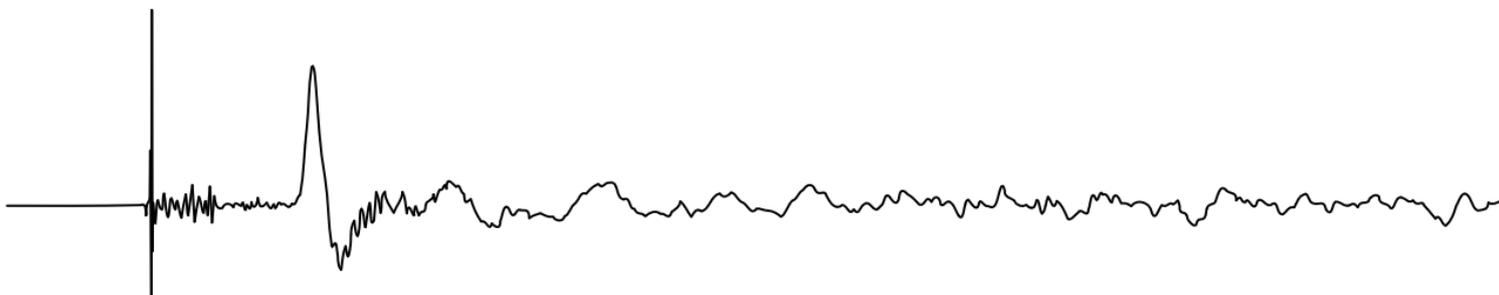


НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦУНАМИ  
ПРИ ОТДЕЛЕНИИ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



**II всероссийская научная конференция  
с международным участием  
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»  
посвященная 90-летию со дня рождения  
Сергея Леонидовича Соловьева**

**16-17 ноября 2020 ГОДА**

**Сборник тезисов докладов**

Москва, 2020

**II всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»**, 16-17 ноября 2020 г.  
Сборник тезисов докладов / Под ред. М.А.Носова. - М.: Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2020 г. 52 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  
д.ф.м.н. Е.А.Куликов  
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  
С.В. Колесов  
А.Ю. Медведева  
Г.Н. Нурисламова  
К.А. Семенцов  
О.И. Яковенко

**Сайт конференции:**

[http://ocean.phys.msu.ru/tsu\\_conf/](http://ocean.phys.msu.ru/tsu_conf/)

**Электронная почта:**

[tsu\\_conf@ocean.phys.msu.ru](mailto:tsu_conf@ocean.phys.msu.ru)

**Конференция проводится в дистанционном формате на платформе**

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



**Соловьев Сергей Леонидович**

**12 апреля 1930 г. – 9 марта 1994 г.**

**С.Л.СОЛОВЬЕВ И СТАНОВЛЕНИЕ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О  
ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ СССР**

**В.К.Гусяков**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.*

*г.Новосибирск*

*gvk@sscc.ru*

Действующая на Дальневосточном побережье РФ служба предупреждения о цунами была создана в 1957-56 гг. по специальному постановлению Совета Министров СССР как результат катастрофического цунами, вызванного Камчатским землетрясением 4 ноября 1952 года. Единственным действующим прототипом такой системы на тот момент была Международная служба предупреждения о цунами с центром в Гонолулу, ориентированная в основном на прогноз сильных трансокеанских цунами. Разработка принципов организации такой службы и регламента ее работы были возложены на Академию наук СССР, в частности, на Совет по сейсмологии при Президиуме РАН, ученым секретарем которого в те годы являлся С.Л.Соловьев. Статистика наблюдений над цунамигенными землетрясениями как в СССР, так и вообще в мире тогда практически отсутствовала, дальневосточная сейсмическая сеть находилась еще в стадии становления. Тем не менее, теоретические разработки советских математиков и гидродинамиков, хорошая инструментальная база и большой опыт практических наблюдений позволили правильно выбрать принципы построения и регламент работы службы. С.Л.Соловьевым был обоснован выбор порогового значения магнитуды (7.0) для объявления тревоги цунами, остающееся неизменным по сей день, которое дает приемлемый уровень соотношения оправдавшихся и ложных тревог (1:5), при практическом исключении случаев пропуска цунами. Это ожидаемое соотношение оправдавшихся и ложных тревог в дальнейшем полностью подтвердилось практикой работы службы предупреждения. В дальнейшем С.Л.Соловьевым был предложен гидрофизический метод прогноза цунами путем регистрации гидростатического давления на краю шельфа с помощью донных кабельных станций, который позволял обеспечить необходимую заблаговременность и практически исключить случаи ложных тревог. Его практическая реализация в те годы натолкнулась на сложность обеспечения сохранности кабеля в прибойной зоне, однако в 1980 году на

шельфе Южных Курил впервые в мире была осуществлена глубоководная регистрация цунами донным датчиком. Сейчас такой метод прогнозирования цунами используется Японским метеорологическим агентством (сеть DONET).

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАЯКОРЕННЫЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ**

**С.А. Бейзель<sup>1</sup>, О.И. Гусев<sup>1,2</sup>, В.А. Кихтенко<sup>1</sup>, Г.С. Хакимзянов<sup>1,2</sup>, Л.Б. Чубаров<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,  
г. Новосибирск*

<sup>2</sup>*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск  
chubarov@ict.nsc.ru*

В настоящем докладе обсуждается задача, связанная с оценкой вероятного воздействия волны цунами на гидротехнические объекты, предполагаемые к размещению в одной из Камчатских бухт. Решение задачи выполняется в два этапа, на первом из которых определяются участки акватории, в которых меры интенсивности волн цунами не будут превышать заданных пороговых значений с заданной повторяемостью. Следуя принятой методике, сначала конструируется совокупность модельных источников цунамигениерирующих землетрясений, затем по каталогам исторических и инструментальных данных, а также с помощью закона Гутенберга-Рихтера определяется их повторяемость. Одновременно проводятся массовые сценарные расчеты, в ходе которых рассчитываются значения характеристик цунами в акватории и вдоль ее побережья. Наконец, повторяемости сейсмических событий конвертируются в повторяемости меры интенсивности цунами, после чего путем решения обратных задач рассчитываются значения пороговых мер и определяются искомые места размещения объектов. При этом рассматриваются различные конфигурации акватории, включающие гипотетические защитные сооружения. В качестве меры интенсивности цунами рассматриваются максимальные за всё время расчёта амплитуды волн, скорости потока, дальности и высоты заплеска на побережье. Анализ рассчитанных характеристик указывает на возможность выделения участков акватории, пороговые значения в которых будут удовлетворять заданным критериям даже в условиях отсутствия защитных сооружений.

На втором этапе выполняется моделирование воздействия длинных поверхностных волн на заякоренный гидротехнический объект, характеристики которого совпадают с параметрами реальных сооружений. Эта часть исследования выполняется с использованием созданной авторами иерархической цепочки математических моделей, алгоритмов и программ для исследования взаимодействия волн цунами с полупогруженными телами в

различных приближениях (трехмерное, двумерное, одномерное). Эта цепочка, помимо модели потенциальных течений, включает в себя нелинейно-дисперсионные модели мелкой воды и бездисперсионную модель мелкой воды. Значимость такого иерархического подхода состоит в повышении степени достоверности численных результатов и существенной экономии вычислительных ресурсов при выполнении многовариантных расчетов за счет использования менее затратных алгоритмов на основе моделей мелкой воды в тех случаях, когда они обеспечивают необходимую точность. Проведенные расчеты (в трехмерной постановке задача решалась с использованием криволинейной адаптивной сетки) позволили определить влияние на картину взаимодействия одиночных волн с полупогруженным телом, в частности, на силовое воздействие волн, таких параметров, как амплитуда и длина набегающей волны, размеры, форма и осадка тела, его положение по отношению к фронту набегающей волны и к береговой линии.

## ДОННОЕ ДАВЛЕНИЕ ПОД ВОЛНАМИ В БАССЕЙНЕ КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЫ

Е.Н. Пелиновский<sup>1,2</sup>, Дж. Тубуль<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Нижегородский технический университет им. Р. Алексеева, г. Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Университет г. Тулона, Франция*

*pelinovsky@gmail.com*

Исследована применимость различных длинноволновых аппроксимаций в описании волнового поля и донного давления, вызываемого поверхностными волнами. В рамках линейной теории известна точная формула, связывающая спектральные амплитуды волны и вариаций давления, позволяющая тестировать длинноволновые аппроксимации. Мы показываем, как эти формулы связаны с известными эволюционными уравнениями, применяемыми в теории волн на воде. Точно распространяющиеся волны описываются уравнением Уизема, в то время как в приближении длинных волн используются уравнения Кортевега-де Вриза (КдВ) и Бенджамина-Бона-Махони (ББМ). В рамках этих приближений донное давление может быть вычислено с помощью простых операций дифференцирования и интегрирования без использования Фурье-трансформации, требующей иметь достаточно длинную запись. Демонстрируется очевидный факт, что, если волна длинная и достаточно гладкая ( $kh \sim 1$ ), обе длинноволновые аппроксимации обеспечивают достаточную точность и нет особой разницы в использовании той или иной аппроксимации. Однако, если волна, хоть и длинная, но достаточно крутая, то ББМ - аппроксимация дает лучшие результаты, чем КдВ – аппроксимация, достаточно близкие к точным результатам. Это же относится и описанию волн-убийц, которые хоть и формируются из гладких относительно длинных волн, но сами зачастую короткие и крутые. Другим преимуществом ББМ - аппроксимации для вычисления донного давления является возможность анализа зашумленных рядов без предварительной фильтрации, что является необходимым при использовании КдВ - аппроксимации. Важно отметить, что в существующих сильно нелинейных моделях волновых движений в прибрежной зоне для вычисления давления используется как раз КдВ аппроксимация (в линейном приближении), так что вопрос о «правильной» формуле для давления остается открытым. И наконец, важный вывод, вытекающий из нашего анализа, что, хотя ББМ аппроксимация работает хорошо практически во всем диапазоне волновых

чисел, она приводит к малым величинам донного давления, если волна-убийца относительно короткая и крутая (этот же вывод вытекает из точного решения). Поэтому пока неясно, как правильно выделять волны-убийцы из записей донного давления.

Нелинейные задачи здесь представлены точными результатами для солитонов и некоторыми результатами численных экспериментов.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ 19-55-15005 и 20-05-00162.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА R-РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ФОРМЫ ВОЛНЫ ЦУНАМИ: ОБСУЖДЕНИЕ НЕИЗБЕЖНЫХ АРТЕФАКТОВ И МЕТОДОЛОГИЯ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

**Т.А. Воронина**

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,*

*г. Новосибирск*

*tanvor@bk.ru*

Задача восстановления начальной формы волны цунами по измерениям колебаний уровня свободной поверхности, обусловленных прошедшей волной в серии удаленных приемников, рассматривается как обратная задача математической физики. Для физической модели сделаны следующие четыре предположения. Во-первых, используется поршневая модель цунами. Во-вторых, распространение волн описывается в рамках линейной теории мелкой воды, что предполагает использование данных глубоководных буев ДАРТ. В-третьих, в данном исследовании не рассматривается набег волны, поэтому использовались условия полного отражения на твердых границах и условия полного поглощения на морских границах. В-четвертых, предполагается, что известна оценка (не обязательно точная) для площади очага цунами. Незвестная функция источника цунами представляется в виде конечного ряда Фурье по пространственным гармоникам.

Рассматриваемая задача относится к классу некорректных задач, для ее решения применяется понятие  $r$ -решения, основанное на усечении сингулярного разложения (SVD) компактного оператора. Регуляризация оператора в этом случае осуществляется путем сужения оператора на подпространство, являющееся линейной оболочкой его первых правых сингулярных векторов. Строится обобщенное нормальное  $r$ -решение.

Аппроксимация задачи осуществляется на основе конечно-разностного подхода. Однако результат инверсии сильно зависит от выбора основных параметров метода: количества правых сингулярных векторов, образующих базис в пространстве решения и количества пространственных гармоники, используемые в представлении неизвестной функции источника цунами. Предлагается методология выбора оптимального числа  $r$  – размерности подпространства решения и количества используемых пространственных гармоник для рассматриваемой батиметрии, системы наблюдения и предполагаемой

области очага. Выбор оптимального подпространства решения обеспечивает не только стабильность численного решения, но и его информативность для заданных условий. Оптимальное количество пространственных гармоник уменьшает как время вычисления матрицы, так и количество артефактов в решении. Одним из значительных преимуществ представленного подхода является его способность быстро вычислять высоты волны цунами в точках, в которых не было наблюдений, но которые были приняты во внимание при расчете матрицы оператора прямой задачи. Дело в том, что нет необходимости снова вычислять распространение волны цунами от восстановленного источника. В рамках предлагаемого подхода можно сделать выбор, сколько и какие мареограммы следует использовать для инверсии. Это может быть сделано на отдельной стадии до фактического события. Как оказалось, наилучшее расположение станций тесно связано с направлениями наиболее интенсивного распространения энергии цунами. Предложенная методология рассматривается на примере Иллапедь Цунами 2015.

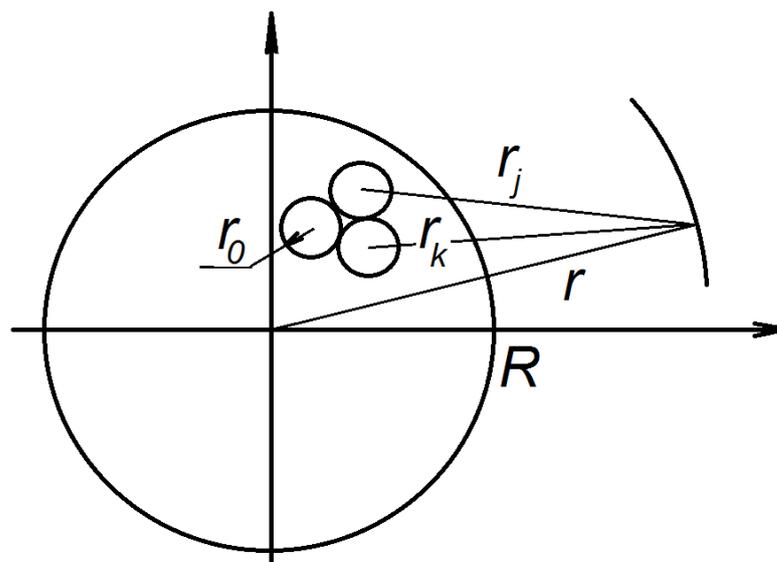
## О НАПРАВЛЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОЧАГА ЦУНАМИ

В.М. Кайстренко

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск  
vict-k@mail.ru*

Вдольбереговые распределения заплесков ряда цунами демонстрируют необычно большие заплески, существенно превышающие таковые на ближайших участках берега. Так, локальный заплеск 31.7 м цунами 12 июля 1993 года вблизи поселка Монай на острове Окусири в Японском море значительно превосходил заплески на остальных участках побережья острова.

Очевидно, что одним из факторов, ответственных за подобные особенности является фокусировка особенностями батиметрии. Другим фактором является неоднородность структуры очага, создающая направленность излучения очага цунами. Такая направленность может быть изучена на конечномерной модели очага, и для этого очаг произвольной формы ограниченного размера дробится на  $N$  частей, в каждой из которых начальное смещение уровня  $a_j$  и начальная вертикальная скорость  $v_j$  считаются постоянными. Для упрощения аналитических преобразований такие элементарные источники можно взять в виде плотно упакованных кругов радиуса  $r_0$ , как показано на рисунке ниже. Дефицит площади очага при этом составляет менее 5 %.



В такой модели удается получить асимптотические формулы для диаграммы направленности  $E(\varphi)$  (угловой плотности энергии), излученной очагом в направлении угла  $\varphi$ .

Случай с начальными смещениями без начальных скоростей ( $a_j$  заданы,  $v_j = 0$ ) аналитически проще общего. При этом можно получить оценку для диапазона изменчивости угловой плотности энергии  $0 \leq E(\varphi) / E \leq N$ , где  $E$  – среднее значение угловой плотности энергии, излученной очагом. Важно, что обе границы являются точными и реализуются при определенной структуре очага цунами, задаваемой набором значений смещений  $a_j$  элементарных очагов. Иными словами, сколь угодно высокий эффект направленности может быть реализован очагом достаточно сложной структуры, и количество  $N$  элементарных очагов является параметром сложности структуры очага цунами. Еще одним интересным асимптотическим свойством является симметрия диаграммы направленности:  $E(\varphi) = E(\varphi + \pi)$  при любом наборе смещений  $a_j$  элементарных очагов.

**ПРИРОДА АНОМАЛЬНОГО МЕХАНИЗМА СЕЙСМИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА  
КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЦУНАМИГЕННОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА  
СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ЧИЛИ 9 МАЯ 1877 Г.**

**Мазова Р.Х.<sup>1,2</sup>, Лобковский Л.И.<sup>2,3</sup>, Мизонов С.А.<sup>1</sup>, Баранова Н.А.<sup>4</sup>,  
Jorge Van Den Bosch F.<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Нижний Новгород, Россия, 603600*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (МФТИ) 141701 Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 917435 Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Auriga, 6/6 ул.Нартов,офис 829, 603104, Нижний Новгород, Россия*

<sup>5</sup>*Engineering Center Mitigation Natural Catastrophes Faculty of Engineering. 1240000,  
Antofagasta, Chile.  
raissamazova@yandex.ru*

Северное побережье Чили подвергались в XIX–XXI веках ряду крупных землетрясений и катастрофическим цунами. Два из крупнейших событий, которые затронули это побережье, произошли в конце XIX века: это события 13 августа 1868 года с предельной магнитудой  $M = 8.5$  с очагом землетрясения, вытянутым к северному побережью Чили, близ города Арика, и 9 мая 1877 года с магнитудой  $M = 8.8$ , также, с очагом вдоль северного побережья Чили [Barrientos, Ward, 1968; Соловьев, Го, 1975]. 9 мая 1877 года в 21:16 по местному времени в районе города Икике было зарегистрировано землетрясение и последующее цунами. Эпицентр землетрясения находился в Тихом океане в районе города Икике. Вычисленная магнитуда землетрясения оценивалась 8,5-8,8. Наибольшая интенсивность отмечалась между городами Арика, Икике и Антофагаста, сильно пострадали также Токопилья, Гатико и Кобиха. Отличие землетрясения 1877 года и генерированное им цунами от других катастрофических землетрясений на северо-западе чилийского побережья заключается в аномальном распределении максимальных высот волн вдоль побережья. Существует множество численных комплексов для оценок максимальных высот волн на побережьях. Ряд из них учитывает динамику движения коры земли в очаге землетрясения при сейсмическом процессе. Однако, когда по оценкам сейсмологов, разрывы смежных сегментов достаточно мелкие и составляют порядка и менее 100км, имеющиеся комплексы, как правило, не способны адекватно отразить

подобную динамику. С этим столкнулись и чилийские цунамисты, долгое время пытавшиеся получить при численном моделировании землетрясения 9 мая 1877г в ряде пунктах побережья, данные по высотам волн цунами, близкие к имеющимся в литературе. Необходимо отметить, что противоречивость имеющихся данных у разных авторов [см., например, Соловьев, Го, 1975; Diana Comte and Mario Pardo, 1991; Barrientos, et.al., 2009] серьезно усложняет анализ возможной реализации динамики в очаге землетрясения. В данной работе оценка возможной динамики сейсмического очага была успешно применена в рамках клавишной модели землетрясения [Lobkovsky, Baranov, 1984], которая в 2017 г. получила свое подтверждение по многолетним спутниковым геодезическим наблюдениям после землетрясения Мауле 2010 г. на основе клавишной концепции строения чилийской зоны субдукции [Лобковский и др, 2017]. Используя данную информацию по чилийской зоне субдукции и при применении блочно-клавишной модели очага землетрясения, нам удалось наиболее близко подойти к решению этой задачи. Кроме того, авторами данной работы, в результате детального анализа имеющейся литературы, была существенно скорректирована локализация эпицентра очага данного землетрясения, что с большим энтузиазмом было поддержано чилийскими сейсмологами. Таким образом, проведенное исследование дало возможность при моделировании процесса генерации волн цунами при землетрясении 1877 г., объяснить необычный характер распределения максимальных высот волн вдоль Чилийского побережья и наиболее близко подойти к реальному распределению высот волн по берегу.

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ DART В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА И НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ОБНОВЛЕННОЙ СИСТЕМЫ РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ ЦУНАМИ В МОРЯХ РФ**

**Г.А. Кантаков**

*НПО «ДЭКО», г. Южно-Сахалинск*

*gennadykantakov@gmail.com*

Представлен опыт применения глубоководных станций DART в период 2010-2020 гг., установленных в северо-западной части Тихого океана по программе МЧС РФ. Рассмотрена эволюция технических разработок в области раннего предупреждения о цунами от первых опытов конца 1960-ых гг. до современных систем, включая DART. Российские DART (№№ 21401, 21402 по номенклатуре NDBC) зарегистрировали 22 цунами-события и цунамиподобных явления в период с ноября 2010 г. по апрель 2017 г. Особо ценной оказалась информация DART № 21401 для анализа волн, вызванных землетрясением Тохоку 11 марта 2011 г. Она позволила смоделировать распространение цунами в реальном времени. В докладе акцентируется внимание на острой необходимости продолжения работ по развертыванию систем DART в морях РФ. Отмечается, что в цунамиопасном районе Курильских о-вов с 2017 г. систематические измерения уровня моря, как в открытом океане, так и на прибрежных станциях прерваны. Общее количество станций для измерений цунами и цунамиподобных явлений с учетом двухгодичного срока службы систем и необходимости их ротации по морям РФ составляет 14 комплектов DART (без аварийного запаса). Технологическим вызовом остается организация круглогодичных измерений DART в ледовых условиях, например, Охотского или Карского морей. Обсуждается возможность лицензионного производства собственных систем DART в России.

## **ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ ПО ДАННЫМ БЛИЖАЙШИХ К ОЧАГУ ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАНЦИЙ, СОДЕРЖАЩИМ ШУМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

**Ю.П. Королёв**

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

*Yu\_P\_K@mail.ru*

В настоящее время оперативный прогноз цунами осуществляется на основе магнитудно-географического метода. Как следствие, службы предупреждения о цунами объявляют свыше 75% ложных тревог.

Повысить качество прогноза возможно на основе гидрофизических методов, использующих данные глубоководных станций о цунами в открытом океане (станций системы DART). Очевидно, что оперативность, заблаговременность прогноза зависит от близости станций к очагу цунами. Данные таких станций могут содержать шумы сейсмического происхождения, наложенные на полезный сигнал. Разделить полезный сигнал и шум в такой ситуации, по-видимому, невозможно. Это обстоятельство может стать препятствием для получения адекватного прогноза. В условиях оперативного режима требуется за короткое время оценить степень опасности цунами, не вдаваясь в проблему разделения сигналов.

Цель работы – прогноз цунами по данным о цунами с шумом сейсмического происхождения. Представлял интерес выяснить, насколько наличие шума в записи уровенной станции влияет на результат прогноза.

Задача оперативного прогноза цунами решается с помощью приближенного способа. Главной его частью является построение передаточной функции, позволяющей по данным о цунами в открытом океане рассчитывать форму ожидаемого цунами в заданной точке. Передаточная функция строится в режиме реального времени после получения информации о координатах эпицентра и времени начала землетрясения. Основой для ее построения является результат расчета волнового поля от вспомогательного аксиально-симметричного источника, центр которого совпадает с эпицентром землетрясения.

Расчеты (прогноз) выполнены для северо-западной и северной части Тихого океана для событий 2006 – 2009 гг. (Симуширские цунами), 2018 г. (Аляскинское цунами с эпицентром вблизи о. Кодьяк) и 2020 г. (Онекотанское цунами). Рассчитывались формы

ожидаемого цунами в точках нахождения удаленных станций DART и в некоторых точках вблизи пунктов Курильских островов, о. Хоккайдо и Западного побережья США с доступными данными о цунами.

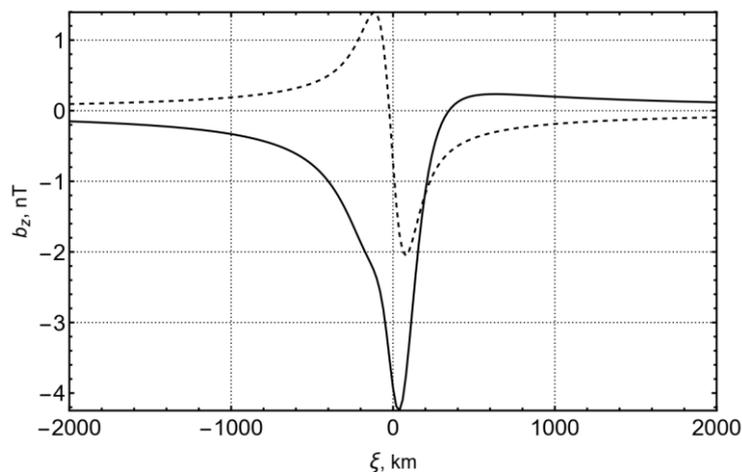
Вопреки предположению, что сейсмический шум в записи цунами на ближних к очагу станциях может повлиять на качество прогноза, численный эксперимент показал, что наличие шума оказывает незначительное влияние на результаты прогноза.

## СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЦУНАМИ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А.К. Яценко, В.М. Сорокин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Москва*  
*alex@izmiran.ru*

Рассмотрен возможный механизм генерации возмущения геомагнитного поля, сопровождающего распространение волны цунами. Источником возмущения являются электрические токи в морской среде и в ионосфере. Ток в морской среде возникает в результате ее движения в волне цунами, а ток в ионосфере возникает в результате падения на нее акустико-гравитационной волны, распространяющейся из атмосферы. Ее источником является вертикальное смещение поверхности морской среды во время распространения в ней волны цунами. Несмотря на то, что проводимость ионосферы значительно меньше проводимости морской среды, величина тока в ней может превышать величину тока в морской среде в результате экспоненциального роста амплитуды акустико-гравитационной волны в процессе ее распространения вверх. Получено пространственное распределение возмущения индукции магнитного поля электрических токов, протекающих в морской среде и в ионосфере. Ниже приведен пример расчета зависимости вертикальной компоненты геомагнитного возмущения с учетом токов в ионосфере (сплошная линия) и без него (пунктир) от расстояния вдоль направления распространения плоской волны цунами.



Из результатов расчетов видно, что генерация электрического тока в ионосфере значительно меняет характеристики возмущения геомагнитного поля, генерируемого волной цунами. Величина магнитного поля суммы токов, протекающих в морской среде и в ионосфере, стремится к постоянному значению с ростом высоты. Такой характер высотной зависимости магнитного поля в ионосфере обусловлен продольным током, текущим в сопряженную ионосферу. Расчеты показали возможность космического мониторинга волн цунами с использованием спутников для регистрации возмущений геомагнитного поля.

## АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЙ ВАРИАЦИОННЫЙ ТРАЕКТОРНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДЛИННЫХ ВОЛН, ПОРОЖДЕННЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ

С.Ю. Доброхотов<sup>1,2</sup>, И.А. Носиков<sup>3</sup>, М.В. Клименко<sup>3</sup>, А.А. Толченников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия*

<sup>3</sup>*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия*

*s.dobrokhotov@gmail.com, igor.nosikov@gmail.com,*

*maksim.klimenko@mail.ru, tolchennikovaa@gmail.com*

Доклад связан с задачами построения в заданной точке наблюдения профиля длинных океанических волн (волн цунами), порожденных пространственно-локализованным источником. Ранее в работах С.Ю. Доброхотова, В.Е. Назайкинского, А.И. Шафаревича, С.Я. Секерж-Зеньковича, А.Ю. Аникина, А.А. Толченникова и др. были получены эффективные асимптотические формулы, позволяющие, в частности, восстановить временную историю профиля волны в точке наблюдения по форме генерирующего эту волну пространственно-локализованного источника и по лучевой траектории гамильтоновой системы, выходящей из центра локализованного источника и приходящей в точку наблюдения.

В докладе обсуждаются указанные формулы для профилей волн и вопрос эффективного численного построения лучевых траекторий (решения граничной задачи) с помощью вариационного метода, основанного на принципе Ферма [1]. Предложенный метод наилучшим образом подходит для решения задач, где начальный импульс распространения волны неизвестен, но вместо этого задано положение пункта регистрации волны. Идея метода заключается в итерационной процедуре оптимизации некоторого начального приближения к оптимальной конфигурации – искомой лучевой траектории. Процесс сходимости управляется обобщенной силой, где определение силы зависит от типа луча. Обсуждаются вопросы поиска множества решений граничной задачи на основе глобальной оптимизации. Представлено применение метода расчета лучей в модельных средах.

1. Доброхотов С. Ю., Клименко М. В., Носиков И. А., Толченников А. А. Вариационный метод расчета лучевых траекторий и фронтов волн цунами, порожденных локализованным источником //Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2020. – Т. 60. – №. 8. – С. 1439-1448.

**ЭФФЕКТИВНЫЕ АСИМПТОТИКИ ПРОФИЛЕЙ ДЛИННЫХ ВОЛН,  
ПОРОЖДЕННЫХ КОРОТКО ДЕЙСТВУЮЩИМИ ИСТОЧНИКАМИ,  
ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ В УПРУГОМ ОСНОВАНИИ**

**С.Ю. Доброхотов<sup>1,2</sup>, Х.Х. Ильясов<sup>1</sup>, О.Л. Толстова<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия*

<sup>3</sup>*Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, Москва, Россия*

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

В работе рассматривается задача о возбуждении волн на поверхности слоя тяжелой жидкости, покоящегося на упругом основании. Источником гравитационных волн выступает локализованное в пространстве и во времени возмущение внутри упругой среды. Изучаются решения совместной системы уравнений теории волн в жидкости и теории упругости, связанные на границе раздела соответствующими условиями. Волновые процессы в изучаемой системе представляются в виде совокупности волн (мод), распространяющихся в жидкости и упругом основании. Как и в более ранних работах авторов, эволюция возвышения свободной поверхности строится на основе решения для самой медленной волны в системе — т.н. "водяной моды".

Необычная с точки зрения теории дифференциальных уравнений исходная задача с помощью методов теории операторов сводится к стандартной задаче Коши с источником, которая в свою очередь с помощью метода, предложенного ранее в работах С.Ю. Доброхотова, В.Е. Назайкинского, D. Bianchi, B. Tirozzi, приводится к задаче с начальными условиями. С помощью ранее полученных упрощенных выражений корней дисперсионного уравнения, отвечающих водяной моде, и приближения длинных волн строятся асимптотические решения поставленной задачи.

В докладе обсуждаются результаты применения указанного метода решения задачи для гладкого в пространстве источника и нескольких вариантов зависимостей от времени. Проводится сравнение результатов расчетов волновых профилей, полученных по "точным" и асимптотическим формулам для коротко и мгновенно действующих источников.

**ПРОСТЫЕ АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ В ЗАДАЧЕ О ДВУМЕРНОМ  
НАКАТЕ НА БЕРЕГ ДЛИННЫХ ВОЛН, ПОРОЖДЕННЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫМ  
ИСТОЧНИКОМ**

**С.Ю.Доброхотов , Д.С. Миненков , В.Е. Назайкинский**

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва  
dobr@ipmnet.ru, minenkov.ds@gmail.com, nazaikinskii@googlemail.com*

Рассматривается двумерная нелинейная система мелкой воды вблизи берега и исследуется накат длинных волн на берег без обрушения. Предполагается, что волны возбуждаются локализованным источником вдали от берега. Замена, похожая на замену Кэрриера—Гринспена приводит к системе с линейной главной частью и фиксированной областью определения. В предположении малости амплитуды, необходимой для необрушения волн, строятся формальные асимптотические решения. При этом главный член совпадает с асимптотикой линейной задачи, построенной в виде модифицированного канонического оператора Маслова. Результаты сравниваются с известными результатами для одномерного наката. Полученные асимптотические формулы легко реализуются на компьютере и позволяют проводить быстрые расчеты.

*Работа выполнена в рамках гранта 19-11-13042.*

## **ЯВНЫЕ РАВНОМЕРНЫЕ АСИМПТОТИКИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ВОЛН НА ВОДЕ СО СЛАБОЙ И СИЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЯМИ**

**С.Ю. Доброхотов<sup>1,2</sup>, В.Е. Назайкинский<sup>1,2</sup>, А.А. Толченников<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия*

*s.dobrokhотов@gmail.com, nazaikinskii@gmail.com, tolchennikova@gmail.com*

Доклад посвящен равномерным формулам для возвышения волн цунами в окрестности регулярного (т.е. не содержащего фокальных точек) участка волнового фронта. Равномерность формул означает, что размер окрестности, в которых они справедливы, не зависит от малых параметров задачи. При этом в области, ограниченной волновым фронтом, могут быть фокальные точки и каустики. А если фокальные точки отсутствуют, то эти формулы справедливы глобально, а не только в окрестности фронта.

**РЕГИСТРАЦИЯ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ 25 МАРТА 2020  
ГОДА**

**А.И. Зайцев<sup>1,2</sup>, С.Г. Долгих<sup>3</sup>, Г.И. Долгих<sup>3</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>1,4,5</sup>, Д. Доган<sup>6</sup>,  
А. Ялченир<sup>6</sup>**

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

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Дальневосточное  
отделение РАН, Владивосток*

<sup>4</sup>*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

<sup>5</sup>*University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia*

<sup>6</sup>*Middle East Technical University, Ankara, Turkey*

*aizaytsev@mail.ru*

25 марта 2020 года в 02 час 49 мин по Гринвичу (05 час 49 мин московского времени) Восточнее Курильских островов произошло сильное землетрясение с магнитудой 7.5. Параметры землетрясения были определены в Службе срочных донесений (ССД) Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) в г. Обнинске с использованием станционных данных, полученных с цифровых сейсмических станций России, стран СНГ и зарубежья. Срочное сообщение об этом землетрясении через 11 мин после его возникновения было передано оперативному дежурному МЧС России. Данное событие привело к возникновению цунами.

Для численного моделирования источника цунами были использованы данные геофизической службы РАН. Используя доступную информацию о землетрясении рассчитано начальное смещение уровня моря в момент землетрясения по формулам Окады [Okada, 1985]. Расчеты выполнены с помощью вычислительного комплекса НАМИ-ДАНС, используемого для моделирования цунами различного происхождения [Зайцев и др., 2019].

Для моделирования использовалась батиметрия Охотского моря, которая была получена из 30-секундной батиметрии Мирового океана (GEBCO30 Digital Atlas) с добавлением более точной прибрежной батиметрией Курильских островов. Шаг по пространству батиметрии Курильских островов около 500 м. Расчеты показывают хорошее

согласие с реальными записями цунами на глубоководных станциях ДАРТ и на посту измерений уровня моря «Водопадная» (Российская служба предупреждения о цунами).

Землетрясение и цунами было зарегистрировано лазерным деформографом, установленным на МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца», на расстоянии почти 2150 км от эпицентра. Используя метод определения цунамигенности землетрясения [Долгих и др., 2007], уже через несколько минут после регистрации можно было говорить о возможной опасности цунами.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов РФФИ и научных исследований молодых российских ученых – докторов наук МД-148.2020.5

1. *Okada Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space // Bull. Seismol. Soc. 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.*
2. *Зайцев А.И., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Ялченир А. Вычислительный комплекс НАМИ-ДАНС в проблеме цунами // Вычислительная механика сплошных сред. 2019. Т. 12. № 2. С. 161-174.*
3. *Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В. Деформационный метод определения цунамигенности землетрясений // ДАН. 2007. Т. 417. № 1. С. 109–112.*

## **ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА НОДАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ОЦЕНКУ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ НАЧАЛЬНОГО ВОЗВЫШЕНИЯ В ОЧАГЕ ЦУНАМИ**

**А.В. Большакова, М.А. Носов, С.В. Колесов, Г.Н. Нурисламова**

*Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова*

*annabolshakova@list.ru*

Оперативный прогноз цунами, как правило, базируется на сейсмических данных и предустановленном магнитудно-географическом критерии. Решение об объявлении тревоги цунами принимается, если магнитуда сейсмического события превышает некоторое пороговое для региона значение. Практика использования магнитудно-географического критерия показывает, что такой подход далек от совершенства. Связь между волной цунами и породившим ее землетрясением является весьма сложной, а магнитуда оказывается важным, но не единственным фактором, определяющим силу цунами. Различия в механизмах очагов землетрясений и их глубинах, особенности топографии дна и затопляемого участка берега, возможный вклад в энергию цунами вторичных источников — оползней и обвалов, провоцируемых землетрясением, — все это не позволяет однозначно связать интенсивность цунами с магнитудой землетрясения.

Одна из возможностей повышения точности оперативного прогноза цунами сопряжена с учетом механизма очага землетрясения и его глубины. В январе 2018 г нами была запущена в тестовую эксплуатацию автоматическая система «Tsunami-Observer», которая реализует означенную возможность. В качестве меры цунамигенности землетрясения в системе «Tsunami-Observer» используется оценка потенциальной энергии начального возвышения водной поверхности в очаге цунами (энергия цунами).

Важной особенностью данных о механизме очага землетрясения является существование двух равнозначных решений, выбор в пользу одного из которых в оперативном режиме не представляется возможным. Основной целью настоящей работы является исследование того, как сильно влияет выбор нодальной плоскости на оценку потенциальной энергии начального возвышения в очаге цунами. Вторая цель – выявление условий, при которых выбор нодальной плоскости гарантированно слабо влияет на оценку энергии.

Исследование было проведено с использованием данных о механизмах очагов землетрясений Бюллетеня Международного Сейсмологического центра (ISC). Показано, что для большинства сейсмических событий оценка энергии слабо зависит от выбора нодалной плоскости. Но в отдельных редких случаях оценки энергии могут различаться значительно – до одного порядка. Как правило, такие значительные различия свойственны сильным мелкофокусным землетрясениям, т. е. именно тем сейсмическим событиям, которые способны эффективно возбуждать волны цунами. Установлено, что во всех случаях, когда отношение длины площадки разрыва к глубине очага невелико, выбор нодалной плоскости практически не влияет на оценку энергии.

Авторы признательны Международному Сейсмологическому центру (the International Seismological Centre) за предоставленные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 19-05-00351, 20-07-01098, 20-35-70038).

## ОПОЛЗНЕВОЕ ЦУНАМИ НА Р. БУРЕЯ

**А.А. Иванова, Е.А. Куликов**

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

*lapoul@gmail.com*

11 декабря 2018 г. в точке с координатами  $50^{\circ}34'$  с. ш. и  $131^{\circ}29'$  в. д. обрушилась часть крутого левого берега р. Буреи. Оползневое тело полностью перекрыло водохранилище от берега до берега высокой каменной плотиной длиной 800 м, вследствие чего было нарушено пополнение Бурейского водохранилища. Оползни такого рода – типичное явление для морских побережий, долин крупных рек и вулканических районов на Дальнем Востоке [1], однако объем сползших масс (свыше 20 млн  $\text{м}^3$ ) и вызванное оползнем цунами с измеренными высотами заплеска до 90 м переводят данное событие в разряд уникальных и требующих пристального внимания.

Подробные экспедиционные исследования в районе оползня были проведены через месяц и через полгода после события, среди основных результатов – определение параметров оползня и инструментальные замеры высот и дальностей заплесков порожденного оползнем цунами. Максимальная высота заплеска, достигнутая в излучине р. Ср. Сандар, на удалении 2.8 км от места схода оползня, оказалась равной 90 метрам.

Полученные данные легли в основу созданной численной модели оползня. Объем обрушившегося грунта составил около  $V \approx 2 \cdot 10^7 \text{ м}^3$ , что соответствует при средней плотности  $\rho = 2.5 \text{ г/см}^3$  массе  $M \approx 5 \cdot 10^7$  тонн. Движение оползня по склону рассматривалось нами как поток сыпучего материала, подобный потоку жидкости [2], однако в отличие от этой модели сохраняется горизонтальная вязкость, что позволяет учесть степень сцепления частиц грунта, которая препятствует слишком быстрому «растеканию» (рассыпанию) оползня. Торможение оползня происходит по закону Кулоновского трения, эффектом перемешивания пренебрегают, обрушение грунта считается одновременным для всей площади оползня. Для выбора оптимальных параметров модели был проведен ряд численных экспериментов с различными значениями коэффициента трения и горизонтальной вязкости. Наилучшее согласие наблюдается для значений  $k = 0.23$  и  $a = 100 \text{ м}^2/\text{с}$ . В модельном расчете удалось воспроизвести не только характер «расползания» массы, но и толщину оползня.

Для оценки эффекта возбуждения цунами использовалась простая одномерная модель и предположение, что основной поток энергии волны цунами был направлен вверх по течению р. Средний Сандар. В рамках этой простой модели мы рассматриваем генерацию волны в канале постоянной глубины  $h$  как результат быстрого вытеснения значительного объема воды оползневым телом. В результате погружения оползня в воду генерируемая волна распространяется вдоль канала в виде бора высотой  $d$ , отсчитываемой от невозмущенной поверхности воды глубиной  $h$ . Вытесненный объем воды оценивался по объему погруженной в воду части оползневого тела – он составляет примерно  $V = 1.5 \cdot 10^7$  м<sup>3</sup>, ширина канала принималась равной  $D = 300$  м, время образование бора  $T = 35$  с, глубина канала  $h = 50$  м. При таких вводных получено значение высоты бора  $d = 47$  м и скорости распространения  $c = 31$  м/с. Такая «грубая» оценка довольно хорошо соответствует высоте заплесков волны, отмеченных на берегах устья Среднего Сандара.

1. Махинов А.Н. Оползень и цунами на реке Бурее 11 декабря 2018 года // Природа, 2019, №4, с. 12-22.

2. Heinrich P., Piatanesi A., Okal E., Hébert H. Nearfield modeling of the July 17, 1998 tsunami in Papua New Guinea // *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(19), 3037-3040.

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ЦУНАМИ НА ОСТРОВЕ САХАЛИН**

**Костенко И.С., Пелиновский Е.Н.**

*ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск*  
*i.kostenko@skbsami.ru*

Благодаря уникальному географическому положению острова Сахалин на его побережье проявляются как локальные цунами, расположенные в непосредственной близости от острова, так и удаленные, расположенные в противоположной части Тихого океана. Это позволяет изучать особенности различных цунами применительно к одному и тому же побережью. Стоит отметить, что не все цунами, которые возникли в Тихом океане и проявились на побережье Курильских остров, были зарегистрированы на Сахалине. А те, которые проявились, оказались значительно меньше. Это связано с тем, что на пути распространения цунами из Тихого океана расположены Курильские и Японские острова, оказывающие экранирующее действие на эти волны. Рассмотрены особенности распределения высот волн вдоль побережья острова Сахалин. Проведен анализ цунами, зарегистрированных за весь период наблюдений, выделены районы их генерации, а также их особенности проявления на рассматриваемом побережье. Проведенные численные расчеты событий цунами позволяют детально изучить интенсивность их воздействия и характер распределения на побережье острова Сахалин.

Исследование выполнено при поддержке грантов РФФИ 18-05-80019 и 20-05-00162.

## **ВЫЯВЛЕНИЕ СЕЙСМОСТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ОБЛАСТЕЙ ПОВЫШЕННОГО СЦЕПЛЕНИЯ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ**

**П.Н. Шебалин**

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва  
p.n.shebalin@gmail.com*

Области повышенного сцепления океанической и континентальной плит в зонах субдукции представляют наибольшую опасность возникновения разрушительных цунами. Применение методов спутниковой геодезии, позволяющих выявлять такие области, как правило, ограничено из-за отсутствия приемников GPS в океане. Поэтому применение различных косвенных методов может помочь решению этой задачи. В данной работе предлагается использование для этой цели методов сейсмостатистики. На примере Камчатского слаба мы используем недавно обнаруженные закономерности. Во-первых, установлено, что прямолинейность графика повторяемости магнитуд землетрясений (закон Гутенберга-Рихтера) может нарушаться как в областях ускоренного асейсмического проскальзывания, так и в областях повышенного сцепления. Во-вторых, обнаружено, что величина задержки начала степенного характера спада активности афтершоков (параметр  $c$  закона Омори-Утсу) зависит от напряжений, накопленных в области очага основного толчка. В данной работе введены параметры, позволяющие картировать указанные два эффекта, проведено сопоставление с выделением опасных цунамигенных областей другими методами.

## МЕТОД ПРОВЕРКИ ДАТЧИКОВ ГЛУБОКОВОДНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ

**В.А. Карпов<sup>1</sup>, М.А. Носов<sup>1</sup>, С.В. Колесов<sup>1</sup>, К.А. Семенцов<sup>1</sup>, Н. Matsumoto<sup>2</sup>, Y Kaneda<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

<sup>2</sup>*Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokosuka, Japan*

<sup>3</sup>*Institute of Education, Research and Regional Cooperation for Crisis Management Shikoku, Kagawa University, Takamatsu, Japan*

*va.karpov@physics.msu.ru*

В настоящее время глубоководные измерения активно применяются для мониторинга цунами и землетрясений, а также для решения иных научных и практических задач. Современная обсерватория на дне океана (DONET, S-net и др.) обычно оснащена сейсмометром (акселерометром и/или велосиметром) и датчиком давления, расположенными практически в одной точке. Датчики эксплуатируются в течение многих лет. Чтобы убедиться, что датчик обеспечивает точные измерения физических величин, полезно периодически его калибровать. Поскольку датчики расположены на глубине нескольких тысяч метров, их замена - это не только достаточно сложная техническая задача, но и очень дорогая процедура, мы предлагаем альтернативный метод для проверки точности калибровки, который не требует прямого доступа к глубоководным измерительным системам. Тестирование можно проводить после каждого достаточно сильного сейсмического события путем анализа зарегистрированных сигналов. Метод основан на линейной связи между вариациями придонного давления и вертикальной компонентой ускорения движения дна. Эта связь существует в определенном частотном диапазоне, именуемом «диапазон вынужденных колебаний» [Nosov et al., 2018]. Метод заключается в вычислении отношения спектров мощности вариаций давления и вертикального ускорения. При правильной калибровке датчиков в диапазоне вынужденных колебаний отношение спектров должно иметь постоянное значение, равное квадрату отношения среднего давления и ускорения силы тяжести. В противном случае калибровка хотя бы одного из датчиков неверна. В нашей презентации мы продемонстрируем применение метода на примере набора данных DONET-1, записанных во время землетрясения Тохоку 2011 г. Также будут описаны основные ограничения метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 19-05-00351, 20-07-01098, 20-35-70038).

*Nosov, M., Karpov, V., Kolesov, S., Sementsov, K., Matsumoto, H., & Kaneda, Y. (2018). Relationship between pressure variations at the ocean bottom and the acceleration of its motion during a submarine earthquake. Earth, Planets and Space, 70(1), 100.*

## КАК УЛУЧШИТЬ ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

**Куликов Е.А.**

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН*

*kulikove@gmail.com*

В работе Гусякова (2010) на основе анализа 50-летней практики применения магнитудно-географического критерия прогнозирования региональных цунами показано, что среди выпущенных оперативной службой за этот период 67 тревог ложными по принятому критерию превышения высотами волн пороговой величины 0.5 м, оказалось 50 (т.е. 75 %).

Современные технологии моделирования сейсмического очага и распространения цунами могут значительно улучшить качество и надежность принятия решения об объявлении цунами. Как пример рассмотрены два известных события вблизи Северо-Курильска - 25 февраля 1973 года с магнитудой 7,5 (тревога оправдалась) и 25 марта 2020 г. с магнитудой 7.3 (тревога оказалась ложной).

*Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958-2009 гг // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46. – №. 3. – С. 5-21.*

## НЕСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЦУНАМИ В ОКРАИННЫХ МОРЯХ И ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМАХ РОССИИ

**В.К.Гусяков<sup>1</sup>, А.Б.Рабинович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. г. Новосибирск*

<sup>2</sup> *Институт океанологии РАН. г. Москва*

<sup>1</sup>*gvk@sscc.ru*, <sup>2</sup>*a.b.rabinovich@gmail.com*

Проблема цунами в Российской Федерации связывается в основном с Курило-Камчатским регионом, где источниками цунами являются сильные субдукционные землетрясения, происходящие в широкой полосе прибрежного океана, простирающейся от края шельфа до глубоководной впадины. Протяженность побережья этой зоны около 2500 км, что составляет лишь малую часть общей протяженности береговой линии РФ (около 60,000 км). Всего за исторический период (с 1737 года) на Дальневосточном побережье (включающем также побережья Японского, Охотского и Берингова морей) наблюдалось около 110 описанных случаев цунами, среди которых было 100 сейсмогенных, 3 вулканогенных, 2 обвальных и 5 метеорологических [Гусяков, 2016].

По мере дальнейшего изучения цунами и цунамиподобных явлений и накопления фактических данных стало понятно, что аномальные длинноволновые колебания уровня водных бассейнов, опасные для населения и береговых сооружений, могут происходить не только на океанических побережьях, но и на побережьях окраинных и внутренних морей (Черного, Азовского, Каспийского, Балтийского, Баренцова, Белого), а также во внутренних водных бассейнах, т.е. на озерах, водохранилищах и даже на крупных реках. Например, доля сейсмогенных событий в историческом каталоге цунами для Черного и Азовского морей, покрывающем почти 4 тыс лет и содержащем 50 событий, снижается до 66 % [Никонов и др., 2018]. Для таких побережий основным фактором генерации цунами могут выступать другие геофизические процессы, в частности, оползневые и метеорологические. Так в Балтике подавляющее большинство аномальных колебаний уровня, зарегистрированных инструментально, связано с атмосферными возмущениями. Сильнейшее на территории Российской Федерации локальное цунами с высотой заплеска до 90 м произошло 11 декабря 2018 года на Бурейском водохранилище, как результат массивного обвала его берегового склона.

Следует подчеркнуть, что выявление и идентификация цунами несейсмического происхождения часто является нетривиальной задачей. Наблюдения последних лет свидетельствуют, что подобные события являются гораздо более распространенными, чем это считалось ранее, и что для Европейской части России именно они представляют главную угрозу. При этом, такого рода цунамигенные события не могут быть спрогнозированы на основе принципов, лежащих в основе работы службы предупреждения о цунами, действующей на Дальневосточном побережье РФ. Тем не менее, какая-то система оповещения населения об угрозе цунами необходима, особенно для участков высокой рекреационной активности на побережьях Черного и Балтийского морей. В докладе обсуждаются возможные подходы к построению такой системы срочного оповещения об угрозе цунами несейсмического происхождения и меры по снижению последствий.

## СИСТЕМА «TSUNAMI OBSERVER»: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

С.В.Колесов<sup>1,2</sup>, М.А.Носов<sup>1,2</sup>, А.В.Большакова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова*

<sup>2</sup>*Институт Морской Геологии и Геофизики ДВО РАН*

*kolesov@ocean.phys.msu.ru*

На Физическом факультете МГУ создана и успешно функционирует автоматическая система оценки цунамиопасности землетрясения «Tsunami Observer», которая в реальном времени осуществляет мониторинг сейсмических событий и производит оперативную оценку интенсивности возможного цунами по шкале Соловьева-Имамуры, а также распределения максимальных амплитуд в районе очага землетрясения. По результатам более чем двухгодичной эксплуатации система продемонстрировала высокую достоверность выдаваемых оценок.

С помощью системы нами были выполнены ретроспективные расчёты некоторых исторических событий, произведены сопоставления с данными натурных наблюдений. Для выявления влияния типа модели очага землетрясения на оценку цунамигенности сейсмического события была проведена серия расчётов на основе моделей конечного разрыва (finite fault model) и произведено сравнение с используемыми системой в настоящий момент простыми моделями (фокальный механизм). Также в докладе будут обсуждаться возможные пути развития и модернизации системы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 20-07-01098, 20-35-70038, 19-05-00351.

## **ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НА ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ЕЙ В ОКЕАНЕ**

**К.А. Семенцов<sup>1</sup>, С.В. Колесов<sup>1,2</sup>, Г.Н. Нурисламова<sup>1,2</sup>, М.А. Носов<sup>1,2</sup>**

*<sup>1</sup>Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

*<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения РАН Россия, г.*

*Южно–Сахалинск*

*sebbest@yandex.ru*

Ключевым фактором, определяющим генерацию гравитационных волн в океане подводными землетрясениями, является вытеснение воды косейсмическими (остаточными) деформациями дна [Пелиновский, 1996]. Однако помимо остаточных деформаций землетрясения сопровождаются излучением поверхностных сейсмических волн, которые, распространяясь по дну водоема, также способны возбуждать гравитационные волны в водной толще [Gutenberg, 1939; Levin and Nosov, 2016; Sementsov et al., 2019]. При увеличении эпицентрального расстояния величина остаточной деформации убывает довольно быстро – обратно пропорционально квадрату расстояния. При этом амплитуда поверхностных сейсмических волн убывает значительно медленнее — обратно пропорционально квадратному корню из расстояния [Aki and Richards, 1981; Okada, 1995]. В связи с этим на большом расстоянии от эпицентра остаточные деформации становятся исчезающе малыми, в то время как поверхностные сейсмические волны все еще обладают значительной амплитудой и, следовательно, способны эффективно возбуждать гравитационные волны. Яркой иллюстрацией этого служат события, при которых эпицентр землетрясения располагался в глубине материка, а в ближайшем водоеме наблюдались длиннопериодные колебания водной толщи [Никонов, 1997]. Заметим, что в связи со слабой изученностью гравитационных волн в океане, возбуждаемых поверхностными сейсмическими волнами, для них нет устоявшегося названия. Поэтому в [Sementsov et al., 2019] нами был предложен термин "FGSS waves" (Free Gravity waves excited in the ocean by Seismic Surface waves – свободные гравитационные волны, возбуждаемые в океане сейсмическими поверхностными волнами), которым мы и будем пользоваться в дальнейшем.

В указанной работе на примере волн FGSS, зарегистрированных донными обсерваториями DONET во время катастрофического события Тохоку 11 марта 2011 года,

было показано, что (1) горизонтальные, а не вертикальные движения дна играют ключевую роль в их генерации; (2) амплитуда возбуждаемых волн FGSS в первую очередь определяется динамической амплитудой горизонтальных движений дна, а роль остаточных горизонтальных смещений дна является незначительной; и (3) амплитуда возбуждаемых гравитационных волн зависит от относительной ориентации подводных склонов и направления распространения сейсмической волны. Приведенные результаты нуждаются в дальнейшем исследовании и уточнении. В частности, как уже было сказано, при увеличении расстояния между эпицентром землетрясения и областью генерации волн FGSS, величина остаточной деформации дна убывает медленнее, чем амплитуда поверхностных сейсмических волн. В связи с этим представляется интересным выяснить, как соотносятся вклады динамических и статических деформаций дна в генерацию волн FGSS на различном эпицентральной расстоянии. Также, учитывая пункт (3) результатов [Sementsov et al., 2019], имеет смысл установить максимальные возможные амплитуды волн FGSS для конкретного региона, варьируя направление и скорость распространения поверхностных сейсмических волн. Описанные исследования проводятся методом численного моделирования с использованием комбинированной 3D/2D модели эволюции волн цунами [Носов, Колесов, 2019; Sementsov et al., 2019]. Для конструирования различных пространственно-временных законов движения дна используются реальные записи донных сейсмометров DONET, выполненные во время катастрофического события Тохоку 11 марта 2011 года. Все численные эксперименты проводятся на реальной батиметрии – в области постановки донных обсерваторий DONET.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 20-35-70038, 19-05-00351, 20-07-01098).

Литература.

1. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. ИПФ РАН. Нижний Новгород, 1996. 276 с.
2. Gutenberg, B. (1939). Tsunamis and Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 29 (1), 517-526.
3. Levin B. W., Nosov M. A. *Physics of Tsunamis, Second Edition.* — Springer International Publishing AG Switzerland, 2016. — 388 p.
4. Sementsov, K. A., Nosov, M. A., Kolesov, S. V., Karpov, V. A., Matsumoto, H., & Kaneda, Y. (2019). Free Gravity Waves in the Ocean Excited by Seismic Surface Waves: Observations and Numerical Simulations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), 8468-8484.

5. Aki, K., & Richards, P. G. (1980). Quantitative seismology: Theory and methods. San Francisco, CA: W.H. Freeman and Co.
6. Okada, Y. (1995). Simulated empirical law of coseismic crustal deformation. *Journal of Physics of the Earth.*, 43(6), 697–713. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.43.697>
7. Никонов А. А. Цунами на берегах Черного и Азовского морей //Физика Земли. – 1997. – Т. 1. – С. 2-10.
8. Носов М.А., Колесов С.В. Комбинированная численная модель цунами // Математическое моделирование. 2019. Т. 31. №1. С. 44-62.

**ЦУНАМИ 25 МАРТА 2020 Г  
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

**Е.П. Семенова<sup>1</sup>, Т.Н. Ивельская<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра ФИЦ ЕГС РАН, Южно-Сахалинск*

<sup>2</sup> *Центр цунами ФГБУ Сахалинское УГМС, Южно-Сахалинск  
ivelskaya@mail.ru*

25 марта 2020 года в северо-западной части Тихого океана юго-восточнее о. Парамушир произошло землетрясение с магнитудой  $M_w 7.4$ . Эпицентр землетрясения находился на расстоянии 220 км от острова Парамушир, интенсивность сотрясений в Северо-Курильске достигла 6 баллов по шкале MSK-64.

На основании «Положения о Службе цунами, осуществляемой сейсмической станцией Южно-Сахалинск» в 14:00 сахалинского времени сейсмологами РИОЦ «Южно-Сахалинск» была объявлена тревога цунами по Северо-Курильскому району. Центром управления в кризисных ситуациях МЧС России по Сахалинской области было немедленно организовано оповещение населения в г. Северо-Курильске и по состоянию на 14:30 сах была завершена эвакуация населения в безопасную зону.

В международной системе предупреждения о цунами Тихоокеанский Центр предупреждения о цунами (Гонолулу) выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 1000 км от эпицентра землетрясения. О возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1–3 метра поступило предупреждение от Японского Метеорологического Агентства (Токио).

Дальнейшее наблюдение за образованием и прохождением волн цунами отслеживалось сотрудниками Центра цунами Сахалинского УГМС.

По визуальным наблюдениям за цунами на сопке «Сигнальная» (остров Парамушир) на фоне штормового волнения и прилива высота волны цунами была оценена в пределах 50 см, что хорошо согласуется с предварительным расчетом и с особенностями трансформации цунами по трассе распространения (район мелководья). Направление движения ветровых волн отмечалось восточное, а волн цунами на 10–15 градусов южнее по сравнению с ветровыми волнами, в сопровождении пены.

Цунами было зарегистрировано глубоководными станциями с амплитудами 2-4 см, что в условиях отсутствия инструментальных наблюдений в Северо-Курильске, явилось важной информацией о подтверждении образования цунами. Небольшое цунами было зарегистрировано на станциях Водопадная (Камчатка, Россия), Wake и Midway (США).

Интересный факт, что были зарегистрированы следы цунами в Стародубском (Сахалин, Россия), что, возможно вызвало полное разрушение припая с 25 на 26 марта в районе Стародубского. Прибытие огромной массы воды неравномерно приподнимает ледяной покров, происходит взламывание припая даже при очень маленькой амплитуде волны ~ 1-3 см.

Таким образом, произошедшее в результате сильного подводного землетрясения 25 марта 2020 г. цунами может быть оценено как слабое, которое отмечается только мареографами.

Действия всех оперативных служб при возникновении сильного подводного землетрясения 25 марта 2020 г. были выполнены в соответствии с действующим регламентом работы без нареканий, данные о проявлении цунами подтвердили обоснованность объявления тревоги цунами для района Северных Курильских островов.

## ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

**Е.А. Куликов, А.Ю. Медведева**

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

*Alisa.bannikova@gmail.com*

К потенциально возможным зонам генерации каспийских цунами относятся области с повышенным уровнем сейсмической активности. Согласно расчету по формуле Грина коэффициента усиления волны цунами при движении от точки ее зарождения до изобаты 5 м, было показано, что наиболее «эффективными» зонами генерации цунами являются области Южнокаспийской и Среднекаспийской котловин.

Детерминистский подход к оценке цунамиопасности произвольного участка побережья состоит в выборе сильнейших наблюдаемых (или гипотетических) событий цунами из ближней окрестности участка и из дальней зоны, последующей оценке параметров модельных источников и, наконец, численным моделированием процессов генерации и распространения цунами от этих источников. В результате удается рассчитать максимальные заплески цунами на побережье для выбранного исторического (или гипотетического) события. Поиск такого сценария на основе детерминистского подхода был осуществлен для трех областей: города Каспийск, района Апшеронского полуострова (население около 100 тыс. чел), вблизи которого на шельфе располагаются многочисленные разработки нефтяных месторождений, в том числе целый посёлок на металлических эстакадах Нефтяные Камни. На самом полуострове находятся многочисленные нефтяные терминалы, непосредственно вблизи уреза воды стоит нефтеперерабатывающий завод SOCAR Refinery, города Баку (население около 2181.8 тыс.) и южного побережья Апшеронского полуострова, как наиболее уязвимо для сейсмических источников цунами, располагающихся в Южнокаспийской котловине.

С точки зрения потенциальной угрозы наиболее опасными для Апшеронского полуострова представляются цунамигенные сейсмические очаги, расположенные к югу от него. «Эталонный» источник определяется на основе анализа сеймотектонических условий исследуемого региона и распределения сейсмической активности. Прежде всего он определяется сейсмическим потенциалом соответствующей тектонической зоны, геометрией разлома, механизмом очагов (сдвиги, взброс, сбросы) и др.

Максимальные высоты цунами для южного побережья Апшеронского полуострова составили 3 м. Наиболее уязвимой оказалась область Гарадагского района, располагающегося к юго-западу от Баку, где дальность проникновения составила по расчетам около 2000 м. Примечательно, что в Баку высота волн цунами от этого источника составляет всего порядка 15-30 см. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОРАН (тема № 0149-2019-0005) и при поддержке гранта РФФИ (проект № 18-05-01018).

## СИСТЕМЫ ГНСС В ЗАДАЧАХ РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ЦУНАМИ

Стеблов Г.М.<sup>1,2</sup>, Сдельникова И.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный*

<sup>3</sup>*ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск*

*steblov@ifz.ru*

Существующие в настоящее время системы раннего предупреждения о цунами в случае сильных подводных землетрясений опираются, в основном, на сейсмологические наблюдения, а также на данные морских уровнемерных постов и донных датчиков давления. Каждый из указанных видов наблюдений характеризуется своими известными ограничениями в отношении своевременной и точной количественной оценки угрозы цунами. Вариации уровня воды и придонного давления, в основном, дают информацию о прохождении волны цунами и не обеспечивают возможности заблаговременного предупреждения. В то же время, широко развитая мировая система сейсмологических наблюдений обеспечивает достаточно точную и оперативную локализацию землетрясений, в том числе подводных. Это позволяет использовать сеть специализированных сейсмостанций для формирования оповещений о цунами по магнитудно-региональному критерию, согласно которому для каждого участка береговой линии устанавливаются пороговые значения магнитуд подводных цунамиопасных землетрясений для объявления тревоги. В частности, Российская система сейсмических наблюдений на Дальнем Востоке неоднократно демонстрировала устойчивость и надежность за годы своего существования.

Однако существующая сейсмологическая система предупреждения цунами не учитывает глубину события и параметры смещений в очаге (механизм очага), что крайне существенно для оценки энергетических характеристик источника цунами. Так, например, во время Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 г., произошедшего на глубине 611 км, была объявлена ложная тревога, основанная по формальным признакам на магнитудно-региональном критерии, которая была позже отменена. Когда произошло сильнейшее землетрясение Тохоку 11 марта 2011 г., сигнал тревоги был объявлен в течение нескольких минут. При этом была допущена существенная недооценка магнитуды события, что привело к катастрофическим последствиям для обширной береговой инфраструктуры и

населения прибрежной зоны из-за характерных аппаратурных проблем, связанных с сейсмическими наблюдениями. Своевременная оценка моментной магнитуды для мега-землетрясений осложнена продолжительным временем развития сейсморазрыва, превышением предельных порогов регистрирующей аппаратуры (по амплитуде и частоте) и ограниченными возможностями анализа поверхностных волн при магнитудах свыше  $M_w 8$ . Современные усилия улучшить методику определения характеристик очага по сейсмологическим наблюдениям базируются на анализе W-фаз. Такой анализ был изначально разработан для быстрого расчета характеристик сейсмического очага в целях предупреждения о цунами и является надежным и простым способом определения главных характеристик очага в случае сильных землетрясений. Недостатком подхода является временная задержка порядка 20 минут, которая необходима для сбора длиннопериодных телесеismicических данных. В то же время, предупреждение о цунами в ближней зоне землетрясения эффективно тогда, когда оно формируется в течение 5-10 минут от начала сейсморазрыва. Таким образом, сейсмологическая система раннего предупреждения о цунами характеризуется большим количеством ложных тревог, а также невысокой оперативностью и точностью магнитудных оценок.

Многочисленные исследования, проведенные после катастрофического землетрясения 26 декабря 2004 г. на Суматре, продемонстрировали способность сетей ГНСС обеспечивать оценки параметров сейсмических источников с приемлемым разрешением, всего за 3-5 минут. Для оценки энергетических характеристик источника цунами необходимы как потенциальная, так и кинетическая составляющие смещений морского дна: вертикальное поднятие и интенсивность горизонтального движения континентального склона. Один из распространенных подходов, который применяется на практике для выявления этих смещений, основан на эмпирических соотношениях, связывающих распределение смещений морского дна с наблюдаемыми на пунктах ГНСС поверхностными смещениями. Такой эмпирический подход допускает дальнейшие усовершенствования путем геомеханического моделирования, направленного на восстановление конечной модели сейсмического очага по косейсмическим смещениям пунктов ГНСС с последующей оценкой из этой модели косейсмических смещений морского дна. Практические меры, необходимые для повышения эффективности, состоят: в сокращении времени регистрации сигнала за счет установки станций ГНСС в ближней зоне возможных очагов; в организации передачи данных в центры обработки в режиме реального времени; в усовершенствовании расчетов функций отклика и их предварительном формировании для известных цунамиопасных участков береговых линий.

Таким образом, интеграция дополнений на базе ГНСС в глобальную систему раннего предупреждения о цунами сможет обеспечить точное, своевременное, экономически эффективное и устойчивое формирование предупреждений о цунами в случае мега-землетрясений по всему земному шару.

## СРАВНЕНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ И БЕЗДИСПЕРСИОННОЙ МОДЕЛЕЙ НАКАТА ДЛИННЫХ ВОЛН НА БЕРЕГ

А. Абдалазиз<sup>1</sup>, И.И. Диденкулова<sup>2,3</sup>, Д. Дутых<sup>4</sup>, П. Денисенко<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Отделение морских систем, Таллиннский технологический университет, Таллинн,  
Эстония*

<sup>2</sup>*Нижегородский технический университет им. Р. Алексеева, г. Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Университет Осло, Норвегия*

<sup>4</sup>*Университет Гренобль Альпы, Университет Савойя Мон Блан, Национальный центр  
научных исследований, Шамбери, Франция*

<sup>5</sup>*Университет Уорика, Ковентри, Великобритания*

*didenkulova@mail.ru*

В современной литературе для описания наката длинных волн на берег чаще используется нелинейная теория мелкой воды, чем дисперсионные модели, в частности, уравнения типа Буссинеска. Вероятно, это связано с тем, что расчеты наката волн, проведенные с помощью дисперсионных кодов, менее устойчивы по сравнению с расчетами, проведенными в рамках нелинейной теории мелкой воды. В данной работе мы сравниваем высоты наката волн на берег, рассчитанные с помощью двух моделей, с экспериментальными данными наката различных типов волн: одиночные волны, регулярные и бигармонические волны, а также модулированные по частоте и амплитуде волновые пакеты, характерные для волн от скоростных судов. Основой для сравнения стали экспериментальные данные, полученные в Большом волновом канале (Ганновер, Германия) в 2012-2013 гг. В эксперименте использовалась стандартная геометрия канала, который состоит из участка ровного дна длиной 251 м, заканчивающегося плоским откосом с тангенсом берегового уклона 1:6. Во время экспериментов, глубина воды поддерживалась постоянной на уровне 3.5 м. Измерения вдоль длины канала проводились с помощью 16-18 струнных волнографов. Колебания наката измерялись емкостным датчиком, а также двумя видеокамерами с высоким разрешением. Канал имел стандартное асфальтовое покрытие, однако в некоторых экспериментах береговой склон был покрыт гладким пластиком для уменьшения влияния трения. Эксперименты на асфальтовом и пластиковом покрытии рассматривались по отдельности.

Волны возбуждались с помощью лопастного волнопродуктора, который был оборудован механизмом активного поглощения отражённой волны, использующим в качестве входных параметров сигналы с двух волнографов: одного в непосредственной близости и другого в 3.6 метрах от лопасти. Регулярные волны имели период 20 с. Длительность одиночных волн у основания волны также была ~20 с. Бигармонические волны содержали две системы волн с периодами 20 с и 10 с. В модулированных по частоте и амплитуде волновых пакетах период линейно менялся от 20 с до 10 с. Амплитуда волн менялась от 10 см до 60 см, что также позволило изучить влияние нелинейности.

В качестве моделей использовались нелинейная теория мелкой воды и дисперсионная теория в приближении Буссинеска, представленная модифицированными уравнениями Перегринна. Обе модели учитывали донное трение по формуле Маннинга. В качестве граничного условия слева использовалась наиболее «чистая» экспериментальная запись волнографа в точке, наиболее приближенной к волнопродуктору. Условий же на скорости течения не накладывалось.

Показано, что обе модели одинаково хорошо справляются с описанием волн малой амплитуды, в то время как для более нелинейных волн дисперсионная теория показала себя более адекватной моделью, и является более предпочтительной. Подчеркнем, что данные выводы сохраняются для всех рассмотренных типов волн в заданном диапазоне параметров.