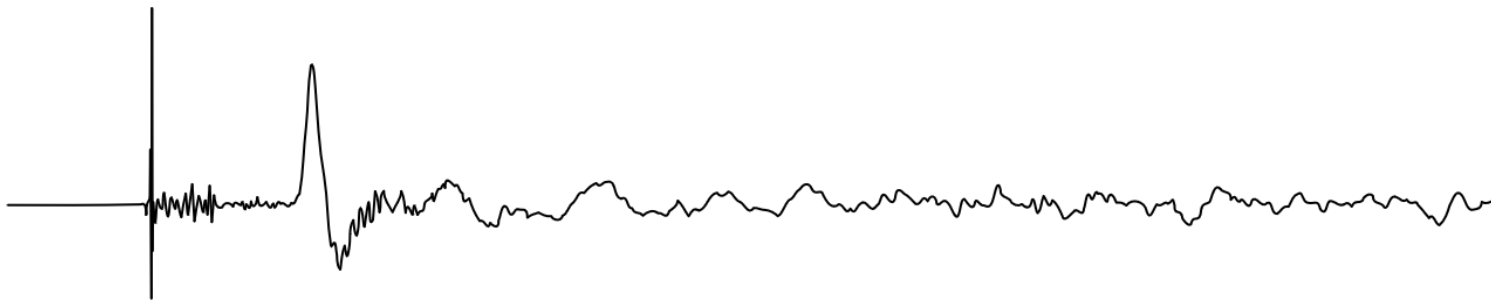


НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦУНАМИ
ПРИ ОТДЕЛЕНИИ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



**V всероссийская научная конференция
с международным участием
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ».**
Конференция приурочена к годовщинам двух знаковых
событий: 30-летию Шикотанского и 20-летию
Индонезийского цунами.

12-13 ноября 2024 г

Сборник тезисов докладов

V всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ». Конференция приурочена к годовщинам двух знаковых событий: 30-летию Шикотанского и 20-летию Индонезийского цунами. 12-13 ноября 2024 г. Сборник тезисов докладов / Под ред. М.А.Носова. - М.: Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2024 г.

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

© Научный совет по проблемам цунами
ОНЗ РАН, 2024

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;
к.ф.м.н. Т.Н. Ивельская;
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

Конференция проводится в очно-дистанционном формате в ИО РАН и на платформе

.....

1.

МЕГА-ЦУНАМИ МИРОВОГО ОКЕАНА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИНА И ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ В КАТАЛОГАХ

В.К.Гусяков

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

gvk@sscc.ru

В работе [1] вводится понятие мега-цунами, как события, при котором максимальный заплеск превысил 35 м. В соответствии с этим критерием авторы выделяют около 40 событий мега-цунами, происшедших в Мировом океане с 1674 года по настоящее время. Анализ приведенного в [1] списка показывает, что 36 из этих 40 цунами являются локальными событиями обвального генезиса, происшедшими главным образом во фьордах и заливах, а также во внутренних водных бассейнах. Из реально масштабных разрушительных цунами, затронувших океанские бассейны целиком и приведших к значительному материальному ущербу и многочисленным человеческим жертвам, в этом списке присутствуют только 5 (цунами 1896, 1946, 1964, 2004 и 2011 гг.).

Ранее в работе [2] был использован другой критерий для выделения мега-цунами в исторических каталогах – наличие заплесков более 5 м на удалении более 5000 км от очага. В соответствии с этим критерием в глобальном историческом каталоге выделяется около 20 трансокеанских мега-цунами, все из которых являются сейсмогенными, порожденными сильнейшими (с магнитудой порядка 9) субдукционными землетрясениями в зонах островных дуг и активных континентальных окраин. В очагах таких землетрясений осуществляется магистральный разрыв вдоль главной литосферной границы, отделяющей океаническую кору от перекрывающего ее островного клина, смещения по которому могут достигать 25-50 м, что приводит к очень значительным (тысяча и более кубических километров) объемам перемещения морского дна. Для всех из них характерно наличие высоких заплесков (до 30-40 м), наблюдавшихся на протяженных участках побережья (до 500-1000 км).

В XX веке среди таких событий были Алеутские цунами 1946 и 1957 годов, Камчатское цунами 1952 года, Чилийское цунами 1960 года и Аляскинское цунами 1964 года. В XXI веке в них добавились Индонезийское цунами 2004 года и цунами Тохоку в Японии 2011 года. Хотя мега-цунами в таком понимании в целом составляют менее 1% от всех случаев цунами, на их долю приходится более чем 50% всех жертв цунами и более 70% наносимого ими ущерба. Такого рода события вносят основной вклад в общую цунамиопасность побережья. Этот вклад особенно значителен для побережий окраинных морей, не имеющих перед собой зон субдукции (типа Охотского и Берингова), для которых обычные субдукционные землетрясения с магнитудой 7.0-8.5 не представляют особой опасности.

В докладе анализируются оба возможных подхода к определению понятия мега-цунами, прослеживается история термина и обсуждается его физическое содержание.

Литература:

[1] Ferrer M., González-de-Vallejo, L.I. Global Historical Megatsunamis Catalog (GHMCat). *GeoHazards* **2024**, 5, 971–1017. <https://doi.org/10.3390/geohazards5030048>

[2] Гусяков В.К. Сильнейшие цунами мирового океана и проблема безопасности морских побережий // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2014, Т.90, №5, С.496-507.

2.

ИЗМЕНЕНИЯ ПОБЕРЕЖИЙ ИНДОНЕЗИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ 26.12.2004 И 28.03.2005 И ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЕ В ИНТЕРСЕЙСМИЧЕСКИЙ ПЕРИОД

Т.К. Пинегина

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

pinegtk@yandex.ru

Во время Индонезийского землетрясения 26.12.2004 г. с Mw 9.2, вертикальные косейсмические деформации произошли на северо-западном побережье о. Суматра, на о. Симелу, на Андаманских и Никобарских островах. Общая протяженность очаговой зоны, в пределах которой наблюдались вертикальные движения побережий превысила 1000 км. На побережьях о. Суматра максимальная амплитуда опускания достигала 50 – 100 см, а на побережьях Никобарских островов – 150-210 см. В тоже время, побережья Андаманских островов (за исключением их самых восточных окраин) и северо-западная часть о. Симелу испытали косейсмические поднятия, максимальные амплитуды которых достигали 150-210 см. Таким образом, линия нулевых деформаций в очаге землетрясения прошла между о. Суматрой и о. Симелу, и далее на север – между Никобарскими и Андаманскими островами.

Во время обследований последствий цунами в январе 2005 г. группами российских и индонезийских ученых были обнаружены опускания юго-восточной части о. Симелу, и участок локального опускания на западном окончании о. Ниас, хотя остров по сейсмологическим данным, примыкал к очаговой зоне с юга, на простирации его нодалной плоскости.

Сильнейший афтершок после главного события произошел в Индонезии 28.03.05 в районе о. Ниас (Mw 8.6). Анализ космических снимков, GPS измерений и повторного обследования, проведенного группой российских и индонезийских ученых в декабре 2005 г. показали, что во время этого афтершока побережье о. Суматра напротив о. Ниас, испытало небольшое опускание, а западное побережье о. Ниас и южная часть о. Симелу значительно приподнялись. Максимальная амплитуда поднятия по нашим оценкам превышала 1-2 м. Таким образом, во время сильнейшего афтершока вертикальные косейсмические движения на о. Ниас и о. Симелу имели знак, противоположный знаку главного декабрьского события.

После косейсмических поднятий вдоль побережий погибли мангровые леса, коралловые рифы, пришли в негодность многие порты и причалы. В результате опусканий значительные участки побережий (шириной в сотни метров) были размыты. Анализ публикаций, посвященных мониторингу на побережье Индонезии, анализ современных космических снимков на ресурсах Googl Erth, Bingo Map, Yandex Map позволили сравнить участки побережья до, сразу после, и спустя годы после землетрясений и цунами в Индонезии. На основе полученных данных сделан вывод о том, что спустя 20 лет, в интерсейсмический период сейсмического цикла, размытые побережья постепенно восстанавливаются, на них начался процесс аккумуляции и проградации.

Проведенные исследования важны для палеосейсмологических реконструкций подобных событий в прошлом для всех побережий, расположенных вдоль зон субдукций.

Исследования выполнены в рамках НИР FWME-2024-0010 «Курило-Камчатская островодужная система: активная тектоника, палеосейсмология, современные деформации и геофизические процессы». Руководитель – д.г.-м.н. Кожурин А.И.

3.

**ЦУНАМИ 4-5 ОКТЯБРЯ 1994 ГОДА НА ПОБЕРЕЖЬЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ
(ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ И ДАННЫХ 30 ЛЕТ СПУСТЯ)**

В.М. Кайстренко, Ю.П. Королёв, Н.Г. Разжигаева, Л.А. Ганзей

vict-k@mail.ru

5 октября 1994 г. в 00 час 23 мин по местному времени (4 октября в 13 час 23 мин по Гринвичу) в районе Южных Курильских о-вов произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_s=8,0$ ($M_w=8.3$), которое проявилось с интенсивностью 8-9 баллов на о.Шикотан (по 12-балльной шкале MSK-64) и вызвало самые тяжелые последствия на Южных Курилах. Землетрясение ощущалось на всех Курильских островах, а также на севере о.Хонсю и большей части о.Сахалин и вызвало сильное цунами с высотами заплеска до 15 м на о. Шикотан (ближняя зона), которое также было отмечено удаленными уровнями станциями на всем побережье Тихого океана. 9 октября 1994 произошел сильнейший афтершок с магнитудой $M_{MLH} = 7.3$, сопровождавшийся слабым цунами.

Примечательным является масштаб деформаций земной коры: о. Шикотан как целое «опустился» на ~55 см. Мониторинг деформаций земной поверхности, проводившийся спутниковой системой DORIS в это время, позволил зарегистрировать резкие изменения расстояния между двумя маяками этой системы, находившимся в Южно-Сахалинске и на Гавайях, связанные с основным толчком и его сильнейшим афтершоком (дуга большого круга проходит практически через район Южных Курильских островов): +19 см 4 октября и -6,5 см 9 октября 1994 г.

По неполным оценкам, материальный ущерб от землетрясения и цунами составил около 600 млрд.руб. (в ценах 1994 года).

Приведены результаты обследования проявлений цунами на побережье островов Шикотан (15,6 м), Кунашир (8,7 м), Итуруп (2,3 м), Юрий (3,5 м), Зеленый (1,8 м), Полонского (4 м), основанные на свидетельствах очевидцев, визуальных оценках и инструментальных измерениях дальности заплеска и высоты цунами (в скобках указаны значения максимальных высот). Наиболее подробные измерения проводились на побережье бухт Малокурильская и Южно-Курильская, что позволило картировать территорию затопления, вызванного цунами. При обследовании затопления бухты Космодемьянской использовались аэрофотоснимки побережья.

На судах, находившихся в акватории, прилегающей к Южным Курилам, собраны свидетельства о разнообразных проявлениях моретрясения 1994 г.

Основные работы были проведены в октябре-ноябре 1994 года, практически сразу после цунами. Отдельные уточняющие исследования, позволившие в частности сделать вывод о характере «старения» и «стирания» следов цунами, продолжались вплоть до осени 1997 года.

В 1995 г в пяти бухтах - Димитрова, Цунамистов, Церковная, Малокурильская и Крабовая на острове Шикотан была проведена пионерские работы по дендроиндикации цунами — отражение затоплений при цунами 1994 г и более ранних событиях в структуре годичных колец деревьев, с их высотной привязкой.

4.
**АСИМПТОТИКИ ДЛИННЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН, ЗАХВАЧЕННЫХ
БЕРЕГАМИ**

М.М. Вотякова^{1,2}, С.Ю. Доброхотов^{1,2}, Д.С. Миненков^{1,2}

¹*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва*

²*Московский физико-технический институт, г. Москва*

s.dobrokhотов@gmail.com

Мы строим эффективные асимптотические формулы для решений системы уравнений мелкой воды в окрестности пологих берегов, описывающие волны, захваченные берегами бассейнов или островов. Волны такого типа обсуждались еще в работах Стокса и Урселла. Они напоминают известные в акустике волны типа шепчущей галереи, однако в отличие от последних их существование не требует выпуклости границы области, где они распространяются.

5.
УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФОКУСИРОВКИ ВОЛН ЦУНАМИ

Ан.Г. Марчук

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

mag@omzg.ssc.ru

Эффект фокусировки волновых возмущений (в частности волн цунами) можно определить как одновременный приход нескольких разных сегментов волнового фронта в какую-либо точку. Обычно это приводит к более высокой амплитуде волн в окрестности точки фокусировки по сравнению с окружающими фокус точками области. Фокусировка может быть, во-первых, следствием геометрической формы источника. В частности, очаг цунами, состоящий из двух областей с положительным и отрицательным смещением водной поверхности, может фокусировать волновую энергию в некоторой точке [1]. Во-вторых – результатом формирования сходящегося волнового фронта над неровным дном вследствие рефракции. Ещё одной причиной фокусировки волновой энергии цунами может быть отражение волны от вогнутой береговой линии. В этом случае точка фокусировки располагается на некотором удалении от берега. Но когда точка фокуса расположена около берега, в этом месте могут наблюдаться аномально высокие волны цунами, что необходимо принимать во внимание службам предупреждения цунами. Теоретически ещё одним фактором, приводящим к фокусировке трансокеанских цунами, может быть сферичность Земли.

Для всех перечисленных случаев построены кинематические карты продвижения волновых фронтов. А численное моделирование динамики распространения цунами по модели мелкой воды подтверждают эффект повышения высоты цунами в точках фокусировки во всех перечисленных выше случаях. Особое внимание следует обратить на подводные хребты, способные быть волноводами цунами. Особенно, когда они выходят к берегу, и за счёт фокусировки вызывают аномальное повышение высоты волны в точке выхода к берегу такой донной структуры. Моделирование цунами 11 марта 2011 у северо-

восточного побережья Японии с использованием модели очага, восстановленного японскими учёными, показывает возникновение на шельфе зон аномально высоких волн вследствие фокусировки, вызванной отражением от береговой линии.

Литература

1. Марчук Ан.Г., Титов В.В. Влияние формы очага на формирование волн цунами // Исследования цунами, Национальный геофизический комитет РАН, г.Москва, 1993, N 5, 7-21.

6. ДИССИПАТИВНЫЕ СОЛИТОНЫ ЦУНАМИ

С.А. Арсеньев¹, Л.В. Эппельбаум²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

²Тель-Авивский университет, Факультет точных наук, г. Тель-Авив, Израиль

Arrsenyev@yandex.ru

Проблема расчета и прогнозирования цунами в настоящее время решается интегрированием уравнений теории морских волн. Их особенностью является нелинейность, которая исключает единственность решения и выполнение принципа суперпозиции. Они могут иметь много решений, в зависимости от различных внешних условий, и среди них могут оказаться весьма нетривиальные. Недавно мы получили несколько новых нелинейных решений и исследовали их свойства [1]. С их помощью можно найти максимально возможную амплитуду волн цунами при приближении к берегу и оценить сейсмическую опасность землетрясения, которое порождает цунами.

В работе используются уравнения теории мелкой воды [1]. Они получаются интегрированием уравнений геофизической гидродинамики по вертикали. Уравнение неразрывности дополняется уравнением сохранения импульса, содержащим нестационарный член, нелинейные ускорения, изменение по горизонтали давления (или уровня поверхности воды), турбулентное трение о дно, горизонтальное турбулентное трение. В зависимости от величины (масштабов) действующих сил получено несколько вариантов решений.

Три варианта описывают диссипативные солитоны (уединенные волны) цунами. В отличие от классических солитонов Рассела, в которых нелинейные ускорения уравновешиваются дисперсией, полученные нами солитоны существуют за счет баланса нелинейных ускорений и горизонтального турбулентного трения. В уравнениях теории мелкой воды работает гидростатическое приближение, справедливое при исчезающей малости вертикальной составляющей скорости движения воды. В классической теории волн на поверхности тяжелой идеальной жидкости без трения вертикальная скорость отнюдь не мала. Соответствующая теория называется негидростатической. Цунами на шельфе испытывают сильное влияние трения за счет близости дна и вертикальных границ. Поэтому уравнения идеальной жидкости без трения здесь не работают.

Литература

Arsen'yev S.A., Eppelbaum L.V., 2023. The Behavior of Nonlinear Tsunami Waves Running on the Shelf. *Applied Sciences*, 13, 8112, 1-13. <https://doi.org/10.3390/app13148112>

7.

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ДЛИННОВОЛНОВОЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ
ГЕНЕРАЦИИ ВОЛН ПРИ ДВИЖЕНИИ ТЕЛА ПО ДНУ БАССЕЙНА В РАМКАХ
АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

М. В. Лебков^{1,a}, М. А. Носов^{1,2,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 *Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б*

^a *lebkov.mv19@physics.msu.ru*, ^b *nosov@phys.msu.ru*

Задача о генерации гравитационных поверхностных волн при движении тела по дну бассейна имеет приложение к проблеме оползневых цунами. В большинстве случаев моделирование динамики оползневых цунами проводится в рамках теории длинных волн. Основная цель настоящей работы состоит в том, чтобы с использованием аналитических решений продемонстрировать ограниченную способность длинноволновых моделей воспроизводить процесс генерации цунами подводными оползнями. В реальности подводное оползневое тело всегда начинает движение из состояния покоя, а после движения останавливается. При этом во многих случаях оползневое тело проходит расстояние, сопоставимое со своим горизонтальным размером. Означенным физическим реалиям, а также возможности получения аналитических решений задачи отвечает следующая простая модель. Гравитационные поверхностные волны возбуждаются в канале постоянной глубины движением тела прямоугольной формы, которое смещается вдоль дна по горизонтали с постоянной скоростью на расстояние, равное своему горизонтальному размеру. Аналитические решения задачи о возбуждении гравитационных волн движениями такого тела были построены в рамках линейной теории длинных волн и линейной потенциальной теории на основе полученных ранее решений схожих задач [Носов, 1995; Лебков, 2023]. Аналитические решения использовались для расчета поля скорости течения и смещения свободной поверхности, по которым определялись кинетическая, потенциальная и полная энергии волн. В результате сопоставления решений, полученных в рамках различных моделей, было, в частности, показано, что длинноволновая модель может сильно завышать энергию возбуждаемых волн. Наиболее ярко этот эффект проявляется, когда размеры оползневого тела оказываются малыми по сравнению с глубиной бассейна или сопоставимыми с глубиной.

Литература

1. Носов М.А. Сравнительный анализ возбуждения цунами поршневой и бегущей подвижками дна // Вулканология и сейсмология, 1995, №6. С. 70-75.
2. Лебков М. В. Генерация длинных волн при движении подводного оползневого тела и сила волнового сопротивления // Ученые записки физического факультета Московского Университета, 2023, № 4, 2340501, с. 1-5

8.
ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ ЦУНАМИ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ
ПОДВОДНОГО ВУЛКАНА

Е.Н. Пелиновский^{1,3}, Т.Г. Талипова^{1,3}, Е.Г. Диденкулова^{1,3}

¹*Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород*

²*Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород*

³*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток*

pelinovsky@ipfran.ru

В статье (Xudong Zhang and Xiaofeng Li, 2022) сообщается о наблюдении внутренних волн в районе архипелага Тонга в Тихом океане, связываемыми с прошедшим 15 января 2022 года извержением Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. Авторы предполагают, что источником волн является проникновение горячих вод в термоклин, приводящих к его деформации типа гравитационного коллапса. Возможен, однако, и другой механизм, обусловленный деформацией водного столба жидкости над подводным вулканом, что обычно и рассматривается в качестве источников поверхностных волн цунами. В этих исследованиях обычно стратификацией вод океана пренебрегается, и считается жидкость однородной.

Целью настоящей работы является теоретический анализ внутренних волн, которые могут возникнуть при эксплозивном извержении подводного вулкана. Поскольку процессы эксплозивного извержения не очень-то изучены, мы используем так называемый параметрический очаг Le Mehaute, разработанный для анализа волнового поля при взрывах в воде на больших расстояниях от места взрыва. Его уже использовали для анализа натуральных данных о волнах цунами при извержении Myojinsho Volcano (Япония) в 1952 году и вулкана в озере Карымское в 1996 году. Параметры возникающих внутренних волн рассчитаны для двухслойной и экспоненциальной моделей стратификации. Результаты исследований опубликованы в статьях:

- Talipova T., Pelinovsky E., Didenkulova E. Internal tsunami waves in the stratified ocean, induced by explosive volcano eruption: parametric source. *Physics of Fluids* 2024, Vol. 36, Issue 4, 042110 <https://doi.org/10.1063/5.0206121>
- Talipova T., Pelinovsky E., Didenkulova E. Internal waves generated by explosive eruptions of underwater volcanoes and their effect on the sea surface. *Natural Hazards*. 2024, <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06851-3>

Исследование Т.Г. Талиповой поддержано грантом РФФ 24-27-00110 «Интенсивные внутренние волны в морях и их воздействие на подводные объекты».

9.

**ВОЛНЫ ЦУНАМИ У ПОБЕРЕЖЬЯ САХАЛИНА, ВЫЗВАННЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ
ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА ХУНГА-ХААПАН 15 ЯНВАРЯ 2022 ГОДА ПО ДАННЫМ
НАБЛЮДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДОННЫХ ВОЛНОГРАФОВ**

Д.П. Ковалев, П.Д. Ковалев

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

d.kovalev@imgg.ru

Волны цунами, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга Хунга-Хаапай 15 января 2022 года, представляли собой редкое явление в Дальневосточном регионе России, удаленном от источника. Для изучения таких волн в прибрежной зоне юго-восточного побережья о. Сахалин устанавливаются донные волнографы, которые с высокой точностью регистрируют колебания уровня моря. Целью настоящего исследования являлось выявление особенностей распространения цунами в данном регионе и влияние этих волн на прибрежные процессы.

В период с ноября 2021 г. по май 2022 г. проводились непрерывные наблюдения с использованием автономных донных регистраторов волнений АРВ-14К, установленных на различных глубинах в прибрежной зоне. Измерения велись с секундной дискретностью, что позволило детально изучить особенности колебаний уровня моря по полученным временным рядам. Для их анализа применялись методы спектрального и статистического анализа, включая фильтрацию временных рядов, выделение цунами-сигналов, а также асимметрии и эксцесса для оценки аномальных волн.

Зарегистрированные 15 января 2022 года волны имели характерные для диапазона волн цунами периоды и значительно выделялись над фоновым волнением. Спектральный анализ выявил, что максимум энергии наблюдался на периоде около 153 минут, что соответствует первой моде шельфовых сейш. Это указывает на то, что приходящие волны цунами возбуждали шельфовые сейши в прибрежной зоне о. Сахалин. Кроме того, были обнаружены пики энергии на периодах около 464 минут, которые соответствуют продольным и поперечным сейшами залива Мордвинова.

Анализ статистических характеристик колебаний уровня моря, выполненный для фонового волнения и волн цунами, показал значительное увеличение среднеквадратичного отклонения в 3,5 раза для отрезков временных рядов, содержащих аномальные волны. Коэффициенты асимметрии и эксцесса для цунами и фоновых колебаний незначительно отличались от гауссовых значений, что говорит о стабильности волнового поля даже при наличии цунами.

Проведенное исследование показало, что извержение вулкана Хунга-Тонга Хунга-Хаапай 15 января 2022 года вызвало аномальные волны в прибрежной зоне о. Сахалин, которые были зарегистрированы донными волнографами. Волны цунами, пришедшие от удаленного источника, возбудили в прибрежной акватории шельфовые сейши и продольные сейши в заливе Мордвинова, что проявилось в спектрах колебаний уровня моря. Полученные результаты подтверждают необходимость продолжения мониторинга изменений уровня моря в прибрежных зонах для лучшего понимания процессов генерации и распространения цунами, особенно в связи с возможными вулканогенными явлениями, характерными и для Курильских островов.

10.

**РАСЧЕТ ЦУНАМИ, ВЫЗВАННОГО ВЗРЫВОМ ВУЛКАНА ТОНГА 15.01.2022 г.,
ЭКСПРЕСС-МЕТОДОМ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА**

П.Ю. Королев, Ю.П. Королёв

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

pasha200482@mail.ru

Извержение вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай в январе 2022 года вызвало катастрофическое цунами на ближних островах архипелага Тонга: до 17 м на расстоянии 65 км, до 45 м на расстоянии 90 км от вулкана. Волна повышенного давления в атмосфере зарегистрирована множеством барографов не только на островах Тихого океана, но и на материках. Барическая волна, распространявшаяся со скоростью звука в атмосфере, вызвала возмущения свободной поверхности океана в виде вынужденной волны, скорость которой также равнялась скорости звука в воздухе. Наряду с этим изменения давления в области взрыва генерировали гравитационные (свободные) волны в океане, распространявшиеся со скоростью длинных волн. Вынужденная поверхностная и/или свободная волны зарегистрированы множеством глубоководных донных станций в Тихом океане. Небольшое количество станций зарегистрировало полностью обе волны от момента вступления вынужденной волны. В силу различия в скоростях распространения свободная волна отстает от вынужденной на 80 – 230 мин в зависимости от расстояния до точки регистрации. Амплитуды вынужденной и свободной волн сопоставимы даже на больших расстояниях от возмущения. Что несколько не обычно: волны от взрывов затухают быстрее, чем поверхностные.

Расчеты волн в океане от различных модельных источников, локализованных в области взрыва вулкана, выполнены в ряде работ.

Известный действующий способ оперативного прогноза цунами NOAA не мог быть использован для оценки цунами во время события ввиду отсутствия данных в базе синтетических мареограмм.

Представлял интерес выяснить, возможен ли расчет цунами, возбужденного взрывом вулкана, экспресс-методом оперативного прогноза, не требующим заранее рассчитанной базы синтетических мареограмм. Для прогноза использовались данные ближайших к месту взрыва донных станций, пробег волн до которых составлял 138 и 282 мин. Ввиду того, что экспресс-метод разработан для прогноза поверхностных гравитационных волн, использовалась только часть записи, соответствующая гравитационной составляющей. Никаких предположений о механизме возбуждения этих волн не делалось.

Получено неплохое соответствие расчетных и зарегистрированных волновых форм. Подтверждено, что экспресс-метод может давать прогноз цунами независимо от механизма возбуждения.

11.
ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ МГНОВЕННЫМ ИМПУЛЬСОМ
АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.П. Королёв

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

Yu_P_K@mail.ru

Взрывное извержение вулкана Хунга Тонга-Хунга Хаапай 15 января 2022 года вызвало волны повышенного давления в атмосфере, в толще океана, а также вынужденные и гравитационные волны на поверхности океана. Волны зарегистрированы наземными барографами на больших расстояниях от эпицентра, а также множеством глубоководных донных станций в Тихом океане. Зарегистрированные в океане волны представляли собой вынужденные волны, обусловленные бегущей со скоростью звука в воздухе волной повышенного давления, движущиеся с той же скоростью, а также поверхностные гравитационные волны, распространяющиеся со скоростью длинных волн.

Рассмотрена известная задача Коши-Пуассона о волнах на свободной поверхности слоя жидкости постоянной глубины. В качестве источника волн принято возмущение в виде бегущей волны повышенного давления над свободной поверхностью. Для определения этого возмущения решена задача о распространении волны давления в экспоненциальной атмосфере над твердой поверхностью. В качестве источника в начальный момент времени принималась аксиально-симметричная область повышенного давления. Задача решалась в линейном приближении. Затухание амплитуды барической волн такое же, как у длинных гравитационных волн, т.е. изменяется обратно пропорционально квадратному корню из пройденного расстояния. Такой вывод совпадает с опубликованными результатами анализа на основании фактических данных.

Сравнение выражений, полученных в результате решения задачи Коши-Пуассона, для форм поверхностных волн и волн давления на дне с учетом множителя ρg (ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения) показывает:

- формы свободных волн, распространяющихся со скоростью длинных волн, идентичны;

- амплитуда вынужденной волны давления на дне больше амплитуды вынужденной поверхностной волны в c^2/gD раз (c – скорость вынужденной волны, $(gD)^{1/2}$ – скорость длинных волн). В реальных условиях этот множитель превышает 2.

Возникает вопрос: всегда ли амплитуда волны на свободной поверхности, полученная по данным о вариациях давления на дне, дает адекватный результат? К сожалению, одновременные непосредственные измерения уровня и донного давления в одной точке, которые могли бы прояснить ситуацию, отсутствуют.

12.

АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ ВОЛНЫ ЛЭМБА ОТ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПЫ ПО ДАННЫМ С ДОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ВОЛНЕНИЯ

А.М. Волгарев¹, С.В. Колесов^{1,2}

1 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет

2 Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

volgarevam@gmail.com, kolesov@phys.msu.ru

14 января 2022 года началось извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, расположенного в южной части Тихого океана. 15 января в 04:14:45 UTC извержение усилилось и примерно через 12 минут произошёл взрыв. Результатом извержения стало образование атмосферной волны Лэмба, зарегистрированной по всему миру различными измерительными системами, в том числе подводными регистраторами. Проявление волны Лэмба по данным с глубоководных систем DART и DONET уже рассматривались ранее в работах [1,2]. В настоящем докладе проведён анализ проявления атмосферной волны Лэмба по данным с донных измерителей волнения, расположенных в прибрежной зоне залива Мордвинова (о. Сахалин). Глубина постановки датчиков составляет около 15 м. Исследованы спектральные характеристики волнения в период до и после прохождения волны. Численное моделирование длинноволновых возмущений водного слоя, возбуждённых волной Лэмба, показало хорошее совпадение синтетических мареограмм с натурными данными.

Литература

1. Nosov, M.A.; Kolesov, S.V.; Sementsov, K.A. Interpretation of Signals Recorded by Ocean-Bottom Pressure Gauges during the Passage of Atmospheric Lamb Wave on 15 January 2022. Remote Sens. 2023, 15, 3071. <https://doi.org/10.3390/rs15123071>
2. М.А. Носов, К.А. Семенцов, С.В. Колесов, В.В. Прядун // Проявления атмосферной волны Лэмба в вариациях придонного давления. ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2022. № 6. С. 66–73

13.

ЦУНАМИ И АТМОСФЕРНЫЕ ВОЛНЫ, СВЯЗАННЫЕ С ЭКСПЛОЗИВНЫМ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА БЕЗЫМЯННЫЙ 30 МАРТА 1956

Д.С. Выдрин¹, Е.С. Цуканова¹, А.Б. Рабинович¹, И.П. Медведев¹

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

dan.vidrin@yandex.ru

Извержения вулканов и сопутствующие с вулканизмом явления являются причиной примерно 5 % всех зарегистрированных случаев цунами. Немногие известные события были вызваны возмущениями атмосферного давления при крупных вулканических взрывах. Впервые, проявление такого механизма формирования цунами описано для мощного извержения вулкана Кракатау 26-27 августа 1883 года (VEI=6). Подобные явления в XX-

XXI вв. зафиксированы при извержении вулкана Суфриер 7 мая 1902 г. (VEI=4), вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. (VEI=5) и вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. (VEI=5-6). Случай связанный со взрывом вулкана Безымянный слабо изучен. 22 октября 1955 г. впервые в историческое время началось извержение сопки Безымянной, входящей в состав Ключевской группы вулканов (п-ов Камчатка). Предварительная фаза извержения закончилась пароксизмальным взрывом 30 марта 1956 года в 6 ч 11 м 05 с (UTC). Воздушная волна обогнула Землю немногим более одного раза. Средняя скорость распространения атмосферных волн определена по ряду станций микробарографов, расположенных на территории СССР, Японии и Великобритании и составляла 310 м/с. Максимальная амплитуда по записи барографа в ближней зоне равнялась 23.5 мбар (ст. Ключи, $\Delta=41.7$ км). Различимые колебания давления на лентах барографов фиксировались на расстоянии более 1000 км от источника (ст. Марково, $\Delta=1108.4$ км). Волны цунами отмечены инструментально на 13 станциях в акватории Тихого океана. Максимальная высота волн достигала 0.3 м на Алеутских (о. Атту) и Гавайских (о. Мауи) островах. На российском побережье волны зафиксированы в Усть-Камчатске, заметное усиление обычных ветровых сейш наблюдалось в Авачинской бухте. Собранный материал позволяет восстановить картину хода и параметры извержения, распространения воздушных волн и условия генерации волн цунами.

14.

ШИКОТАНСКИЕ ЦУНАМИ 1969, 1975 И 1994 ГГ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРАВЛЕННОСТИ ИСТОЧНИКОВ

А.В. Лоскутов

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

a.loskutov@imgg.ru

В докладе представлены результаты анализа направленности волновой энергии очагов для трех событий цунами – 11 августа 1969 г., 10 июня 1975 г. и 4 октября 1994 г. На основе выверенных данных о распределении сейсмической подвижки, полученных сейсмологами и классических формул Окады были построены модели источников цунами в виде остаточных деформаций морского дна, пересчитанных в начальное смещение уровня невозмущенной поверхности океана. С помощью этих моделей источников была проведена серия численных экспериментов, позволивших построить детальные волновые картины при распространении этих цунами на Южно-Курильском шельфе. Так же был проведен ряд экспериментов по моделированию отклика близких полузамкнутых акваторий различной формы на цунами, позволивший проанализировать частотную направленность источников этих цунами и ее влияние на то, как проявляют себя различные близкие цунами на сложном побережье. Анализ результатов численного моделирования позволил выявить следующее: даже близкие и похожие по структуре источники цунами могут генерировать существенно различные распределения характеристик цунами вдоль побережья, причем эти распределения могут быть параметризованы еще и частотой падающей волны, что, в свою очередь определяет весьма различный отклик хорошо резонирующих акваторий вроде б. Малокурильская и б. Крабовая на о. Шикотан.

15.

**ОЦЕНКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЦУНАМИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ
СХОДА ПОДВОДНЫХ ОПОЛЗНЕЙ В ОХОТСКОМ МОРЕ**

И.С. Костенко, А.И. Зайцев

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

i.kostenko@skbsami.ru

В данной работе исследуется проблема возникновения цунами от подводных оползней. Изучается волновое воздействие на прибрежную зону. На подводных склонах постоянно происходит накопление осадочных пород, которые вызывают сход оползней. При этом оползни могут сойти без каких-либо предвестников и быть зарегистрированы случайно вследствие возникновения цунами или изучения подводного дна. Таким образом, появляется необходимость изучения возможности генерации цунами в районах, где были найдены формирующиеся, а также сошедшие подводные оползни. На основании имеющихся данных в Охотском море неоднократно были обнаружены следы сошедших, а также предполагаемых оползней. Выполненные другими авторами исследования показали, что на о. Сахалин в результате схода подводных оползней могут проявиться значительные по высоте цунами.

Проведена серия численных расчетов схода гипотетических оползней с различными параметрами. Для расчетов использовались батиметрии с разным уклоном и характером подстилающей поверхности. Результаты расчетов показали, что в случае схода достаточно крупного подводного оползня в Охотском море на значительной глубине наблюдаются волны цунами на поверхности. Их высоты значительно превышают цунами сейсмического происхождения.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00325.

16.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЦУНАМИ В СИСТЕМУ
СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ**

А.Ю. Белоконь, Д.И. Лазоренко, В.В. Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

a.bazykina@mhi-ras.ru

Явление цунами свойственно не только акваториям океанов, но и акваториям внутренних морей, хоть и не с такими катастрофическими последствиями. В Черном море известно о 50 случаях цунами, произошедших за последние 3000 лет, большинство из которых имели сейсмическую природу. При этом наиболее подверженными участками побережья при цунами являются бухты, заливы и проливы, в которых могут происходить значительные усиления колебаний уровня моря.

Одним из наиболее сложных участков побережья Черного моря является прибрежная зона Севастополя. Береговая линия изрезана множеством бухт и мысов, которые образуют систему, состоящую из главной бухты – Севастопольской, и ответвленных от нее бухт меньших размеров. Севастопольская бухта представляет собой акваторию эстуарного типа с ограниченным водообменом с открытым морем из-за наличия двух защитных молов.

Район Севастополя отнесен к особо сейсмоопасной области вследствие того, что здесь проходит граница зон разной балльности землетрясений. Исторические данные свидетельствуют о том, что во время сильного землетрясения магнитудой $M \geq 7$, произошедшего в 103 г. в районе Севастопольской бухты, вода отступила в сторону моря на расстояние до 3–4-х км, при этом высота пришедших волн составила не менее 2 м. Известно также о землетрясении 29 апреля 1650 г. в северо-западной части Черного моря, которое вызвало волны высотой около 3-х м вблизи Севастополя. Разрушительное подводное землетрясение магнитудой $M \geq 6,5$ произошло в 11 сентября 1927 в 30-ти км к юго-востоку от г. Ялта. Подъемы уровня при штиле наблюдались в разных местах и после сильных толчков. Последующие более слабые толчки с очагами у Севастополя и Балаклавы сопровождалась отходом воды от берега и накатыванием одиночных волн на берег. 26 декабря 1939 г. сильное землетрясение $M = 8$ произошло в г. Фатса (побережье Турции). По свидетельствам очевидцев, море отступило на 50 м, а затем затопило побережье на 20 м. Волны цунами пересекли Черное море и были зарегистрированы мареографами в Севастополе, где высота волн составила 50 см. Опасность проникновения цунами в бухты заключается также и в том, что цунами могут возбуждать в них сейшевые колебания.

В настоящей работе с помощью численного моделирования исследуется проникновение волн цунами в систему севастопольских бухт. В качестве форсинга использованы три варианта гидродинамических очагов цунами в Черном море, вызванных подводными землетрясениями. Получены количественные оценки возможных повышений уровня моря при распространении цунами в бухтах Севастополя. Рассчитаны спектры сейшевых колебаний, возбуждаемых проникновением цунами в бухты.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания FNNN-2024-0016.

17.

МЕТОД ОЦЕНКИ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ БЕЗДИСПЕРСИОННОЙ ТЕОРИИ ДЛИННЫХ ВОЛН ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ЦУНАМИ

А. И. Зарубина¹, М. А. Носов^{1,2}, С. В. Колесов^{1,2}

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН, г. Южно-Сахалинск

zarubina.ai17@physics.msu.ru

Модели динамики волн цунами в большинстве случаев строятся на основе теории длинных волн. Существенный недостаток таких моделей заключается в их ограниченной способности воспроизводить диспергирующие волны цунами. Попытки введения

критериев, позволяющих судить об области применимости длинноволновых моделей, предпринимались ранее многими исследователями [1-4]. В длинноволновом пределе все критерии сводятся к единой формуле для расстояния, на котором дисперсия становится значимой: $C \lambda^3 / H^2$, где λ – длина волны, H – глубина океана, C – числовой коэффициент. В силу субъективности оценки точности воспроизведения диспергирующих волн бездисперсионной теорией различными авторами, коэффициент C имеет широкий разброс. В нашей работе [5] мы предложили объективную количественную меру точности воспроизведения волн и установили ее связь со степенью запаздывания диспергирующего волнового пакета от фронта длинных волн. Целью настоящей работы является разработка практического метода определения области пространства, в которой бездисперсионная теория длинных волн способна воспроизводить диспергирующие волны цунами с заданной точностью. Судить о точности мы предлагаем по степени запаздывания диспергирующего волнового пакета, которая рассчитывается вдоль набора волновых лучей, выпущенных из центра источника под различными азимутальными углами. Расчет лучей реализован на сферической поверхности с учетом рельефа дна, который был сглажен для удовлетворения условиям применимости лучевой теории. Вдоль каждого из лучей с учетом формы начального возвышения и распределения глубин океана определялся доминирующий период волн цунами. По доминирующему периоду и профилю глубин вдоль луча рассчитывалась степень запаздывания диспергирующего волнового пакета. Работа метода продемонстрирована на примере двух цунами-событий на Центральных Курильских островах (Симуширские цунами 15.11.2006 и 13.01.2007).

Литература

1. *Kajiura K.* The leading wave of a tsunami // Bull. Earthq. Res. Inst. 1963. V. 41. № 3. P. 535–571.
2. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. Горький: ИПФ АН СССР, 1982. 216 с.
3. *Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Thomson R.E. et al.* The landslide tsunami of November 3, 1994, Skagway harbor, Alaska // J. Geophys. Res.: Oceans. 1996. V. 101. № C3. P. 6609–6615.
4. *Glimsdal S., Pedersen G.K., Harbitz C.B. et al.* Dispersion of tsunamis: does it really matter? // Nat. Hazard. Earth. Syst. Sci. 2013. V. 13. № 6. P. 1507–1526.
5. *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.

18.

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ
ЦУНАМИОПАСНОСТИ ХАЛАКТЫРСКОГО ПЛЯЖА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

С.А. Бейзель², О.И. Гусев², В.К. Гусяков¹, А.В. Ландер³, Д.В. Чебров⁴, Л.Б. Чубаров²

¹ *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск*

² *ФИЦ информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск*

³ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г.
Москва*

⁴ *Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
г. Петропавловск-Камчатский*

chubarov@ict.nsc.ru

В докладе представлены результаты вероятностной оценки цунамиопасности участка побережья Авачинского залива акватории Тихого океана от устья р. Халактырка до оз. Котельного, полученной посредством численного моделирования с использованием методики РТНА. Параметры заплеска экстремальных волн цунами на это побережье определялись по методике «Worst Case» («Наихудший случай»). Основными результатами исследования на предварительном этапе работ стали общая характеристика исследуемого района и сейсмического режима района; создание сеймотектонических схем основных цунамигенных зон, угрожающих исследуемому участку побережья; сбор, анализ, обобщение существующих архивных и литературных данных по проявлениям цунами на исследуемом участке побережья (включая палеоисследования) и методикам вероятностной оценки цунамиопасности побережья. Выполненные авторами «пробные» расчеты позволили построить синтетические каталоги модельных очагов цунамигенных землетрясений в выделенных Курило-Камчатской, Алеутской и Чилийской цунамигенных зонах.

С использованием построенных цифровых моделей рельефов дна и суши созданы системы вложенных расчетных сеток (различные для источников Курило-Камчатской, Алеутской и Чилийской зон), на которых были проведены расчёты для каждого из модельных очагов. Полученные результаты стали основой для определения искомых вероятностных оценок, которые, в свою очередь, привели авторов к следующим выводам. Для повторяемости в среднем 1 раз в 50 лет пороговые значения амплитуд вдоль исследуемого побережья составляют 1.5 ÷ 2 м, 1 раз в 100 лет –2.6 ÷ 3.2 м, 1 раз в 500 лет – 7.3 ÷ 8.7 м, 1 раз в 1000 лет 8.2 ÷ 9.8 м.

Для наиболее опасных для исследуемого побережья источников цунами были определены основные характеристики наката волн на берег: зоны затопления и осушения, максимальные высоты заплеска, толщины водного слоя, продолжительности заливания суши. Определена также максимальная по всем событиям зона затопления. Достоверность полученных результатов подтверждается согласием с данными палеоисследований [1] по повторяемости сильных (с высотой заплеска более 5 м) цунами вблизи оз. Котельное.

Литература

1. Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Bourgeois J., Kozhurin A.I., Medvedev I.P., & Vydrin D.S. (2018) Holocene Tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia // Pure and Applied Geophysics. Vol. 175. No. 4. P. 1485 – 1506.

19.

ЦУНАМИ: ОТ ПРОГНОЗА К УПРАВЛЕНИЮ БЕДСТВИЕМ

М.А. Клячко¹

*1 Председатель АНО «Региональный альянс для анализа и уменьшения бедствий»/
АНО «РАДАР», Санкт-Петербург*

marfazhirkina@yandex.ru

Конечной целью НИОКР академического и инженерного направлений является обеспечение устойчивой безопасности урбанизированных производственных и сельских прибрежных территорий, подверженных воздействию цунами. В докладе рассматриваются современное состояние, проблемы цунамибезопасности в целом, цепочка необходимого взаимодействия океанологов и инженеров, вопросы физического моделирования взаимодействия волн цунами с плавучими, прибрежными и береговыми сооружениями, недостатки и достоинства строительных норм СП 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» и методических пособий в сравнении с нормами США «ASCE 7 and the development of a tsunami building code». Представляются комплексная схема защиты населения и территорий от воздействия цунами, а также рабочий инструментарий для анализа и управления вероятным бедствием на урбанизированной цунамиопасной территории, что рекомендуется для использования в качестве «дорожной карты» для управления бедствием. Особое внимание уделяется локальным цунами, триггером которых являются местные землетрясения на примере Шикотанского, в результате которых возникают комплексные бедствия. Рассматриваются экономические потери, обусловленные долговременными негативными экологическими последствиями воздействия цунами. Величина и допустимость различных бедствий, вызванных цунами, демонстрируется с помощью шкалы бедствий. Сообщаются итоги Всероссийской научно-практической конференции «Цунамибезопасность», посвященной памяти трагического цунами 5 ноября 1952 года на Курильских островах и Камчатке (Санкт-Петербург 31 октября – 1 ноября 2022 г.).

20.

**ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GPS/ГЛОНАСС ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ
О ЦУНАМИ НА РОССИЙСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ**

В.В. Пупатенко

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск

pvv2.dv@gmail.com

Цунами – сравнительно редкие, но наносящие огромный ущерб природные бедствия. Произошедшие в последнее десятилетия катастрофические цунами привели к огромным человеческим жертвам. Несмотря на это, проблема быстрого и надёжного предупреждения о цунами для близких к эпицентру подводного землетрясения регионов всё ещё далека от решения.

Среди нескольких предложенных в последние десятилетия альтернативных методов раннего предупреждения о цунами для близких к эпицентру побережий особое место занимает использование данных Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС,

GPS/ГЛОНАСС). Наиболее типичным является их использование для определения с сантиметровой точностью косейсмических (постоянных) смещений пунктов наблюдений и дальнейшей оценки параметров модели очага потенциально цунамигенного землетрясения.

Решение связанной с этим обратной задачи принципиально неоднозначно. Одностороннее расположение ГНСС-станций относительно эпицентра землетрясения может привести к большим ошибкам в определении значений углов, характеризующих положение поверхности разрыва и направление подвижки. В существующих и тестируемых таких системах, например, в японской системе REGARD, положение поверхности сейсморазрыва зафиксировано априорными значениями.

В докладе приведены результаты серии численных экспериментов, имитирующих работу системы предупреждения о цунами на основе ГНСС-данных. На примере северо-восточной части Японского моря определена потенциальная эффективность системы предупреждения о цунами на основе ГНСС-данных, которая может быть создана на основе станций, расположенных на российском и японском побережье, и при этом будет определять параметры, характеризующие положение поверхности сейсморазрыва. Показано, что точность определения параметров в ряде случаев может быть достаточно высокой при магнитуде землетрясения от 7.4 и выше.

21.

ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЦУНАМИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Г.А. Кантаков¹

¹ НПО ДЭКО, г. Южно-Сахалинск

gennadykantakov@gmail.com

Рассмотрена эволюция мониторинга цунами на примере создания автономных станций открытого океана DART. Станции способны регистрировать колебания земной коры и уровня океана при землетрясениях, распознавать и измерять волны цунами. Данные об уровне океана позволяют не только измерить параметры волн до их прихода на берег, но и оценить высоты заплесков, что снижает риски человеческих потерь и материального ущерба.

Применение DART показало эффективность и надежность систем раннего предупреждения цунами в разных странах, включая РФ. Показана история инструментальных наблюдений за цунами в северо-западной части Тихого океана до эпохи DART, а также результативная часть российских работ по предупреждению цунами в период 2010-2017 гг. Рассказано о создании автономных платформ для измерения и передачи данных о цунами, приведших к DART, ETD и G4. Раскрыты технические описания DART и ETD, перспективы развертывания и дальнейшей поддержки океанских станций, включая организацию работ, сложную судьбу исследований и мониторинга цунами Дальневосточных морей РФ и северо-западной части Тихого океана.

Как показывает эволюция цунамиметров и опыт их применения, производство систем предупреждения цунами перспективно для самостоятельных разработок. Продолжение работ по цунами сопряжено технологическими, разрешительными и организационно-финансовыми вызовами. Для развития систем раннего предупреждения о цунами не следует воспринимать существующие системы как окончательно устоявшиеся.

22.

**ПРОЯВЛЕНИЕ И ОСАДКИ НОТО ЦУНАМИ (01.01.2024)
В БУХТЕ ПРЕОБРАЖЕНИЯ, СЕВЕРО-ЗАПАД ЯПОНСКОГО МОРЯ**

**Н.Г. Разжигаева¹, Д.Г. Тюняткин¹, Л.А. Ганзей¹, Т.А. Гребенникова¹,
Е.Д. Иванова¹, Ю.Р. Путинцев¹, Ю.Ю. Жабыко², Д.Р. Шпачук^{1,3}, Е.И. Стасюк³**

¹ ФГБУН Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток

² ФГБУ «Приморское УГМС», Владивосток

³ ДВНИГМИ, Владивосток

nadyar@tig.dvo.ru

Цунами 01.01.2024, вызванное землетрясением (М 7.6; 7:10:22.5 UTC), эпицентр которого находился на п-ове Ното (префектура Исикава), на глубине 16 км, сопровождалось косейсмическим подъемом (до 4 м), деформацией земной коры на дне Японского моря (сдвиги по разломам до 3.5 м) и сильным цунами на западном побережье Японии (Fujii, Satake, 2024). Цунами достигло побережья Приморья 8:14-9:44 UTC, колебания уровня моря были записаны мореографами на 6 постах «Приморского УГМС». Осадочный покров цунами был сформирован только в закрытой бух. Преображения, где цунами взломало ледяной покров. По данным автоматического пункта цунами (АП) «Преображение» Центра наблюдения и предупреждения о цунами ФГБУ «Приморское УГМС» высота волны здесь составила 63 см. В конце января и апреле 2024 г. проведено обследование зоны затопления Ното цунами. Несмотря на небольшую величину волны и высоту заплеска (20–60 см), в бухте образовался протяженный (до 325 м) покров илов (мощность до 1.5 см) на невзломанном припае и сильно консолидированном льде, в краевой части захватывавший берег (от 5 до 23 м). По льду водотока цунами проникло до 680 м от устья, пятна ила встречены на замершем льду водотока до 250 м. Граница максимального заплеска на льду водотока намного превышала зону осадконакопления. Разгрузка материала здесь произошла перед барьером на излучине водотока. В кутовой части бухты линия максимального заплеска лишь на 2-3 м превышала зону с покровом илов. Дробление ледяного покрова многократно усилили эрозию донных осадков. На снимках с квадрокоптера хорошо видно, что на дне выделяются полосы, лишенные водной растительности, направленные к вершине бухты. Особенности распространения волны зафиксированы по положению стеблей наземной травы, валиков из зостеры и водорослей. Проанализированы изменения гранулометрического состава осадков и соотношение экологических групп биофоссилий по профилям. В илах преобладают мелкоалевритовые фракции (до 77%) и много пелита (до 36%), структура мало меняется по простиранию, более тонкий материал осаждался на участке, где стояла вода в центре зоны затопления на припае, более крупный выносился с льдинами и попадал в удаленную часть зоны заплеска. Основная масса диатомей представлена эпифитами, которые населяли густые заросли зостеры, сильно пострадавшие при подходе волны. В удаленной части заплеска на льду водотока происходила дифференциация створок, наиболее мелкие выпали у границы зоны осадконакопления. Количество морских видов снижается по мере продвижения вглубь зоны затопления, пресноводных становится больше. Их источником также были донные илы, в которые они попадали с речным стоком. В составе бентосных фораминифер в мористой части заплеска больше секреторных видов, состав их в цунамигенных илах близок к комплексу из ила, перенесенного льдинами с верхней сублиторали. Наличие более глубоководных форм свидетельствует, что эрозия дна могла происходить и на глубинах более 5 м. Основным источником осадка находился на литорали и сублиторали, где дно активно эродировалось льдинами. Возможно, поступление воды и взвешенного материала происходило по трещинам и в зоне сильно сплоченного ледяного покрова у границы

невзломанного припая. Ното цунами показало, что большой риск для замерзающих бухт Приморья связан с цунами, происходящими в зимний период, в том числе и имеющими очаги в юго-восточной части Японского моря. Опасность цунами со льдом намного возрастает за счет большой эродирующей способности волн.

23.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦУНАМИ 01 ЯНВАРЯ 2024 ГОДА ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА

С.Г. Долгих¹, Г.И. Долгих¹, Е.Н. Пелиновский²

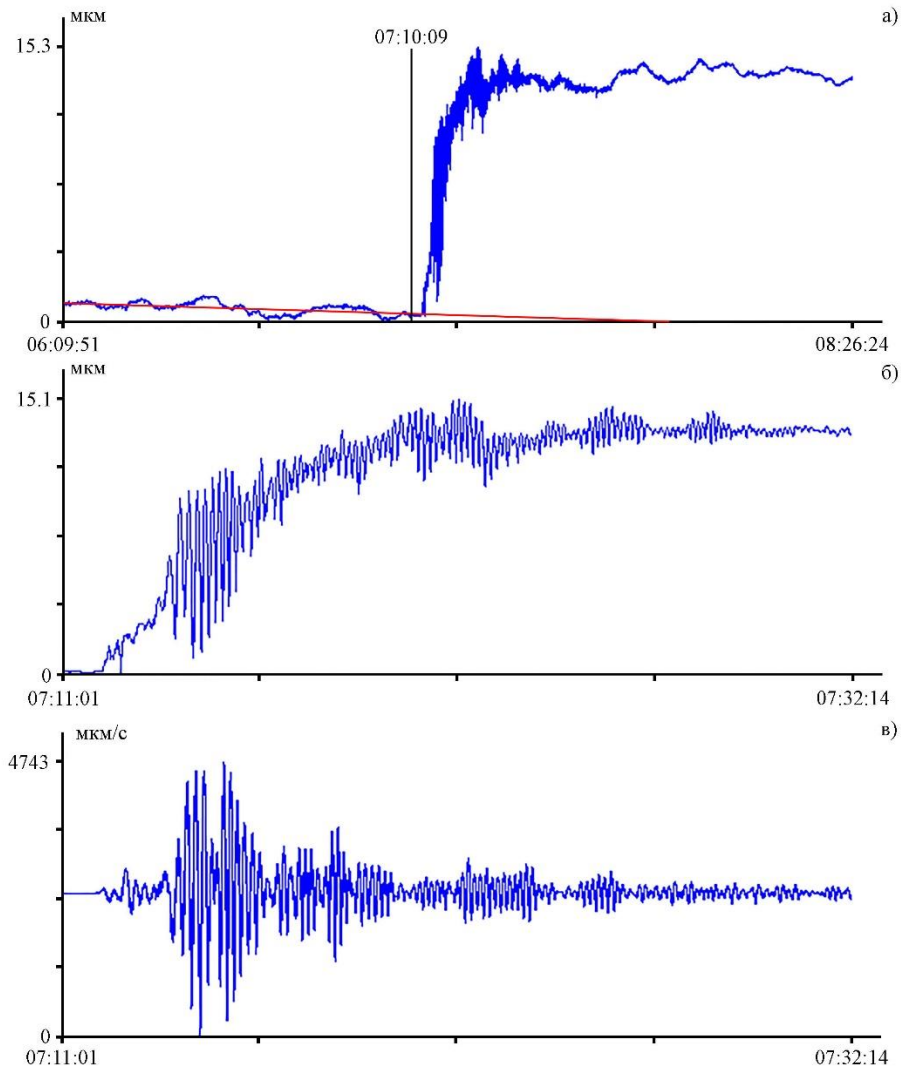
¹*Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток*

²*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

sdolgikh@poi.dvo.ru

01 января 2024 года в 07:10:09 UTC на западном побережье Японии произошло сильное землетрясение с магнитудой 7.6. Данное землетрясение было самым сильным на западном побережье более чем за сто лет. Японским метеорологическим агентством (JMA) после него было зарегистрировано более 140 небольших землетрясений. На территории Японии после землетрясения была объявлена тревога цунами. На западном побережье в некоторых районах фиксировались волны высотой 1.2 м. Российской службой предупреждения цунами также было объявлено предупреждение о цунами на Дальнем Востоке России, с высотой около 0.3 м. По словам очевидцев, в некоторых бухтах о. Русский Приморского края, пришедшая волна разломала и вынесла лед толщиной около 0.5 м.

На записях лазерного деформографа и широкополосного сейсмометра, установленных на берегу Японского моря на юге Приморского края, было зарегистрировано это землетрясение менее чем через 2 мин. Так в 07:12:05 (UTC) 1 января 2024 на записях приборов были зафиксированы первые толчки от землетрясения. Эпицентр которого располагался в точке с координатами 37.487°N 137.271°E на глубине 10 км на расстоянии около 770 км от места установки приборов. На рисунке приведены записи лазерно-интерференционного прибора и широкополосного сейсмометра. На рисунке а) приведена запись лазерного деформографа длительностью 137 мин, вертикальной линией отмечено время начала землетрясения. На рисунке б) приведен увеличенный фрагмент записи лазерного деформографа, в момент регистрации цунамигенного землетрясения. На рисунке в) приведена запись широкополосного сейсмометра. На записях лазерного деформографа присутствует деформационная аномалия, в момент начала землетрясения запись резко начала ползти в верх. А на записи широкополосного сейсмометра такого поведения записи не наблюдается. По резкому изменению характера записи можно сказать, что данное землетрясение является цунамигенным, причем величина этой деформационной аномалии составила 13.5 мкм.



**24.
НОТО ЦУНАМИ 1 ЯНВАРЯ 2024 Г.**

Цуканова Е.С., Медведев И.П., Владимирова И.С.
Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

tsukanovaelizaveta@gmail.com

1 января 2024 г. произошло землетрясение с магнитудой M_w 7.5, которое вызвало цунами, распространившееся по всему Японскому морю. Это стало первым событием с объявлением опасности цунами в Японии после 2011 г. Землетрясение произошло на полуострове Ното и привело к гибели более 240 человек. Возникшие в результате волны цунами также привели к разрушениям и жертвам. Высоты заплеска превысили 7 м.

Очаг землетрясения имел взбросовый механизм и был расположен на западном склоне Японской островной дуги. Землетрясение является результатом подвижки по системе разломов вдоль побережья Ното. Максимальные косейсмические деформации

достигли 6 м. Землетрясение вызвало сход оползней в ближней зоне, а также привело к заметному изменению рельефа.

В результате работы была доработана существующая модель источника цунами, а также особенности распространения волн цунами в Японском море. Было проанализировано более 40 записей мареографов по всему побережью. Для расчета распространения волн цунами использовалась модель И.В. Файна, схожая с моделью TUNAMI. В качестве рельефа дна использовался массив базы данных GEBCO 2014.

По характеру проявления волн, акваторию можно разделить на несколько зон. Заметные волны цунами наблюдались не только в ближней зоне, но также в Приморье и Корее. Например, по данным мареографов, высоты волн провысили 50 см в Преображении и Рудной Пристани, Сокхчо и Мукхо.

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

25.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ «МОРСКОЙ» ГИДРОДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

А.С. Козелков

*НГТУ им. Алексеева, г. Нижний Новгород
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров*

askozelkov@mail.ru

С развитием технологий возможности вычислительной гидродинамики достигли значительного прогресса, как следствие, она находит все большее применение в качестве альтернативы натурному эксперименту, который часто является сложным и дорогостоящим мероприятием. В настоящее время это позволяет эффективно решать достаточно сложные прикладные индустриальные и фундаментальные задачи. Однако, не смотря на существенный прогресс в этой области, точное описание развития и предсказания характеристик многих гидродинамических процессов остается скорее исключением, чем правилом. В первую очередь к таким процессам относятся моделирование турбулентности, горение, течения в анизотропных пористых средах, многофазные течения и другие. Усугубляет ситуацию и тот факт, что широкое практическое внедрение, даже уже разработанных и математически обоснованных методов вычислительной гидродинамики, возможно лишь при использовании в расчетах «качественных» расчетных сеток.

Одной из наиболее важных задач механики жидкости и газа является адекватное описание геофизических явлений с помощью полной гидродинамической системы уравнений Навье-Стокса. До настоящего времени большинство геофизических явлений, такие возникновение, распространение и накат на берег волн цунами, воздействие волн большой амплитуды на побережье, штормовые нагоны и т.д., моделируются с помощью упрощенных моделей. Современные методы исследования геофизических явлений, таких как волны цунами, основаны, как правило, на обобщениях системы уравнений Навье-Стокса. Данные обобщения, реализованные численно, позволили смоделировать многие практически значимые и фундаментальные задачи. Несмотря на достигнутые успехи, расчет характеристик геофизических явлений представляет собой достаточно трудную задачу, как из-за неопределенности параметров источника, так и из-за многочисленных дополнительных факторов, таких как, например, нелинейность и дисперсия. Поэтому

очевиден переход к более сложным моделям их описания. Наиболее полной системой уравнений, позволяющей учесть все особенности, является система уравнений Навье-Стокса. В общем случае данная система не имеет аналитического решения, и все решения находятся численно. Проблема дискретизации уравнений Навье-Стокса, а также их численное решение составляют один из ключевых этапов математического моделирования [1,2]. В настоящее время система уравнений Навье-Стокса для моделирования геофизических явлений практически не применяется.

Одним из классов задач, требующих применения в изучении полной гидродинамической системы, являются внутренние океанические волны. Исследование внутренних гравитационных волн в контексте их воздействия на окружающую среду – одна из наиболее актуальных задач современной гидродинамики, интерес мирового научного сообщества к которой неуклонно растет, особенно в последние десятилетия, когда появились новые знания о необходимости учета их влияния как при проектировании объектов инфраструктуры на шельфе (для стратифицированных акваторий существенно воздействие этого типа волн на подводные части морских гидротехнических сооружений, в т.ч. посредством усиления сосредоточенных нагрузок, изгибающих и крутящих моментов и натяжения заякоривающих узлов, а также изменения рельефа дна), так и при разработке экологических мер защиты морских экосистем (перенос примесей и загрязнений). Создание современных моделей, позволяющих исследовать различные аспекты динамики внутренних волн и оценивать их воздействие на гидротехнические сооружения, очевидно, способствует реализации стратегии рационального природопользования в России, владеющей пятой частью площади шельфа Мирового океана и сосредоточенными на ней ресурсами.

Родственным классом выше упомянутых задач геофизики являются задачи судостроения – обтекание тел потоком жидкости, моделирование вращения гребных винтов, плавание тел на водной поверхности с учетом ветро-волновых нагрузок, моделирование маневрирования судов с учетом вращения движителей, моделирование процессов кавитации и т.д. Решение типичных задач судостроения – вращение гребных винтов и обтекания корпусов судов и их частей потоком вязкой жидкости в открытом океане требует применения точных физико-математических моделей и численных алгоритмов, специализированных сеточных генераторов, а также современных средств распараллеливания и постобработки.

В настоящей работе представлено описание методологии численного моделирования задач «морской» гидродинамики на основе полной гидродинамической системы уравнений Навье-Стокса. Методология реализована в пакете программ ЛОГОС [1,2,3]. Представлено описание базовых моделей и алгоритмов, позволяющих провести адекватную оценку последствий природных катастроф в прибрежной зоне и на берегу, что может быть использовано в различных задачах прогноза и при планировании строительства береговой инфраструктуры и защитных сооружений. Для задач судостроения продемонстрировано решение задач о вращении корабельных винтов в открытой воде, буксировка и качка на встречном волнении модели контейнеровоза KCS (KRISO container ship).

Результаты получены при поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий № FSWE-2024-0001 (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания гидродинамических характеристик жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования промышленных объектов»).

Литература

1. Козелков А.С., Таранов А.Е., Курулин В.В., Рудниченко А.А., Плыгунова К.С., Крутякова О.Л. Валидация пакета программ «Логос» на задачах судостроительной

- отрасли // Труды Крыловского государственного научного центра, 2023, т. 4, № 406, с. 59-73.
2. Kozelkov A. S., Kurulin V. V., Kurkin A.A., Taranov A.; Plygunova K.; Krutyakova O.; Korotkov, A. Numerical Approach Based on Solving 3D Navier–Stokes Equations for Simulation of the Marine Propeller Flow Problems. *Fluids* 2023, 8, 293. <https://doi.org/10.3390/fluids8110293>.
 3. Kozelkov A., Kurkin A., Utkin D.A., Tyatyushkina E., Kurulin V., Strelets D. Yu., Application of Non-Reflective Boundary Conditions in Three-Dimensional Numerical Simulations of Free-Surface Flow Problems // *Geosciences* 2022, 12, 427, <https://doi.org/10.3390/geosciences12110427>.

26.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИКИ ВСПАРЫВАНИЯ РАЗРЫВА В ОЧАГЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ГЕНЕРАЦИЮ ЦУНАМИ

К.А. Семенцов¹, Т. Баба², С.В. Колесов^{3,4}, Ю. Таниока¹, М.А. Носов^{3,4}

¹*Институт Сейсмологии и Вулканологии, Университет Хоккайдо, г. Саппоро*

²*Университет Токусима, г. Токусима*

³*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

⁴*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

sebbest@yandex.ru

Исследуется влияние динамики вспарывания разрыва в очаге землетрясения на генерацию цунами. Теоретические работы показывают, что динамика вспарывания разрыва существенно влияет не только на амплитуду цунами, но и на полную энергию волны (Носов, 1998; Todorovska & Trifunac, 2001). Данное исследование преследует две цели: (1) оценить влияние динамики вспарывания разрыва на шестнадцать цунами 1992 – 2021 гг. в терминах полной энергии цунами и (2) детально изучить событие Иллапель 2015 г. (Чили) в терминах распределения амплитуд цунами.

Для каждого из шестнадцати событий 1992 – 2021 гг. были рассчитаны два источника цунами: динамический (движение дна во время землетрясения) и статический (остаточная деформация дна). Расчет источников проводился на основе моделей конечных разломов (Finite Fault Models), предоставленных Геологической службой США. Для обоих типов источников было выполнено численное моделирование цунами в рамках линейной теории длинных волн. Установлено, что в одиннадцати из шестнадцати событий полная энергия цунами для динамического источника превышает полную энергию цунами для статического источника. Максимальная разница в энергиях (9,1%), как и предсказывала теория, наблюдается при минимальном отношении средней скорости вспарывания разрыва к скорости длинных волн.

Событие Иллапель 2015 г. подробно исследовано с помощью дисперсионных моделей цунами JAGURS и CPTM. Модель JAGURS основана на 2D нелинейных дисперсионных уравнениях Буссинеска (Baba et al. 2015), а модель CPTM – на 3D уравнениях линейной потенциальной теории сжимаемой жидкости (Nosov & Kolesov 2019). Установлено, что динамический источник приводит к пространственному перераспределению амплитуд цунами и заметному усилению высокочастотной составляющей во временных рядах высот цунами. В некоторых точках побережья Чили

разница между расчетами для динамического и статического источников составляет более 2 м.

27.

ЦУНАМИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Д.И. Пилик^{1,2}, И.П. Медведев¹, Е.С. Цуканова¹

¹ *Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

² *Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

dariapilik12@mail.ru

Японское море представляет собой сейсмически активный регион, где происходит множество землетрясений различного масштаба. Некоторые из них могут вызывать цунами. Наиболее крупные цунамигенные землетрясения, зарегистрированные в акватории Японского моря за последние 100 лет: Ниигатское 1964 г. ($M_w = 7.5$), Монеронское 1971 г. ($M_w = 7.5$), Япономорское 1983 г. ($M_w = 7.7$), Окуширское 1993 г. ($M_w = 7.8$), Невельское 2007 г. ($M_w = 6.2$), Ното 2024 г. ($M_w = 7.5$). Большинство событий были детально изучены и описаны, однако некоторым случаям было уделено меньше внимания, несмотря на их значимость. Одними из таких цунами являются Монеронское цунами 1971 г. и Невельское цунами 2007 г., исследованию особенностей которых, посвящена данная работа.

Монеронское землетрясение с магнитудой $M_w = 7.5$ произошло 05.09.1971 в 18:35 UTC в Татарском проливе вблизи о. Монерон. Гипоцентр залегал на глубине 15-20 км. В результате землетрясения были сгенерированы волны цунами высотой 30-40 см по данным мареографов в Невельске, Холмске и на японской станции Вакканай. По визуальным наблюдениям высота цунами достигала 2 м.

Невельское землетрясение с магнитудой $M_w = 6.2$ было зафиксировано 02.08.2007 в 02:37 UTC у побережья города Невельск. Гипоцентр залегал на глубине около 10 км. Несмотря на малую магнитуду, были сгенерированы волны цунами высотой 40-50 см по данным мареографа (Холмск) и до 3.2 м по данным визуальных наблюдений. Данное событие можно считать аномальным, т.к. землетрясения с магнитудой такой величины не принято считать цунамигенными.

Моделирование цунами производилось с использованием модели TUNAMI (авторская модификация И.В. Файна). В качестве исходных данных использовались данные о рельефе дна GEBCO 2014 и данные о геометрии сейсмического очага. Источники обоих землетрясений были самостоятельно созданы на основе данных каталога ISC-GEM. Параметры очагов рассчитывались с помощью формул Окады. Верификация модели производилась с использованием записей мареографов на прибрежных станциях российского и японского побережий. Были воссозданы оба события, оценены максимальные высоты волн на побережье и в открытой части акватории и их особенности проявления на прибрежных территориях.

В результате сравнения данных моделирования с данными прибрежных уровнемерных станций для каждого из событий был выбран очаг, наилучшим образом отображающий колебания уровня во время и после прохождения цунами. В случае Монеронского цунами была выявлена проблема заиливания подводной трубы мареографа, что ранее описывалось в работе [Костенко, Зайцев, 2018]. При анализе Невельского цунами было сделано предположение о прохождении метеоцунами в этом регионе, что усилило

колебания уровня моря на прибрежных станциях. Также для каждого из событий проводился анализ заплесков на побережье.

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

28.

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПОСТРОЕНИЮ АНАЛИТИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ БОРА И УЕДИНЁННОЙ ВОЛНЫ НА ЗАФИКСИРОВАННОЕ ПОЛУПОГРУЖЕННОЕ ТЕЛО

О.И. Гусев¹, Г.С. Хакимзянов¹, В.С. Скиба^{1,2}, Л.Б. Чубаров¹

¹ *Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
г. Новосибирск*

² *Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск*

gusev_oleg_igor@mail.ru

В докладе обсуждается подход, основанный на результатах серии вычислительных экспериментов, выполненных с использованием одномерных моделей мелкой воды [1]: первого длинноволнового приближения (NSWE-модель) для воздействия бора и второго длинноволнового приближения (SGN-модель) для воздействия уединённой волны на полупогруженное зафиксированное тело. Необходимость оценивать силовое воздействие таких волн с помощью приближенных «инженерных» аналитических соотношений возникает при проектировании и эксплуатации объектов, таких как хранилища сжиженного природного газа, плавучие атомные электростанции и т.п., размещённых и заякоренных в прибрежных зонах.

Для расчёта взаимодействия волны с полупогруженным телом авторами рассматривалась модельная акватория с горизонтальными дном акватории и днищем тела, и вертикальными боковыми его гранями. При построении соотношений использовались результаты 3600 расчётов с перебором значений следующих параметров задачи: амплитуда набегающей волны от $0.01h_0$ до $0.5h_0$, заглубление тела от $0.05h_0$ до h_0 , длина тела от $3h_0$ до $25h_0$ (h_0 – постоянная глубина акватории). Получены формулы, аппроксимирующие результаты расчётов, для оценки максимальных горизонтальной и вертикальной составляющих суммарной волновой силы, заплесков на лицевую и тыльную грань тела. По результатам сравнения с известными ранее формулами [2], результатами расчётов и экспериментальных исследований задач о взаимодействии волн с полупогруженным телом и вертикальной стенкой авторами предлагаются выводы о границах применимости полученных формул.

Литература

1. Gusev O.I., Khakimzyanov G.S., Skiba V.S., Chubarov L.B. Shallow water modeling of wave–structure interaction over irregular bottom // Ocean Engineering. 2023. V. 267. Art. 113284.
2. Liu P. L.-F., Al-Banaa K. Solitary wave runup and force on a vertical barrier // J. Fluid Mech. 2004. V. 505. P. 225–233.

29.

БЫСТРЫЙ РАСЧЁТ ТРАНСОКЕАНСКОГО ЦУНАМИ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

М.М. Лаврентьев¹, Ан.Г. Марчук^{1,2}, К.К. Облаухов¹

¹*Институт Автоматики и Электростроения СО РАН, г. Новосибирск*

²*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск*

mmlavr@gmail.com

С определенной периодичностью в Тихом Океане возникают катастрофические цунами, создающие опасность даже некоторым значительно удалённым от очага участкам побережья. Например, Чилийское цунами 1960 года нанесло ущерб инфраструктуре на побережье Японии. В таких случаях локальные службы предупреждения цунами должны до прихода волны на участки побережья под их ответственностью оценить время прихода и высоту ожидаемых там цунами. Это можно сделать путём численного моделирования распространения цунами от заданного очага (начального вертикального смещения водной поверхности). Однако на персональном компьютере это можно сделать за приемлемое время лишь на весьма грубой сетке. Как правило, трансокеанское цунами моделируют с привлечением суперкомпьютера.

В работе предложен вычислительный конвейер, позволяющий практически достичь производительности суперкомпьютера при использовании платы FPGA в качестве со-процессора для персонального компьютера. При этом оперативная память этой платы позволяет вести расчёт распространения цунами во всей акватории Тихого океана с шагом 1 географическая минута (примерно 1800 м в направлении Север-Юг). С использованием разностной схемы МакКормака для численного решения нелинейной системы дифференциальных уравнений мелкой воды расчёт 30-ти часов распространения волны по Тихому океану занимает всего 23ы минут. Это позволяет не только смоделировать распространение цунами от очага до всех побережий, но и, корректируя начальную высоту в очаге по записям глубоководных регистраторов цунами, повторить расчёт несколько раз ещё до прихода волны к интересующему участку побережья. Таким образом, используя данную методику, любая локальная служба предупреждения цунами будет иметь возможность ещё до прихода волны в зону ответственности этой службы оценить ожидаемую там высоту цунами.

30.

ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ СЕЙШ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ УДАЛЕННЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В МАЛЫХ ВОДОЕМАХ СУШИ

Д.Н. Валеева¹, 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*

dilaravn@mail.ru

В работе предлагается метод оценки амплитуды сейш, возбуждаемых удаленными землетрясениями в малых замкнутых водоемах. В основу метода положено предположение о том, что горизонтальные размеры водоема существенно уступают длинам сейсмических волн. Это предположение позволяет представить сейсмическое воздействие как колебания недеформируемой чаши водоема и перейти в неинерциальную систему отсчета, связанную с дном. При такой постановке задачи возбуждение сейш землетрясением описывается как действие внешней вынуждающей силы, определить которую можно по измеренной или рассчитанной акселерограмме землетрясения. Показано, что для удаленных землетрясений основную роль в возбуждении сейшевых колебаний уровня играют горизонтальные компоненты ускорения, а вклад вертикальной компоненты пренебрежимо мал.

Метод оценки амплитуды сейш основан на аналитическом решении 1D задачи (канал), из которого следует, что водоем целесообразно характеризовать двумя параметрами: горизонтальной протяженностью и максимальным периодом собственных колебаний. По этим двум параметрам и при наличии акселерограммы землетрясения метод позволяет оперативно оценить амплитуду сейшевых колебаний уровня.

Работоспособность метода была проверена путем сопоставления оценок с результатами 2D численных экспериментов. В численных расчетах использовалась запись катастрофического землетрясения в Турции 6 февраля 2023 г., которая была получена сейсмометром кафедры физики Земли физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на расстоянии 2050 км от эпицентра. Численные эксперименты проводились для набора модельных бассейнов цилиндрической формы и постоянной глубины, а также для водоемов с батиметрией, соответствующей реальным озерам Ивановской и Владимирской областей. Показано, что при отсутствии ледяного покрова, свойственного водоемам средней полосы в феврале, размах сейшевых колебаний мог достигать 0.5 м.

31.

ВЛИЯНИЕ ПРИДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ТРАНСПОРТ ВАЛУНОВ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНОЙ ВДОЛЬ ПЕСЧАНОГО ПЛЯЖА

И.И. Диденкулова^{1,2}, П.-Ц. Су¹, А. Йенсен¹

¹Университет Осло, г. Осло, Норвегия

²Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

didenkulova@mail.ru

В работе изучается воздействие донных отложений на прибрежном склоне на транспорт валунов уединенной волной. Исследование проведено экспериментально в малом волновом бассейне Лаборатории гидродинамики Университета Осло. Бассейн имел длину 3 м, ширину 10 см, и был заполненной пресной водой с глубиной 5 см. В конце бассейна располагался плоский откос со склоном 1:10. Валуну перемещались обрушающейся уединенной волной с отношением амплитуды к глубине воды $a/h = 0.5$. Эксперименты проводились для двух конфигураций пляжа: (i) пустое дно лотка из полиметилметакрилата, (ii) этот же склон, покрытый тонким слоем песка фракции 65 мкм. Валуну представляли собой бетонные блоки прямоугольной формы с размером каждой из сторон от 1 см до 3 см. Валуну размещались поочередно на разных позициях вдоль берегового склона относительно места обрушения волны.

Транспорт валунов изучался в зависимости от их характеристик (размер, ориентация), начального положения и наличия донных отложений на береговом склоне.

Показано, что наличие тонкого слоя донных отложений существенно усиливает транспорт валунов. Максимальное увеличение длины перемещения наблюдалось для валунов, изначально расположенных в месте обрушения волны, с наименьшей длиной (вдоль главной оси бассейна) и высотой, и наибольшей шириной.

Другой интересный результат касался типа движения валунов. Валунуны испытывали либо скольжение, либо переворачивание. Валунуны, высота которых была как минимум в два раза больше их длины, переворачивались. Это касалось валунов, размещенных как на пустом пластиковом склоне, так и на песчаном склоне. При этом наибольшее смещение валуна на пустом склоне произошло из-за переворачивания, в то время как на песчаном склоне – из-за скольжения.

32.

ЭФФЕКТЫ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУНТА ПРИ РАЗМЫВАХ ОТ ВОЛН ЦУНАМИ

А.В. Куприн, И.Г. Кантаржи

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва

rtyter55@gmail.com

Одной из причин разрушения гидротехнических сооружений, является размыв грунта основания, приводящий либо к деформациям отдельных элементов конструкции, либо к потери общей устойчивости сооружения. Усилению эффекта размыва может способствовать разжижение грунта. Волновое разжижение грунта морского дна создает риск для устойчивости морских сооружений.

Был проанализирован крупномасштабный эксперимент Tonkin, проведенных с целью изучения механизмов размыва, связанных с набеганием цунами на пляж и участия разжижения в данном процессе. Было установлено, что недостающим механизмом, отвечающим за усиленный размыв грунта от волн цунами, является градиент порового давления, возникающий в результате быстрого снижения давления при откате волны, то есть мгновенное разжижение грунта. По данным эксперимента было выявлено пороговое значение в 0.5 для параметра усиления размыва, который определяется как доля взвешенного веса осадка, выдерживаемого градиентом порового давления, и важен для определения усиленного размыва грунта при разжижении. Была модифицирована формула для определения глубины местного размыва от волн цунами с учетом мгновенного разжижения грунта. Было показано, что эффект разжижения грунта может в 1.8 раз увеличить глубину размыва по сравнению с глубиной, рассчитанной без учета этого эффекта.

33.

**АНАЛИЗ ОРИЕНТАЦИИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ СЕТИ ПОДВОДНЫХ
ОБСЕРВАТОРИЙ S-NET**

О.В. Пономарев¹, С.В. Колесов^{1,2}

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет*

² *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН*

bumerangxfox@gmail.com, kolesov@phys.msu.ru

При сейсмических движениях морского дна в диапазоне частот вынужденных колебаний, между вертикальной компонентой ускорения дна и давлением должна выполняться линейная зависимость [1]. На данном факте основан метод проверки ориентации подводных акселерометров успешно апробированный ранее на данных японских кабельных измерительных сетей DONET и DONET-2 [2]. В данном докладе этот метод применяется к станциям сети S-net. Предлагается усовершенствование метода, направленное на корректировку данных акселерометра, в случае нарушения его ориентации в результате косейсмических смещений или нарушения технологии постановки донной станции.

[1] Nosov, M., Karpov, V., Kolesov, S., Sementsov, K., Matsumoto, H., and Kaneda, Y. (2018). Relationship between pressure variations at the ocean bottom and the acceleration of its motion during a submarine earthquake. *Earth Planets Space* 70:100. doi: 10.1186/s40623-018-0874-9

[2] Mikhail Nosov, Viacheslav Karpov, Kirill Sementsov, Sergey Kolesov, Hiroyuki Matsumoto, and Yoshiyuki Kaneda. Approbation of the method for examining the performance of seafloor observatory sensors using distant earthquakes records. *FRONTIERS IN EARTH SCIENCE*, 9:661337, 2021. doi: 10.3389/feart.2021.661337