

Колосовский Егор Владимирович, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, e-mail: e.kolosovskiy@bk.ru

Kolosovskiy Egor Vladimirovich, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: e.kolosovskiy@bk.ru

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ
ИНИЦИИРУЕМЫХ ПАДЕНИЕМ ЛЕДЯНОГО БЛОКА В ВОДУ С
УЧЁТОМ РЕАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА ДНА**

Аннотация. В работе представлено численное моделирование образования волны, генерируемой падением ледяной глыбы в водоём с неоднородным рельефом дна. В качестве модельного примера выбрана акватория с реалистичным батиметрическим профилем, характерным для арктических прибрежных регионов, склонных к обрушению крупных масс льда. Актуальность исследования связана с учащением подобных явлений, которые способны вызывать локальные цунами и представляют угрозу прибрежной инфраструктуре. Падение льда моделируется в виде вертикального перемещения прямоугольного твёрдого блока, которое вытесняет воду и генерирует волну на поверхности. Расчёты проводились на регулярной сетке с шагом 2 м по пространству и 0,04 с по времени. В качестве численного метода интегрирования применена схема Лакса–Фридрихса, обеспечивающая устойчивость при наличии резких градиентов. Модель учитывает физические свойства льда и воды, что позволяет достоверно воспроизвести начальную стадию формирования волны. Полученные результаты показали характерную картину возмущения: первоначальный центральный всплеск, его дальнейшую эволюцию и постепенное затухание волны, что подтверждает физическую обоснованность предложенного подхода.

Ключевые слова: волны, ледяной блок, мелководные волны, нелинейные волны, батиметрия, численное моделирование, схема Лакса–Фридрихса, одномерная модель.

Annotation. This paper presents a numerical simulation of wave formation generated by the impact of an ice block into a water body with non-uniform seabed topography. A model domain with a realistic bathymetric profile typical of Arctic coastal regions prone to large-scale ice collapses was selected as a representative case. The relevance of the study stems from the increasing frequency of such events, which can trigger local tsunamis and pose a threat to coastal infrastructure. The ice impact is modeled as the vertical motion of a rectangular rigid block, displacing water and generating a surface wave. Calculations were carried out on a regular grid with a spatial resolution of 2 m and a time step of 0.04 s. The Lax–Friedrichs scheme was used as the numerical integration method, ensuring stability in the presence of steep gradients. The model accounts for the physical properties of both ice and water, allowing for a realistic reproduction of the initial stage of wave generation. The results demonstrate a characteristic disturbance pattern: an initial central splash, subsequent evolution, and gradual attenuation of the wave, confirming the physical validity of the proposed approach.

Keywords: waves: ice block, shallow water waves, nonlinear waves, bathymetry, numerical modeling, Lax–Friedrichs scheme, one-dimensional model.

Введение

На фоне ускоряющихся темпов климатических изменений и масштабного таяния ледников всё более актуальными становятся задачи моделирования волновых процессов, возникающих при обрушении крупных ледяных масс [1,2]. Падение крупных льдин вызывает значительные возмущения свободной поверхности, аналогичные по своим характеристикам локальным цунами, что представляет угрозу для береговой инфраструктуры, судоходства и природной среды. Существующие численные методы, используемые для расчёта волновых процессов, связанных с падением тел, обычно не учитывают

специфику ледяных масс, таких как малая плотность и способность частично всплывать [3]. Цель настоящей работы — создание эффективной численной модели для изучения цунами, инициированных вертикальным погружением льдин с учётом реальной батиметрии.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – численно смоделировать процесс формирования волны, возникающей при вертикальном погружении ледяного блока в водную среду при наличии реального рельефа дна. В рамках работы основное внимание уделено анализу структуры образующейся волны, её амплитуды и формы в зависимости от параметров ледяного тела и батиметрических условий. Разрабатываемая модель ориентирована на достоверное воспроизведение процесса генерации волны в условиях, приближённых к арктическим прибрежным регионам, где возможны обрушения массивных ледяных образований.

Математическая модель и метод расчёта

Разрабатываемая математическая модель опирается на одномерную нелинейную систему уравнений мелкой воды в гидростатическом приближении [2,4,5]. Ледяной блок в расчётах представлен в виде прямоугольного твёрдого тела, которое движется вертикально вниз с конечной скоростью, вызывая вытеснение воды и последующую генерацию волны [6]. Влияние блока на жидкость реализуется через ввод дополнительных источников массы и импульса в уравнения модели.

Для численного решения применяется схема Лакса–Фридрихса [7] первого порядка, обладающая хорошей устойчивостью и способной надёжно обрабатывать резкие перепады параметров. Пространственно-временная регулярная сетка с шагом 2 м по пространству и 0,04 с по времени, что соответствует требованиям устойчивости численного метода и позволяет достоверно отслеживать развитие волнового процесса [8].

Постановка задачи

В данной работе исследуется процесс генерации волн, возникающих при вертикальном погружении льдиноподобного твёрдого тела заданных размеров в водоём глубиной до 180 метров с учётом реальной батиметрии. Геометрические и динамические характеристики блока — его размеры, плотность и начальная скорость погружения — варьируются для анализа чувствительности модели к исходным параметрам. На границах расчётной области используются открытые граничные условия, исключающие отражение волн и обеспечивающие корректное моделирование распространения возмущения [9].

Результаты исследования

В настоящем исследовании численное моделирование осуществлялось на регулярной расчётной сетке с пространственным шагом 2 м и временным шагом 0,04 с. Такая дискретизация позволяет обеспечить устойчивость решения и достоверно воспроизводить основные характеристики волнового процесса. В основу модели положены одномерные нелинейные уравнения мелкой воды в гидростатическом приближении.

Для расчёта использовалась явная схема Лакса–Фридрихса первого порядка, обладающая высокой стабильностью и способной эффективно обрабатывать резкие градиенты, возникающие при генерации волн. Ледяной блок в модели задан в виде прямоугольного твёрдого тела с габаритами 4×2 метра и плотностью 940 кг/м³. Начальная скорость его вертикального движения составляла 5 м/с, при этом падение начиналось с высоты 1,5 метра над поверхностью воды.

Такой набор параметров соответствует характерным условиям для арктических прибрежных зон, где возможны обрушения льда в результате разрушения шельфовых ледников. Модель позволяет отследить динамику волнообразования и оценить влияние начальных условий на амплитуду и форму формирующегося возмущения.

Численные эксперименты показали, что вертикальное погружение блока с соответствующими габаритами и скоростью приводит к образованию волны

с максимальной амплитудой порядка 2 метров. Возмущение распространяется в обе стороны от зоны погружения, формируя отчётливый волновой фронт с последующим затуханием. Влияние профиля дна становится особенно заметным на более поздних этапах: фронт волны деформируется, часть энергии отражается от мелководных участков, вызывая образование вторичных волн и сложных интерференционных структур.

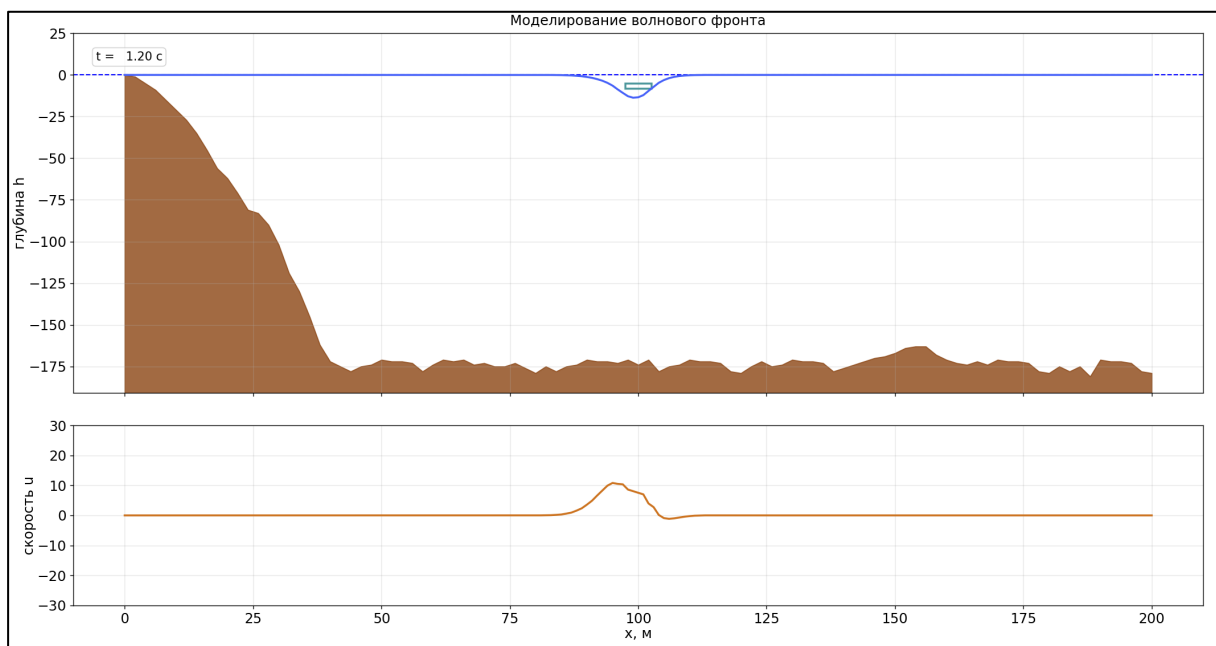


Рисунок 1 – Моделирование в момент времени $t = 1.2$ с.

На рисунке 1 представлен результат численного моделирования формирования волнового фронта на временном шаге $t = 1.20$ с. В верхней части изображён профиль свободной поверхности (синяя линия) над реальным рельефом дна (коричневая заливка), а также положение ледяного блока в момент его погружения. В области взаимодействия тела с водой формируется отчётливая отрицательная фаза волны, возникающая вследствие вытеснения жидкости при падении. Нижний график иллюстрирует распределение горизонтальной скорости потока (u) вдоль расчётной области. Наблюдается локальное возмущение, связанное с начальной фазой генерации волны, характеризующееся направленным движением воды от зоны падения. Формируемая структура свидетельствует о начальной стадии распространения возмущения и позволяет проследить динамику взаимодействия льда и жидкости на фоне неоднородного морского дна.

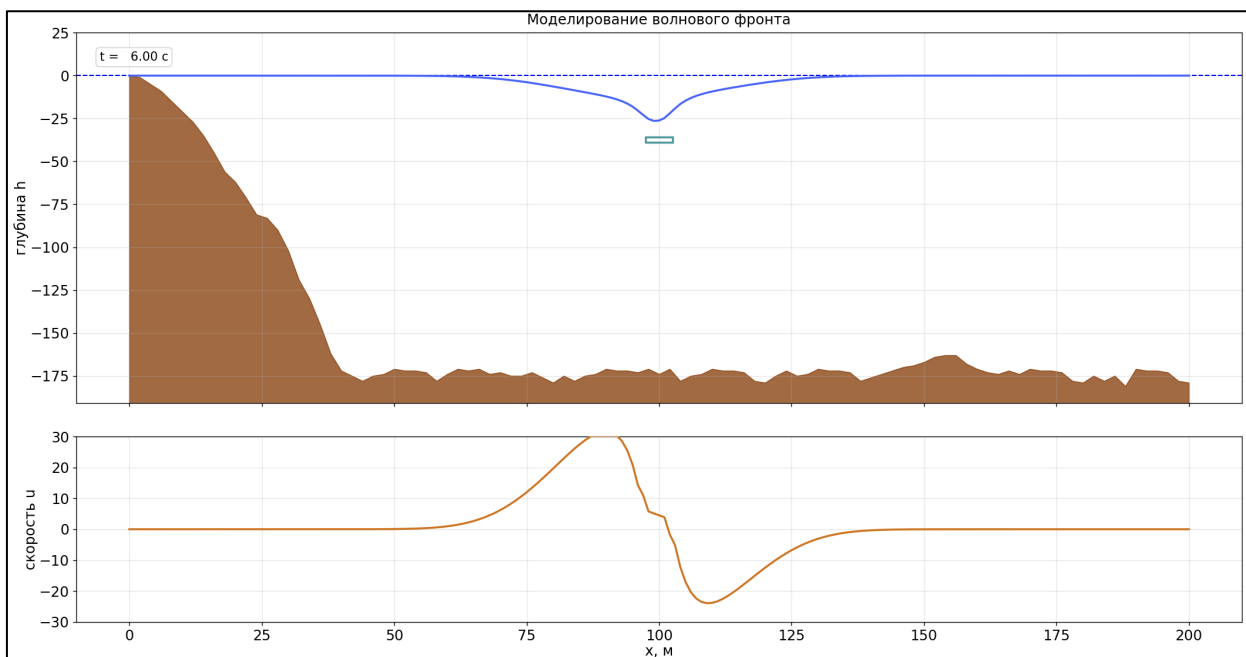


Рисунок 2 – Моделирование в момент времени $t = 6.0$ с.

На данном этапе моделирования на рисунке 2 волна полностью отделилась от источника и продолжает распространяться по акватории. Отрицательная фаза становится более выраженной и симметричной, формируя устойчивый волновой фронт. Характер распределения скорости указывает на завершение фазы активного вытеснения и переход к свободному распространению волны. Влияние рельефа дна начинает сказываться на структуре фронта, вызывая его постепенную деформацию.

Анализ показал, что увеличение размера ледяного блока или его скорости погружения приводит к пропорциональному росту амплитуды волны. Кроме того, рельеф дна значительно влияет на скорость и форму волнового фронта, вызывая асимметрию и искажения при распространении в прибрежной зоне.

Заключение

Предложенная численная модель демонстрирует способность надёжно воспроизводить процессы генерации и последующего распространения волн, вызванных вертикальным погружением ледяных массивов в условиях, приближённых к реальным — с учётом сложной батиметрии дна. Полученные результаты численных экспериментов подчёркивают высокую чувствительность волнового отклика как к геометрическим и динамическим характеристикам ледяного блока, так и к конфигурации рельефа дна.

Следует отметить, что большинство существующих численных моделей, направленных на анализ волн, возникающих при падении твёрдых тел в воду, ориентированы преимущественно на объекты с высокой плотностью — такие как каменные обвалы, оползни и др. При этом, как правило, предполагается мгновенное погружение тела, без учёта специфики плотности. Эти особенности могут существенно изменить начальную структуру волнового возмущения и привести к формированию дополнительных колебаний, оказывающих влияние на амплитудные и фазовые характеристики распространяющейся волны.

Список литературы

1. Лаврентьев И.И., Бузин И.В. Ледники российской Арктики и айсберги как потенциальная угроза морскому транспорту и добыче на шельфе // Сборник статей. — М.: Институт географии РАН; Арктический и антарктический НИИ Росгидромета, 2016. — С. 161–166.
2. Аббасов И.Б., Неверов А.А. Численное моделирование поверхностных волн на мелкой воде // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2010. — № 9. — С. 80. — Материалы конференции. — Таганрог: Технологический институт Южного федерального университета. — Яз. рус. — Учредители: ООО «НИЦ Академия Естествознания».
3. Tripepi G., Casella F., Aristodemo F., Filianoti P., et al. The solitary wave run-up on sloped beaches protected by submerged rigid breakwaters // Ocean Engineering. 2023. Vol. 281.
4. Петрухин Н.С., Катаева Л.Ю., Мазова Р.Х., Донис Н.М. Численное моделирование волны цунами от оползня // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2004. Т. 9. С. 54–62. (дата обращения: 21.07.2025).

5. Лобковский Л.И., Мазова Р.Х., Катаева Л.Ю., Баранов Б.В. Генерация и распространение катастрофических цунами в акватории Охотского моря. Возможные сценарии // Доклады Российской академии наук. 2006. Т. 410, № 4. С. 528–531. (дата обращения: 21.07.2025).
6. Yulianti K., Marwati R., Permatahati S. A modified Lax–Friedrichs method for the numerical solution of shallow water equations // EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems. 2019. Vol. 6, No. 18.
7. Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье–Стокса полностью неявным методом // Акустический журнал. 2023. Т. 69, № 3. С. 341–349.
8. Гусев О.И., Хакимзянов Г.С. Численное моделирование распространения длинных поверхностных волн по вращающейся сфере в рамках полной нелинейно-дисперсионной модели // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20, № 3. С. 3–32.
9. Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц // Математическое моделирование. 2015. Т. 27, № 1. С. 99–112. (дата обращения: 21.07.2025).