

УДК 004.94:528.952

©А. С. Козелков^{1,2}, Л. М. Богомолов³, В. В. Смазнов, В. В. Курулин^{1,2}, Е. С. Тятюшкина^{1,2*}, 2023

¹Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188, Нижегородская обл., г. Саров, пр. Мира, д. 37.

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

³Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

*leno4ka-07@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РФ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ — СТОКСА

Статья поступила в редакцию 20.12.2021, после доработки 13.12.2022, принято в печать 15.02.2023

Аннотация

Приводятся результаты моделирования оползневых цунами у полуострова Камчатка в части акватории Тихого океана. Дано описание используемой модели на основе трехмерных уравнений Навье—Стокса. Для учета реологии оползневых масс модель дополнена реологическим соотношением, основанным на модели Бингама. Предложена модификация классической модели Бингама с ненулевым пределом текучести, которая подразумевает, что среда покоится, либо перемещается как твердое тело в случае отсутствия в среде напряжения, превышающего этот предел. Применение классической модели невозможно в рамках используемой системы уравнений. В статье предложена ее модификация, которая заключается в возможности изменения предела текучести до нулевого значения путем добавления линейной функции до заданной скорости сдвига. До ее достижения жидкость течет как ньютоновская, а после — режим течения вещества подчиняется закону Бингама.

Для моделирования волн в реальных акваториях используется оригинальный алгоритм, реализующий открытые граничные условия. Этот алгоритм основан на использовании демпфирующего приграничного слоя. Он поглощает кинетическую энергию приходящей волны, что учитывается с помощью дополнительного источника в уравнении момента импульса. Предложен способ определения коэффициента сопротивления, значение которого определяет интенсивность поглощения кинетической энергии волны.

Используемая математическая модель позволяет единым образом моделировать возникновение, распространение и накат на берег волн цунами оползневого происхождения. Приводятся результаты моделирования схода подводного оползня в акватории Камчатского залива около г. Усть-Камчатска с учетом батиметрических данных. Проведен анализ зависимости высот волн от объема оползня в зоне его начального положения и в нескольких точках у побережья, а также отмечены участки побережья (в частности, на острове Беринга), которые могут наиболее сильно пострадать при возникновении оползневых цунами в этой акватории.

Ключевые слова: цунами, оползень, реология, численное моделирование, уравнения Навье—Стокса, метод VOF, пакет программ ЛОГОС

©А. С. Козелков^{1,2}, Л. М. Богомолов³, В. В. Смазнов, В. В. Курулин^{1,2}, Е. С. Тятюшкина^{1,2*}, 2023

¹Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics (FSUE RFNC — VNIIEF), 607188, Mira Ave, 37, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russia

²Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev, 603950, Minin Street, 24 Nizhny Novgorod, Russia

³Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences 693022, Nauki St., 1B, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*leno4ka-07@mail.ru

SIMULATION OF LANDSLIDE TSUNAMI IN THE RUSSIAN FAR EAST BASED ON 3D NAVIER—STOKES EQUATIONS

Received 20.12.2021, Revised 13.12.2022, Accepted 15.02.2023

Abstract

The paper presents the results of modeling landslide tsunamis near the Kamchatka Peninsula in part of the Pacific Ocean. The paper describes the model based on the three-dimensional (3D) Navier—Stokes equations. The model is supplemented with the rheological relation based on the Bingham model to account for the rheology of landslide masses. The paper proposes a modification

Для цитирования: Козелков А.С., Богомолов Л.М., Смазнов В.В., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С. Моделирование оползневых цунами на Дальнем Востоке РФ на основе трехмерных уравнений Навье—Стокса // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 3. С. 30–51. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-3

For citation: Kozelkov A.S., Bogomolov L.M., Smaznov V.V., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S. Simulation of Landslide Tsunami in the Russian Far East Based on 3D Navier—Stokes Equations. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023, 16, 3, 30–51. doi:10.59887/2073-6673.2023.16(3)-3

of the classical Bingham model with a non-zero yield strength, which implies that the medium is at rest or it moves as a solid (body) in the absence of a tension in the medium exceeding this limit. The application of the classical model is impossible within the framework of the used equation system. The paper proposes its modification, which consists in the possibility of changing the yield strength to zero value by adding a linear function to a given shear rate, until which the fluid flows as Newtonian and after reaching it, the flow conditions of the substance obeys Bingham's law.

An original algorithm is used to simulate waves in real water areas, it implements open boundary conditions. The algorithm is based on the use of a damping boundary layer that absorbs the kinetic energy of the incoming wave, which is taken into account using an additional source in the angular momentum equation. A method is proposed for determining the resistance coefficient, the value of which determines the intensity of absorption of the kinetic energy of the wave.

The used mathematical model makes it possible to model in a single way the occurrence, propagation and rolling on shore of tsunami waves of landslide origin. The results of modeling of an underwater landslide in the waters of the Kamchatka Bay near the city of Ust-Kamchatsk are presented, taking into account bathymetric data. The paper includes the analysis of dependence of wave heights on the volume of landslide in the zone of its initial position and at several points of the coast, as well as sections of the coast (in particular on Bering Island), which may be most severely affected by the occurrence of landslide tsunamis in this water area.

Keywords: tsunami, landslide, rheology, numerical simulation, Navier—Stokes equations, VOF method, the LOGOS software package

1. Введение

Важной задачей механики жидкости является моделирование возникновения, распространения и процесса наката на берег волн цунами. В настоящее время для моделирования волн цунами, главным образом, применяются модели, основанные на теории мелкой воды; см., например, [1, 2]. Программы, основанные на этой теории [3, 4], позволили провести численное моделирование многих исторических цунами и получить адекватные оценки [5–7]. Система уравнений мелкой воды хорошо зарекомендовала себя при моделировании распространения волн цунами, однако она не способна воспроизвести сложную структуру трёхмерного течения. Существует ряд физических свойств цунами, которые необходимо учитывать при цунамирайонировании и прогнозировании [8–9]. Сложные трехмерные структуры движения жидкости характерны в очаге цунами. Такие структуры возникают при вхождении в воду оползней, обломков скал, небесных тел. Также трехмерным является процесс трансформации волны в шельфовой зоне при ее обрушении, накате на берег и продвижении по суше с учетом ее взаимодействия с береговой инфраструктурой.

Для учета всех особенностей трехмерной структуры течения необходимо использовать численное моделирование, основанное на системе трехмерных уравнений Навье—Стокса [8–11]. Данная система является наиболее полной системой уравнений вязкой жидкости, учитывающей сложную структуру течений. Такая математическая модель позволяет единым образом моделировать движение и взаимное влияние «твердой» (оползень, тело), водной и воздушной сред. В настоящее время система уравнений Навье—Стокса уже начинает активно использоваться для расчета цунами [8, 9, 11–13].

Одной из причин возникновения волн цунами является сход подводных оползней. Как известно, на Камчатке высока вероятность оползневых явлений [14, 15], которые могут приводить к возникновению цунами. Гидродинамические модели, применяемые для моделирования движения оползня, рассматривают его как ньютоновскую вязкую жидкость [16]. Такое упрощение может существенно повлиять на результаты моделирования, по причине неточного предсказания скорости движения оползневых масс. Для более точного моделирования движения оползня необходимо учитывать его реологические свойства. В гидродинамических моделях, это можно сделать, рассматривая среду как неньютоновскую с определенными реологическими свойствами.

В настоящей статье приводится описание и результаты применения гидродинамической модели, которая позволяет единым образом моделировать возникновение, распространение и накат на берег волн цунами оползневого происхождения. В ее основе лежит система трёхмерных уравнений Навье—Стокса, в которой для учета границы раздела фаз используется дополнительное уравнение переноса объемных долей (метод Volume of Fluid VOF) [17]. Для моделирования оползневой массы с учетом ее реологических свойств, вводится модификация классической модели Бингама [18, 19] с ненулевым пределом текучести, которая подразумевает, что среда покоится, либо перемещается как твердое тело в случае отсутствия в среде напряжения, превышающего этот предел. Применение классической модели невозможно в рамках используемой системы уравнений, в которой для связи скорости сдвига и напряжения сдвига используется молекулярная вязкости или эффективная вязкость. В статье предложена ее модификация, которая заключается

в возможности изменения предела текучести до нулевого значения путем добавления линейной функции до заданной скорости сдвига. До ее достижения жидкость течет как ньютоновская, а после — режим течения вещества подчиняется закону Бингама.

В статье представлены результаты численного моделирования гипотетических случаев возникновения цунами, образовавшихся в результате схода подводных оползней в акватории Камчатского залива. Проведен анализ зависимости высот волн от объема оползня в источнике и в нескольких точках у побережья. Также определяются участки побережья (в частности, на острове Беринга), которые могут наиболее сильно пострадать при возникновении оползневых цунами в этой акватории.

2. Математическая модель

Для моделирования распространения волн цунами, возникших в результате схода оползней (как надводных, так и подводных) будем применять гидродинамическую модель, основанную на системе уравнений Навье—Стокса, дополненной уравнением переноса объемных долей отдельных фаз. Предполагается, что течение изотермическое, а поле скорости общее для всех фаз — этот подход называется VOF [8, 12, 17, 20]. Учитывая данные допущения, система уравнений, состоящая из уравнения сохранения массы, уравнений сохранения импульса и уравнения переноса объемной доли, в декартовых координатах имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i, \\ \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \alpha_w) = 0, \\ \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \alpha_l) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где i, j — нижние индексы, указывающие на принадлежность векторных компонент к декартовым координатам, $i, j = \{x, y, z\}$, ρ — средняя плотность, вычисляемая как $\rho = (\rho_w \alpha_w + \rho_a \alpha_a + \rho_l \alpha_l)$, w — (water) нижний индекс, указывающий на соответствие фазе «вода», a — (air) нижний индекс, указывающий на соответствие фазе «воздух», l — (landslide) нижний индекс, указывающий на соответствие фазе «оползень», α_w — объемная доля воды, α_l — объемная доля оползня, u_i — компонента вектора скорости, $i = \{x, y, z\}$, t — время, p — давление, x_i — компонента вектора декартовых координат, $i = \{x, y, z\}$, τ_{ij} — тензор вязких напряжений, который, согласно гипотезе Буссинеска, принимает вид:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right), \quad (2)$$

где μ — динамическая вязкость, δ_{ij} — символ Кронекера, $g_i = \{0, 0, -9,81\}$ — компонента вектора ускорения свободного падения.

Учет силы тяжести осуществляется с использованием алгоритма, основанного на поправке объемных сил [8], который обеспечивает отсутствие паразитных осцилляций, связанных с неколокированным размещением неизвестных величин, на сетках с ячейками произвольного типа.

Система уравнений решается путем численного интегрирования на конечно-объемной расчетной сетке с ячейками произвольного типа. Для дискретизации уравнений используется оригинальный полностью неявный метод решения уравнений Навье—Стокса для расчета многофазных течений со свободной поверхностью [8, 21, 22]. Перед дискретизацией уравнений системы (1) имеет смысл воспользоваться преобразованиями, которые позволят повысить точность и устойчивость решения. Уравнение сохранения импульса запишем в полудивергентном виде, поскольку, как показано в [20, 23], такая запись компенсирует ошибки аппроксимации, связанные с неточным выполнением условия баланса массы в ячейке, и в результате повышает точность формы свободной поверхности:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j \rho) - u_i \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \rho) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i. \quad (3)$$

Таким образом, окончательно система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j \rho) - u_i \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \rho) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i, \\ \frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \alpha_w) = 0, \\ \frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \alpha_l) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) должна быть дополнена граничными условиями. Для задач цунами, как правило, используются граничные условия типа «стенка» для поверхности дна, неотражающие граничные условия на внешних границах акваторий. При моделировании наката никаких дополнительных граничных условий не требуется, используется только граничное условие «стенка» на подстилающей поверхности.

На твердых стенках градиент давления и объемных долей равен нулю:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0,$$

значение скорости равно нулю:

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0,$$

т. е. невозможно ни проскальзывание жидкости вдоль границы «жидкость — твердая стенка», ни движение по нормали к ней. На условной границе «жидкость — жидкость» должны быть непрерывны скорость и сдвиговые напряжения.

На верхней границе воздуха фиксируется нулевое статическое давление, градиенты скорости и объемных долей равны нулю:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0.$$

Решение задач о распространении волн цунами в акваториях с открытыми границами, где должно выполняться условие свободного ухода волн из расчётной области, требует использования неотражающих граничных условий, имитирующих бесконечное пространство за пределами расчётной области [24–29].

Представим здесь оригинальный метод моделирования выхода волн за границы расчетной области для трехмерного случая, неотражающие граничные условия (с точки зрения математической постановки). Для моделирования цунами данная проблема не нова.

В рамках теории мелкой воды применяют так называемые неотражающие граничные условия, которые минимизируют характеристики отражённых волн. Такие граничные условия выводятся математически из основной модели. В общем случае, рассматривается допущение, что выходная граница имеет точное аналитическое решение относительно выходящих из расчётной области волн. Зачастую, чтобы получить такие граничные условия прибегают к использованию метода характеристик или полиномиального разложения [25–28]. В [29] приводится обобщение подхода для задач в трехмерной постановке со свободной поверхностью, однако не анализируются высоты отраженных волн и рассматриваются только простые конфигурации расчетной сетки (прямоугольная расчетная область и структурированная сетка). Подход может быть обобщен на неструктурированные сетки с ячейками произвольной формы, один из способов представлен в [30]. Однако он не обеспечивает полный отвод волн из расчетной области, и отраженная волна может существенно повлиять на распространение волн.

Представленный здесь метод основан на использовании вблизи открытых границ демпфирующего приграничного слоя, который поглощает кинетическую энергию приходящей волны. Поглощение кинетической энергии приходящей волны в уравнении момента импульса (1) может быть учтено за счет добавления дополнительного источника I_i :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho g_i + I_i.$$

Добавленный источник импульса I_i аналогичен силе сопротивления, возникающей при течениях в пористых телах [21], пропорционален скорости и имеет противоположный знак:

$$I_i = -\delta \cdot k_s \cdot \varepsilon \cdot u_i.$$

Здесь k_s — коэффициент сопротивления, значение которого определяет интенсивность поглощения кинетической энергии волны (способ определения этого коэффициента будет предложен ниже), ε — геометрический коэффициент который отличен от нуля в слое демпфирования и линейно возрастает от начала зоны демпфирования к ее концу:

$$\varepsilon = \max\left(1 - \frac{l}{L}, 0\right),$$

где l — кратчайшее расстояние до границы расчетной области, L — ширина зоны демпфирования. Такое линейное распределение уменьшает эффект отражения волн от начала зоны демпфирования.

В данном методе свободными параметрами являются две величины: параметр k_s и ширина демпфирующего слоя L . Данные параметры напрямую влияют на эффективность поглощения волн, и, следовательно, на высоты отраженных волн. Их оптимальные значения зависят от параметров приходящих волн: высоты и длины волны и глубины канала. Необходимо определить оптимальные значения параметра k_s и ширину демпфирующего слоя L . Для этого решается задача распространения одиночной волны высотой H в каналах разной глубины. Волна с заданными параметрами распространяется от левой границы к правой свободной границе.

Начальный профиль волны задается следующей формулой:

$$\eta(x, 0) = H \operatorname{sech}^2(\gamma(x - X_s)),$$

где $\gamma = \sqrt{\frac{3H}{4d}}$, d — глубина канала, X_s — координата точки, в которой расположен гребень волны в начальный момент времени.

Начальная скорость волны равна:

$$u(x, 0) = \sqrt{\frac{g}{d}} \eta(x, 0).$$

Для определения оптимального значения параметра демпфирования k_s , моделировалось распространение волны в каналах разной глубины. Рассматривались постановки, представленные в табл. 1.

На первом этапе моделировалось распространение волны в каналах разной глубины для выбора оптимального параметра демпфирования k_s , при котором высота отраженной волны наименьшая. Затем при выбранной постоянной глубине канала варьировалась ширина зоны демпфирования L для одной длины волны.

На первом этапе рассмотрим четыре варианта постановки задачи, представленные в табл. 1. Для выбора оптимального параметра демпфирования сравнивалась высота отраженной волны с высотой приходящей волны в мареографе, который находится вблизи зоны демпфирования.

На рис. 1 показана схема расчетной области с местом установки мареографа.

На рис. 2 представлены графики сравнения высоты отраженной волны при различных параметрах демпфирования для каналов различной глубины. Параметры для каждой постановки задачи взяты из табл. 1.

По представленным графикам получены следующие результаты: оптимальный k_s для глубины канала 0,32 м равен 2000 с^{-1} , для глубины 3,2 м — 750 с^{-1} , для глубины 32 м — 175 с^{-1} , для глубины 320 м — 75 с^{-1} . Исходя из полученных данных, была подобрана зависимость параметра демпфирования от глубины канала (рис. 3):

$$k_s = \frac{1,1 \cdot 10^3}{\sqrt{d}}. \quad (5)$$

Таблица 1

Table 1

Постановки задачи

Problem setup

Постановка	Глубина канала, d , м	Длина канала, м	Высота волны, H , м	Длина волны, λ , м	Ширина зоны демпфирования, L , м
1	0,32	23	0,064	4,24	4
2	3,2	230	0,64	40,24	40
3	32	2300	6,4	402,4	400
4	320	23000	64	4024	4000

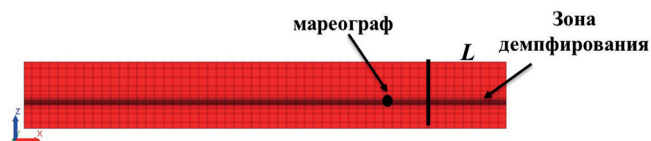


Рис. 1. Схема расчетной области

Fig. 1. Scheme of the design area

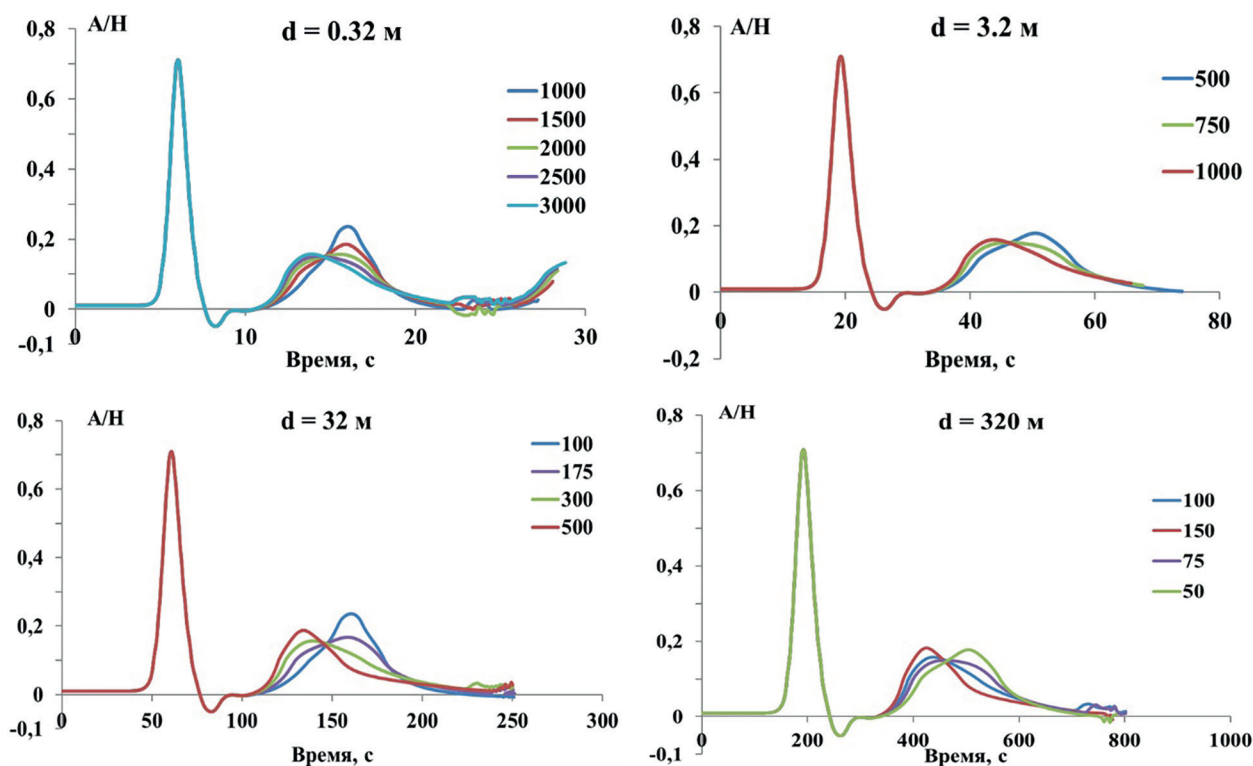


Рис. 2. Показания мареографа для всех постановок (A — высота волны, H — начальная высота волны)

Fig. 2. Gauge readings for all productions (A — wave height, H — initial wave height)

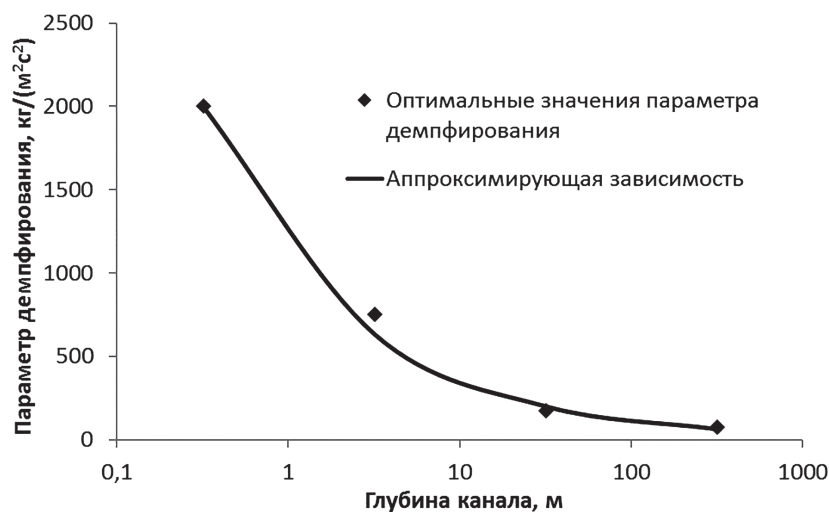


Рис. 3. Зависимость параметра демпфирования k_s от глубины канала

Fig. 3. The dependence of the damping parameter k_s on the channel depth

Для определения оптимального значения ширины зоны демпфирования решалась задача с варьированием ширины зоны демпфирования L при неизменном параметре k_s . Длина волны λ составляла 40,24 м и ее высота 0,64 м. Канал был выбран длиной 13λ и глубиной 3,2 м, ширина зоны демпфирования варьировалась: $L = 1 \div 9\lambda$. Параметр демпфирования определялся зависимостью (5).

На рис. 4 представлены показания мареографа, установленного в точке за 20 м до начала зоны демпфирования. Графики демонстрируют сравнение высоты проходящих в мареограф волн с высотой отраженных волн.

Из графиков видно, что при увеличении зоны демпфирования, как и ожидалось, высота отраженной волны уменьшается. Процентное отношение высот отраженных волн к высотам волн, подходящих к границе демпфирующего слоя приведены в табл. 2.

Из представленной таблицы видно, что при ширине зоны демпфирования 6λ высота отраженной волны относительно проходящей составляет менее 5%. Затем при увеличении ширины этой зоны высота отраженной волны практически не меняется. В результате проведенных численных экспериментов был выработан критерий, определяющий степень отражения волны от границы.

Критерий: Для обеспечения величины отраженной волны не более 10% ширина демпфирующего слоя должна составлять от 2 до 6 длин проходящих волн. При задании демпфирующего слоя размером больше 6 длин проходящих волн, отраженная волна не превышает 5%.

Метод демпфирования волн является наиболее предпочтительным для решения реальных задач, поскольку этот метод возможно настроить для конкретной задачи за счёт выбора оптимальных параметров демпфирования.

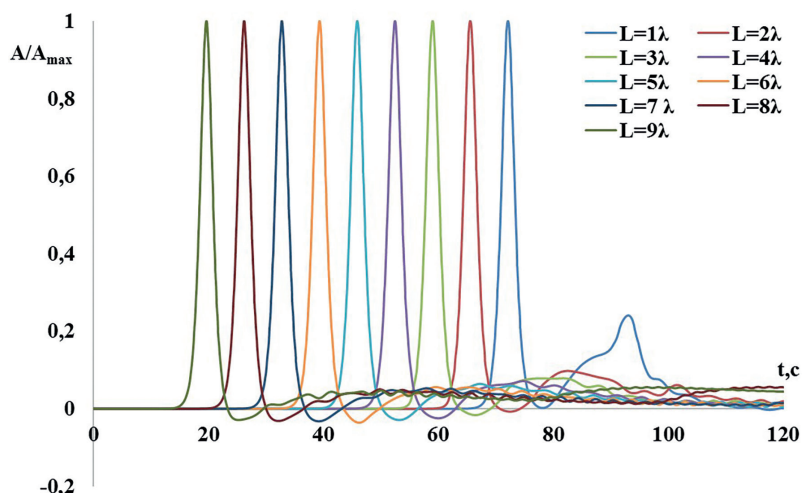


Рис. 4. Сравнение высоты проходящих волн с высотой отраженных волн

Fig. 4. Comparison between amplitudes of incoming and reflected waves

Таблица 2
Table 2

Зависимость высоты отраженной волны от ширины зоны демпфирования
The reflected wave amplitude versus the damping area width

Ширина зоны демпфирования	Процентное отношение высот отраженных волн к высотам волн, подходящих к границе поглощающего слоя, %
1λ	23,8
2λ	9,7
3λ	7,8
4λ	6,5
5λ	5,3
6λ	4,6
7λ	4,5
8λ	4,4
9λ	4,4

Дискретизация системы уравнений (4) осуществляется методом конечных объемов на неструктурированной сетке с ячейками произвольной формы, а для её численного решения используется полностью неявный метод [21, 22], основанный на известном алгоритме SIMPLE. Моделирование течений со свободной поверхностью требует определенных модификаций алгоритма SIMPLE, а именно: необходимо сделать полностью неявную модификацию, тем самым сняв жесткие ограничения на шаг по времени и повысив сходимость итерационного процесса. Описание основных формул модифицированного алгоритма SIMPLE детально описано в [8, 21, 22].

3. Моделирование движения оползня

Оползневый источник — это движение части донного грунта, обладающего определенными упругопластичными и деформационными свойствами (так называемые реологические свойства), которые необходимо учитывать при моделировании движения оползня. С точки зрения вычислительной гидромеханики реологические свойства вещества задаются моделью, одновременно учитывающей свойства ньютоновской жидкости, вязкость которой не зависит от режима деформирования, и свойства идеально упругого тела, в котором в каждый момент времени величина деформации пропорциональна приложенному напряжению. Эти понятия были обобщены для сред, проявляющих одновременно пластичные (вязкостные) и упругие свойства. Реологические соотношения, связывающие тензор напряжений и тензор скоростей деформации, описывают поведение различных сред при нагрузках и при течении.

Для моделирования движения земных почв (грунтов) и донных грунтов используют модель бингамовского пластика (модель Бингама) [18, 19]. Бингамовский пластик — неньютоновская жидкость, имеющая ненулевой предел текучести (начальное напряжение сдвига), которой свойственно сохранение структуры (неподвижность) вплоть до достижения напряжения, равного начальному напряжению сдвига.

Модель Бингама, описывающая течение вязкопластической среды, записывается в следующем виде:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma},$$

где τ — напряжение сдвига, τ_0 — предел текучести, μ_p — пластическая вязкость, $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига.

Ненулевое значение предела текучести τ_0 означает, что в случае отсутствия в среде напряжений $\tau > \tau_0$, среда покоится, либо перемещается как твердое тело. Такой режим не описывается в рамках используемой в статье системы уравнений, в которой связь скорости сдвига и напряжения сдвига определяется значением молекулярной вязкости или эффективной вязкости. Однако такой режим движения можно приближенно учесть, заменив исходную реологическую зависимость предлагаемой модификацией, которая осуществляется комбинацией двух функций. Функция $\tau'(\dot{\gamma})$ является линейной, и её вид зависит от выбранного параметра j_0 — переходной точки для скорости сдвига, после которой режим течения вещества подчиняется закону Бингама. На рис. 5 показан исходный график зависимости между напряжением и скоростью сдвига для ньютоновской жидкости, бингамовского пластика и его модификация.

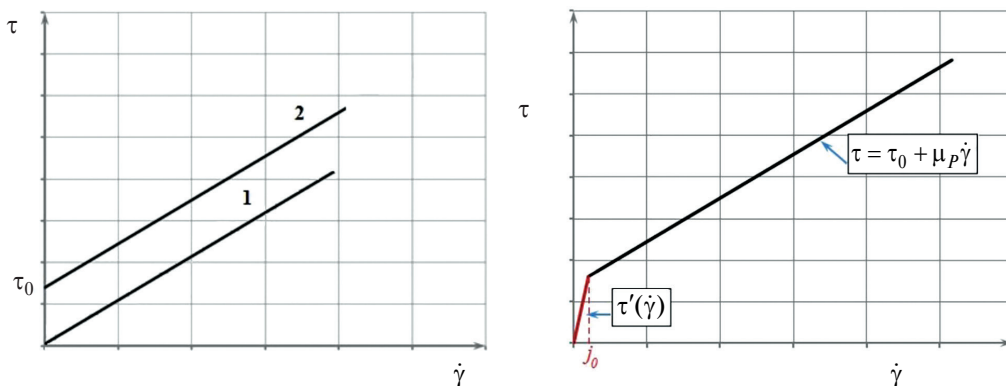


Рис. 5. Реологические зависимости: (слева: 1 — ньютоновская жидкость, 2 — бингамовский пластик; справа: модифицированная модель бингамовского пластика)

Fig. 5. Rheological dependences: (left: 1 — Newtonian liquid, 2 — Bingham plastic, right: a modified model of Bingham plastic)

Модифицированная реология имеет нулевой предел текучести и может учитываться в рамках уравнений Навье—Стокса. Формула для вязкости выглядит следующим образом:

$$\mu(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \mu_0, & \dot{\gamma} = 0, \\ \frac{\tau'(\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}}, & \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_0, \\ \frac{\tau_0 + \mu_P \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}}, & \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_0, \end{cases} \quad (6)$$

где μ_0 — некоторое значение вязкости вещества при отсутствии скорости сдвига.

В таком виде модель реализована в отечественном пакете программ ЛОГОС, ориентированном на решение задач вычислительной гидродинамики на произвольных неструктурированных сетках. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел тщательную верификацию [31, 32] и показал хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач, включая расчеты турбулентных [33–35] и геофизических течений [36–38].

4. Моделирование оползневых цунами, вызванного сходом подводного оползня у побережья полуострова Камчатка

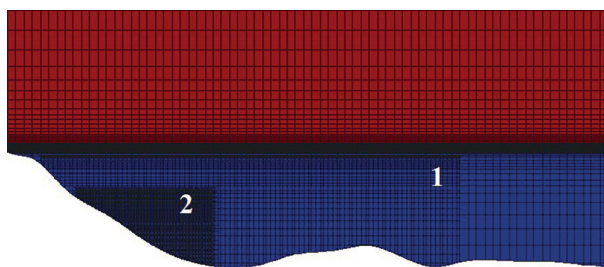


Рис. 6. Фрагмент расчетной сетки с блоками детализации (1 и 2 — блоки измельчения сетки, размеры ячеек в которых равны 650 м и 375 м соответственно)

Fig. 6. A computational grid fragment with refinement blocks (1 and 2 are grid refinement blocks with mesh sizes of 650 m and 375 m, respectively)

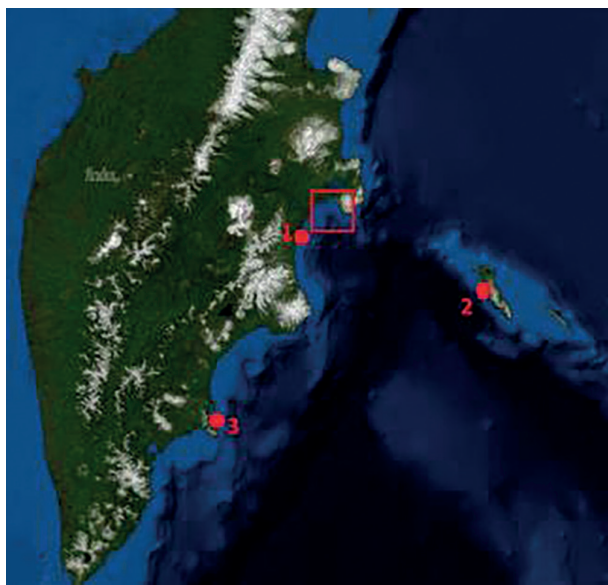


Рис. 7. Расположение оползня и расстановка мареографов (отмечены цифрами) [40]

Fig. 7. Landslide location and arrangement of tide gauges (figured) [40]

Как известно, на Камчатке высока вероятность оползневых явлений [14, 15], которые могут приводить к возникновению цунами. В статье представлены результаты численного моделирования цунами, вызванного возможным сходом подводного оползня в Камчатском заливе акватории Тихого океана у побережья полуострова Камчатка.

Проведено моделирование гипотетического схода оползня объемом 20 км³, толщиной 400 м. Район схода подводного оползня в районе г. Усть-Камчатска отмечен рамкой на рис. 6. Форма оползня, по сути, является бруском, нижняя граница оползня повторяет форму подстилающей поверхности (дна). Координаты центра оползня задаются на дне акватории в интересующем месте, в данном случае они равны 55,75 с. ш. 162,8 в. д.

Моделирование проводилось на расчетной сетке с базовым размером ячейки (размер ячеек в горизонтальных направлениях X и Y) 1300 м, покрывающей акваторию Тихого океана у побережья Камчатки. Сетка состоит из ~30,6 млн. ячеек. Батиметрия была взята из генеральной батиметрической карты океанов (GEBCO 2014 с разрешающей способностью 30 угловых секунд) [39]. Для более точного моделирования распространения волн сетка имеет сгущение к поверхности раздела фаз. Для детализации характера движения оползня были построены дополнительные блоки измельчения сетки в области его предполагаемого схода, размеры ячеек в которых задавались равными 650 м и 375 м для первого и второго блоков соответственно (рис. 7). Типичная задача моделирования схода оползня и распространения волн цунами в реальной акватории может потребовать до нескольких десятков процессоров и до нескольких десятков часов компьютерного счета.

На начальный момент времени оползень покоится, водная поверхность ровная. Оползень начинает движение под действием силы тяжести. Невозмущенная

глубина воды зависит от батиметрии, максимальная глубина достигает 7843 м, высота невозмущенного воздушного потока над уровнем воды составляет 1000 м. Граничные условия задачи включают непроницаемую границу с прилипанием (дно), набор неотражающих границ с условием демпфирования волн (боковые границы), на верхней открытой границе — заданное давление. При моделировании наката никаких дополнительных граничных условий не требуется, используется только граничное условие «стенка» на подстилающей поверхности.

Параметры оползневой, воздушной и водной фаз представлены в табл. 3.

Вязкость оползня вычисляется по модифицированной модели Бингама (формула (6)) с параметрами $\tau_0 = 1000$ Па и $\mu_p = 10$ Па·с.

На рис. 8 приведены поля распределения объемной доли фазы оползня в вертикальном сечении на различные моменты времени — 0, 100 и 200 с.

В рассматриваемой задаче при движении оползня на переднем фронте наблюдается образование зоны завихрения. Это может быть связано с высокой скоростью его движения, которая составляла примерно 53 м/с. На рис. 9 показано, как сходит оползень по склону. Видно, что оползень деформируется, а не сходит симметрично.

Таблица 3

Table 3

Свойства фаз
Properties of phases

Фаза	Молекулярная вязкость (кг/(м·с))	Плотность (кг/м ³)
Вода	0,001	1000
Воздух	1,85e-05	1,205

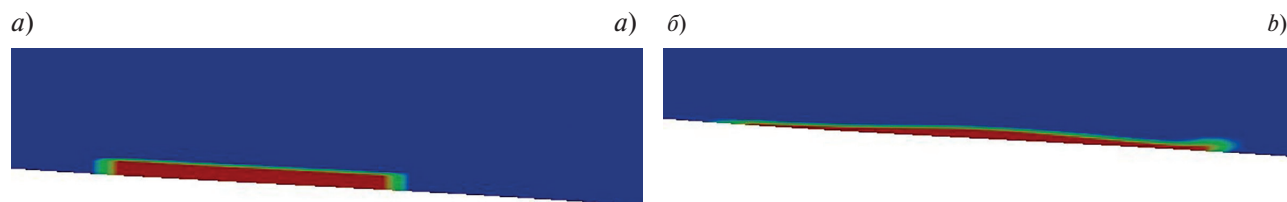


Рис. 8. Объемная доля оползня в продольном сечении на различные моменты времени: а — 0 с; б — 100 с; в — 200 с

Fig. 8. A volumetric fraction of landslide phase (longitudinal section) at various times: a — 0 s; b — 100 s; c — 200 s

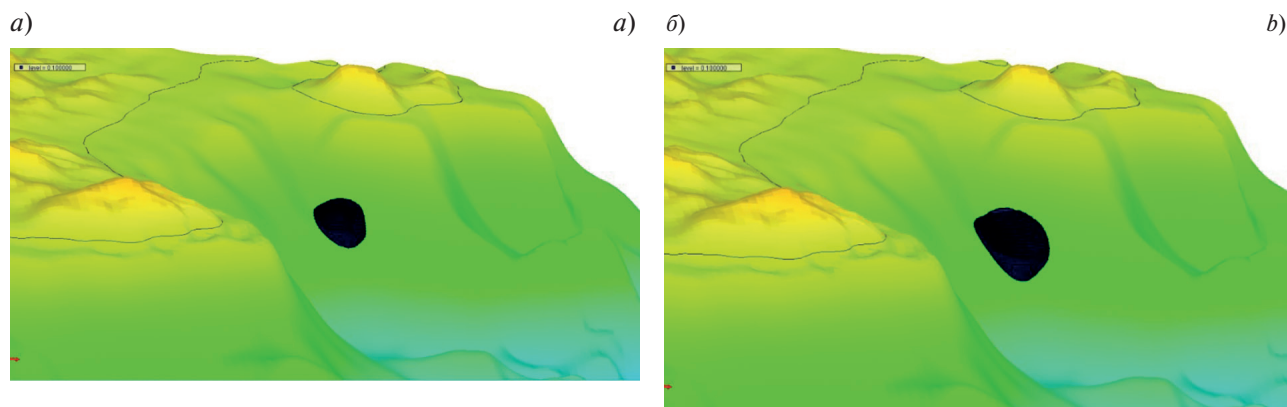


Рис. 9. Сход оползня по склону на различные моменты времени: а — 100 с; б — 200 с

Fig. 9. Landsliding on the slope at various times: a — 100 s; b — 200 s

На рис. 10 приведена карта распределения максимальных высот волн в акватории за все время расчета. Максимальная высота волны в источнике при сходе подводного оползня составила около 9 м. Волны с наибольшей высотой наблюдаются при достижении мелководья и при распространении над Камчатским хребтом.

На рис. 11 приведены картины распространения волн цунами в акватории в различные моменты времени.

На рис. 7 цифрами обозначены места установки виртуальных мареографов, в которых измеряется смещение водной поверхности. На рис. 12 приведены зависимости смещения водной поверхности от времени в точках установки виртуальных мареографов.

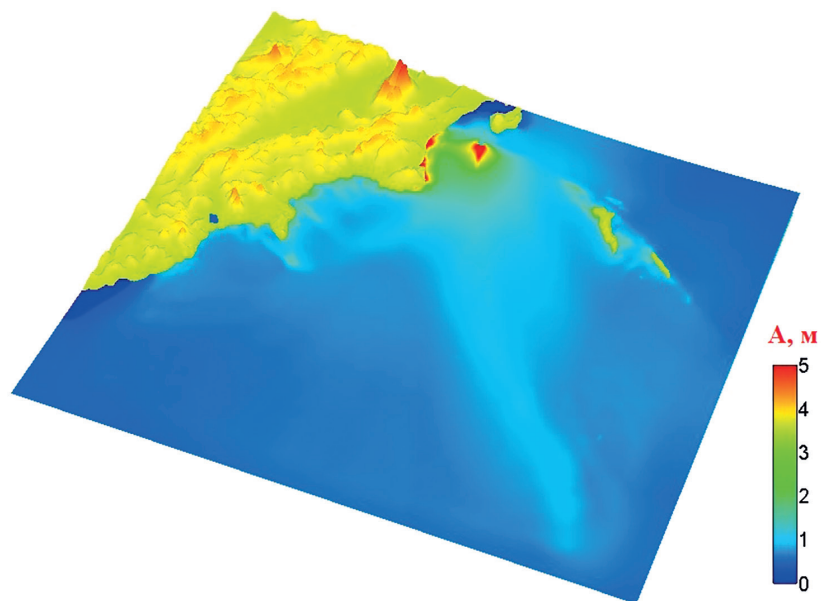


Рис. 10. Распределение максимальных высот волн, порожденных сходом подводного оползня, за все время расчета

Fig. 10. Distribution of maximum wave heights generated by a submarine landslide over the entire calculation period

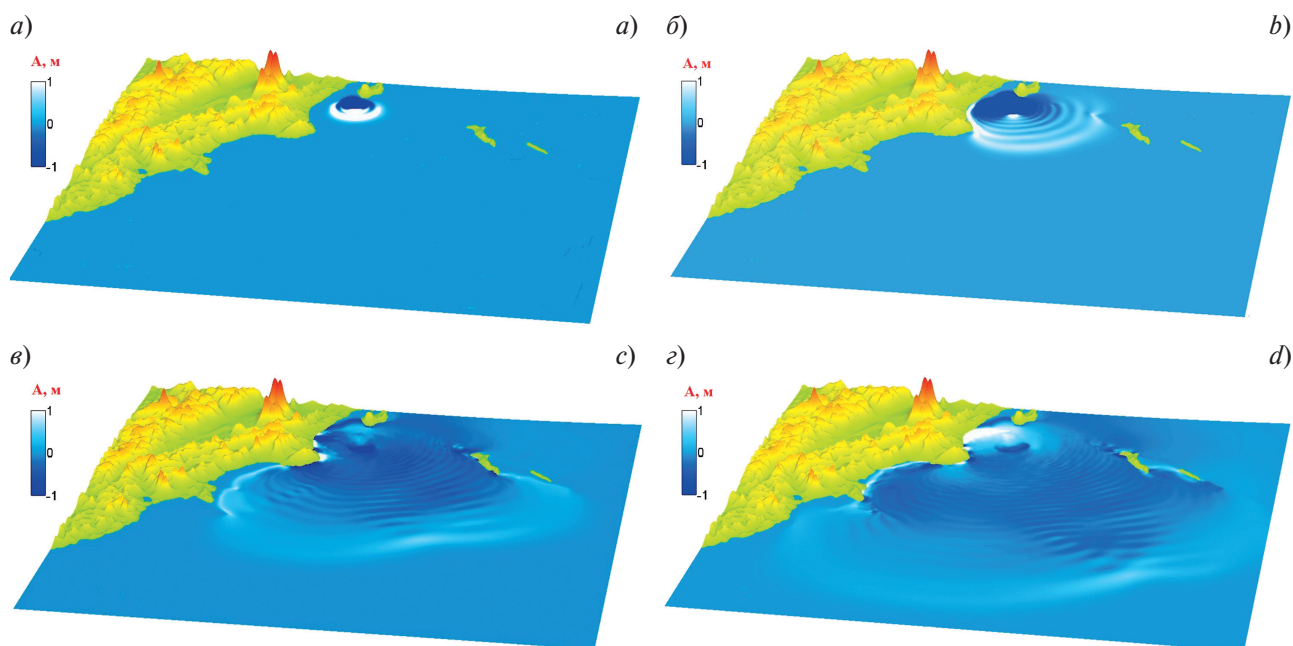


Рис. 11. Распространение волн на различные моменты времени: а — 300 с; б — 900 с; в — 2200 с; г — 3000 с

Fig. 11. Propagation of waves at various times: а — 300 s; б — 900 s; в — 2200 s; г — 3000 s

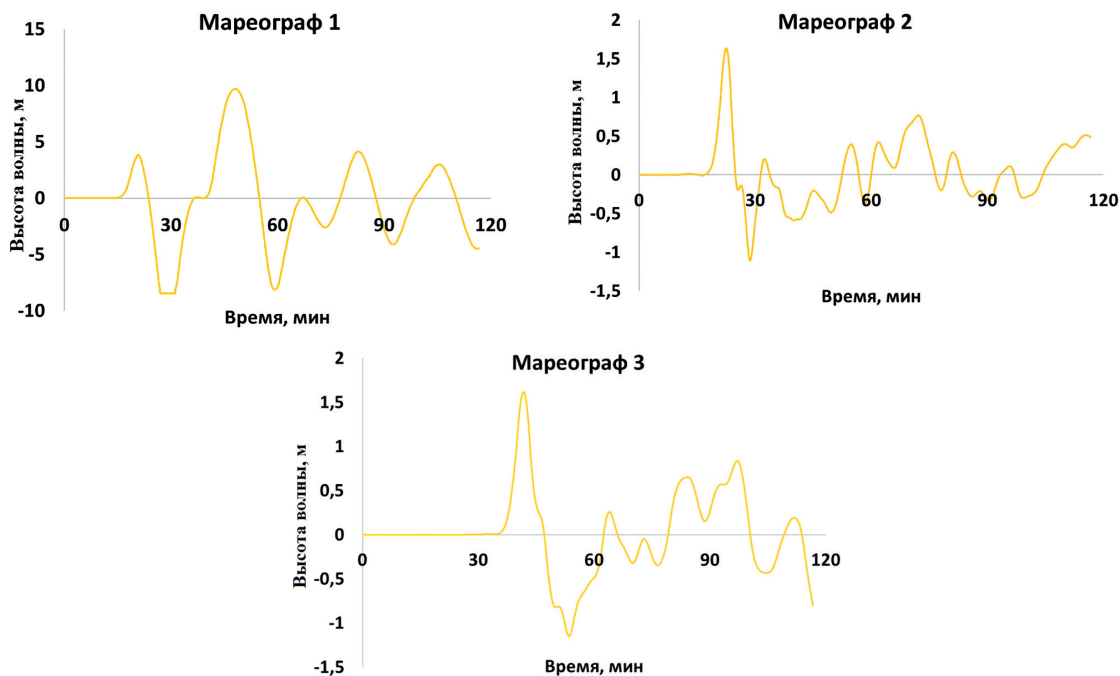


Рис. 12. Показания мареографов

Fig. 12. Tide gauge readings

Из представленных рисунков видно, что основная волна цунами распространяется в направлении схода оползня. Волны распространяются до Командорских островов, а также вдоль всего побережья полуострова Камчатка. Из графиков видно, что в первый и второй мареографы волна пришла почти одновременно. Согласно используемой карте глубин GEBCO, глубины в направлении мареографа 1 не превышают 1000 м, а глубины в направлении мареографа 2 существенно больше и достигают почти 8000 м. Соответственно и скорость распространения волны в направлении острова Беринга, где установлен мареограф 2, будет выше. Отношение средней глубины в направлении 1 мареографа к средней глубине в направлении 2 мареографа достигает $1/8 \div 1/9$, расстояние от точки схода оползня до 1 мареографа примерно в 3 раза меньше, чем до 2 мареографа. Как известно, скорость распространения гравитационной волны $\sqrt{gh}$, таким образом, используя отношения глубин и расстояний, получится, что время прихода волн в 1 и 2 мареограф почти одно и то же.

С точки зрения цунамиопасности при сходе данного оползня наиболее пострадавшим может быть побережье Камчатского залива (мареограф 1), куда пришло с временным интервалом около 30 мин несколько волн с высотой от 4 до 10 м.

5. Оценка влияния объема оползня на высоту волн цунами

Провести оценку реального объема возможного оползня в природных условиях зачастую бывает практически невозможно. В статье представлено исследование влияния объема оползня на высоту и характер распространения образуемых волн. Рассматривается пять постановок согласно табл. 4. Протяженности в направлениях X и Y одинаковые для всех рассматриваемых вариантов и составляют 6000 и 8000 м соответственно.

Таблица 4

Table 4

Варианты объемов оползня
Landslide volume options

Обозначение	Объем оползня, км ³	Толщина оползня, м
V1	12	250
V2	20	420
V3	30	630
V4	40	830
V5	50	1040

На рис. 13 представлены карты высот волн за все время расчета для оползней объемами 12 км^3 и 30 км^3 . Максимальная высота волны в источнике при сходе оползня объемом 12 км^3 составила 6 м, объемом 30 км^3 —23 м.

На рис. 14 представлено распределение максимальных высот волн, порожденных сходом подводных оползней объемами 40 км^3 и 50 км^3 за все время расчета. Максимальная высота волны в источнике при сходе оползня объемом 40 км^3 составила 26 м, объемом 50 км^3 —44 м.

На рис. 15 представлено сравнение картин распространения волн при сходе оползней объемами 12 км^3 и 50 км^3 .

На рис. 16 приведены зависимости высоты смещения водной поверхности от времени, рассчитанные в точках установки виртуальных мареографов, полученные в расчетах с разными объемами оползня.

Как видно из рис. 16, характер распространения волн для всех постановок задач с различными объемами оползней одинаковый. Очевидно, что высота волны, вышедшая из источника оползневого цунами, будет пропорциональна объему сошедшего оползня (чем больше объем оползня, тем больше высота волны), или его средней толщине (при условии неизменности площади оползня).

Приведем зависимость от объема сошедшего оползня высот волн, возникающих в источнике, а также первых волн, дошедших до берега (рис. 17).

Как видно из представленных графиков на рис. 17, высота волны в источнике и высоты волн, дошедших до берега, измеренные в мареографах, в зависимости от объема сошедшего оползня меняются нелинейно. Эти выводы находятся в согласии с результатами многих авторов (см., например, [41–43]). Однако в отличие от этих работ, в которых параметры волны цунами в источнике определяются из полуэмпирических формул, в данной работе сход оползня и возникновение волны моделируется явно, учитывая сход оползня в воде и генерируя волну непосредственно во время схода.

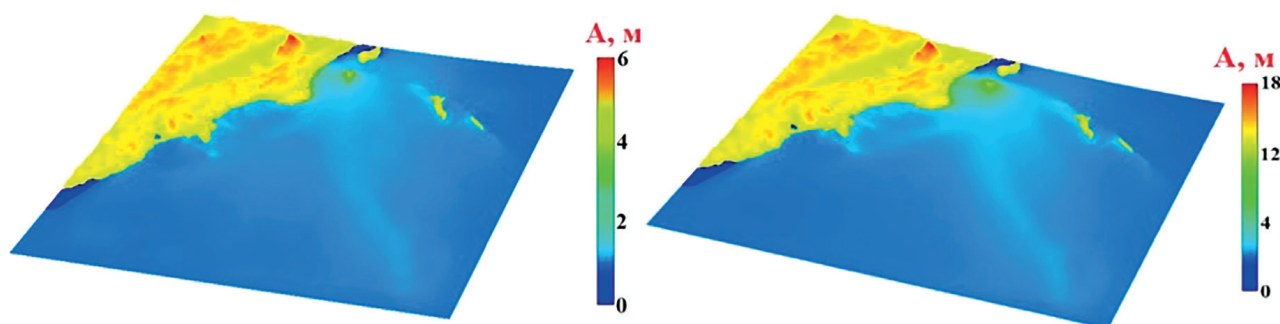


Рис. 13. Распределение максимальных высот волн, порожденных сходом подводного оползня объемом 12 км^3 (слева) и 30 км^3 (справа) за все время расчета

Fig. 13. Map of maximum wave heights for a 12 км^3 submarine landslide (left) and a 30 км^3 landslide (right) over the entire calculation period

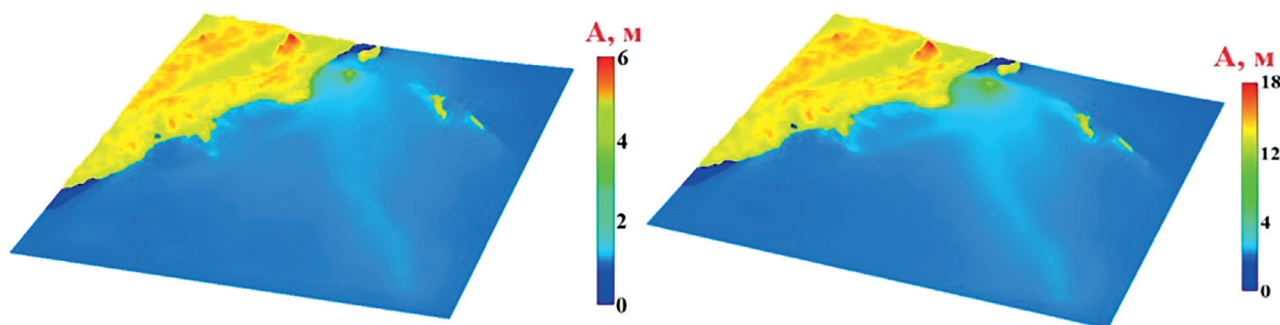


Рис. 14. Карта высот волн для оползня объемом 40 км^3 (слева) и 50 км^3 (справа) за все время расчета

Fig. 14. Map of wave heights for a 40 км^3 landslide (left) and a 50 км^3 landslide (right) over the entire calculation period

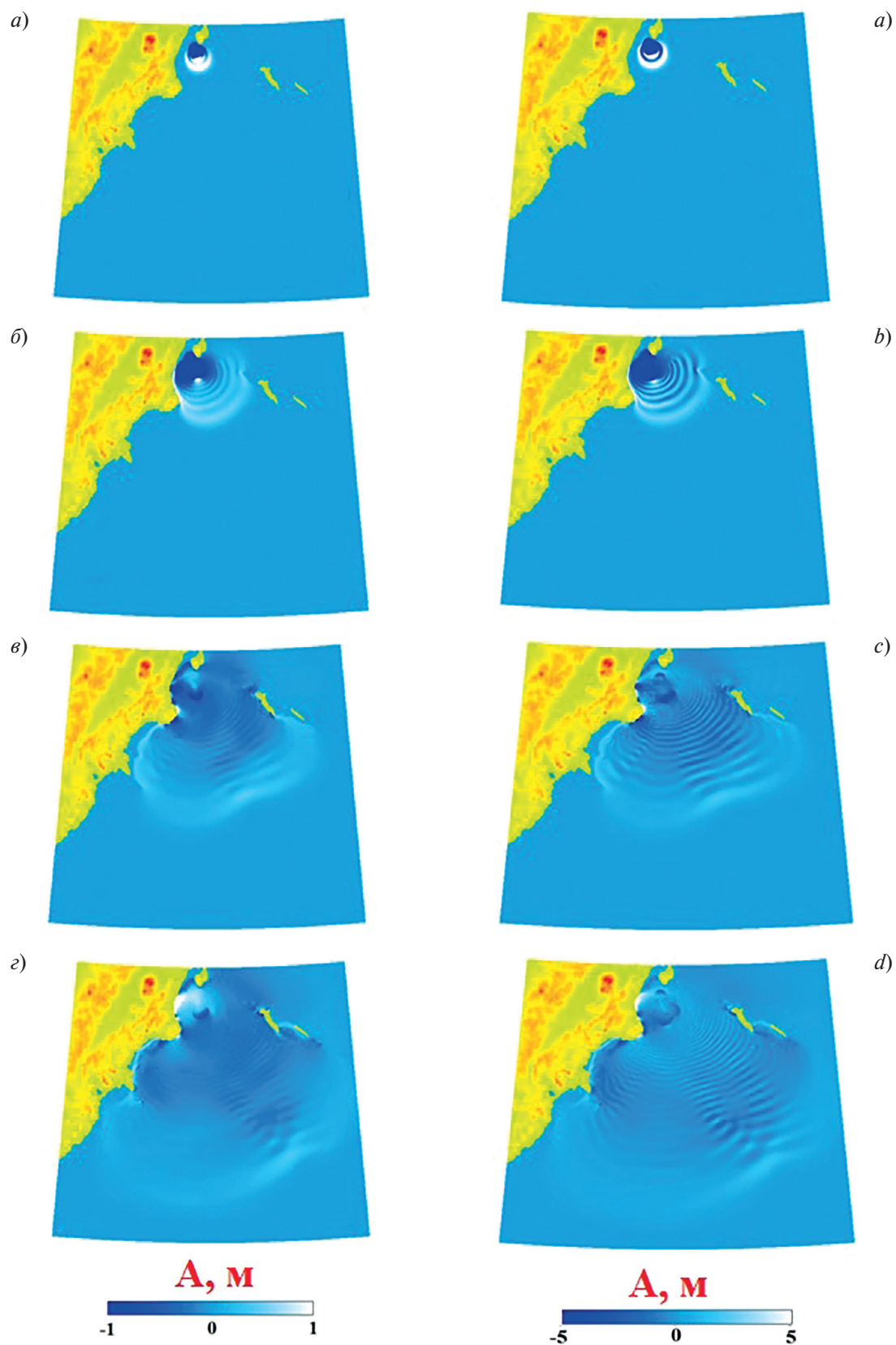


Рис. 15. Распространение волн на разные моменты времени: *a* — 300 с; *б* — 900 с; *в* — 2100 с; *г* — 3000 с (слева — для оползня объемом 12 км³, справа — для оползня объемом 50 км³)

Fig. 15. Propagation of waves at various times: *a* — 300 s; *b* — 900 s; *c* — 2100 s; *d* — 3000 s (for a 12 km³ landslide (left) and for a 50 km³ landslide (right))

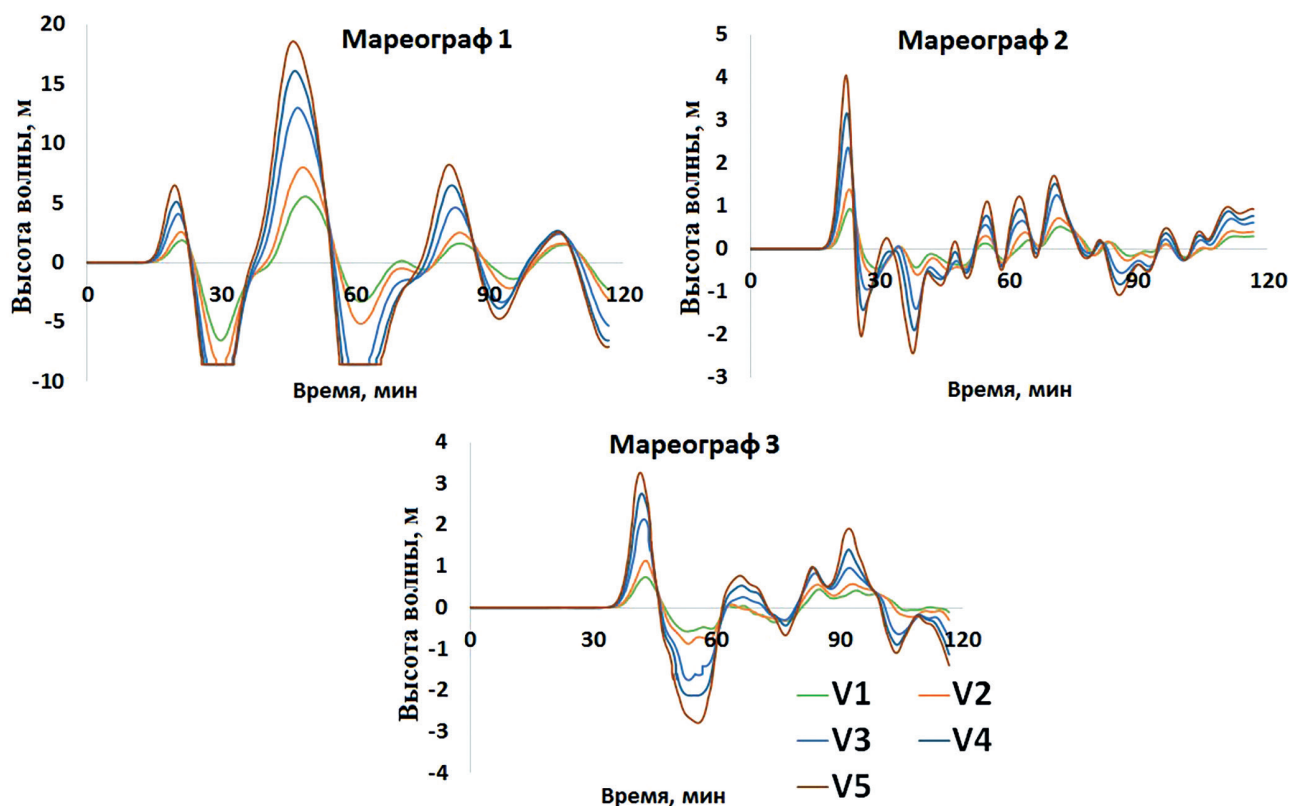


Рис. 16. Показания мареографов для оползней разных объемов

Fig. 16. Tide gauge readings for landslides of different volumes

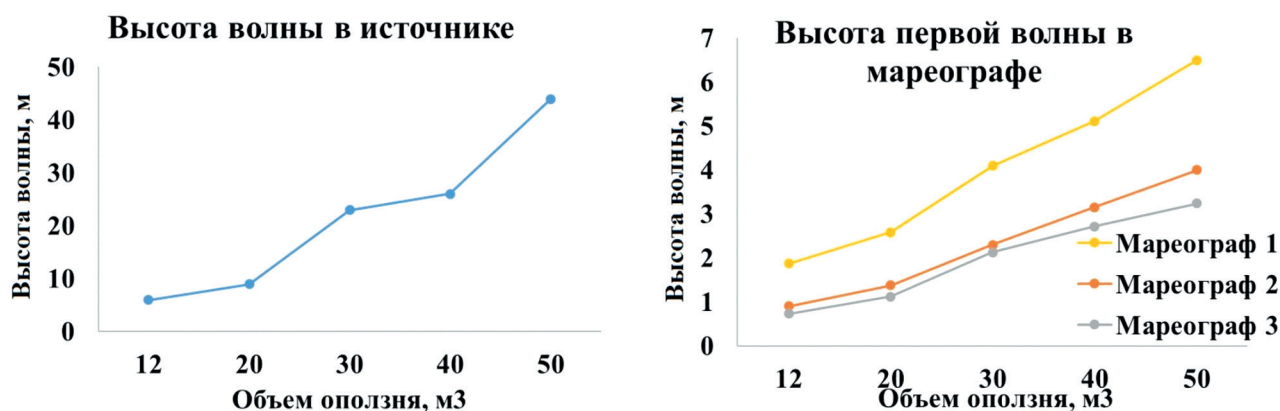


Рис. 17. Зависимости высот волн от объема оползня

Fig. 17. Heights of waves vs volume of landslide

6. Анализ дальности заплеска

Гидродинамическая модель на основе уравнений Навье — Стокса позволяет в рамках численной модели провести моделирование всех стадий оползневых цунами: зарождение волны в источнике, распространение и накат на сушу. Проведем анализ дальности заплеска волн на побережье острова Беринга (на рис. 18 остров отмечен красной рамкой) при сходе оползней объемами 12, 20 и 30 км³.

Для более точного описания заплеска волны на сушу и оценки дальности заплеска вдоль берега были построены локальные блоки измельчения, размер ячеек которых составлял 100 м (рис. 19).

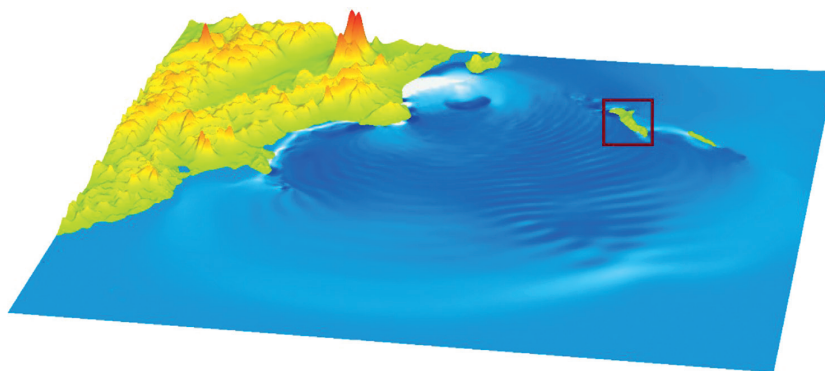


Рис. 18. Область исследования (о. Беринга)

Fig. 18. Research region (Bering Island)

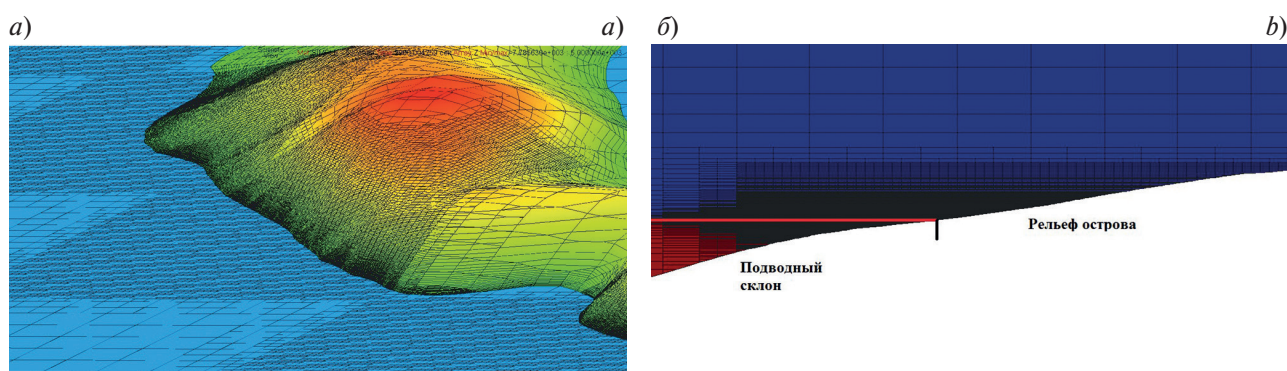


Рис. 19. Блоки измельчения для исследования дальности заплеска: *a* — вид сверху, *б* — в вертикальном сечении

Fig. 19. Refinement blocks used for runup studying: *a* — top view; *b* — in vertical section

На рис. 19 показан заплеск волны на сушу при сходе подводного оползня объемом 30 км^3 . Наибольший горизонтальный заплеск достигает 1 км и наблюдается в районе, отмеченном на рисунке рамкой. К северо-западу от этой области заплеск достигает 500 м, а к югу этой области — 200 м.

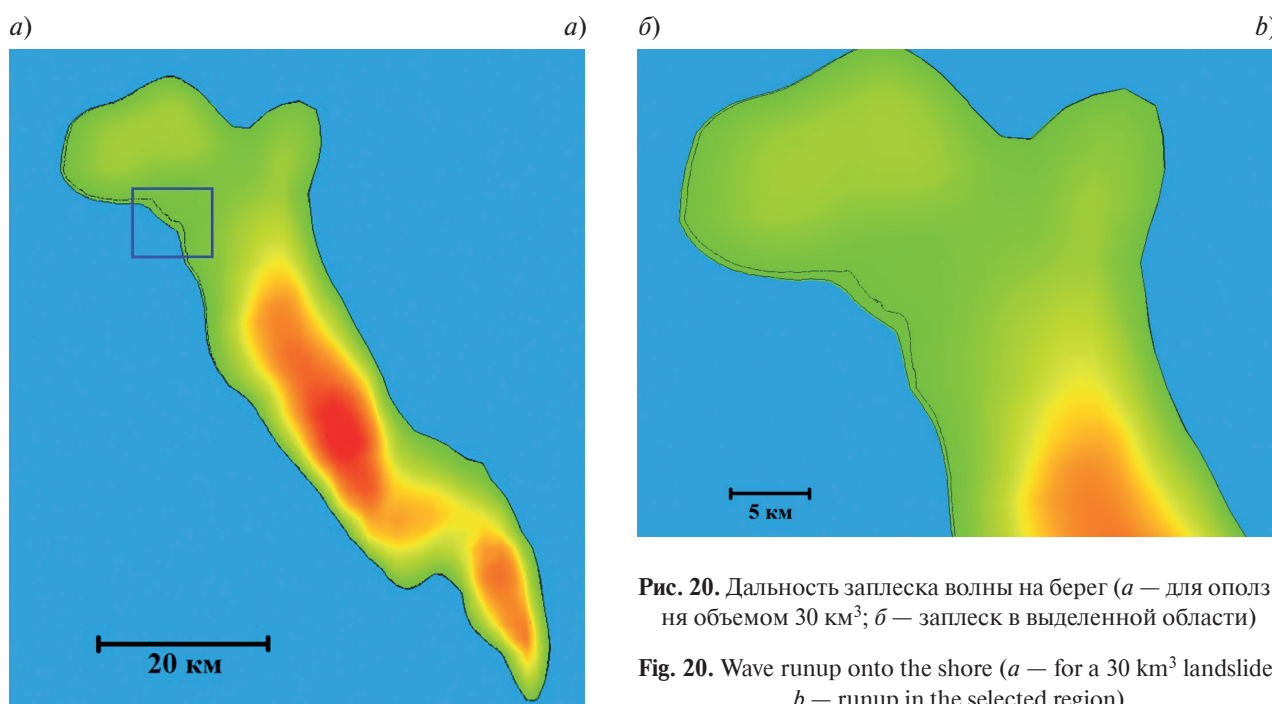


Рис. 20. Дальность заплеска волны на берег (*a* — для оползня объемом 30 км^3 ; *б* — заплеск в выделенной области)

Fig. 20. Wave runup onto the shore (*a* — for a 30 км^3 landslide; *b* — runup in the selected region)

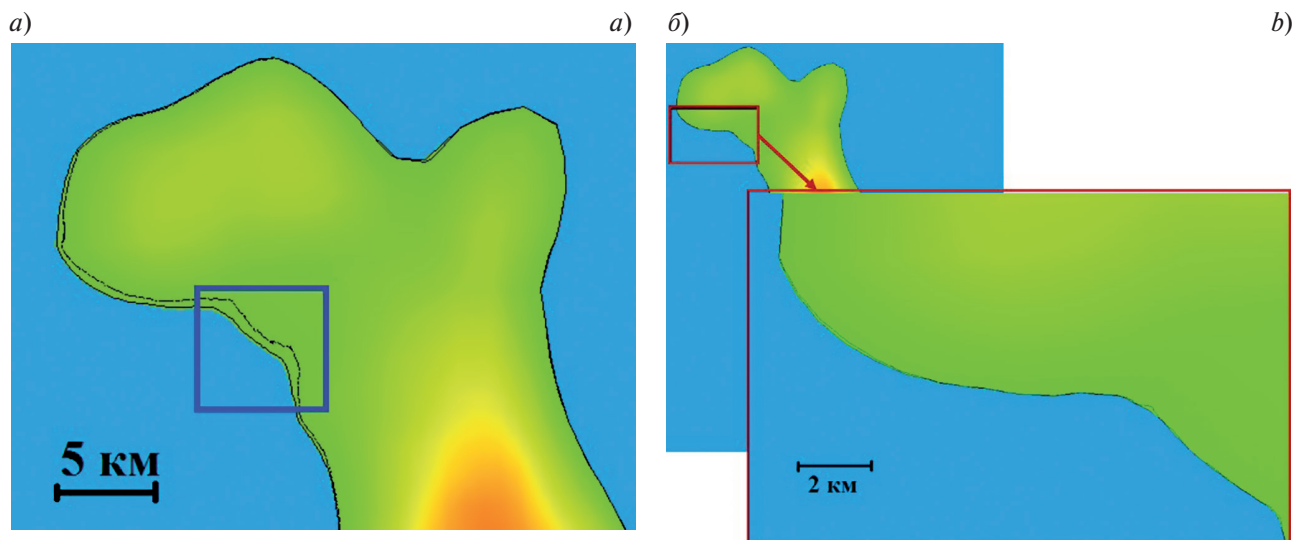


Рис. 21. Дальность заплеска волны на берег (а — для оползня объемом 20 км^3 ; б — для оползня объемом 12 км^3)

Fig. 21. Range of the wave splash on the shore (a — for a 20 км^3 landslide; b — for a 12 км^3 landslide)

На рис. 21, а показан заплеск волны на сушу при сходе подводного оползня объемом 20 км^3 . Максимальный горизонтальный заплеск на берег наблюдается в районе, отмеченном рамкой, и достигает 800 м. К северо-западу от выделенной области заплеск достигает 400 м. На рис. 21, б показан заплеск волны на сушу при сходе подводного оползня объемом 12 км^3 . Наибольший заплеск наблюдается в районе, отмеченном на рисунке красной рамкой, и достигает 100 м.

Как видно из рис. 21, полученные значения заплесков аналогичны результатам по высотам волн и показывают, что чем больше объем подводного оползня, тем больше дальность заплеска волн на побережье.

7. Заключение

В статье приводятся результаты численного моделирования гипотетического цунами, вызванного сходом подводного оползня в акватории Камчатского залива вблизи г. Усть-Камчатск, с учетом батиметрических данных. Для исследования используется гидродинамическая модель, основанная на трехмерных уравнениях Навье—Стокса. Для учета реологии оползневых масс модель дополнена реологическим соотношением, основанным на модели Бингама. Представленная модель позволяет моделировать сход оползня в рамках единой системы «воздух-вода-оползень», в которой оползень рассматривается как не-ньютоновская жидкость. Для моделирования волн в реальных акваториях используется оригинальный алгоритм, реализующий открытые граничные условия. Этот алгоритм основан на использовании демпфирующего приграничного слоя, который поглощает кинетическую энергию приходящей волны. Поглощение кинетической энергии приходящей волны учитывается с помощью дополнительного источника в уравнении момента импульса, который пропорционален скорости и аналогичен силе сопротивления, возникающей при течениях в пористых телах. Пропорциональность скорости определяется коэффициентом сопротивления, значение которого определяет интенсивность поглощения кинетической энергии волны. Предложен способ определения этого коэффициента методом численного моделирования и приведены его оптимальные значения. Предложенный метод является наиболее предпочтительным для решения практических задач, поскольку есть возможность его настройки за счёт выбора параметров демпфирования.

Приведены результаты численного моделирования оползневого цунами, вызванного сходом подводного оползня у побережья полуострова Камчатка. Приведены некоторые особенности построения расчетной сеточной модели на основе генеральной батиметрической карты океанов, покрывающей акваторию Тихого океана у побережья Камчатки. К таким особенностям можно отнести сужение к поверхности раздела фаз (вода-воздух) и построение дополнительных блоков измельчения сетки в области предполагаемого схода оползня.

На основе полученных результатов проанализирована зависимость высот волн цунами от объема оползня в источнике и в нескольких точках у побережья, а также отмечены участки побережья (в частности,

на острове Беринга), которые могут наиболее сильно пострадать при возникновении оползневых цунами в этой акватории. Показано, что высоты волн в источнике и высоты волн, дошедших до берега, измеренные в мареографах, в зависимости от объема сошедшего оползня меняются нелинейно.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Численное моделирование генерации и распространения оползневых цунами с учетом рельефа дна акваторий, определяющих локальное увеличение высот заплеска», которая является составной частью научно-исследовательской работы, выполняемой Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), а также при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий № FSWE-2021–0009 (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») и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-70.2022.1.5.

Funding

The study was carried out within the framework of the research work “Numerical modelling of generation and propagation of landslide tsunamis taking into account the bottom topography of water areas determining the local increase in splash heights”, which is a part of the research work carried out by the Federal State Budgetary Institution of Science, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMG&G FEB RAS), as well as with the financial support of the national project “Science and Universities” under the programme of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the creation of youth laboratories № FSWE-2021–0009 (scientific theme: “Development of numerical methods, models and algorithms to describe the hydrodynamic characteristics of liquids and gases in natural conditions, and the functioning of industrial facilities in normal and critical conditions on petaflops-class supercomputers”) and with the support of the grant of the President of the Russian Federation on the state support of leading scientific schools of the Russian Federation NSH-70.2022.1.5.

Литература

1. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1996. 276 с.
2. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
3. Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura N. Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme (IUGG/IOC Time Project) // IOC Manuals and Guides. 1997. No. 35. P. 130.
4. Wei G., Kirby J., Grilli S., Subramanya R. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves // Journal of Fluid Mechanics. 1995. Vol. 294. P. 71–92. doi:10.1017/S0022112095002813
5. Pelinovsky E., Zahibo N., Dunkley P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Kozelkov A.S., Nikolkina I. Tsunami generated by the volcano eruption on July 12–13, 2003 at Montserrat, Lesser Antilles // Science of Tsunami Hazards. 2004. Vol. 22, No. 1. P. 44–57.
6. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A.C., Kurkin A., Kozelkov A., Zaitsev A. Modelling the 1867 Virgin Island Tsunami // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003. Vol. 3, No. 5. P. 367–376. doi:10.5194/nhess-3-367-2003
7. Mader C.H., Gittings M.L. Modeling the 1958 Lituya Bay mega tsunami, II // Science of Tsunami Hazards. 2002. Vol. 20, No. 5. P. 241–250.
8. Козелков А.С. Методика численного моделирования цунами оползневого типа на основе уравнений Навье—Стокса // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. Т. 9, № 2. С. 218–236. doi:10.7242/1999–6691/2016.9.2.19
9. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Tyatyushkina E.S., Kurulin V.V., Tarasova N.V. Landslide-type tsunami modelling based on the Navier-Stokes Equations // Science of Tsunami Hazards, Journal of Tsunami Society International. 2016. Vol. 35, No. 3. P. 106–144.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика. 3-е изд. М.: Наука, 1986. 736 с.
11. Horrillo J., Wood A., Kim G.B., Parambath A. A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunami: Application to the Gulf of Mexico // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013. Vol. 118, Iss. 12. P. 6934–6950. doi:10.1002/2012JC008689

12. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Курулин В.В. Моделирование цунами космогенного происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса с источниками различных типов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 2. С. 142–150.
13. Qin X., Motley M., LeVeque R., Gonzalez F., Mueller K. A comparison of a two-dimensional depth-averaged flow model and a three-dimensional RANS model for predicting tsunami inundation and fluid forces // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018. Vol. 18(9). doi:10.5194/nhess-18-2489-2018
14. Делемень И.Ф., Константинова Т.Г. Оценка оползневой опасности на территории Петропавловска-Камчатского при ожидаемом сильном землетрясении // Труды Второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга дальнего востока России». Петропавловск-Камчатский, 11–17 октября 2009 г. Обнинск: ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». 2010. С. 116–120.
15. Ломтев В.Л. Особенности строения и формирования Камчатского подводного каньона (тихоокеанская окраина Камчатки) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 177–197. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0344
16. Franco A., Moernaut J., Schneider-Muntau B., Aufleger M., Strasser M., Gems B. Lituya Bay 1958 Tsunami — detailed pre-event bathymetry reconstruction and 3D-numerical modelling utilizing the CFD software Flow-3D // Natural Hazards and Earth System Science. 2020. No. 20. P. 2255–2279. doi:10.5194/nhess-2019-285
17. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics. 1981. Vol. 39, Iss. 1. P. 201–225. doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5
18. Gerbeau J.F., Vidrascu M. A quasi-newton algorithm based on a reduced model for fluid-structure interaction problems in blood flows // ESAIM Mathematical Modelling and Numerical Analysis. 2003. Vol. 37, No. 4. P. 631–647. doi:10.1051/m2an:2003049
19. Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. М.: МГУ, 1977. 372 с.
20. Храбрый А.И., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М. Численное моделирование течений со свободной поверхностью на основе метода VOF // Труды Крыловского государственного научного центра. 2003. № 78 (362). С. 53–64.
21. Kozelkov A.S., Lashkin S.V., Efremov V.R., Volkov K.N., Tsibereva Yu.A., Tarasova N.V. An implicit algorithm of solving Navier–Stokes equations to simulate flows in anisotropic porous media // Computers and Fluids. 2018. Vol. 160. P. 164–174. doi:10.1016/j.compfluid.2017.10.029
22. Chen Z.J., Przekwas A.J. A coupled pressure-based computational method for incompressible/compressible flows // Journal of Computational Physics. 2010. Vol. 229, Iss. 24. P. 9150–9165. doi:10.1016/j.jcp.2010.08.029
23. Храбрый А.И. Численное моделирование нестационарных турбулентных течений жидкости со свободной поверхностью: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2014. 154 с.
24. Ильгамов М.А., Гильманов А.Н. Неотражающие условия на границах расчетной области. М.: Физматлит, 2003. 242 с.
25. Kar S.K., Turco R.P. Formulation of a lateral sponge layer for limited-area shallow-water models and an extension for the vertically stratified case // Monthly Weather Review. 1994. Vol. 123. P. 1542–1559. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1542: FOALSL>2.0.CO;2
26. Подгорнова О.В. Построение дискретных прозрачных граничных условий для анизотропных и неоднородных сред: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2008. 109 с.
27. Givoli D., Neta B. High-order nonreflecting boundary conditions for the dispersive shallow water equations // Journal of Computational and Applied Mathematics. 2003. Vol. 158. P. 49–60. doi:10.1080/1061856031000113608
28. Овчарова А.С. Метод расчёта стационарных течений вязкой жидкости со свободной границей в переменных вихрь-функция тока // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39, № 2. С. 59–68.
29. Fürst J., Musil J. Development of non-reflective boundary condition for free-surface flows // Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics, Prague, 21–23 February, 2018, P. 97–104. doi:10.14311/TPFM.2018.013
30. Тятюшкина Е.С. Применение трехмерных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, для моделирования волн цунами: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2021. 139 с.
31. Козелков А.С., Куркин А.А., Шарипова И.Л., Курулин В.В., Пелиновский Е.Н., Тятюшкина Е.С., Мелешкина Д.П., Лашкин С.В., Тарасова Н.В. Минимальный базис задач валидации методов расчета течений со свободной поверхностью // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 49–69.
32. Tyatyushkina E.S., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kurulin V.V., Plygunova K.S., Utkin D.A. Verification of the LOGOS software package for tsunami simulations // Geosciences. 2020. Vol. 10, No. 385. doi:10.3390/geosciences10100385
33. Козелков А.С., Курулин В.В. Численная схема для моделирования турбулентных течений несжимаемой жидкости с использованием вихреразрешающих подходов // Вычислительная математика и математическая физика. 2015. Т. 55, № 7. С. 135–146. doi:10.7868/S0044466915070091
34. Козелков А.С., Курулин В.В., Пучкова О.Л., Тятюшкина Е.С. Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей // Математическое моделирование. 2014. Т. 26, № 8. С. 81–96.

35. Козелков А.С., Куркин А.А., Крутякова О.Л., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С. Зонный RANS—LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 5. С. 24—33.
36. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Влияние угла входа тела в воду на высоты генерируемых волн // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 2. С. 166—176.
37. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Курулин В.В., Тятюшкина Е.С. Моделирование возмущений в озере Чибаркуль при падении метеорита в 2013 году // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 6. С. 134—143.
38. Козелков А.С. Методика численного моделирования цунами оползневого типа на основе уравнений Навье—Стокса // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. Т. 9, № 2. С. 218—236. doi:10.7242/1999-6691/2016.9.2.19
39. General Bathymetric Chart of the Oceans. URL: <https://www.gebco.net/> (дата обращения: 15.05.2021).
40. Спутниковая карта Камчатского края — Яндекс Карты. URL: <https://yandex.ru/maps/11398/kamchatka-krai/sputnik/?ll=169.782981%2C61.350179&z=8> (дата обращения: 15.05.2021).
41. Watts P. Wavemaker curves for tsunamis generated by underwater landslides // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 1998. Vol. 124, No. 3. P. 127—137.
42. Watts P. Tsunami features of solid block underwater landslides // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2000. Vol. 126, Iss. 3. P. 144—152. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:3(144)
43. Watts P., Grilli St.T., Tappin D.R., Fryer G.J. Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive Equations and Case Studies // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2005. Vol. 131, No. 6. P. 298—310. doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:6(298)

References

1. Pelinovsky E.N. Hydrodynamics of Tsunami Waves. N. Novgorod, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, 1996. 276 p. (in Russian).
2. Levin B.V., Nosov M.A. Physics of Tsunami and Similar Phenomena in the Ocean. Moscow, Yanus-K, 2005. 360 p. (in Russian).
3. Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura N. Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme (IUGG/IOC Time Project). IOC Manuals and Guides. 1997, 35, 130.
4. Wei G., Kirby J., Grilli S., Subramanya R. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. Journal of Fluid Mechanics. 1995, 294, 71—92. doi:10.1017/S0022112095002813
5. Pelinovsky E., Zahibo N., Dunkly P., Edmonds M., Herd R., Talipova T., Kozelkov A.S., Nikolkina I. Tsunami generated by the volcano eruption on July 12—13, 2003 at Montserrat, Lesser Antilles. Science of Tsunami Hazards. 2004, 22, 1, 44—57.
6. Zahibo N., Pelinovsky E., Yalciner A., Kurkin A., Kozelkov A.S., Zaitsev A. Modelling the 1867 Virgin Island Tsunami. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003, 3, 5, 367—376. doi:10.5194/nhess-3-367-2003
7. Mader C.H., Gittings M.L. Modeling the 1958 Lituya Bay mega tsunami, II. Science of Tsunami Hazards. 2002, 20, 5, 241—250.
8. Kozelkov A.S. The numerical technique for the landslide tsunami simulations based on Navier-Stokes equations. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2017, 58, 7, 1192—1210. doi:10.1134/S0021894417070057
9. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Tyatyushkina E.S., Kurulin V.V., Tarasova N.V. Landslide-type tsunami modelling based on the Navier-Stokes Equations. Science of tsunami Hazards, Journal of Tsunami Society International. 2016, 35, 3, 106—144.
10. Landau L.D., Lifshits E.M. Theoretical Physics: Textbook. In 10 vol. Vol. 6. Hydrodynamics. 3rd ed. Moscow, Nauka, 1986. 736 p.
11. Horrillo J., Wood A., Kim G.B., Parambath A. A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunami: Application to the Gulf of Mexico. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2013, 118, 6934—6950. doi:10.1002/2012JC008689
12. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kurulin V.V. Modeling the Cosmogenic Tsunami within the Framework of the Navier-Stokes Equations with Sources of Different Types. Fluid Dynamics. 2015, 50(2), 306—313. doi:10.1134/S0015462815020143
13. Qin X., Motley M., LeVeque R., Gonzalez F., Mueller K. A comparison of a two-dimensional depth-averaged flow model and a three-dimensional RANS model for predicting tsunami inundation and fluid forces. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2018, 18(9). doi:10.5194/nhess-18-2489-2018
14. Delemen I.F., Konstantinova T.G. Assessment of the landslide risk on the Petropavlovsk-Kamchatsky territory during an expected large earthquake. Proceedings of the Second Regional Scientific and Technical Conference “Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East”. Petropavlovsk-Kamchatsky, 11—17 October 2009; Obninsk, FRC “Unified Geophysical Service of RAS”. 2010, 116—120 (in Russian).

15. Lomtev V.L. Features of the structure and formation of the Kamchatka Canyon (The Pacific margin of Kamchatka). *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018, 9(1), 177–197. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0344 (in Russian).
16. Franco A., Moernaut J., Schneider-Muntau B., Aufleger M., Strasser M., Gems B. Lituya Bay 1958 Tsunami — detailed pre-event bathymetry reconstruction and 3D-numerical modelling utilizing the CFD software Flow-3D. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2020, 20, 2255–2279. doi:10.5194/nhess-2019-285
17. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*. 1981, 39, 201–225. doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5
18. Gerbeau J.F., Vidrascu M. A quasi-newton algorithm based on a reduced model for fluid-structure interaction problems in blood flows. *ESAIM Mathematical Modelling and Numerical Analysis*. 2003, 37, 4, 631–647. doi:10.1051/m2an:2003049
19. Ogibalov P.M., Mirzadzhanzade A.H. *Unsteady flows of viscoplastic media*. Moscow, MSU, 1977, 372 p. (in Russian).
20. Hrabry A.I., Zaytsev D.K., Smirnov E.M. Numerical simulation of flows with a free surface based on the VOF method. *Scientific Works of the Krylov State Scientific Center. SPb., Krylovsky State Scientific Center*. 2003, 78 (362), 53–64 (in Russian).
21. Kozelkov A.S., Lashkin S.V., Efremov V.R., Volkov K.N., Tsibereva Yu.A., Tarasova N.V. An implicit algorithm of solving Navier–Stokes equations to simulate flows in anisotropic porous media. *Computers and Fluids*. 2018, 160, 164–174. doi:10.1016/j.compfluid.2017.10.029
22. Chen Z.J., Przekwas A.J. A coupled pressure-based computational method for incompressible/compressible flows. *Journal of Computational Physics*. 2010, 229, 9150–9165. doi:10.1016/j.jcp.2010.08.029
23. Hrabry A.I. Numerical simulation of unsteady turbulent flows of a liquid with a free surface. *Thesis for the degree of Ph.D. in Physics and Mathematics, St Petersburg*, 2014, 154 p. (in Russian).
24. Ilgamov M.A., Gilmanov A.N. Non-reflective conditions at the boundaries of the computational domain. *Moscow, Fizmatlit*, 2003, 242 p. (in Russian).
25. Kar S.K., Turco R.P. Formulation of a lateral sponge layer for limited-area shallow-water models and an extension for the vertically stratified case. *Monthly Weather Review*. 1994, 123, 1542–1559. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1542: FOALSL>2.0.CO;2
26. Podgornova O.V. Construction of discrete transparent boundary conditions for anisotropic and inhomogeneous media. *Thesis for the degree of Ph.D. in Physics and Mathematics*. Moscow, 2008, 109 p. (in Russian).
27. Givoli D., Neta B. High-order nonreflecting boundary conditions for the dispersive shallow water equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2003, 158, 49–60. doi:10.1080/1061856031000113608
28. Ovcharova A.S. A computational method for steady flows of a viscous fluid with a free boundary in stream function-vorticity variables. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1998, 39(2), 59–68 (in Russian).
29. Fürst J., Musil J. Development of non-reflective boundary conditions for free-surface flows. *Proc. Topical problems of fluid mechanics*, Prague, 21–23 February, 2018, 97–104. doi:10.14311/TPFM.2018.013
30. Tyatyushkina E.S. The use of three-dimensional Navier-Stokes Equations, offended by Reynolds, for modeling the waves of the tsunami. *Thesis for the degree of Ph.D. in Physics and Mathematics, N. Novgorod*, 2021, 139 p. (in Russian).
31. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Sharipova I.L., Kurulin V.V., Pelinovsky E.N., Tyatyushkina E.S., Meleshkina D.P., Lashkin S.V., Tarasova N.V. Minimal Basis of Problems for Validating Methods of Numerical Simulation of Turbulent Viscous Incompressible Flows. *Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev*. 2015, 2(109), 49–69 (in Russian).
32. Tyatyushkina E.S., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kurulin V.V., Plygunova K.S., Utkin D.A. Verification of the LOGOS Software Package for Tsunami Simulations. *Geosciences*. 2020, 10, 385. doi:10.3390/geosciences10100385
33. Kozelkov A.S., Kurulin V.V. Eddy-resolving numerical scheme for simulation of turbulent incompressible flows. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2015, 55, 7, 1232–1241. doi:10.1134/S096554251507009X
34. Kozelkov A.S., Kurulin V.V., Puchkova O.L., Tyatyushkina E.S. Detached Eddy Simulation of Turbulent Viscous Incompressible Flows on Unstructured Grids. *Mathematical Modeling*. 2014, 26(8), 81–96 (in Russian).
35. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Krutyakova O.L., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S. Zonal RANS–LES approach based on an algebraic Reynolds stress model. *RAS Proceedings. Mechanics of Liquid and Gas*, 2015, 5, 24–33 (in Russian).
36. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N. Effect of the angle of water entry of a body on the generated wave heights. *Fluid Dynamics*. 2016, 51, 2, 288–298. doi:10.1134/S0015462816020162
37. Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kurulin V.V., Tyatyushkina E.S. Modeling the disturbances in the Lake Cherbarkul caused by the fall of the meteorite in 2013. *Fluid Dynamics*. 2015, 50(6), 828–840. doi:10.1134/S0015462815060137
38. Kozelkov A.S. The numerical technology for the landslide tsunami simulations based on Navier–Stokes equations. *Computational Continuum Mechanics*. 2016, 9(2), 218–236. doi:10.7242/1999–6691/2016.9.2.19 (in Russian).
39. General Bathymetric Chart of the Oceans. URL: <https://www.gebco.net/> (date of access: 15.05.2021).
40. Satellite map of the Kamchatka Krai — Yandex map. URL: <https://yandex.ru/maps/11398/kamchatka-krai/sputnik/?ll=169.782981%2C61.350179&z=8> (date of access: 15.05.2021).

41. Watts P. Wavemaker curves for tsunamis generated by underwater landslides. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 1998, 124, 3, 127–137.
42. Watts P. Tsunami features of solid block underwater landslides. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2000, 126, 3, 144–152. doi:10.1061/(ASCE)0733–950X(2000)126:3(144)
43. Watts P., Grilli St.T., Tappin D.R., Fryer G.J. Tsunami generation by submarine mass failure. II: Predictive equations and case studies. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 2005, 131, 6, 298–310. doi:10.1061/(ASCE)0733–950X(2005)131:6(298)

Об авторах

КОЗЕЛКОВ Андрей Сергеевич, РИНЦ AuthorID: 133747, ORCID ID: 0000-0003-3247-0835,
Scopus Author ID: 8310195500, Wos Researcher ID: P-8730–2017, askozelkov@mail.ru

БОГОМОЛОВ Леонид Михайлович, РИНЦ AuthorID: 18263, ORCID ID: 0000-0002-1685-3775,
Scopus Author ID: 6603578865, Wos Researcher ID: K-5905–2018, bleom@mail.ru

СМАЗНОВ Владимир Викторович, независимый исследователь, тел.: 8(496)5456200

КУРУЛИН Вадим Викторович, РИНЦ AuthorID: 724833, ORCID ID: 0000-0002-1685-3775,
Scopus Author ID: 56609303000 Wos Researcher ID: O-8661–2016, kurulin@mail.ru

ТЯТЮШКИНА Елена Сергеевна, РИНЦ AuthorID: 1007206, ORCID ID: 0000-0002-5234-0977,
Scopus Author ID: 56755232200, Wos Researcher ID: AAT-4024–2021, leno4ka-07@mail.ru