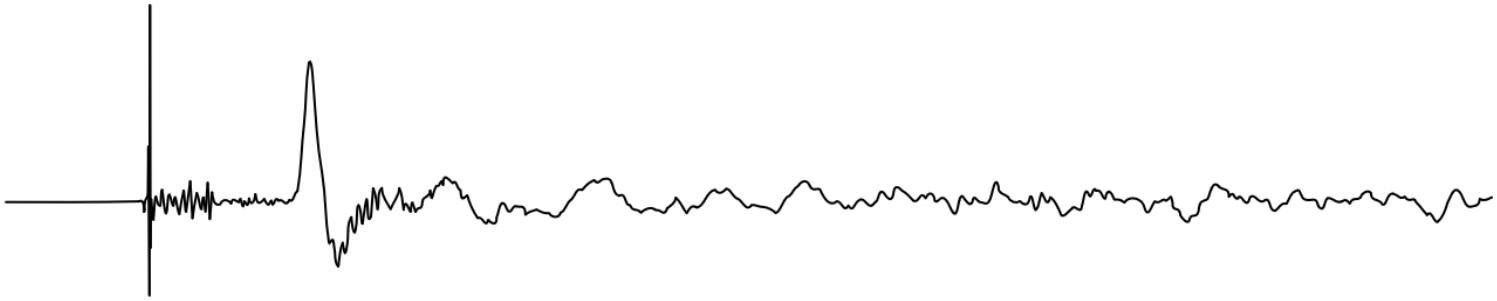
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦУНАМИ
ПРИ ОТДЕЛЕНИИ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



VI всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ».

17-18 ноября 2026 г

Сборник тезисов докладов

Москва, 2026

VI всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ». 17-18 ноября 2026 г. Сборник тезисов докладов / Под ред. М.А.Носова. - М.: Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2026 г.

Электронное издание
Опубликовано на сайте
http://ocean.phys.msu.ru/tsu_conf/

© Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2026

Конференция организована Научным советом по проблемам цунами ОНЗ РАН при поддержке физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» и Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова» Российской академии наук. Целью конференции является возобновление и развитие сотрудничества между российскими специалистами, работающими над решением проблемы цунами. Мероприятие предполагает максимально широкий охват тем в рамках означенной проблемы. К участию в конференции были приглашены ученые, специалисты-практики, а также аспиранты и студенты, заинтересованные в проведении исследований по указанной тематике.

Тезисы докладов, представленные в настоящем сборнике, публикуются в авторской редакции.

Программный комитет:
проф. РАН М.А. Носов – председатель;
к.ф.м.н. А.В. Большакова – ученый секретарь;
акад. РАН Л.И. Лобковский;
член-корр. РАН А.А. Маловичко;
д.ф.м.н. В.К. Гусяков;
проф. РАН И.И. Диденкулова;
проф. С.Ю. Доброхотов;
член-корр. РАН А.И. Зайцев;
д.ф.м.н. Д.П. Ковалев;
к.ф.м.н. И.П. Медведев;
проф. Е.Н. Пелиновский;
проф. РАН Т.К. Пинегина;
д.г.н. Н.Г. Разжигаева;
к.ф.м.н. Д.В. Чебров;
проф. Л.Б. Чубаров.

Организационный комитет:
А.В. Большакова – председатель;
И.П. Медведев – заместитель председателя;
Д.С. Выдрин;
С.В. Колесов;
А.Ю. Медведева;
Е.С. Цуканова;
О.И. Яковенко.

Сайт конференции:
http://ocean.phys.msu.ru/tsu_conf/
Электронная почта:
tsu_conf@ocean.phys.msu.ru

1.
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ И ЦУНАМИ 29 ИЮЛЯ 2025 ГОДА НА КАМЧАТКЕ И ЕГО ПРЕДШЕСТВЕННИКИ

В.К.Гусяков

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

gvk@sscc.ru

Исторический каталог цунами для Камчатки охватывает период почти в 290 лет и включает 44 региональных цунамигенных события, а также 3 цунами от удаленных источников, имевших проявления у побережья Камчатки. Подавляющее большинство региональных событий (42 из 44) было вызвано подводными землетрясениями, произошедшими в северной части Курило-Камчатской зоны субдукции. Каталог открывается сильнейшим региональным событием — Камчатским землетрясением 1737 года, которое вызвало разрушительное цунами на большом протяжении побережья – от Авачинского залива до о-ва Парамушир и, по-видимому, стало причиной одного из самых масштабных трансокеанских цунами в Тихом океане. Анализ доступных сведений об этом землетрясении, а также отложений вызванного им цунами, показывает, что его магнитуда (макросейсмическая) могла достигать значения 9.5. Второе по силе камчатское землетрясение (магнитуда 9.0) произошло 4 ноября 1952 года практически в той же очаговой области; таким образом, интервал между этими двумя событиями составил 216 лет, что является наименьшим значением повторяемости мега-землетрясениями на одном и том же участке зоны субдукции среди всех других цунамигенных зон Тихоокеанского «огненного кольца». Повторение столь мощного землетрясение в той же самой очаговой зоне не ожидалось, однако оно произошло 29 июля 2025 года, спустя всего 73 года. Его моментная магнитуда (Mw 8.8) делает его шестым по силе инструментально зарегистрированным землетрясением. Это землетрясение также породило трансокеанское цунами с максимальными заплесками до 15-18 м на восточном побережье Камчатки и северных Курильских островах и с высотами до 1.5 – 2.0 м на Гавайях. Спустя 23 часа волна дошла до побережья Южной Америки, сохранив при этом среднюю высоту порядка 1 м. Анализ доступных макросейсмических сведений и береговых отложений цунами показывает, что помимо этих трех мега-землетрясений в этой же очаговой зоне произошли еще как минимум два сильных землетрясения. Это землетрясение 17 мая 1841 года, вызвавшее сотрясения до 8 баллов в районе Авачинского залива и цунами с высотами до 15 м на его побережье и землетрясение 25 июня 1904 года, вызвавшее многочисленные разрушения в Петропавловске-Камчатском (сотрясения до 9-10 баллов) и заметные колебания уровня внутри Авачинской бухты. Таким образом, данный участок Курило-Камчатской сейсмогенной зоны представляет собой своего рода «горячую точку», характеризующуюся повышенной вероятностью возникновения сильнейших землетрясений, способных порождать трансокеанские цунами. В докладе рассматриваются основные особенности региональной сейсмотектоники, проводится обзор значимых исторических цунами в этом районе, а также обсуждается их значение для долгосрочной оценки цунамиопасности Курило-Камчатского региона.

Работа выполнена в рамках базового проекта ИВМиМГ СО РАН № FWNM-2025-0004.

2.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЦУНАМИ (29 ИЮЛЯ 2025 Г.): ПОДХОДЫ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НЕРЕШЁННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

С.А.Бейзель[1], Т.А.Воронина[2], О.И.Гусев[1], В.К.Гусяков[2], А.В.Ландер[3], Т.К.Пинегина[4], Д.В.Чебров[5], Л.Б.Чубаров[1]

[1]*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск*
[2]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*
[3]*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*
[4]*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*
[5]*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский*

beisels@gmail.com

В докладе представлены результаты математического (численного) моделирования цунами, порождённого мега-землетрясением с магнитудой 8.8, происшедшего 29 июля 2025 г. вблизи юго-восточного побережья Камчатки. Рассматриваются различные модели сейсмического источника цунами, в том числе: опубликованные на сайте USGS, предложенные авторами ряда статей, опубликованных вскоре после события, а также модели, разработанные авторами с использованием инверсии записей региональных станций GPS и глубоководных станций DART. Результаты расчётов, выполненных в рамках нелинейной модели мелкой воды, сравниваются с записями глубоководных датчиков системы DART и с результатами полевых измерений заплесков волн цунами на побережье Камчатки и северных Курильских островов (Парамушир и Шумшу). Эти сравнения показали, что наиболее близкое соответствие наблюдённым данным дают расчёты, выполненные с использованием источников, порождавших начальные возмущения в очаге цунами, смещённые к юго-западу от центра очаговой области, они достаточно хорошо воспроизводят записи ближайших датчиков DART и общее вдольбереговое распределение заплесков. Модели очага с равномерно распределенной подвижкой по плоскости разрыва, не позволяют адекватно воспроизвести наблюдённые данные, тем не менее, удаётся подобрать альтернативный прямоугольный очаг, также обеспечивающий удовлетворительное соответствие этим данным. В рамках данного исследования выполнялись также расчеты наката для трёх районов (г. Северо-Курильска, б. Вестник и Халактырского пляжа) по методике вложенных сеток, при этом для очаговых моделей, обеспечивающих хорошее соответствие картам заливания в районе Северо-Курильска получаются несколько заниженные значения заплеска в б. Вестник.

Основной вывод данной работы состоит в том, что выполненные расчеты не позволяют сделать однозначный выбор наилучшего источника, наиболее полно соответствующего всем данным наблюдений и оставляют нерешенным вопрос о природе коротковолновых колебаний, следующих примерно в 40 минутах за головной волной в записях DART 21415, а также 21414, 46413 и 46408.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий № 125051305955-3; Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН № 124020900029-7; Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН в рамках базового проекта № FWNM-2025-0004; Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в рамках базового проекта № FWME-2024-0010

3.
РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ОБСЛЕДОВАНИЙ ПРОЯВЛЕНИЙ ЦУНАМИ 29(30).07.2025 НА О-ВАХ ШУМШУ И ПАРАМУШИР

Т.К. Пинегина[1], В.А. Цветков[1], Т.А. Котенко[1], Д.С. Выдрин[2], В.К. Гусяков[3], А.И. Кожурин[1], Ф.И. Батанов[1], А.Л. Хомчановский[1], Л.В. Котенко[1], Л.М. Кузьминых[4]

[1]Институт Вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский
[2]Институт океанологии РАН, г. Москва
[3]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск
[4]Нучный фотограф, г. Нижний Новгород

pinegtk@yandex.ru

Летом 2026 г. была проведена полевая экспедиция по обследованию параметров цунами 29(30).07.2025 г. вдоль восточного побережья о-ва Парамушир, а также по периметру о-ва Шумшу. Во время обследования побережий с помощью геодезического БПЛА с RTK антенной была проведена аэрофотосъемка участков, подвергшихся затоплению цунами. Опорная GNSS станция находилась в г. Северо-Курильске, еще одна базовая GNSS станция устанавливалась поблизости от места проведения аэрофотосъемки. Кроме того, для контроля точности привязки полученных аэрофотомозаик, на берегу расставлялись маркеры в виде крестов, видимые с воздуха, а их высота и координаты измерялись непосредственно в поле, как с помощью нивелира, так и с помощью дополнительной GNSS станции. Аэрофотосъемка проводилась в интервале высот от 30 до 250 м. В результате были получены аэрофотомозаики с разрешением от нескольких до примерно 10 см на пиксель, а также построены цифровые модели местности (ЦММ) с разрешением в интервале 5-25 см на пиксель.

Последующий этап обработки полученных данных включил детальное дешифрирование аэрофотомозаик с целью выделения зон, испытавших воздействие цунами и оконтуривания линии максимального заплеска цунами (так называемой «мокрой линии»). Несмотря на то, что с момента цунами прошел год, следы воздействия цунами по-прежнему были довольно хорошо видны с воздуха. Зоны заплеска выделялись по мертвой кустарниковой и древесной растительности, валикам травы и плавучего мусора, выброшенным бревнам, нарушенному почвенному покрову в области, подвергшейся цунами- эрозии. Однако в местах, где эрозия была незначительной, а растительность представлена травами-галофитами, однозначно выделить линию заплеска цунами уже не представляется возможным. На берегах абразионных террас с небольшим количеством рыхлых отложений, очень часто не наблюдались и отложения цунами. Этот факт необходимо учитывать при реконструкциях параметров голоценовых палеоцунами по их отложениям.

После выделения линий максимальных заплесков, вдоль них выбирались характерные точки, для которых определялась высота цунами. Точки выбирались в местах, где линия заплеска дешифрировалась уверенно, отсутствовала древесная, кустарниковая растительность и высокотравье - для того, чтобы не завышать реальные заплески цунами.

Всего вдоль островов Шумшу и Парамушир было обследовано 25 участков побережий на протяжении около 190 км (в среднем 1 участок на 7-8 км), сделано более 650 замеров высот цунами (в среднем 1 замер на 300 м берега). Кроме того, в ходе обследований отбирались образцы отложений цунами, в ряде точек были получены новые данные по цунами 1952 г., выполнена фотодокументация последствий цунами.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН № FWME-2024-0010 «Курило-Камчатская островодужная система: активная тектоника, палеосейсмология, современные деформации и геофизические процессы».

4.
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29 ИЮЛЯ 2025 ГОДА НА КАМЧАТКЕ НА ОСНОВЕ БЛОЧНО-КЛАВИШНОЙ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ОЧАГА

Р.Е.Мазова[1], Е.Ф.Денисов[1], А. А. Баранов[2], Л.И.Лобковский[3]

[1] Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
[2]Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН Москва, Россия.
[3] Институт Океанологии РАН им. П.П.Ширшова, Москва, 917435 Russia.

raissamazova@yandex.ru
randty@yandex.ru
aabaranov@gmail.com
llobkovsky@ocean.ru

В работе проведено численное исследование процессов возникновения и распространения волн цунами, вызванных катастрофическим землетрясением 29 июля 2025 года у восточного побережья полуострова Камчатка. В данном исследовании учтена геодинамика сейсмического очага, а также форшоковая и афтершоковая активность. Работа базируется на известной блочно-клавишной модели сильнейших землетрясений в зонах субдукции. На базе данной модели сформирован очаг землетрясения, протянувшийся от Авачинского залива до Кроноцкого полуострова, с учетом форшоковой активности за неделю до события и афтершокового процесса за неделю после данного события с магнитудами M>5. При создании модели сейсмического очага особое внимание уделено строению его южной части, характеризующейся отсутствием внутренних разрывов и способной накапливать большие напряжения, в отличие от раздробленной северной части. В работе учтено направление разрыва в очаге землетрясения: от юга к северу, а затем, опять к югу, вызвав значительное вертикальное смещение морского дна и, как следствие, мощное цунами. Проведена оценка возможной кинематики блоков-клавиш в очаговой зоне, для чего рассмотрены 7 сценариев динамического процесса при смещении блоков в очаге землетрясения, соответственно времени появления форшоков и афтершоков и их магнитудам. Проведено численное моделирование распространения волн цунами по всей акватории Тихого океана и приведено сравнение расчетных мареограмм с данными натурных записей в пунктах локализации мареографных станций. Показано близкое совпадение виртуальных и натурных записей. Также проведено сравнение с расчетными данными ряда авторов.

5.
ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ФОРМЫ ВОЛНЫ ЦУНАМИ ПОСЛЕ КАМЧАТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 29.07.2026 И ОЦЕНКА АМПЛИТУД ВОЛНЫ В УДАЛЕННЫХ ЛОКАЦИЯХ

Т.А.Воронина

Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН
г. Новосибирск

vta@omzg.sscc.ru

Целью настоящего исследования было определить начальную форму волны цунами (далее - *источник цунами*), распространившуюся по всему Тихому океану после землетрясения 29.07.2026 (Mw 8.8) у берегов Камчатки. Восстановление источника цунами осуществляется посредством инверсии удаленных глубоководных записей проходящей волны на основе метода усеченного сингулярного разложения (Truncated SVD). Распространение волн рассматривается в рамках линейной теории. Численное моделирование осуществляется на основе конечно-разностного подхода. Функция источника в области поиска представляется как конечный отрезок ряда Фурье по пространственным гармоникам с неизвестными коэффициентами, которые определяются как квазирешение линейной системы. Правая часть этой системы содержит наблюденные мареограммы, а столбцы матрицы – отклики в локациях датчиков системы наблюдения и точек прогноза (где нет наблюдений) на каждую из пространственных гармоник. Система наблюдения определяет свойства спектра матрицы этой системы, который характеризуется быстрым убыванием сингулярных чисел, что является проявлением некорректности решаемой задачи и ведет к неустойчивости численного решения. Применяемый подход обеспечивает снижение численной неустойчивости, что достигается за счет проецирования точного решения на некоторое подпространство, размерность которого напрямую зависит от системы наблюдения и определяет качество инверсии. На основе анализа распределения удельной энергии волны между локациями датчиков предложена методика выбора наиболее информативного набора данных и параметров инверсии, которые позволяют не только восстановить первоначальную форму волны цунами, но и одновременно, без новых расчетов распространения волны от восстановленного источника, получить амплитуды волны в пунктах, где не было наблюдения, но которые использовались в расчетах матрицы системы. Численные расчеты для рассматриваемого события показали хорошее восстановление мареограмм в локациях пяти буев DART: 21414,21415, 21416, 21418, 21419, при этом данные трех (21416, 21415, 21419) использовались в инверсии, а локации DART 21414 и 21418 рассматривались как точки прогноза. Восстановленная форма источника цунами также хорошо соответствует источникам, полученными другими исследователями на основе других подходов.

Работа выполнена в рамках базового проекта ИВМиМГ СО РАН № FWNM-2025-0004.

Литература

1. Voronina, T. A., Voronin, V. V., & Cheverda, V. A. (2019). The 2015 Illapel Tsunami Source Recovery by Inversion of DART Tsunami Waveforms Using the R-Solution Method // Pure and Applied Geophysics, 176(7), 2985–2993. https://doi.org/10.1007/s00024-019-02100-y
2. Voronina, T. A., & Voronin, V. V. (2025). On the assessment of the efficiency of deep-sea monitoring sensors for a tsunami warning system. *Marine Geophysical Researches,* 46(2). https://doi.org/10.1007/s11001-025-09577-4

3. Chengli Liu, Yefei Bai, Thorne Lay, Ping He, Yangmao Wen, Xiong Xiong, and Tuncay Taymaz. Simple unilateral rupture of the great Mw 8.8 2025 Kamchatka earthquake Science 391 (6787), DOI: 10.1126/science.aeb8232

6.
ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТ ЦУНАМИ 2025 ГОДА НА КАМЧАТКЕ И КУРИЛАХ

Е.Н. Пелиновский[1-3], А.И. Зайцев[3], И.И. Диденкулова[4,1]

[1]Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород
[2]Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород
[3]СКБ средств автоматизации морских исследований, г. Южно-Сахалинск
[4]University of Oslo, Norway

Pelinovsky@ipfran.ru

Мы проанализировали распределение максимальных высот заплеска цунами вдоль побережья полуострова Камчатка и Северных Курильских островов после цунами, произошедшего у берегов Камчатки 29 июля 2025 года. Были использованы пять имеющихся наборов полевых данных, полученных в ходе различных экспедиций: два по Камчатке и три по Северным Курилам (Костенко и др., 2025; Зайцев и др., 2026; Pinegina et al., 2026; Kotenko et al., 2026). Для каждого набора данных мы построили эмпирические функции плотности вероятности и дополняющие функции распределения высот заплеска, а затем сравнили их с теоретическим логнормальным распределением.

Показано, что логнормальное распределение хорошо описывает данные о высоте заплеска цунами вдоль побережья; однако исходный набор данных должен быть достаточно представительным (обширным) и статистически независимым. Наши результаты также демонстрируют, что даже данные об одном и том же цунами, собранные на относительно близких участках, могут характеризоваться различными статистическими параметрами логнормального распределения. В связи с этим использование логнормального распределения в универсальной непараметрической форме является оптимальным подходом для сравнения различных наборов данных.

Высказывается предположение, что логнормальное распределение может также служить косвенным индикатором независимости данных: соответствие набора данных логнормальной модели или наличие значительных отклонений от нее позволяют судить о характере выборки.

Литература

1. Костенко И.С., Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н**.** Цунами 29 (30) июля 2025 года в Камчатско-Курильской зоне: инструментальные данные и моделирование**.** *Доклады РАН Науки о Земле.* 2025, т. 525, № 2, 322-329. DOI: 10.7868/S3034506525120158
2. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Костенко И.С., Цепкало А.О. Проявления Камчатского цунами 2025 года на побережье острова Шумшу (Северные Курилы): полевые наблюдения и численное моделирование. *Морской гидрофизический журнал*. 2026, том 42, № 2, 263-274
3. Pinegina, T.K., Ozerov, A.Y., Tsvetkov, V.A. et al. Tsunami from the Mw 8.8 Kamchatka Earthquake of 29 July 2025 on the East Coast of Kamchatka and the North Kuril Islands. *Pure Appl. Geophys*. 2026, vol. 183, Issue 1, 1–25. DOI: 10.1007/s00024-025-03873-1

4. Kotenko, M., Zaytsev, A., & Pelinovsky, E. Field Survey of the 2025 Kamchatka Tsunami on Coasts of the North Kuril Islands, Russia (Second Kuril Strait). *Pure Appl. Geophys*. 2026, vol. 183, Issue 6, 2681-2695. DOI: 10.1007/s00024-026-03963-8

7.
ПРОГРАММНАЯ ОБОЛОЧКА ДЛЯ РАБОТЫ С ДАННЫМИ НАБЛЮДЕНИЙ ЦУНАМИ

Е.В. Лысковская

Лаборатория математического моделирования волн цунами
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

kate@omzg.sscc.ru

Программная оболочка ITDB (Integrated Tsunami Data Base) разрабатывается в лаборатории с 1999 года. Включает функции редактирования, визуализации и анализа исторического каталога цунами (событий и высот), построение карты на основе геоданных, а также работу с дополнительными слоями, такими как землетрясения, границы плит, цунамигенные регионы, сеть сейсмостанций и мареографов. В докладе будут продемонстрированы основные возможности программы и ее работа в различных режимах выборки и визуализации данных, построение графиков и создание слайдов для презентаций.

8.
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСОКЕАНСКОГО ЦУНАМИ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

М.М. Лаврентьев[1], АН.Г. Марчук[2], К.Ф. Лысаков[1]

[1]Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
[2]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

mmlavrentiev@gmail.com

Для моделирования процесса распространения трансокеанских волн цунами принято использовать ресурсы суперкомпьютеров. Чтобы сократить время обработки до 1-2 часов, для таких расчетов используются сетки с шагом в 3-4 географические минуты. Использование более подробных сеток требует еще более значительных вычислительных затрат. Благодаря аппаратному ускорению (ранее коллективом авторов был предложен сопроцессор на основе Вентильной матрицы, программируемой пользователем – Field Programmable Gates Array – FPGA) для расчетов можно использовать и персональный компьютер, что может значительно увеличить количество исследований в области предупреждения цунами. Была реализована параллельная версия схемы МакКормака, оптимизированная для применения аппаратного ускорителя. В серии проведенных вычислительных экспериментов было проведено сравнение полученных результатов как с известными точными решениями системы уравнений мелкой воды (случаи специальных модельных профилей глубин), так и с численными решениями, полученными применением широко известных программных пакетов. Продемонстрирована такая же точность вычислений, как при использовании альтернативных инструментов моделирования, а производительность вычислений можно сравнить с производительностью суперкомпьютеров.

В работе представлены результаты численного решения системы уравнений мелкой воды, моделирующей распространение волны цунами в акватории Тихого океана, с использованием вычислительных сеток с разрешением в 1 и 4 географических минут. Показано, что благодаря высокой скорости вычислений можно корректировать параметры источника по мере поступления новой информации об амплитуде и профиле волны, поступающей с глубоководных датчиков давления. Результаты исследования будут полезны исследователям и службам предупреждения цунами при принятии решений.

9.
БАРОТРОПНО-БАРОКЛИННАЯ КОНВЕРСИЯ НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦУНАМИ

И.А. Бетке[1,2], С.М. Дарьенкова[1,2]

[1]Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь
[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

betkeigor@gmail.com

В работе рассматривается генерация внутренних волн цунами на континентальном склоне. Постановка задачи опирается на аналогию с внутренним приливом, поскольку цунами над склоном представляет собой баротропное течение над неровным дном в стратифицированном океане. От прилива его отличают более высокая частота и кратковременность воздействия. Изучается, возможно ли излучение внутренних волн на частотах цунами и при каких условиях, чем излучённые волны отличаются от вынужденного отклика стратификации на проходящую волну и успевает ли за столь короткое время сформироваться нелинейный цуг.

Теоретическая часть основана на линейных уравнениях динамики стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска с учётом вращения Земли, конечной глубины и произвольного профиля плотности. Решение строится в виде разложения по вертикальным модам. Излучение возможно лишь там, где частота волны ниже частоты плавучести у дна. Смещение изопикн, которое движется вместе с цунами и самостоятельной волной не является, выделяется в отдельную моду, если использовать моды со свободной поверхностью.

Численно задача решается в цепочке связанных моделей. Распространение цунами от очага до шельфа рассчитывается в модели мелкой воды GeoClaw на реальной батиметрии. Полученные уровень и расход задаются на открытых границах трёхмерной гидростатической модели Oceananigans со стратификацией из декабрьской климатологии WOA23, поэтому волна входит в область через границы, а не задаётся начальным условием. Нелинейные и негидростатические эффекты у бровки шельфа изучаются в трёхмерной негидростатической модели участка склона с подводным каньоном при горизонтальном разрешении 50 м, со свободной поверхностью и фоновым приливом по модели ТРХО, а также в двумерных расчётах на разрезах поперёк склона. От расчёта к расчёту меняются амплитуда и форма баротропного воздействия и наличие прилива. Численные результаты сравниваются с линейным решением, полученным методом связанных мод.

Доля энергии цунами, переходящая во внутренние волны, определяется из замкнутого баланса бароклинной энергии, который включает конверсию, поток и диссипацию. Устойчивость оценок проверяется изменением разрешения, длительности расчёта, стратификации и вязкости.

Моделирование выполнено для цунами 26 декабря 2004 г. у восточного побережья Шри-Ланки, где внутренние волны предполагались по спутниковому снимку MODIS. Результаты сопоставляются со снимками MODIS до и после события и с записями кабельной обсерватории OOI на склоне у Орегона во время Камчатского цунами 2025 г. Для переноса выводов на другие континентальные окраины используется закон подобия, в котором эффективность генерации определяется отношением уклона дна к наклону лучей внутренних волн.

10.

УЧЕТ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЦУНАМИ

Ан.Г. Марчук[1], А.С. Хорунженко[2]

[1]Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск
[2]Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

mag@omzg.sscc.ru

В работе исследовалось влияние силы Кориолиса на результаты численных расчётов распространения волны цунами. Моделирование процесса распространения волн цунами проводилось путём численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений мелкой воды в сферических координатах разностной схемой Мак-Кормака. Для выявления степени влияния силы Кориолиса результаты сравнивались с распределением максимальных высот волн, полученных при численном моделировании цунами в декартовых координатах без учёта этой силы. На серии модельных расчётов над ровным дном найдена величина сдвига распределения максимальных высот волн в зависимости от широты расчётной области. При широте центра расчётной области 52° с. ш. после пробега волной 650-ти км в северном направлении распределение максимальных высот смещается вправо по ходу волны на 3,6 км, а высота волны уменьшается на 3,6 %. Проведено численное моделирование распространения цунами от модельных очагов в акватории Японского моря и во всём Тихом океане. Выявлена разница (с учётом и без учёта силы Кориолиса) в проявлениях трансокеанского цунами вдоль побережья Южной Америки в случае, когда очаг располагался около п-ова Камчатка. Время прихода волны к побережью Южной Америки при этом меняется не более чем на 5 с, а максимальные высоты у экватора уменьшаются на величину до 20 %. По результатам исследования можно сделать вывод, что в транс-тихоокеанском расчёте учёт силы Кориолиса меняет максимальные высоты высоких (более 1 м) волн не более чем на 3 %, однако, на участках побережья с высотами волн менее 0,5 м изменения достигают 20–30 %. Скорее всего, это происходит из-за изменения направленности излучения волновой энергии цунами под действием силы Кориолиса. По результатам исследования можно принимать решение о целесообразности учёта воздействия силы Кориолиса на распространение волны цунами в каждом конкретном вычислительном эксперименте.

11.
О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ И ГЛУБИНЫ ОКЕАНА НА СТРУКТУРУ ПОРОЖДАЕМЫХ ИМИ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

,

С.Ю. Доброхотов[1], Х.Х.Ильясов[1], О.Л.Толстова[2]

[1]Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, г. Москв
[2] Московский государственный строительный университет, г. Москва

s.dobrokhotov@gmail.com

В рамках поршневой модели распространение длинных волн в бассейне с переменным дном D(x), например, волн цунами, описывается задачей Коши для двумерного волнового уравнением с переменной скоростью для превышения свободной поверхности. Начальные условия задаются в виде локализованной функции для превышения свободной поверхности (функции источника) и нулевой производной по времени. В работах С.Ю.Доброхотова, В.Е.Назайкинского, С.Я.Секерж-Зеньковича, Б.Тироцци, А.И.Шафаревича и др. были получены эффективные асимптотические формулы, связывающие, в частности, локальную структуру профиля распространяющейся волны с преобразованием Фурье от функции источника. Для некоторых специальных источников соответствующие функции профиля имеют простую форму и выражаются через элементарные функции, что позволяет сравнительно легко анализировать некоторые характеристики распространяющейся волны, например локальную амплитуду, диаграмму направленности и т.д. С другой стороны, в работах С.Ю.Доброхотова, О.Л.Толстовой, С.Я.Секерж-Зеньковича и Х.Х.Ильясова и др. в рамках модели Подъяпольского рассматривалась возникающая при описании длинных волн задача, описываемая функциями, заданными в слое жидкости (уравнением Лапласа) и в бесконечном полупространстве (уравнениями Ламе), связанными граничными условиями и условиями сопряжения. Математическая нестандартность задачи состоит в том, что производные по времени присутствуют в уравнениях Ламе и отсутствуют в уравнении Лапласа, кроме того, часть граничных условий включает в себя производные по времени. В предположении, что упругое основание однородно и граница раздела упругое основание жидкость- горизонтальная плоскость, задача с помощью преобразования Фурье сводится к изучению спектра (сложной структуры) операторного пучка по вертикальной переменной. Это, в свою очередь, дает возможность правильно сформулировать соответствующую задачу Коши и представить после ряда полезных преобразований (“трюков”) ее решение с начальными данными, локализованными в упругом полупространстве, в простой конструктивной форме, явно отражающей влияние параметров задачи, таких как размеры, глубина залегания и направления действия источника, скорости распространения упругих волн, плотности жидкости и упругой среды и глубины слоя жидкости. Полученные формулы позволяют построить эквивалентные источники, которые могут быть использованы при описании волн цунами в рамках поршневой модели.

Последние результаты, представленные в докладе, поддержаны РНФ, проект 24-11-00213.

Литература

1. Доброхотов С.Ю., Ильясов Х.Х., Толстова О.Л., Гидроупругая модель в задаче о влиянии глубины океана и параметров подземных источников на структуру порождаемых ими волн на поверхности воды, Прикладная математика и механика, 90: 3, (2026), 424-450

12.
ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ДИСПЕРСИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПО СИНТЕТИЧЕСКИМ ВОЛНОВЫМ ФОРМАМ ЦУНАМИ

А.И. Зарубина[1], М.А. Носов[1,2], С.В. Колесов[1]

[1]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
[2]Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск

zarubinaai@my.msu.ru

Большинство численных моделей цунами построено на основе бездисперсионной теории длинных волн. В реальности волны цунами подвержены фазовой дисперсии и, как правило, они являются слабо диспергирующими. В этом случае дисперсионные эффекты имеют свойство плавно накапливаться по мере распространения волны, и их проявление существенно искажает волновой профиль только на достаточно большом расстоянии от источника D. Все оценки величины D, сделанные различными авторами [1], в длинноволновом пределе дают единую формулу $D=C\lambda^3/H^2$, где λ- длина волны, H- глубина океана, C- числовой коэффициент, величина которого варьируется в зависимости от субъективных представлений исследователей о степени значимости дисперсионных эффектов.

В работах [2, 3] нами был предложен метод определения области пространства, в которой бездисперсионная длинноволновая модель способна воспроизводить диспергирующие волны цунами с заданной точностью. При разработке метода мы основывались на связи между точностью воспроизведения волнового профиля и степенью запаздывания диспергирующего волнового пакета относительно фронта длинных волн [1]. Степень запаздывания характеризуется безразмерным параметром $\alpha=\delta T/T$, где δT – время запаздывания, T – доминирующий период волны. Степень запаздывания α рассчитывалась вдоль волновых лучей, испускаемых из центра источника под различными азимутальными углами. Использование исходного метода на практике оказалось затруднено необходимостью специальной подготовки батиметрии для корректного применения лучевой теории, а также сложностями в оценке доминирующего периода. В связи с этим актуальной задачей является развитие альтернативного метода, который не использует лучевую теорию.

В докладе будет представлен новый метод оценки значимости проявлений фазовой дисперсии, который опирается на анализ волновых форм цунами, рассчитанных численно с использованием линейной бездисперсионной теории длинных волн для набора виртуальных мареографов. По волновым формам определяются время распространения волны и спектральный состав лидирующих волн, по которому оценивается преобладающий период. Получена формула, позволяющая по времени распространения, преобладающему периоду и средней глубине рассматриваемой акватории рассчитать степень дисперсионной запаздывания α. Работоспособность метода будет продемонстрирована на примере нескольких событий, произошедших в 21-м веке в тихоокеанском регионе.

Литература

1. Носов М.А., Зарубина А.И. Критерий применимости теории длинных волн для описания диспергирующих волн цунами //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2023. – Т. 59. – №. 4. – С. 485-496.
2. Носов М.А., Зарубина А.И., Колесов С.В. Оценка области применимости приближения мелкой воды для воспроизведения диспергирующих волн цунами // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2025, Т. 61, № 4. С. 30-44.

3. Строгов Т.А., Зарубина А.И., Носов М.А. Азимутальное распределение доминирующих периодов волн цунами, формируемых косейсмическими смещениями дна //Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 525. – №. 1. – С. 152-159.

13.
ЦУНАМИ В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА В 2025 ГОДУ

Д.А. Смирнова[1], А.Ю. Медведева[1], И.П. Медведев[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова, РАН, г. Москва

smirnova.daria@ocean.ru

В 2025 году в проливе Дрейка были зафиксированы цунами, вызванные региональными землетрясениями (M_w 7.4 в мае и M_w 7.5 в августе), произошедшими в акватории пролива. Это первые события подобной магнитуды в этом регионе, начиная с 1910 года (M_w 7.1). Также на берегах Южной Америки, Антарктического полуострова и островов моря Скотия наблюдалось трансокеанское цунами от землетрясения у побережья Камчатки (M_w 8.8 в июле).

На основе имеющихся в открытом доступе данных уровня моря (11 станций) Службы мониторинга станций наблюдения за уровнем моря UNESCO (Sea Level Station Monitoring Facility, IOC) и запрошенной в Корейском гидрографическом и океанологическом агентстве (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, KHOA) информации о колебаниях уровня моря на корейской антарктической станции Кинг Седжон было выполнено исследование особенностей распространения цунами в регионе. Так, максимальная амплитуда цунами в 2025 году (43 см) была зафиксирована на станции Капитан Артуро Прат от камчатского события. Сопоставимые значения были получены для станции Вернадский (40 см), куда волна дошла быстрее всего, меньше, чем за сутки. В случаях региональных цунами волна быстрее всего приходила на защищенную от волн открытого моря станцию Кинг Седжон (менее, чем через полтора часа после землетрясения). Однако наибольшие амплитуды были получены для станций Капитан Артуро Прат и Вернадский (до 21 см).

Спектральный анализ показал превосходство по энергии камчатского цунами над региональными на станциях Антарктического полуострова Капитан Артуро Прат, О'Хиггинс, Вернадский и Ротера в диапазоне периодов от 11 до 85 минут. Вероятно, это связано с тем, что трансокеанское цунами имеет более длинные волны. Также были определены основные резонансные периоды бухт, где расположены станции. У 7 из 8 из них структура полимодальная, только у Пуэрто-Уильямса — бимодальная (два резонансных пика).

Результаты численного моделирования показали основное направление распространения региональных цунами и дали первые оценки их амплитуды (до 67 см на Южных Шетландских островах), что очень важно для большого количества станций Антарктического полуострова (50 станций к северу от 73° ю.ш.). Несмотря на технические ограничения расчетов (неточности топографии дна, разрешение модельной сетки, неопределенности в параметрах очагов землетрясений, удаленность камчатского очага), результаты моделирования оказались близки к наблюдениям, особенно на станции Кинг Седжон. По времени добегания первой волны были получены небольшие расхождения, не превышающие 5 мин в мае, 25 минут в июле и 17 минут в августе. В первом и третьем случае это может быть связано с неточностью параметров очага, во втором — с накоплением ошибки вследствие удаленности очага.

Помимо освещения приведенных выше результатов, исследование обращает особое внимание на возможность повторения землетрясений как минимум со сравнимой магнитудой или даже большей, которые при других параметрах очага способны вызвать более сильные цунами, и в связи с этим на необходимость развития независимой сети наблюдения за уровнем моря в сравнительно густонаселенном Антарктическом регионе.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

14.
ЦУНАМИ У ПОБЕРЕЖЬЯ МЕКСИКИ В 1985, 2017 И 2022 ГГ.: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАПРАВЛЕННОСТЬ ВОЛН

А.А. Иванова[1], А.Б. Рабинович[1,2]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва
[2] Institute of Ocean Sciences, Sidney, BC, Canada

lapoul@gmail.com

19 сентября 1985 года у побережья штата Мичоакан произошло самое разрушительное землетрясение в XX веке в Мексике (M_w 8.0), жертвами которого стали тысячи людей. При этом цунами от самого землетрясения и от крупного афтершока 21 сентября (M_w 7.5) не вызвали каких-либо значимых разрушений. Оба цунами распространились по Тихому океану и были зарегистрированы несколькими приливными станциями в Центральной Америке, Колумбии, Эквадоре, Французской Полинезии, Самоа и на Гавайях. Ни от одной из станций не поступало сообщений о повреждениях; незначительный ущерб из-за первого цунами был зафиксирован лишь в районе очага землетрясения.

8 сентября 2017 года в заливе Теуантепек (Чьяпас, Мексика) произошло разрушительное землетрясение магнитудой M_w 8.2. Это событие стало одним из самых сильных землетрясений, когда-либо зарегистрированных приборами в мексиканской зоне субдукции. Оно унесло жизни более 100 человек и вызвало серьезные разрушения в нескольких штатах Мексики. Вызванные этим событием волны цунами заметно затронули побережье Мексики. Экспедиционное обследование, проведенное после цунами, зафиксировало максимальный заплеск около 3 метров в Бока-дель-Сьело и максимальное затопление суши вглубь на 190 метров в Пуэрто-Ариста.

По интересному совпадению, 19 сентября 2022 года практически в той же локации, что и в 1985 г, произошло достаточно мощное землетрясение с M_w 7.6, и вызванное им цунами было зафиксировано рядом береговых мареографов, а также станцией DART 43412, расположенной недалеко от источника. Цунами не вызвало заметных разрушений или человеческих жертв, а небольшое подтопление наблюдалось только на побережье Мичоакана вблизи эпицентра землетрясения.

Все три цунами были тщательно изучены с помощью численного моделирования. Как данные наблюдений, так и результаты моделирования показывают, что «сила» волн цунами в основном определялась расстоянием от источника, а не специфическими резонансными характеристиками отдельных станций наблюдения. Особое внимание было уделено изучению частотного состава событий. Численное моделирование позволило выявить значительные отличия в характере излучения энергии цунами: низкочастотная энергия была в основном сосредоточена в захваченных краевых волнах, распространяющихся вдоль шельфа, в то время как более высокочастотные утекающие волны излучали энергию цунами от источника вовне, причем основной пучок был направлен перпендикулярно побережью материка, подобно «прожектору».

15.
КАМЧАТСКОЕ ЦУНАМИ, ВЫЗВАННОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ (M_w 7.8) 18 СЕНТЯБРЯ 2025 ГОДА

А.К. Ревина[1], И.П. Медведев[2], Д.А. Смирнова[2]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

revina.anastacia@yandex.ru

В 2025 г. у юго-восточного побережья Камчатки произошла серия сильных землетрясений: 20 июля (M_w 7.4), 29 июля (M_w 8.8–8.9), 3 августа (M_w 6.8) и 18 сентября (M_w 7.8). Последнее событие является наиболее сильным афтершоком серии (глубина гипоцентра 27 км) и в отличие от главного толчка остаётся практически неизученным. Цель работы — оценить характеристики вызванного им цунами в Тихом океане по данным уровенных наблюдений.

Волна цунами была определена на 48 станциях, что указывает на трансокеанский характер события. В ближайшем к очагу пункте Семячик размах колебаний (от подошвы волны до ее гребня) достиг 70 см при амплитуде (от среднего уровня до гребня волны) 30 см. Время добегания первой волны составило 6–6.5 ч до Гавайского архипелага, 7–8 ч до северо-западного побережья Северной Америки и 19–24 ч до побережья Южной Америки. Наибольшие амплитуды волн (60–75 см) были зафиксированы на чилийских станциях (Бойерука, Икике, Кокимбо, Вальпараисо, Корраль), умеренные (30–45 см) — на Гавайских островах (Ханалей, Кахулуи, Хило) и наименьшие (4–15 см) — у побережья США. На отдельных пунктах наблюдений отмечались аномально высокие размахи колебаний уровня моря: на станции Бойерука он достигал 105 см, тогда как на соседней станции Кокимбо составлял около 25 см. Локальное усиление волны обусловлено морфометрией дна и конфигурацией узких бухт.

На записи станции DART №21416 в момент прохождения цунами была зарегистрирована серия кратковременных пиков с размахом до 14 см, через полчаса был зафиксирован пик с размахом около 8 см. Спектрально-временной анализ показал, что первые колебания имели частоту 20–60 цикл/час (периоды от 1 до 5 мин) и являлись сейсмическими волнами Рэлея, тогда как устойчивый широкополосный сигнал на частотах 2–6 цикл/час (периоды 10–30 мин) соответствовал гравитационным волнам цунами.

Таким образом, афтершок 18 сентября 2025 г. вызвал трансокеанское цунами, зарегистрированное как вблизи очага, так и у берегов Южной Америки. Локальное усиление волны определяется островным положением пунктов, морфометрией дна и конфигурацией бухт, а записи глубоководных станций позволяют надёжно отделить отклик уровня моря от непосредственно волн цунами.

16.
НОВЫЙ ГИС-ИНТЕРФЕЙС ПОМОЖЕТ ЖИТЕЛЯМ ПОБЕРЕЖЬЯ АЛЯСКИ ПОДГОТОВИТЬСЯ К СЛЕДУЮЩЕЙ УГРОЗЕ ЦУНАМИ

Е.Н. Трошина[1]

Аляскинский центр землетрясений, Университет Аляски, г. Фэрбанкс
ensuleimani@alaska.edu

Многие прибрежные населённые пункты Аляски находятся в зоне высокой цунамиопасности, однако доступную для каждого жителя информацию об уровне риска и подготовительных мерах найти непросто. Опираясь на многолетний опыт моделирования зон затопления, Аляскинский центр землетрясений (Alaska Earthquake Center, AEC) и Географическая информационная сеть Аляски (Geographic Information Network of Alaska, GINA) в 2021 году начали совместную работу по созданию простых и удобных информационных брошюр о цунами для конкретных населенных пунктов. В этих брошюрах, доступных как в печатном, так и в цифровом формате, показаны зоны возможного затопления, границы зон эвакуации и пункты сбора, а также содержатся сведения об исторических цунами в регионе. Следующим логическим шагом стало бы создание онлайн-портала, где каждый житель мог бы найти доступную информацию о цунамиопасности в его городе или деревне.

В 2025 году, получив финансирование от Федерального агентства по управлению в чрезвычайных ситуациях США (FEMA), AEC и GINA начали разработку веб-интерфейса на платформе ArcGIS Experience Builder, который объединил в одном онлайн-ресурсе информацию о цунамиопасности для 66-ти населённых пунктов на побережье Аляски. *Tsunami.alaska.edu* позволяет местным жителям и туристам в удобном интерактивном формате просматривать зоны и пункты эвакуации, месторасположение важных муниципальных ведомств и служб, а также соответствующую историческую и географическую информацию. Все доступные публикации, данные и дополнительные материалы для каждого места можно скачать непосредственно со страницы этого населённого пункта в интерфейсе. Портал также позволяет увидеть, какие населенные пункты соответствуют критериям «TsunamiReady», программы Национальной метеорологической службы США, а также какую работу ещё необходимо провести, чтобы достичь этого уровня.

17.

К ВОПРОСУ ОБ УТОЧНЕНИИ МАГНИТУДНО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ НА РОССИЙСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

И.П. Медведев, Е.С. Цуканова

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

medvedev@ocean.ru

Использование данных об исторических землетрясениях и результатов численного моделирования позволило провести исследования по уточнению магнитудно-географического критерия опасности цунами на российском побережье Японского моря. На базе детерминистического подхода выполнена комплексная оценка цунамиопасности региона от сильнейших региональных землетрясений. В качестве наихудших сценариев использовались источники цунами, определенные в японском проекте оценки опасности цунами MLIT (2014). Моделирование цунами от 60 потенциальных землетрясений позволило проанализировать максимальные высоты волн вдоль побережья России. Установлено, что критическую угрозу для Хабаровского края и Сахалинской области представляют сейсмические источники, расположенные севернее 39°–40° с.ш. Очаги, находящиеся южнее этой границы, несмотря на высокие значения магнитуды M_w до 7.7, не генерируют опасных волн (высотой более 0.5 м) на российском побережье. Исследование подтвердило, что действующий магнитудно-географический критерий требует уточнения, и обосновало необходимость более дифференцированного подхода к объявлению тревоги цунами. Полученные результаты могут непосредственно использоваться в практике оперативного прогноза.

Дополнительно изучена возможность генерации волн цунами на побережье Приморья сильными локальными глубокофокусными землетрясениями в Японском море. Путем численного моделирования получена оценка вертикальных смещений морского дна и высот возникающих волн для различных сценариев с разной глубиной гипоцентра ($30 \leq d$ (км) ≤ 600) и моментной магнитуды ($6 \leq M_w \leq 9$). Показано, что исторические глубокофокусные события (расположение гипоцентра глубже 300 км) в Японском море не приводили к опасным цунами вследствие малых величин подвижек дна. Выявлена нелинейная зависимость высоты волн на побережье от глубины гипоцентра при фиксированном пороговом значении размаха смещений дна 0.4 м. Максимальные высоты цунами при фиксированном пороговом значении смещений дна и различных значениях M_w достигаются при расположении гипоцентра на глубине 140–200 км. Полученные данные указывают на необходимость пересмотра жесткого ограничения глубины гипоцентра в 120 км при определении цунамигенности землетрясения в оперативной службе, так как сильные события с $M_w > 7.9$ при большей глубине способны генерировать опасные для побережья Приморья волны.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (№ 24-17-00313, https://rscf.ru/project/24-17-00313/).

18.
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЦУНАМИ

К.В. Кислов [1], Ф.Э. Винберг [1], А.С. Фомочкина [1,2], А.И. Филиппова [1,3]

[1] Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва
[2] Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, г. Москва
[3] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк

kvkislov@yandex.ru

Распределенное акустическое зондирование (DAS) – технология использования оптического волокна (ОВ) в качестве линейного набора сейсмических приборов. К основным достоинствам DAS относятся беспрецедентно высокая пространственная плотность измерений и возможность задействовать «темные» (незанятые) волокна в телекоммуникационных кабелях. К сожалению, рабочая длина оптического волокна DAS пока не превышает 150 км. DAS используется для измерения осевой деформации ОВ и редко применяется в низкочастотном диапазоне. Казалось бы, эта технология не подходит для мониторинга цунами. Однако сперва экспериментально, а затем и теоретически были найдены несколько механизмов воздействия волны цунами на донный кабель.

1. Гидростатическое давление действует через эффект Пуассона, вызывая удлинение оптоволокна. Коэффициент Пуассона – отношение относительного сжатия волокна $\Delta d/d$, вызванного увеличением давления, к его относительному удлинению $\Delta l/l$, фиксируемому DAS, – составляет для оптоволокна величину $\mu = 0.17$ (для кабеля $\mu = 0.2 – 0.25$).

2. Волны цунами вызывают пороупругие деформации поверхности дна. Согласно этому эффекту, сигналы, наблюдаемые системой DAS, отражают деформацию волокна при прогибе поверхностного слоя, в который заглублен кабель.

3. При прохождении длиннопериодных волн (цунами и приливных волн) происходит изменение температуры, как результат появления придонных потоков. Поскольку DAS чувствительно к температуре, это дает возможность регистрации таких волн.

4. Участки кабеля, провисшие над впадинами дна, также оказываются полезными для мониторинга цунами. Вызванные придонными потоками колебания провисших участков кабеля дают возможность судить о скорости потока.

Для идентификации и определения характеристик цунами необходимо, чтобы DAS зарегистрировал не менее ¼ длины волны. Далее требуется простое геометрическое вычисление минимального времени пути цунами от предполагаемых источников.

Тем не менее, гораздо более перспективно использование DAS для оперативного определения цунамигенности землетрясения, а именно его параметров: положения гипоцентра, магнитуды и фокального механизма, для чего необходимо максимально полное азимутальное покрытие, которое может быть достигнуто благодаря высокому пространственному разрешению данных DAS при незначительном удалении эпицентра рассматриваемого события от оптоволоконного кабеля.

Выводы: Привлечение данных DAS для предупреждения о цунами перспективно, однако прокладка спецкабеля на данном этапе не представляется рентабельной.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН.

19.
О НЕОБХОДИМОСТИ РАССМОТРЕНИЯ ЦУНАМИ КАК ЧАСТИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АЭС

А.В. Тарасенко[1,2], А.Г. Река [1], А.А. Калютик[2]

[1]ООО «РИСК МОНИТОР», г. Всеволожск
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург

tarasenko.av@risk-monitor.ru

Вероятностный анализ безопасности (далее ВАБ) необходим для оценки вероятности тяжёлой аварии и большого аварийного выброса энергоблока АЭС на основе статистики об исходных событиях и отказах отдельных элементов. Его выполнение обязательно для обоснования безопасности АЭС. В том числе ВАБ учитывает риски от внешних воздействий (далее ВВ) природного и техногенного характера.

Из-за масштабного влияния землетрясений на энергоблок и особых сложностей с их моделированием, они рассматриваются отдельно от всех прочих ВВ. В актуальных руководствах по безопасности задачи ВАБ сейсмических воздействий (РБ-123-17) отделены от ВАБ ВВ (РБ-021-21). В связи с этим, в РФ работы по ВАБ внешних и сейсмических воздействий зачастую выполняются по отдельности, в разное время и, возможно, разными организациями. Стоит отметить, что рекомендации МАГАТЭ в части совместного учёта землетрясений и внешних воздействий (включая цунами) присутствуют в документах SSG-3 Rev. 1 и IAEA-TECDOC-1937, но приводятся весьма кратко и размыто. При этом соблюдение положений этих документов в РФ не носит обязательный характер.

Очевидно, что совместное воздействие цунами и землетрясений, представляет значительную угрозу для прибрежных энергоблоков. Возможны аварийные последовательности, в которых происходит повреждение оборудования сперва землетрясением, а затем затопление резервных элементов цунами. Такая авария произошла на АЭС Фукусима-1: потеря внешнего электроснабжения являлась прямым следствием землетрясения, а отказ дизель-генераторов был вызван воздействием волн цунами.

Предлагается в следующей редакции руководства РБ-123-17 привести рекомендации о необходимости учёта цунами как части именно ВАБ сейсмических воздействий. Данный вопрос имеет огромную значимость для обоснования безопасности будущей Приморской АЭС, а также энергоблоков, сооружаемых в заграничных сейсмоопасных районах. Многие такие проекты напрямую используют Российские руководства по безопасности, либо выстраивают свою документацию на их основе.

Для корректного включения цунами в состав ВАБ сейсмических воздействий необходимо оценить связь между пиковой прибрежной амплитудой цунами и ускорением нулевого периода землетрясения на площадке АЭС (основная характеристика землетрясения в ВАБ). Эта зависимость может быть получена совместным выполнением вероятностного анализа цунамиопасности (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis) и вероятностного анализа сейсмической опасности. Суть этих методик заключается в получении связи характеристик воздействия (высоты волн / ускорений нулевого периода) от их повторяемости в зависимости от расстояния, свойств грунта и магнитуды возможных землетрясений близлежащих сейсмических очаговых зон.

Очевидно, что некоторые очаги (отдалённые, в глубине материка) не смогут породить волну достаточной высоты, чтобы представлять опасность для АЭС. Таким образом, для более реалистичного моделирования возможно разделение очаговых зон на цунамигенные и нецунамигенные. Если выполнить анализ сейсмической опасности для них

отдельно, то возможно получить условную вероятность совместного воздействия цунами и землетрясения на площадку АЭС для любой интенсивности землетрясения. Однако такая переоценка затруднительна и требует проведение дополнительных расчетных исследований.

20.
LITUYA BAY, TRACY ARM… ГДЕ ЖДАТЬ СЛЕДУЮЩИЙ ОБВАЛ В ГОРАХ? ОТ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПОЛЗНЕЙ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЦУНАМИ

Е.Н. Трошина[1]

Аляскинский центр землетрясений, Университет Аляски, г. Фэрбанкс
ensuleimani@alaska.edu

На Аляске произошли два цунами с самыми высокими значениями наката за всю историю наблюдений. В 1958 году оползень в заливе Литуйя вызвал цунами с максимальной известной высотой наката 525 м, а в августе 2025 года массивный оползень, сошедший во фьорд Трейси-Арм на юго-востоке Аляски, вызвал цунами с высотой наката 481 м — второй по величине за всю историю наблюдений. Оползень в Трейси-Арм произошёл на склоне, который ранее не рассматривался как представляющий особую опасность. Вместе с другими недавними оползнями на Аляске это событие подчёркивает сложность оценки цунамиопасности на нескольких тысячах километров береговой линии, где отступление ледников и связанные с этим изменения состояния склонов могут способствовать их неустойчивости.

В настоящее время несколько проектов создают основу для более комплексного подхода к оценке опасности оползневых цунами на Аляске. Интенсивный мониторинг оползня Барри-Арм в заливе Принца Вильяма стал испытательной площадкой для методов наблюдения за оползнями, их сейсмического обнаружения и оценки параметров источника, а также сравнительного анализа численных моделей оползневых цунами. На уровне всего штата был создан Реестр Оползней Аляски — постоянно пополняемая база данных ранее известных и недавно выявленных оползней, которая позволяет определять районы, требующие дальнейшего изучения.

В рамках новой совместной программы Аляскинского центра землетрясений (AEC) и Геологической службы США (USGS) данные региональной сейсмической сети будут использоваться для обнаружения и определения местоположения крупных оползней и оценки их объёма в реальном времени. Сейсмические наблюдения сопоставляются с данными дистанционного зондирования и полевых исследований; изучаются возможные предвестники оползней; разрабатываются методы оценки возможных последствий вызванных ими цунами. AEC создаёт собственную систему численного моделирования оползневых цунами на основе модели D-Claw. Программа также предусматривает создание механизмов передачи информации об оползнях для её практического использования службами предупреждения о цунами.

В совокупности эти исследования представляют собой шаг к созданию на Аляске комплексной системы оценки опасности оползневых цунами, объединяющей реестры оползней, целевой мониторинг потенциально опасных склонов, региональное сейсмическое обнаружение, оценку параметров источника, численное моделирование, а в конечном итоге — получение оперативной информации для предупреждения о цунами.

21.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЦУНАМИ ОТ СХОДА ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ В РАЙОНЕ о. ПАРАМУШИР

И.С. Костенко, А.И. Зайцев

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

i.kostenko@skbsami.ru

На основе гидрографических исследований района, расположенного к северо-западу от о. Парамушир (Курильские острова) [1], были обнаружены подводные оползни, которые могут являться потенциальным источником цунами в случае их схода. Согласно имеющейся информации, эти оползни относятся к числу крупнейших в северной части Курильской гряды: их объем достигает 1.0–1.9 км³. Именно они были выбраны в качестве основы для оценки цунамиопасности с целью моделирования генерации волн и анализа их воздействия на прибрежную зону. На основе этих данных были построены гипотетические подводные оползни.

Проведена серия численных расчетов нескольких сценариев возникновения длинных волн от схода гипотетических подводных оползней. Проведен анализ схода оползней, распространения волн по акватории, районов наиболее интенсивного их проявления и колебаний уровня моря у побережья. Показано, что на характер перемещения подводных оползневых тел существенное влияние оказывает прилегающая батиметрия морского дна, что, в свою очередь, напрямую влияет на генерацию волн цунами.

Выявлено, что наибольшие колебания уровня моря от всех случаев цунами расположены в районе очагов и на близлежащих к ним побережьях, где происходит фокусировка энергии. А по мере удаления от очагов происходит уменьшение высот волн, что свидетельствует о достаточно локальном характере этого явления. Наиболее интенсивно цунами от всех очагов проявляются на северном и западном побережьях острова Парамушир (наибольшие значения 11.5 м), а также на южном побережье острова Атласова и северном побережье острова Анциферова. В районе крупнейшего населенного пункта Северо-Курильск (о. Парамушир), который расположен в достаточно узком и мелководном Втором Курильском проливе, колебания уровня моря имеют незначительные высоты. В связи со слабой заселенностью побережья исследуемых островов в районе максимального проявления волн на побережье негативное воздействие (цунами-риск) при сходе подводных оползней в пределах рассматриваемых параметров будет незначительным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00367.

Литература

1. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Погребенная подводная вулканическая зона к западу от о. Парамушир (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 69–85.

22.

ЧИСЛО ФРУДА В ЗАДАЧЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ЦУНАМИ: АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

М.В. Лебков[1,2,a], М.А. Носов[1,3,b]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
[2]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
Российская Федерация, 117997, г. Москва, Нахимовский проспект, д.36
[3]Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН
Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б

[a]lebkov.mv19@physics.msu.ru, [b]m.a.nosov@mail.ru

Число Фруда, определяемое как отношение скорости оползневого тела к скорости длинных волн или как квадрат этого отношения, является одним из критериев подобия в задаче о генерации цунами подводными оползнями. Известно, что при прохождении числом Фруда критического значения, равного единице, меняется режим генерации волн, а при числах Фруда, близких к единице, генерация волн становится очень эффективной (резонанс Праудмена), в результате чего резко возрастает сила волнового сопротивления. Таким образом, для задачи об оползневых цунами вопрос о возможности достижения числом Фруда критического значения в реальных геофизических условиях имеет важнейшее значение.

В качестве модели подводного оползня мы рассматриваем движение недеформируемого оползневого тела из состояния покоя вниз по плоскому откосу под действием скатывающей силы, силы Архимеда и силы сопротивления, включающей сухое и турбулентное трение. Задача сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению. В результате решения этого уравнения получено аналитическое выражение, описывающее зависимость числа Фруда от времени. Установлено, что зависимость характеризуется единственным максимумом, величина которого зависит от трех безразмерных параметров: отношения плотностей оползневого тела и воды, отношения коэффициента сухого трения к тангенсу угла наклона дна и коэффициента сопротивления. Показано, что в реалистичном диапазоне параметров максимальное число Фруда не достигает критического значения.

23.
ПРОЯВЛЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЦУНАМИ В БУХТЕ СЬЮТАДЕЛЬЯ, БАЛЕАРСКИЕ ОСТРОВА

Д.И. Пилик[1], А.Б. Рабинович[1]

[1]Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

dariapilik12@mail.ru

Метеорологические цунами (метеоцунами) – это явление, имеющее схожие пространственные и временные масштабы с классическими волнами цунами, но возникающее преимущественно из-за резких скачков атмосферного давления. Перепады давления в атмосфере могут быть вызваны длинными гравитационными волнами в атмосфере, прохождением атмосферных фронтов или линий шквалов. Метеорологические цунами фиксируются в разных районах Мирового океана, однако в некоторых местах они проявляются регулярно и могут носить катастрофический характер. Сюда относятся бухты в Хорватии (бухты Вела-Лука и Стари Град), Испании (бух. Сьютаделья), Японии (бух. Нагасаки), в США (Великие озера) и других местах. Данная работа посвящена изучению проявления метеоцунами в бухте Сьютаделья на о. Менорка (Балеарские острова), где метеоцунами наблюдаются наиболее часто.

В бухте Сьютаделья метеоцунами носят локальное название «риссага», они наблюдаются ежегодно в период с мая по сентябрь. Характерные высоты волн риссага достигают 1-2 м, но с частотой раз в 5-6 лет наблюдаются аномальные явления, приводящие к разрушениям прибрежной инфраструктуры и даже гибели людей. Для подробного изучения механизмов формирования и трансформации волн метеоцунами в бухте Сьютаделья Университетом Балеарских островов был проведен Гидрофизический эксперимент LAST-97. Он заключался в развертывании системы наблюдений за уровнем моря с помощью датчиков придонного давления, 4 из которых находились на шельфе о. Менорка, два – в бухте Сьютаделья, один – в смежной бухте Платха Гран. Флуктуации атмосферного давления фиксировались тремя микробарографами, установленными на суше вблизи бухты. В результате были получены длительные синхронные ряды наблюдений за уровнем моря и атмосферным давлением, которые были использованы в работе.

За время проведения эксперимента было зарегистрировано 12 событий риссага с высотами волн от 0.5 до 1.62 м. Пять наиболее мощных событий имели высоты волн более 1 м. Для всех событий фиксировались максимальная высота волны в вершине бухты, размах атмосферного колебания, сгенерировавшего метеоцунами, рассчитывался коэффициент генерации и коэффициент усиления. Также по данным микробарографов рассчитывались скорость и направление распространения атмосферных возмущений. Эти параметры играют наиболее важную роль при формировании волн риссага в исследуемой бухте. Сильнейшие события вызывались атмосферными возмущениями, распространявшимися в западном секторе направлений (250° до 275°) со скоростями от 12 до 24 м/с.

Спектральный анализ фоновых колебаний уровня моря позволил оценить периоды собственных колебаний бухт Сьютаделья (10.5, 4.2, 2.4 мин) и Платха Гран (5.5, 2.1 мин) и построить передаточные функции от шельфа к бухтам. С помощью этих функций для выделенных событий для станций внутри бухт рассчитывались теоретические спектры и сравнивались с наблюденными, при этом было получено очень хорошее соответствие. Проведенное исследование позволило выявить физический механизм генерации экстремальных событий (волн риссага) в бухтах западного побережья о. Менорка и выявить критические параметры атмосферных процессов, ответственные за их формирование.

24.

ЗАПИСЬ СИЛЬНЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ ЦУНАМИ И ПАЛЕОЦУНАМИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Н.Г. Разжигаева[1], Л.А. Ганзей[1], Т.А. Гребенникова[1], Т.Р. Макарова[1], А.О. Горбунов[2], В.М, Кайстренко[2]

[1]Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток
[2]Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

nadyar@tigdvo.ru

Поиск отложений палеоцунами проведен на побережье 19 бухт Восточного Приморья (от бух. Удобная до бух. Окуневая), 10 бухт Южного Приморья и на о. Русский. Цель – найти наиболее полные записи цунами в голоцене, включая цунами 20 века, оценить их параметры в бухтах, отличающихся строением подводного берегового склона и побережья, провести корреляцию с данными по сопредельным территориям и выяснить повторяемость крупных событий в регионе. Основными объектами были береговые низменности за пределами зоны влияния сильных штормов. Наилучшая сохранность осадков современных и палеоцунами отмечена в бухтах, приуроченных к низкопорядковым водотокам. Проанализирован состав цунамигенных песков, установлены их сходство и различие с другими прибрежно-морскими фациями и определены источники поступления материала.

Цунами 1983, 1993 гг. оставили песчаные покровы и отдельные пятна песка, которые удалось найти в кровле разрезов спустя 20–30 лет после событий. Как правило, отложения встречаются на побережье бухт, где величина заплеска волн превышала 3 м. Наиболее детально изучены покровы в бух. Валентин, где закартированы зоны осадконакопления. Состав диатомовых водорослей в цунамигенных песках показал, что волны цунами переносили как морские и солоноватоводные, так и пресноводные виды, переотложенные из берегового озера. Основная поставка материала шла с глубин менее 5 м. Сделано предположение, что для этой части побережья наиболее опасными являются цунами с очагами около о. Окусири. Цунами, имевшие очаги, расположенные к северо-западу от Хонсю, проявлялись слабее. Отложений цунами 1940 г. достоверно не обнаружено. Наиболее подробная запись палеоцунами восстановлена в бух. Кит, где найдены следы цунами 1993 г., 1741 гг. и 3–4 позднеголоценовых события (возраст ~2.1–2.3, 1.7, 0.8 тыс. кал. л.н.). Высота заплеска превышала 3 м, дальность – несколько сотен метров. Наиболее древнее событие зафиксировано в разрезах на побережье бух. Триозерье, оно датировано ~3.5–3.2 тыс. кал. л.н., заплеск цунами можно оценить не менее 3 м, была затоплена вся береговая низменность. След близкого по возрасту цунами обнаружен в отложениях палеоозера на побережье бухты Бойсмана, где в прослое торфа возрастом ~3.2–3.1 тыс. кал. л.н. найдены многочисленные поломанные створки пресноводных видов диатомей и единичные морские формы. Повреждение мелких створок может происходить при проявлении цунами в зимний период, когда взламывается лед, усиливавший эрозионную силу волны. В бух. Триозерье найдены и следы цунами 1026 г. В Южном Приморье цунамигенные отложения практически не встречаются, о прохождении цунами можно судить лишь по появлению среди пресноводных комплексов морских диатомей, в том числе видов открытого моря. Исключением является закрытая бух. Спокойная на о. Русский, на побережье которой найдены многочисленные прослои цунамигенных песков, оставленных за последние 700 лет, высота заплеска не превышала 1.5 м, зона затопления достигала 250 м. В целом, летопись палеоцунами, восстановленная по геологическим следам, не может рассматриваться, как полная. Имеющийся материал позволяет предположить, что крупные цунами в Япономорском регионе происходят каждые 200 лет, но не исключены ситуации,

когда события происходили через небольшие промежутки времени. Судя по залеганию отложений, палеоцунами были более интенсивными, чем исторические события.

25.
ПРОЯВЛЕНИЕ УДАЛЕННЫХ ЦУНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Ю. Медведева[1]

[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

Alisa.bannikova@gmail.com

Японское море является одним из цунамиопасных регионов Дальнего Востока России. Цунами здесь могут возникать как от локальных землетрясений, так и от удаленных мегаземлетрясений, происходящих в Тихом океане. Оценка вклада удаленных источников в цунамиопасность Японского моря необходима для уточнения критериев тревоги цунами и долгосрочного прогноза. Целью данной работы является анализ проявления удаленных цунами в Японском море на основе численного моделирования.

Для моделирования использовалась численная модель, аналогичная TUNAMI (Fine et al., 2013), реализующая конечно-разностную аппроксимацию уравнений мелкой воды в сферических координатах. Входные данные: батиметрия GEBCO-2014 с шагом 2′, береговая линия по данным NASA SRTM3. Сейсмические источники задавались моделью Окада (1985) и моделями конечного разрыва. Валидация проводилась по записям мареографов и данным заплесков.

В работе рассмотрены удаленные события: Чилийское цунами 1960 г. (M_w 9.5), цунами Тохоку 2011 г. (M_w 9.1), а также Камчатские цунами 1952 г. (M_w 9.0) и 2025 г. (M_w 8.8). Установлено, что наибольшие высоты в Японском море среди рассмотренных событий были зафиксированы от Чилийского цунами 1960 г. Для этого события «средние» высоты вдоль побережья Японского моря достигали 20–30 см на северо-востоке. Цунами Тохоку 2011 г. составило в Японском море 0.1–0.2 м, а на отдельных участках до 0.6–0.8 м. Для камчатских цунами 1952 и 2025 годов максимальная высота в Охотском море была в 8 раз выше, чем в Японском. В 1952 году на Камчатке высота цунами как в Охотском, так и в Японском была в 1.5-2 раза выше, чем в 2025 году. Сравнение показало, что для Чили 1960 и Тохоку 2011 высоты в Охотском море были примерно в 2 раза больше, чем в Японском.

По данным численного моделирования, среди удаленных цунами чилийские землетрясения с $Mw \geq 9.0$ вызывают наибольшие высоты в Японском море (до 30 см и более). Цунами от камчатских источников проявляются в Японском море слабее, и слабее по сравнению с Охотским. Полученные количественные оценки могут быть использованы для уточнения магнитудно-географического критерия объявления тревог цунами на российском побережье.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-17-00313.

Литература

1. Fine, I. V., Kulikov, E. A., & Cherniawsky, J. Y. (2013). Japan's 2011 tsunami: Characteristics of wave propagation from observations and numerical modelling. *Pure and Applied Geophysics*, *170*(6-8), 1295–1307. https://doi.org/10.1007/s00024-012-0555-8
2. Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull. Seismol. Soc. Am. 75, 1135–1154.

26.

ПРОНИКНОВЕНИЕ ТРАНСОКЕАНСКИХ ЦУНАМИ В ЯПОНСКОЕ МОРЕ

Е.С. Цуканова[1], И.В. Файн[2]

[1] Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва
[2] Институт наук об океане, г. Сидней, Канада

tsukanova.es@ocean.ru

Японское море в значительно мере подвержено угрозе волн цунами, при этом основную опасность для его побережья представляют региональные источники. Однако трансокеанские цунами, возникающие в Тихом океане, также способны проникать в Японское море через три основных пролива – Корейский, Цугару и Лаперуза. Целью работы является оценка фильтрующих свойств этих пролив при прохождении через них трансокеанских цунами.

Для исследования применялось численное моделирование распространения цунами и анализ потока энергии через проливы. Показано, что большая часть энергии трансокеанских цунами поступает в Японское море через проливы Цугару и Лаперуза, тогда как вклад Корейского пролива оказывается сравнительно небольшим.

Передаточные функции проливов значительно отличаются друг от друга. Пролив Цугару действует как узкополосный фильтр, наиболее эффективно пропуская волны с периодом около 1.5 ч. Пролив Лаперуза характеризуется более широкой полосой пропускания и максимальным откликом для периодов около 3 ч. Полученные передаточные функции были использованы для анализа исторических трансокеанских цунами, когда волны проникали в акваторию Японского моря: Чилийского цунами 1960 г., Аляскинского цунами 1964 г. и Тохоку цунами 2011 г.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-17-00313.

27.

АСИМПТОТИКИ ДЛИННЫХ ВОЛН, ОПИСЫВАЮЩИХ СЕЙШИ В ПРОТЯЖЕННЫХ БАССЕЙНАХ С ПОЛОГИМИ БЕРЕГАМИ, С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ТРЕНИЯ И ЗАПЛЕСКА.

С.Ю.Доброхотов[1], А.Н.Кутлубаева[1,2], Д.С.Миненков[1]

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва
[2]Московский физико-технический институт (НИУ), г. Москва

minenkov.ds@gmail.com

При моделировании сейсмогенных сейшевых колебаний в замкнутых водоемах с вертикальными стенками используются результаты спектральной теории для задач с краевыми условиями Неймана и Стеклова (см. [1,2,3] и библиографию внутри). Мы рассматриваем ситуацию, когда берега в водоемах пологие и используем приближение мелкой воды (длинных волн) с учетом трения (Релея) (см. [4]) и нелинейных эффектов. Как правило, в протяженных бассейнах нелинейные эффекты играют роль в окрестности береговой линии, поэтому согласно недавним результатам [5,6], метод построения заключается в изучении подходящих решений линеаризованной задачи (с особыми условиями на границе – ограниченности решения) и последующего применения модифицированного преобразования Карриера – Гринспана, определяющего асимптотику решения нелинейной системы и, в частности, позволяющего описать процесс заплеска сейшевых волн на берег.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 24-11-00213.

Литература.

1. С. Ф. Доценко, Н. А. Миклашевская, Генерация сейш при перемещении барических образований // Морской гидрофизический журнал. 2007. №6.
2. Д. Н. Валеева, М. А. Носов, Оценка амплитуды сейш, возбуждаемых удаленными землетрясениями в малых водоемах суши // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2025. 61 (2) 260–272
3. С. А. Назаров, Разномасштабная локализация собственных функций смешанных краевых задач со спектральным условием Стеклова // Изв. РАН. Сер. матем. 2027. 91 (2)
4. Должанский Ф В, Крымов В А, Манин Д Ю, Устойчивость и вихревые структуры квазидвумерных сдвиговых течени // УФН. 1990. 160 (7) 1–47
5. S. Yu. Dobrokhotov, D. S. Minenkov, V. E. Nazaikinskii, Asymptotic Solutions of the Cauchy Problem for the Nonlinear Shallow Water Equations in a Basin with a Gently Sloping Beach // Russian J. Math. Phys. 2022. 29 28–36
6. S. Yu. Dobrokhotov, V. A. Kalinichenko, D. S. Minenkov, V. E. Nazaikinskii, Asymptotics of Long Standing Waves in One-Dimensional Pools with Shallow Banks: Theory and Experiment // Fluid Dynamics. 2023. 58 1213–1226

28.
МЕТОД ЭМПИРИЧЕСКИХ МОД ДЛЯ РАСЧЕТА СЕЙШ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Д.Н. Валеева[1], М.А. Носов[1,2]

[1]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
[2] Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск

valeevadn@my.msu.ru

В докладе будет представлен метод воспроизведения сейсмогенных сейш в замкнутых водоемах суши, основанный на линейной потенциальной теории гравитационных поверхностных волн. Задача о генерации сейш рассматривается в неинерциальной системе отсчета, связанной с чашей водоема, которая предполагается недеформируемой. Источником волн служат горизонтальные сейсмические движения чаши водоема. Вкладом вертикальных движений мы пренебрегаем.

Метод предполагает представление стоячих волн в виде разложения Фурье по эмпирическим нормальным модам, которые определяются из решения смешанной спектральной задачи Стеклова-Неймана, сведенной к эквивалентному интегральному уравнению [1]. Решение задачи разбито на два этапа. На первом этапе по батиметрическим данным водоема вычисляются собственные функции спектральной задачи. На втором этапе по заданному сейсмическому ускорению рассчитываются сейшевые колебания водоема как суперпозиция конечного числа эмпирических мод. Вычислительно трудоемкая часть задачи — расчёт эмпирических мод — может быть решена заранее. Задача второго этапа — расчет реакции водоема на сейсмическое событие — может быть выполнен в оперативном режиме, для этого необходимо наличие измеренной или синтетической акселлерограммы.

Для иллюстрации возможностей метода проведено моделирование отклика водоема с реальной батиметрией на реальное сейсмическое воздействие. Батиметрия соответствует оз. Колдун (Ивановская область), имеющему площадь 0.2 га и максимальную глубину 10.8 м. В качестве источника сейсмических колебаний выбрано землетрясение, произошедшее 6 февраля 2023 г. в Турции (01:17:34 UTC; эпицентр 37.226°N, 37.014°E, глубина гипоцентра 10 км, Mw=7.8). Использованный сигнал зарегистрирован сейсмометром кафедры физики Земли физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на эпицентральном расстоянии около 2050 км. Результаты расчетов сопоставлены с данными численного моделирования, выполненного с применением линейной теории длинных волн [2].

Литература

1. Валеева, Д. Н. Расчет сейсмогенных сейш методом эмпирических мод / Д. Н. Валеева, М. А. Носов // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2026. – Т. 529, № 1. – С. 132-139. – DOI 10.7868/S3034506526070147. – EDN ZIDULY.
2. Валеева, Д. Н. Оценка амплитуды сейш, возбуждаемых удаленными землетрясениями в малых водоемах суши / Д. Н. Валеева, М. А. Носов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2025. – Т. 61, № 2. – С. 260-272. – DOI 10.31857/S0002351525020086. – EDN GJBOQZ.

29.

АЗИМУТАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ЦУНАМИ: АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА И ЕЕ ПРОВЕРКА

Т.А. Строгов[1], М.А. Носов[1,2]

[1]Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва
[2]Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск

strogovtixon@yandex.ru

Исследование азимутального распределения периодов волн цунами имеет большое прикладное значение для решения задач, связанных с распространением диспергирующих цунами в открытом океане. Известно [1], что расстояние, на котором проявления фазовой дисперсии становятся значимыми, пропорционально кубу доминирующего периода волнового пакета. Очаги цунами обычно имеют вытянутую форму, вследствие чего длины и периоды волн, излучаемых в различных азимутальных направлениях существенно различаются. В ранее опубликованных работах, посвященных азимутальному распределению периодов цунами, как правило, речь шла о численном моделировании [2,3] или анализе данных наблюдений [4,5]. В недавно опубликованной работе [4] нами была аналитически получена формула, позволяющая для океана фиксированной глубины по форме начального возвышения водной поверхности в очаге рассчитать спектр волн цунами на большом удалении от источника. Эта формула, в частности, позволяет рассчитать доминирующий период цунами в зависимости от азимутального направления. В докладе будет кратко описан способ получения формулы и представлена ее проверка с использованием модельных источников и аналитических расчетов волновых профилей по формуле Пуассона. В ходе исследования установлено, что асимптотическая формула дает точные значения доминирующих периодов на большом расстоянии от источника (порядка 10 размеров источника). Вблизи источника, фактически на его границе, формула все еще может быть использована, но только для грубых оценок, т.к. точность определения периода, падает на 20-30% .

Литература

1. Пелиновский Е. Н. Гидродинамика волн цунами/ИПФ РАН //Нижний Новгород. – 1996.
2. Hatori T. Directivity of tsunamis // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1963. – Т. 41. – С. 61-81.
3. Iwasaki S. I. The wave forms and directivity of a tsunami generated by an earthquake and a landslide // Science of Tsunami Hazards. – 1997. – Т.15. - №1. – С. 23-40.
4. Соловьев С. Л., Куликов Е. А. О восстановлении параметров очага цунами из спектральных характеристик волн у берега //Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1987. – Т. 23. – №. 1. – С. 91.
5. Мазова Р. Х. и др. Анализ спектральных характеристик черноморских цунами //Труды НГТУ им. РЕ Алексеева. – 2013. – №. 2 (99). – С. 52-66.
6. Строгов Т. А., Зарубина А. И., Носов М. А. - Азимутальное распределение доминирующих периодов волн цунами, формируемых косейсмическими смещениями дна //Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2025. – Т. 525. - №1. – С. 152-159.

30.
ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ОДНОМЕРНОЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ НАД НАКЛОННЫМ ДНОМ

А.В. Аксенов, Л.О. Мальгина

Механико-математический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

aksenov@mech.math.msu.ru

Нелинейная система уравнений мелкой воды над наклонным дном сводится точечным преобразованием Carrier–Greenspan [1] к линейной системе уравнений [2,3]. Получено комплекснозначное семейство решений линейной системы уравнений, инвариантных относительно однопараметрической группы преобразований. Выделено двухпараметрическое семейство решений нелинейной системы уравнений, описывающих набегание волны на берег и отражение от него. Обнаружены эффекты заплеска и отката волны. Приведены примеры таких решений.

Основные результаты исследования опубликованы в статье [4].

Литература

1. Carrier G.F., Greenspan H.P. Water waves of finite amplitude on a sloping beach // J. Fluid Mech. 1958. V. 4, No. 1. P. 97–109.
2. Pelinovsky E.N., Mazova R.Kh. Exact analytical solutions of nonlinear problems of tsunami wave run-up on slopes with different profiles // Natural Hazards. 1992. V. 6. No. 3. P. 227–249.
3. Доброхотов С.Ю., Тироцци Б. Локализованные решения одномерной нелинейной системы уравнений мелкой воды со скоростью $c = \sqrt{x}$ // Успехи матем. наук. 2010. Т. 65. Вып. 1. С. 185–186.
4. Аксенов А.В., Мальгина Л.О. Точные решения системы уравнений мелкой воды над наклонным дном: набегание волны на берег // Вестник МГУ. Серия 1. Математика. Механика. 2026. № 1. С. 70–73.

31.
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БАТИМЕТРИИ GEBCO С ДАННЫМИ МОРСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ КАРТ

А.В. Большакова, С.В. Колесов, М.А. Носов

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

annabolshakova@list.ru

Глобальные цифровые модели рельефа дна широко используются при численном моделировании цунами. В публикациях, посвященных численному моделированию, систематически возникают нарекания к точности глобальных цифровых моделей рельефа дна. Особенно это касается шельфовых и мелководных областей. Например, в работе [1] были выявлены более чем двухкратные расхождения данных цифрового атласа GEBCO и прямого измерения глубин судовым эхолотом в районе Центральных Курил. В работе [2] показано, что батиметрические данные GEBCO в районе моря Флорес соответствуют результатам прямых измерений в 96% случаев для глубоководных участков, тогда как для мелководья этот показатель снижается до 0,9%.

Целью настоящей работы является проверка точности глобальной цифровой модели рельефа дна GEBCO в регионе 120º-170ºE, 30º-60ºN и анализ того, как эта точность меняется со временем — при выпуске новых версий. Для проверки в качестве эталона были использованы точки промера глубин с 248 морских навигационных карт TRANZAS. Эти данные представляли собой массив в формате «широта-долгота-глубина», включающий в себя около 270 тыс. точек. Для сравнения использовались цифровые атласы GEBCO 2008, 2014, 2018, 2023, 2026 гг. Данные GEBCO интерполировались билинейным методом на координаты точек промера глубин TRANZAS. В докладе будут представлены результаты статистического анализа соответствия глубин TRANZAS и GEBCO как для всего массива данных, так и по некоторым отдельным регионам.

Литература

1. Nosov M. A., Kolesov S. V. Optimal initial conditions for simulation of seismotectonic tsunamis // Pure and Applied Geophysics. 2011. Vol. 168, no. 6-7. P. 1223–1237.
2. Kintan Maulidina, Masita Dwi Mandini Manessa, Rahmad Kurniawan. Accuracy test of GEBCO bathymetry data in the Flores Sea. Proc. SPIE 12977, Eighth Geoinformation Science Symposium 2023: Geoinformation Science for Sustainable Planet, 129770Q (29 Jan 2024); https://doi.org/10.1117/12.3009694