

DOI: [10.7242/1999-6691/2019.12.2.14](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.2.14)

УДК 551.46

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НАМИ-ДАНС В ПРОБЛЕМЕ ЦУНАМИ**А.И. Зайцев<sup>1,2</sup>, А.А. Куркин<sup>2</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>1-4</sup>, А. Ялченир<sup>5</sup><sup>1</sup>Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Российская Федерация<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН», Нижний Новгород, Российская Федерация<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация<sup>5</sup>Ближневосточный технический университет, Анкара, Турция

Дано описание математических моделей, применяемых при решении проблемы генерации и распространения волн цунами от различных источников: подводных землетрясений, оползневых движений в воде и резких изменений атмосферных условий (метеоцунами). В их основе лежит известная нелинейная теория «мелкой воды» и ее дисперсионные обобщения (плановые уравнения). Дисперсия длинных волн на воде, связанная с конечностью глубины водного слоя, приводит к повышению порядка исходных уравнений, вследствие чего резко увеличивается время счета. Поэтому в представляемых в данной статье исследованиях физическая дисперсия заменена на численную благодаря специальному выбору пространственно-временных шагов. Численная схема решения уравнений мелкой воды базируется на методе «чехарда». Уравнения решаются в сферической системе координат на вращающейся Земле с учетом диссипативных эффектов в придонном слое с помощью разработанного комплекса НАМИ-ДАНС. При волнах сейсмического происхождения начальные условия для решения гидродинамических уравнений берутся из решения задачи теории упругости, описывающей развитие землетрясения (решение Окады). В случае метеоцунами атмосферные факторы учитываются как внешние силы и включаются в правые части уравнений мелкой воды. Наконец, генерация волн цунами подводными оползнями рассматривается в рамках двухслойной модели с нижним вязким слоем, моделирующим движение оползня. Используются граничные условия двух типов: на открытых границах (проливах) полагается свободный уход волны через границу (в рамках линейной теории) и на берегу (или вблизи берега) – полностью отражающие границы. Перечислены некоторые тестовые задачи (benchmarks), на которых проверялся вычислительный комплекс. Отмечаются трудности представления характеристик цунами, обусловленные плохим знанием данных батиметрии дна и топографии берега. Обсуждается также возможность использования данного комплекса в расчетах воздействия цунами на берега и сооружения.

*Ключевые слова:* цунами, подводные землетрясения, подводные оползни, метеоцунами, теория мелкой воды, теория длинных волн, численные методы решения гиперболических уравнений, метод «чехарда», воздействие цунами

**COMPUTATIONAL NAMI-DANCE COMPLEX IN THE PROBLEM OF TSUNAMI WAVES**A.I. Zaytsev<sup>1,2</sup>, A.A. Kurkin<sup>2</sup>, E.N. Pelinovsky<sup>1-4</sup> and A. Yalciner<sup>5</sup><sup>1</sup>Special Research Bureau for Automation of Marine Researches FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation<sup>3</sup>Federal Research Center "Institute of Applied Physics RAS", Nizhny Novgorod, Russian Federation<sup>4</sup>National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russian Federation<sup>5</sup>Middle East Technical University, Ankara, Turkey

Mathematical models applicable to the simulation of generation and propagation of tsunamis of different origin - underwater earthquakes, submarine landslides, meteotsunami – are described. The basic model is based on the well-known nonlinear shallow-water theory and its dispersion generalizations in two horizontal dimensions. Long wave dispersion related to the finiteness of water depth increases the order of PDE and leads to serious computational problems. We replace the physical dispersion with the numerical one using specific conditions for spatial and temporal steps. The numerical scheme is based on a Leap-Frog method. The equations are solved in spherical coordinates fixed to the rotating Earth by taking into account dissipative effects in the near-bottom layer with the use of NAMI-DANCE code. For tsunami waves of seismic origin, the initial conditions for hydrodynamic equations are found from the Okada solution of elastic equations describing the development of an earthquake. In the case of meteotsunami, atmospheric factors are modeled by the external forces. The process of generation of tsunami waves of landslide origin is analyzed in the framework of a two-layer model with lower viscous layer modeling the motion of a submarine landslide. There are two kinds of boundary conditions: free wave passage through open boundaries (in straits, etc.) using linear shallow-water equations, and a full reflection on the coast or in near-shore area. The NAMI-DANCE code has been verified with several benchmarks. The difficulties of tsunami modelling associated with the lack of accuracy in the bottom bathymetry and land topography are mentioned. The use of the developed code for the analysis of tsunami action on the coasts and constructions is discussed.

*Key words:* tsunami, underwater earthquake, submarine landslides, meteotsunami, shallow-water equations, long wave theory, numerical methods for hyperbolic equations, Leap-Frog method, tsunami action

**1. Введение**

Анализ исторической информации о цунами в мире показывает, что в среднем такое явление случается примерно один раз в месяц, а с катастрофическими последствиями — примерно раз в год. Только за последний, 2018 год, два разрушительных цунами с человеческими жертвами произошли в Индонезии. Первое из них случилось на острове Сулавеси после сильного землетрясения 28 сентября, высота волны достигла тогда 11 м, погибло более 2 тысяч человек [1]. Второе было вызвано извержением вулкана Анак

Кракатау 22 декабря и привело к волне высотой до 7 м, погубившей около тысячи человек; оно было предсказанным в [2]. Особо отметим цунами оползенового происхождения, имевшее место в России в декабре на реке Буряя с волнами высотой до 40 м. К счастью, оно произошло в необжитых местах [3]. Наконец, стоит упомянуть метеоцунами с волнами 1,5 м в Испании 16 июля [4]. Даже это простое перечисление событий лишь за 2018 год показывает, как разнообразны механизмы генерации цунами.

Между тем, есть общие свойства волн цунами, позволяющие понять, какими моделями они могут быть описаны. В частности, катастрофические цунами обладают большими размерами (большей длиной волны), превышающими глубину водного бассейна, так что базовой моделью для расчета является двумерная теория мелкой воды, хорошо известная в механике сплошных сред [5–8]. Она давно и активно применяется в проблеме цунами [9–13]. В настоящее время в мире существует много вычислительных комплексов, решающих уравнения мелкой воды при различных приближениях с помощью разных алгоритмов. Их разнообразие побуждает производить проверку точности получаемых результатов на тестовых задачах — benchmarks, для которых есть аналитические решения или надежные экспериментальные данные [14–16]. В настоящей статье описан один из таких комплексов, разработанный авторами и названный НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE) [17]. Аббревиатура NAMI-DANCE включает сокращение от слова «цунами» (NAMI) и слово «танец» (DANCE) и навеяно численной схемой прыгающей («танцующей») лягушки, используемой в программе (<http://lnnad.nntu.ru/ru/projects/namidance/>). Комплекс уже более 10 лет успешно применяется службой предупреждения о цунами в Турции и Малайзии и непрерывно совершенствуется.

## 2. Уравнения теории длинных волн, решаемые с помощью комплекса НАМИ-ДАНС

Цунами часто имеют глобальный характер и, зародившись в одном месте, могут оставаться разрушительными при перемещении от очага на расстояния до десятков тысяч километров. Поэтому возникает необходимость решения уравнений мелкой воды на реальной Земле с учетом ее вращения, изменчивых сведений о батиметрии дна и изрезанности береговой линии, а также влияния трения в турбулентном придонном слое. Удобно записать уравнения в полных потоках, обеспечивающих сохранение массы и количества движения [18]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = fN, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = -fM, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[ \frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0, \quad (3)$$

где  $\eta$  — смещение водной поверхности,  $t$  — время,  $M$  и  $N$  — компоненты расхода воды по долготе  $\lambda$  и широте  $\theta$  на вращающейся Земле,  $D = h(x, y) + \eta$  — полная глубина бассейна и  $h(x, y)$  — невозмущенная глубина воды (задаваемая картами),  $g$  — гравитационная постоянная,  $f$  — параметр Кориолиса ( $f = 2\Omega \sin \theta$ ) и  $\Omega$  — частота вращения Земли (период вращения 24 часа),  $R$  — радиус Земли. В сферических координатах система уравнений (1)–(3) является гиперболической, но имеет сингулярные точки  $\theta = \pm \pi/2$  (полюса Земли). В приполярных широтах океан покрыт льдом, и такие области обычно исключаются при анализе.

На практике необходимо учитывать диссипацию энергии в придонном турбулентном слое. Простейший способ моделирования здесь — это параметризация донного трения квадратичной формулой (последние слагаемые в левой части уравнений (1), (2)) с постоянным коэффициентом шероховатости дна  $n$  (так называемая формула Маннинга). Такая параметризация активно используется в задачах речной гидравлики, для которых проведены специальные лабораторные эксперименты, и коэффициенты шероховатости определены для различного рода грунтов. Волны цунами — это нестационарные гидравлические потоки, но их периоды достаточно большие, так что и для них можно прибегать к квазистатической формуле Маннинга. В расчетах, как правило, коэффициент шероховатости составляет:  $n = 0,015 \text{ м}^{-1/3} \text{ с}$ , что характерно для естественного дна (песка, мелкой гальки).

Отметим, что сейчас в задачах наката волн на берега с учетом реальной застройки полагается переменное значение коэффициента шероховатости (см., например, [19]), что позволяет проводить детальное районирование заливания побережья волнами цунами. Другие модели диссипации волн в придонном слое ведут к трехмерности уравнений (это так называемые модели с вертикальным разрешением, получаемые из уравнений Навье–Стокса [18], требующие существенного увеличения

времени расчетов). Такие модели, как и исходные трехмерные уравнения гидродинамики Эйлера или Навье–Стокса, пока еще редко применяются для расчетов характеристик волн цунами.

Главное преимущество «сферической» системы (1)–(3) заключается в том, что она привязана к географическим координатам, и поэтому локация результатов расчетов на местности становится легко осуществимой. Кроме того, и данные глубин океанов и морей (параметры батиметрии) даются в атласах (в том числе и в электронных) в географических координатах, так что, напротив, есть проблема преобразования батиметрических данных к «плоской» Земле.

Система уравнений мелкой воды должна быть дополнена граничными и начальными условиями. На морских границах расчетных областей (например, в проливах) ставится условие свободного ухода волны, которое является точным в рамках линейной теории мелкой воды (без учета вращения Земли) и простейшей геометрии морской границы:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0,$$

где производная от уровня вычисляется по нормали к внешней границе расчетной области. Это условие делает возможными расчеты в ограниченной области, однако надо понимать, что в реальности любой водный бассейн имеет переменную глубину, и волна, вышедшая из расчетной области, может вернуться в нее после отражения извне. Данное обстоятельство накладывает ограничения на время расчетов волн в бассейне (на что, к сожалению, часто не обращается должного внимания), поэтому морские границы необходимо сдвигать как можно дальше.

Береговая граница в общем случае подвижна и перемещается вместе с волной, накатывающейся на берег. На береговой линии нарушается гиперболичность уравнений волн на воде, к тому же коэффициент при диссипативном слагаемом обращается в бесконечность. Если на берегу расположены скалы, практически вертикально уходящие в воду, то естественным граничным условием служит условие полного отражения:

$$\frac{\partial \eta}{\partial n} = 0 \quad \text{или} \quad u_n = 0. \quad (4)$$

Здесь  $n$  — нормаль к береговой линии. Если же берег достаточно крут, то часто используют искусственную вертикальную стенку на глубине 5–20 м (в последних «морских» точках расчетной сетки), на которой ставятся граничные условия (4). Благодаря такому приему исключается зона наката, трудоемкая при численных расчетах (требуется очень мелкая сетка и присутствует отмеченная выше сингулярность в диссипативном слагаемом).

Более правильно (и необходимо для практики) решать систему уравнений мелкой воды в области с подвижной границей:

$$D(\lambda, \theta, t) = h(\lambda, \theta) + \eta(\lambda, \theta, t),$$

что позволяет исследовать накат волн на берег и рассчитывать характеристики затопления побережья опасными морскими волнами. В большинстве вычислительных комплексов в зависимости от задачи используется граничные условия как на вертикальной стенке в море, так и на подвижной границе.

Для расчета наката волн цунами в реальных акваториях необходимо иметь очень хорошую информацию о батиметрии морского дна. Так, в обзоре [20] рассмотрен эффект влияния качества данных батиметрии на точность расчетов волнового поля цунами. Показано, что современные цифровые карты батиметрии, например GEBCO, не обеспечивают адекватным воспроизведением рельефа дна в численных моделях распространения волн, что может приводить к существенным ошибкам при оценке максимальных заплесков цунами на побережье. В работе [21] этот эффект продемонстрирован на примере двух Симуширских цунами 2006 и 2007 годов в центральной части Курильской гряды. Показано, что расчеты, выполненные на сетках с разрешением 30 угловых секунд, обеспечивают только качественную оценку распределения высот волн цунами вдоль побережья. В то же время количественное совпадение результатов моделирования и данных наблюдений удается получить только для сеток с пространственным разрешением не хуже 10 угловых секунд. Разумеется, хорошее разрешение требуется только в окрестности берега, поэтому в практике расчетов цунами (и в этой работе тоже) используется метод вложенных сеток, позволяющий уменьшать шаги в  $3^m$  раз, где  $m$  — целое число (см., например, [22]).

Приведенная выше система уравнений мелкой воды реализована численно многими коллективами исследователей. В данной работе в качестве исходного численного кода выбран международный код TUNAMI, созданный по заказу ЮНЕСКО и описанный в [23]. Численная схема в нем основана на конечных разностях типа «чехарда» (схема с перешагиванием) (см., например, [10, 23]). Временной шаг,

в силу гиперболичности уравнений мелкой воды, выбирается из условия Куранта устойчивости численной схемы:

$$\frac{R\Delta\lambda}{\Delta t}, \frac{R\Delta\theta}{\Delta t} > \sqrt{gh_{\max}},$$

где  $\Delta\lambda$  и  $\Delta\theta$  — шаги расчетной сетки вдоль долготы и широты,  $\Delta t$  — шаг по времени,  $h_{\max}$  — максимальная глубина бассейна.

В приложении к проблеме, обсуждаемой в настоящей работе, код TUNAMI был модернизирован, в частности, переписан на языке Си++, более совершенном, по сравнению с языком Fortran, на котором он написан в исходном состоянии, и при создании параллельных программ использованы коммуникационные библиотеки Message Passing Interface (MPI) и технология Open Multi-Processing (OpenMP), позволившие значительно сократить время счета. Также разработан новый интерфейс программы, в результате появилась возможность не только проводить расчеты волн цунами, но и обрабатывать полученные данные. В частности, предусмотрено построение пространственных распределений смещения уровня воды в разные моменты времени, максимумов и минимумов волнового поля (которые для простоты названы положительными и отрицательными амплитудами) во время прохождения волны цунами, высот волн вдоль исследуемого побережья; расчет мареограмм (отклонений свободной поверхности воды от нулевого уровня в фиксированной точке дна) вблизи различных пунктов побережья, построение функций распределения высот волн. На основе разработанного интерфейса легко подготовить данные к презентации, например, построить трехмерные (3D) картинки и анимацию. Комплекс был назван НАМИ-ДАНС и зарегистрирован (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014611028 от 22 января 2014 года).

После катастрофического землетрясения, произошедшего в 2004 году в Индийском океане, вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС рекомендован ЮНЕСКО для расчетов цунами (один из авторов статьи — А. Зайцев, работал инструктором во время проведения серии курсов по его освоению, организованных под эгидой Международного океанографического комитета ЮНЕСКО) и взят на вооружение специалистами ряда стран: Турции, России, Индии, Шри-Ланки, Малайзии. Он внедрен в системы оповещений о цунами в Турции и Малайзии. Отметим также, что в дополнение к НАМИ-ДАНС разработаны программы для автоматического извлечения в реальном времени данных Геофизических служб о землетрясении и сведений из системы буев DART о колебаниях морской поверхности, необходимых для расчетов цунами по следам только что случившегося землетрясения. Однако в данной работе эти программы не обсуждаются.

### 3. Нелинейно-дисперсионная модель длинных волн

Известно, что для относительно слабых землетрясений или оползневых цунами характерная длина вызванной волны может быть сравнима с глубиной водного бассейна. В этом случае приближения мелкой воды недостаточно [24], и необходимо переходить к дисперсионным моделям длинных волн. Это важно и для сильнейших цунами тоже, если очаг цунами очень анизотропен. Так, очаг Индонезийского цунами 2004 г. был вытянут почти на 1000 км вдоль меридиана и примерно на 50 км вдоль широты. Длина волны при этом менялась (грубо) от 50 до 1000 км, и в своем нижнем пределе волна «чувствовала» глубину океана, особенно на больших расстояниях.

Нелинейно-дисперсионные модели длинных волн (так называемые системы Буссинеска) предложены достаточно давно. Наверное, первой из них была система Перегринна, справедливая для слабой нелинейности и дисперсии [25]. Затем появилась сильно-нелинейная слабо-дисперсионная модель Грина–Нагди, которая в русскоязычной литературе часто называется системой Железняк–Пелиновского (она описана в книге [12]). Уравнения такого типа выведены аккуратно для волн в сферических координатах в работе [26]. Следует сразу сказать, что в силу малости дисперсии отдельные слагаемые в уравнениях могут быть заменены на другие, если использовать связи из уравнений мелкой воды. В результате могут быть получены разнообразные нелинейно-дисперсионные обобщения теории длинных волн в воде (см. обзоры [27–29]). Некоторые из них реализованы в популярных вычислительных комплексах FUNWAVE [30] и COOLWAVE [31], применяемых для моделирования цунами и штормовых нагонов. Однако для реализации численных алгоритмов решения уравнений нелинейно-дисперсионной теории нужны более мелкие шаги в пространстве и во времени, чтобы вычислить производные высокого порядка. В результате резко возрастает время счета и накапливаются вычислительные погрешности. Например, большинство численных схем нелинейно-дисперсионных уравнений типа Буссинеска оказываются неустойчивыми [32]. Другая трудность связана с отсутствием батиметрических карт с детальным разрешением, а их интерполяция на мелкие масштабы не является точной. Именно поэтому нелинейно-дисперсионные модели пока еще не очень активно используются в рассмотрении проблемы цунами, особенно при расчетах волн, распространяющихся на большие расстояния.

Наряду с этим рассматриваются другие пути дисперсионного обобщения уравнений мелкой воды, не связанные с введением явно производных высокой степени. Так, в одном из подходов вместо физической дисперсии используется численная, и, по-видимому, именно этот подход был впервые применен к проблеме цунами в работе [33]. Его основная идея заключается в изменении численной схемы конечных разностей, дискретизирующей уравнения мелкой воды так, чтобы величина вносимой ею ошибки приводила к точно такой же дисперсии волн на воде, как если бы решались строго уравнения дисперсионной теории. Поясним это на примере одномерного уравнения Буссинеска, к которому в простейшем случае сводятся уравнения дисперсионной теории длинных волн:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - \frac{c_0^2 h^2}{3} \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = 0, \quad (5)$$

где  $c_0 = \sqrt{gh}$  — скорость длинных волн; справа отброшены слагаемые, содержащие производные более высокого порядка. Если теперь рассмотреть волновое уравнение (5) без последнего слагаемого и решить его численно методом «чехарда», как это и делается в случае исходной системы уравнений мелкой воды, то получится разностный аналог волнового уравнения. Если в нем разложить все разности в ряд Тейлора, то, ограничившись несколькими первыми членами, можно получить снова дифференциальное уравнение вида

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} - c_0^2 \frac{(\Delta x)^2}{12} (1 - c_r^2) \frac{\partial^4 \eta}{\partial x^4} = 0, \quad (6)$$

где появляется дополнительное (последнее) слагаемое, и  $c_r = c_0 \Delta t / \Delta x$  есть известное число Куранта, а  $\Delta t$  и  $\Delta x$  — временной и пространственный шаги численной схемы. Важно отметить, что схема «прыгающей лягушки» позволяет исключить появление в (6) третьей производной, которая приводила бы либо к диссипации энергии, либо к неустойчивости численной схемы (именно отсюда и вытекает требование малости числа Куранта). При этом, однако, не удастся исключить члены с производной четвертой степени, описывающие дисперсию волн.

При сравнении уравнений (5) и (6) видно, что они идентичны, если размер шага равен

$$\Delta x = 2h / \sqrt{1 - c_r^2} \quad \text{или} \quad \Delta x = \sqrt{4h^2 + gh(\Delta t)^2}. \quad (7)$$

Таким образом можно связать между собой пространственные и временные шаги. Идея справедлива и для переменной (но все же плавно переменной) глубины бассейна, однако в этом случае необходимо строить переменные по координате сетки [33, 34]. В работе [33] предложено брать постоянное значение временного шага. Но в результате этого утрачивается свобода в выборе шага пространственной сетки в силу (7), и на переменной глубине пространственная сетка может стать сильно неоднородной и потому не всегда удобной для вычислений. В авторском комплексе НАМИ-ДАНС реализован такой способ изменения шага по времени, который приводит к значительному увеличению эффективности численной дисперсии. При этом пространственная сетка остается более однородной. Описание схемы и данные ее тестирования на ряде задач приводятся в [35, 36].

#### 4. Генерация цунами землетрясениями

При генерации волн цунами подводными землетрясениями сейсмический процесс в очаге заканчивается достаточно быстро, и волна не успевает выйти из очага. В этом случае подвижки морского дна можно считать мгновенными, вызывающими такие же мгновенные смещения водной поверхности. Тогда процесс генерации волн сводится к формулировке начальных условий:

$$\eta(\lambda, \theta, t = 0) = \eta_0(\lambda, \theta), \quad M(\lambda, \theta, t = 0) = N(\lambda, \theta, t = 0) = 0. \quad (8)$$

Ранее информация о землетрясениях была весьма отрывочной (для происходящего землетрясения более или менее давались его координаты и магнитуда), поэтому начальные условия устанавливались через эмпирические формулы (см., например, [12]). Сейчас сообщается более полная информация (буквально через несколько минут после начала землетрясения), которая включает положение плоскости разрыва, величины дислокаций и другое. Характерные параметры очага землетрясения, определяемые в настоящее время достаточно хорошо, показаны на рисунке 1: это длина разлома  $L$ , его ширина  $W$  и

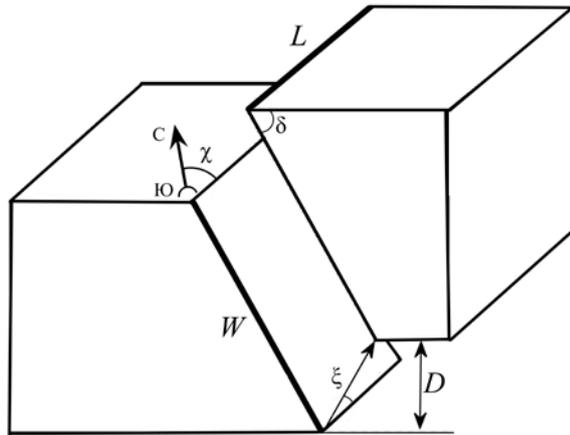


Рис. 1. Схема и параметры очага землетрясения с ориентацией относительно поверхности Земли

смещение  $D$ , угол между меридианом и линией разлома (strike angle)  $\chi$ , угол наклона плиты (dip angle)  $\delta$ , угол сдвига плиты (slip angle)  $\xi$ . В результате возможен более точный расчет остаточных смещений в очаге в рамках теории упругости полупространства (соответствующие формулы приведены в ряде работ). В большинстве расчетов, сделанных в данной работе, использовались формулы, данные в статье [37] и позволяющие определить функцию  $\eta_0(\lambda, \theta)$  в (8) по приведенным выше характеристикам землетрясения (этот подход сейчас общепринят). Аналитические формулы Окады весьма громоздки (занимают несколько страниц), но сейчас они запрограммированы, так что расчет начальных смещений водной поверхности происходит практически мгновенно.

Во время наиболее сильных землетрясений, с магнитудами порядка 9, вспарывание очага осуществляется не сразу, а в течение нескольких

минут и даже десятков минут. Эти времена сравнимы с характерным периодом волн цунами, так что необходимо решать уравнения мелкой воды с правой частью. В теоретическом плане эта проблема обсуждается, например, в книгах [12, 13]. На практике же растянутый процесс возбуждения волн цунами заменяют на несколько точечных всплесков путем задания мгновенных подвижек земной поверхности в разные моменты времени и в разных точках (отвечающих сейсмическим данным). Получаемые решения для открытой части моря складывают линейно, а затем уже анализируется общий процесс распространения волн цунами. Эта процедура реализована в комплексе НАМИ-ДАНС. Имеются другие модели процессов, вызванных землетрясением, например, клавишная модель, развиваемая под руководством Л.И. Лобковского [38], и на ее основе также рассчитываются волны цунами (см., например, [39]).

В заключение этого раздела перечислим несколько последних публикаций, отражающих применение комплекса НАМИ-ДАНС для расчета реальных цунами и карт заливания берега: [22, 40–44].

## 5. Генерация цунами подводными оползнями

Согласно статистике, около 85% волн цунами генерируются подводными землетрясениями, и только малая часть — оползнями или обвалами. Зачастую оползни тоже возникают в результате землетрясений, даже слабых, и также могут вызывать заметные цунами. Такие оползни диагностированы после известнейших катастрофических цунами сейсмического происхождения последних лет, в том числе после последнего цунами в Индонезии в 2018 году [45]. Точка зрения, что цунами вызываются главным образом оползнями, а не напрямую подвижками дна, сейчас становится популярной [46].

Во многих случаях разрушительные оползни являются откликами на локальные процессы в отсутствие сейсмических событий. Волны большой амплитуды, связанные с оползнями, наблюдались на Аляске, в Японии и во многих фиордах Норвегии. Так, сход лавины, содержащей около 300 млн кубометров породы, со склонов горы Фейрузер (Аляска, 10 июля 1958 г.) в бухту Литуя привел к образованию цунами высотой 60 м, при этом максимальный заплеск на берег в самой бухте достиг рекордной цифры в 524 м. Уже говорилось о цунами 40-метровой высоты в долине реки Бурей на Дальнем Востоке в 2018 г. Еще ранее, 1 сентября 2017 г., в Баксане, на Кавказе, оползень сошел в реку и породил волну высотой 1 м (погиб человек). Оползневое цунами часто приводит к катастрофическим последствиям, поэтому проблема генерированных оползнем волн на воде представляет большой практический интерес.

Описание цунами, связанных с подводными оползнями, является трудной задачей. Для этого создан ряд моделей, зависящих от реологии оползневой массы; они обсуждаются в [47–52]. Одна из таких «мелководных» моделей разработана под руководством профессора Имамуры (главного автора комплекса TUNAMI), названная им двухслойной — two-layer. Именно эта модель [47] с модификациями использована в комплексе НАМИ-ДАНС. В ее рамках оползень предполагается вязко-жидким. Основные уравнения двухслойной модели имеют следующий вид (в декартовых переменных без учета вращения Земли):

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} + \frac{g m_1^2}{2 D_1^{7/3}} M_1 \sqrt{M_1^2 + N_1^2} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_1^2}{D_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_1 N_1}{D_1} \right) + g D_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial y} + \frac{g m_1^2}{2 D_1^{7/3}} M_1 \sqrt{M_1^2 + N_1^2} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial (\eta_1 - \eta_2)}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial x} + \frac{\partial N_1}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} - \beta \left( \frac{\partial^2 \eta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta_2}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + g D_2 \left[ \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial x} (\eta_1 + h_1 - \eta_2) + \frac{\partial}{\partial x} (\eta_2 - h_1) \right] + \frac{g m_2^2}{2 D_2^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} = 0,$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N_2^2}{D_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M_2 N_2}{D_2} \right) + g D_2 \left[ \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial}{\partial y} (\eta_1 + h_1 - \eta_2) + \frac{\partial}{\partial y} (\eta_2 - h_1) \right] + \frac{g m_2^2}{2 D_2^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} = 0.$$

Здесь:  $\eta_1$  — смещение водной поверхности;  $\eta_2$  — изменение высоты оползня в процессе движения;  $t$  — время;  $x$  и  $y$  — горизонтальные координаты;  $M_1$  и  $N_1$  — потоки воды вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $D_1 = h_1 + \eta_1 - \eta_2$  и  $h_1$  — полная и невозмущенная глубины воды;  $M_2$  и  $N_2$  — потоки оползневой массы вдоль осей  $x$  и  $y$ ;  $D_2 = h_2 + \eta_2$  и  $h_2$  — полная и невозмущенная толщины оползня;  $g$  — гравитационная постоянная;  $m_1$  и  $m_2$  — коэффициенты шероховатости поверхности твердого и вязко-жидкого (оползневого) дна соответственно;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотность воды и плотность оползневого материала;  $\beta$  — коэффициент эффективной вязкости в оползне. Следует сразу сказать, что вязкость оползня учитывается феноменологически и присутствует только в одном уравнении — (12), этим обеспечивается растекание оползня и сглаживание его поверхности, при этом структура течения в оползне предполагается однородной в поперечном сечении (как в модели Саваджа–Хутера [53]), а наличие пограничного турбулентного слоя учитывается введением в уравнение (12) члена со вторыми производными, описывающего трение. Применимость подобных приближений описана в [47]. Система уравнений в итоге перестает быть гиперболической, что требует аккуратности при последующей аппроксимации численной схемы.

Отвечающая двухслойной модели геометрия расчетной области представлена на рисунке 2.

В начальный момент времени задается положение оползня, который еще находится в состоянии покоя:

$$\eta_2(x, y, t = 0) = \eta_0(x, y), \quad M_2 = 0, \quad N_2 = 0,$$

при этом водная поверхность считается невозмущенной (выполняются нулевые начальные условия для  $\eta_1$ ,  $M_1$  и  $N_1$ ). В результате удастся рассчитать движение оползня и волн, вызываемых его движением.

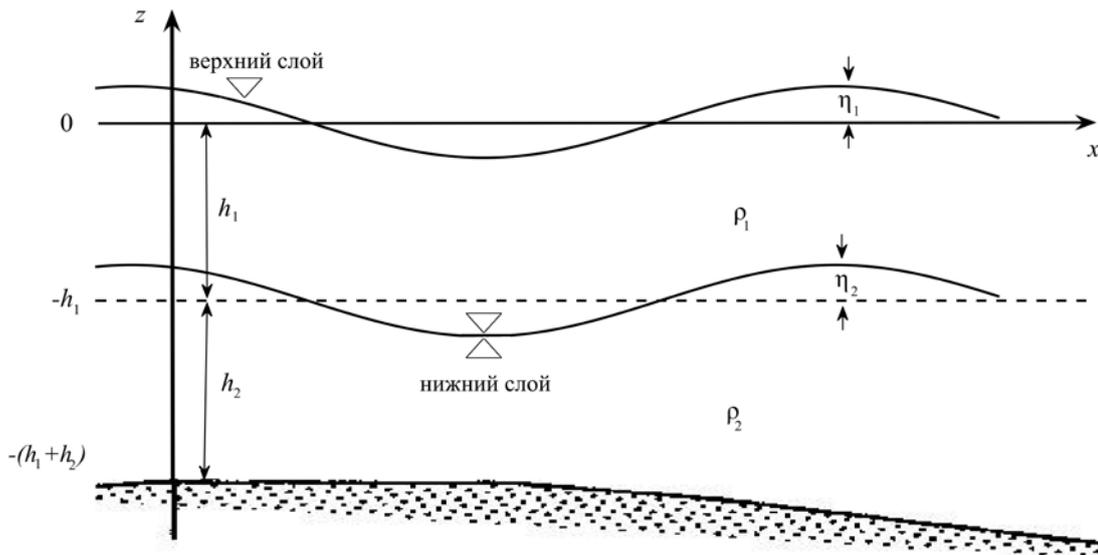


Рис. 2. Двухслойная модель генерации цунами, вызванного подводным оползнем: верхний слой – вода, нижний – оползень

Учитывая тот факт, что длина волны оползневых цунами обычно значительно меньше тех, что вызваны землетрясением, учет дисперсионных эффектов представляется важным. Именно поэтому численная схема для системы уравнений водного слоя (9)–(11) была усовершенствована, в то время как оползень описывается недисперсионными уравнениями мелкой воды. Данная процедура встроена в программный комплекс НАМИ-ДАНС. Включение дисперсии в «водный слой» производилось по той же методике, что и в разделе 2, то есть с заменой физической дисперсии численной.

Данная модель использована для прогностической оценки цунами в дельте реки Нил [46].

## 6. Метеоцунами

Причиной внезапного возникновения больших волн, которые иногда наблюдаются на побережье, могут быть пространственные и временные изменения атмосферного давления. Так, низкое атмосферное давление приводит к повышению уровня воды в части морской области, а высокое — к понижению уровня воды в другой зоне (закон обратного барометра), так что уровень воды в море всегда искажен. Возникающие при этом волны могут усиливаться в силу резонансных свойств прибрежной морфологии. Обзор наблюдений метеоцунами дан в статьях [54, 55]. У метеорологических длинных волн есть тот же самый период волны, как и у волн обычных цунами (от нескольких минут до 2–3 часов), они, подобно обычным цунами, могут вызвать человеческие жертвы и разрушительные эффекты в прибрежных зонах. Для метеоцунами важными являются механизмы генерации, например, пространственные и временные распределения давления (атмосферные фронты), атмосферные гравитационные волны.

Одно из интересных событий наблюдалось 23–27 июня 2014 года в Средиземном и Черном морях от Испании до Украины [56]. В частности, 27 июня 2014 года волны высотой 1–2 м внезапно пришли на Одесское побережье. Поскольку во время данных событий значимые землетрясения в средиземноморском и черноморском регионах не были зарегистрированы, возможной причиной таких событий предположительно считаются атмосферные возмущения.

Итак, уравнения длинноволновой модели теперь включают атмосферное воздействие. В связи с этим уравнения (1), (2) модифицируются:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} + \frac{D}{\rho} \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial p_{\text{atm}}}{\partial \lambda} = fN,$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} + \frac{D}{\rho} \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial p_{\text{atm}}}{\partial \theta} = -fM,$$

а уравнение (3) остается без изменений. Здесь  $p_{\text{atm}}$  — значение атмосферного давления в паскалях, которое берется из метеорологических карт, обычно передаваемых потребителям в режиме реального времени с интервалом в 1 час. Карты распределения давления с интервалом в 6 часов являются доступными на сайте NASA [<https://gemini.gsfc.nasa.gov/aplo>]. Для расчетов данные этих карт интерполируются по времени, чтобы на каждом временном шаге иметь поле давления. Фактически же, к сожалению, пропускаются события, когда в заданном месте за короткий промежуток времени имеет место резкое изменение атмосферного давления, что как раз и приводит к генерации метеоцунами. Поэтому так трудно получить достоверные данные, которые служат при вычислениях входными параметрами, особенно, если нет каких-либо более частых наблюдений в отдельных местах. Ощутимое усиление метеоцунами происходит при резонансе, когда скорость атмосферного фронта близка к скорости длинных волн в водном бассейне (резонанс Праудмана), и такие эффекты отмечаются в ряде районов Мирового океана.

Модификация вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС с введением в него атмосферного давления не вызывает трудностей (порядок системы не меняется), за исключением технических, связаны с получением сведений с атмосферных карт (выше об этом говорилось). Модифицированный комплекс НАМИ-ДАНС прошел верификацию на известных решениях в рамках линейной теории мелкой воды для бассейнов с идеализированной батиметрией [57].

## 7. Учет силового воздействия волн цунами на берега и сооружения

Расчеты волновых характеристик (смещения водной поверхности и скорости потока) стали сейчас общепринятыми в исследовании проблемы цунами. Определение же силовых характеристик цунами еще в зачаточной стадии. В практике нахождения нагрузок от ветровых волн — рассчитывать их на втором этапе, когда волновой режим в море известен и легко может быть пересчитан в любой точке акватории. Этот путь не приемлем для цунами. Волны цунами — это длинные волны, масштаб которых сопоставим с размерами прибрежных сооружений (гаваней, портов и другого), так что нельзя пересчитать волновое

поле с открытого моря в проектируемой береговой точке с помощью простых формул в рамках метода геометрической оптики. Любое проектирование в прибрежной зоне должно сопровождаться моделированием волнового режима с учетом возводимого сооружения, поскольку при наличии последнего меняются резонансные свойства акватории и положения экстремумов волн. Только для относительно простых конструкций можно выполнять расчеты волнового поля вне зависимости от них, а уж потом рассчитывать отдельно нагрузки на них. Такая ситуация, в частности, реализуется в случае одиночных вертикальных преград незначительного (по сравнению с длиной волны цунами) диаметра. В некоторых случаях диаметр преграды настолько мал, что она является «подсеточной», вносимое ею возмущение практически не сказывается на распределении компонентов волнового поля. Именно в таких случаях можно пользоваться классическими формулами для сил и моментов сил, в частности, силы давления в гидростатическом приближении —  $F_h$ , и лобового сопротивления —  $F_f$ :

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_w g D S, \quad F_f = \frac{1}{2} \rho_w C_D u^2 S, \quad (13)$$

где  $\rho_w$  — плотность морской воды,  $S$  — площадь поперечного сечения преграды по направлению распространения волны,  $C_D$  — коэффициент лобового сопротивления, пропорциональный кинематическим характеристикам волн цунами; все характеристики берегового сооружения (диаметр, ширина преграды и другое) учитываются только через величины числовых коэффициентов в (13). Поэтому расчет силового воздействия цунами на опоры малого диаметра можно выполнять уже после анализа волнового поля в акватории.

Сложнее рассчитать изменения состояния морского дна и берега. Для этого требуется привлечение трехмерных транспортных моделей. Между тем интенсивность транспорта донных наносов движущейся жидкостью можно грубо охарактеризовать числом Роуза (Rouse number) [58], определенным как отношение скорости осаждения взвешенных частиц —  $W_s$ , к сдвиговой скорости неоднородного по вертикали водного потока —  $u^*$ :

$$Rs_0 = \frac{W_s}{\beta \kappa u^*},$$

где  $\kappa$  — постоянная Кармана,  $\beta$  — отношение вихревой вязкости к вихревой диффузии. Величина скорости осаждения частиц  $W_s$  зависит от их размеров и плотности и является постоянной величиной для каждого типа наносов. Сдвиговую скорость можно грубо связать со скоростью течения воды:  $u^* \sim u$  [58], так что число Роуза обратно пропорционально скорости водного потока с точностью до константы. Принято считать, что инициирование движения донных наносов происходит при числе Роуза около 7; в диапазоне значений 2,5–7,5 влекаемые наносы (bed-load) мигрируют; течению жидкости со взвешенными осадками соответствуют числа Роуза 0,8–1,2; при меньших значениях перемещение донных осадков приводит к значительным деформациям дна [58]. Рассчитав скорость водного потока и определив соответствующую величину числа Роуза, можно судить о характере донных процессов, а для районов интенсивного изменения морфологии дна выполнить отдельное моделирование количественных характеристик транспорта наносов на основе более сложных моделей.

Отметим также важность оценки возможных разрушений волнами цунами домов и различных сооружений на берегу. Для многих районов, с учетом характера построек, даются так называемые кривые «хрупкости» (fragility), связывающие с высотой цунами процент разрушений или относительное количество погибших на берегу [59]. Такие кривые построены для некоторых районов Японии, Индонезии и США. В России с 2018 года введен в действие Свод правил № 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденный 23 июня 2017 года Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Изданы также два специальных выпуска журнала РАН «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» (№3 и №4 за 2017 г.), посвященные воздействию цунами на берега и сооружения.

Следует подчеркнуть, что расчет всех перечисленных выше параметров легко «встраивается» в любой вычислительный комплекс, и, в частности, это сделано в комплексе НАМИ-ДАНС [60–62].

## 8. Заключение

В приведенном в работе кратком обзоре представлены основные гидродинамические модели механики сплошных сред, используемые в проблеме цунами. С помощью их и вычислительного комплекса

НАМИ-ДАНС можно получить решения различных практически важных задач. В постановки задач входят известные двумерные (плановые) уравнения теории мелкой воды, «приспособленные» к вращающейся Земле, а также к имеющимся банкам (атласам) батиметрии морского дна и топографии берега, и учитывающие главные механизмы генерации и диссипации волн цунами. В ряде случаев приходится принимать во внимание дисперсию волн на воде, которая приводит к повышению порядка дифференциальных уравнений. Авторами данной работы при вычислениях физическая дисперсия заменена численной, и это не увеличило существенно время расчетов.

В настоящее время началось активное использование вычислительного комплекса в задачах долгосрочного прогнозирования цунами, требующего моделирования большого числа (десяти тысяч и более) возможных сценариев их появления, построения карт заливания берега и выбора оптимальных путей для эвакуации населения, а также в задачах оценки силового воздействия цунами на берега и сооружения. Для нахождения характеристик цунами на берегу требуется знание прибрежной топографии с разрешением в несколько метров, но такая информация пока еще не надежна, и приходится включать в расчеты ту, что получается в результате интерполяции данных из более грубых атласов.

В заключение хотелось бы отметить, что методы механики сплошных сред, особенно механики разрушения, были бы весьма полезными в исследованиях характера разрушений портов и береговых сооружений под действием волн цунами. Но пока это еще вообще не присутствует в практике изучения цунами.

Настоящая статья написана по материалам пленарной лекции, прочитанной одним из авторов (Е.Н. Пелиновским) на 21-й Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, февраль 2019 г.). Докладчик выражает благодарность организаторам Школы за плодотворную обстановку для дискуссий и обмена идеями.

Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (Задания № 5.4568.2017/6.7 и 5.5176.2017/8.9) при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (грант НШ-2685.2018.5) и РФФИ (проекты № 17-05-00067 и 18-05-80019).

## Литература

1. Omira R., Dogan G.G., Hidayat R., Husrin S., Prasetya G., Annunziato A., Proietti C., Probst P., Paparo M.A., Wronna M., Zaytsev A., Pronin P., Giniyatullin A., Putra P.S., Hartanto D., Ginanjar G., Kongko W., Pelinovsky E., Yalciner A.C. The September 28<sup>th</sup>, 2018, tsunami in Palu-Sulawesi, Indonesia: A post-event field survey // *Pure Appl. Geophys.* 2019. Vol. 176. P. 1379-1395. DOI
2. Giachetti T., Paris R., Kelfoun K., Ontowirjo B. Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau Volcano, Sunda Strait, Indonesia // *Geological Society, London, Special Publications.* 2012. Vol. 361. P. 79-90. DOI
3. Чубаров Д.Л. Ледовое цунами в водохранилище Бурейской ГЭС. <http://sdc.esemc.nsc.ru/node/102> (дата обращения: 28.03.2019)
4. Meteotsunami floods islands of Mallorca and Menorca, Spain. <http://scienceglobalnews.com/environment/meteotsunami-floods-islands-of-mallorca-and-menorca-spain> (дата обращения 28.03.2019).
5. Стокер Д.Д. Волны на воде. Математическая теория и приложения. М.: Изд-во иностранной литературы, 1959. 618 с.
6. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. М.: Физматгиз, 1963. Ч. 1. 584 с.
7. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука, 1977. 816 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
9. Мурти Т. Сейсмические морские волны. Цунами. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 446 с.
10. Марчук А.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное моделирование волн цунами. Новосибирск: Наука, 1983. 175 с.
11. Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б., Марчук А.Г., Симонов К.В. Вычислительный эксперимент в проблеме цунами. Новосибирск: Наука, 1989. 168 с.
12. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. Н.Новгород: ИПФ РАН, 1996. 276 с.
13. Левин Б.В., Носов М.А. Физика волн цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
14. Synolakis C., Bernard E.N., Titov V.V., Kanoğlu U., González F.I. Validation and verification of tsunami numerical models // *Pure Appl. Geophys.* 2008. Vol. 165. P. 2197-2228. DOI
15. Liu P.L.-F., Yeh H., Synolakis C. Benchmark problems // *Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup* / Ed. P.L.-F. Liu, H. Yeh, C. Synolakis. Singapore: World Sci. Publ., 2008. P. 223-230.
16. Lynett P.J., Montoya L., Gately K. et al. Inter-model analysis of tsunami-induced coastal currents // *Ocean Model.* 2017. Vol. 114. P. 14-32. DOI
17. <http://namidance.ce.metu.edu.tr/> (дата обращения 28.03.2019).
18. Вольцингер Н.Е., Клеваный К.А., Пелиновский Е.Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 272 с.
19. Choi J., Kwon K.K., Yoon S.B. Tsunami inundation simulation of a built-up area using equivalent resistance coefficient // *Coast. Eng. J.* 2012. Vol. 54. P. 1250015–1-1250015–25. DOI
20. Куликов Е.А., Гусяков В.К., Иванова А.А., Баранов Б.В. Численное моделирование цунами и рельеф дна // *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика. Астрономия.* 2016. № 6. С. 3-14. (English version DOI)
21. Иванова А.А., Куликов Е.А., Файн И.В. О моделировании Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. в районе средних Курил // *Фундам. прикл. гидрофиз.* 2017. Т. 10, № 3. С. 56-64. DOI

22. *Dilmen D.I., Kemeç S., Yalciner A.C., Düzgün S., Zaytsev A.* Development of a tsunami inundation map in detecting tsunami risk in gulf of Fethiye, Turkey // *Pure Appl. Geophys.* 2015. Vol. 172. P. 921-929. [DOI](#)
23. *Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura F.* IUGG/IOC TIME Project: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. Manuals and guides. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 1997. No. 35. 126 p.
24. *Носов М.А.* Применимость длинноволнового приближения к описанию динамики цунами // *Ученые записки физического факультета Московского университета.* 2017. № 4. С. 1740503-1-7.
25. *Peregrine D.H.* Long waves on a beach // *J. Fluid Mech.* 1967. Vol. 27. P. 815-827. [DOI](#)
26. *Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Mitsotakis D.* Dispersive shallow water wave modelling. Part I: Model derivation on a globally flat space // *Commun. Comput. Phys.* 2018. Vol. 23. P. 1-29. [DOI](#)
27. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейно-дисперсионная теория волн цунами: взгляд после катастрофического цунами в Индийском океане // *Нелинейные волны* 2006. Н.Новгород: ИПФ РАН, 2007. С. 393-407.
28. *Федотова З.И., Хакимзянов Г.С., Гусев О.И.* История развития и анализ численных методов решения нелинейно-дисперсионных уравнений гидродинамики. I. Одномерные модели // *ЖВТ.* 2015. Т. 20, № 5. С. 120-156.
29. *Шокин Ю.И., Федотова З.И., Хакимзянов Г.С.* Иерархия нелинейных моделей гидродинамики длинных поверхностных волн // *ДАН.* 2015. Т. 462, № 2. С. 168-172. [DOI](#)
30. *Kirby J.T., Wei G., Chen Q., Kennedy A.B., Dalrymple R.A.* Funwave 1.0. fully nonlinear boussinesq wave model – Documentation and user's manual. University of Delaware, 1998. 80 p.
31. *Cheung K.F., Phadke A.C., Wei Y., Rojasa R., Douyere Y.J.-M., Martino C.D., Houston S.H., Liu P.L.-F., Lynett P.J., Dodd N., Liao S., Nakazaki E.* Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management // *Ocean Eng.* 2003. Vol. 30. P. 1353-1386. [DOI](#)
32. *Lovholt F., Pedersen G.* Instabilities of Boussinesq models in nonuniform depth // *Int. J. Numer. Meth. Fluids.* 2009. Vol. 61. P. 606-637. [DOI](#)
33. *Yoon S.B.* Propagation of distant tsunamis over slowly varying topography // *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, no. C10. P. 4-1-4-11. [DOI](#)
34. *Yoon S.B., Lim C.H., Choi J.* Dispersion-correction finite difference model for simulation of transoceanic tsunamis // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2007. Vol. 18. P. 31-53.
35. *Velioglu D., Kian R., Yalciner A.C., Zaytsev A.* Performance assessment of NAMI DANCE in tsunami evolution and currents using a benchmark problem // *J. Mar. Sci. Eng.* 2016. Vol. 4. 49. [DOI](#)
36. *Kian R., Horrillo J., Zaytsev A., Yalciner A.C.* Capturing physical dispersion using a nonlinear shallow water model // *J. Mar. Sci. Eng.* 2018. Vol. 6. 84. [DOI](#)
37. *Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1985. Vol. 75. P. 1135-1154.
38. *Лобковский Л.И., Баранов Б.В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // *ДАН СССР.* 1984. Т. 275, № 4. С. 843-847.
39. *Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А., Иващенко А.И., Файн И.В., Томсон Р.Е., Ивельская Т.Н., Богданов Г.С.* Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // *Океанология.* 2009. Т. 49. № 2. С. 181-197. (English version [DOI](#))
40. *Zaytsev A., Kostenko I., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A.C.* The depth effect of the earthquakes on tsunami heights in the Okhotsk Sea // *Turk. J. Earth. Sci.* 2016. Vol. 25. P. 289-299. [DOI](#)
41. *Aytore B., Yalciner A.C., Zaytsev A., Cankaya Z.C., Suzen M.L.* Assessment of tsunami resilience of Haydrapasa port in the Sea of Marmara by high resolution numerical modeling // *Earth, Planets and Space.* 2016. Vol. 68. P. 139-150. [DOI](#)
42. *Zaytsev A., Kostenko I., Kurkin A., Pelinovsky E., Pararas-Carayannis G.* Manifestation of the 1963 Urup tsunami on Sakhalin: observations and modeling // *Science of Tsunami Hazards.* 2017. Vol. 36. P. 145-166.
43. *Костенко И.С., Зайцев А.И., Минаев Д.Д., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ошмарина О.Е.* Монеронское цунами 1971 года и его проявления на побережье о-ва Сахалин по результатам численного моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2018. Т. 54, № 1. С. 3-12. [DOI](#)
44. *Tufekci D., Suzen M.L., Yalciner A.C., Zaytsev A.* Revised MeTHuVA method for assessment of tsunami human vulnerability of Bakirkoy district, Istanbul // *Nat. Hazards.* 2018. Vol. 90. P. 943-974. [DOI](#)
45. *Sassa S., Takagawa T.* Liquefied gravity flow-induced tsunamis: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters // *Landslides.* 2019. Vol. 16. P. 195-200. [DOI](#)
46. *Yalciner A.C., Zaytsev A., Aytore B., Insel I., Heidarzadeh M., Kian R., Imamura F.* A possible submarine landslide and associated tsunami at the northwest Nile Delta, Mediterranean Sea // *Oceanography.* 2014. Vol. 27. P. 68-75. [DOI](#)
47. *Imamura F., Imteaz M.A.* Long waves in two layer: governing equations and numerical model // *Science of Tsunami Hazards.* 1995. Vol. 13. P. 3-24.
48. *Pelinovsky E., Poplavsky A.* Simplified model of tsunami generation by submarine landslides // *Phys. Chem. Earth.* 1996. Vol. 21, no. 12. P. 13-17. [DOI](#)
49. *Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В., Борнхолд Б.Д., Томсон Р.Е.* Генерация цунами оползнями на тихоокеанском побережье Северной Америки и роль приливов // *Океанология.* 1998. Т. 38, № 3. С. 361-367.
50. *Гарагаи И.А., Лобковский Л.И., Козырев О.Р., Мазова Р.Х.* Генерация и накат волн цунами при сходе подводного оползня // *Океанология.* 2003. Т. 43, № 2. С. 185-193.
51. *Бейзель С.А., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б.* Моделирование поверхностных волн, порождаемых подводным оползнем, движущимся по пространственно неоднородному склону // *ЖВТ.* 2010. Т. 15, № 3. С. 39-51.
52. *Пак В.В.* Моделирование эволюции трехслойного Стоксова течения и некоторые геофизические приложения // *Вычисл. мех. сплош. сред.* 2018. Т. 11, № 3. С. 275-287. [DOI](#)
53. *Pudasaini S.P., Hutter K.* Avalanche Dynamics: Dynamics of Rapid Flows of Dense Granular Avalanches. Springer, 2007. 602 p.
54. *Pattiaratchi C.B., Wijeratne E.M.S.* Are meteotsunamis an underrated hazard? // *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2015. Vol. 373. 20140377. [DOI](#)

55. Рабинович А.Б., Шенц Я. Метеорологические цунами: что это такое? // Природа. 2016. № 1. С. 12-26.
56. Sepic J., Vilibic I., Rabonovich A.B., Monserrat S. Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing // Sci. Rep. UK. 2015. Vol. 5. 11682. [DOI](#)
57. Metin A.D., Pelinovsky E., Yalciner A.C., Zaytsev A., Ozyurt Tarakcioglu G., Yalciner B., Kurkin A. Meteotsunami generation, propagation and amplification // Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment. MEDCOAST 17, Mellieha, Malta, October 31-November 4, 2017. Vol. 2. P. 1143-1154.
58. Анцыферов С.М., Косьян Р.Д. Взвешенные наносы в верхней части шельфа. М.: Наука, 1986. 223 с.
59. Nanayakkara K.I.U., Dias W.P.S. Fragility curves for structures under tsunami loading // Nat. Hazards. 2016. Vol. 80. P. 471-486. [DOI](#)
60. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A. Investigation of tsunami hydrodynamic parameters in inundation zones with different structural layouts // Pure Appl. Geophys. 2015. Vol. 172. P. 931-952. [DOI](#)
61. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Suppasri A., Imamura F. Investigation of hydrodynamic parameters and the effects of breakwaters during the 2011 Great East Japan Tsunami in Kamaishi Bay // Pure Appl. Geophys. 2015. Vol. 172. P. 3473-3491. [DOI](#)
62. Зайцев А.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ялчинер А., Куан Р. Исследование влияния размеров L-формы залива на отложение донных осадков под воздействием волн // Фундам. прикл. гидрофиз. 2017. Т. 10, № 3. С. 73-77. [DOI](#)

## References

1. Omira R., Dogan G.G., Hidayat R., Husrin S., Prasetya G., Annunziato A., Proietti C., Probst P., Paparo M.A., Wronna M., Zaytsev A., Pronin P., Giniyatullin A., Putra P.S., Hartanto D., Ginanjar G., Kongko W., Pelinovsky E., Yalciner A.C. The September 28<sup>th</sup>, 2018, tsunami in Palu-Sulawesi, Indonesia: A post-event field survey. *Pure Appl. Geophys.*, 2019, vol. 176, pp. 1379-1395. [DOI](#)
2. Giachetti T., Paris R., Kelfoun K., Ontowirjo B. Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau Volcano, Sunda Strait, Indonesia. *Geological Society, London, Special Publications*, 2012, vol. 361, pp. 79-90. [DOI](#)
3. Chubarov D.L. Ledovoye tsunami v vodokhranilishche Bureyskoy [Ice tsunami in the Bureyskaya HPP basin], available at: <http://sdc.esemc.nsc.ru/node/102> (accessed 28 March 2019).
4. Meteotsunami floods islands of Mallorca and Menorca, Spain, available at: <http://scienceglobalnews.com/environment/meteotsunami-floods-islands-of-mallorca-and-menorca-spain> (accessed 28 March 2019).
5. Stoker J.J. *Water waves. The mathematical theory with applications*. Interscience Publishers. Inc., 1957. 609 p.
6. Kochin N.E., Kibel' I.A., Rose N.V. *Theoretical hydromechanics*. Interscience Publ., 1964. 577 p.
7. Sretenskiy L.N. *Teoriya volnovykh dvizheniy zhidkosti* [Theory of fluid wave motion]. Moscow, Nauka, 1977. 816 p.
8. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas]. Moscow, Drofa, 2003. 840 p.
9. Murty T.S. *Seismic sea waves. Tsunamis*. Ottawa: Department of fisheries and the environment fisheries and marine service, 1977. 337 p.
10. Marchuk A.G., Chubarov L.B., Shokin Yu.I. *Chislennoye modelirovaniye voln tsunami* [Numerical modeling of tsunami waves]. Novosibirsk, Nauka, 1983. 175 p.
11. Shokin Yu.I., Chubarov L.B., Marchuk A.G., Simonov K.V. *Vychislitel'nyy eksperiment v probleme tsunami* [Computational experiment in tsunami problem]. Novosibirsk, Nauka, 1989. 168 p.
12. Pelinovskiy E.N. *Gidrodinamika voln tsunami* [Hydrodynamics of tsunami waves]. Nizhny Novgorod, IPF RAN, 1996. 276 p.
13. Levin B., Nosov M. *Physics of tsunamis*. Springer, 2009. 338 p.
14. Synolakis C., Bernard E.N., Titov V.V., Kanoğlu U., González F.I. Validation and verification of tsunami numerical models. *Pure Appl. Geophys.*, 2008, vol. 165, pp. 2197-2228. [DOI](#)
15. Liu P.L.-F., Yeh H., Synolakis C. Benchmark problems. *Advanced numerical models for simulating tsunami waves and runup*, ed. P.L.-F. Liu, H. Yeh, C. Synolakis. Singapore, World Sci. Publ., 2008. P. 223-230.
16. Lynett P.J., Montoya L., Gately K. et al. Inter-model analysis of tsunami-induced coastal currents. *Ocean Model.*, 2017, vol. 114, pp. 14-32. [DOI](#)
17. <http://namidance.ce.metu.edu.tr/> (accessed 28 March 2019).
18. Vol'tsingher N.E., Klevanyy K.A., Pelinovskiy E.N. *Dlinnovolnovaya dinamika pribrezhnoy zony* [Long-wave dynamics of the coastal zone]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1989. 272 p.
19. Choi J., Kwon K.K., Yoon S.B. Tsunami inundation simulation of a built-up area using equivalent resistance coefficient. *Coast. Eng. J.*, 2012, vol. 54, pp. 1250015-1-1250015-25. [DOI](#)
20. Kulikov E.A., Gusiakov V.K., Ivanova A.A., Baranov B.V. Numerical tsunami modeling and the bottom relief. *Moscow University Physics Bulletin*, 2016, vol. 71, no. 6, pp. 527-536. [DOI](#)
21. Ivanova A.A., Kulikov E.A., Fain I.V. On modelling 2006, 2007 Simushir tsunamis in the central Kuril region. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 56-64. [DOI](#)
22. Dilmen D.I., Kemec S., Yalciner A.C., Düzgün S., Zaytsev A. Development of a tsunami inundation map in detecting tsunami risk in gulf of Fethiye, Turkey. *Pure Appl. Geophys.*, 2015, vol. 172, pp. 921-929. [DOI](#)
23. Goto C., Ogawa Y., Shuto N., Imamura F. IUGG/IOC TIME Project: Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. Manuals and guides. Paris: Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, 1997. No. 35. 126 p.
24. Nosov M.A. Applicability of long-wave approximation to the description of tsunami dynamics. *Uchenyye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta – Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2017, no. 4, 1740503.
25. Peregrine D.H. Long waves on a beach. *J. Fluid Mech.*, 1967, vol. 27, pp. 815-827. [DOI](#).

26. Khakimzyanov G., Dutykh D., Fedotova Z., Mitsotakis D. Dispersive shallow water wave modelling. Part I: Model derivation on a globally flat space. *Commun. Comput. Phys.*, 2018, vol. 23, pp. 1-29. [DOI](#)
27. Pelinovskiy E.N. Nelineyno-dispersionnaya teoriya voln tsunami: vzglyad posle katastroficheskogo tsunami v Indiyском океане [Nonlinear-dispersion theory of tsunami waves: A look after the catastrophic tsunami in the Indian Ocean]. *Nelineynye volny' 2006* [Nonlinear waves' 2006]. Nizhny Novgorod, IPF RAN, 2007, pp. 393-407.
28. Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S., Gusev O.I. History of the development and analysis of numerical methods for solving nonlinear dispersive equations of hydrodynamics. I. One-dimensional models problems. *ZhVT – Computational technologies*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 120-156.
29. Shokin Yu.I., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. Hierarchy of nonlinear models of the hydrodynamics of long surface waves. *Dokl. Phys.*, 2015, vol. 60, no. 5, pp. 224-228. [DOI](#)
30. Kirby J.T., Wei G., Chen Q., Kennedy A.B., Dalrymple R.A. *Funwave 1.0. fully nonlinear boussinesq wave model – Documentation and user's manual*. University of Delaware, 1998. 80 p.
31. Cheung K.F., Phadke A.C., Wei Y., Rojasa R., Douyere Y.J.-M., Martino C.D., Houston S.H., Liu P.L.-F., Lynett P.J., Dodd N., Liao S., Nakazaki E. Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management. *Ocean Eng.*, 2003, vol. 30, pp. 1353-1386. [DOI](#)
32. Lovholt F., Pedersen G. Instabilities of Boussinesq models in nonuniform depth. *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 2009, vol. 61, pp. 606-637. [DOI](#)
33. Yoon S.B. Propagation of distant tsunamis over slowly varying topography. *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, no. C10, pp. 4-1-4-11. [DOI](#)
34. Yoon S.B., Lim C.H., Choi J. Dispersion-correction finite difference model for simulation of transoceanic tsunamis. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2007, vol. 18, pp. 31-53.
35. Velioglu D., Kian R., Yalciner A.C., Zaytsev A. Performance assessment of NAMI DANCE in tsunami evolution and currents using a benchmark problem. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2016, vol. 4, 49. [DOI](#)
36. Kian R., Horrillo J., Zaytsev A., Yalciner A.C. Capturing physical dispersion using a nonlinear shallow water model. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2018, vol. 6, 84. [DOI](#)
37. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1985, vol. 75, pp. 1135-1154.
38. Lobkovskiy L.I., Baranov B.V. Klavishnaya model' sil'nykh zemletryaseniy v ostrovnykh dugakh i aktivnykh kontinental'nykh okrainakh [Keyboard model of strong earthquakes in island arcs and active continental margins]. *DAN SSSR – Reports of the Academy of sciences of the USSR*, 1984, vol. 275, no. 4, pp. 843-847.
39. Lobkovsky L.I., Rabinovich A.B., Kulikov E.A., Ivashchenko A.I., Fine I.V., Thomson R.E., Ivelskaya T.N., Bogdanov G.S. The Kuril Earthquakes and tsunamis of November 15, 2006, and January 13, 2007: Observations, analysis, and numerical modelling. *Oceanology*, 2009, vol. 49, no. 2, pp. 166-181. [DOI](#)
40. Zaytsev A., Kostenko I., Kurkin A., Pelinovsky E., Yalciner A.C. The depth effect of the earthquakes on tsunami heights in the Okhotsk Sea. *Turk. J. Earth. Sci.*, 2016, vol. 25, pp. 289-299. [DOI](#)
41. Aytore B., Yalciner A.C., Zaytsev A., Cankaya Z.C., Suzen M.L. Assessment of tsunami resilience of Haydrapasa port in the Sea of Marmara by high resolution numerical modeling. *Earth, Planets and Space*, 2016, vol. 68, pp. 139-150. [DOI](#)
42. Zaytsev A., Kostenko I., Kurkin A., Pelinovsky E., Pararas-Carayannis G. Manifestation of the 1963 Urup tsunami on Sakhalin: observations and modeling. *Science of Tsunami Hazards*, 2017, vol. 36, pp. 145-166.
43. Kostenko I.S., Zaytsev A.I., Minaev D.D., Pelinovsky E.N., Kurkin A.A., Oshmarina O.E. The Moneron Tsunami of September 5, 1971, and Its Manifestation on the Sakhalin Island Coast: Numerical Simulation Results. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2018, vol. 54, pp. 1-9. [DOI](#)
44. Tufekci D., Suzen M.L., Yalciner A.C., Zaytsev A. Revised MeTHuVA method for assessment of tsunami human vulnerability of Bakirkoy district, Istanbul. *Nat. Hazards*, 2018, vol. 90, pp. 943-974. [DOI](#)
45. Sassa S., Takagawa T. Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, 2019, vol. 16, pp. 195-200. [DOI](#)
46. Yalciner A.C., Zaytsev A., Aytore B., Insel I., Heidarzadeh M., Kian R., Imamura F. A possible submarine landslide and associated tsunami at the northwest Nile Delta, Mediterranean Sea. *Oceanography*, 2014, vol. 27, pp. 68-75. [DOI](#)
47. Imamura F., Imteaz M.A. Long waves in two layer: governing equations and numerical model. *Science of Tsunami Hazards*, 1995, vol. 13, pp. 3-24.
48. Pelinovsky E., Poplavsky A. Simplified model of tsunami generation by submarine landslides. *Phys. Chem. Earth.*, 1996, vol. 21, no. 12, pp. 13-17. [DOI](#)
49. Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Fain I.V., Bornhold B.D., Thomson R.E. Tsunami generation by landslides at the Pacific coast of North America and the role of tides. *Oceanology*, 1998, vol. 38, pp. 323-328.
50. Garagash I.A., Lobkovskii L.I., Kozyrev O.R., Mazova R.Kh. Generation and runup of tsunami waves at a submarine landslide. *Oceanology*, 2003, vol. 43, no. 2, pp. 173-181.
51. Beizel S.A., Khakimzyanov G.S., Chubarov L.B. Simulation of surface waves generated by an underwater landslide moving along a spatially irregular slope. *ZhVT – Computational technologies*, 2010, vol. 15, no. 3, pp. 39-51.
52. Park V.V. Modeling the evolution of three-layered Stokes flow and some geophysical applications. *Vychisl. mekh. splosh. sred – Computational Continuum Mechanics*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 275-287. [DOI](#)
53. Pudasaini S.P., Hutter K. *Avalanche Dynamics: Dynamics of Rapid Flows of Dense Granular Avalanches*. Springer, 2007. 602 p.
54. Pattiaratchi C.B., Wijeratne E.M.S. Are meteotsunamis an underrated hazard? *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015, vol. 373, 20140377. [DOI](#)
55. Rabinovich A.B., Shepic J. Meteorological tsunami: What is that? *Priroda*, 2016, no. 1, pp. 12-26.
56. Sepic J., Vilibic I., Rabinovich A.B., Monserrat S. Widespread tsunami-like waves of 23-27 June in the Mediterranean and Black Seas generated by high-altitude atmospheric forcing. *Sci. Rep. UK*, 2015, vol. 5, 11682. [DOI](#)

57. Metin A.D., Pelinovsky E., Yalciner A.C., Zaytsev A., Ozyurt Tarakcioglu G., Yalciner B., Kurkin A. Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment. MEDCOAST 17, Mellieha, Malta, October 31-November 4, 2017. Vol. 2, pp. 1143-1154.
58. Antsyferov S.M., Kos'yan R.D. *Vzveshennyye nanosy v verkhney chasti shel'fa* [Suspended sediment at the upper shelf]. Moscow, Nauka, 1986. 223 p.
59. Nanayakkara K.I.U., Dias W.P.S. Fragility curves for structures under tsunami loading. *Nat. Hazards*, 2016, vol. 80, pp. 471-486. [DOI](#)
60. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A. Investigation of tsunami hydrodynamic parameters in inundation zones with different structural layouts. *Pure Appl. Geophys.*, 2015, vol. 172, pp. 931-952. [DOI](#)
61. Ozer Sozdinler C., Yalciner A.C., Zaytsev A., Suppasri A., Imamura F. Investigation of hydrodynamic parameters and the effects of breakwaters during the 2011 Great East Japan Tsunami in Kamaishi Bay. *Pure Appl. Geophys.*, 2015, vol. 172, pp. 3473-3491. [DOI](#)
62. Zaytsev A.I., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Yalciner A., Kian R. Investigation of the influence of the Z-shape of the bay on sedimentation of bottom sediments under the impact of waves. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 73-77. [DOI](#)

Поступила в редакцию 01.04.2019; после доработки 08.05.2019; принята к опубликованию 22.05.2019

---

Сведения об авторах

Зайцев Андрей Иванович, дфмн, зав.лаб., Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (СКБ САМИ ДВО РАН), 693023, Сахалинская область, г. Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25; e-mail: aizaytsev@mail.ru

Куркин Андрей Александрович, дфмн, проф., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексея (НГТУ им. Р.Е. Алексея), 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24; e-mail: aakurkin@gmail.com

Пелиновский Ефим Наумович, дфмн, проф., Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: pelinovsky@gmail.com

Ялчинер Ахмет (Yalciner Ahmet), доктор, проф., Ближневосточный технический университет (Middle East Technical University – METU), 06800, Ankara, Turkey, K5 Building No K5-014; e-mail: yalciner@metu.edu.tr