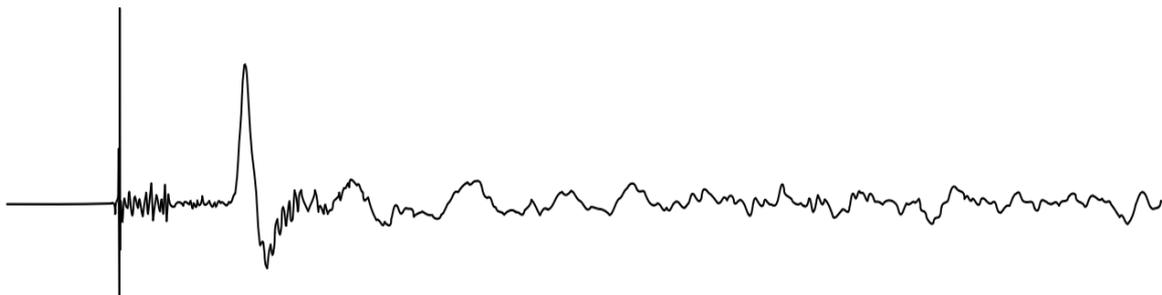


НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦУНАМИ  
ПРИ ОТДЕЛЕНИИ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



**IV всероссийская научная конференция  
с международным участием  
«ВОЛНЫ ЦУНАМИ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ»,  
посвященная 70-летию катастрофического цунами в  
Северо-Курильске**

**15 - 16 ноября 2022 г**

**Сборник тезисов докладов**

Москва, 2022

**IV всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ», посвященная 70-летию катастрофического цунами в Северо-Курильске. 15-16 ноября 2022 г. Сборник тезисов докладов / Под ред. М.А.Носова. - М.: Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2022 г. 25 с.**

Электронное издание  
Опубликовано на сайте 10.11.2022

© Научный совет по проблемам цунами  
ОНЗ РАН, 2022

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  
проф. С.Ю. Доброхотов  
член-корр. РАН А.И. Зайцев  
к.ф.м.н. Т.Н. Ивельская  
проф. Е.Н. Пелиновский  
проф. РАН Т.К. Пинегина  
д.г.н. Н.Г. Разжигаева  
к.ф.м.н. Д.В. Чебров  
проф. Л.Б. Чубаров

**Организационный комитет:**

А.В. Большакова – председатель  
И.П. Медведев – заместитель председателя  
Д.С. Выдрин  
С.В. Колесов  
А.Ю. Медведева  
Г.Н. Нурисламова  
Е.С. Цуканова  
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 очно-дистанционном формате в ИО РАН и на платформе <https://meet.ocean.ru/b/htg-cfi-zie-g9r>**

1.

**КАМЧАТСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ И ЦУНАМИ 4 НОЯБРЯ 1952 ГОДА И ЕГО  
ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦУНАМИОПАСНОСТИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО  
ПОБЕРЕЖЬЯ РФ**

**В.К. Гусяков**

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

*gvk@sscc.ru*

Камчатское цунами 4 ноября 1952 года является крупнейшим по числу жертв стихийным бедствием на территории РФ. Оно было вызвано подводным землетрясением, моментная магнитуда которого сейчас оценивается величиной 9.0, происшедшем на западном склоне Курило-Камчатской глубоководной впадины. На ближайшем побережье островов Парамушир и Шумшу высоты заплеска достигали 20 – 23 м. Волнами цунами был практически уничтожен г.Северо-Курильск. Точное число жертв этой катастрофы неизвестно до сих пор, по оценкам камчатских краеведов и журналистов оно составило от 10 до 14 тыс. человек. Землетрясение вызвало трансокеанское цунами, высоты которого на Гавайях достигали 9.1 м (мыс Каена на о-ве Оаху), и до 2 м на побережье Чили.

Данное событие принадлежит к классу трансокеанских мега-цунами, характеризующихся предельно высокими заплесками (до 40 – 50 м) на протяженных участках побережья (до 500-1000 км), а также способностью наносить ущерб на противоположных берегах океанского бассейна. В очагах таких землетрясений осуществляется магистральный разрыв вдоль главной литосферной границы, отделяющей океаническую кору от перекрывающего ее островного клина, смещения по которому могут достигать 25-50 м. В XX веке среди таких были Алеутские цунами 1946 и 1957 годов, Чилийское цунами 1960 года и Аляскинское цунами 1964 года. В XXI веке в них добавились Индонезийское цунами 2004 года и цунами Тохоку в Японии 2011 года. В мировом каталоге цунами насчитывается около 20 таких событий. Они составляют менее 1% от всех случаев цунами, но ответственны за более чем 50% всех жертв цунами и более 70% наносимого ими ущерб.

Субдукционные мега-землетрясения класса M9 вносят основной вклад в общую цунамиопасность побережья. Этот вклад особенно значителен для побережий окраинных морей, не имеющих перед собой зон субдукции (типа Охотского и Берингова), для которых обычные субдукционные землетрясения с магнитудой 7.0 – 8.5 не представляют особой опасности. Однако, ввиду большого периода повторяемости мега-землетрясений на каждом отдельном участке субдукционной зоны (который варьируется от 200 – 300 лет до 1100-1200 лет), они присутствуют далеко не во всех региональных каталогах. Современная точка зрения на возникновение субдукционных мега-землетрясений состоит в том, что практически все участки зон субдукции должны рассматриваться как возможные места возникновения мега-землетрясений с магнитудой 9+. Похоже, что единственной причиной отсутствия таких событий в некоторых зонах является недостаточная длина инструментальных и исторических каталогов, а также недостаточная изученность их палеопроявлений.

Главная проблема оценки цунамиопасности океанического побережья, имеющего перед собой зону субдукции, состоит в получении реалистичных оценок места и времени возникновения в ближайших сегментах этой зоны мега-землетрясения с магнитудой 9.0 и выше. Получение таких оценок представляет собой сложную научно-практическую проблему и фактически сводится к решению задачи долгосрочного прогноза сильнейших

землетрясений. Карты сейсмоопасности и цунамиопасности любого масштаба, построенные без учета возможности и вероятности возникновения мега-землетрясений, будут значительно недооценивать реальную опасность цунами и землетрясений.

## 2.

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА, ПОРОЖДЕННОГО КАМЧАТСКИМ МЕГА-ЦУНАМИ 1952 Г. В ОДНОЙ ИЗ ВНУТРЕННИХ БУХТ АВАЧИНСКОЙ ГУБЫ**

**С.А. Бейзель, О.И. Гусев, Г.С. Хакимзянов, Л.Б. Чубаров**

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

*chubarovster@gmail.com*

Исследование выполнялось по методике «наихудшего случая» (the worst-case scenario), в качестве которого был выбран случай мега-цунами, происшедшего 4 ноября 1952 г. Очаг землетрясения с магнитудой 9.0 был расположен в непосредственной близости от входа в Авачинскую бухту.

Результаты численного моделирования генерации начального возвышения, распространения волны и ее заплеска на берег бухты (модель Гусякова-Окады, нелинейная теория мелкой воды, схема типа МакКормака, метод крупных частиц, телескопически вложенные расчетные области, код MGC) позволили определить основные зоны концентрации волновой энергии в бухте, дальности заплеска и продолжительность затопления суши. Анализ показал, что имеют место значительные колебания свободной поверхности при выходе волны на мелководье и в узостях. Обращает на себя внимание образование «заводы», куда попадает поток воды и задерживается после фазы отхода волны. В разных частях бухты, особенно вблизи входа в нее, образуются вихреобразные структуры, задерживающие прохождение волн в акватории. Отмечается также образование коротковолновых возмущений, распространяющихся на фоне длинноволновых «несущих» колебаний.

Выполненное моделирование воздействия волны на неподвижную полупогруженную конструкцию (модель потенциальных течений, 3D постановка, адаптивная сетка) показало, что её положение относительно вертикальной причальной стенки, параллельной направлению распространения волны, оказывает небольшое влияние на силовую нагрузку. Анализ результатов подтвердил предположение о том, что силовое воздействие пропорционально амплитуде набегающей волны и площади фрагмента конструкции, на который она воздействует. Преобладающую долю волнового воздействия оказывает продольная составляющая силы. Приближение к причалу несколько увеличивает максимальные значения поперечной составляющей силы, однако эти изменения не приводят к существенному изменению максимальной суммарной нагрузки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. Результаты, связанные с оценкой волнового воздействия, получены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00127).

3.  
**КАРТЫ ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ АЛЯСКИ КАК ЭЛЕМЕНТ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ УМЕНЬШЕНИЯ РИСКА ЦУНАМИ В  
США**

**Е.Н. Сулеймани<sup>1</sup>, Д.Ю. Никольский<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Геофизический Институт, Университет Аляски, г. Фэрбанкс, США*

*ensuleimani@alaska.edu*

Алеутская зона субдукции – один из наиболее сейсмически активных регионов Тихого океана, где произошли сильнейшие цунамигенные землетрясения 20-го века. В дополнение к высокой сейсмической активности (около 50 тысяч регистрируемых землетрясений в год), ледниковые фьорды центрального и юго-восточного побережья Аляски вносят существенный вклад в цунамиопасность региона. Группа моделирования цунами в Геофизическом Институте Университета Аляски обеспечивает цунамирайонирование побережья Аляски с 1998 года, после присоединения штата к государственной программе уменьшения риска цунами (NTHMP) в США. Наша деятельность включает в себя построение карт затопления прибрежной зоны на основании моделирования волн, вызванных историческими и гипотетическими землетрясениями, а также другими источниками цунами, включая оползневые, вулканические и обвальные. За последние 20 лет мы построили карты цунамиопасности для более чем 60-ти населенных пунктов на побережье Аляски.

Поскольку сеймотектоника Алеутской зоны субдукции и, соответственно, ее цунамигенность существенно отличаются на разных ее участках, мы строим потенциальные источники цунами, учитывая геофизические данные для каждого отдельного сегмента Алеутской дуги. Данные включают в себя результаты многолетнего GPS-мониторинга движения различных участков субдукционной плиты, геометрию зоны субдукции SLAB2, модифицированную на основании анализа гипоцентров землетрясений и других региональных данных, а также результаты исследований палеоцунами. Мы используем набор численных моделей, прошедших валидацию и верификацию в рамках программы NTHMP, для расчета затопления населенных пунктов волнами, вызванными землетрясениями, оползнями и обвалами. Расчеты проводятся на вложенных сетках, разрешение которых постепенно меняется от двух угловых минут в открытом океане до 15 метров в том районе, где считается накат. Для расчетов и визуализации было создано веб-приложение, при помощи которого можно запустить программу на суперкомпьютере университета Аляски и визуализировать промежуточные результаты во время счета. Для визуализации карт затопления существует отдельное веб-приложение [tsunami.alaska.edu](http://tsunami.alaska.edu), которое оптимизировано для сотовых телефонов.

Множество населенных пунктов на Аляске находятся близко к очагам потенциальных цунамигенных землетрясений, поэтому одной из важных компонент нашей деятельности является работа с населением в прибрежных районах. Мы информируем местных представителей МЧС об угрозе цунами, разъясняем им, как использовать карты цунамиопасности для определения зон эвакуации, выбора места для убежища и определения эффективных маршрутов эвакуации. Мы читаем образовательные лекции про цунами в школах, библиотеках и культурных центрах. Наша задача – сделать все возможное для того, чтобы у новых поколений, которые не помнят страшного цунами 1964 года, были все необходимые ресурсы и знания для того, чтобы выжить во время следующего катастрофического события.

4.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЯПОНСКОМ МОРЕ, ВЫЗВАННЫХ  
ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХААПАЙ 15.01.2022**

**А.И. Зайцев<sup>1</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>2</sup>, Г.И. Долгих<sup>3</sup>, С.Г. Долгих<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований  
ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

<sup>2</sup>*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

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

*aizaytsev@mail.ru*

15 января 2022 года случилось катастрофическое извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай на архипелаге Тонга, сопровождавшееся сильной взрывной волной, ощущавшейся на очень больших расстояниях от вулкана, а также вызвавшее волны цунами на ближайших островах и колебания уровня моря вдали от вулкана. Атмосферные возмущения, связанные с взрывным извержением вулкана, регистрировались во многих городах России и других стран. Наряду с колебаниями атмосферного давления имеются записи колебаний водной поверхности на российском побережье Тихого океана.

В данной работе представлен анализ возмущений на водной поверхности, обусловленных этим извержением, зафиксированных на российском побережье Японского моря. Выполнены расчеты генерации волн на воде атмосферными возмущениями в рамках двумерных уравнений нелинейно-дисперсионной теории с помощью программного комплекса НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE-P). Сделан сравнительный анализ результатов расчета и данных регистрации.

Демонстрируется, что возмущения атмосферного давления и колебания водной поверхности, связанные с извержением вулканов, оказались зарегистрированными на российском шельфе Японского моря, на расстоянии около 9000 км от архипелага Тонга. Рассчитанные колебания уровня моря, вызванные прохождением звуковой волны от взрыва, оказываются в согласии с данными наблюдений на станциях залива Посьета и Владивостока.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственных заданий СКБ САМИ ДВО РАН "Прибрежные риски, связанные с природными катастрофами с учетом инженерных и социально-экономических приложений" и ТОИ ДВО РАН "Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане", а также гранта РФФИ № 20-05-00162.

5.

**ГЛОБАЛЬНОЕ ЦУНАМИ, ВЫЗВАННОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ТОНГА В ЯНВАРЕ 2022 Г.**

**И.П. Медведев<sup>1</sup>, Я. Шепич<sup>2</sup>, И.В. Файн<sup>3</sup>, А.Б. Рабинович<sup>1,3</sup>, Р. Томсон<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

<sup>2</sup>*Факультет естественных наук, Сплитский университет, г. Сплит, Хорватия*

<sup>3</sup>*Институт наук об океане, г. Сидни, Британская Колумбия, Канада*

*patamates@gmail.com*

Извержение вулкана Тонга 15 января 2022 года вызвало волны цунами, которое наблюдалось во всем Мировом океане. Важной характеристикой цунами был механизм двойного воздействия. Волны цунами были образовались непосредственно в результате взрыва вулкана Хунга Тонга в тропической части Тихого океана и генерировались атмосферными волнами Лэмба, распространяющимися вокруг земного шара со скоростью звука (т.е. примерно в 1,5 раза быстрее, чем фазовая скорость длинных океанских волн). На основе анализа временных рядов нескольких сотен наблюдательных пунктов с высоким разрешением были построены глобальные карты океанических волн цунами и атмосферных волн Лэмба. В некоторых районах Тихого океана удалось разделить два типа движений и оценить их относительный вклад. Была построена глобальная численная модель волн цунами, результаты которой дали хорошее совпадение с наблюдениями. Глобальные карты также позволили нам определить региональные «горячие точки», где высоты волн цунами были наибольшими. Помимо районов в Тихом океане (Чили, Новая Зеландия, Япония, западное побережье США и Аляска/Алеутские острова), «горячие регионы» включали западное Средиземноморье и атлантическое побережье Европы и северной Африки.

6.

**ВОЗМУЩЕНИЯ ПРИДОННОГО ДАВЛЕНИЯ, ВЫЗВАННЫЕ ВЗРЫВОМ ВУЛКАНА ХУНГА ТОНГА-ХУНГА ХААПАН В ЯНВАРЕ 2022 Г**

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

<sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

<sup>2</sup>*Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской Академии наук, г. Южно-Сахалинск*

*pryadun.vv15@physics.msu.ru*

В тихоокеанском регионе 15 января 2022 года произошло мощное взрывное извержение вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай. Извержение сопровождалось формированием волн цунами, которые наблюдались по всему Тихому океану с высотами до 15 м в ближней зоне и свыше 3 м в дальней зоне. В дальней зоне за образование цунами была ответственна атмосферная волна Лэмба, вызванная вулканическим взрывом [1, 2].

Последствия взрывного извержения были зарегистрированы множеством геофизических датчиков, в том числе датчиками давления, расположенными на дне океана (цунамиметрами). Основная цель настоящей работы – исследовать проявление

вулканического взрыва по данным донных датчиков давления DART, расположенных в акватории Тихого океана. Проявления волны Лэмба двойки: прямое проявление атмосферной волны в вариациях придонного давления и проявление свободных волн гравитационных волн (цунами), сформированных волной Лэмба в океане. Разграничение этих двух эффектов важно для решения прогностических задач. Разделение по частотам, как это делается при анализе записей сейсмогенных цунами, в данном случае невозможно в связи с близкими значениями частот.

По данным наземных барографов были изучены проявления волн Лэмба. Скорость волны Лэмба составила  $312 \pm 4$  м/с, также было определено время в источнике, составившее  $04 : 27$  UTC  $\pm 4$  мин с интервалом вероятности 95 %. Время прохождения волны Лэмба в точности соответствует отчетливо различимому всплеску придонного давления, присутствующему на данных глубоководных станций уровня моря DART. Было проведено сопоставление колебаний давления, зарегистрированных с помощью барографов и станций DART, которое продемонстрировало идентичность волновых форм (в т.ч. оказались близкими и амплитуды сигналов) на протяжении первых 30 минут с момента вступления волны Лэмба. После этого времени датчики давления начинают регистрировать волны цунами, вызванные волной Лэмба. Вариации придонного давления были представлены с учетом теоретически рассчитанного корректирующего множителя, что подтвердило правильность представленного в работе теоретического анализа линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления, бегущие вдоль свободной поверхности воды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 22-27-00415, <https://rscf.ru/project/22-27-00415/>.

Литература:

- [1] Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прядун В.В. Вулканогенное цунами 15.01.2022 по данным глубоководных станций DART // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2022. — doi: 10.31857/S2686739722601004 (в печати)
- [2] Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption //Science. – 2022. – С. eabo4364.

## 7.

### ТОНГА 2022: ЦУНАМИ В ОКРАИННЫХ МОРЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

**Е.С. Цуканова<sup>1</sup>, А.Ю. Медведева<sup>1,2</sup>, И.П. Медведев<sup>1</sup>, А.Б. Рабинович<sup>1</sup>, Т.Н. Ивельская<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

<sup>3</sup>Служба предупреждения о цунами. г. Южно-Сахалинск

*tsukanovaelizaveta@gmail.com*

Извержение вулкана Хунга-Тонга, произошедшее 15 января 2022 г., вызвало цунами, затронувшее весь Тихий океан. Наблюдаемое цунами имело смешанный механизм возникновения: было вызвано как волной, пришедшей из района очага, так и атмосферной волной (волной Лэмба), распространяющейся со скоростью звука. Волны цунами были зафиксированы в окраинных морях северо-западной части Тихого океана, включая Японское, Охотское и Берингово моря, в частности у берегов Камчатки,

Курильских и Алеутских островов. Выполнен анализ измерений колебаний уровня моря на 50 мареографах и флуктуаций атмосферного давления на 15 метеостанциях в данном регионе за период с 14 по 17 января 2022 г. На российском побережье самая высокая волна с высотой 1.4 м была зафиксирована на станции Водопадная (на юго-востоке полуострова Камчатка); на побережье Алеутских островов волны цунами достигали высоты 2 м. На основе численного моделирования оценено время прихода гравитационных волн цунами от источника, но на большинстве станций характер колебаний изменился до прихода этих волн. Анализ данных об уровне моря и атмосферных данных показал, что эти колебания, вероятно, вызваны влиянием атмосферных волн в результате извержения вулкана Хунга-Тонга.

## 8.

### **О ВЛИЯНИИ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ ЛОКАЛИЗОВАННОГО В УПРУГОМ ОСНОВАНИИ ИСТОЧНИКА НА ПРОФИЛИ ПОРОЖДАЕМЫХ ИМ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ**

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

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

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

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, г. Москва*

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

Ранее [1,2] в рамках модели основанной на исследовании совместной упруго-гидродинамической модели (модели Подъяпольского) нами были построены эффективные асимптотические формулы, позволяющие описать гравитационные волны на поверхности слоя жидкости, возбуждаемых источником, расположенном в упругом основании. Эти формулы позволяют, в частности, достаточно явно проанализировать зависимость превышения свободной поверхности от различных параметров источника. В предыдущих публикациях и докладах мы обсуждали зависимость профиля источника при действии подземного источника только в вертикальном направлении. В этом докладе мы анализируем профили волн и их диаграммы направленностей в случае, когда вектор направления действия источника не вертикальный.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 21-11-00341.

Библиография.

[1] С.Ю. Доброхотов, Х.Х. Ильясов, О.Л.Толстова, Простые решения линейной задачи о возбуждении длинных волн на поверхности жидкости источником в упругом основании, Известия РАН, Механика твердого тела, 2020, N 4, С. 126–139.

[2] С.Ю. Доброхотов, Х.Х. Ильясов, О.Л.Толстова, Линейные волны на поверхности жидкости, порожденные локализованными во времени и пространстве источниками в упругом основании, Известия РАН, Механика жидкости и газа, 2022, N 3, с. 88–101.

9.

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЛН ЦУНАМИ НА ЗАЯКОРЕННЫЕ ПОЛУПОГРУЖЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ МОДЕЛЬНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ДНА И ДНИЩА КОНСТРУКЦИИ**

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

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий*

<sup>2</sup> *Новосибирский государственный университет  
г. Новосибирск*

*gusev\_oleg\_igor@mail.ru*

Исследуется задача о взаимодействии длинных поверхностных волн с фиксированными полупогруженными в воду телами. Актуальность задачи связана с возможным воздействием волн цунами, которое необходимо учитывать при проектировании плавучих высокотехнологичных объектов, таких как хранилища сжиженного природного газа, атомные электростанции и т.п., при их размещении в цунамиопасных прибрежных зонах. Задача решается в одномерном приближении в рамках иерархии моделей волновой гидродинамики, которая включает в себя модель потенциальных течений жидкости, нелинейно-дисперсионную модель Серре-Грина-Нагди и классическую бездисперсионную модель. Разработанные численные алгоритмы для моделей мелкой воды основаны на разбиении расчётной области на две подобласти по границе тела и использовании на ней условий сопряжения [1], что позволяет связывать искомые волновые характеристики слева и справа от тела. Валидация моделей выполнена при помощи сравнений полученных численных решений с экспериментальными данными [2].

Исследована зависимость характеристик взаимодействия длинных волн с полупогруженным телом (амплитуды отражённой и прошедшей волны, заплеск на тело, горизонтальная и вертикальная составляющие волновой силы) от таких параметров задачи, как амплитуда и длина набегающей волны, заглубление и длина тела, форма и положение донного препятствия. В рамках бездисперсионной модели рассмотрена задача о воздействии волн с вертикальным передним фронтом, получены формулы для оценки горизонтальной и вертикальной составляющей волновой силы. Показано, что форма подходящей волны является критически важной характеристикой при оценке силового воздействия.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00127).*

[1] *Khakimzyanov G.S., Dutykh D. Long wave interaction with a partially immersed body. Part I: Mathematical models // Communications in Computational Physics. 2020. V. 27. N. 2. P. 321-378.*

[2] *Lu X., Wang K.-H. Modeling a solitary wave interaction with a fixed floating body using an integrated analytical-numerical approach // Ocean Engineering. 2015. V. 109. P. 691-704.*

10.

**СИЛЬНО НЕЛИНЕЙНОЕ ДИПОЛЬНОЕ ЦУНАМИ, БЕГУЩЕЕ ПО ШЕЛЬФУ**

**С.А. Арсеньев<sup>1</sup>, Л.В. Эппельбаум<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>*Тель Авивский университет, факультет точных наук, г. Тель Авив, Израиль*

*Arrsenyev@yandex.ru*

Задача расчета и прогноза цунами решается в настоящее время интегрированием уравнений теории морских волн. Их особенностью является нелинейность, которая исключает единственность решения и выполнение принципа суперпозиции. Решений может быть много в зависимости от различных внешних условий. Среди решений могут быть и нетривиальные. В настоящей работе мы получили необычное решение в виде дипольного цунами, состоящее из двух волновых пиков разного знака, которые бегут по шельфу с одинаковой скоростью, причем возвышение уровня граничит с его понижением. Исходным является волновое уравнение с квадратичной нелинейностью, описывающей сильное придонное трение. В работе исследовано это необычное теоретическое решение. Может ли оно реализоваться в природе? Необходим поиск подходящих данных наблюдений или постановка специальных лабораторных экспериментов.

11.

**СЕЙШИ В ЗАМКНУТЫХ ВОДОЕМАХ, ИНИЦИИРУЕМЫЕ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ**

**Д.Н. Валеева, М.А. Носов**

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

*dilaravn@mail.ru*

Работа посвящена моделированию стоячих волн в замкнутых водоемах под воздействием сейсмических движений грунта. В ряде случаев такие волны могут иметь значительные амплитуды, представляющие опасность для человеческой деятельности. Имеются многочисленные описания и видеосвидетельства волн с амплитудой более метра в плавательных бассейнах, расположенных недалеко от эпицентра землетрясения. Примечательно, что аналогичные явления могут происходить и за много тысяч километров от сейсмического источника: во время катастрофического землетрясения 2011 года в Японии в норвежских фьордах возникли колебания уровня с амплитудой до 2 м [1].

Основными целями работы являются: разработка численной модели колебаний водных масс в закрытых водоёмах на основе уравнений теории мелкой воды под воздействием сейсмических колебаний, численное воспроизведение сейшевых колебаний с использованием реальных сейсмических записей.

В основу численной модели положена расчетная схема сквозного счета на сетке Аракавы. Показано, что при слабых (по сравнению с ускорением свободного падения) вертикальных сейсмических движениях сейшевые колебания в водоемах малых размеров формируются преимущественно за счет горизонтальных ускорений дна, а вертикальные ускорения играют пренебрежимо малую роль. Резонансный отклик

водоемов на реальные сейсмические колебания рассмотрен на примере модельных водоемов с простой геометрией (прямоугольной и круговой). Установлено, что амплитуда сейшевых колебаний растет с увеличением глубины водоема. Выполнено численное моделирование сейшевых колебаний в естественных водоемах с учетом реальной батиметрии и с использованием акселерограмм, полученных для двух сейсмических событий (Землетрясение Тохоку 2011 и Охотоморское глубоководное землетрясение 2013 года). Показано, что данные землетрясения могли инициировать сейши заметных амплитуд даже на больших расстояниях от эпицентра. В частности, в озере Смердячье (Шатурский район Московской области, характерный диаметр – 300м, максимальная глубина – 30м) Охотоморское землетрясение должно было вызвать колебания уровня с амплитудой порядка нескольких сантиметров, а в аналогичном ему по батиметрии озере на расстоянии 450км от эпицентра землетрясения Тохоку сейшевые волны могли бы достигать высот более метра.

[1] Bondevik, S., B. Gjevik, and M. B. Sørensen (2013), Norwegian seiches from the giant 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3374–3378, doi:10.1002/grl.50639.

## 12.

### **ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ЦУНАМИАКТИВНОСТИ: ПОДХОД НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ДАННЫХ**

**В.М. Кайстренко**

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

*vict-k@mail.ru*

Крупные цунами — опасные и непредсказуемые явления. Их опасность необходимо оценивать даже в тех частях океана, где они встречаются редко, поскольку возможны крупные разрушения и человеческие жертвы. Для оценки повторяемости и опасности цунами, как и других опасных явлений, используется вероятностный подход. Неполнота и/или недостаточность исторических данных о цунами для большинства цунамиопасных побережий вынуждает использовать дополнительные сейсмические данные для оценки цунамиопасности, поскольку около 80 % цунами были вызваны землетрясениями. И только для некоторых побережий, таких как Северо-восточное побережье Японии, или Южные Курильские острова, с надежными рядами натуральных данных о проявлениях исторических цунами, удается построить достаточно адекватную вероятностную модель для описания цунамиактивности и, соответственно, цунамиопасности. Привлечение многочисленных и надежных данных о цунамигенных землетрясениях восполняют недостаточность прямых натуральных данных об исторических цунами для большинства цунамиопасных побережий. Схематически этот подход начинается с анализа тектонических условий и построения модели сейсмичности для рассматриваемой цунамигенной зоны. Следующим шагом является создание синтетического каталога землетрясений очаговой зоны на заданный интервал времени. Затем для каждого источника в синтетическом каталоге численно моделируется распространение цунами. Наконец, частота возникновения/вероятность превышения заданной максимальной высоты заплеска (или другого показателя интенсивности цунами) оценивается в данном прибрежном месте.

Этот метод оперирует многими параметрами пространственно-временного распределения землетрясений и моделей очагов (и др.), что приводит к необходимости

оценки неопределенности этих параметров. Иными словами, при таком походе в модель привлекается ряд серьезных и до конца не решенных проблем самой сейсмологии, таких, как статистическое описание повторяемости потенциально цунамигенных землетрясений с магнитудой  $M > 8$ . Не менее серьезными проблемами являются адекватное описание структуры очага таких землетрясений, и закономерности их пространственного распределения. Именно такой достаточно сложный подход позволил построить карты цунамиопасности для многих побережий Тихого океана, но не дал возможности оценить точность получаемых параметров.

Альтернативный подход основан на анализе функции повторяемости цунами, которая для каждого пункта побережья содержит два масштабных параметра: асимптотическую частоту  $f$  сильных цунами и характерную высоту цунами  $H^*$  для всех рассматриваемых мест. Исследование зависимости параметров  $f$  и  $H^*$  от периода наблюдения показало, что для получения параметров цунамиактивности  $f$  и  $H^*$  с приемлемой точностью около 10 % нужны полные ряды высот цунами в заданном месте длительностью не менее 250 лет, и, соответственно, примерно 5 % точность может быть получена при использовании рядов данных порядка 500 лет. Эти оценки иллюстрируют проблему, связанную с исходными данными.

### 13.

## ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ НА КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВАХ

**Ю.П. Королёв**

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

*Yu\_P\_K@mail.ru*

В текущем году исполняется 70 лет со дня катастрофического цунами 1952 г. За прошедшие годы достигнут определенный прогресс в деле предотвращения, снижения катастрофических последствий такого рода событий: отлажена система оповещения о цунами на Курильских островах, построены карты цунамирайонирования побережья, жилые застройки выведены из зоны возможного затопления. Вместе с тем оперативный прогноз и объявление тревоги цунами все еще основываются на магнитудно-географическом критерии, разработанном около 50 лет назад. Принятие решения об объявлении тревоги цунами на Курильских островах в настоящее время базируется на данных о магнитуде произошедшего землетрясения, а также предупреждениях, выпущенных Тихоокеанским центром предупреждения о цунами, Японским метеорологическим агентством, опирающихся, по сути, на тот же магнитудный критерий. За последние 16 лет в районе глубоководной Курило-Камчатской впадины произошло несколько довольно сильных землетрясений. На Курильских островах объявлялись тревоги цунами в большинстве событий во всех населенных пунктах. При этом высоты волн в населенных пунктах были незначительными, не представлявшими опасности.

В докладе В. Титова «Можно ли полностью избежать жертв от цунами?» (2021) даны оценки эффективности современных служб цунами. Почти все они опираются на оценку параметров землетрясений. По мнению В. Титова, ложные тревоги и пропущенные предупреждения до сих пор являются большой проблемой. US NOAA TWS является единственной системой прогноза цунами с оперативной оценкой заплеска, основанной на измерениях цунами, а не только параметров землетрясения.

Действующий способ NOAA для населенных пунктов Курильских островов не применим.

Экспресс-метод оперативного прогноза цунами позволяет по данным о координатах эпицентра землетрясения и о цунами в открытом океане рассчитывать форму ожидаемого цунами в заданных точках вблизи побережья в режиме реального времени.

Экспресс-методом выполнены расчеты (ретроспективный прогноз) для событий 2006 – 2009 гг. (Симуширские цунами), 2020 г. (Онекотанское цунами) и 2011 г. (Тохоку цунами). Показано, что прогноз цунами вблизи населенных пунктов Курильских островов возможен с качеством и с заблаговременностью, достаточными для принятия решения об объявлении тревоги. Следует отметить, что для островов в непосредственной близости к очагам, время пробега цунами до которых менее 20 – 25 мин., экспресс-метод, как и любые гидрофизические способы, не применим.

В силу отсутствия уровенных данных моделирование процесса оперативного прогноза цунами 1952 г. невозможно. Тем не менее, на основе кинематических расчетов показано, что при возникновении землетрясения, подобного землетрясению 1952 г., прогноз по данным, например, станций DART 21416 или DART 21402 возможен, но с недостаточной заблаговременностью: менее 20 мин. При наличии уровенных станций, расположенных ближе к Курило-Камчатской впадине, заблаговременность прогноза может быть увеличена до 30 мин.

#### 14.

### ЦУНАМИ НА О.САХАЛИН ОТ ОПОЛЗНЯ В КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЕ

**Р.Е. Мазова<sup>1,2</sup>, Д.А. Окунев<sup>1</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>*Институт Океанологии РАН, г. Москва*

*raissamazova@yandex.ru*

В работе рассматривается оползневой процесс на западном склоне Курильской котловины, на основании данных батиметрической и сейсмической съемок, приведенных в работе [1]. Данные работы [1], дали возможность выбрать для моделирования два участка склона, которые могут подвергнуться оползанию: около восточной (мыс Терпения) и юго-восточной (мыс Анива) частей острова Сахалин. Проанализированы высоты волн на восточном побережье острова Сахалин, наиболее подверженном воздействиям волн цунами при рассматриваемых вариантах реализации оползневых процессов на западном склоне Курильской котловины. Движение оползня моделируется как движение твердого тела, разбитого на ряд сегментарных блоков (рис. 1). Кинематика движения блоков определяется схематическим поведением движения оползня при реализации расчета по упруго-пластической модели: сползание верхней части оползневого слоя с одновременным нарастанием толщины нижней части склона [2]. Для реализации данного моделирования, оползневое тело представляется четырьмя блоками, расположенными вдоль склона. При этом два верхних блока последовательно смещаются вниз, с одновременным последовательным движением двух нижних блоков вверх.

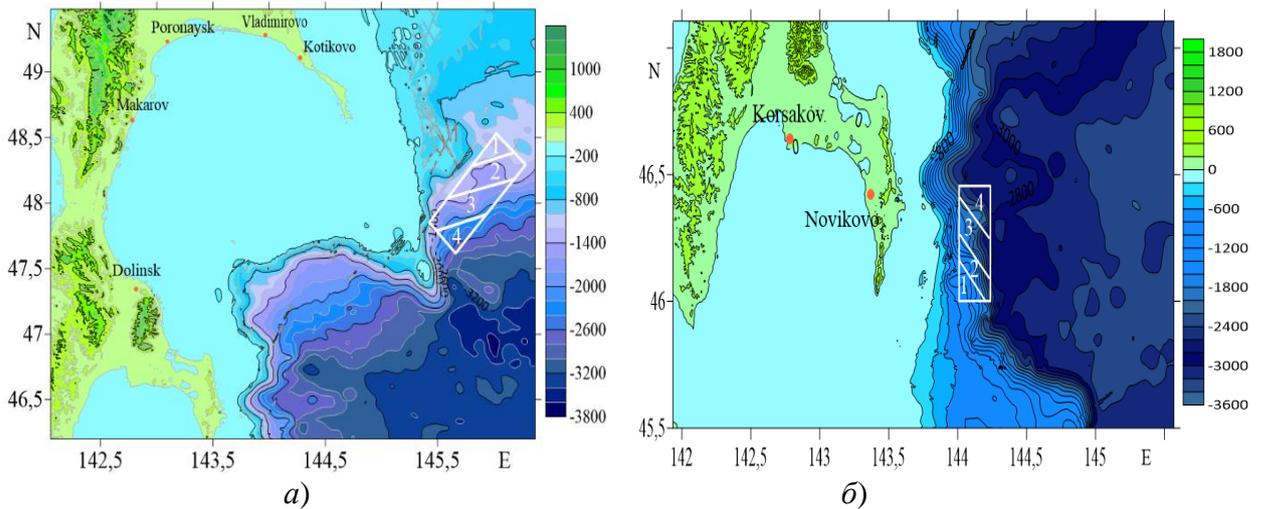


Рис. 1. Положение очага оползневых цунами:  
а – первый очаг, б – второй очаг

Рассчитаны волновые характеристики волн цунами, генерируемых подводными оползнями. 2D и 3D гистограммы распределения высот волн построены на 5-ти метровой изобаты вдоль восточного побережья вдоль о. Сахалин.

1. Баранов Б.В., Прокудин В.Г., Джин Я.-К., Дозорова К.А., Руковишникова Д.Д. Подводные оползни на западном склоне Курильской котловине Охотского моря // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 452–462.
2. Lobkovsky L.I., Papadopoulos G.A., Garagash I.A., Kozyrev O.R., Mazova R.Kh. Numerical Modeling of Sediment Mass Sliding and Tsunami Generation: The Case of February 7, 1963, in Corinth Gulf, Greece // Marine Geodesy. 2015. V. 3. No. 4. P. 315-331.

## 15. РОЛЬ СИЛЫ РАДИАЦИОННОГО ТРЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОПОЛЗНЕВОГО ТЕЛА

**М. В. Лебков<sup>1</sup>, М. А. Носов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши*

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

*lebkov.mv19@physics.msu.ru*

Несмотря на то, что в основном цунами происходят из-за землетрясений, оползневые процессы также могут давать значительный, а в ряде случаев преобладающий, вклад в энергию цунами. Оползни делятся на субаэральные и подводные. С оползнями первого типа связаны рекордные высоты заплесков (Литуйя, 1958; Буряя, 2018 и др.). Подводные оползневые процессы в качестве «генератора» цунами представляют не меньшую опасность. Настоящее исследование посвящено выявлению закономерностей движения подводного оползневого тела.

При движении оползневого тела под водой часть его потенциальной энергии тратится на возбуждение гравитационных поверхностных волн. Эти затраты энергии

проявляются как сила радиационного (волнового) трения, которая тормозит оползневое тело. Основная цель настоящей работы состоит в получении аналитических формул, описывающих как энергию волн, возбуждаемых в водном слое, так и силу радиационного трения. Второй целью является оценка значимости силы радиационного трения в динамике движения оползневого тела.

Вначале рассматривается одномерное движение прямоугольного блока по ровному горизонтальному дну. В рамках линейной теории длинных волн выводятся формулы, описывающие кинетическую и потенциальную энергии волн, сформированных в водном слое движением блока. По зависимости полной энергии от времени рассчитывается мощность силы радиационного трения и значение самой силы. На втором этапе с использованием численных методов делается оценка применимости полученных аналитических формул для тел иной формы и для случая наклонного дна. Проводится оценка значимости силы радиационного трения по сравнению с другими силами, тормозящими движение оползня (турбулентное и «сухое» трение).

## 16.

### **ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С СУБДУКЦИОННЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ НА О. ИТУРУП**

**Т.К. Пинегина<sup>1</sup>, Н.Г. Разжигаева<sup>2</sup>, А.В. Дегтерев<sup>3</sup>, А.Л. Хомчановский<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

<sup>2</sup>*Тихоокеанский институт географии, г. Владивосток*

<sup>3</sup>*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

*pinegtk@yandex.ru*

В июле-августе 2022 г. в рамках проекта РНФ были проведены первые работы на о. Итуруп по поиску и изучению геологических следов вертикальных косейсмических деформаций острова, связанных с сильными землетрясениями в районе Курило-Камчатской зоны субдукции.

Остров Итуруп расположен на расстоянии около 200 км от глубоководного Курило-Камчатского желоба, глубина сейсмофокальной зоны (слэб) составляет около 50 км под самым восточным участком побережья, и примерно 70 км под западным. Такая же глубина слэба характерна для наиболее удаленного от желоба побережья Авачинского залива (восточная Камчатка), где ранее нами были идентифицированы следы трех сильных землетрясений, сопровождавшихся косейсмическими опусканиями с амплитудами от первых десятков сантиметров до полутора метров (Pinegina et al., 2020).

Для поисков геологических следов косейсмических опусканий необходимы низкие аккумулятивные побережья, так как они способны реагировать даже на незначительные изменения относительного уровня моря. На восточном берегу о. Итуруп, такие перспективные для изучения участки побережий отсутствуют. На западном побережье острова, рядом с заливом Доброе начало, расположено озеро Доброе, на берегах которого сформировано несколько серий береговых валов. В настоящее время озеро пресное, из него в Охотское море вытекает протока. Судя по результатам дешифрирования космоснимков, уровень озера (и протоки) могли периодически меняться в результате резких вертикальных косейсмических опусканий и последующих поднятий в межсейсмический интервал. Колебания уровня воды могут запечатлеваться в

геологическом строении аккумулятивной озерной террасы. Поэтому побережье данного озера было выбрано в качестве объекта палеосейсмологических исследований.

Во время экспедиции мы провели замеры высот береговых валов, шурфовочные и буровые работы с описанием разрезов и кернов, отбором вулканических пеплов и озерных песков. Было выявлено несколько этапов косейсмических опусканий земной поверхности, в результате чего более древние береговые валы оказались ниже современных. По-видимому, наиболее молодое опускание связано с недавним, историческим сейсмическим событием (возможно 1958 г.), так как в районе озера Доброе произрастал высокий пихтовый лес, который в настоящее время погиб от переувлажнения корневой системы в результате опускания. После получения данных радиоуглеродного анализа из отобранных образцов органики, можно будет оценить повторяемость в голоцене сильнейших землетрясений в районе южных Курил, что необходимо для долгосрочного прогноза.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00049, <https://rscf.ru/project/21-17-00049>, руководитель – Е.И. Гордеев.

## 17.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ЦУНАМИГЕННЫХ И ШТОРМОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Д.С. Выдрин<sup>1</sup>, Т.К. Пинегина<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

<sup>2</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

<sup>3</sup>*Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта, г. Москва*

*dan.vidrin@yandex.ru*

Минералогический состав рыхлых отложений – источник важной геоморфологической и палеогеографической информации. С помощью комплексного минералогического анализа возможно определение гидродинамической обстановки осадконакопления, установление терригенно-минералогической питающей провинции и распознавание фациально-генетической принадлежности отложений. Проанализированы осадки цунами 3(4) февраля 1923 года, современные и погребенные штормовые отложения, отобранные в ходе полевых работ 2019 г. на ключевом участке бухты Моржовой, восточное побережье Камчатки. Определен выход тяжелой подфракции ( $>2,84$  г/см<sup>3</sup>), а также основные минеральные ассоциации в искомым образцах. Основными минералами являются: кварц, плагиоклаз, роговая обманка, магнетит, с небольшой примесью клинопироксена, хлорита и слюды. Выявлено меньшее содержание тяжелых минералов в отложениях цунами по сравнению с прибрежно-морскими осадками. По-видимому, это связано с импульсным, кратковременным характером воздействия потока цунами, меньшей сепарацией обломочного материала, в отличие от штормовых волн.

18.  
**ПРОЯВЛЕНИЕ ПАЛЕОЦУНАМИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ ЗАКРЫТЫХ БУХТ  
ОСТРОВА ШИКОТАН**

**Н.Г. Разжигаева<sup>1</sup>, Л.А. Ганзей<sup>1</sup>, Т.А. Гребенникова<sup>1</sup>, В.М. Кайстренко<sup>2</sup>, А.А.  
Харламов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток*

<sup>2</sup>*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

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

*nadyar@tigdvo.ru*

Изучение проявления сильных палеоцунами в закрытых бухтах о. Шикотан имеет несколько аспектов: 1) в вершинах бухт расположены протяженные болотные массивы, которые являются природными архивами, фиксирующими подробные летописи событий; 2) практически все закрытые бухты расположены со стороны Южно-Курильского пролива и геологическая запись здесь включает информацию о наиболее крупных цунами; 3) осадконакопление во время цунами на побережье таких акваторий имеет свою специфику, которая мало изучена; 4) побережье таких бухт наиболее заселено и поэтому информация по проявлению цунами в прошлом наиболее важно для оценки цунамиопасности побережья. Целью является анализ распределения цунамигенных отложений в разрезах торфяников береговых низменностей, восстановление вертикальных и горизонтальных заплесков, определение хронологии событий и их повторяемости в среднем–позднем голоцене. Работы проводились на побережье бух. Малокурильская, Отрадная и Крабовая, а также бух. Дельфин и на тихоокеанской стороне острова – Малая Церковная. При идентификации цунамигенных отложений использовались общепринятые критерии, изучалась структура отложений, состав диатомовых водорослей, возраст определялся на основе радиоуглеродного датирования вмещающего торфа и данных тефростратиграфии.

Исследования отложений палеоцунами дало возможность продлить временные ряды сильных событий до 7.5 тыс. лет. В отложениях палеоозера бух. Малокурильская найдены отложения 2 исторических и 13 палеоцунами. Повторяемость событий составляет 1 раз в тысячу лет за последние 2 тыс. кал. лет, что реже, чем на тихоокеанской стороне острова. Сильные цунами были более частыми (9 событий) в период 2–5.1 тыс. л.н., повторяемость их была выше – 1 раз в 180–500 лет, а в отдельных случаях – через 90 лет. Особенно сильными были цунами, произошедшие ~3.5 и 3.8–3.9 тыс. л.н., зоны затопления превышали 330 м; возможно, во время первого в соседней бух. Хромова был сейсмогенный оползень; второе вызвало наиболее интенсивную эрозию дна и бортов бухты. В среднем голоцене (5.1–7.5 тыс. л. н.) повторяемость сильных цунами снизилась: 1 событие в 0.8–1 тыс. лет.

Изучение распределения осадков Тохоку цунами в бух. Отрадная и Крабовая показало, что даже при небольших заплесках здесь образуются протяженные покровы илов, которые активно зарастают и хорошо сохраняются в разрезах, поэтому летопись палеоцунами здесь более подробная. Торфяники побережья содержат следы и не крупных позднеголоценовых цунами. В разрезах торфяников обнаружено до 9 прослоев илов (до 8 см) и заиленных песков (до 20 см), которые прослеживаются >500 м от береговой линии. Структура илов древних цунами подобен осадкам Тохоку цунами, что свидетельствует о сходстве хода эрозионно-аккумулятивных процессов. Прослеживается тенденция уменьшения содержания пелита и увеличение доли алевролита от древних к молодым осадкам. В отложениях встречено до 38 морских видов диатомей (12.4–66.7%),

привнесенных со дна бухты, пресноводные формы свидетельствует об эрозии и переотложении материала из разных источников на берегу.

Геологические материалы показывают, что палеособытия были более интенсивными, хотя и более редкими, чем известные исторические цунами.

## 19.

### ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПО ДАННЫМ ГНСС С ВЫСОКОЙ ЧАСТОТОЙ РЕГИСТРАЦИИ

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

<sup>1</sup>*ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск*

<sup>2</sup>*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,  
г. Москва*

<sup>3</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

*sdelnikova@gsras.ru*

Методы космической геодезии, основанные на Глобальных Навигационных Спутниковых Системах (ГНСС), широко применяются для решения задач раннего предупреждения о цунами. Данные ГНСС, получаемые в режиме реального времени, могут использоваться для оперативной оценки параметров сильнейших подводных землетрясений, а также для построения распределения начального смещения морского дна с целью моделирования распространения волны цунами и оценки цунамиопасности возникшего события. Для задач раннего оповещения о цунами оперативность получения такой информации имеет критически важное значение. В данной работе по данным ГНСС Японской сети с высокой частотой регистрации получена оценка минимально необходимого времени для расчета сейсмических смещений вследствие землетрясения Тохоку 2011 года  $M_w=9.1$  с точностью порядка нескольких сантиметров. Оценки времени по данным с 30-ти секундным интервалом регистрации составили от 3 до 7 минут в зависимости от расстояния до очага. При повышении частоты регистрации ГНСС измерений до 1 секунды позволяет сократить время оценки величины сейсмических смещений на 1-3 минуты.

## 20.

### СТАЦИОНАРНЫЕ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ БУИ И ПРОБЛЕМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ЦУНАМИ

**Д.Г. Левченко<sup>1</sup>, В.Д. Левченко<sup>2</sup>,**

<sup>1</sup>*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

<sup>2</sup>*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва*

*levch35@mail.ru*

В настоящее время в основном используются два принципиально различных метода (и соответствующие им технологии) для обнаружения волн цунами –

специальные исследования сейсмических сигналов от землетрясений с целью оценки их цунамигенности и непосредственное измерение уровня океана донными станциями. Эти методы в определенной степени дополняют друг друга, но, к сожалению, пока не обеспечивают решения проблемы раннего обнаружения всех видов цунами и защиты прибрежных районов от его разрушительного воздействия.

В соответствие с первым методом для принятия решения об объявлении тревоги цунами руководствуются «магнитудно-географическим» критерием. Решение принимают, если магнитуда сейсмического события превышает некоторое пороговое значение для данного региона. Поскольку сейсмографы обычно находятся на суше в значительном удалении от очага землетрясения, регистрация сейсмических сигналов происходит с большими искажениями. Искажения связаны с неоднородностями земной коры и верхней мантии, с особенностями распространения сейсмоакустических сигналов в океанических волноводах и на границе океан – континент. Сильная зависимость параметров цунами от механизма очага землетрясения и его глубины, от глубины океана и тектонических особенностей региона делает этот критерий недостаточно надежным.

Из систем, измеряющих уровень океана, наиболее известны DART (США), PMEL NEPTUN и др. Основные недостатки таких систем состоят в значительной инерционности принятия решений и относительно большой стоимости эксплуатации в связи с автономностью питания и необходимостью периодической замены как донных, так и надводных элементов (через 1 – 2 года). Время принятия решений здесь складывается из времени добегающей волны цунами в район расположения измерительной системы и времени выделения характерного сигнала из помех. Эти системы в принципе глубоководные, поэтому устанавливаются на расстояниях около 200 – 1000 км от берега и, из экономических соображений, примерно на таких же расстояниях друг от друга. Сильные цунамигенные землетрясения чаще всего происходят в зонах субдукции, т.е. в относительной близости к берегу. Поэтому время обнаружения для локальных и части региональных цунами оказывается в ряде случаев недостаточным для принятия решений. Предлагается с целью раннего обнаружения цунами совмещать измерители уровня океана и донные сейсмографы, располагая их в непосредственной близости к зонам субдукции, оснащать сейсмографы кроме широкополосных сейсмоприемников, датчиками сильных движений и низкочастотными гидрофонами. В качестве несущей платформы использовать стационарные стабилизированные буи. Такие буи мало подвержены воздействию ветра и волн, не вращаются, что позволяет соединять их кабелями с донной аппаратурой, имеют большую массу (до 100 т), поэтому могут быть оснащены длительными источниками питания (волновыми, ветровыми и солнечными генераторами), качественными метеостанциями, измерителями течений и другой аппаратурой, надежными системами спутниковой связи. Подобные исследовательские буи для разных целей периодически разрабатывались и использовались в ряде стран (США, Франции, России). Ресурс такого буя может составлять до 10 – 20 лет. Стоимость в основном определяется оснасткой.

В работе с целью обоснования предлагаемой системы проводится динамическое численное моделирование возбуждения и распространения связанных с цунами акустогравитационных и сейсмоакустических волновых полей в океаническом волноводе со слоистым упругим дном, на границе океан-континент и частично на континенте. Математической основой модели являются модифицированные уравнения Эйлера для описания слоя океана как сжимаемой жидкости и согласованные с ними уравнения упругости для описания океанического дна, состоящего из слоя осадков, участков морской и континентальной коры и верхней мантии.

Источником акустогравитационных волн является подвижка дна океана во время землетрясения. В качестве граничных условий для уравнений Эйлера используются условия непротекания на дне океана и свободной границы на его поверхности. Для уравнений упругости задаются неотражающие граничные условия на виртуальной

границе модельной области в толще Земли и отражения на поверхности. Система наблюдения включает донные и/или материковые сейсмографы и датчики давления в составе морской измерительной системы.

В работе применяются быстродействующие Локально-рекурсивные нелокально-асинхронные параллельные алгоритмы, разработанные в Институте прикладной математики РАН, и адаптированные для моделирования геофизических полей. Для расчетов использована высокопроизводительная вычислительная система, включающая графические ускорители.

Рассматриваются, также, специфические помехи при работе донных сейсмографов: от придонных течений, штормовых микросейсм и др. Описывается ряд конструкций стабилизированных буев.

## 21.

### **ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ИНВЕРСИИ ЦУНАМИ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЯ 6 ФЕВРАЛЯ 2013 ГОДА ВБЛИЗИ СОЛОМОНОВЫХ ОСТРОВОВ**

**Т.А. Воронина**

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

*tanvor@bk.ru*

Эффективная система наблюдения необходима для создания точного прогноза цунами.

Применение метода усеченного сингулярного разложения (метод  $g$ -решения) для инверсии волн цунами, порожденных землетрясением вблизи Соломоновых островов 6 февраля 2013 года, и зарегистрированных системой наблюдения, состоящей из буев DART: 55012, 55023, 52403, 52402, 52406, 51425, позволило выделить наиболее информативную часть этой системы наблюдения, оценивая доли удельной энергии волны в локации каждого буя. Предлагаемый метод, основанный на обращении удаленных записей колебаний поверхности океана, подавляет неустойчивость численного решения, обусловленную некорректностью задачи. Данные наиболее информативных датчиков позволяют не только более точно восстановить первоначальную форму волны цунами, но и одновременно, без новых расчетов распространения волны от восстановленного источника, получить высоты морской поверхности в пунктах, где не было наблюдения («фиктивные» станции), но которые использовались в расчетах матрицы системы. Оценивая доли удельной энергии, порожденные каждой модой, можно быстро и уверенно определить один из основных параметров инверсии – число  $g$ , что оказалось гораздо эффективнее, чем анализ сингулярного спектра. В итоге, осуществление предлагаемого подхода представляется следующим образом:

(1). Цунамигенная зона (сейсмического разлома, субдукции) покрывается набором областей поиска, и для каждой из них заранее насчитывается матрица  $A$ , состоящая из откликов на пространственные гармоники (используемые в качестве источников) в серии датчиков, включающих как реально существующие станции, так и «фиктивные» (где хотелось бы быстро получить высоты волны). Для каждой области поиска можно заранее определить набор наиболее информативных буев. Локации датчиков, оказавшихся

наиболее информативными для нескольких зон поиска, нужно считать наиболее перспективными для построения системы раннего предупреждения о цунами.

(2). Эпицентр землетрясения быстро определяется по сейсмическим данным. Тогда становится понятно, какую из областей поиска надо выбрать для произошедшего события и какие из данных, записанных глубоководными датчиками, следует взять в качестве наиболее информативных для этой области поиска. Результатом инверсии для таких данных будет не только начальная форма волны цунами, но и возможность быстро вычислить колебания водной поверхности в точках расположения «фиктивных» станций, так как решение прямой задачи для них уже произведено при расчете матрицы  $A$ .

Применение этой методики продемонстрировано на примере цунами на Соломоновых островах 6 февраля 2013 года. Предварительные эксперименты с модельными системами наблюдения в прогнозируемых цунамиопасных зонах могут помочь в проектировании размещения глубоководных датчиков.

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

## 22.

### **ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОТОТИП АВТОМАТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ КАК ИНФОРМАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧИ НАБЛЮДЕНИЙ ЦУНАМИ И АНАЛОГИЧНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**Н.С. Чолич<sup>1</sup>, Г.А.Кантаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*DATARECORDS, г. Москва*

<sup>2</sup>*НПО ДЭКО, г. Южно-Сахалинск*

*nebojsa@datarecords.ru*

Представлено техническое решение для наблюдений за уровнем моря на прибрежных станциях, включая комплексные измерения метеопараметров. Предлагаемая автоматическая станция состоит из даталоггера Campbell Scientific CR6 и датчика CS456, иных измерителей, внесенных в госреестр РФ, с опциями связи через радио, GPRS, GSM, Wi-Fi, FTP и спутниковых каналов передачи данных и по DATARECORDS. Станция может стать единицей информационного обеспечения любой автоматизированной сети наблюдений РАН, ГС РАН, Росгидромета, Росморпорта и может дополнительно оснащаться требуемыми датчиками, например, сейсмическими. Разработка существует в действующих системах наблюдений метеопараметров реального времени на территории РФ. Обсуждается необходимость демонстрации пилотного проекта в задачах наблюдений за уровнем моря для выявления цунами, метеоцунами, сейш, сгонно-нагонных явлений на Дальневосточных морях, Балтике, Азовском, Каспийском, Черном морях и Арктическом побережье, включая удаленные и необитаемые острова. Рассматривается и ПО предлагаемого решения, имеющего потенциал программно-аппаратного воплощения в нейронную сеть наблюдений за уровнем моря с точки зрения применения AI для предупреждения морских опасных явлений.

23.

**ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ПРИМЕНИМОСТИ ТЕОРИИ МЕЛКОЙ ВОДЫ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ВОЛН ЦУНАМИ**

**М.А. Носов, А.И. Зарубина**

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

*m.a.nosov@mail.ru*

Большинство моделей динамики цунами описывают распространение волн в рамках теории мелкой воды. Такие модели не учитывают фазовую дисперсию, присущую гравитационным волнам на воде. Дисперсионные эффекты имеют свойство накапливаться с расстоянием. Это накопление происходит плавно, поэтому не существует четкой границы, до которой теория мелкой воды может адекватно описывать волны цунами. Определять эту границу следует специальным образом, исходя из требуемой точности воспроизведения волн. Для этих целей в работе [Kulikov et al., 1996] было введено понятие «расстояние дисперсионного разрушения». В определении означенной величины положена оценка расстояния, при распространении на которое диспергирующий волновой пакет отстанет от фронта на длину волны. В реальности длины волн цунами достигают сотен километров, и отставание на одну длину волны, может говорить об очень сильной трансформации волнового пакета. По этой причине время и расстояние дисперсионного разрушения не могут служить хорошим практическим критерием применимости теории мелкой воды. Целью настоящей работы является адаптация понятия расстояния дисперсионного разрушения для практического применения, то есть определение условий, при выполнении которых теория мелкой воды дает результаты, близкие к полной теории диспергирующих волн.

Мы рассматриваем одномерное распространение волн, описываемое интегралом Фурье. Задавая вид дисперсионного соотношения, мы имеем возможность рассчитывать волновые профили, соответствующие диспергирующим и недиспергирующим волнам. Источник волн - остаточное смещение дна, которое, с учетом сглаживающего эффекта водного слоя, пересчитывается в начальное возвышение водной поверхности. В силу того, что именно коротковолновые компоненты поверхностных гравитационных волн в наибольшей степени подвержены фазовой дисперсии, корректный учет сглаживающего эффекта имеет важное значение для проводимого исследования.

В развитие подхода, предложенного в работе [Kulikov et al., 1996], мы вводим безразмерную характеристику «дистанция дисперсионного разрушения». Эта величина отличается от классического определения расстояния дисперсионного разрушения корректирующим коэффициентом и еще тем, что ее расчет опирается на волновое число, соответствующее максимуму спектра начального возвышения.

В работе вводятся количественные меры, характеризующие различие между диспергирующими и недиспергирующими волновыми профилями. Исследование проводится методом Монте-Карло. Параметры остаточного смещения, включающего области поднятия и опускания, варьируются статистически равномерно в заданных диапазонах. Основным результатом исследования состоит в выявлении количественной связи между различиями волновых профилей и величиной корректирующего коэффициента в формуле для расчета дистанции дисперсионного разрушения.

Kulikov E.A., Rabinovich A.B., Thomson R.E., Bornhold B.D. The landslide tsunami of November 3, 1994, Skagway harbor, Alaska //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1996. – Т. 101. – №. С3. – С. 6609-6615.

24.  
**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ 25 МАРТА 2020 Г.  
В РАЙОНЕ Г. СЕВЕРО-КУРИЛЬСК  
(ДОКЛАД ОТМЕНЕН)**

**Р.Е. Мазова<sup>1,2</sup>, С.А. Мизонов<sup>1</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород,

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

*raissamazova@yandex.ru*

25 марта 2020 г. в 13:49 сахалинского времени у побережья северных Курил произошло сильное землетрясение с магнитудой 7,3; координаты эпицентра 48.8° с.ш., 157.8° в.д. Первые волны цунами в г. Северо-Курильск прибыли через час после землетрясения. Высота цунами визуально оценивалась в пределах 50 см. В работе сделаны оценки характеристик очага для магнитуды  $M = 7,3$ : длина  $L = 72$  км и ширина  $W = 21$  км. Нами рассмотрен двухблочный очаг землетрясения с эпицентром в одном из блоков (рис. 1). Вертикальная компонента смещения блоков-клавиш в очаге землетрясения принята  $H = 3.5$  м. Рассмотрено четыре сценария кинематики блоков в очаге землетрясения. На рис. 2 приведены результаты численного моделирования одного из сценариев (Сценарий 4), наиболее близко отражающего реальный процесс. Приводится сравнение (табл. 1) полученных расчетных данных для Сценария 4 в некоторых пунктах о. Парамушир с натурными данными при катастрофическом землетрясении и цунами 5 ноября 1952 г. с эпицентром к юго-востоку от г. Петропавловска-Камчатского.

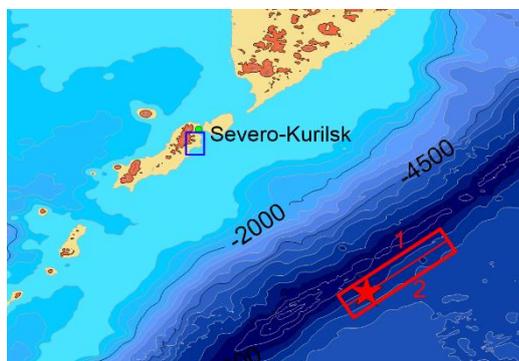


Рис. 1. Двухблочный очаг землетрясения 25 марта 2020 г. (звездочка – эпицентр землетрясения)

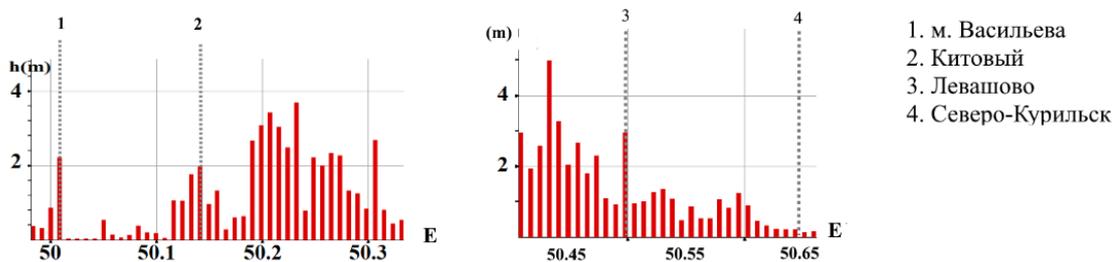


Рис. 2. Гистограммы высот волн для ряда пунктов в расчетной области

Табл. 1. Сравнение для цунами 25 марта 2020 г. и 5 ноября 1952 г.

	м. Васильева	Китовый	Левашово	Северо-Курильск
Цунами 05.11.1952 г.	6.2	18.4	10	10
Цунами 25.03.2020 г. (численное моделирование)	2	2	3	0.5