

УДК 550.345

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ: МЕТОДОЛОГИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЙ

© 2025 г. В. К. Гусяков^{а, *}, Л. Б. Чубаров^{б, **}

^аИнститут вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
просп. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия

^бФедеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий
просп. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: gvk@sscc.ru

**e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

Поступила в редакцию 02.08.2024 г.

После доработки 18.12.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2025 г.

Математическое моделирование представляет собой одно из наиболее мощных и гибких средств изучения сложных природных явлений, в отношении которых постановка прямого натурного эксперимента является, как правило, невозможной. Характерным примером опасного природного явления, характеризующегося малой повторяемостью и тяжелыми последствиями, являются волны цунами, возникающие в морях и океанах при подводных землетрясениях, вулканических извержениях, подводных оползнях и береговых обвалах, а также при высокоэнергетических атмосферных воздействиях. В работе рассматриваются математические модели, используемые для изучения трех основных этапов эволюции волн цунами: возбуждения подводным либо надводным источником, распространения в глубоком океане и на шельфе, накат на берег. Обсуждается их применение для решения двух главных научно-прикладных задач, связанных с проблемой цунами — оперативного прогноза и цунамирайонирования побережья. Работа написана для данного номера журнала, посвященного 100-летию академика Г.И. Марчука, поэтому обзор ограничен в основном результатами, полученными авторами в период работы в ВЦ СО АН СССР в 1970–80 гг.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные алгоритмы, очаги землетрясений, сейсмотектоника, цунами, оперативный прогноз, цунамиопасность, цунамирайонирование

DOI: 10.31857/S0002351525030105

ВВЕДЕНИЕ

Волны цунами, возникающие в морях и океанах при некоторых сильных подводных землетрясениях, вулканических извержениях, оползнях и обвалах, являются одним из наиболее опасных видов природных катастроф. По числу жертв и суммарному ущербу цунами находятся на четвертом месте в ряду стихийных бедствий и катастроф, после землетрясений, наводнений и тайфунов. В мировой статистике жертв природных катастроф в XX столетии, унесших более четырех млн жизней, [Topics, 2000] доля цунами была относительно невелика и составляла чуть более 1%. Индонезийская катастрофа 2004 г., унесшая более 227000 жизней, сразу вы-

вела цунами в статистике жертв природных катастроф XXI в. на первое место.

Ущерб, наносимый цунами, усиливается их внезапностью, быстротечностью, тяжелыми разрушениями и высокой вероятностью летальных исходов среди людей, оказавшихся в зоне воздействия этих волн. Проблема эффективной защиты от этого стихийного бедствия осложняется редкостью его проявления на отдельном участке побережья. Даже в наиболее цунамиопасных районах Тихого океана (таких как Япония, Чили, Перу) сильные цунами с жертвами среди населения происходят раз в 30–50 лет, катастрофические — раз в 100–150 лет. Это намного ниже повторяемости, например, ураганов

и наводнений и сопоставимо с повторяемостью землетрясений и вулканических извержений. Благодаря особенностям механизма возникновения, а также ввиду наличия постоянных возмущений уровня моря, обусловленных ветровым волнением, штормами и приливами, цунами обладают некоторым естественным порогом (по высоте), ниже которого они практически ненаблюдаемы, а выше него сразу становятся опасными. Отчасти поэтому при возникновении такого стихийного бедствия степень готовности населения к нему оказывается недопустимо низкой.

В начальный период изучения цунами, в 50-х и 60-х гг. прошлого века, под этими волнами понимались длиннопериодные (в диапазоне от 2 до 200 мин) колебания уровня океана, вызванные быстротечными процессами на дне или поверхности океана, в основном, тектонического характера, т.е. подводными землетрясениями, вулканическими извержениями, а также береговыми и подводными оползнями и обвалами [Соловьев, 1968]. В настоящее время термином “цунами” принято обозначать низкочастотные поверхностные гравитационные волны, возникающие в океане в результате сейсмических движений дна, оползней и обвалов (в том числе и подводных), вулканических извержений, воздействия на водный слой подвижных неоднородностей атмосферного давления и напряжения трения ветра (метеоцунами) [Носов, 2019].

В географическом отношении считалось, что главным цунамигенным регионом является Тихий океан, цунами в других океанах могут возникать только при редких исключительных событиях, подобных Лиссабонскому землетрясению 1755 г. или извержению вулкана Кракатау 1883 г. Считалось, что наилучшей моделью цунами является длинная волна на мелкой воде. Однако уже тогда в каталоги цунами включались явления, подобные гигантскому (высотой в 524 м) заплеску в заливе Литуйя на Аляске, порожденному 10 июля 1958 г. сейсмогенным обвалом, возникшем после землетрясения магнитуды 7.9 [Miller, 1960]. Такого рода волну ни в каком приближении нельзя считать “длинной”, однако ее аномальный и катастрофический характер не вызывает сомнения.

Сравнительно с начальным периодом изучения цунами (50-е и 60-е гг. прошлого века) сейчас содержание этого термина существен-

но расширилось, как в географическом, так и в смысловом отношении. В современные каталоги и базы данных включаются не только аномальные низкочастотные колебания уровня в морях и океанах, вызванные тектоническими источниками, но также цунамиподобные явления, вызывающие опасные колебания уровня во внутренних водных бассейнах (реках, озерах, водохранилищах). В последние десятилетия выяснилась важная роль метеоцунами, вызванных метеорологическими причинами, вносящих основной вклад в цунамиопасность в таких регионах как Мексиканский залив, восточное побережье США, юго-западная Атлантика, Болеарские острова, Адриатическое море, Желтое море, юго-западное побережье Японии [Vilibić et al., 2014; Rabinovich, 2020].

При любом типе источника волна цунами есть возмущение, захватывающее всю толщу водного бассейна, при ее прохождении в движение приводятся огромные массы воды, что и делает цунами грандиозным катастрофическим явлением. В этом ее принципиальное отличие от ветровых волн, высоты которых при сильных штормах также могут достигать 8–10 м и более (в пределе до 35–37 м), но их разрушительный потенциал неизмеримо ниже.

В Российской Федерации угрозе цунами подвержено, в первую очередь, Курило-Камчатское побережье, а также побережья Японского, Охотского и Берингова морей. Исторический каталог цунами для Дальневосточного региона включает в себя 110 цунамигенных событий, происшедших там с 1737 г. [Гусяков, 2016]. Всего за этот период наблюдалось 10 разрушительных цунами с высотами заплеска 10 и более метров, среди них было 2 мегацунами с высотами более 20 м (в 1737 г. и 1952 г.), еще в 15 случаях цунами были опасными (высоты в диапазоне 2–10 м), в 13 случаях наблюдаемые высоты волн находились в пределах приливных колебаний (порядка 1–2 м), в остальных случаях цунами были слабыми и наблюдались только на приборных записях. Таким образом, повторяемость разрушительных цунами у дальневосточных берегов РФ составляет в среднем 1 раз в 25 лет, опасных — 1 раз в 10–15 лет, слабые цунами наблюдаются практически ежегодно. Цунами и цунамиподобные явления (внезапные аномальные колебания уровня воды) известны также на Черном, Каспийском, Балтийском, Баренцовом и Белом

морях. Максимальные высоты заплесков при них достигали 4–5 м, однако их повторяемости существенно ниже, чем в Дальневосточном регионе и составляют десятки и даже сотни лет. Внезапные опасные колебания уровня в историческое время известны на Байкале и на Ладоге, и даже на крупных реках, таких как Волга и Днепр, возникавших на них вследствие береговых оползней и обвалов.

В Сибирском отделении РАН работы по изучению цунами, начатые по инициативе академика М.А. Лаврентьева в Институте гидродинамики СО АН СССР Е.И. Биченковым и Р.М. Гариповым еще в начале 1960-х гг. (подробный обзор можно найти в [Шокин и Чубаров, 1999]), получили дальнейшее развитие в Вычислительном центре СО АН СССР (сейчас Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН). Ведущую роль в этом сыграл академик А.С. Алексеев, в то время доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией математических задач сейсмологии. В 1968 г. он предложил одному из авторов настоящей статьи, тогда еще студенту геолого-геофизического факультета НГУ задачу о возбуждении волн в слое сжимаемой гравитирующей жидкости, лежащем на упругом полупространстве. Идея А.С. Алексеева состояла в том, что если в уравнениях Ляме, описывающие динамику частиц сжимаемой жидкости, ввести силу тяжести, то среди решений дисперсионного уравнения должен быть корень, соответствующий поверхностной гравитационной волне, т.е. цунами. Такой подход оказался весьма плодотворным и позволил изучить зависимость амплитуд цунами от параметров сейсмического источника, используемых в сейсмологии и определяемых из наблюдений над сейсмическими волнами (сейсмический момент, глубина, механизм). Он получил название “упругой модели” возбуждения, которая рассматривалась как альтернатива чисто гидродинамической “поршневой модели”, в которой жидкость считалась несжимаемой, а дно жестким и возможность его колебаний не учитывалась. Упругая модель позволила провести совместный анализ условий возбуждения сейсмических волн, в частности поверхностных волн Релея и волн цунами для того, чтобы выяснить существование физических связей или корреляции между ними, которую можно было бы использовать для прогноза цунами. Такая

связь действительно обнаружилась (см., например, [Гусяков, 1972]), однако технические возможности средств регистрации сейсмических волн не позволили проверить ее практическую эффективность.

Работы по изучению цунами, выполняемые в ВЦ СО АН СССР, всегда находились в фокусе внимания и всячески поддерживались его тогдашним директором академиком Г.И. Марчуком. Особенно активно они развивались в середине 1970-х и в 1980-е гг., когда полученные результаты начали находить свое применение в реорганизации системы предупреждения о цунами на Дальневосточном побережье СССР (начавшейся в рамках проекта ЕАСЦ), а также в советско-американском сотрудничестве по проблеме цунами. В Новосибирске на базе ВЦ СО АН СССР по этой тематике были проведены несколько научных конференций, а также первая советско-американская встреча экспертов по цунами (рис. 1).

В СССР научное исследование проблемы началось в середине 1950-х гг. после разрушительного Камчатского цунами 1952 г., обрушившегося на город Северо-Курильск и унесшего, по современным оценкам, более 10 тыс. жизней. Тогда перед Росгидрометом и Академией наук была поставлена задача создать на Дальнем Востоке СССР Службу оперативного предупреждения о цунами. К ее решению были подключены ведущие специалисты по сейсмологии, гидродинамике и механике, в том числе, и по математическому моделированию, которое уже тогда, при очень ограниченных возможностях для выполнения численных экспериментов, представляло собой одно из наиболее мощных и гибких средств изучения сложных природных явлений, таких как волны цунами.

Применение математического моделирования к изучению цунами за рубежом началось сразу же с появлением во второй половине 1950-х гг. и доступностью для академических исследований первых ЭВМ, типа IBM 704, способных выполнять подобные расчеты. Среди известных авторов работ самой ранней можно считать работу Т. Уено [Ueno, 1965], в которой была предпринята попытка воспроизвести эволюцию высот разрушительного Чилийского цунами 1960 г. при распространении по всему Тихому океану. Начальные смещения (амплитудой порядка 2 м) были заданы на контуре,



Рис. 1. Директор ВЦ СО АН СССР академик Г.И. Марчук на открытии первой советско-американской встречи экспертов по цунами, проводившейся в ВЦ СО АН СССР в сентябре 1976 г. Справа от него – член-корр. АН СССР С.Л. Соловьев, директор СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, слева – д-р К. Иоганнссон, руководитель американской делегации, заместитель директора Национальной службы погоды США

очерчивающем сейсмический очаг. Их дальнейшая эволюция рассчитывалась в рамках линейной модели мелкой воды на сетке с шагом в 5° . Несмотря на примитивность постановки и грубость расчетной сетки, (размерностью всего 25×30), результат довольно уверенно воспроизвел кинематические особенности распространения цунами по Тихому океану и закон спада-ния высот по мере удаления от источника.

В изучении реальных природных явлений методами математического моделирования можно выделить четыре логических уровня [Гусев, 1981]:

(1) **уровень системы наблюдений**, используемой для получения количественных характеристик явления (что мы знаем о реальном природном объекте, который собираемся изучать, насколько полны, достоверны и точны наши знания, являются ли они результатом прямых измерений или решения обратных задач);

(2) **уровень физической модели** (какие свойства объекта являются наиболее важными для данной проблемы). На этом уровне формирует-

ся концептуальная схема природного явления, т.е. фиксируется *предмет* исследований;

(3) **уровень математической модели** (выбор системы уравнений, постановка начальных и граничных условий, исследование существования и единственности);

(4) **уровень численного алгоритма** (выбор метода решения, создание и тестирование реализующего его программного кода, исследование его эффективности и надежности, анализ устойчивости по отношению к начальным и граничным данным и внутренним параметрам задачи).

В идеале процесс исследования должен включать в себя все четыре уровня и состоять в последовательном перемещении (возможно, неоднократном) сверху вниз до получения численного результата с последующим возвращением на первый уровень для его осмысления (интерпретации). Однако в реальности наличие этих уровней далеко не всегда осознается и логически явно выделяется. Во многих случаях исследование начинается сразу с третьего уровня, то есть с выбора уравнения или системы

уравнений и далее основные усилия прилагаются на четвертом уровне, т.е. для нахождения численного решения поставленной математической задачи.

При этом полученные в итоге выводы соотносятся сразу с первым уровнем, фактически без анализа адекватности принятой физической и математической моделей реальному природному явлению или процессу. Очень часто возникающие на четвертом уровне проблемы (неустойчивость решения, его неединственность, невозможность реалистичной оценки точности и др.) не могут быть разрешены на этом уровне, поскольку относятся к верхним уровням, являясь “метапроблемами” (в терминах работы [Гусев, 1989]). Четкое выявление ограничений на первом уровне часто ставит определенный предел в усложнении физической и математической моделей явления, поскольку существующие системы наблюдений не могут обеспечить степень полноты и точности данных, необходимых для достоверного различия результатов, полученных при использовании разных моделей.

Можно заметить, что эти уровни согласуются с предложенными еще в конце 1970-х гг. методиками математического моделирования в форме вычислительного эксперимента [Самарский, 1979] и математической технологии [Яненко и др., 1977].

В исследовании проблемы цунами наличие таких уровней было осознано достаточно давно и в практическом плане реализовывалось в тщательном выборе физических моделей, соответствующих тому или иному этапу эволюции волны цунами (возбуждение, распространение, накат) и в постоянном внимании к созданию и поддержке исторических каталогов и баз данных по наблюдениям и инструментальным измерениям цунами на региональном и глобальном уровнях [Гусяков и Осипова, 1992; Gusiakov et al., 1997; Гусяков и Калашникова, 2016].

Упругая модель возбуждения цунами. Обычный подход к изучению процесса возбуждения цунами — это решение линеаризованных уравнений гидродинамики для потенциального движения идеальной тяжелой жидкости, лежащей на жестком дне. Линеаризация может быть выполнена в предположении малости амплитуд волн, как в рамках линейной потенциальной теории, так и в рамках линейной теории

длинных волн. В таких постановках уже в середине 1960-х гг. был решен ряд задач о возбуждении гравитационных волн в слое несжимаемой жидкости постоянной глубины при заданных подвижках дна. Однако связать при этом волну цунами непосредственно с порождающим ее сейсмическим очагом не представляется возможным, поскольку дно принимается жестким и его упругие свойства не учитываются.

Математическая постановка задачи о возбуждении цунами в рамках упругой модели может быть сформулирована следующим образом. Слой однородной сжимаемой жидкости (воды) залегает на однородном упругом полупространстве (породы земной коры) и находится в однородном поле силы тяжести. Пусть H — толщина слоя жидкости (глубина океана), а на глубине h под дном находится модельный источник, имеющий некоторые свойства реального очага землетрясения (рис. 2). Тогда уравнение Ляме с учетом влияния поля силы тяжести записывается в виде:

$$V_0^2 \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{U} - g \operatorname{div} \bar{U} k = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2}, \quad 0 < z < H, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (V_p^2 - V_s^2) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{U} + V_s^2 \Delta \bar{U} - \\ - g \operatorname{div} \bar{U} k = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2}, \quad z > H. \end{aligned} \quad (2)$$

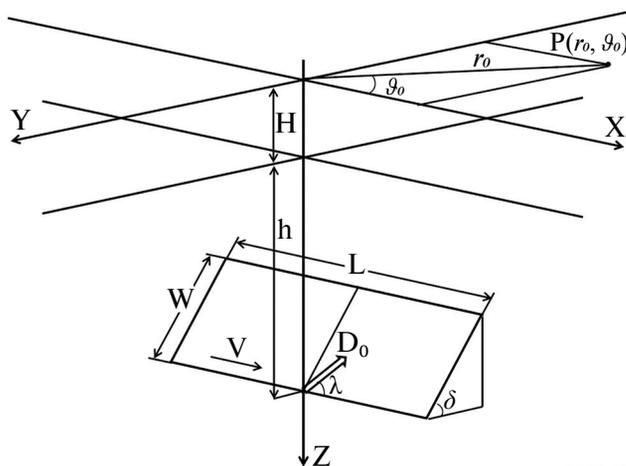


Рис. 2. Модель среды (слой сжимаемой жидкости, лежащий на упругом полупространстве) и сейсмического источника (пространственная дислокационная модель очага землетрясения), в рамках которой решается задача о возбуждении цунами в упругой постановке. Начало полярной системы координат z, r, ϑ находится на невозмущенной поверхности жидкого слоя, в эпицентральной точке, соответствующей проекции середины нижнего края разрыва

Граничные условия на поверхности и дне океана имеют вид:

$$\left[V_0^2 \operatorname{div} \bar{U} - gU_z \right]_{z=0} = 0, \quad (3)$$

$$\left[U_z \right]_{z=H+0} = \left[U_z \right]_{z=H-0}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) \Big|_{z=H+0} = 0; \quad \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} + \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right) \Big|_{z=H+0} = 0, \quad (5)$$

$$\left[\left(V_p^2 - 2V_s^2 \right) \operatorname{div} \bar{U} + 2V_s^2 \frac{\partial U_z}{\partial z} - gU_z \right]_{z=H+0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} \left[V_0^2 \operatorname{div} \bar{U} - gU_z \right]_{z=H-0}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{U}(r, \theta, z, t)$ — вектор смещения частиц среды относительно некоторого начального состояния статического равновесия в гравитационном поле, g — ускорение силы тяжести, \bar{k} — единичный вектор по оси Oz , направленный вертикально вверх, в сторону противоположную вектору ускорения силы тяжести, ρ_0 — плотность воды, V_0 — скорость звука в воде, ρ_p , V_p , V_s — плотность, скорость продольных и поперечных волн в упругом полупространстве, соответственно.

Начальные условия принимаются нулевыми. В момент времени $t=0$ включается источник, в качестве которого на первом этапе берутся вертикальная и горизонтальная (ориентиро-

ванная вдоль оси Ox) сосредоточенные силы величиной Q и S , соответственно, приложенные внутри упругого полупространства в точке с координатами $(0, 0, H+h)$, зависимость которых от времени вначале принимается в виде единичной ступенчатой функции Хэвисайда. Впервые подобный подход к задаче возбуждения цунами был предложен в работе [Подъяпольский, 1968], однако в ней решение не было доведено до численного результата и анализировалось только асимптотически, т.е., по сути, в рамках приближения длинных волн.

В работе [Гусяков, 1974] решение системы уравнений (1)–(6) находилось методом разделения переменных. В начале рассматривался случай точечного источника в виде двойной пары сил произвольной ориентации. Затем решение обобщалось на случай пространственного источника дислокационного типа с движущимся с произвольной конечной скоростью разрывом, описываемого набором параметров: длиной L , шириной W , глубиной нижнего края h_0 , углом падения δ , направлением подвижки λ и величиной смещения противоположных берегов разрыва D_0 (рис. 2). Окончательные формулы имеют весьма сложный вид, и мы их здесь не приводим.

Полученное решение описывает полное динамическое поле смещений, образуемое волнами различных типов, которые соответствуют различным особенностям подынтегральных функций. Известно, что поверхностные (сейсмические и гравитационные) волны связаны с полюсами подынтегральных выражений, т.е. с корнями дисперсионного уравнения (7).

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_{10} \operatorname{ch}(kH\alpha_{10}) + \frac{g}{2kV_0^2} \left(1 + \frac{2V_0^2}{r^2V_s^2} \right) \operatorname{sh}(kH\alpha_{10}) \right] \times \\ & \times \left[\left((2-\eta^2)^2 - 4\alpha_1\beta_1 \right) \frac{1}{\eta^2} + \frac{g}{k} \frac{1}{V_0^2 - V_s^2} \left(\frac{V_p^2}{V_s^2} \alpha_1 - \frac{2}{\eta^2} \left(\frac{V_s^2}{V_p^2} \beta_1 - \alpha_1 \right) \right) \right] + \\ & + \frac{g}{2k^2V_s^2} \frac{1}{V_p^2 - V_s^2} \left[1 + \frac{2}{\eta^2} \left(1 - \frac{V_s^2}{V_p^2} \right) \right] + \frac{\eta^2\rho_0}{\rho_1} \left[1 - \frac{g^2}{k^2V_s^4\eta^4} \right] \times \\ & \times \left[\alpha_1 + \frac{g}{2k} \frac{1}{V_p^2 - V_s^2} \left(1 + \frac{V_s^2}{V_p^2} + \frac{2}{\eta^2} \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

где k — волновое число, η — некоторая комплексная переменная, по которой производится интегрирование в преобразовании Лапласа-Меллина.

Дисперсионное уравнение обсуждаемой модели имеет, кроме корней, соответствующих главной и высшим модам волны Релея, еще один дополнительный корень. Этот корень не имеет аналога в обычной теории упругости, его существование обусловлено введением гравитационного члена в уравнениях движения (1)–(2). Соответствующие ему дисперсионные кривые для трех глубин океана представлены на рис. 3. Они показывают дисперсию фазовой и групповой скорости гравитационной волны, возникающей в слое жидкости. От классических дисперсионных кривых гравитационных волн на воде, полученных в рамках модели несжимаемой жидкости и жесткого дна, они отличаются наличием области отрицательной дисперсии на периодах более 10 тыс. сек. В дальнейшем эффект влияния упругости дна на кинематические и динамические характеристики распространения цунами изучался как теоретически, так и на материалах реальных наблюдений (см., например, [Watada et al., 2014]). Интегрируя вычет в этом полюсе вдоль дисперсионной кривой фазовой скорости, можно получить смещение в волне цунами как функцию времени и расстояния, т.е. расчетную мареограмму. Меняя затем параметры источника и среды, можно изучать их влияние на условия возбуждения цунами. В этом, собственно, и состоит главное преиму-

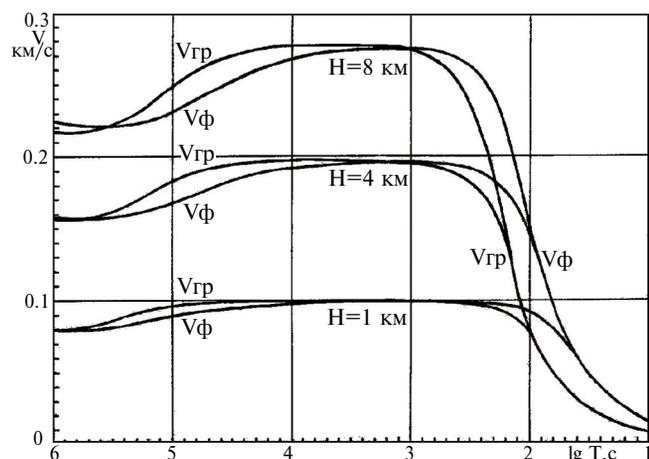


Рис. 3. Дисперсионные кривые фазовой (V_ϕ) и групповой (V_{gr}) скорости волн цунами при различных глубинах океана

щество рассмотрения процесса генерации цунами в рамках упругой модели.

Детальный анализ условий возбуждения цунами в рамках такой модели был выполнен в работах [Гусяков, 1974; Алексеев и Гусяков, 1984]. Было показано, что наибольшее влияние на амплитуды цунами на глубокой воде (в зоне очага) оказывают механизм и глубина источника. В качестве иллюстрации этих результатов на рис. 4 приведены расчетные мареограммы цунами для трех основных типов источника — взброс по вертикальной плоскости разрыва, надвиг по пологой плоскости разрыва и чисто сдвиговая подвижка (по вертикальному разрыву). Видно, что наиболее интенсивное цунами возбуждается взбросовой подвижкой по вертикальному разрыву. На рис. 5 показана зависимость амплитуд цунами от глубины источни-

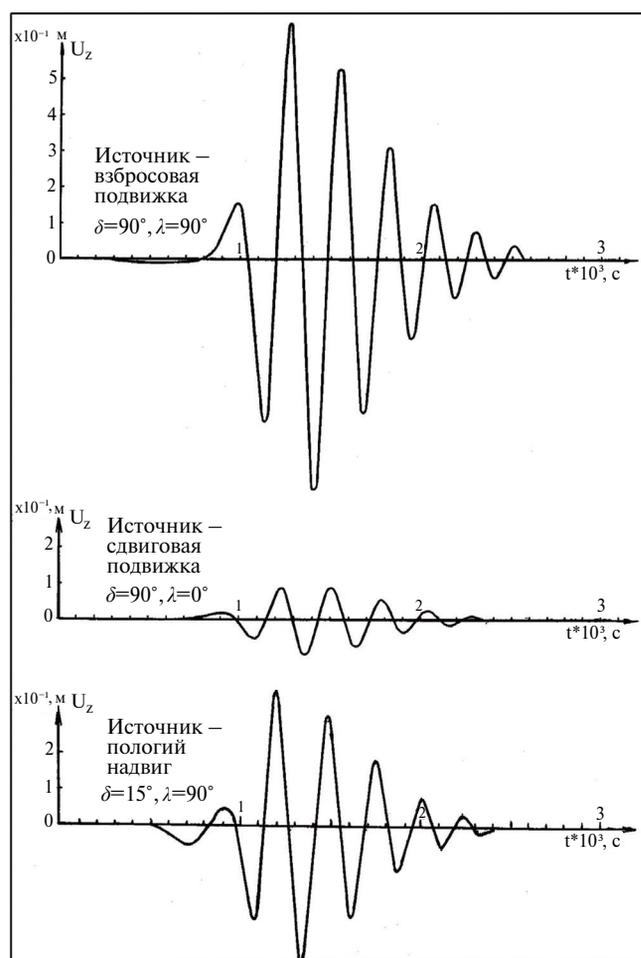


Рис. 4. Расчетные мареограммы волн цунами для трех различных типов модели очага подводного землетрясения

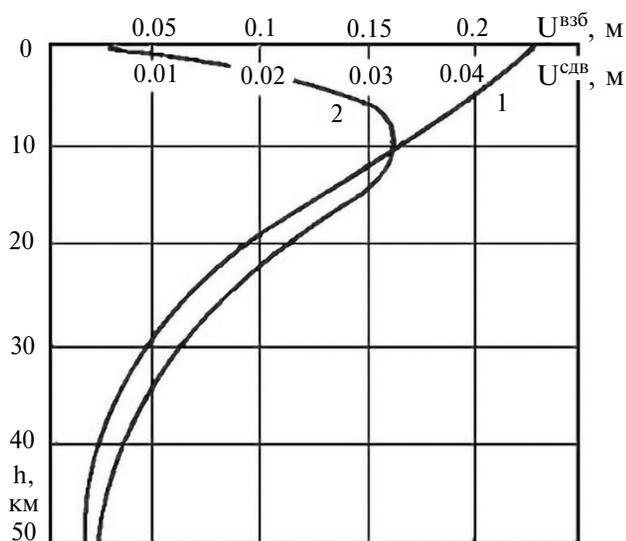


Рис. 5. Зависимость максимальных амплитуд волн цунами от глубины источника: 1 – взброс (\$\lambda=90^\circ\$) по вертикальной плоскости разлома (\$\delta=90^\circ\$); 2 – сдвиг (\$\lambda=0^\circ\$) по той же плоскости. Верхняя шкала амплитуд соответствует источнику 1, нижняя – источнику 2

ка для взбросовой и сдвиговой подвижек. При \$h > 10\$ км амплитуды монотонно уменьшаются и на глубине около 60 км составляют около 1/10 от максимума. Во всем диапазоне глубин амплитуда цунами от сдвиговой подвижки составляет приблизительно 1/5 амплитуды от взбросовой подвижки.

Эти результаты на тот момент (середина семидесятых годов прошлого столетия) носили пионерский характер и ясно показывали, в каком направлении должна идти работа по совершенствованию методов оперативного прогноза цунами. В дальнейшем упругая модель получила свое развитие в работах Б.В. Левина и М.А. Носова, результаты которых суммированы в монографии [Levin and Nosov, 2016].

Моделирование распространения цунами. Упругая модель, являясь важным и продуктивным средством изучения процесса генерации цунами в очаговой области не позволяет, тем не менее, изучать процесс дальнейшего распространения цунами в открытом океане, так как не учитывает изменения глубины водного слоя. Рельеф дна акватории, по которой распространяется волна, между тем, является важным фактором, определяющим характеристики трансформации волны цунами и наката на берег. Поэтому уже на самых ранних этапах

(в 1960-х гг.) применения математического моделирования для изучения цунами возникла идея разделения задачи на две части — задачу генерации в области источника, которую можно было решать в рамках модели с ровным дном, и задачу распространения в океане с реальным рельефом дна. При таком подходе процесс генерации рассматривался в рамках так называемой “поршневой модели”, когда смещения дна океана, задаваемые произвольно или получаемые путем решения задачи о деформации поверхности упругого полупространства под действием внутреннего источника дислокационного типа (такая задача была решена в работе [Гусяков, 1978]), вводятся в уравнение неразрывности гидродинамической системы, описывающей движение поверхностных гравитационных волн в жидкости. Чаще всего в качестве такой системы используется система уравнений мелкой воды, записанная в сферических координатах и учитывающая силы Кориолиса и донное трение. Эта система затем решается численно для модельного рельефа, аппроксимирующего реальные участки акватории океана. В недивергентной форме уравнения теории мелкой воды первого приближения имеют вид [Murty et al., 2006]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial u D}{\partial \psi} + \frac{\partial (v D \cos \varphi)}{\partial \varphi} \right] = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} u \frac{\partial u}{\partial \psi} + \frac{1}{R} v \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \left(\frac{\tan \varphi}{R} u + f \right) v = \\ = - \frac{1}{R \cos \varphi} g \frac{\partial \zeta}{\partial \psi} + \frac{\tau_{sv}}{\rho_0 D} - \tau_* u, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} u \frac{\partial v}{\partial \psi} + \frac{1}{R} v \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \left(\frac{\tan \varphi}{R} u + f \right) u = \\ = - \frac{g}{R} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + \frac{\tau_{s\varphi}}{\rho_0 D} - \tau_* v, \end{aligned}$$

где \$\psi, \varphi\$ (градусы) — долгота, отсчитываемая от Гринвичского меридиана, и широта, отсчитываемая к северу от экватора, \$\zeta\$ — смещение свободной поверхности от невозмущенного состояния, \$u, v\$ — осредненные по глубине горизонтальные скорости, \$R\$ — радиус Земли, \$D = \zeta + d\$ — полная глубина, \$d\$ — толщина слоя жидкости от дна до невозмущенной свободной поверхности, \$f = 2\Omega \sin \varphi\$ — параметр Кориолиса, \$\Omega\$ — угловая скорость вращения Земли, па-

параметры τ_{sv} и τ_{sp} задают напряжения на свободной поверхности (“ветровое трение”), донное трение определяется параметром

$$\tau_* = C_f \frac{(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{D},$$

где C_f есть коэффициент донного трения.

В задачах возбуждения цунами параметр t_0 (время движения дна) обычно мал по сравнению с периодом волны, так что смещения свободной поверхности в очаговой области практически повторяют вертикальные движения дна. В такой постановке уже в середине 1970-х гг. в ВЦ СОАН СССР были выполнены первые расчеты гипотетических [Алексеев и др., 1978] и реальных исторических [Гусяков и Чубаров, 1982] цунами на конкретных участках акватории Курило-Камчатского региона. На рис. 6 воспроизведен результат одного из первых таких расчетов, выполненных на ЭВМ БЭСМ-6

для моделирования реального события цунами в районе Южных Курил (цунами Немуро-Оки 17 июня 1973 г.). Расчет был выполнен на сетке размерностью 108 на 45 с пространственным шагом $\Delta x = \Delta y = 4.76$ км, в узлах которой аппроксимировался подводный рельеф изучаемого участка океана, оцифрованный вручную с батиметрической карты. Стоит отметить, что быстродействие самой мощной из имевшихся в то время в ВЦ СОАН СССР ЭВМ (БЭСМ-6) не позволяло выполнять опережающие расчеты цунами, поскольку вычисления даже на таких малых сетках требовали примерно часа процессорного времени на час физического времени распространения волны.

С появлением первых персональных ЭВМ появилась возможность выполнения подобных расчетов в интерактивном режиме. Уже для ПК на основе процессора i80286 была создана система ITMS (Interactive Tsunami Modeling System), позволяющая выполнять расчет распространения цунами за время, сопоставимое со временем

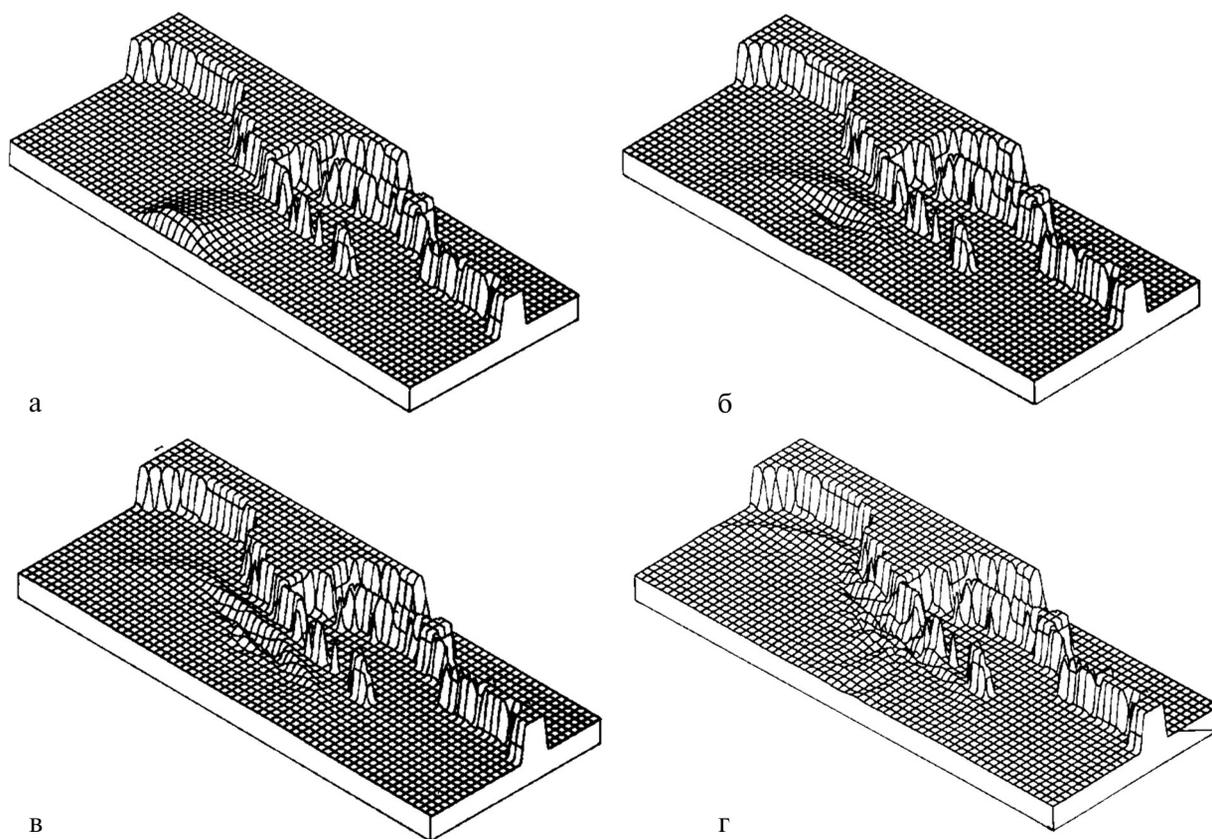


Рис. 6. Численное моделирование цунами Немуро-Оки 17 июня 1973 г. в районе Южных Курил [Гусяков и Чубаров, 1982]. Форма начального возвышения поверхности океана через 12 сек после землетрясения (а) и волновая картина через 170 (б), 294 (в) и 810 (г) сек

физического распространения волны [Гусяков и др., 1992]. Создание новой расчетной схемы, основанной на методе расщепления по направлениям, рассмотренном в фундаментальной монографии Г.И. Марчука [Марчук, 1988], дало возможность молодому сотруднику ВЦ СО АН СССР, выпускнику мехмата НГУ В.В. Титову создать эффективную программу, позволяющую выполнять опережающие расчеты распространения региональных и трансокеанских цунами. Пример такого расчета приведен на рис. 7. В настоящее время В.В. Титов является одним из ведущих специалистов по моделированию цунами в США, а созданный им еще в начале 1990-х гг. в ВЦ СО АН СССР программный комплекс MOST (Method of Splitting for Tsunami) [Titov, 2009; Titov and Synolakis, 2011] широко используется во многих странах мира.

В процессе подобных расчетов возникла идея проведения численных экспериментов по

изучению особенностей генерации и распространения цунами не на реальных участках акватории океана, имеющих подчас весьма сложную морфологию и конфигурацию береговой линии, а на модельном рельефе, характерном для зон островных дуг и активных континентальных окраин, где происходит большинство цунамигенных землетрясений. Такой модельный бассейн, сохраняя основные особенности морфологии островодужного склона (шельф, материковый склон, глубоководная терраса, континентальный и океанический борта глубоководной впадины, океаническое плато) позволяет разделить эффекты влияния источника (очага землетрясения) и эффекты распространения, определяющиеся в основном, подводным рельефом дна. Такая модель оказалась весьма полезной, продуктивной и позволила изучить влияние механизмов очагов землетрясения на характер вдольберегового распределения высот волн цунами и на их расчетную интенсивность,

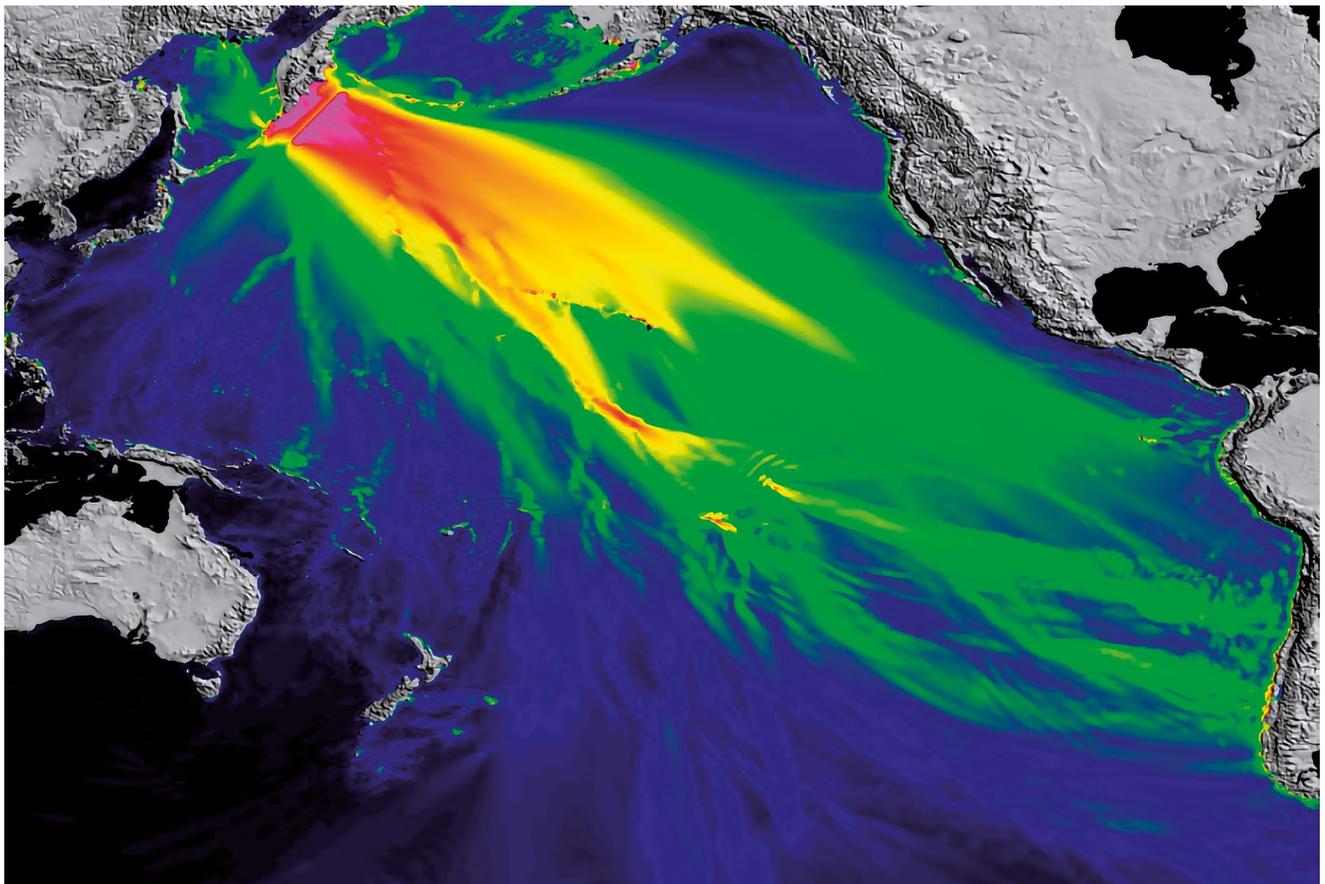


Рис. 7. Численная модель Камчатского цунами 4 ноября 1952 г. Результат расчетов представлен в виде так называемой “диаграммы свечения”, показывающей максимальные за все время расчета амплитуды волн в каждой точке расчетной области

определяемую в баллах шкалы Соловьева–Имамуры [Гусяков и Чубаров, 1987]. Было показано, что распределение высот цунами вдоль побережья типичной островной дуги имеет колоколообразную форму с шириной зоны главного максимума порядка размера очага, т.е. 100–150 км (рис. 8), при удалении от которой вдоль берега амплитуды цунами быстро падают. Формирование такой отчетливо выраженной зоны максимума является результатом совместного действия направленности излучения сейсмического источника, эллиптичности очага цунами и фокусирующего действия наклонного рельефа дна. Из этих трех факторов наибольшее значение имеет последний.

В рамках этого подхода впервые была получена теоретическая зависимость интенсивности цунами по шкале Соловьева–Имамуры I от момент-магнитуды подводного землетрясения M_W в виде соотношения

$$I = 3.55 \times M_W - 27.1.$$

Полученная зависимость сопоставлена с реальными данными по наблюдениям цунами в зонах островных дуг типа Японской, Курило-Камчатской, Алеутской, и обнаружено их хорошее соответствие. Оказалось, что практически все события попадают в доверительный интервал ± 1 от расчетного значения интенсивности, что соответствует реальной точности определения этого параметра.

Примерно в это же время была осознана необходимость создания каталогов и баз данных по наблюдениям цунами, которые могли бы использоваться в качестве информационной поддержки теоретических исследований многих аспектов проблемы цунами. Такая возможность появилась в середине 1980-х гг. с появлением в ВЦ СО АН СССР первых средств вычислительной техники (машин типа СМ-4), позволяющих интерактивное взаимодействие пользователя с вычислительным комплексом и средствами визуализации (экраном дисплея и планшетными плоттерами). В лаборатории математического моделирования волн цунами, созданной в

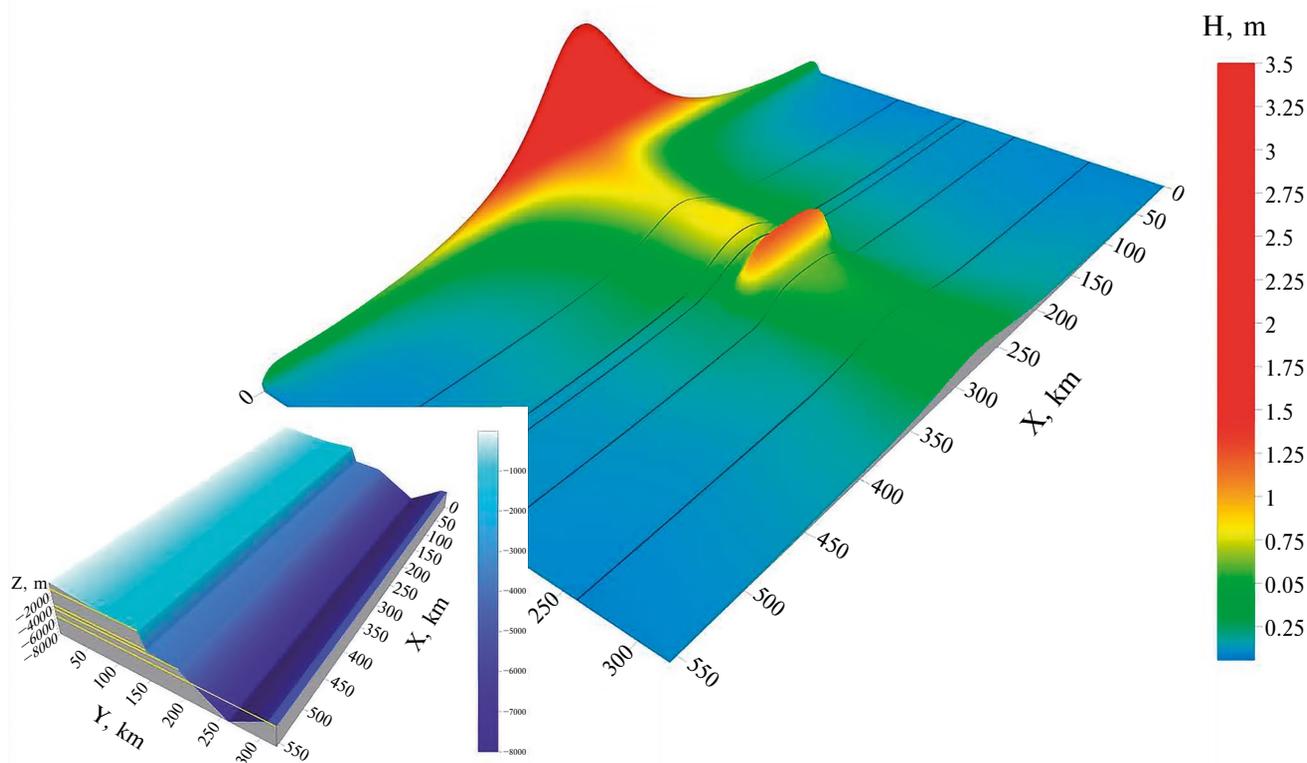


Рис. 8. Распределения максимальных амплитуд цунами по расчетной области (диаграмма свечения) и вдоль берега, полученные в расчете возбуждения и распространения цунами на модельном рельефе дна, аппроксимирующем реальную морфологию зон островных дуг. На врезке слева внизу — модельный рельеф, на котором производился расчет

институте в 1988 г., были начаты работы по составлению каталога наблюдений исторических цунами вначале в Курило-Камчатском регионе, а позднее во всем Тихом океане [Гусяков и Осипова, 1992a]. С появлением первых персональных ЭВМ, имевших в составе матобеспечения средства поддержки баз данных (СУБД типа MS Access) эти каталоги были конвертированы в базы данных [Гусяков и Осипова, 1992b]. Особое внимание при этом было уделено созданию средств выборки и визуализации наблюдаемых данных в виде специализированных графических оболочек, обеспечивающих удобное взаимодействие пользователя с данными, картами и моделями.

В настоящее время в лаборатории цунами ИВМиМГ СО РАН (ставшего правопреемником ВЦ СО РАН в 1997 г.) поддерживается Глобальная база данных по наблюдениям цунами в Мировом океане GTDB (Global Tsunami DataBase), содержащая подробные сведения о параметрах очагов более чем 2750 событий и проявлениях цунами на побережье [Гусяков и Калашникова,

2016]. База покрывает весь период исторических наблюдений (с 2000 г. до н.э. по настоящее время) и содержит около 2800 цунамигенных событий и свыше 25000 наблюдений высот цунами (рис. 7). Web-версия базы данных поддерживается на сервере лаборатории цунами ИВМиМГ СО РАН (<http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>). База снабжена специализированной графической оболочкой PDM/TSU (<http://tsun.sccc.ru/PDM.htm>), имеющей встроенные процедуры выборки, анализа и визуализации данных на конкретной картографической основе (цифровой карте местности) [Лысковская и Гусяков, 2016]. Пример визуализации Глобального каталога по наблюдениям цунами приведен на рис. 9.

Оперативный прогноз цунами. Двумя главными научно-практическими задачами, связанными с проблемой цунами являются **оперативный прогноз** и предварительное **цунамирайонирование побережья**. Оперативный прогноз в РФ осуществляется по факту возникновения сильного подводного землетрясения Службой предупреждения о цунами (СПЦ), действующей на

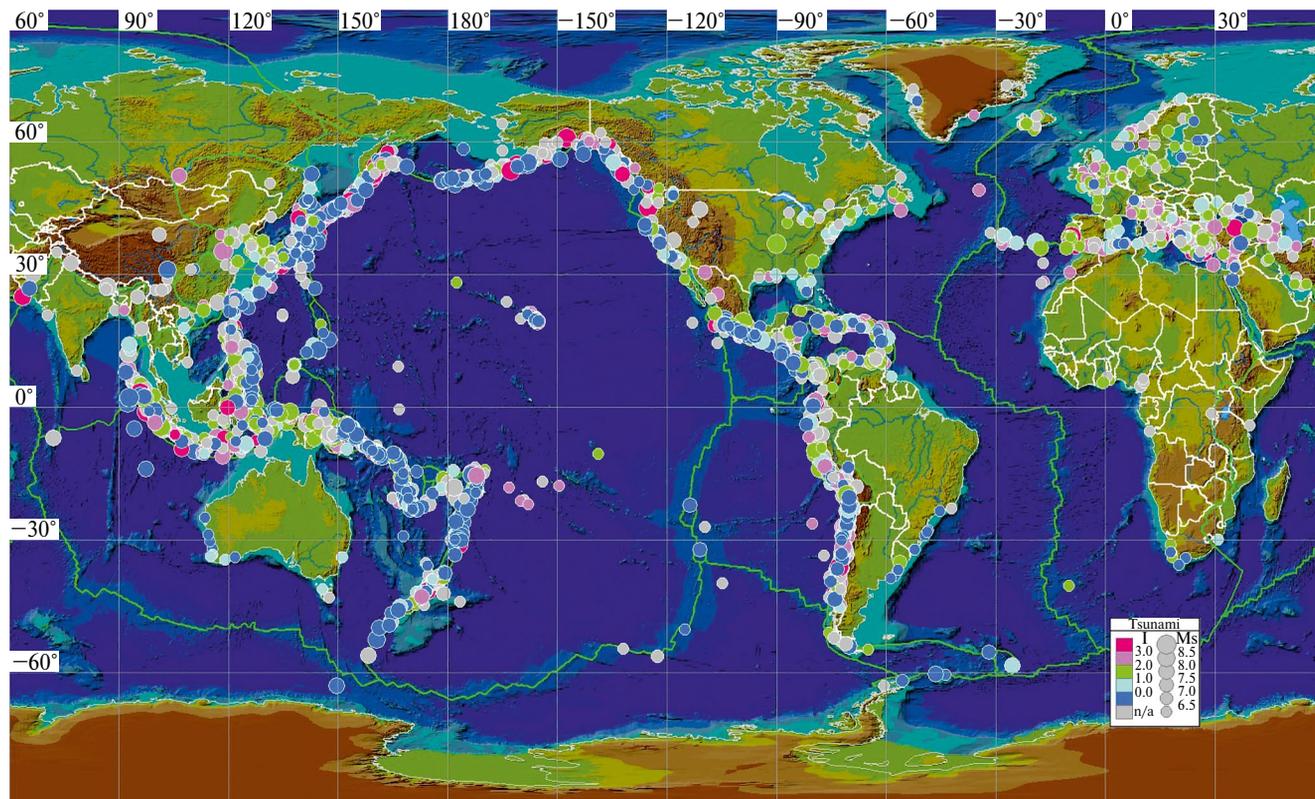


Рис. 9. Карта очагов цунамигенных событий, вызвавших зарегистрированные цунами на побережье Мирового океана за период с 2000 г. до н.э. по настоящее время. Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, цветом показана интенсивность цунами (по шкале Соловьева–Имамуры). Сплошными зелеными линиями показаны границы тектонических плит

Дальневосточном побережье РФ с 1958 г. Прогноз осуществляется тремя оперативными центрами – во Владивостоке, Южно-Сахалинске и Петропавловске-Камчатском, по трем основным зонам – Курило-Камчатское побережье, Японское море, Охотское море. Используется так называемый магнитудно-географический принцип прогноза, согласно которому землетрясение считается цунамигенным при превышении магнитудой значения **7.0** и положении его эпицентра под морским дном или в пределах береговой линии. Выполненный в 2010 г. в работе [Гусяков, 2010] анализ эффективности работы СПЦ за 50 лет (с 1958 по 2009 г.) показал, что в целом служба предупреждения о цунами на Дальневосточном побережье функционирует вполне надежно, без крупных провалов (т.е. пропусков опасных цунами) и накопила определенный опыт в прогнозировании региональных и удаленных цунами. Основной проблемой службы является высокая доля ложных тревог при обработке региональных событий, достигающая 75% от всех поданных. Это явля-

ется следствием стохастической природы генерации цунами и разнообразия механизмов их возбуждения. Статистика наблюдений цунами в Дальневосточном регионе за 1737–2024 гг. показывает, что все подводные землетрясения становятся реально цунамиопасными только начиная с магнитуды 8 (рис. 10). Однако поднимать на этот уровень пороговое значение магнитуды нельзя из-за риска пропуска сильного цунами (с высотами до 10–15 м) при относительно слабых землетрясениях, с магнитудой порядка 7. Такие особые землетрясения, называемые цунами-землетрясения (tsunami-earthquakes по терминологии Х. Канамори [Kanamori, 1972] в течение XX-го в. в Курило-Камчатском регионе происходили трижды – в 1923, 1963 и 1975 гг.

Снижение доли ложных тревог может быть достигнуто как за счет использования дополнительной гидрофизической информации от подводных кабельных и буйковых регистраторов цунами, так и путем пересмотра географических границ для выпуска тревоги цунами для землетрясений в различных магнитудных диапазонах. Такой пересмотр может быть сделан на основе анализа фактических наблюдений цунами и результатов сценарных расчетов распространения волн внутри каждой из трех основных цунамигенных зон (Курило-Камчатская зона, Охотское море, Японское море). Результаты расчетов убедительно показывают (и это подтверждается анализом реальных наблюдений), что вдольбереговое распределение максимальных высот имеет ограниченную протяженность и для большинства цунамигенных землетрясений, за исключением предельно сильных (с магнитудой более 8.5), имеет размеры, сопоставимые с размерами самого очага, т.е. 150–200 км (см. рис. 8). Действующий же регламент работы СПЦ предусматривает выпуск тревоги цунами при любом цунамигенном землетрясении для всего побережья зоны, протяженность которого может достигать 1500 км.

Еще один резерв для совершенствования работы службы заключается в переходе от бинарного прогноза (угроза цунами/нет угрозы цунами) к оценке возможных высот в конкретных пунктах побережья. На первом этапе это может быть сделано путем разбиения тревожного сообщения на три уровня – сильное цунами/цунами/возможное (слабое) цунами, при соответствующей модификации действий служб МЧС

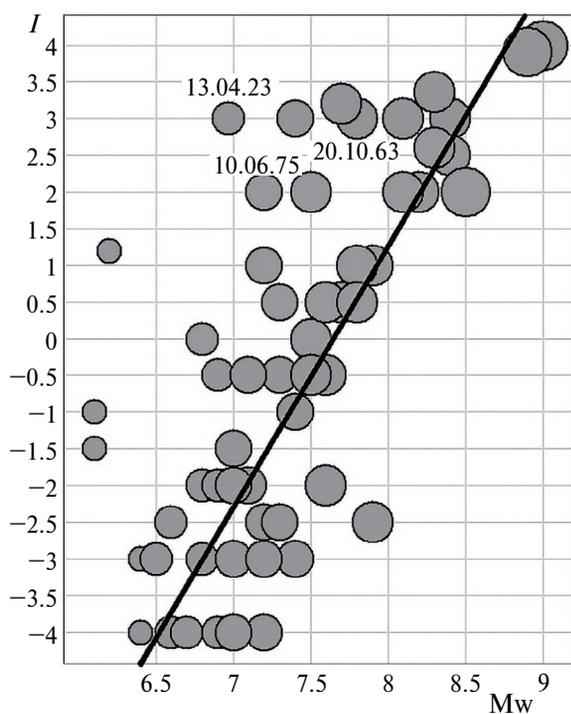


Рис. 10. Зависимость интенсивности цунами I от магнитуды M_w для цунамигенных событий, происшедших в Дальневосточном регионе РФ с 1737 по 2024 г. Сплошной линией на рисунке показана теоретическая зависимость $I = -27.1 + 3.6M_w$, полученная в работе [Гусяков и Чубаров, 1987]. Цунами-землетрясения 1923, 1963 и 1975 гг. помечены датой

и местных властей при угрозе разного уровня. Такое разбиение могло бы осуществляться на основе предвычисления ожидаемых высот с использованием хорошо развитых в настоящее время средств моделирования цунами, а также алгоритмов коррекции прогноза по мере поступления сведений о фактической регистрации цунами региональной мареографной сетью с учетом возросших возможностей оперативного получения информации с приборов регистрации уровня.

Цунамирайонирование побережья. Предварительное цунамирайонирование побережья – это получение и картирование долговременных оценок максимальных ожидаемых высот цунами на побережье и их обеспеченности (повторяемости). Долговременные оценки опасности цунами необходимы для: (1) обеспечения безопасной и рациональной жизнедеятельности на угрожаемой территории; (2) перспективного планирования ее развития; (3) выполнения оперативных мероприятий по защите населения при угрозе цунами (выбор безопасных убежищ и маршрутов эвакуации). Хозяйственное освоение прибрежных территорий в цунамиопасных районах требует также наличия оценок долгосрочного цунами-риска, которые могут быть получены на основе детальных карт цунамиопасности конкретных участков побережья и карт заливания для отдельных населенных пунктов, гаваней и бухт.

В настоящее время существует современная, детально разработанная методика РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) для вероятностной оценки цунамиопасности [Power and Downes, 2009; Knighton and Bastidas, 2016]. Эта методика широко используется в США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии, в западной Европе как для обзорного цунамирайонирования протяженных участков побережья, так и для расчета детальных карт заливания отдельных населенных пунктов, гаваней и портов. В основе методики РТНА лежит построение вероятностной сейсмотектонической модели основных цунамигенных зон, угрожающих защищаемому побережью и применение численных моделей возбуждения и распространения цунами для расчета ожидаемых высот цунами в конкретных пунктах побережья. Поскольку изменчивость высот волн цунами вдоль берега является достаточно сильной, особенно для

сложных изрезанных побережий, карты цунамиопасности, пригодные для практического использования должны строиться в достаточно крупных масштабах (1:10000–1:100000). Как следствие, покрываемые ими территории будут весьма ограниченными (1–10 км). В этой ситуации наличие обзорной карты цунамирайонирования для крупных участков побережья, построенной в масштабе порядка 1:2000000 является совершенно необходимым. Помимо того, что такая карта позволяет количественно сравнивать различные побережья в смысле их цунамиопасности, она также служит основой для построения карт детального цунамирайонирования, поскольку при ее построении должен быть выполнен основной объем работ по созданию сейсмотектонической модели цунамигенного региона. Такого рода карты цунамиопасности Дальневосточного и Черноморского побережий России были созданы в рамках гранта РНФ 14-17-219 [Гусьяков и др., 2019; Шокин и др., 2019]. Пример такой карты для периода повторяемости в 975 лет приведен на рис. 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое моделирование представляет собой одно из наиболее мощных и гибких средств изучения сложных природных явлений, таких как волны цунами, но оно должно применяться с полным осознанием всех ограничений, вытекающих из несовершенства используемых моделей и ограниченности имеющихся реальных данных наблюдений. Две главные научно-практические задачи в проблеме цунами – это оперативный прогноз и предварительное цунамирайонирование побережья. Основная проблема оперативного прогноза цунами на Дальневосточном побережье РФ заключается в снижении числа ложных тревог, что может быть достигнуто путем ограничения размеров зон для выпуска тревоги при землетрясениях различной магнитуды и переходе от бинарной к трехуровневой схеме подачи тревоги. Основная проблема оценки цунамиопасности океанического побережья, имеющего перед собой зону субдукции, состоит в получении реалистичных оценок места и времени возникновения в ближайших сегментах этой зоны мега-землетрясения с магнитудой 9.0 и выше. Получение таких оценок представляет собой сложную научно-практическую проблему и фактически

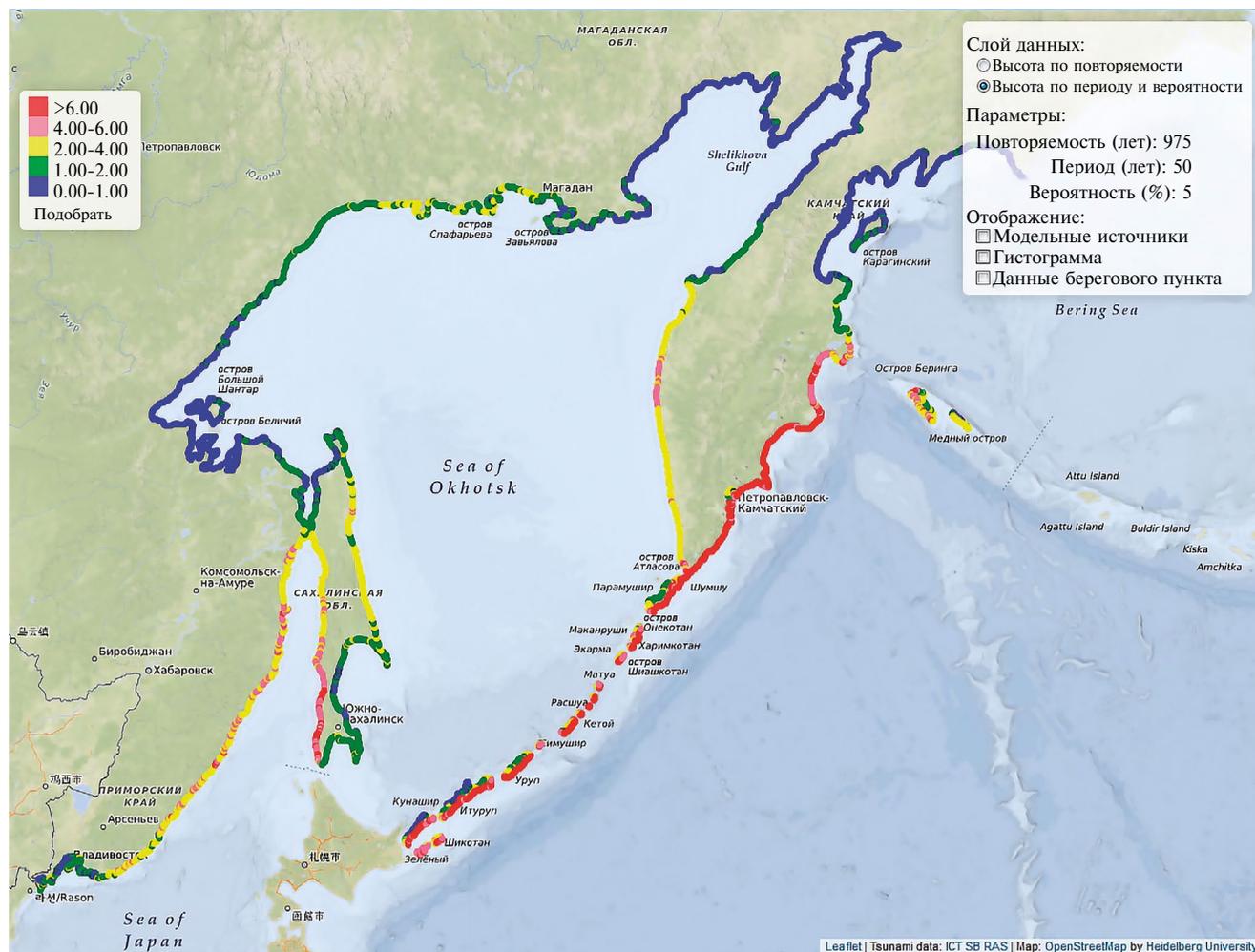


Рис. 11. Пример вероятностной карты цунамиопасности для Дальневосточного побережья РФ для периода повторяемости 975 лет. Цвет маркирует максимальную ожидаемую высоту цунами на побережье (в метрах)

сводится к решению задачи долгосрочного прогноза сильнейших землетрясений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Т.В. Калашниковой за помощь в подготовке графических материалов и оформлении статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Представленные в работе результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИВМиМГ СО РАН № FWNM-2022-0004 и государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев А.С., Гусяков В.К. Об оценке цунамиопасности подводных землетрясений // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий: Труды 27-го Международного геологического конгресса, 4–14 августа 1984 г. / Сб. научн. тр. М.: Наука, 1984. С. 127–133.
- Алексеев А.С., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Численное исследование генерации и распространения волн цунами при реальной топографии дна. Линейная модель / Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 5–20.
- Гусев А.А. Некоторые проблемы логики интерпретации геофизических данных // Вулканология и сейсмология. 1981. № 6. С. 106–108.
- Гусяков В.К. Возбуждение волн цунами и океанических волн Релея при подводном землетрясении // Математические проблемы геофизики. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1972. Вып. 3. С. 250–272.

- Гусяков В.К. О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения // Математические проблемы геофизики. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1974. Вып. 5. Ч. 1. С. 118–140.
- Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства / Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1978. С. 23–51.
- Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 5–21.
- Гусяков В.К. Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 9. С. 1601–1615.
- Гусяков В.К., Калашникова Т.В. Глобальная база данных по цунами / Global tsunami database (GTDB). Зарегистрирована в ФГУ ФИПС (Роспатент) 16 сентября 2016 года, свидетельство № 2016621269.
- Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Построение обзорных карт цунамирайонирования Дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 55–72.
- Гусяков В.К., Марчук А.Г., Титов В.В. Интерактивная система моделирования цунами на персональной ЭВМ // Вычислительные технологии. 1992. Вып. 3. С. 189–196.
- Гусяков В.К., Осипова А.В. Автоматизированный каталог землетрясений и цунами Курило-Камчатского региона // Вычислительные технологии. 1992а. Вып. 3. С. 197–204.
- Гусяков В.К., Осипова А.В. База данных по землетрясениям и цунами Курило-Камчатского региона / Препринт ВЦ СО РАН. № 976. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1992б. 24 с.
- Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Численное моделирование Шикотанского (Немуро-Оки) цунами 17 июня 1973 года / Эволюция цунами от очага до выхода на берег. М.: Радио и связь, 1982. С. 16–24.
- Гусяков В.К., Чубаров Л.Б. Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Физика Земли. 1987. № 11. С. 53–64.
- Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
- Лысковская Е.В., Гусяков В.К. Графическая оболочка PDM/TSU (Parametric Data Manager for Tsunami Database) для работы с базой данных по цунами. Зарегистрирована в ФГУ ФИПС (Роспатент) 16 сентября 2016 года, свидетельство № 2016660574.
- Марчук Г.И. Методы расщепления. М.: Наука, 1988. 263 с.
- Носов М.А. Волны цунами сейсмического происхождения: современное состояние проблемы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 5. С. 540–551.
- Носов М.А. Введение в теорию волн цунами. Учебное пособие. М.: Янус-К, 2019. 170 с.
- Подъяпольский Г.С. Возбуждение цунами землетрясением // Методы расчета возникновения и распространения цунами. М.: Наука, 1978. С. 30–87.
- Самарский А.А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент // Вест. АН СССР. 1979. Т. 5. С. 38–49.
- Соловьев С.Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7–50.
- Шокин Ю.И., Чубаров Л.Б. Очерк истории исследования проблемы цунами в Сибирском отделении Российской академии наук // Вычислительные технологии. 1999. Т. 4. № 5. С. 70–105.
- Шокин Ю.И., Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б. Методика построения карт цунамиопасности и ее реализация для Дальневосточного побережья Российской Федерации // Докл. РАН. 2019. Т. 489. № 4. С. 419–425.
- Яненко Н.Н., Карначук В.И., Коновалов А.Н. Проблемы математической технологии // Числ. методы механики сплошной среды. ВЦ СО АН СССР: Новосибирск, 1977. Т. 8. № 3. С. 129–157.
- Gusiakov V.K., Marchuk An.G., Osipova A.V. Expert tsunami database for the Pacific: motivation, design and proof-of-concept demonstration // G.Hebenstreit (Editor). Perspectives on Tsunami Hazard Reduction: Observations, Theory and Planning. Kluwer Academic Publisher. Dordrecht-Boston-London, 1997. P. 21–34.
- Kanamori H. Mechanism of tsunami earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 1972. V. 6. P. 346–359.
- Knighton J., Bastidas L. A proposed probabilistic seismic tsunami hazard analysis methodology // Natural Hazards. 2015. V. 78. P. 699–723.
- Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis, Second Edition. Cham-Heidelberg-New York-Dordrecht-London: Springer, 2016. 388 p.
- Miller D.J. Giant Waves in Lituya Bay, Alaska / Geological Survey Professional Paper 354-C. U.S. Government Printing Office. Washington, 1960. P. 50–85.

- Murty T.S., Rao A.D., Nirupama N., Nistor I.* Numerical modelling concepts for tsunami warning systems // *Current Sci.* 2006. V. 90. № 8. P. 1073–1081.
- Power W., Downes G.* Tsunami hazard assessment / Ed. by Connor C., Chapman N., Connor L. Volcanic and tectonic hazard assessment for nuclear facilities. Cambridge Univ. Press, 2009. P. 276–306.
- Rabinovich A.B.* Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event // *Pure Appl. Geophys.* 2020. V. 177. P. 1193–1230.
- Titov V.V.* Tsunami forecasting // *The SEA, Tsunamis.* V. 15. Harvard University Press, 2009. P. 371–400.
- Titov V.V., Synolakis C.E.* Numerical modeling of tidal wave runup // *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering.* 1998. V. 124. № 4. P. 157–171.
- Topics 2000. Natural catastrophes – the current position. Special Millennium Issue // Munich Re Group. 2001. 126 p.
- Ueno T.* Numerical computations for the Chilean Earthquake Tsunami // *The Oceanographical Magazine.* 1960. V. 17. № 2. P. 87–94.
- Vilibić I., Monserrat S., Rabinovich A.B.* Meteorological tsunamis on the US East Coast and in other regions of the World Ocean // *Natural Hazards.* 2014. V. 74. № 1. P. 1–9.
- Watada S., Kusumoto S., Satake K.* Travel time delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2014. V. 119. № 5. P. 4287–4310.

MATHEMATICAL MODELING IN THE TSUNAMI PROBLEM: METHODOLOGY AND PRACTICAL APPLICATIONS

© 2025 V. K. Gusiakov^{1, *}, L. B. Chubarov^{2, **}

¹*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS
Lavrentiev av., 6, Novosibirsk, 630090 Russia*

²*Federal Research Center for Information and Computational Technologies
Lavrentiev av., 6, Novosibirsk, 630090 Russia*

*e-mail: gvk@sccc.ru

**e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

Mathematical modeling is one of the most powerful and flexible tools for studying complex natural phenomena, in which the setting up of a direct full-scale experiment is, as a rule, impossible. A typical example of a dangerous natural phenomenon characterized by low frequency and severe consequences are tsunami waves that are generated in the oceans and the seas after submarine earthquakes, volcanic explosions, underwater slumping and coastal landslides as well as by high-energy atmospheric disturbances. The paper examines mathematical models used to study the three main stages of tsunami wave evolution: generation by underwater or surface sources, propagation in the deep ocean and on the shelf, and run-up to the coast. Their application to solving two main scientific and applied problems related to the tsunami problem (operational warning and coastal tsunami zoning) is discussed. The work was written for this issue of the journal dedicated to the 100th anniversary of Academician G.I. Marchuk, therefore the review is limited mainly to the results obtained by the authors during their work at the Computing Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences in the 1970-80s.

Keywords: mathematical modeling, numerical algorithms, earthquake sources, seismotectonics, tsunami, operational warning, tsunami hazard, tsunami-zoning