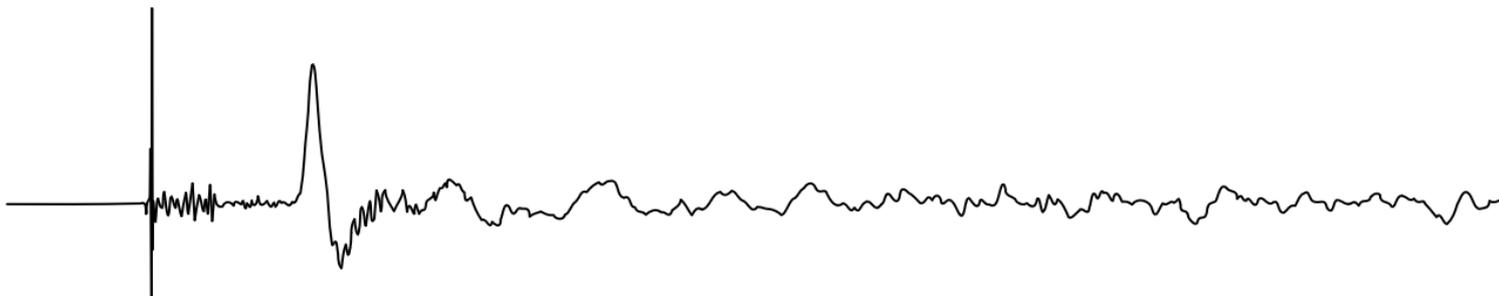


НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРОБЛЕМАМ ЦУНАМИ  
ПРИ ОТДЕЛЕНИИ НАУК О ЗЕМЛЕ РАН



**Всероссийская научная конференция  
с международным участием  
ВОЛНЫ ЦУНАМИ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ**

**17 МАЯ 2019 ГОДА**

**Сборник тезисов докладов**

Москва

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

2019

**Всероссийская научная конференция с международным участием «ВОЛНЫ ЦУНАМИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНИТОРИНГ, ПРОГНОЗ», 17 мая 2019 г.**  
Сборник тезисов докладов / Под ред. М.А.Носова. - М. Научный совет по проблемам цунами ОНЗ РАН, 2019 г. 34 с.

Конференция организована Научным советом по проблемам цунами ОНЗ РАН. 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  
член-корр. 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:**

к.ф.м.н. А.В.Большакова  
к.ф.м.н. С.В.Колесов  
к.ф.м.н. Г.Н.Нурисламова  
к.ф.м.н. К.А.Семенцов

**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)

**Адрес проведения конференции:**

119991, ГСП-1, Москва Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова Дом 1, строение 2,  
Физический Факультет



## КАРТЫ ЗАЛИВАНИЯ БЕРЕГА ВОЛНАМИ ЦУНАМИ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СООРУЖЕНИЯ

*Е.Н. Пелиновский<sup>1-3,\*</sup>, А.И. Зайцев<sup>2,3</sup>, А.А. Куркин<sup>2</sup>, А. Yalciner<sup>4</sup>*

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

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

<sup>3</sup>*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО  
РАН, Южно-Сахалинск, Россия*

<sup>4</sup>*Middle East Technical University, Ankara, Turkey*

*\*pelinovsky@appl.sci-nnov.ru*

Проблема цунами актуальна для России; цунами часто проявляются на Дальнем Востоке, однако они встречаются в Черном и Каспийском морях. Известны одиночные случаи цунами в Балтийском и Баренцевом морях. Именно поэтому во всем мире активизировались работы по оценке цунамириска, включающим разработку схем цунамирайонирования, карт эвакуации населения, укрепление существующих и проектирование специальных сооружений, способных ослабить действие волн цунами. В нашей стране с 2018 года введен в действие Свод правил № 292.1325800.2017 «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования», утвержденный 23 июня 2017 года Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Аналогичные документы разрабатываются и в других странах. Выпущены также два специальных выпуска журнала РАН «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» (№№ 3 и 4 за 2017 г), посвященные проблеме воздействия цунами на берега и сооружения. В докладе дан обзор методов расчетов воздействия цунами на берега и сооружения, которые могут быть решены с использованием уже существующих вычислительных комплексов. Приводятся примеры расчета проектных высот волн цунами с заданной обеспеченностью и карт заливания берега волнами цунами, необходимые для эвакуации населения и обеспечения устойчивой работы портов и гаваней. Выделены характеристики силового воздействия волн цунами на преграды малого диаметра, которые уже вычисляются в рамках существующих вычислительных комплексов цунами. Обсуждается возможность анализа донных размывов волнами цунами с

помощью числа Рауза. Даны примеры расчета силовых характеристик волн цунами для ряда акваторий.

Исследования по этой проблеме поддержаны грантом РФФИ 18-05-80019 по программе «Опасные явления».

## **НОВЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ КЛАВИШНОЙ МОДЕЛИ ЦИКЛОВ СИЛЬНЕЙШИХ ЦУНАМИГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ТЕОРИИ ПРЯМЫМИ ДАННЫМИ СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИИ**

*Л.И.Лобковский*

*Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова (Москва)*

*lobkovsky@ocean.ru*

Клавишная модель циклов сильнейших землетрясений в зонах субдукции была предложена автором уже достаточно давно: в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия. Эта геодинамическая модель логично устраняла кажущееся противоречие между единым механизмом накачки напряжений в узких и протяженным поясах островных дуг и активных континентальных окраинах благодаря непрерывному горизонтальному движению и субдукции океанских литосферных плит, с одной стороны, и автономному поведению очагов сильнейших землетрясений с присущей им независимой цикличностью – с другой. На западе все это время доминировала так называемая модель «асперити», т.е. неоднородной шероховатости (или сцепления) в контактной области взаимодействия поддвигаемой и нависающей плит в зоне субдукции, которая была предложена примерно в те же годы Касахарой с соавторами. Эти два подхода можно рассматривать как конкурирующие теоретические модели происхождения сильнейших землетрясений, хотя они фокусируются на разных сторонах сейсмотектонического процесса.

В настоящее время с возникновением спутниковых технологий прямых наблюдений смещений поверхности литосферы с высокой точностью порядка 1 см появилась возможность проверки предложенных моделей сейсмических циклов в зонах

субдукции. Оказалось, что клавишная модель получила полное подтверждение на примерах трех недавних сильнейших землетрясений, произошедших в Курило-Камчатской (Симуширские землетрясения 2006 и 2007 гг.), Японской (Тохоку 2011 г.) и Чилийской (Мауле 2010г.) зонах субдукции.

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ НА ДАЛЬНЕМ ВОСТОКЕ РОССИИ**

*Д. В. Чебров*

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

*danila@emsd.ru*

Новая система предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России, созданная в 2006–2010 гг, находится в эксплуатации уже более восьми лет. Она пришла на смену устаревшей СПЦ, которая была разработана после Большого Камчатского землетрясения 1952 г и запущена в эксплуатацию в 1958 г. Основой СПЦ-2010 по-прежнему остается сейсмический метод, опирающийся на магнитудно-географический критерий. Поэтому Сейсмическую подсистему можно назвать ключевой для всей СПЦ, и ее характеристики определяют характеристики всей системы.

В работе обсуждается современное состояние сейсмической подсистемы системы предупреждения о цунами (СП СПЦ) и анализируется опыт ее эксплуатации. На основе накопленного эмпирического материала исследуется вопрос о реальных характеристиках СП СПЦ, влияющих на эффективность работы всей системы предупреждения о цунами: времени реакции системы, и точности оценок координат землетрясений.

Оказалось, что СП СПЦ демонстрирует стабильно высокие характеристики на протяжении всего периода эксплуатации. Время реакции системы и точность оценок удовлетворяют требованиям, заложенным при проектировании СП СПЦ. Детальный анализ пространственного распределения времени реакции системы и точности оценок координат позволил заключить, что большая часть камчатского сейсмоактивного региона

обеспечивается точными и своевременными оценками параметров землетрясений в рамках СПЦ и службы срочных сейсмических донесений. В то же время, выделены районы, для которых качество оценок параметров землетрясений находится вблизи предельных значений (согласно регламентам СПЦ). К таким районам относятся Северные Курилы и сегмент Алеутской дуги восточнее Командорских островов. Основная причина пониженного качества работы СП СПЦ при обработке землетрясений происходящих в этих районах – это недостаточная обеспеченность наблюдениями Курильских и Алеутских островов.

## **TSUMAPS-NEAM: ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ В РЕГИОНЕ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АТЛАНТИКИ**

*А.Ю. Бабейко<sup>1</sup> и группа TSUMAPS-NEAM*

*<sup>1</sup>Немецкий национальный центр наук о Земле, г. Потсдам, Германия*

*babeyko@gfz-potsdam.de*

Вероятностный анализ опасности цунами лежит в основе количественной оценки экономических рисков связанных с данным природным явлением, а также может служить ориентиром при планировании систем раннего предупреждения об угрозе цунами. В ходе исполнения европейского научного проекта TSUMAPS-NEAM (2016-2017) была разработана первая гомогенная долгосрочная вероятностная модель угрозы цунами, обусловленных сейсмическими источниками, для регионов Средиземного моря (включая Черное и Мраморное моря) и Северо-Восточной Атлантики. Численный анализ проводился в четыре этапа, включавших в себя ряд новых оригинальных подходов к моделированию в данном масштабе.

Этап 1. Вероятностное моделирование сейсмических источников, включающее (а) определение параметров всех возможных репрезентативных цунамигенных источников и (б) вычисление их долгосрочной среднегодовой повторяемости.

Этап 2. Моделирование генерации цунами и распространения волн в глубокой воде вплоть до реперных точек расположенных вдоль изобаты 50 м.

Этап 3. Моделирование распространения волн на мелководье и процесса наката цунами на берег. Данный этап также включал стохастическое моделирование связанных с численным анализом неопределенностей, проистекающих из упрощенного представления моделей источников и распространения цунами;

Этап 4. Заключительный расчет вероятностных характеристик угрозы цунами (частоты повторяемости высот цунами в заданных точках вдоль побережья плюс производные карты) с количественной оценкой их неопределенностей.

В ходе исследования были рассмотрены более 50 миллионов сейсмических сценариев. Результаты анализа представлены для более чем 2000 береговых точек расположенных с интервалом ~20 километров (1130 точек в Средиземноморском бассейне, 137 вдоль побережья Черного моря и 1076 относящихся к Северо-Восточной Атлантике). Все результаты проекта доступны онлайн на сайте:

<http://www.tsumaps-neam.eu/> (Menu→РТНА→Interactive Hazard Curve Tool)

В частности, интерактивные карты включают вероятностные высоты цунами для средних периодов повторения 500, 1000, 2500, 5000 и 10000 лет, а также карты вероятностей превышения высот цунами 1, 2, 5, 10 и 20 метров. Для визуальной оценки неопределенностей все карты представлены как для средних значений характеристик, так и для 16- и 84% квантилей.

В целом, более 30% побережья рассматриваемых регионов могут испытывать цунами высотой более 1 метра со средним периодом повторяемости 2500 лет.

## **ПОВТОРЯЕМОСТЬ СИЛЬНЫХ ЦУНАМИ НА МАТЕРИКОВОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ ПО ПАЛЕОДАНЫМ**

*Н.Г. Разжигаетева<sup>1,\*</sup>, Л.А. Ганзей<sup>1</sup>, В.М. Кайстренко<sup>2</sup>, Т.А. Гребенникова<sup>1</sup>,  
О.А. Горбунов<sup>2</sup>, И.И. Лебедев<sup>1</sup>*

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

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

*\*nadyar@tigdvo.ru*

Одним из цунамиопасных участков дальневосточного побережья России является берег Приморского края. Район активно развивается, здесь сконцентрировано население, располагаются крупные портовые города, построены газовые и нефтяные терминалы, протяженные мосты, множество рекреационных объектов. Наиболее опасные цунами в регионе вызваны подводными землетрясениями с эпицентрами в северо-восточной части Японского моря. Катастрофические цунами имели и вулканогенную природу (1741 г.) или были вызваны подводными оползнями (1026 г.). Инструментальные наблюдения за цунами в Приморье проводятся со второй половины XX века. Последние крупные цунами (1940, 1983, 1993 гг.) имели очаги около о. Хоккайдо. Хотя для Япономорского региона есть летописные свидетельства о прохождении сильных цунами с VIII века, не было сведений о том, какие из известных цунами достигли материкового побережья и каков был их масштаб. Не все цунами, очаги которых располагались около о-вов Хоккайдо и Окусири, зафиксированы в летописях. Работы по поиску отложений исторических цунами и палеоцунами в Приморье проводятся с 2010 г. Целью является выявление особенностей проявления цунами в бухтах разного типа, реконструкция их параметров, определение возраста и повторяемости. Одна из задач – поиск осадков цунами XX века и сравнение их распространения с результатами замеров заплесков, выполненных сразу после событий. В Восточном Приморье обследовано 22 бухты (от бух. Удобной до бух. Анны), на юге работы проводились на о. Русский. Идентифицированы следы сильных цунами, произошедших в последние 3.5 тысячи лет. Возраст определен на основе радиоуглеродного датирования. В ряде бухт найден маркирующий пепел влк. Байтоушань (946-947 гг.) На ключевых участках (бух. Валентин, Кит) закартированы зоны осадконакопления. Как правило, цунамигенные осадки встречаются на побережье, где величина заплеска волн превышала 3 м. Наилучшая сохранность осадков отмечена в бухтах, приуроченных к низкопорядковым водотокам. Там, где в бухты впадают крупные реки, осадочные покровы имеют плохую сохранность, что связано с размывом во время частых паводков. Максимальная мощность осадков цунами 1983 г. отмечена на побережье бух. Триозерье (до 10 см), цунами 1993 г. – бух. Валентин (до 11 см). Последние крупные цунами разделены небольшим промежутком времени. Обычно в разрезах встречается один прослой песка, отвечающий более сильному цунами, проявившемуся в конкретном месте. Два прослоя цунамигенных песков 1983 и 1993 гг. найдены в бухтах Милоградовка, Валентин, Кит, Проселочная, зал. Восток, бух. Спокойная (о-в Русский). Максимальная протяженность покрова осадков цунами 1993 г. (до 300 м) зафиксирована на побережье бух. Валентин. Наиболее подробная геологическая летопись сильных цунами за последние 700 лет, обнаружена на побережье бухты Спокойная на о-ве Русский (1993, 1983, 1940,

1833, 1741 гг., XVII в. – 1614 или 1644 гг., 3–4 цунами XIV–XVI вв.). Заплеск локализован в узкой полосе (60 м), сохранности отложений способствуют уникальные условия мелководной закрытой бухты. Крупные цунами на побережье Восточного Приморья происходили каждые 200 лет. След цунами 1026 г. найден только в бух. Триозерье. В разрезах обнаружены следы 3–4 позднеголоценовых цунами (1.2; 1.7-1.8; 2.3-2.6; 3.5 тыс. л.н.). В бух. Валентин, Кит сопоставимым по интенсивности с 1993 г. является цунами XII в., не зафиксированное в летописях. Близкими по проявлению были цунами 1983 и 1644 гг. Для этой части берега наиболее опасными являются цунами с очагами в районе о. Окусири. События эти редкие, их разделяет ~700 лет. Цунами, связанные с землетрясениями с эпицентрами около северо-западного Хонсю проявлялись слабее.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦУНАМИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ ДЛЯ РАЙОНОВ КАСПИЙСКА И АПШЕРОНСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

*Куликов Е.А.\* , Медведева А.Ю.*

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

*\*kulikove@gmail.com*

Каспийское море – это регион с относительно высокой сейсмической активностью, определяемой геотектоническими процессами. Его можно условно разделить на северную, центральную и южную части, две последних отделены от Северного Каспия Челекен-Апшеронским порогом, которому присуща высокая сейсмическая активность [Куликов и др., 2014]. Наиболее сильными землетрясениями Каспийского региона были: Рудбарское (Иран) 1990 г. с  $M_w = 7.4$  и Красноводское (Туркмения) 1895 г. с  $M = 8 \pm 0.2$ . Согласно исследованию Уломова (2008), наибольшая магнитуда возможных в исследуемом районе землетрясений достигает 8, в то же время магнитуда 6.8 [Доценко и др., 2001] является минимально необходимой для возбуждения здесь волн цунами. Например, по базе данных USGS, землетрясение с  $M=6.8$  произошло в 10 км к югу от Баку под экваторией. Выполнение численного моделирования цунами в рамках детерминистского подхода было выполнено для районов Каспийска и Апшеронского полуострова. Для расчетов была применена

разновидность программы TUNAMI [Куликов и др., 2014]. На береговой границе задается условие непротекания. Шаг по времени составил 2 с. Оценка высоты цунами проводилась на изобате 1 м. Для задания рельефа морского дна была взята база данных GEBCO (30") в сочетании с оцифрованными навигационными картами, для суши – были взяты односекундные данные SRTM (Shuttle radar topographic mission), находящиеся в открытом доступе. Для расчета была созданы средняя сетка с шагом 6" и для учета наката – мелкая сетка с шагом 1".

В качестве источника было задано землетрясение со следующими характеристиками:  $M = 8$ , Глубина – 19 км,  $\text{Strike} = 322^\circ$ ,  $\text{Dip} = 86^\circ$ ,  $\text{rake} = 90^\circ$ , Slip – 12.6 м, длина – 190 км, ширина – 35 км, координаты –  $42.996^\circ$  с.ш.,  $48.819^\circ$  в.д. Начальное смещение было рассчитано по формулам из [Okada, 1985]. По полученным расчетам в Каспийске высота волны цунами при таком очаге составит 9.5 м. Для случая Апшеронского полуострова также была проведена серия расчетов цунами для выявления «наихудшего сценария». Были проведены расчеты с накатом и без него на вложенных сетках. было получено, что для некоторых точек северного побережья полуострова высота волны цунами может достигать 2.5-4 м. Если рассматривать источники цунами, располагающиеся непосредственно на самом Апшеронском пороге, то оценки высот волн цунами на некоторых участках побережья выше и доходят до 5-6 м.

1. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. Цунами в Каспийском море: численное моделирование распространения из зон сейсмической генерации // Морск. Гидрофиз. журн. 2001. № 6. С. 3–13.
2. Куликов Е.А., Кузин И.П., Яковенко О.И. Цунами в центральной части Каспийского моря // Океанология. 2014а. Т. 54. № 4. С. 473–473.
3. Уломов В.И. Выявление потенциальных очагов и долгосрочный прогноз сильных землетрясений на Северном Кавказе // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. 2008. Т. 1. С. 127–146.
4. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. Vol. 75. No. 4. P. 1135–1154.

## ВОЛНЫ ЦУНАМИ В МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

*Медведев И.П. \*, Куликов Е.А., Иващенко А.И., Яковенко О.И., Медведева А.Ю.*

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

*\*medvedev@ocean.ru*

Традиционно цунамиопасность в Арктике считается незначительной. Это объясняется, прежде всего, низкой сейсмической активностью региона. Однако отсутствие прямых свидетельств о проявлениях цунами может объясняться малонаселенностью Арктического побережья и весьма редкой сетью уровенных постов. Согласно геологическим данным в Арктике наблюдались цунами различного происхождения. Примерно в 6100—6200 гг. до н. э. в Норвежском море на границе континентального шельфа в 100 км к северо-западу от Мёре-ог-Ромсдал (Норвегия) сошел гигантский оползень Сторегга, который вызвал сильное цунами. На побережье Норвегии высота волн цунами достигала 10–12 м, на Шетландских островах (Северное море) превышала 20 м, а на южном побережье Баренцева моря достигала 3–4 м.

Для арктического побережья России и прилегающего шельфа наибольшая опасность возникновения цунами сейсмотектонического происхождения исходит от землетрясений, возникающих в зоне подводного хребта Гаккеля. В этой зоне возможно возникновение землетрясений магнитудой  $M_w \sim 6.5$ —7.0 с частотой  $10^{-2}$  год<sup>-1</sup> и магнитудой  $M_w \sim 7.5$  с частотой  $10^{-3}$  год<sup>-1</sup>. В рамках настоящего исследования были воспроизведены два наиболее сильных землетрясения в бассейне Северного Ледовитого океана: в море Баффина (1933 г.,  $M_w = 7.7$ ) и в море Лаптевых (1964 г.,  $M_w = 6.7$ ). Расчеты показали, что максимальная высота волн цунами на побережье в ближней зоне очага могла бы достигать 10 и 0.3 м соответственно.

Известно, что волны цунами, образованные сильнейшими землетрясениями, распространяются на огромные расстояния сохраняя свою разрушительную силу. В мировой базе данных по цунами (NGDC/WDS, 2014) в настоящее время имеется единственное упоминание о проникновении в акваторию Северного Ледовитого океана волн цунами от сильнейших удаленных землетрясений в Атлантическом и Тихом океанах. 22 мая 1960 г. вблизи побережья Чили произошло сильнейшее землетрясение магнитудой  $M_w = 9.5$ , которое вызвало волны цунами с высотой до 25 м в южной части Тихого океана. Волна цунами, вызванная этим землетрясением, наблюдалась в Чукотском море в Пойнт-

Хоупе (северо-западное побережье Аляски). Однако о высоте волны ничего не сообщается.

В настоящем исследовании при помощи численного моделирования были воспроизведены сильнейшие цунами, произошедшие в Тихом океане в XX-XXI вв. Для этого была использована модификация известной численной модели распространения волн цунами в океане TUNAMI. Область расчета для численного моделирования распространения цунами покрывала весь Тихий и Северный-Ледовитый океаны с шагом 2'. Были промоделированы пять событий:  $M_w \sim 9.5$  (Чили, 22 мая 1960),  $M_w \sim 9.2$  (Аляска, США, 27 марта 1964),  $M_w \sim 9.0$  (Камчатка и Курилы, СССР, 4 ноября 1952),  $M_w \sim 9.0$  (Тохоку, Япония, 11 марта 2011),  $M_w \sim 8.7$  (Крысьи острова, Алеутские о-ва, США, 4 февраля 1965).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОРАН (тема № 0149-2019-0005) и при поддержке гранта РФФИ № 17-05-41144.

## **КЕРЧЕНСКИЙ ПРОЛИВ: ЦУНАМИОПАСНОСТЬ ПРИ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПОДВОДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ С ОЧАГАМИ НА ШЕЛЬФЕ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА**

*Мазова Р.Х.\* , Баранова Е.А.*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

*\*raissamazova@yandex.ru*

В работе рассматривается историческое цунамигенное катастрофическое землетрясение на юго-востоке Крымского полуострова, произошедшее 12 сентября 1927 г., а также возможные сильные землетрясения с близкой к данному землетрясению локализацией очага и магнитудах землетрясения. В работе также проведено численное моделирование прохождения черноморских цунами через Керченский пролив. Рассмотрены возможные сильные цунамигенные землетрясения, очаги которых расположены в бассейне Черного моря на входе в Керченский пролив. Рассматривались сейсмические очаги эллиптической формы с однополярной и дипольной реализацией смещений в очаге землетрясения. При выборе локализации очага принимались во

внимание наиболее сейсмически опасные участки рассматриваемой акватории. Численное моделирование проводилось в рамках нелинейных уравнений мелкой воды. Характерные параметры очага оценивались с использованием формул Вэлса (Wells et al.,1994). Проанализированы различные возможные сценарии распространения цунами для выбранных локализаций источников. Получены волновые характеристики при движении волны цунами от данных сейсмических источников по акватории Черного моря вдоль Крымского полуострова и в акватории Керченского пролива. Для расчетной акватории построены гистограммы распределения максимальных высот заплесков вдоль побережий Крымского полуострова и Керченского пролива, выполнен спектральный анализ волнового поля цунами. Особенно детально проведены оценки волновых и энергетических характеристик волн цунами в районе Крымского моста. Было получено, что при возможном катастрофическом землетрясении с очагом, расположенным в районе очага землетрясения 12 сентября 1927г., с магнитудой  $M=8$ , максимальные высоты волн цунами, дошедшие до опор Керченского моста, не превысят 1,1м.

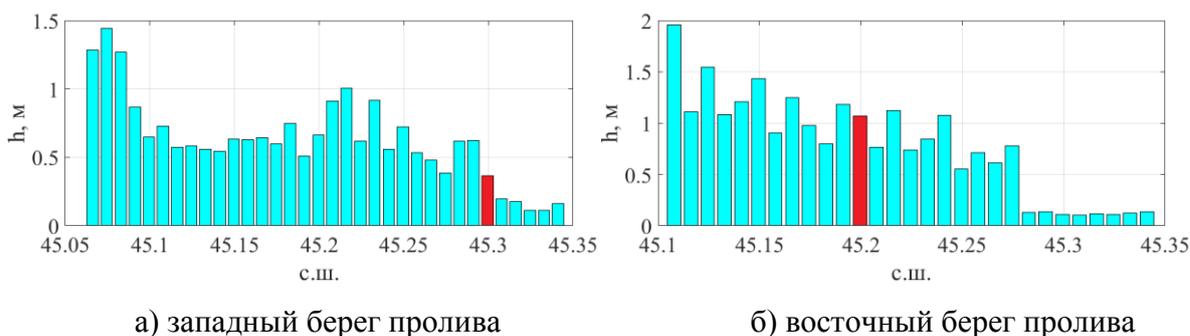


Рис.1. Гистограммы распределения максимальных высот волн цунами для побережья Керченского пролива вблизи Крымского моста для  $M=8$ .  
Красный цвет – район расположения опор Крымского моста

## ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЕГИПТА

А.И. Зайцев<sup>1,2,\*</sup>, А.Ю. Бабейко<sup>3</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>1,2,4,5</sup>, А. Ялченир<sup>6</sup>

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

<sup>2</sup>*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований, Дальневосточное отделение РАН, Южно-Сахалинск*

<sup>3</sup>*GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany*

<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*

Карта цунамигенных зон в Средиземном море показывает что, наиболее цунамигенная зона находится в Греции, она достаточно далека от Египта и экранируется островом Крит. Поэтому волны цунами, приходящие из этой зоны, будут по высоте сравнимы с волнами, приходящими из менее интенсивных, но более близких зон. Наиболее опасные для Египта очаги цунами находятся около Крита с его двух сторон; эти зоны достаточно интенсивны и близки по расстоянию к Египту.

Из приведенных данных видно, что как исторические данные, так и результаты моделирования конкретных событий мало пригодны для долговременных оценок цунами на побережье Египта. Именно поэтому мы использовали метод РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment – Вероятностная оценка опасности цунами), в основе которой лежит статистический анализ возможных цунамигенных землетрясений, число которых достаточно велико. Такой анализ уже выполнен для Средиземного моря в целом (Sorensen et al., 2012). Именно этот анализ был использован в наших исследованиях. Для вероятностных оценок в выбраны только цунами сейсмического происхождения, учитывая большой объем данных о возможных землетрясениях. Каталог землетрясений за последние 1000 лет для Средиземного моря приведен в (Grunthal and Wahlstrom, 2012) и он использован для создания синтетического каталога потенциальных цунамигенных землетрясений на последующие 100 тысяч лет. В нем сохраняются те же распределения магнитуд и механизмов очага, как и в каталогах реальных событий. Синтетический каталог

содержит около 85 тысяч землетрясений с магнитудой  $M > 6.5$  на период 100 тысяч лет.

Получено распределение ожидаемых высот цунами вдоль побережья Египта на период в 1000 лет. В целом, предсказуемые высоты волн лежат в диапазоне 1.5 – 3 м. Как и ожидалось, высоты волн в западной части побережья Египта больше, чем на восточном побережье.

Представленные результаты получены при финансовой поддержке грантов РФФИ (17-05-00067 и 18-05-80019).

1. Sorensen M.B., Spada M., Babeyko A., Wiemer S., Grünthal G. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea. *J. Geophysical Research*, 2012, vol. 117, B01305.
2. Grünthal G., Wahlstrom R. The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. *Journal of Seismology*, 2012, vol. 16, 535-570.

## **ПОЛЕВОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ СЛЕДОВ ЦУНАМИ 28 СЕНТЯБРЯ 2018 Г. НА О. СУЛАВЕСИ (ИНДОНЕЗИЯ)**

*П.И. Пронин<sup>1,\*</sup>, А.И. Зайцев<sup>1,2</sup>, А.Р. Гиниятуллин<sup>1</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>1-4</sup>*

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

<sup>2</sup>*Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО  
РАН, г. Южно-Сахалинск*

<sup>3</sup>*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

<sup>4</sup>*University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia*

*\*pavel.pronin2010@yandex.ru*

28 сентября 2018 года в центральной части острова Сулавеси (Индонезия) произошло землетрясение магнитудой 7.5. Его источник находился на расстоянии 77 км от административного центра провинции Палу и ощущался на достаточно большом расстоянии вплоть до Восточного Калимантана а также в Малайзии. В результате землетрясения возникли волны цунами (до 11 м высотой), достигшие город Палу, где погибло более 2 тысячи человек. Это событие явилось наиболее катастрофическим на

острове Сулавеси за всю письменную историю.

Обследование результатов цунами проводилось несколькими международными группами учёных. Российская группа проводила исследования на острове Сулавеси в районе залива г. Палу с 7 по 11 ноября 2018 года совместно учеными из Индонезии, Турции, Австрии, Италии, Марокко, Португалии под эгидой правительства Индонезии и UNESCO-ИОС. В настоящей работе приведена часть результатов измерений, выполненных российскими участниками экспедиции. Представлены результаты измерений высот волн цунами в прибрежных пунктах залива Палу и их анализ. Максимальная высота волны цунами составила почти 11 м. Высоты волн 4 - 8 м наблюдаются практически вдоль всей городской части г. Палу, которая густо населена. Именно поэтому так велико число жертв. Землетрясение и цунами вызвало большие разрушения в городе и прибрежной инфраструктуре.

Представленные результаты получены при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5 и гранта РФФИ 18-05-80019.

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ОПОЛЗНЕВЫХ ЦУНАМИ В ЧЁРНОМ МОРЕ**

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

*<sup>1</sup>Институт вычислительных технологий, г. Новосибирск*

*\*gusev\_oleg\_igor@mail.ru*

В докладе обсуждаются гипотезы о связи двух цунамиподобных явлений в Чёрном море с подводными оползнями, один из которых был обнаружен несколько южнее Керченского пролива, напротив Геленджика [1], а второй мог послужить причиной образования аномальных волн у берегов Болгарии 7 мая 2007 [2]. В качестве модели оползня используется квазидеформируемое тело, движущееся по криволинейному склону под действием сил тяжести, плавучести, трения о дно и сопротивления воды. Моделирование трансформации волн цунами выполняется в рамках полностью нелинейной дисперсионной модели на вращающейся сфере. Валидация модели

проводится путём сравнения численных решений с экспериментальными лабораторными данными о движении твёрдой модели оползня по плоской поверхности.

В первой задаче известны приблизительные параметры оползня, его начальное положение и пройденное расстояние, однако нет никаких сведений о порождённых сходом этого оползня волнах. Проведённое численное исследование демонстрирует сильное влияние начального положения и объёма оползня на максимальные амплитуды порождённых им волн, изменяющихся в диапазоне от 1 до 11 м.

Во второй задаче, напротив, известны измеренные максимальные и минимальные значения уровней свободной поверхности в семи пунктах вдоль побережья Болгарии, но механизм образования соответствующих волн пока окончательно не определён. Так как никакого землетрясения в то время и в том месте зарегистрировано не было, обсуждаются [2] две гипотезы о природе источника волн: подводный оползень или метеорологическая крупномасштабная аномалия. При численном моделировании в [2] рассмотрено четыре начальных положения оползня и подобрана его толщина для наилучшего соответствия результатов расчётов натурным данным, что позволило авторам говорить о предпочтительности оползневой механизмы. Некоторые расхождения, однако, наблюдаются для южной части побережья (Бургасский залив). Трудно также назвать удовлетворительным согласие с натурными данными результатов численного исследования гипотезы о метеоцунами [3]. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования для более двухсот начальных положений гипотетического оползня. Выделены шесть локаций, приводящих к удовлетворительному соответствию с натурными данными по всему побережью. Замечено, что начинающие свое движение с этих положений шесть оползней останавливаются приблизительно в одном месте, которое можно рекомендовать для дальнейших исследований структуры рельефа морского дна.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00219).

#### **Список литературы.**

1. Казанцев Р.А., Кругляков В.В. Гигантский оползень на дне Черного моря // Природа. 1998. № 10. С. 86–87.
2. Rangelov B., Tinti S., Pagnoni G., Tonini R., Zaniboni F., Armigliato A. The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on 7 May 2007: was it due to a submarine landslide? // Geophys. Res. Letters, 2008, Vol. 35, L18613.
3. Vilibic I., Sepic J., Rangelov B., Mahovic N.S., Tinti S. Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. C07006.

**ПРОСТЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВОЛНАХ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ,  
ВОЗБУЖДАЕМЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ВНУТРИ  
УПРУГОГО ОСНОВАНИЯ**

*С. Ю. Доброхотов<sup>1,2</sup>, Х.Х.Ильясов<sup>1</sup>С.Я.Секерж-Зенькович<sup>1</sup>, О.Л.Толстова<sup>2,3,\*</sup>*

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

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

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

*\*Olgall1@rambler.ru*

В докладе обсуждается задача о возбуждении волн на поверхности слоя воды, расположенного на упругом основании. Предполагается, что источник возбуждения располагается внутри упругого полупространства. Используется подход Г.С. Подъяпольского, основанный на изучении решений совместной линейной системы уравнений теории упругости в полупространстве и теории волн в жидкости, связанных на границе раздела соответствующими граничными условиями. Найдено упрощенное дисперсионное соотношение для водяной моды, учитывающего влияние упругого основания, и с помощью этого упрощенного соотношения выведена простая интегральная формула, связывающая начальное возмущение специального вида в упругом полупространстве и амплитуду волны на поверхности воды, порожденной этим источником. Проведено сравнение получаемых решений с решениями, основанных на известной поршневой модели возбуждения длинных волн.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-01-00644

## ЭФФЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЛИННЫХ ВОЛН НА МЕЛКОВОДЬЕ

*А.А. Родин<sup>1,\*</sup>, Н.А. Родина<sup>1,2</sup>, А.А. Куркин<sup>1</sup>, Е.Н. Пелиновский<sup>3-6</sup>*

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

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород*

<sup>3</sup> *Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород*

<sup>4</sup> *Специальное конструкторское бюро автоматизации морских исследований ДВО РАН,  
г. Южно-Сахалинск*

<sup>5</sup> *Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики, г. Москва*

<sup>6</sup> *University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia*

*\*xmrrarro@gmail.com*

В настоящей работе рассматривается встречное взаимодействие нелинейных одиночных волн на мелкой воде и изучается его влияние на эволюцию простой волны. Динамика таких волн хорошо известна вдали от области взаимодействия, где эти волны являются гладкими (римановыми) или обрушенными, но в момент взаимодействия, при влиянии волн друг на друга, аналитические решения отсутствуют. При анализе процесса взаимодействия используется численное решение нелинейных уравнений мелкой воды, представляющих собой законы сохранения массы и количества движения.

В работе приведены аналитические и численные решения уравнений для встречного взаимодействия волн одинаковой амплитуды. Для получения аналитического решения уравнений мелкой воды, описывающего взаимное влияние волн друг на друга, система нелинейных уравнений мелкой воды преобразована в уравнения для римановых инвариантов. Римановы инварианты сохраняются в любой момент времени, и эффект взаимодействия волн, бегущих в разных направлениях, проявляется через переменность скоростей их распространения. В момент взаимодействия смещение водной поверхности и скорость течения не известны, а сдвиг характеристик не находится аналитически, поэтому, в этом случае, необходимы численные расчеты.

Расчеты выполнены с помощью программного комплекса CLAWPACK (www.clawpack.org). В первом сценарии численных экспериментов задается только одна

волна, двигающаяся в одну сторону; во втором – две одинаковых волны, двигающихся навстречу друг другу; в третьем – взаимодействие двух одинаковых импульсов разной полярности. Взаимодействие необрушенных (римановых) волн происходит упруго и сопровождается небольшими фазовыми сдвигами. В случае обрушенных волн становится заметным уменьшение амплитуды волны и увеличиваются фазовые сдвиги при взаимодействии. Наиболее сильно нелинейное взаимодействие проявляется для волн отрицательной полярности, поскольку возрастает отношение амплитуды волны к локальной глубине.

Представленные результаты получены в рамках гос. задания в сфере научной деятельности (Задание № 5.5176.2017/8.9) при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5, Программы «Нелинейная динамика» и грантов РФФИ (17-05-00067 и 18-05-80019).

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ДЛИННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН УЗКИМ  
ДВИЖУЩИМСЯ ПО ДНУ БАССЕЙНА ИСТОЧНИКОМ  
(ОДНОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ).**

*С.Ю. Доброхотов<sup>1,2,\*</sup>, П.Н. Петров<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 (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия*

*\*[dobr@ipmnet.ru](mailto:dobr@ipmnet.ru), \*\*[petr.petrov@phystech.edu](mailto:petr.petrov@phystech.edu)*

В одномерной ситуации рассматривается линейная задача о возбуждении поверхностных волн движущимся по дну бассейна локализованным источником [1]. Мы предполагаем, что источник локализован в окрестности движущейся точки, время движения источника конечное. Таким образом, может быть описан один из механизмов генерации оползневых волн цунами [2,3,4]. В приближении мелкой воды возвышение свободной поверхности жидкости описывается псевдодифференциальным уравнением в безразмерных координатах [5]:

$$h^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \hat{L}u = h \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{1}{\cosh(|\hat{p}|D(x))} D_1 \left( \frac{x - \xi(t/t_1)}{\mu}, t \right) \right], u|_{t=0} = \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0, \quad (1)$$

где  $\hat{L} = L \left( \frac{1}{(\hat{p} + \hat{p})/2}, \frac{2}{x}, h \right)$ ,  $L = |p| \tanh(|p|D(x)) + O(h^2)$ ,  $\hat{p} = -ih \partial/\partial x$ ,  $h$  и  $\mu$  – малые параметры,  $\xi(t/t_1)$  – траектория источника,  $t_1$  – время движения источника,  $D(x)$  – глубина бассейна, функция  $D_1(y, t)$  описывает форму возмущения дна. В работе построена асимптотика решения уравнения (1). Главный член асимптотики в момент времени  $t_1$  имеет вид:

$$u = \sum_{+,-} \frac{Q(\tau^\pm) \ddot{X}(\tau^\pm)}{c^2} + \frac{\dot{Q}(\tau^\pm)}{c} \Big|_{\tau^\pm = t_1 \pm x/c}$$

где  $\ddot{X}_D = \xi((ct \pm x)/ct_1)_{tt}$  – ускорение центра источника, а  $Q$  – двумерный объем источника. Обсуждаются вопросы влияния дисперсионных эффектов на образующуюся поверхностную волну

#### Литература.

1. Dobrokhotov, S. Y., & Petrov, P. N. (2019). Asymptotics of Linear Surface Waves Generated by a Localized Source Moving Along the Bottom of the Basin. I. One-Dimensional Case. *Russian Journal of Mathematical Physics*, 26(1), 32-39.
2. Tinti S., Bortolucci E., Chiavettieri C. Tsunami excitation by submarine slides in shallow water approximation // *Pure and Applied Geophysics*. – 2001. Vol. 158, No. 4, pp. 759-797.
3. Didenkulova I., Pelinovsky E. Analytical solutions for tsunami waves generated by submarine landslides in narrow bays and channels // *Pure and Applied Geophysics*. – 2013. Vol. 170, No. 9-10, pp. 1661-1671.
4. Papadopoulos G. A. et al. Numerical modeling of sediment mass sliding and tsunami generation: The case of February 7, 1963, in Corinth Gulf, Greece // *Marine Geodesy*. – 2007. Vol. 30, No. 4, pp. 315-331.
5. S. Yu. Dobrokhotov and V. E. Nazaikinskii, Waves on the Free Surface Described by Linearized Equations of Hydrodynamics with Localized Right-Hand Sides // *Russian Journal of Mathematical Physics*, Vol. 25, No. 1, 2018, pp. 1—16.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ЦУНАМИ ПО  
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ ЗАПИСЯМ  
И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ МЕТОДА R-РЕШЕНИЙ**

*Т.А. Воронина*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики РАН,*

*г. Новосибирск*

*tanvor@bk.ru*

Задача восстановления первоначальной формы волны цунами по записям колебаний уровня морской поверхности, обусловленных пришедшей волной в серии удаленных приемников рассматривается как обратная задача математической физики.

Рассматриваемая задача относится к классу некорректных задач и ее решение основано на методе наименьших квадратов и методе  $r$ -решения, который состоит в усечении сингулярного разложения 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, которое и является восстановленной приближенно начальной формой волны цунами. Предложенная методика позволяет избежать неустойчивости решения рассматриваемой некорректной задачи, обусловленной объективной зашумленностью реальных данных. Распространение волн описывается в рамках линейной теории мелкой воды. Предполагается, что источником цунами является вертикальное смещение океанского дна, вызванное главным толчком землетрясения - поршневая модель цунами. Аппроксимация задачи осуществляется на основе конечно-разностного подхода. Установлено, что качество получаемого решения существенно зависит от пространственного распределения регистрирующей системы относительно предполагаемого очага цунами, особенностей рельефа дна и уровня шумов.

Поскольку задача восстановления источника не является, вообще говоря, однозначно разрешимой, качество восстановления оценивается по совпадению наблюдаемых и рассчитанных мареограмм. Более того, одновременно с восстановлением источника цунами предложенный подход позволяет получить высоты смещения морской поверхности в пунктах, где наблюдения отсутствуют при условии наличия в этих точках

синтетических данных. Показано, что появление артефактов обусловлено некорректностью задачи.

В рамках предложенного подхода появляется возможность оценить действенность системы наблюдения для восстановления формы источника цунами и выявить наиболее информативную часть этой системы, то есть предложить более эффективный проект расположения датчиков уровня поверхности океана.

Эффективность предложенного подхода подтверждается на примере восстановления источника Чилийского цунами 16 сентября 2015 года.

## **НЕСТАНДАРТНЫЕ КАУСТИКИ И АНАЛИТИКО-ЧИСЛЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ГОЛОВНЫХ ПРОФИЛЕЙ ВОДЯНЫХ ВОЛН, ПОРОЖДЕННЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ С УЧЕТОМ БЫСТРОМЕНЯЮЩИХСЯ УЧАСТКОВ ДНА**

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

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

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

*\*tolchennikovaa@gmail.com*

Рассматривается задача Коши-Пуассона в бассейне с неровным дном, содержащие быстроменяющиеся участки. Начальные данные задаются в виде локализованной функции. Построены асимптотические решения этой задачи учитывающие слабодисперсионные эффекты, связанные как со стандартной «водяной» дисперсией, так и дисперсией вызванной осциллирующими участками дна. Показано, что головной фронт соответствующих волн - это нестандартная движущаяся каустика, содержащая иногда дополнительные сингулярности. Для источника специального вида предъявлены эффективные формулы равномерные по переходу от бездисперсионной ситуации (приближение волнового уравнения) к ситуациям со слабой (приближение Буссинеска) и сильной дисперсией. Обсуждается вопрос построения участка фронта головной волны с помощью вариационного подхода.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 16-11-10282).

## ЭФФЕКТИВНЫЕ АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ДВУМЕРНОЙ ЗАДАЧИ О НАКАТЕ ЦУНАМИ НА БЕРЕГ

*А.Ю. Аникин<sup>1,2\*</sup>, С.Ю. Доброхотов<sup>1,2</sup>, Д.С. Миненков<sup>1</sup>, В.Е. Назайкинский<sup>1,2</sup>*

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

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

*\*anikin83@inbox.ru*

Исследуется задача Коши с локализованным начальным условием (источником возмущения) для двумерной системы мелкой воды. Такая задача отвечает поршневой модели наката волн цунами на берег. Отношение характерного размера источника к размеру бассейна считается малым параметром, что позволяет применить асимптотические методы. Представлены эффективные (т.е. пригодные для численной реализации) формулы для асимптотических решений линеаризованной системы уравнений мелкой воды. Исследуется вопрос о симметрии набегающей и отраженной волн, изучена связь полученных результатов с результатами Пелиновского-Мазовой. Рассмотрена ситуация, когда источник возмущения является не мгновенным, а распределен по времени. Также изучаются асимптотические решения нелинейного уравнения мелкой воды для случая ровного наклонного дна. Для этого используется замена Кариера—Гринспена по координате, поперечной береговой линии. В результате получается слабонелинейная система, которую можно решать методом Уизема, анзацем при этом служат асимптотики линейной задачи. Полученные асимптотики нелинейной системы мелкой воды легко реализуются на компьютере. Это позволяет анализировать накат цунами в зависимости от модели начального возмущения в режиме онлайн. Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 16-11-10282).

**«TSUNAMI OBSERVER» – АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ  
ЦУНАМИОПАСНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

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

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

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

*\*kolesov@ocean.phys.msu.ru*

На Физическом факультете МГУ создана и с 2018 года функционирует автоматическая система оценки цунамиопасности землетрясения «Tsunami Observer». По оперативным данным о механизме очага землетрясения (используются данные Геофизической службы США (USGS) и Немецкого Центра наук о Земле (GEOFON)) система производит оценку интенсивности возможного цунами по шкале Соловьева-Имамуры. Для этого системой последовательно рассчитываются векторное поле косейсмической деформации дна, начальное возвышение воды в источнике цунами и потенциальная энергия начального возвышения. Для получения связи между потенциальной энергией начального возвышения и интенсивностью цунами было проанализировано более 200 исторических событий для которых известны интенсивность цунами (HTDB/WLD, NGDC/WDS) и механизм очага землетрясения (СМТ, USGS и др.). Для событий с интенсивностью выше заданной пороговой производится гидродинамическое моделирование распространения волн цунами. Результатом работы системы, помимо оценки интенсивности цунами, являются карты косейсмической деформации поверхности дна, начального возвышения в очаге цунами и распределение максимальных высот волн.

В докладе анализируются результаты работы системы с момента начала эксплуатации по настоящее время. Оценки высот волн сопоставляются с данными натуральных наблюдений. Обсуждается качество и оперативность оценок механизма очага землетрясения, полученных от служб USGS и GEOFON.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 19-05-00351.

## **УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА ЦУНАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ОЧАГА И ДИСТАНЦИОННЫХ ТОЧЕК РЕГИСТРАЦИИ**

*Ю.П. Королёв*

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

*Yu\_P\_K@mail.ru*

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.

Несмотря на то, что очаг цунами имеет форму, вытянутую вдоль сейсмического разлома, в оперативном режиме применяется аксиально-симметричный источник.

Вопреки сомнениям, что использование круговых источников при расчете цунами от реального источника сложной структуры может давать адекватный реальному результат, подтверждена работоспособность предложенного способа.

Представлены результаты расчетов, выполненных для ряда цунами. Расчеты выполнены по данным регистрации цунами в различных направлениях относительно очага.

Результаты расчетов хорошо совпадают с реальными формами цунами с точностью, достаточной для оценки степени опасности и принятия решения об объявлении тревоги цунами с необходимой заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу.

## ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВСЕХ СТАДИЙ ЦУНАМИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В РАМКАХ ЕДИНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

*Е.С. Тятюшкина<sup>1,2</sup>, А.С.Козелков<sup>1,2,\*</sup>, В.В. Курулин<sup>2</sup>, О.Л. Крутякова<sup>2</sup>, Д.А. Уткин<sup>2</sup>, К.С. Плыгунова<sup>2</sup>, В.Ю. Герасимов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева»*

<sup>2</sup> *ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ», Нижегородская обл., г. Саров*

*\*askozelkov@mail.ru*

Среди всех природных стихийных бедствий цунами является одним из самых опасных и разрушительных. Для уменьшения риска, смягчения последствий, а также прогнозирования цунами необходимы надежные методы численного моделирования этого явления. Существующие подходы к численному моделированию цунами подразумевают использование принципиально разных математических моделей на стадиях генерации в источнике, распространения в океане и наката волн на сушу. Однако, современный уровень развития вычислительных технологий, которые уже применяются в инженерной практике, позволяет перевести моделирование цунами на качественно новый уровень. Наиболее адекватной гидродинамической моделью, позволяющей учесть особенности оползневых цунами на всех стадиях, является система уравнений Навье-Стокса.

В докладе представлена математическая модель моделирования всех стадий цунами оползневого происхождения в рамках единой математической модели. Основу математической модели составляют трехмерные уравнения Навье-Стокса и метод Volume of Fluid (VOF). Это позволяет единым образом моделировать движение и взаимное влияние оползневой, водной и воздушной сред. Такой подход также позволяет использовать хорошо развитые методы моделирования турбулентности (RANS и LES моделирование).

Построение численного алгоритма решения сформулированной математической модели связано с трудностями. Необходимость моделирования волн небольших амплитуд в протяженных акваториях требует использования существенно анизотропных неструктурированных трехмерных сеток с зонами локального измельчения. Использование сеток такого типа наряду с необходимостью решения многофазной задачи требует особых алгоритмов обеспечения устойчивости счета. Также в условиях переноса малого возмущения на большие расстояния возрастает требования на точность численного

алгоритма. Численный алгоритм, представленный в докладе, основан на итеративном методе типа SIMPLE. Устойчивость решения поставленной задачи обеспечивается за счет использования оригинального метода учета силы тяжести в условиях наличия разрывов в поле плотности среды. Точность алгоритма обеспечена использованием низкодиссипативной схемы BCD для дискретизации уравнения движения и схемой MCICSAM для уравнения объемной доли.

Доклад содержит решение задач верификации численного алгоритма для трех стадий оползневых цунами: возникновение, распространение и накат. В качестве итоговой задачи рассматривается задача об оползневом цунами вблизи о. Сахалин.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9, государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГЕНЕРАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ОКЕАНЕ ПОВЕРХНОСТНЫМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ**

*К.А. Семенцов<sup>1,\*</sup>, С.В. Колесов<sup>1,2</sup>, М.А. Носов<sup>1,2</sup>, В.А. Карпов<sup>1,2</sup>, Х. Матсумото<sup>3</sup>, Й. Канеда<sup>4</sup>*

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

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

<sup>3</sup>*Японское агентство по морским и наземным исследованиям и технологиям (JAMSTEC) Япония, г. Йокосука*

<sup>4</sup>*Институт образования, исследований и кооперации регионов для кризисного менеджмента, Сикоку, Университет Кагава, г. Кагава*

*\*sebbest@yandex.ru*

Записи глубоководных обсерваторий DONET, полученные во время катастрофического землетрясения и цунами Тохоку-оки 11 марта 2011 года, показали, что вскоре после прохождения по дну океана поверхностных сейсмических волн в водном слое наблюдаются свободные поверхностные гравитационные волны. В настоящей работе

представлены результаты численного воспроизведения наблюдаемых гравитационных волн. Для моделирования использовалась комбинированная 2D/3D численная модель, состоящая из динамически сопряженных глубоководного и мелководного блоков. Глубоководный блок решает уравнения линейной потенциальной теории сжимаемой жидкости, записанные в неортогональных сигма-сферических координатах. Мелководный блок основан на теории мелкой воды, он решает волновое уравнение, записанное относительно потенциала скоростей течения в сферических координатах. Пространственно-временной закон движения дна был восстановлен нами на основе записей глубоководных обсерваторий DONET и близлежащих наземных GPS-станций.

Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с данными наблюдений, что свидетельствует о корректной работе модели и подтверждает, что наблюдаемые гравитационные волны возбуждаются именно поверхностной сейсмической волной. Механизмы генерации наблюдаемых гравитационных волн обсуждаются в работе на основе серии численных экспериментов.

## **ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛИННОВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

*А.А. Куркин<sup>\*</sup>, О.Е. Куркина, А.А. Родин, Л.В. Талалушкина, Е.А. Рувинская*

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г. Нижний Новгород*

*\*aakurkin@gmail.com*

В настоящей работе представлены первые результаты лабораторного исследования длинноволновых процессов, а именно: трансформация поверхностных волн при распространении над протяженным подводным шельфом-ступенькой; накат поверхностных волн (одиночная волна, регулярные и нерегулярные волновые пакеты) на берега различных сечений; генерация нелинейной поверхностной и внутренней сейши различных мод; генерация уединенных внутренних волн различной амплитуды и полярности в двухслойной и трехслойной жидкостях; измерения величины придонного

давления при распространении уединенных внутренних волн и давления на вертикальную стенку при их отражении.

Лабораторные эксперименты проводились в гидродинамическом лотке, созданном на базе научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф НГТУ им. Р.Е. Алексеева (общая длина лотка – 7 м, ширина – 0,5 м, высота – 1 м, размер рабочей области – 6,5 м, [http://lmnad.nntu.ru/ru/projects/wave\\_tank/](http://lmnad.nntu.ru/ru/projects/wave_tank/)). Лоток оснащен программируемым волнопродуктором способным совершать колебательные движения в диапазоне частот 0.1-10 Гц с угловой амплитудой до 15 град, а также герметичной вертикальной перегородкой, которая при старте эксперимента поднимается вверх со скоростью 1 м/с (для генерации волн методом гидродинамического коллапса). Имеются несколько съемных модуля для установки на противоположном от волнопродуктора конце бассейна, имитирующих различные профили берега (подводный уступ, наклонный плоский профиль, вертикальная стенка, наклонный модуль со специальным «безотражательным» профилем). Измерительное оборудование экспериментального лотка включает: 22 датчика ПДТК-Р-М (преобразователь давления и температуры кварцевый), при этом специально разработанный и изготовленный комплект креплений позволяет устанавливать датчики в дне лотка, боковых стенках и устанавливаемых дополнительно съемных подвижных и неподвижных конструкциях; систему из 5 емкостных и 5 резистивных волнографов (измерителей смещения уровня жидкости) для регистрации поверхностного волнения; систему видеофиксации, включающую 6 камер Logitech C920, камеру Sony HDR-CX405 и высокоскоростную видеокамеру GO-5000M-PGE. Плотность жидкости, ее температура, динамическая и кинематическая вязкости измеряются с помощью высокоточного вискозиметра Stabinger viscometer SVM 3001.

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 5.4568.2017/6.7 и задание № 5.1246.2017/4.6) и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5.

**ЦУНАМИ-ПОДОБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ У БЕРЕГОВ АНТАРКТИДЫ,  
ВЫЗВАННЫЕ ОТКОЛАМИ АЙСБЕРГОВ**

*Б.Рангелов<sup>1</sup>, В.М.Кайстренко<sup>2,\*</sup>, Дж.Ю. Чунг<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Университет геологии и горного дела, София, Болгария*

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

<sup>3</sup> *Институт океанографии, Сеульский национальный университет, Сеул, Республика  
Корея*

*\*vict-k@mail.ru*

Регулярные отколы айсбергов от ледового покрова Антарктиды вызывают локальные цунами-подобные волны. В период с 1 декабря 2000 года по 10 января 2001 года удалось зарегистрировать 20 таких возмущений уровня высотой до 2 м у побережья Южного залива о. Ливингстона во время проведения Болгарской Антарктической национальной экспедиции (BANE 2000-2001) [Rangelov, 2002]. Заплески таких волн четко отслеживались визуально на берегу вблизи Болгарской Антарктической базы «Св. Климент Охридский», принадлежащей Болгарскому Антарктическому институту Софийского университета. Наблюдения прерывались вследствие непогоды. Замеренные заплески (с точностью 0.1 м) корректировались на прилив. Откол айсбергов также вызывал сейсмический сигнал, регистрировавшийся сейсмографом.

Анализ последовательности цунами-подобных возмущений показал, что она приближенно пуассонова, так же, как и цунами [Geist and Parsons, 2008]. Анализ повторяемости зарегистрированных высот заплесков был проведен по методике, описанной в [Kaistrenko, 2014]. Эмпирическая функция повторяемости, как и в случае сильных цунами, имеет экспоненциальный вид

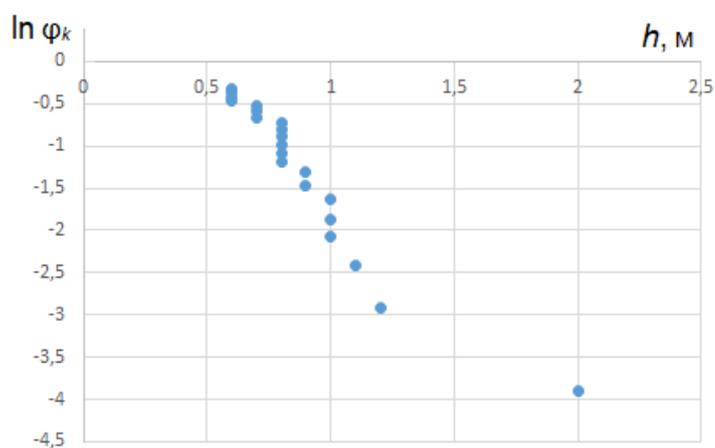


Рис. Эмпирическая функция повторяемости высот цунами-подобных волн, вызванных отколы айсбергов у побережья о. Ливингстона, Антарктида.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Geist, E.L. Distribution of tsunami interevent times / E.L. Geist, T. Parsons // *Geophys. Res. Lett.* – 2008. – Vol. 35, L02612.
2. Kaistrenko, V. Tsunami Recurrence Function: Structure, Methods of Creation, and Application for Tsunami Hazard Estimates / V. Kaistrenko // *Pure Appl. Geophys.* – 2014. – Vol. 171. – P. 3527-3538.
3. Rangelov B. Complex geological and geophysical investigations in Antarctica // *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski". Geology.* Vol.45, part I. Sofia, 2002, P. 117-120.