

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦУНАМИ
ПРИ ОТДЕЛЕНИИ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



**III всероссийская научная конференция
с международным участием
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»**

16-17 ноября 2021 г

Сборник тезисов докладов

Москва, 2021

III всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ», 16-17 ноября 2021 г.
Сборник тезисов докладов / Под ред. М.А.Носова. - М.: Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2021 г. 30 с.

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
член-корр. РАН Б.В. Левин
академик РАН Л.И. Лобковский
член-корр. РАН А.А. Маловичко
д.ф.м.н. В.К. Гусяков
проф. РАН И.И. Диденкулова
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
Г.Н. Нурисламова
К.А. Семенцов
О.И. Яковенко

Сайт конференции:

http://ocean.phys.msu.ru/tsu_conf/

Электронная почта:

tsu_conf@ocean.phys.msu.ru

Конференция проводится в дистанционном формате на платформе

<https://distant.msu.ru/>

ПАМЯТИ ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ЦУНАМИ
Алексея Илларионовича ИВАЩЕНКО (1.11.1941 – 16.11.2020)

и

Евгения Аркадьевича КУЛИКОВА (27.01.1950 – 21.11.2020)

О.И. Яковенко

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН

tsucen@ocean.ru

Ровно год назад ушли от нас два выдающихся ученых в области цунами Алексей Илларионович Иващенко и Евгений Аркадьевич Куликов. Рана от этой потери не затянулась и полностью, думаю, не затянется никогда.

Евгений Аркадьевич Куликов, доктор физико-математических наук, в течение многих лет руководил Лабораторией цунами им. С.Л. Соловьева в ИО РАН. Его знания и об океане были очень широки, что позволяло ему видеть и понимать физику процессов и формулировать задачи, касающиеся многих сторон как в вопросах, связанных с цунами, так и с изменением уровня в морях и океанах. Он был одним из самых сильных специалистов в мире по статистическому исследованию процессов в океане.

Алексей Илларионович Иващенко 14 лет проработал в Лаборатории цунами ИО РАН. Его вклад в исследование землетрясений и, в частности, цунамигенных землетрясений, типов их очагов и оценка риска этих событий – неоценим и уникален.

И Алексей Илларионович и Евгений Аркадьевич начали свою работу в области геофизики и гидрофизики на Сахалине в Комплексном научно-исследовательском институте ДВНЦ РАН, ныне Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН, куда А.И. Иващенко приехал по распределению после окончания Новосибирского государственного университета (Факультет естественных на) в 1964 г., а Е.И. Куликов - после окончания Московского физико-технического института (Кафедра термогидромеханики океана) в 1973 году. В это время возглавлял институт Сергей Леонидович Соловьев, который себе в заместители директора пригласил Сергея Сергеевича Лаппо. Сергей Леонидович создал советскую цунамистику и Службу оповещения о цунами, Сергей Сергеевич создал новую лабораторию Физики океана, состоящую в основном из молодых специалистов, которая в первую очередь была ориентирована на изучение длинных волн на шельфе и цунами.

До переезда в Москву за 40 лет работы на Сахалине А.И. Иващенко прошел путь от инженера до заведующего Лабораторией сейсмологии и заместителя директора ИМГиГ ДВО РАН по научной работе. Евгений Аркадьевич Куликов с 1980 по 1986 гг. был заведующим Лабораторией физики океана Отдела цунами СахКНИИ/ИМГиГ ДВНЦ АН СССР.

Достаточно подробно научный путь Иващенко и Куликова изложены в статьях, опубликованных в журнале «Океанологические исследования» в декабре 2020 года.

Рабинович А.Б., Файн И.В., Медведев И.П., Яковенко О.И. Памяти Евгения Аркадьевича Куликова (27.01.1950 – 21.11.2020) // Океанологические исследования. 2020. № 4. С. 177-192.

Яковенко О.И., Медведев И.П., Кайстренко В.М., Ковачев С.А., Крылов А.А. Памяти Алексея Илларионовича Иващенко (1.11.1941 – 16.11.2020) // Океанологические исследования. 2020. № 4. С. 193-204.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

И.П. Медведев¹, А.Ю. Медведева^{1,2,3}, Е.А. Куликов¹, А.И. Иващенко¹

¹*Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва*

²*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

³*Московский физико-технический институт*

medvedev@ocean.ru

Каспийское море относится к сейсмически активным регионам. Из-за отсутствия качественных данных о проявлениях цунами в Каспийском море для оценки цунамиопасности был применен вероятностный подход, основанный на статистической модели сейсмичности региона. В основе региональной модели сейсмических источников цунами лежит каталог ISC-GEM v.7.0 и данные о сильнейших исторических землетрясениях региона за период времени с 800 г. н.э. по н.в. Каталог ISC-GEM включает данные с 1904 по 2016 гг. и содержит сведения о землетрясениях с магнитудой $M_w \geq 5.5$. Также были использованы каталоги активных разломов и СМТ решений механизма очага, цифровые модели рельефа морского дна и прилегающей суши.

На основе статической модели региона был сгенерирован модельный каталог вероятных цунамигенных землетрясений магнитудой $M_w \geq 6$. Каждое модельное землетрясение в этом каталоге задается набором из значений для 10 параметров, полностью характеризующих сейсмический источник в рамках принятой кинематической модели площадки разрыва конечных размеров: $M_w, Lat, Lon, h, L, W, \bar{D}, STK, DIP, SLIP$. Значения параметров выбирались случайным образом по методу Монте-Карло из наблюдаемых распределений (или на основе регрессии с магнитудой), что позволяет учесть алеаторную (случайную) неопределенность их оценок. Очевидно, что для получения статистически обоснованного распределения максимальных высот волн цунами на побережье с разной обеспеченностью необходимо использовать модельный каталог с большим числом событий. Сгенерированный каталог землетрясений содержит 339 событий магнитудой $M_w \geq 7$, что дает хорошее статистическое обеспечение для надежного вероятностного определения параметров волн цунами. Каталог охватывает временной интервал порядка 20 тыс. лет.

На основе полученных возможных землетрясений были рассчитаны максимальные высоты волн для всего побережья моря для различных периодов повторяемости: 250, 500, 1000 и 5000 лет и построены соответствующие обзорные карты цунамирайонирования Каспийского моря. Максимальные высоты цунами были получены для восточного побережья. На восточном побережье на широте $40-42^\circ$ высота цунами составляет 6–8 м. Максимальная высота до 11 м зафиксирована в районе пролива Кара-Богаз-Гол ($\sim 41^\circ$ с.ш.). Вблизи п-ва Челекен ($\sim 39.4^\circ$ с.ш.) высота волн цунами составляет 5 м. Высота цунами до 5.5 м может наблюдаться в западной части Казахского залива. В восточной части южного побережья Каспийского моря высота цунами не превышает 2 м, на западной части южного побережья повышается до 3–4 м. На восточном побережье Каспия высота цунами достигает 4–5 м с максимумом вблизи Апшеронского п-ва (6 м) и вблизи $\sim 38^\circ$ с.ш. (6 м). В Северном Каспии высота волн цунами не превышает 1 м.

ВОЗМОЖНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ЦУНАМИ ГИПОТЕТИЧЕСКИМИ ПОДВОДНЫМИ ОПОЛЗНЯМИ ВБЛИЗИ ПОБЕРЕЖЬЯ О. САХАЛИН

А.И. Зайцев¹⁾, Е.Н. Пелиновский²⁾, И.С. Костенко¹⁾

<sup>1) Специальное конструкторское бюро автоматизации морских исследований,
Дальневосточное отделение РАН, Южно-Сахалинск</sup>

^{2) Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород}

aizaytsev@mail.ru

Согласно статистике, около 85% волн цунами генерируются подводными землетрясениями, и только малая часть – оползнями или обвалами. Во многих случаях разрушительные оползни произведены локальными процессами в отсутствие сейсмических событий. Волны большой амплитуды, связанные с оползнями, наблюдались на Аляске, в Японии и во многих фиордах Норвегии. Так, сход лавины, содержащей около 300 млн. кубометров породы со склонов горы Фейруэзер (Аляска, 10 июля 1958 г.) в бухту Литуя привел к образованию цунами высотой 60 м, при этом максимальный заплеск в самой бухте достиг рекордной цифры в 524 м.

Подводный оползень на склоне о-ва Сахалин был обнаружен и закартирован по данным батиметрической и сейсмической съемок, проведенных в 50-м и 56-м рейсах НИС «Академик М. А. Лаврентьев» (2010, 2011 гг.) в рамках корейско-российско-японского проекта SSGH (Sakhalin Slope Gas Hydrates) [Иванова и др., 2018].

В данной работе проводится исследование опасности цунами от подводных оползней вблизи побережья о. Сахалин. Наш метод оценки цунамиопасности подводных оползней основан на численном моделировании реалистических сценариях движения оползня. Мы применяем модель TWO-LAYER [Imamura and Imteaz, 1995]. Были проведены расчеты нескольких сценариев схода оползней с различными их параметрами (объем, местоположение, плотность). Рассчитаны высоты волн на ближайшем побережье и скорости потоков. Очевидно, что такие волны способны произвести значительные разрушения и привести к большому количеству смертей; следовательно, меры по смягчению воздействия цунами необходимы.

Таким образом, изучение подводных и возникающих на границе сред оползней имеет большое значение как для фундаментальных и прикладных исследований, так и для народнохозяйственной деятельности и безопасности жизни людей. Поэтому изучению механизмов формирования таких цунами необходимо уделить особое внимание, в частности, особенностям возникновения этих процессов для улучшения численных моделей их генерации и распространения.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов РФФИ (19-55-15005 и 20-05-00162) и Грантов Президента РФ (МД-148.2020.5 и НШ-2485.2020.5)

1. Иванова А.А., Куликов Е.А., Файн И.В., Баранов Б.В. Генерация цунами подводным оползнем вблизи восточного побережья о. Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 111–116.

2. Imamura F., Imteaz M.A. Long waves in two layer: governing equations and numerical model // Journal of Science of Tsunami Hazards. 1995. V. 13. № 1. P. 3 – 24.

МЕТЕОЦУНАМИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ САХАЛИНА И КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Г.В. Шевченко^{1,2}, А.А. Шишкин¹, А.В. Лоскутов^{1,4}, Т.Н. Ивельская³

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

²*Сахалинский филиал ВНИРО, г. Южно-Сахалинск*

³*Центр цунами СахУГМС, г. Южно-Сахалинск*

⁴*Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН, г. Москва*

shevchenko_zhora@mail.ru

В 2010–2012 гг. сеть береговых измерителей цунами, созданная на Сахалине и Курильских островах в рамках Службы предупреждения о цунами, а также развиваемая Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН на южных Курильских островах, достигла максимального развития. Этими приборами были зарегистрированы сильные трансокеанские цунами, вызванные землетрясениями у берегов Чили (февраль 2010 г.) и Японии (март 2011 г.). В тени этих опасных событий осталась регистрация более слабых колебаний, сходных по характеру своих проявлений, но не связанных с сейсмическими источниками. Именно эти события, интерпретируемые как метеоцунами, и являются предметом данного исследования.

Основное внимание было уделено аномальным колебаниям в ряде бухт о. Шикотан (Малокурильская, Крабовая, Церковная, Димитрова) и в бухте Южно-Курильская на о. Кунашир, вызванным прохождением хорошо выраженного атмосферного фронта, двигавшегося на северо-восток со скоростью около 100 км/ч. Длинноволновые процессы в указанных бухтах были подобны цунами, они характеризовались четким вступлением, быстрым нарастанием и более медленным спаданием интенсивности, максимальный размах колебаний в бухте Малокурильская достиг 75 см. Для этой ситуации было выполнено численное моделирование прохождения фронта атмосферного давления, которое показало значительное возрастание отклика на его прохождение с западной стороны о. Шикотан вследствие близости скорости его перемещения к скорости длинных волн, а также эффективную генерацию резонансных колебаний в бухтах.

Проанализированы также метеоцунами на южных Курильских островах 3-4 августа 2010 г. (вызвано мощной грозой), в Северо-Курильске 21 марта 2010 г., 4 октября 2010 и 25 мая 2011 г. в порту Холмск на юго-западном побережье о. Сахалин (обусловлены прохождением атмосферных фронтов). Проведенное исследование показало, что метеоцунами сравнительно часто (1–2 раза в год) наблюдаются на побережье о. Сахалин и Курильских островов, что, вероятно, обусловлено высокой активностью атмосферных процессов в регионе. Метеоцунами представляют определенную угрозу (существенно меньшую по сравнению с сейсмическими волнами, но вполне реальную) в бухтах с хорошо выраженными резонансными свойствами, таких как Малокурильская, Крабовая, Холмская.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД В МЕТОДИКЕ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ УГРОЗЕ ЦУНАМИ

Я. Сельва¹, С. Лорито², А.Ю. Бабейко³ и RTF-Team

¹*Институт геофизики и вулканологии, г. Болонья, Италия*

²*Институт геофизики и вулканологии, г. Рим, Италия*

³*Немецкий центр Наук о Земле, г. Потсдам, Германия*

babeyko@gfz-potsdam.de

Во многих регионах Земли, там где источники разрушительных цунами находятся в непосредственной близости от побережья, операционные центры предупреждения об угрозе цунами сталкиваются с задачей быстрого прогнозирования степени угрозы непосредственно после землетрясения (10-15 минут и менее). Эта задача существенно усложняется недостатком фактических данных о происходящем событии, то есть прогнозирование проходит в условиях высокой неопределенности. В настоящей работе мы представляем методику вероятностного прогнозирования (Probabilistic Tsunami Forecasting -- RTF) применимую к проблеме раннего предупреждения об угрозе цунами. Наш метод явным образом учитывает и обрабатывает неопределенности данных и результирующих прогнозов, представляя последние в виде функций распределения плотности вероятности ожидаемых величин затопления. Такой подход позволяет определять уровни предупреждений в соответствии с любым заранее определенным уровнем консерватизма, основанным на целевом балансе пропущенных и ложных тревог. Более того, наш подход позволяет разделить научную задачу оптимального прогноза уровня затопления, являющуюся прерогативой научного и инженерного сообщества, и задачу принятия оптимального решения касательно эвакуации населения, относящуюся к ведению органов обработки чрезвычайных ситуаций. Применимость нашего подхода тестируется на примере ретроспективного анализа чилийского цунами 2010 года (M8.8 Maule), цунами 2003 года в Западном Средиземноморье (M6.8 Zemmouri-Boumerdes, Алжир), а также всех землетрясений в районе Средиземного моря вызвавших предупреждающие сообщения от Итальянского Центра Предупреждений об угрозе цунами (CAT-INGV) начиная с момента его создания в 2015 году, демонстрируя точность прогнозов в широком диапазоне магнитуд и типов землетрясений.

ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЦУНАМИАКТИВНОСТИ

В.М. Кайстренко

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

vict-k@mail.ru

Данные о высотах цунами на побережье следует рассматривать как случайный ряд и для каждого пункта ранжировать в соответствии с величиной

$$h_1 \geq h_2 \geq h_3 \geq \dots \quad (1)$$

Функция повторяемости цунами (ФПЦ) – важнейшая характеристика цунамиактивности – это средняя частота событий в заданном месте x с высотой, равной или превышающей пороговое значение h

$$\varphi(h) = \left\langle \frac{N(\text{заплеск} \geq h)}{T} \right\rangle, \quad (2)$$

где N есть число таких событий, произошедших за период времени T .

Ряд математических свойств функции повторяемости приходится постулировать на основе соображений физического характера. Выяснено при этом, что для участков побережья размером порядка 300 км функция повторяемости имеет вид:

$$\varphi(x; h) = f \cdot \Phi\left(\frac{h}{H^*(x)}\right), \quad (3)$$

где f – асимптотическая частота сильных цунами в регионе, которая медленно изменяется вдоль берега и может считаться региональной постоянной. Параметр H^* – характеристическая высота цунами, пропорциональная среднему коэффициенту трансформации $K(x)$ высоты цунами при ее распространении из океана к берегу.

При этом средние величины логарифмов частот $\ln(\varphi_k)$, соответствующих k -му заплеску цунами в ряду (1) и их дисперсии вычисляются аналитически:

$$\overline{\ln \varphi(h_k)} = \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s} - 0.577\dots - \ln T, \quad (4)$$

$$D_k = D(\ln \varphi(h_k)) = \frac{\pi^2}{6} - \sum_{s=1}^{k-1} \frac{1}{s^2}. \quad (5)$$

Имея надежный ряд данных для Южно-Курильска, мы построили функцию повторяемости. Точность оценок параметров цунамиактивности $f = 0.15 \pm 0.04$ 1/год и $H^* = 1.6 \pm 0.5$ м, полученных за период наблюдений 67 лет (1953 – 2020 гг) оказалась ожидаемо невысокой. Можно рассмотреть обратную ситуацию: использовать полученные параметры $f_0 = 0.15$ 1/год и $H_0^* = 1.6$ м в качестве входных и построить по ним синтетические ряды высот цунами $h \geq 0.5$ м на заданный период времени $T = 250$ and 500 лет, а по синтетическим рядам, аналогичным (1), оценить «выходные параметры» f и H^* и их дисперсии. В результате получены оценки: $f_{250} = 0.15 \pm 0.01$ год⁻¹ и $H_{250}^* = 1.5 \pm 0.16$ м для $T = 250$ лет и $f_{500} = 0.15 \pm 0.006$ год⁻¹ и $H_{500}^* = 1.5 \pm 0.08$ м для $T = 500$ лет. Таким образом, для получения параметров цунамиактивности с приемлемой точностью 5-10 % нужны полные ряды высот цунами $h \geq 0.5$ м в заданном месте длительностью не менее 250 лет.

Ряды наблюдений цунами указанной длительности имеются на Северо-Восточном побережье Хонсю и на Тихоокеанском побережье Южной Америки, но в них документированы только сильнейшие события, так что эти ряды не являются полными.

Серьезный прогресс с улучшением качества оценок цунамиактивности возможен ретроспективно, с привлечением данных о палеоцунами. Стоит заметить, что в настоящее время в технологии получения оценок цунамиактивности на базе данных о палеособытиях имеется много внутренних нерешенных проблем.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКО ДЕЙСТВУЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ В УПРУГОМ ОСНОВАНИИ, НА ПРОФИЛИ ДЛИННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН.

С.Ю. Доброхотов^{1,2}, Х.Х. Ильясов¹, О.Л. Толстова^{2,3}

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

²*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия*

³*Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, Москва, Россия*

s.dobrokhотов@gmail.com, hisam.ilyasov@gmail.com, olgall1@rambler.ru

Изучается поведение решения задачи о возбуждении длинных гравитационных волн в тяжелом слое жидкости над упругим основанием в зависимости от параметров коротко действующих источников.

Ранее авторами было получено решение задачи возбуждения волн локализованными в пространстве и во времени источниками, действующими в упругом основании. С помощью операторных методов нестандартная с точки зрения теории дифференциальных уравнений задача приводилась сперва к задаче Коши с источником, а затем, к задаче с начальными условиями. Разложение решения по собственным волнам (модам) позволило исключить не влияющие на длинные волны компоненты и ограничиться изучением самой медленной волны в системе - т.н. "водяной моды". Использование упрощенных выражений для корня дисперсионного уравнения, отвечающего "водяной моде" в сочетании с приближением длинных волн дало возможность получить явные аналитические зависимости, описывающие возвышение поверхности жидкости.

В докладе обсуждаются результаты расчетов волновых профилей (зависимостей возвышения поверхности жидкости от расстояния) по выведенным ранее формулам. Проводится анализ влияния таких параметров как глубина залегания источника, время его действия и вид зависимости от времени на характеристики гравитационных волн. Изучение производится с привлечением "эквивалентного размера" источника, получаемого в результате сравнения волновых профилей, рассчитанных для коротко действующих источников с профилями волн, вычисленных с помощью поршневой модели с источником специального вида.

К ВОПРОСУ О ГЕНЕРАЦИИ ЦУНАМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ДВИЖЕНИЯМИ ДНА

М.А. Носов^{1,2,a}, А.В. Большакова^{1,b}, К.А. Семенцов^{1,c}

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.*

^anosov@phys.msu.ru, ^bannabolshakova@list.ru, ^csebest@yandex.ru

Выполнен физический анализ процесса формирования волн цунами сейсмическими движениями дна. Показано, что за генерацию цунами отвечают исключительно низкочастотные компоненты спектра сейсмических движений дна, в том числе остаточные (косейсмические) смещения дна. Установлено, что при рассмотрении задачи о генерации цунами землетрясением можно полагать, что давление на подвижное дно определяется гидростатической компонентой, а динамическая компонента давления пренебрежимо мала. Выполнена сравнительная оценка эффективности передачи энергии водному слою при движениях дна в своей плоскости и в нормальном направлении. Показано, что ведущая роль в передаче энергии принадлежит нормальным движениям дна, которые сопровождаются вытеснением воды.

Для набора сильных подводных землетрясений с использованием данных о распределении подвижки (Finite Fault Model, USGS) выполнены оценки работы A , которая совершается против сил гидростатического давления при формировании косейсмических смещений дна, и доступной потенциальной энергии E_{TS} (энергии цунами). Установлено, что энергия цунами E_{TS} на 3-4 порядка меньше работы A . Сопоставление величин A и E_{TS} с энергией землетрясения E_{EQ} , рассчитываемой по формуле Канамори, позволяет утверждать, что доля энергии землетрясения, переходящая к волнам цунами, незначительна и растет с увеличением моментной магнитуды M_w (при $M_w = 7$ – 0.004%, при $M_w = 9$ – 0.16%). Но работа A по абсолютной величине оказывается сопоставимой с энергией землетрясения E_{EQ} .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №19-05-00351, №20-07-01098, №20-35-70038.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКАТА УЕДИНЕННЫХ ВОЛН НА ОТКОС С УЧЕТОМ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ. МОДЕЛЬ, АЛГОРИТМ, РЕЗУЛЬТАТЫ

О.И. Гусев, Г.С. Хакимзянов, Л.Б. Чубаров

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

Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

chubarovster@gmail.com

В докладе представлены результаты исследования влияния дисперсии на высоту наката и характеристики отраженных от берегового склона поверхностных волн. Расчеты выполнены в рамках нелинейных дисперсионной и бездисперсионной моделей мелкой воды (SGN и NSWЕ, соответственно) с использованием оригинальных граничных условий на подвижной линии уреза.

Методика, использованная авторами в настоящей работе, соответствует принятому ими иерархическому подходу, который предусматривает моделирование исследуемого явления с помощью моделей различного порядка гидродинамической аппроксимации. Практическая значимость такого иерархического подхода состоит не только в повышении степени достоверности результатов моделирования с использованием моделей «старших» приближений, но и в существенной экономии вычислительных ресурсов при выполнении многовариантных расчетов за счет использования менее затратных алгоритмов на основе «младших» моделей в тех случаях, когда они обеспечивают необходимую точность.

В настоящей работе для расчета наката поверхностных волн на берег используется метод явного выделения подвижной гонки уреза, применявшейся ранее для бездисперсионных уравнений. Следуя алгоритму расчета, проводимого на подвижной сетке, после того, как найдены новое положение точки уреза и ее скорость, строится новая сетка, узлы которой являются образами узлов неподвижной равномерной сетки, покрывающей вычислительную область. При этом в узле подвижной сетки, совпадающем с точкой уреза, значения искомых величин определяются с использованием краевых условий. В других узлах они вычисляются с помощью схемы предиктор-корректор с использованием одинаковых алгоритмов для SGN- и NSWЕ-моделей. В случае SGN-модели дополнительно решается уравнение для определения дисперсионной части давления. Сравнение результатов расчетов по SGN-модели с численными решениями по NSWЕ-модели позволило оценить влияние дисперсии на процесс заплеска волн на плоский откос и формирование отраженных от него волн. На задаче с параметрами, близкими к характеристикам одной из камчатских бухт, для которой авторами были получены вероятностные оценки цунамиопасности, показано, что при накате уединенных волн на плоские береговые склоны максимальные заплески и амплитуды отражённых волн завышается бездисперсионной моделью на 10 – 20%. Анализ результатов расчетов позволил также определить влияние дисперсионных эффектов при накате и формировании отражённых от плоского откоса волн в зависимости от угла его наклона. Показано, что учёт дисперсии уменьшает максимальные высоту и дальность заплеска, а также амплитуду отражённой волны. При увеличении угла склона глубина отката и высота отражённой волны увеличиваются. Выявленные закономерности вместе с предложенными аналитическими и алгоритмическими конструкциями могут быть использованы для повышения точности моделирования взаимодействия длинных волн с полупогруженными телами, расположенными вблизи береговых склонов.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00127).

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН НА ПОБЕРЕЖЬЕ, ВКЛЮЧАЯ ПЛАВАЮЩИЕ ОБЪЕКТЫ

А.С. Козелков^{1,2)}, В.В. Курулин¹⁾, К.С. Плыгунова¹⁾, Д.А. Уткин¹⁾

¹⁾ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ»),*

²⁾ *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»)*

В настоящее время уровень развития численных методов и мощность вычислительных ресурсов позволяет напрямую моделировать обрушение и накат океанических волн на берег с использованием полной трехмерной гидродинамической системы уравнений – системы уравнений Навье-Стокса. Это дает полноценный инструмент для исследования особенностей распространения волны, ее усиление и ослабление в зависимости от конфигурации шельфовой зоны, а также воздействие волны на инфраструктуру побережья, включая плавающие объекты. Автоматические методы построения трехмерных сеточных моделей позволяют за короткий срок построить расчетную сетку в бухтах сколь угодно сложной геометрической конфигурации. В прибрежных бухтах волновое возмущение можно создавать путем генерации волн различного типа: волны Стокса, одиночный солитон, нерегулярное волнение. Для волн типа цунами, приходящих из открытого океана, можно использовать хорошо развитые методы непосредственного трехмерного моделирования.

Трехмерное моделирование плавающих объектов осуществляется с помощью технологии перекрывающихся сеток, либо деформирующихся сеток с сохранением топологии. Данный подход связан с перемещением расчетной сетки на каждом шаге, что является ресурсозатратным, однако, позволяет детально проанализировать волновой процесс около объекта и картину воздействия волны на него, включая заплеск.

В настоящей работе рассматривается методика трехмерного моделирования воздействия волн на побережье, включая плавающие объекты. Методика основана на численном решении системы уравнений Навье-Стокса совместно с методом VOF. Методика реализована на базе отечественного пакета программ ЛОГОС. Рассматриваются результаты воздействия пришедшей волны на контейнеровоз, пришвартованный в бухте, прохождение волны около него и накат на берег. Приводится трехмерная картина распределения давления воды на поверхности контейнеровоза, перемещение и итоговый снос судна, анализируется волновая картина.

БЫСТРОЕ РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ КОМПЬЮТЕРЕ

М.М. Лаврентьев¹, Ан.Г. Марчук^{1,2}, К.К. Облаухов¹, М.Ю. Шадрин¹

¹*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск*

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

mmlavrentiev@gmail.com

Как показывают натурные наблюдения и численные эксперименты, даже в случае сильного сейсмического события волна цунами имеет опасные для населения и инфраструктуры параметры лишь на выделенных, относительно узких участках побережья. Для событий ближней зоны, когда разрушительная волна доходит до ближайшей точки берега (в случае Японии это примерно 20 минут) уже через полтора десятка минут после землетрясения, представляется важным быстро оценить ожидаемую максимальную высоту волны на конкретном участке береговой линии. Предлагаемое программно-аппаратное решение использует персональный компьютер (ПК) со специализированной платой (спецпроцессор) для аппаратного ускорения программного кода.

Спецпроцессор, базирующийся на вентиляционной матрице программируемой пользователем (Field Programmable Gates Array – FPGA), используя возможности параллельного выполнения вычислений в виде конвейера, позволяет значительно ускорить численное решение системы нелинейных уравнений мелкой воды. Была реализована конечно-разностная схема МакКормака, имеющая второй порядок аппроксимации. Проведенное сравнение с решением системы мелкой воды в лучевом приближении для наклонного и параболического рельефа дна показало высокую точность численного решения и хорошую аппроксимацию фронта волны.

Ограничения по объему имеющейся в составе комплекса памяти позволяет производить расчеты на сетках порядка 3000x3500 узлов. Для того, чтобы охватить географическую область от 140,00 ° до 147,46 ° восточной долготы и от 34,02 ° до 41,97 ° северной широты, был реализован метод вложенных сеток. Изменение шага сетки составляет от 276 м до всего 17 м.

Численные эксперименты проводились в трех вычислительных областях: В1 (параметры области указаны выше), В2 – вложена в В1 и В3 – вложена в В2. Для численного моделирования был взят источник цунами, имеющий расположение, характерное для цунамигенных очагов в этом районе. Используя преимущества аппаратного ускорителя на базе FPGA, были достигнуты следующие результаты по производительности. Численное моделирование 6000 временных шагов (2160 секунд) распространения цунами для области В1 из 3000x3200 узлов занимает 36 секунд обработки. В подобласти В2 (2601x4000 узлов) те же 6000 временных шагов (2160 секунд) распространения волны занимают 39 секунд времени обработки. А для моделирования на заключительном этапе с 12000 временных шагов (2160 секунд) распространения цунами в подобласти В3 размером 2098x2152 узлов требуется 34 секунды времени обработки. Таким образом, даже при последовательном вычислении этих трех этапов получение оценок высоты волны вдоль всего рассматриваемого побережья занимает менее 2 минут.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ВОЛНЫ ЦУНАМИ НАД ПОДВОДНЫМ БАРЬЕРОМ

Ан.Г. Марчук

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

mag@omzg.ssc.ru

Одним из способов защиты от атаки цунами являются массивные вертикальные стены, возведённые вокруг портов или поперёк входа в бухты. Во время сильных цунами такие стены, возвышающиеся над водой, часто опрокидываются и не выполняют своей функции. В этом плане затопленный вертикальный барьер является более устойчивым, хотя он в меньшей степени гасит проходящую над ним волну цунами.

На основе энергетических соотношений для длинной волны сформулированы внутренние граничные условия, реализующие частичное отражение цунами от затопленных вертикальных барьеров при её прохождении над ними. Результаты модельных расчётов хорошо согласуются с измерениями высот проходящих над подводными барьерами волн при лабораторном моделировании в гидрофизическом лотке. Такого рода защитные сооружения способны задерживать до 45% энергии волны цунами, уменьшая при этом высоту цунами на 25%.

Проведены расчёты распространения волны цунами в бухтах в регионе Санрику (Япония) при наличии виртуального подводного барьера. Для различной высоты подводной стенки (относительно глубины) найдена высота волны на различных участках береговой линии бухты. Сравнение этих высот с результатами моделирования при отсутствии барьера показывает ослабляющий эффект наличия защитного сооружения такого типа. При этом следует заметить, что совсем не обязательно при помощи защитных стенок добиваться снижения высоты цунами до нуля. Достаточно снизить амплитуду волны у берега на 20 – 30 процентов для существенного снижения ущерба от этого стихийного бедствия.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЦУНАМИ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧИЛИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ 1 АПРЕЛЯ 2014Г.

Р.Х. Мазова, Т.Е. Моисеенко

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia.

tatyana.moiseenko99@mail.ru

В начале XXI века сильнейшие землетрясения произошли в средней и северной части побережья Чили. Так, 27 февраля 2010 г. у побережья Чили произошло катастрофическое землетрясение магнитудой $M = 8.8$, вызвавшее мощное цунами (см., например, [Pararas-Carayannis, 2010; Fritz et al., 2011]), мега-землетрясение 1 апреля 2014 года на севере Чили, недалеко от чилийского побережья, произошло в районе исторической сейсмической брешы, называемой «брешью Икике» (см., например [Catalan et.al, 2015; Ruiz et al., 2016]). В данной работе анализируются катастрофическое сейсмическое событие у северной части чилийского побережья 1 апреля 2014 года и проводится численное моделирование генерации и распространению волн цунами от виртуального сейсмического источника, совпадающему по локализации и интенсивности с источником рассматриваемого землетрясения (см., также, [Mazova et.al.,2021]).

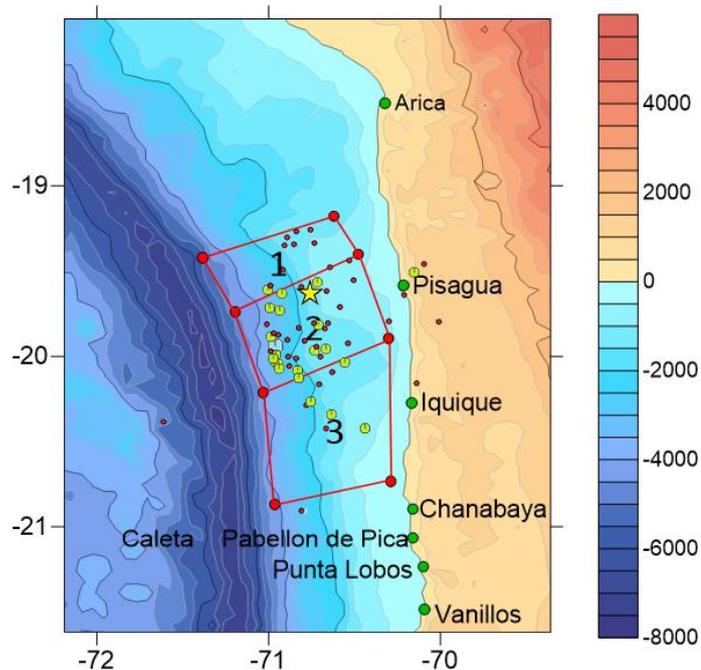


Рис.1. Схематическое изображение очага землетрясения 01.04.2014 на северо-западной части чилийского побережья

Моделирование проводилось в рамках упрощенной модели блочно-клавишного очага землетрясения [Lobkovsky, Baranov,1984] для различных вариантов кинематического движение блоков в очаге. Для всех сценариев построены характеристики волновых полей цунами в расчетной акватории от сейсмического источника до 5-ти метровой изобаты, построены гистограммы распределения максимальных высот волн вдоль всех побережий данной акватории. Получены данные с виртуальных мареографов на 5-ти метровой изобате, соответствующих 11 пунктам побережья, где существуют документальные данные по высотам наката на берег волн цунами при землетрясении 01.04.2014. В данных пунктах рассчитаны величины вертикального заплеска волн цунами. Проведено сравнение полученных волновых характеристик с имеющимися данными в доступной литературе.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ В ЭГЕЙСКОМ МОРЕ 30 ОКТЯБРЯ 2020Г.

А.Р. Гиниятуллин, А.А. Куркин, Р.Х. Мазова

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin str., 603950 Nizhny Novgorod, Russia.

adel.giniyatullin@gmail.com

30 октября 2020 года произошло землетрясение в Эгейском море магнитудой $M=7,0$ к северу от острова Самос, которое ощущалось как в Греции, так и в Турции. В обеих странах наблюдались высокие волны, которые привели к наводнениям на некоторых участках побережья. Цунами, вызванное землетрясением, поразило многие близлежащие прибрежные районы. В работе рассматриваются различные варианты генерации, распространения и наката волн цунами от виртуального сейсмического очага, расположенного вдоль линии разлома, к северу от острова Самос. Исходя из данных ряда работ по этому землетрясению (см., например, (**Dogan et.al., 2021**)), можно предполагать, что механизм сейсмического очага относится к тектонике растяжения, а это означает, что модель механизма очага в данном случае, может рассматриваться, как сброс. Это означает, что при использовании упрощенной кинематической блочно-клавишной модели сейсмического очага (**Lobkovsky и Baranov, 1984**), мы можем аппроксимировать очаг этого землетрясения блоками, из которых тот блок, который ориентирован к берегу идет вниз, а второй, ориентированный к открытой акватории, идет вверх.

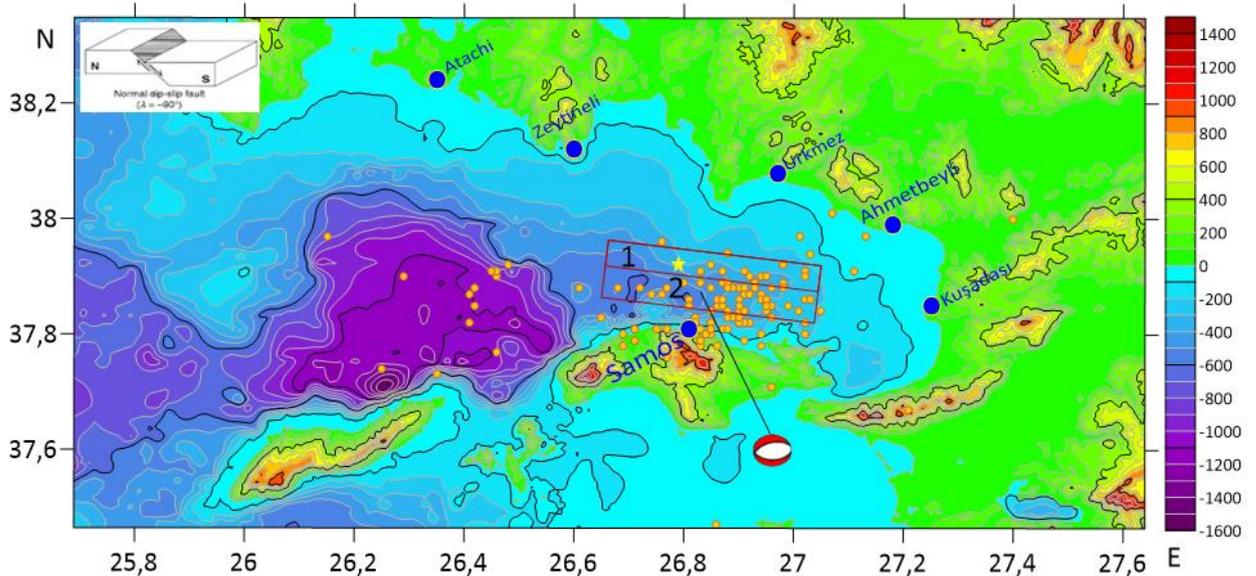


Рис.1. Схематическое изображение очага землетрясения 30.10.2020, о. Самос. Красно-белый мяч и на вставке слева показан механизм главного толчка землетрясения.

В работе проведено численное моделирование генерации распространения волн цунами для разных сценариев кинематического движения блоков в очаге землетрясения. Для всех сценариев найдены волновые характеристики и построены 3D-гистограммы распределения максимальных высот волн вдоль всех побережий данной акватории. Для ряда пунктов, где есть документальные данные по высотам наката волн на побережье, рассчитаны величины вертикального заплеска на берегу. Проведено сравнение полученных волновых характеристик с имеющимися данными в доступной литературе.

ОКУШИРСКОЕ ЦУНАМИ 1993 Г. НА ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ И ЯПОНИИ ПО ДАНЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.С. Цуканова^{1,2}, И.П. Медведев¹, А.Ю. Медведева^{1,2,3}

¹*Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва*

²*Московский физико-технический институт*

³*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

tsukanovaelizaveta@gmail.com

12 июля 1993 г. вблизи японского острова Окушири произошло землетрясение с магнитудой (по разным оценкам) около $M_w = 7.8$, что вызвало огромные волны цунами, превышающие 30 м. Как результат, была смыта часть поселка Аонае в южной части острова Окушири. Число жертв составило от 185 до 200 человек. В результате цунами пострадала не только побережье Японии, но также России и полуострова Корея. На побережье Приморского края высоты волн составили от 0.5 до 5 м. Целью настоящего исследования было восстановление сейсмического источника по данным записей мареографов, установленных на японском и российском побережьях.

При моделировании используется разновидность модели TUNAMI. За основу для рельефа дна используются массивы баз данных GEBCO с шагом 30 сек и ETOPO с шагом 1 мин. В результате исследований было проведено сравнение используемых массивов батиметрии и получены оценки их качества для акватории Японского моря. Начальные возмущения строились по формулам Окада. За основу взят источник из статьи Такахашаи (1995).

Большинство работ, рассматривающих этот источник, сконцентрированы на воспроизведении волн на острове Окушири. Основная новизна этой работы – создание источника, воспроизводящего существующие записи мареографов на всем побережье Японского моря.

**ПРИМЕНЕНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К РАСЧЕТУ
ОКЕАНИЧЕСКИХ ВОЛН НА ПРИМЕРЕ ЦУНАМИ ТОХОКУ 2011 Г.**

**С.А. Бейзель¹, С.Ю. Доброхотов², В.Е. Назайкинский², И.А. Носиков³,
А.А.Толченников²**

¹*Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск*

²*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва*

³*Калининградский филиал института земного магнетизма, ионосферы и
распространения
радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград*

tolchennikov.aa@gmail.com

На примере японского цунами 2011 года, используя простой источник и модель мелкой воды, проведено моделирование мареограммы дальней станции DART при помощи асимптотических формул, основанных на применении канонического оператора Маслова (обобщающего лучевой метод). При этом на начальном этапе производится сглаживание батиметрии для того, чтобы исключить влияние мелкомасштабных колебаний на асимптотическое решение. Расчет лучей с заданными граничными условиями, пришедших в станцию DART производится двумя способами: традиционным методом пристрелки (решая систему Гамильтона) и новым вариационным методом. Полученные асимптотические мареограммы сравниваются с результатами численных расчетов. Работа поддержана грантом РФФ 21-71-30011.

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РФ: ИТОГИ ДЕСЯТИЛЕТИЯ 2010-2021 ГГ.

В.К. Гусяков¹⁾, Т.Н. Ивельская²⁾

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

²⁾ *Центр цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС», г.Южно-Сахалинск*

gvk@sscc.ru

Истекшее десятилетие было первым десятилетием работы Службы предупреждения о цунами на Дальневосточном побережье РФ, модернизированной в рамках ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 г.». Модернизация, в основном, коснулась системы гидрофизических наблюдений, которая была существенно расширена и оснащена новыми цифровыми датчиками. Служба успешно справилась со своими задачами, обеспечив своевременное предупреждение о региональных и удаленных цунами,

Всего по дальневосточному региону в 2010 – 2021 гг. тревога цунами объявлялась 6 раз. Из них в двух случаях тревоги были вызваны удаленными событиями (27.02.2010 Mw=8.8 Чили и 11.03.2011 Mw=9.0 Тохоку). Обе тревоги можно считать оправданными, хотя реальный ущерб возник только от цунами Тохоку, имевшем высоту волн на Южных Курилах до 2.5 метров. Тревога цунами, объявленная согласно действующему регламенту после глубокофокусного (глубина 600 км) землетрясения в Охотском море 23.05.2013 (Mw=8.3), оказалась ложной и еще раз продемонстрировала необходимость учета глубины очага при оценке цунамиопасности подводного землетрясения.

При сильных чилийских землетрясениях 02.04.2014 Mw=8.2 и 17.09.2015 Mw=8.3 тревоги не выпускалась, что было вполне оправдано, поскольку все имеющиеся исторические данные свидетельствуют об отсутствии реальной угрозы возникновения транс-океанских цунами при землетрясениях такой магнитуды. На уровнях зарубежных станциях, расположенных севернее 15° ю.ш., максимальная амплитуда цунами отмечалась на Гавайских островах и составила около 60 см в 2014 г. и 83 см в 2015 г. Две тревоги были выпущены при землетрясениях в районе Командорских островов – 17.07.2017 (Mw=7.7) и 20.12.2020 (Mw=7.3). Ощутимого цунами оба эти землетрясения не вызвали. Непосредственно в Курило-Камчатской зоне возникло только одно потенциально опасное землетрясение – 25.03.2020 с магнитудой Mw=7.5. Оно вызвало сильные (до 6 баллов) сотрясения на ближайших участках побережья (в Северо-Курильске были повреждены здания школы и больницы), но цунами оказалось слабым, с высотами волн в пределах приливных колебаний. С формальной точки зрения выпуск тревоги можно считать оправданным (колебаниями уровня был взломан лед в районе Северо-Курильска), хотя эвакуации населения в сложных зимних условиях можно было бы избежать (при наличии средств инструментальной регистрации уровня в этом районе).

Следует однако, отметить, что уровень сейсмической активности в регионе оказался самым низким за последние 70 лет, за десятилетие произошло всего 8 подводных землетрясений с магнитудой выше пороговой (7.0), пять из которых оказались глубокофокусными (с глубинами очагов более 100 км).

ДЕЙСТВИЯ САХАЛИНСКОЙ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ (СПЦ) В ПЕРИОД УГРОЗЫ ЦУНАМИ И ПОСЛЕ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЗА ПЕРИОД 2010 – 2020 ГГ.

Т.Н. Ивельская

*ФГБУ «Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей
среды, Россия*

ivelskaya@mail.ru

Существующая в настоящее время Служба предупреждения о цунами обеспечивается Росгидрометом совместно с Геофизической службой РАН, МЧС России, Министерством связи и массовых коммуникаций, администрациями субъектов Российской Федерации Дальневосточного региона. Как отмечал еще более 40 лет назад академик С.Л.Соловьев, сложность междоветовственных отношений можно отнести к одной из основных проблем СПЦ.

Недостаточная точность определения опасности цунами на основе сейсмологической информации является причиной значительного числа ложных тревог, что существенно осложняет деятельность СПЦ и приводит к экономическому ущербу при отсутствии цунами. Так, за период с 1958 по 1994 год тревога цунами объявлялась 51 раз, из которых оправданным прогноз был только в 19 случаях, что составляет 37%. За весь период существования службы по 2010 год включительно тревога объявлялась 79 раз, из них ложных было 57, таким образом, оправдываемость снизилась до 28%.

Основной прогресс, как в международной, так и в отечественной службе цунами связан с развитием сети телеметрических регистраторов цунами, прежде всего глубоководных буйковых станций DART, хотя в отечественной СПЦ преобладают автоматические посты, установленные на береговых гидрометеостанциях. Информация о параметрах цунами в открытом океане во многих случаях позволяет заблаговременно определить ожидаемые высоты волн на защищаемых участках побережья, оценить степень угрозы, и более обосновано принимать решение о подаче (или не подаче) тревожного сообщения. При удаленном источнике обычно имеется достаточный запас времени, чтобы использовать данные глубоководных уровней станций в численных расчетах распространения цунами, что позволяет получить еще более точные оценки ожидаемых высот волн на берегу.

В 2006 году для обеспечения своевременного, надежного и достоверного предупреждения населения, хозяйственных объектов об угрозе цунами Постановлением Правительства РФ была утверждена Федеральная целевая программа (ФЦП) "Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010». В феврале 2010 и марте 2011 года развернутая гидрофизическая подсистема СПЦ прошла серьезную проверку. Вначале произошло сильнейшее землетрясение у берегов Чили. Впервые в истории Российской Службы предупреждения о цунами в ходе проведения тревоги цунами в режиме реального времени поступали данные о характере колебаний уровня моря в различных пунктах Дальневосточного региона, что позволило принимать четкие и взвешенные решения на основе объективной информации. Это прибрежные станции, и хотя записи цунами на них не используются для прогноза цунами, они важны для определения времени подачи сигнала об отбое тревоги цунами и принятии решения о распространении тревоги на соседние, не охваченные районы. Тем не менее, возможность следить за развитием ситуации в защищаемом регионе оказала большую помощь Сахалинской СПЦ, когда волны цунами, зародившиеся у берегов Чили, достигли Курильских островов. Была объявлена тревога

цунами, находящимся в портах судам была дана команда выйти в открытое море, а населению – подняться на возвышенность. Эти меры были оправданы: как на Северных, так и на Южных Курилах высоты волн были около 2 метров. Цунами такой интенсивности не представляет серьезной угрозы для объектов береговой инфраструктуры, но может быть опасно для оставшихся вблизи берега судов и находящихся в прибрежной зоне людей.

Сахалинской службой предупреждения о цунами за период 2010 – 2020 гг. тревоги выпускались 6 раз. Показана 100%-оправдываемость предупреждений о цунами, выпущенных гидрофизической подсистемой Сахалинской СПЦ (Центром цунами ФГБУ «Сахалинское УГМС»). Не оправдались 3 тревоги, выпущенные сейсмической подсистемой Сахалинской СПЦ. Таким образом, за последние 10 лет оправдываемость предупреждений повысилась до 50 %.

ОБ АСИМПТОТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ В БАССЕЙНАХ С ПОЛОГИМИ БЕРЕГАМИ

С.Ю. Доброхотов¹, Д.С. Миненков¹, В.Е. Назайкинский¹

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

s.dobrokhотов@gmail.com, nazaikinskii@googlemail.com, minenkov.ds@gmail.com

Рассматриваются решения небольшой амплитуды нелинейной системы уравнений мелкой воды в одно- или двумерной области. Величина амплитуды характеризуется малым параметром. Предполагается, что функция, задающая глубину бассейна, гладкая, причем ее градиент не обращается в нуль на множестве ее нулей (т.е. на береговой линии бассейна при отсутствии волн). *Решением* системы называется гладко зависящая от малого параметра тройка (область, возвышение свободной поверхности, скорость), такая, что сумма возвышения свободной поверхности и глубины положительна внутри области и равна нулю на ее границе, а сами функции, задающие возвышение свободной поверхности и скорость, являются гладкими в этой области и удовлетворяют нелинейной системе уравнений мелкой воды всюду в области. *Асимптотическое решение* определяется аналогичным образом, только система уравнений должна удовлетворяться с точностью до некоторой степени малого параметра.

Для построения асимптотических решений задачи Коши с малыми гладкими начальными данными для нелинейной системы уравнений мелкой воды используется замена переменных (типа упрощенного преобразования Кэрриера–Гринспена), зависящая от самого неизвестного решения и преобразующая область, в которой последнее определено, в независимую от решения невозмущенную область, и затем полученная нелинейная система решается стандартными методами теории возмущений. В качестве нулевого приближения возникает *линейная* гиперболическая система с вырождением на границе области. Один из основных результатов доклада формулируется следующим образом.

При указанных выше предположениях относительно функции глубины нелинейная система уравнений мелкой воды с малыми начальными данными имеет асимптотическое решение с точностью до сколь угодно высокой степени малого параметра. Это асимптотическое решение асимптотически единственно.

В докладе будут даны точные конструктивные формулировки этого и связанных с ним других полезных утверждений и описаны связи с имеющимися в литературе результатами, а также приведены примеры, в том числе для волн цунами.

АСИМПТОТИКИ ДВУМЕРНЫХ ДЛИННЫХ ВОЛН В БАССЕЙНЕ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЫ, ПОРОЖДЕННЫХ ДВИЖУЩИМСЯ ПО ДНУ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ

А.В. Цветкова¹, С.Ю. Доброхотов¹, П.Н. Петров²

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

²*Московской физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный*

annatsvetkova25@gmail.com

Рассматривается задача типа Коши-Пуассона для уравнений волн на воде в бассейне с переменной глубиной $D(x,y)$ с движущимся по дну локализованным источником. Предполагается, что время движения источника конечное. Такая математическая модель описывает возмущение поверхности жидкости, вызванное подводным оползнем.

В одномерном случае было показано, что на поверхности жидкости будет возбуждаться длинная волна, если источник движется неравномерно или объем источника меняется в процессе движения. Этот факт позволяет заменить исходную задачу на задачу в рамках "поршневой модели" с "эквивалентным" начальным источником. В двумерном случае асимптотика решения задач такого типа представляется в виде канонического оператора Маслова, что позволяет изучить зависимость профиля образовавшейся волны от параметров движущегося источника.

О ЗАТОПЛЕНИИ ПРИБРЕЖНОЙ РАВНИНЫ ТУРБУЛЕНТНЫМ ЦУНАМИ

С.А. Арсеньев, Л.В. Эппельбаум

*Институт физики Земли РАН, Россия,
Тель-Авивский университет, Израиль*

arrsenyev@yandex.ru

Когда волна цунами приходит из океана и распространяется по шельфу, очень важно прогнозировать несколько опасных факторов: (а) максимальное затопление побережья, (б) высота волны цунами на побережье, (в) скорость распространения фронта цунами г) время прибытия цунами в заданную точку побережья и вокруг него. В данной работе мы изучаем случай плоских прибрежных равнин, когда угол наклона α морского берега равен нулю. Линейное решение этой задачи неудовлетворительно, так как оно дает бесконечную скорость затопления побережья, то есть побережье затопляется мгновенно и без фронтальной границы. Мы предлагаем принципиально новое, аналитическое решение этой задачи на основе нелинейной теории. Полученные формулы показывают, что волна цунами может быть остановлена (или очень сильно ослаблена) в шельфовой зоне до подхода к береговой линии. Для этого необходимо искусственно поднять несколько десятков донных выступов до уровня спокойной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Arsen'yev S.A., Eppelbaum L.V. Nonlinear model of coast flooding by a highly turbulent tsunami. Journal of Nonlinear Mathematical Physics <https://doi.org/10.1007/s44198-021-00005-w>
https://www.researchgate.net/publication/352938846_Nonlinear_model_of_coastal_flooding_by_a_highly_turbulent_tsunami#fullTextFileContent [accessed Aug 2021].

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА R-РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЦУНАМИ

Т.А. Воронина

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск,
Россия, 630090 пр. Ак. Лаврентьева, 6,*

tanvor@bk.ru

Повышение надежности прогнозов цунами может быть частично достигнуто с помощью численного моделирования, которое позволяет оценить ожидаемое распространение, высоту волн и время прибытия цунами в защищаемые районы. Ключевым вопросом оценки возможных характеристик проявления волны на побережье остаются начальные условия, т.е. начальная форма поднятия воды (далее - источник цунами) в области сейсмического очага. Инверсия удаленных от источника волновых форм цунами - широко распространенный в настоящее время подход для реконструкции источника цунами. В данной работе численное решение обратной задачи осуществляется с использованием метода усеченного сингулярного разложения (метод R-решения), как варианта метода наименьших квадратов. Метод R-решения позволяет избежать неизбежной неустойчивости численного решения, точность которого напрямую зависит от используемой системы наблюдения и рельефа дна в области моделирования. Обоснованный выбор наиболее информативных направлений для размещения станций наблюдения в рамках предложенного подхода основан на анализе передачи энергии пространственными модами, генерируемыми каждым правым сингулярным вектором. В настоящей работе предложена методика поиска наиболее информативной части системы наблюдения, использование которой не только повышает точность восстановления, но и обеспечивает без дополнительных расчетов, вычисление высот волны в любых, заранее фиксированных точках акватории. Численные эксперименты с модельными системами наблюдения на этапе предварительных расчетов для зон прогнозируемой цунами опасности могут быть обоснованием для планирования размещения глубоководных датчиков. Как выяснилось, оптимальная система наблюдения располагается на направлениях наиболее интенсивного распространения энергии цунами. Представлена реализация предложенного подхода к оценке существующей системы наблюдения для чилийского Иллапель цунами 16 сентября 2015 года.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМ и МГ СО РАН (0315-2021-0005).

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВСЛЕДСТВИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ТОХОКУ 2011 ГОДА ПО ДАННЫМ ГНСС ДЛЯ ЗАДАЧ РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ О ЦУНАМИ

Г.М. Стеблов^{1,2,3,4}, И.А. Сдельникова И.А.⁴

¹ *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
г. Москва*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

³ *Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*

⁴ *ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск*

steblov@ifz.ru

Существующие в настоящее время сейсмологические системы раннего предупреждения о цунами при формировании оповещения опираются на магнитудно-региональный критерий, согласно которому для каждого участка береговой линии задаются пороговые величины магнитуд возникающих подводных землетрясений для объявления тревоги. Однако в случае сильнейших землетрясений получение оперативных достаточно точных значений магнитуды и глубины очага осложнено особенностями сейсмических измерений в ближней зоне очага. Так, например, первая оценка магнитуды землетрясения Тохоку 2011 года, которая была опубликована Японским Метеорологическим Агентством через три минуты после события, составила всего лишь $M_w=7.9$, через 1 час и 20 минут скорректирована до 8.4, а через 3 часа – до 8.8. Это привело к значительной недооценке опасности возникшего цунами.

Методы космической геодезии, основанные на Глобальных Навигационных Спутниковых Системах (ГНСС), активно применяются для решения различных научных и прикладных задач. Многочисленные исследования, основанные на данных ГНСС, показали возможность их применения для оценки распределения смещений в очаге землетрясения с приемлемой точностью. По распределению подвижки в очаге можно оценить энергетические характеристики очага, локализацию наиболее интенсивных движений и, кроме того, выполнить моделирование деформации дна океана, которые являются источником волн цунами.

Для выявления возможности интеграции ГНСС в систему раннего оповещения о цунами необходимо оценить оперативность и точность получаемых оценок сейсмических смещений по данным ГНСС. С этой целью проведен анализ временных рядов положений станций ГНСС Японской сети с 30-ти секундным интервалом регистрации, получена оценка сейсмических смещений земной поверхности, вызванных сильнейшим землетрясением Тохоку 2011 года $M_w=9.1$, выполнено моделирование смещений в очаге. Оценки времени, необходимого для выявления сейсмических смещений с точностью несколько сантиметров, составили от 3 до 7 минут в зависимости от расстояния до очага.

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОТОТИП ОРГАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЦУНАМИ

К.Г. Кебкал¹, Н.С. Чолич², Г.А. Кантак³

¹ *Evologics GmbH, г. Берлин*

² *Data Records, г. Москва*

³ *НПО «ДЭКО», г. Южно-Сахалинск*

kebkal@evologics.de

Обсуждается разработанный авторами технический прототип информационного решения раннего предупреждения цунами на основе беспроводного обмена сигналами донной станции между автономной донной станцией и рабочим местом оператора. Основа обсуждаемого прототипа базируется на гидроакустическом модеме технологии S2C производства компании Evologics, в то время как решение по потокам данных – на ПО и сервисе DataRecords, включая хранение и управление полученными данными. Оценка признаков цунамиопасного явления основана на регистрации скачкообразного изменения гидростатического давления и соответствующего фрагмента сейсмографии (предвестника) и передаче их через гидроакустический модем и спутниковую связь на береговую станцию в реальном времени. Дискутируются перспективы применения технического прототипа и подхода к сбору данных для задач раннего предупреждения цунами. Сделан вывод о принципиальной возможности создания отечественной разработки и необходимости пилотного проекта по раннему предупреждению цунами. Предлагается решить задачу создания донной станции с высокоточным измерением гидростатического давления, сопровождающей записью сейсмографии и алгоритмом идентификации волн цунами, а также вопрос беспроводной передачи сигналов на береговую станцию. Оцениваемое время для создания пилотного рабочего образца системы раннего предупреждения цунами на основе автономной донной станции - в РФ составляет от 5 до 7 лет, со смещением целевого результата от техники к информационной составляющей предупреждения о цунами.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ ЦУНАМИ НА ПРИМЕРЕ КУРИЛЬСКИХ СОБЫТИЙ 1994, 2006 и 2007 ГГ.

А.А. Иванова

Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, г. Москва

lapoul@gmail.com

Определение степени опасности очага цунами является в настоящее время одной из наиболее актуальных задач. Подавляющее большинство регистрируемых цунами имеют сейсмическое происхождение. Часть выделившейся при землетрясении энергии переходит в энергию цунами, эффективность возбуждения волн зависит от ряда факторов: глубины моря над очагом и его расположения относительно берега и континентального склона; формы и площади остаточных смещений дна, а также рельефа дна непосредственно в зоне сейсмического источника; неоднородностей рельефа дна океана на пути распространения цунами (для оценки высот волн в дальней от очага зоне); неоднородности во времени излучения волн цунами из зоны источника; неанизотропности спектра излучения цунами.

Для изучения эффективности очага цунами было рассмотрено три цунами в районе Курильской гряды: Шикотанское цунами 1994 г., и два Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. Выбор событий определялся, с одной стороны, близким географическим расположением – все они относятся к Курило-Камчатской зоне субдукции. Эти события хорошо изучены, и имеется довольно большой объем данных по измерениям цунами на берегу и в открытом океане. При этом все три источника различаются по механизмам сейсмического очага и расположением относительно берега и континентального склона и по своим геометрическим характеристикам, что, очевидно, влияет на направленность излучения волн.

В данном исследовании были выполнены расчеты потока энергии волн цунами 1994, 2006 и 2007 гг. в течение 30 часов. Уже по распределению фронтального потока энергии можно судить о большей или меньшей направленности источника цунами. Было показано, что наиболее направленным является источник 2007 г., а характер излучения волновой энергии для события 1994 г. носит более изотропный характер.

Направленность излучения энергии цунами в значительной степени определяется формой очага (Kajiura, 1972): чем больше отношение длины источника к его ширине, тем более узконаправлено излучение энергии. Очаг цунами 1994 г. имеет форму диполя, при этом изолинии максимальных вертикальных смещений морской поверхности почти круговые и не вытянуты вдоль континентального склона, поэтому источник излучения цунами оказался широконаправленным. В отличие от Шикотанского цунами очаги 2006 и 2007 гг. оказались более вытянутыми вдоль континентального склона.

Что касается большей направленности источника 2007 г. по сравнению с очагом 2006 г., то, согласно (Kajiura, 1972), чем ближе к берегу расположен источник и чем менее он вытянут, тем большая часть его энергии перейдет в захваченные волны, соответственно доля энергии, излучаемой в открытый океан, будет меньше. Эпицентр землетрясения 2007 г. оказался расположенным фактически полностью в глубоководном желобе, при этом начальные отрицательные смещения морской поверхности оказались вне шельфа. Очевидно, что в захваченные волны ушла относительно небольшая часть энергии волн, а кроме того, крутой континентальный склон как бы экранировал излучение волн в северо-западном направлении и усиливал его в юго-восточном.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ 11 АВГУСТА 1969 Г. И 10 ИЮНЯ 1975 Г.

А.В. Лоскутов^{1,2}, Г.В. Шевченко^{1,3}, О.С. Седаева¹

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

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва,*

³*Сахалинский филиал ВНИРО, г. Южно-Сахалинск*

a.loskutov@imgg.ru

Цунами 11 августа 1969 г. и 10 июня 1975 г., согласно каталогу цунами Соловьева-Го являются одними из самых сильных событий прошлого столетия с магнитудами (M_w) 8.0, 7.8 соответственно. Эти события представляют значительный интерес для исследования особенностей распространения цунами, близких по отношению к побережью Дальнего востока РФ. Источники обоих событий находились в районе южных Курильских островов. В основных населенных пунктах Южных Курильских островов высоты заплесков составляли от 0.5 до 1.5 м.

По имеющимся мареограммам в ряде пунктов о. Сахалин (Корсаков, Крильон, Невельск, Поронайск, Холмск) и Курильских островов (Малокурильское, Южно-Курильск, Буревестник, Курильск, Матуа, Северо-Курильск), а также побережья Японии, проводилась оцифровка сигналов цунами и формирование цифрового каталога для верификации численного эксперимента и спектрального анализа. С использованием оценок косейсмических деформаций были построены источники и проведено численное моделирование распространения цунами в Охотском море и в Татарском проливе. Результаты моделирования сравнивались с оцифрованными сигналами. Распределение заплесков было построено в том числе вдоль всего побережья Курильских островов, Камчатки и о. Сахалин, а также некоторых участков побережья Японии. Анализировалось распределение энергии волнового поля цунами для выявления характера направленности источников. Также были построены частотные диаграммы направленности источников, рассчитанные по лучам, выходящим из эпицентров.

Верификация результатов моделирования показала надежное описание распределения энергии цунами численной моделью, что позволило получить распределение энергии на других участках побережья островного региона и выявить особенности распространения цунами через проливы в Охотское море.