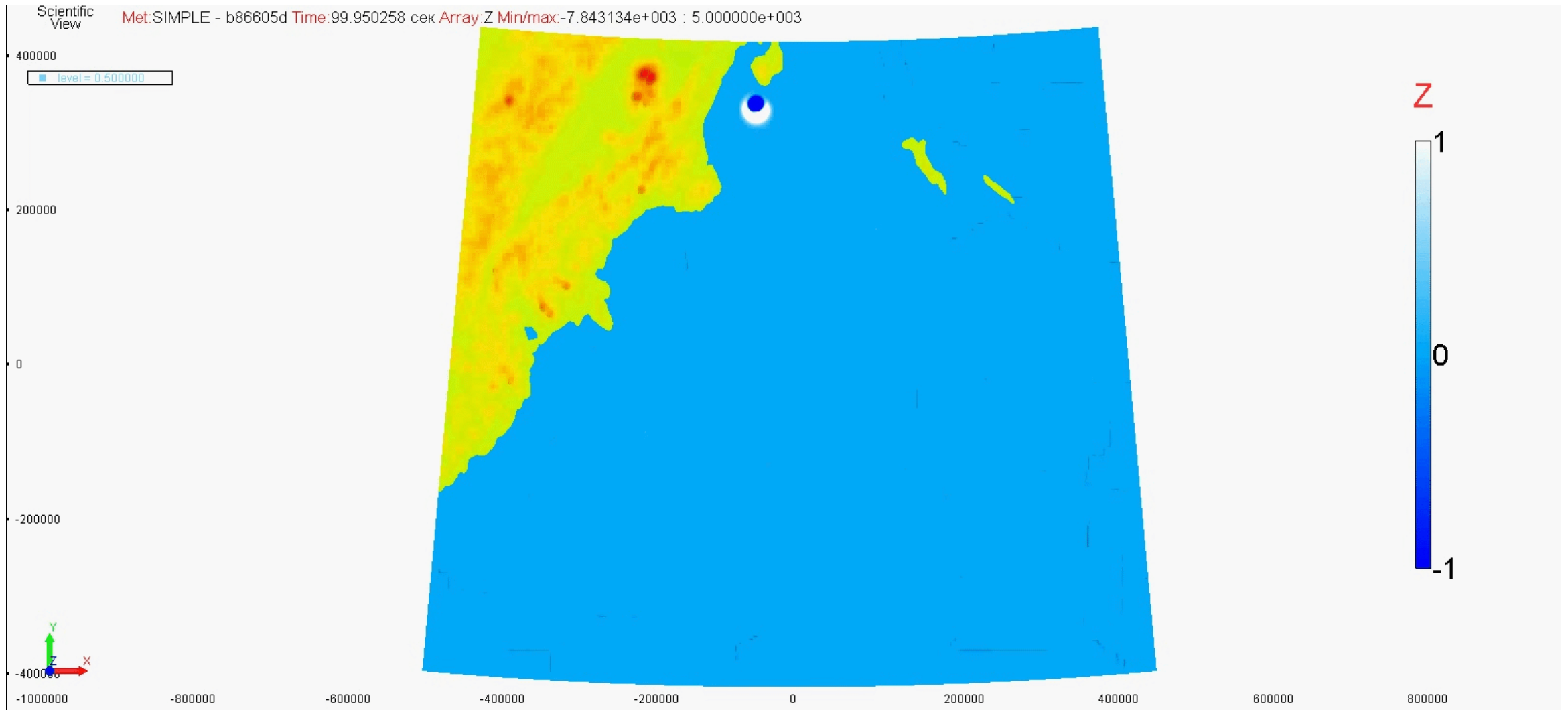
в)

Объемная доля фазы оползня на различные моменты времени:
а) – 0 с, б) – 100 с, в) – 200 с

*Работы выполнены совместно с ИМГИГ ДВО РАН

Моделирование процесса возбуждения и распространения цунами, возникших в результате оползней* и их воздействие на подвижные объекты

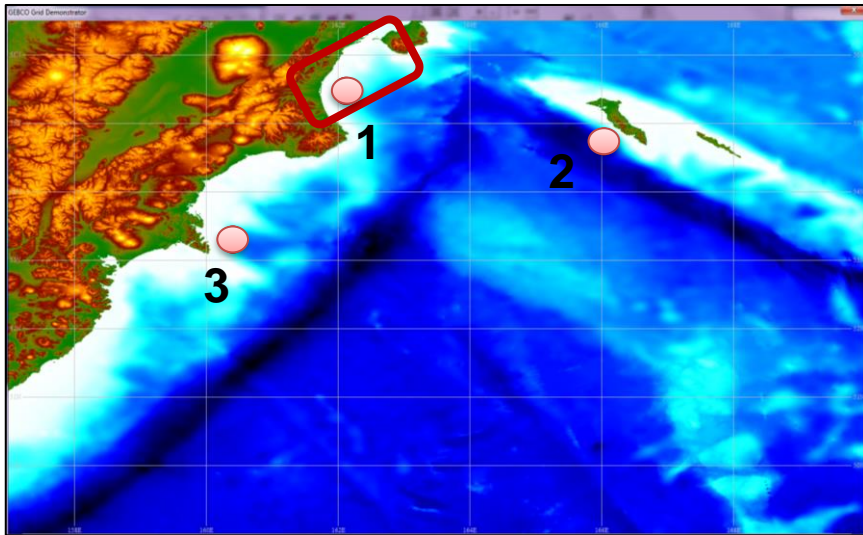
Камчатка, Камчатский залив (объем оползня V2)



Моделирование процесса возбуждения и распространения цунами, возникших в результате оползней* и их воздействие на подвижные объекты

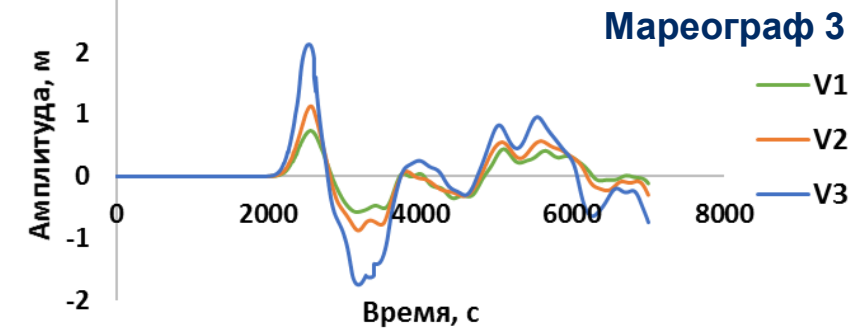
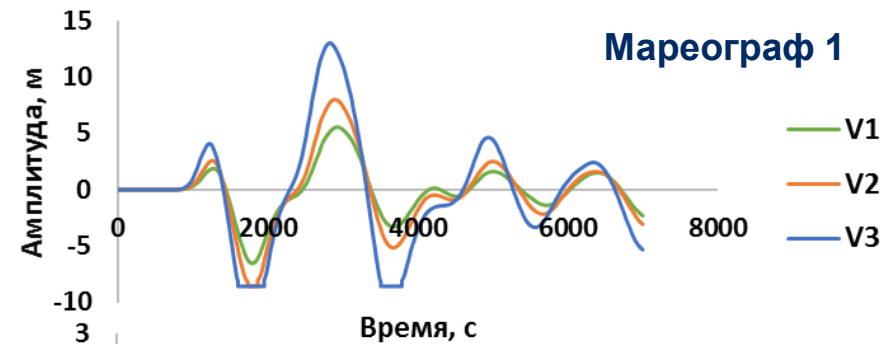
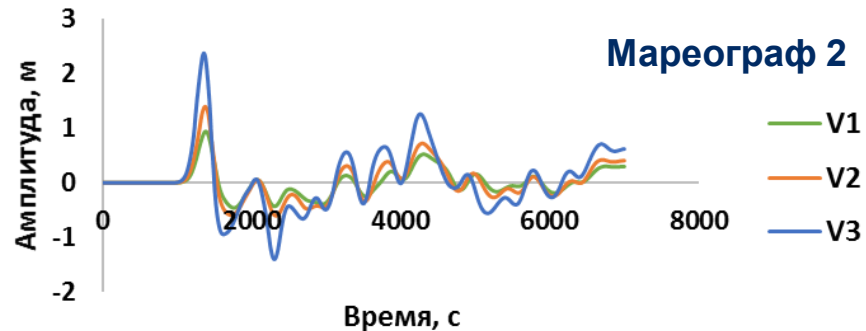
Камчатка, Камчатский залив

Карта акватории, место размещения потенциального оползня и мареографов



Рассматриваются следующие параметры оползневой массы

Обозначение	Объем оползня, км ³
V1	12
V2	20
V3	30

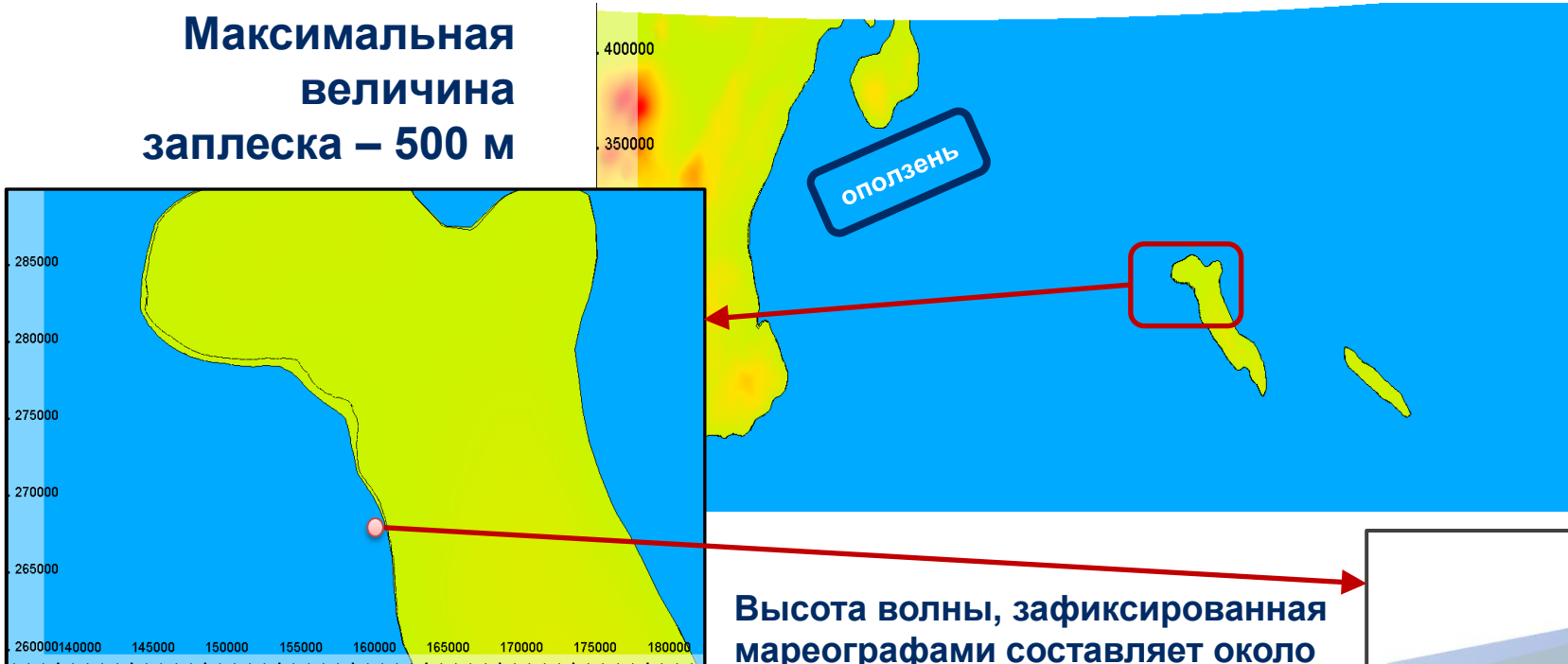


*Работы выполнены совместно с ИМГИГ ДВО РАН

Моделирование процесса возбуждения и распространения цунами, возникших в результате оползней* и их воздействие на подвижные объекты

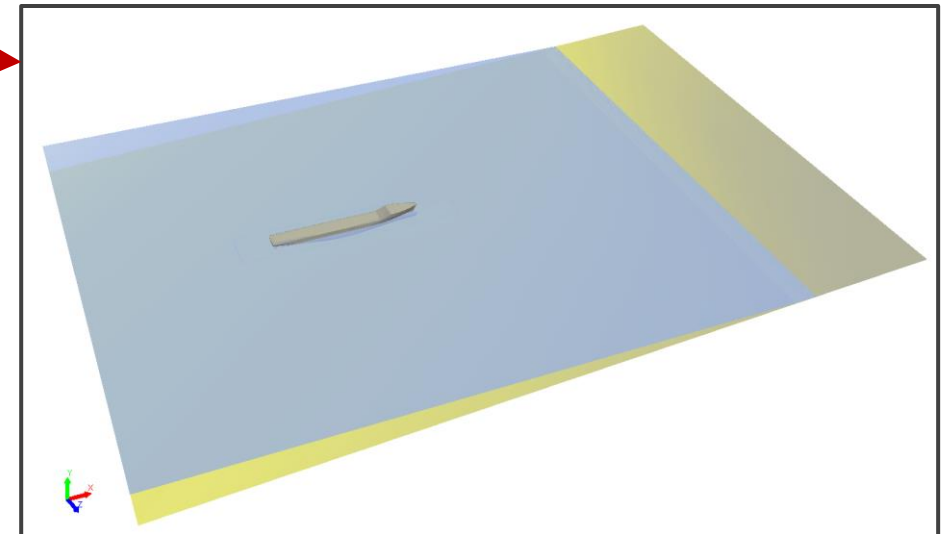
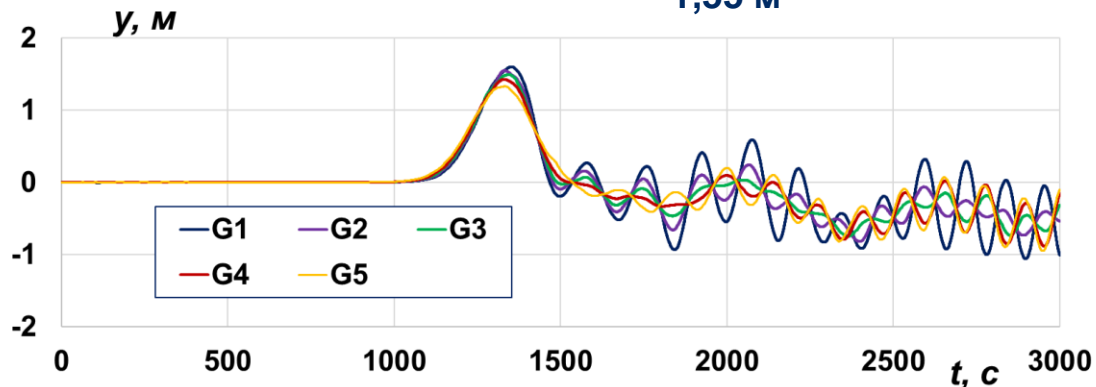
Камчатка, Камчатский залив (объем оползня V2)

Максимальная
величина
заплеска – 500 м



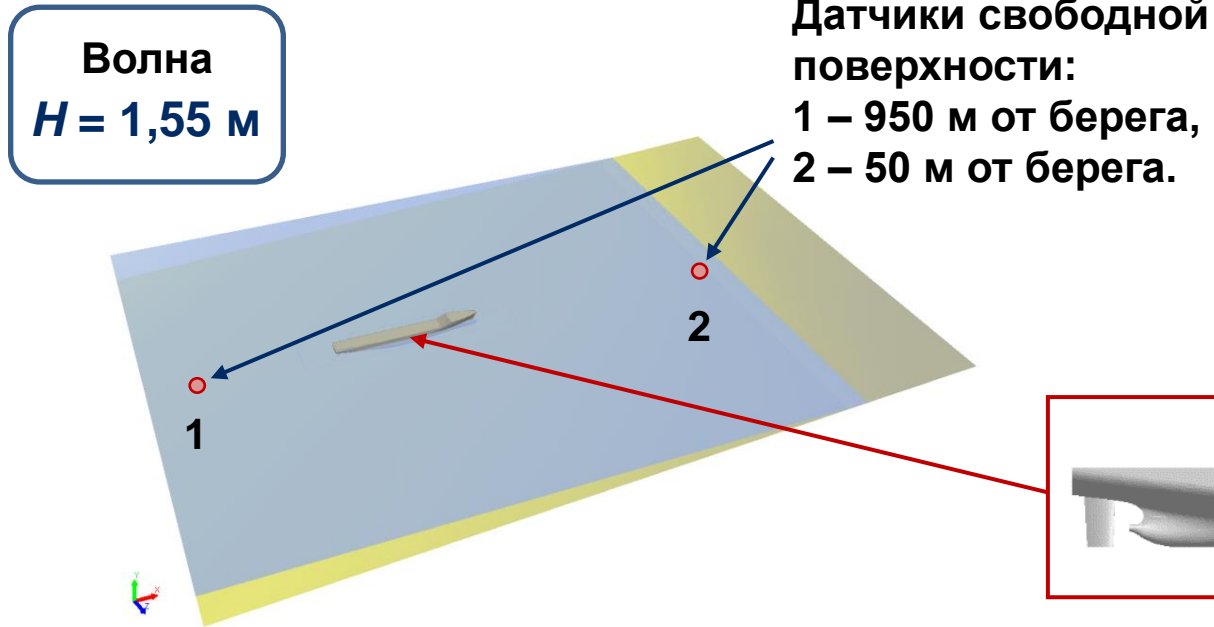
Для исследования был выбран остров Беринга. Черной линией по области суши отображена линия заплеска, характеризующая максимальный накат на сушу за весь промежуток времени

Высота волны, зафиксированная мареографами составляет около 1,55 м



Исследование воздействия первой волны цунами на контейнеровоз, расположенный у берега

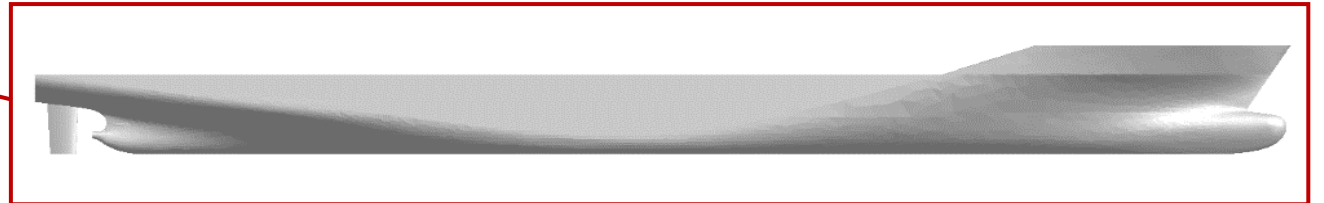
Схема расчетной области



Рассматривается натекание солитона на модель контейнеровоза, расположенного у берега.

Длина судна составляет около 240 м.

Модель контейнеровоза KCS



Проводится оценка:

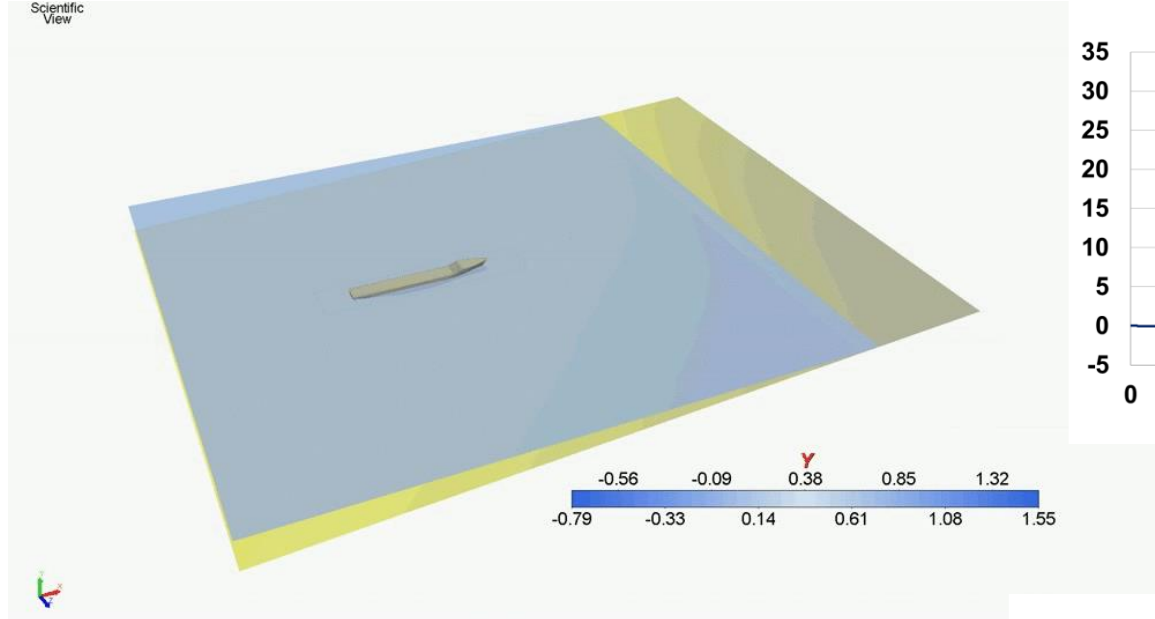
- волновой картины;
- сноса судна;
- распределения давления воды на поверхности контейнеровоза.

Моделируется:

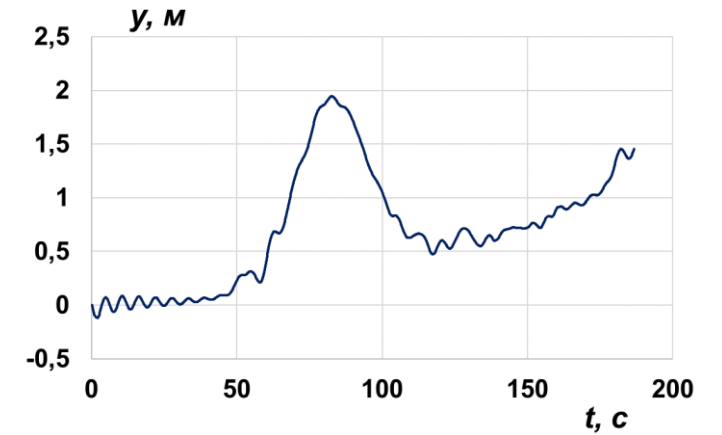
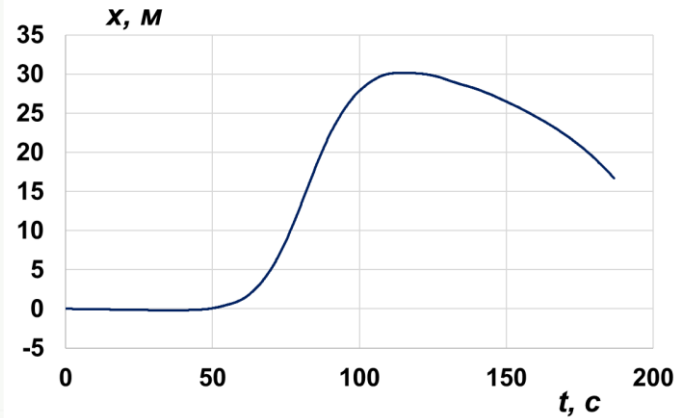
- а) прямое натекание волны на контейнеровоз;
- б) косое натекание под углом;
- в) натекание волны на контейнеровоз, расположенный вдоль берега

Исследование воздействия первой волны цунами на контейнеровоз, расположенный у берега

Визуальная картина распространения волны

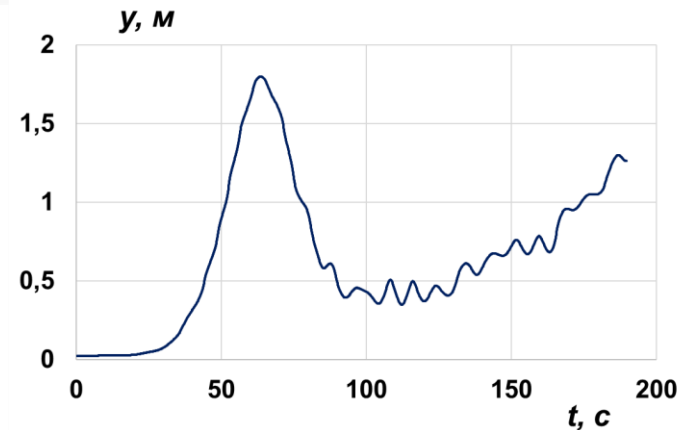
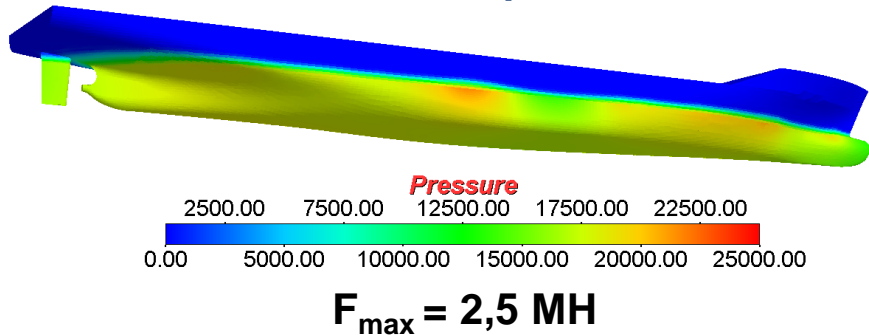


Снос контейнеровоза по осям



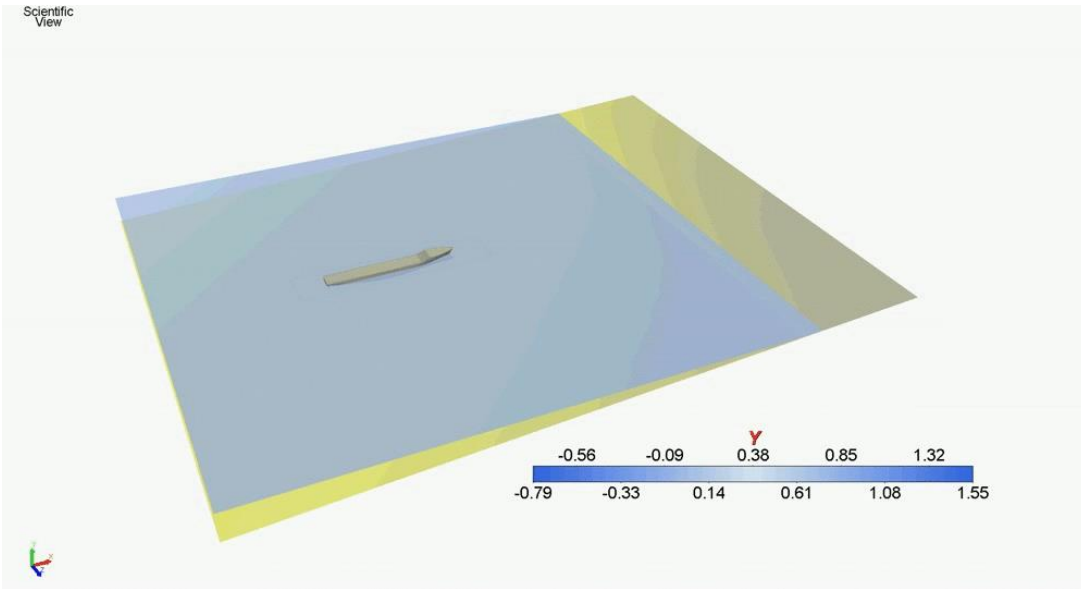
Показания датчиков свободной поверхности

Распределение давления на корпусе контейнеровоза

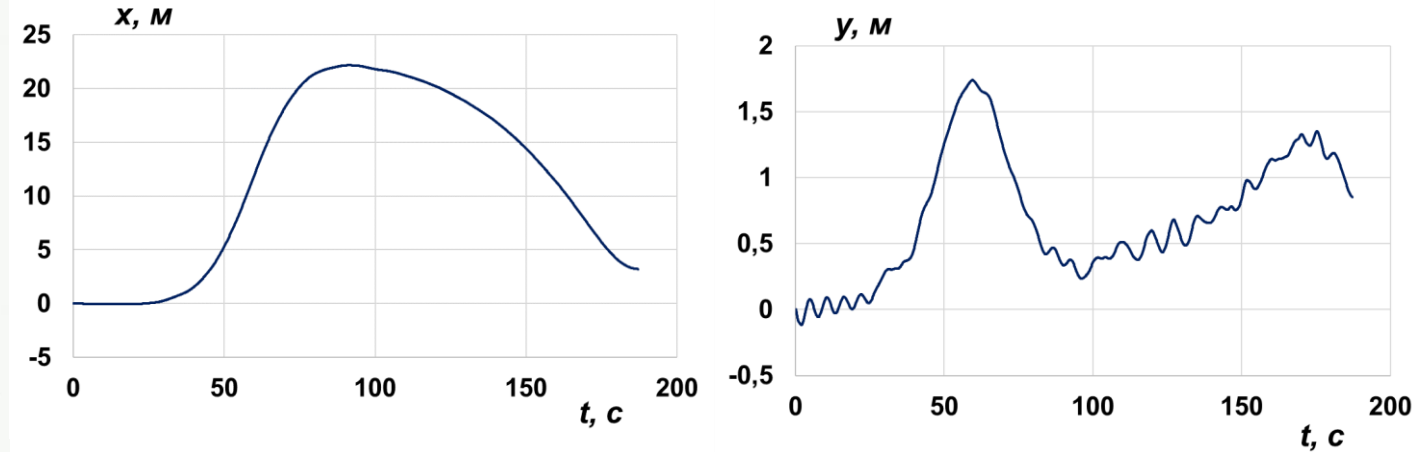


Исследование воздействия первой волны цунами на контейнеровоз, расположенный у берега

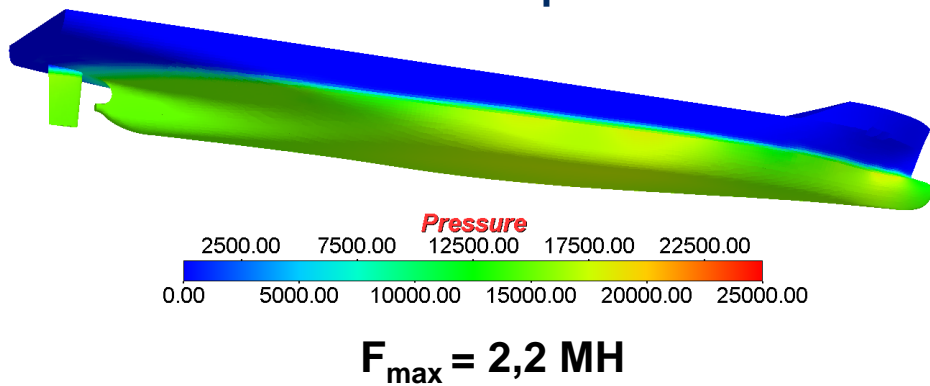
Визуальная картина распространения волны



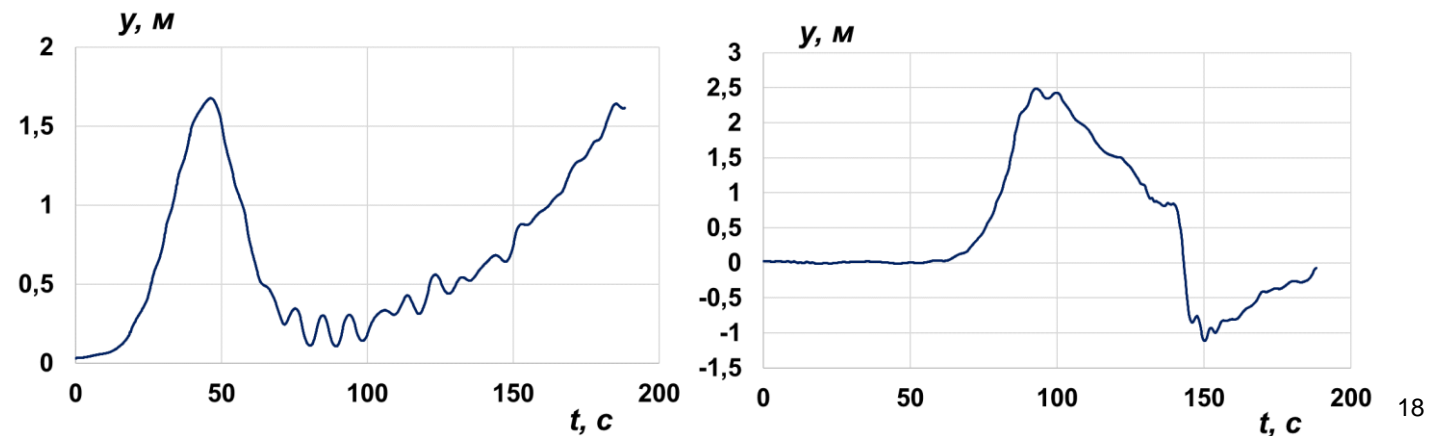
Снос контейнеровоза по осям



Распределение давления на корпусе контейнеровоза

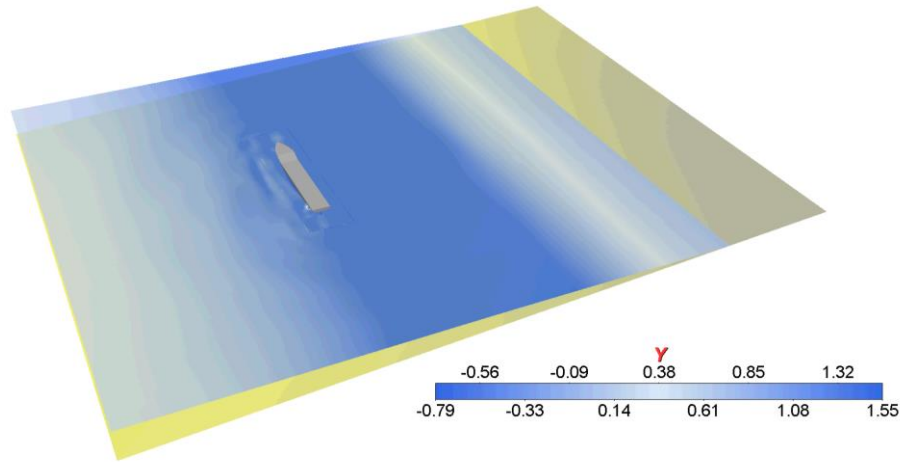


Показания датчиков свободной поверхности

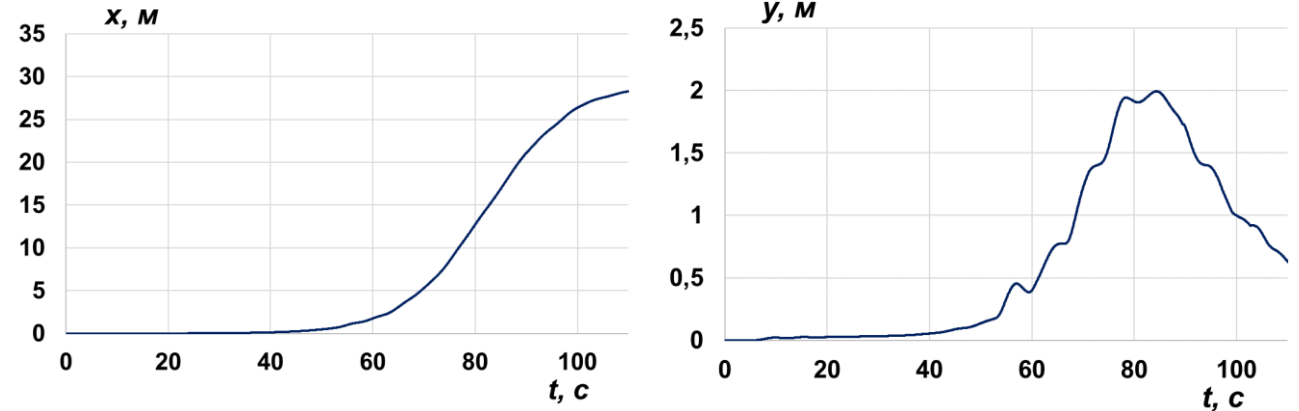


Исследование воздействия первой волны цунами на контейнеровоз, расположенный у берега

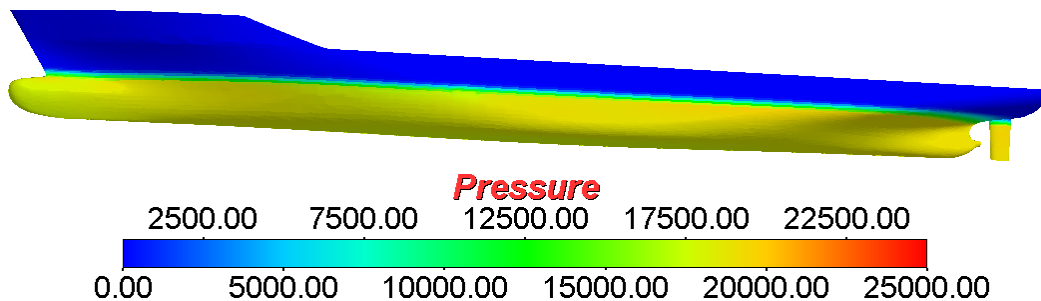
Скрининг View



Снос контейнеровоза по осям

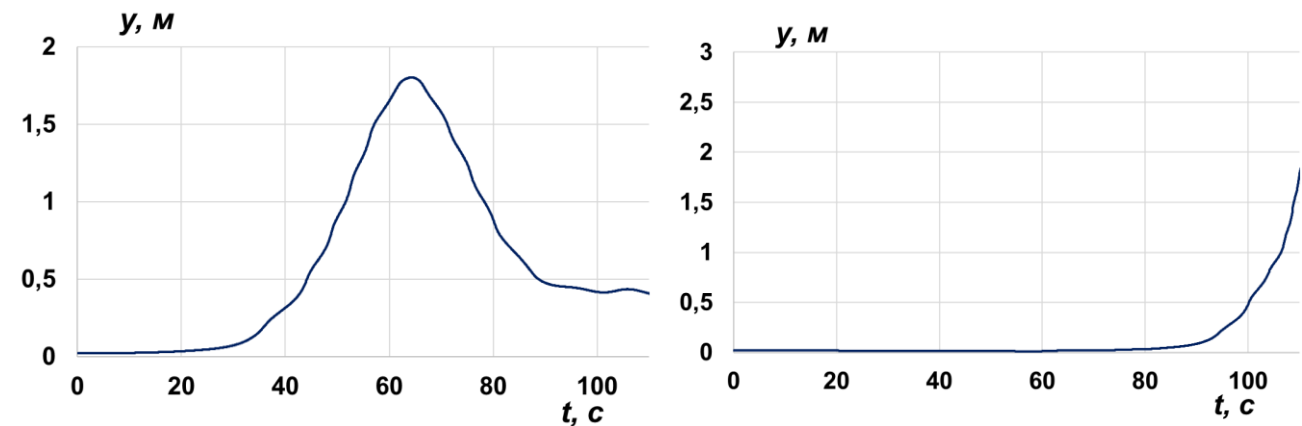


Распределение давления на корпусе контейнеровоза



$F_{\max} = 4,2 \text{ МН}$

Показания датчиков свободной поверхности



Заключение

Основные результаты:

- представлена методика, основанная на трехмерных уравнениях Навье-Стокса, позволяющая моделировать генерацию и распространение волн цунами и их воздействие на инфраструктуру побережья при накате
- методика реализована на базе российского пакета программ ЛОГОС и валидирована на ряде задач натекания жидкости на препятствия
- проведена апробация настоящей методики на комплексной задаче возникновения волн цунами в результате схода оползня и последующем натекании первой волны на плавающий объект – контейнеровоз, расположенный у берега

Данные исследования проведены с финансовой поддержкой программы Минобрнауки РФ по созданию молодёжных лабораторий (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания гидродинамических характеристик жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования промышленных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах петафлопсного класса»)

**Спасибо
за внимание!**

