

На правах рукописи



ЛОСКУТОВ Артём Владимирович

**ДИНАМИКА ВОЛН ЦУНАМИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
ТИХОГО ОКЕАНА НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗ-
МЕРЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Южно-Сахалинск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН).

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Кайстренко Виктор Михайлович

Официальные оппоненты: Камаев Дмитрий Альфредович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск, заведующий лабораторией.

Диденкулова Ирина Игоревна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева", г. Нижний Новгород, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», г. Нижний Новгород.

Защита состоится 05.10.2016 г. в 10-00 на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при ФГБУН Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), ФГБУН Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), ФГБУН Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б) и на сайте www.imgg.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте www.imgg.ru

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03
кандидат физико-математических наук



М.Ю.Андреева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В середине XX века в Тихом океане произошла череда сильнейших подводных землетрясений, вызвавших разрушительные трансокеанские волны – цунами, которые проявились даже в самых удаленных областях, в том числе и на побережье Дальнего Востока РФ: Чилийское цунами 22 мая 1960 г., вызванное сильнейшим историческим землетрясением с рекордной магнитудой $M_w = 9.5$, Камчатское цунами 4 ноября 1952 г., уничтожившее поселок Северо-Курильск, а также катастрофа, которая случилась на Аляске 28 марта 1964 г.

В конце XX и в начале XXI века, после почти полувекового затишья произошла новая серия катастрофических трансокеанских цунами, которая обрушилась на берега России, Японии, Чили, Перу, Индонезии и т.д. Самым губительным и разрушительным стало Суматранское цунами 24 декабря 2004 г. Это цунами было вызвано землетрясением с моментной магнитудой $M_w = 9.1$, очаг которого находился на глубине 30 км. Согласно зарубежным источникам, ущерб составил порядка 10 млрд. долларов США. Погибло свыше 230000 человек, в том числе многочисленные туристы, среди которых были и граждане России. В 2011-м году трагедия Тохoku в Японии обернулась многотысячными человеческими жертвами и разрушениями в наиболее организованной и подготовленной стране мира, обладающей передовыми геофизическими службами мониторинга опасных природных явлений! Катастрофическое цунами было вызвано произошедшим в 05:46 (UTC) землетрясением у восточного побережья острова Хонсю, на глубине 32 км ниже океанского дна, которое стало сильнейшим за всю историю Японии с магнитудой $M_w = 9$, а также одним из шести крупнейших землетрясений за последние 65 лет (1952-2016 гг.), на долю которых приходится более половины всей сейсмической энергии, выделившейся в этот период времени. Другое крупное событие, в серии южноамериканских цунами, произошло ранее на юго-востоке у берегов Чили – землетрясение 27 февраля 2010 г. магнитудой $M_w = 8.8$ вызвало трансокеанское цунами, также унесшее человеческие жизни и причинившее материальный ущерб в близлежащих районах. Это цунами отчетливо проявилось на берегах Камчатки, Курильских островов, Сахалина и Японии. За несколько месяцев до него Самоанское цунами 29 сентября 2009 г. также повлекло человеческие жертвы и материальные убытки.

С точки зрения физики длинных гравитационных волн в океане, цунами – явление довольно хорошо изученное, но с точки зрения конкретных геофизических проявлений в той или иной части океана, и в осо-

бенности на реальном шельфе, каждое цунами проявляется с ярко выраженными особенностями, механизмы формирования которых требуют детального исследования и моделирования с использованием современных наблюдений и технологий.

В настоящее время наметился значительный прогресс в области прикладных исследований, посвященных проблеме цунами. Современные глубоководные измерительные системы позволяют измерять как сильные цунами, так и слабые с точностью до 1 мм. Наличие таких глубоководных измерений позволяет изучать характеристики цунами в чистом виде (дисперсию, затухание), без наложения пограничных эффектов, с одной стороны, а с другой – интенсивно развивающиеся прибрежные автономные и кабельные сети регистраторов придонного давления дают возможность оценивать вклад, который вносится топографическими особенностями шельфовой зоны в результирующее проявление цунами на побережье (сейши, тягуны и т.д.).

В свою очередь, современные данные сейсмологических наблюдений цунамигенных землетрясений, с их широчайшим покрытием, и данные измерений геодеформационных процессов со спутников позволяют с достаточно высокой точностью моделировать очаг цунами – наименее изученную часть этого явления.

В данной работе с использованием глубоководных записей DART, данных прибрежных измерений уровня моря на базе ИМГиГ ДВО РАН и телеметрических регистраторов Сахалинской службы предупреждения о цунами (СПЦ), а также на основе численного моделирования распространения цунами в северо-западной части Тихого океана исследовались особенности динамики наиболее значительных цунами за последнее десятилетие.

Цель данной работы – объяснить физические особенности трансформации волн цунами в северо-западной части Тихого океана и в его прибрежной зоне, используя современную сейсмическую модель очага и данные инструментальных измерений на примере последних исторических цунами.

Для достижения цели работы решались следующие **задачи**:

- 1) Обработка и анализ цифровых записей колебаний уровня, содержащих цунами с сервиса доступа к глубоководным станциям NOAA DART в открытом океане
- 2) Обработка и анализ цифровых записей колебаний уровня, содержащих цунами и фоновые колебания, с прибрежных донных станций ИМГиГ ДВО РАН и СПЦ
- 3) Адаптация численной модели распространения цунами, с использованием современной модели сейсмического очага цунами;

- 4) Анализ направленности излучения источника с учетом рельефа океанского дна при помощи численного эксперимента;
- 5) Анализ трансформации волнового поля цунами в северо-западной части Тихого океана с учетом эффектов волновой дисперсии;
- 6) Определение пространственно-временной структуры резонансных колебаний в заливах и бухтах о. Сахалин и Курильских островов.

Научная новизна заключается в выявлении и анализе особенностей локальных проявлений наиболее значительных цунами последнего десятилетия, а именно Самоанского цунами 29 сентября 2009 г., Чилийского трансокеанского цунами 28 февраля 2010 г. и катастрофического Тохоку цунами 11 марта 2011 г. Кроме того, для детального анализа эффектов волновой дисперсии рассмотрен ряд цунами малой силы.

Выявлены и объяснены особенности формирования волнового поля в северо-западной части Тихого океана, изучено влияние направленности источников цунами и неоднородности донного рельефа океана на трансформацию волнового поля цунами. При исследовании этих исторических событий впервые применены современные методики вычислительного эксперимента с использованием последних данных о сейсмической природе очага цунами. Подробно рассмотрены эффекты волновой дисперсии, анализ которых был применен в задаче инверсии глубоководных волнограмм для оценки параметров источника слабых цунами. Впервые рассчитаны параметры собственных колебаний ряда бухт о. Шикотан и заливов о. Сахалин, применена эффективная методика расчета пространственных структур сейшевых колебаний.

Практическая значимость во многом определяется научной новизной результатов работы и заключается в объективной оценке физических проявлений возможных цунами, как близких, так и удаленных, что дает вклад в основную задачу долгосрочного прогноза опасности цунами для побережья Дальнего Востока РФ.

Апробация результатов

Результаты, представленные в работе, освещались на следующих отечественных и международных научных собраниях:

1. V Конференция молодых ученых «Океанологические исследования», 2011 г., ТОИ ДВО РАН, Владивосток, Россия.
2. 24th International Tsunami Symposium of the IUGG Tsunami Commission, Technical Workshop on Tsunami Measurements and Real-time Detection, Novosibirsk, Russia, July 13-18, 2009: Programme and abstracts.P.102

3. XXV International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne, Australia, 2011
4. European Seismological Commission 33rd General Assembly, 19-24 August, Moscow - Obninsk, Russia, 2012. P.438.
5. Int.Tsunami Symposium, 2013 Symposium, 25-28 September 2013. Gocek, Turkey. Abstracts. P.34.
6. Joint Assembly IAHS-IAPSO-IASPEI, 22-26 July 2013, Gothenburg, Sweden, и др.

Личный вклад автора

В рамках данной диссертационной работы автором лично была проделана кропотливая работа по подготовке и обработке данных инструментальных измерений. Лично автором проводился расчет спектральных характеристик сигналов цунами и сравнение их с частотными параметрами естественного длинноволнового шума, осуществлялся гармонический анализ приливных компонент в записях. Автором применялись реализованные им методы анализа и моделирования случайных временных рядов для оценки резонансных компонент колебаний уровня в прибрежной зоне. Автором была решена проблема эффективного моделирования распространения цунами с использованием современной модели сейсмического источника, для решения этой задачи автором привлекались самые современные вычислительные средства, такие как CUDA и OpenMP. Все результаты систематизировались и визуализировались усилиями автора данной работы. Также автор принимал непосредственное участие в формировании идей и публикаций по теме работы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 13-05-00936 А «Особенности формирования морских опасных явлений в случае суперпозиции нескольких составляющих и оценка экстремальных высот уровня и скоростей течений» и РФФИ 13-07-00412 А «Информационная технология и программные средства анализа и оперативного прогнозирования цунами» и др., а также при поддержке ФЦП 14.607.21.0105 «Разработка программно-технических решений в области мониторинга и управления сейсмическими рисками природного и техногенного характеров при промышленном освоении шельфовых нефтегазовых месторождений».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. В объеме работы (115 страниц) содержится 73 рисунка и 1 таблица.

Защищаемые положения являются обобщением основных результатов работы и состоят в следующем:

1. На основе современных сейсмических данных об очаге подводного землетрясения, адаптирована численная модель распространения цунами, адекватно описывающая направленность излучения источника и особенности формирования волнового поля в северо-западной части Тихого океана.

2. Волновая картина цунами в северо-западной части Тихого океана в значительной степени обусловлена фокусировкой при прохождении протяженных хребтов, а также влиянием волновой дисперсии.

3. Результирующее волновое поле в прибрежной зоне Дальневосточного региона определяется трансформацией сигнала цунами на внешней границе шельфа и резонансными эффектами в заливах и бухтах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **главе 1** делается краткий обзор методики анализа данных, численного моделирования и инструментальных измерений, используемых в работе.

В **п.1.1** в качестве основной модели генерации и распространения волн цунами как в открытом океане, так и на шельфе в данной работе была принята классическая линейная модель мелкой воды на сферической поверхности Земли без учета вращения. Система уравнений в географических (сферических) координатах, описывающая данную модель, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} &= 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} &= 0, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (Q \cos \varphi) \right\} &= 0, \\ \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0, P_n = Q_n &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где P , Q – горизонтальные компоненты потока жидкости, $\eta(\lambda, \varphi, t)$ – возвышение свободной поверхности, h – глубина бассейна с невозмущенной свободной поверхностью.

Также здесь описывается теоретическая основа численного метода обращения сигналов цунами вида

$$\eta_0(t) = \eta(r_0, t) \quad (2)$$

посредством обращения интегрального представления решения задачи Коши для модели Пуассона:

$$\eta(r, t) = \int_0^{\infty} k J_0(kr) \{h_0(k) \cos \omega(k)(t - t_0)\} dk \quad (3)$$

где r – расстояние от источника до места наблюдения сигнала, $h_0(k)$ – трансформанта Ханкеля для функции $s(\lambda, \varphi)$, $\omega(k)$ – угловая частота, зависящая от волнового числа по закону

$$\omega^2 = gk \operatorname{th} kH \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, k – волновое число, ω – угловая частота волновой компоненты.

В п. 1.2 дается описание техники численного моделирования генерации и распространения цунами, и ее применение для анализа конкретных проявлений цунами, а также для объяснения особенностей формирования волнового поля при цунами.

Отмечается использование расчета остаточных смещений по формулам, позволяющего выйти на новый уровень численного моделирования начальных условий в очаге цунами по данным USGS о структуре подвижки в эпицентре подводного землетрясения, что позволяет построить сложные модели остаточных деформаций океанского дна (рисунок 1).

Поскольку изучение реальных цунами в значительной мере базируется на натурных наблюдениях за уровнем моря, в п. 1.3 дается описание основных инструментальных измерений цунами в прибрежной зоне и в открытом океане в ИМГиГ ДВО РАН, а также привлекаемые данные глубоководных измерений посредством регистраторов цунами NOAA DART. Показана роль прибрежных измерений в изысканиях по длинноволновой динамике как прибрежной зоны, так и открытого океана, и то, как получаемый материал используется, в частности, для анализа проявлений реальных цунами на побережье, позволяя анализировать особенности проявлений цунами, зависящие от характера донного рельефа и береговой линии, а также бухтовые эффекты, сопровождающие цунами. Также даны ссылки на традиционно используемые методы анализа временных океанографических рядов применительно к проблеме цунами.

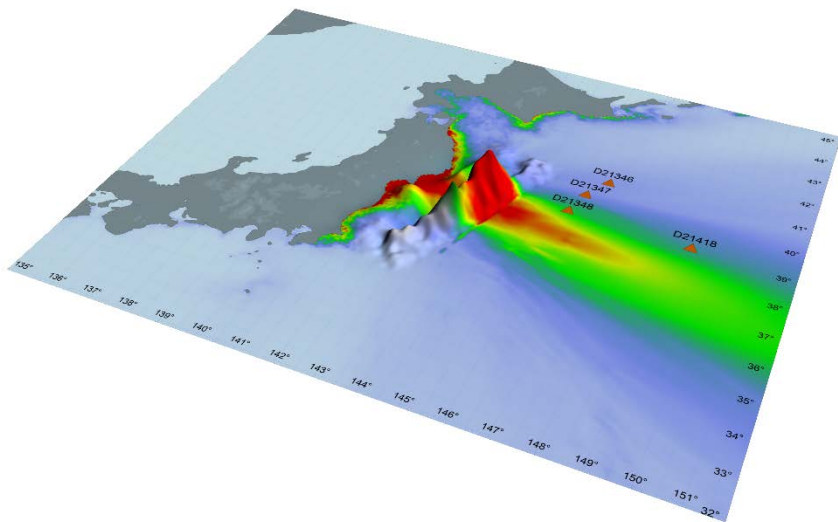


Рисунок 1 – Модель источника Тохоку цунами 2011 г. Показано расположение близлежащих станций NOAA DART, цветовым градиентом отображено распределение энергии излучения, полученное при численном моделировании с использованием сейсмической модели источника.

В главе 2, посвященной анализу генерации и направленности энергии волнового поля наиболее значительных исторических цунами рассматриваются уже исторические события, произошедшие за последнее десятилетие и оказавшие ощутимое воздействие на побережье Дальнего востока РФ, так в п. 2.1 внимание уделено достаточно крупному Самоа цунами 29 сентября 2009 года, при котором, несмотря на значительный ущерб на архипелаге Самоа, на Российском тихоокеанском побережье не было замечено жертв или ущерба, тем не менее это цунами имело ярко выраженные высокочастотные свойства и проявилось в виде усиления резонансных колебаний в бухтах Южных Курильских островов.

В п. 2.2 было рассмотрено уже трансокеанское Чилийское цунами 27 февраля 2010 года. При этом цунами были зарегистрированы опасные волны с высотой около 2 метров на тихоокеанском побережье Северных и Южных Курильских островов. Была объявлена тревога цунами, причем в Северо-Курильске действительно опасная волна высотой 228 см пришла через 4 часа после первых, совсем слабых колебаний. К этому времени был дан отбой тревоги цунами, и только по счастливой случайности никто из местных жителей не пострадал. Вопрос о формировании

волны в данном районе и причинах ее позднего прихода в Северо-Курильск представлял значительный интерес. Для анализа этих и других особенностей проявления Чилийского цунами 2010 г. вследствие особенностей формирования волнового поля в северо-западной части Тихого океана, для численного моделирования также была построена модель сейсмического источника.

В п. 2.3 анализ проводился для катастрофического Тохоку цунами 11 марта 2011 года. Это цунами было вызвано одним из сильнейших за историю Японии землетрясением ($M_w = 9.0$, $H=32$ км), которое произошло в 05:46 UTC к северо-востоку от о. Хонсю. Это цунами, имевшее катастрофические последствия на тихоокеанском побережье Хонсю, послужившее причиной крупнейшей аварии на АЭС «Фукусима-1», не прошло незамеченно и для тихоокеанского побережья России, где была объявлена тревога цунами, которая оправдалась – высоты волн в окрестностях населенных пунктов на побережье Курильской гряды достигали 2–2.5 м. Особенностью этого цунами был взлом ледяного покрова в бухтах и устьях рек и выброс тяжелого льда на берег.

На основе численного моделирования и анализа материалов инструментальных измерений были рассмотрены вопросы влияния направленности источника Тохоку цунами на особенности формирования волнового поля (высоты и периоды волн) на побережье Дальневосточного региона России.

В главе 3 более детально рассматриваются особенности распространения цунами в открытом океане.

В п. 3.1 обсуждается влияние топографии дна на результирующее волновое поле цунами в северо-западной части Тихого океана на примере Чилийского цунами 28 февраля 2010 г. Здесь выделяются эффекты задержки волн в определенных направлениях и формирования вторичных волновых пакетов (рисунок 2). Объясняется увеличение временного сдвига между первой слабой волной и опасной в Севере-Курильске до 4 часов по сравнению с 2 часами на DART 21416. Приводятся результаты численного моделирования, показывающие причину, по которой в западной части Алеутских островов, на Командорских островах и в районе Петропавловска-Камчатского наблюдались сравнительно слабые волны. При этом на Средних Курилах, куда изначально пришли более слабые волны, резонансное усиление выражено слабо, так как шельф здесь короткий и приглубый.

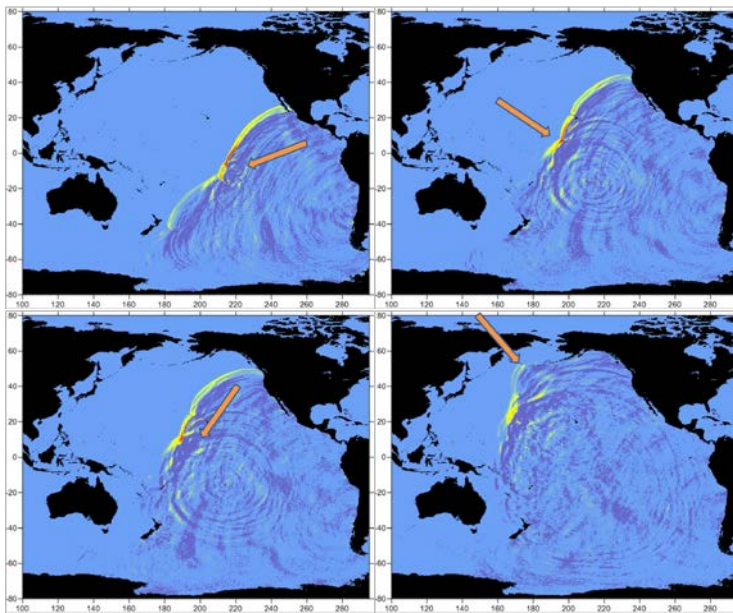


Рисунок 2 – Расчет трансформации Чилийского цунами 27.02.2010 г. Моменты формирования особенностей волнового поля отмечены стрелками.

В п. 3.2 проводится анализ и выявление эффектов волновой дисперсии для мелкомасштабных событий, таких как Бонинское цунами, 21 декабря 2010 г., Хонсю цунами 7 декабря 2012 г. и Японское цунами 25 октября 2013 г., которые не были, вероятно, разрушительными или смертоносными, но записи которых содержат отчетливую волновую дисперсию. Волновая дисперсия – это важное физическое явление, которое нужно учитывать при детальном исследовании цунами. Многие авторы отмечали наличие дисперсионных эффектов при распространении крупных цунами по данным регистраторов уровня или спутниковой альтиметрии. В целом мелкомасштабные цунами должны испытывать более явную волновую дисперсию, эффект от которой состоит в разбегании компонент волнового пакета с разными частотами, что приводит к трансформации волнового поля в ходе его распространения даже в условиях относительно гладких участков подстилающего дна океана. Используя волновой профиль как начальное условие, была сделана попытка восстановить пространственную конфигурацию волнового пакета, а по нему уже восстановить и параметры источника в линейном приближении для цилиндрических потенциальных волн.

В заключительной **4-й главе** проводится анализ проявлений цунами на шельфе и прилегающих акваториях.

В п. 4.1 наглядно показывается трансформация волнового пакета на границе шельф-материковый склон на примере Тохоку цунами 11 марта 2011 г. Это явилось одной из самых интересных особенностей этого цунами, так как трансформация волнового поля при распространении из глубоководной части на шельф была весьма сильная. Эффект трансформации отчетливо проявился на прибрежных записях по сравнению с глубоководными записями DART в районе Курильских островов, где колебания представляли собой почти одиночный импульс амплитудой около 1 м, в то время как пришедшая на шельф волна цунами проявилась в виде длинных волновых пакетов, причем максимальные амплитуды достигались не при вступлении, а через несколько часов, и в некоторых пунктах – после отмены тревоги.

Трансформация волнового пакета обусловлена прежде всего резонансом при отражении на шельфе и захватом волновой энергии. Для выяснения физических условий и пространственного масштаба этой трансформации был проведен численный эксперимент с использованием детальной батиметрии Охотского моря и прилегающего к Курильским островам шельфа с шагом 0.5 угловой минуты.

Моделирование распространения цунами производилось на временном отрезке 48 часов, достаточном для проникновения цунами глубоко в Охотское море и установления квазистационарного режима колебаний в шельфовой зоне. С помощью моделирования было показано, что существенное изменение формы сигнала и его усиления происходят при наличии достаточно протяженного шельфа до глубин 100–300 м, что для различных участков отвечает шельфовой кромке. При отсутствии выраженной шельфовой зоны, качественной перестройки волнового поля цунами не происходит, а наблюдается лишь усиление волны, пришедшей из открытого океана.

В п. 4.2 подробно изучались резонансные свойства заливов и бухт о. Сахалин, о. Симушир и о. Шикотан, применительно к вопросу об усилении естественных длинноволновых колебаний в бухтах при цунами.

Естественные акватории типа залива или бухты обычно представляют собой бассейны с относительно пологим дном и открытой жидкой границей, через которую происходит захват и излучение волновой энергии. Система такого типа представляет собой резонатор, который имеет вполне определенный набор собственных колебаний – стоячих волн фиксированного периода и устойчивой пространственной структуры: положения пучностей и узловых линий волновой поверхности.

Пространственная структура собственных колебаний бухты, прежде всего самой низкочастотной моды, представляет значительный интерес, и для ее изучения было выполнено численное моделирование.

В п. 4.3. те же методы применяются в исследовании крупномасштабных резонансных колебания в заливах о. Сахалин. Заливы также можно рассматривать как колебательные системы, подверженные резонансу, но если резонанс в бухте или порту в виде сейш и тягуна поддается гашению с помощью молов или других защитных конструкций, то трудно себе представить, как возможно подавить разбушевавшиеся резонансные колебания крупного залива. Именно наличие таких заливов является характерной особенностью физико-географических условий о. Сахалин, на севере и юге которого находятся обширные, глубоко вдающиеся в сушу заливы Сахалинский и Анива, а в юго-восточной части – залив Терпения.

В таких крупных бассейнах резонансные колебания имеют гораздо большие, чем в более мелких заливах и бухтах, периоды и пространственные масштабы, соответственно они обладают огромной энергией и разрушительной силой. Но для их возбуждения требуется и значительное внешнее воздействие, поэтому они могут возникать только при сильных цунами и штормовых нагонах. В силу этого, изучение структуры и особенностей возбуждения подобных колебаний представляет значительный научный интерес.

Для залива Анива были рассчитаны пространственные структуры амплитуд и фаз колебаний на периодах 4.9 ч, 2.9 ч. Здесь получена наиболее богатая модовая структура резонансных колебаний (рисунок 3).

В заключении говорится о том, что для выявления закономерностей трансформации цунами в открытом океане и на шельфе, кроме анализа инструментальных данных, было выполнено численное моделирование распространения волн с использованием современной модели сейсмического очага цунами. И далее перечисляются основные результаты работы:

1. Пространственные масштабы и асимметрия источников цунами, как показывает модель, определяют направленность и частотный диапазон излучения. Самоа цунами проявило почти равномерное распределение энергии по направлению, со смещением максимума энергии в высокочастотную область спектра, а Чилийское цунами и Тохоку цунами, обладая выраженными главными направлениями излучения в сторону открытого океана почти нормально к линии берега, проявились в очень широком диапазоне частот.

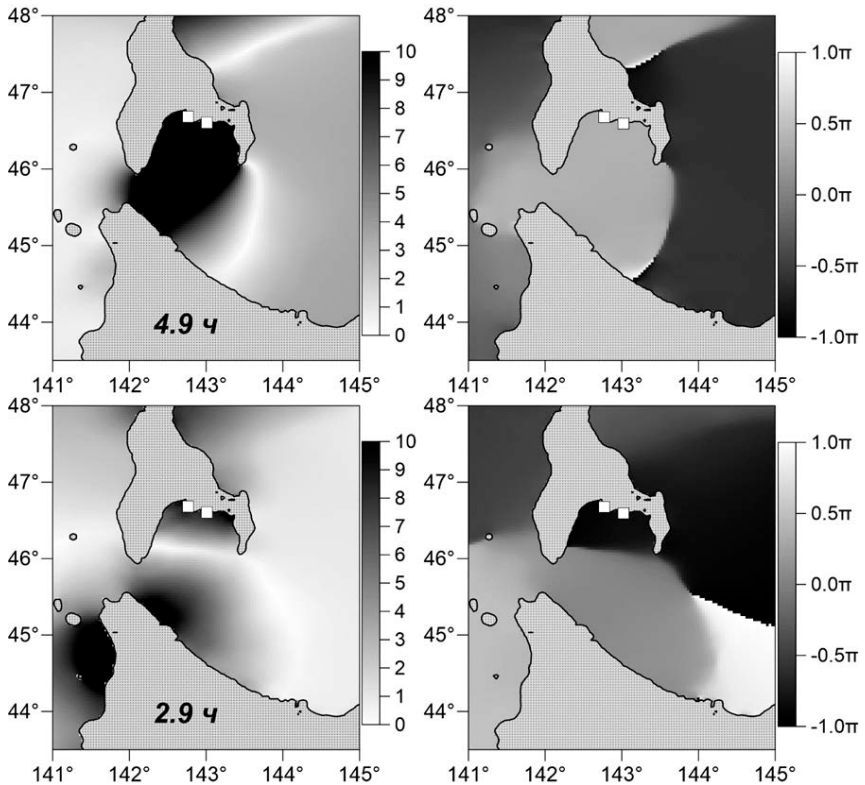


Рисунок 3 – Рассчитанное распределение амплитуд и фаз колебаний в заливе Анива на периодах, отвечающих спектральным максимумам наблюдений. Узловые линии сейш показаны пунктирными линиями.

2. Проявление эффекта позднего добегаия максимальной волны (задержка около 4 ч.) при Чилийском цунами 2010 г. в п. Северо-Курильск обусловлено задержкой волнового пакета при последовательных фокусировке и дифракции на Императорском хребте, Маркизовских островах, архипелаге Лайн и др. в центральной части Тихого океана. Такой эффект, вероятно, будет проявляться при других цунами, зарождающихся у берегов Южной-Америки.

3. Выявлен дисперсионный характер записей некоторых небольших цунами, а также обнаружено проявление дисперсионных эффектов Тохуку цунами в направлении короткой оси очага. В рамках приближенной осесимметричной модели источника и уравнения Пуассона, рассчитаны

профили начального возвышения для нескольких небольших цунами. Получено хорошее соответствие восстановленного профиля и сейсмической модели источника Бонинского цунами по данным USGS.

4. На основе численного эксперимента показано, что усложнение, стохастизация и усиление сигнала цунами в записях прибрежных донных станции по сравнению с записями станций DART, обусловлены резонансным взаимодействием волнового пакета цунами и шельфа, которое начинает резко проявляться на его внешней границе на в районе изобаты 100-200 м.

5. Определены резонансные периоды, оценена добротность и рассчитаны пространственные структуры собственных мод ряда бухт Курильских островов с различной геометрией и шириной входа (б. Крабовая, б. Церковная, б. Хромова, о. Шикотан, б. Броутона, о. Симушир), кроме того рассчитаны пространственно-временные характеристики собственных мод заливов Анива, Сахалинский и Терпения (о. Сахалин).

6. Для Самоанского (2009), Чилийского (2010) и Тохоку (2011) цунами рассчитаны спектральные характеристики записей, которые сопоставлены со спектрами естественного длинноволнового фона для береговых и глубоководных станций. Оценены диапазоны проявления и преобладающие периоды колебаний. Выявлено, что на береговых станциях спектры определялись эффектами, обусловленные характером локальной топографии.

Статьи автора, опубликованные в изданиях перечня ВАК

1. Tsunami measurements in bays of Shikotan Island / G. Shevchenko, A. Shishkin, G. Bogdanov, A. Loskutov // *Pure and Applied Geophysics*. – 2011. – Vol. 168, № 11. – P. 2011-2021.
2. The tsunamis of January 3, 2009 in Indonesia and of January 15, 2009 in Simushir as recorded in the South Kuril Islands / G.V. Shevchenko, A.G. Chernov, P.D. Kovalev, D.P. Kovalev, O.N. Likhacheva, A.V. Loskutov, A.A. Shishkin // *Science of Tsunami Hazards*. – 2011. – Vol. 30, № 1. – P. 43-61.
3. The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia // G. Shevchenko, T. Ivelskaya, A. Loskutov, A. Shishkin // *Pure and Applied Geophysics*. – 2012. – Vol. 170, № 9. – P. 1511-1527.
4. Регистрация цунами у берегов Сахалина и Курильских островов / Г.В.Шевченко, П.Д.Ковалев, Г.С.Богданов, А.А.Шишкин, А.В.Лоскутов, А.Г.Чернов // *Вестник ДВО РАН*. – 2008. – № 6. – С. 23.

5. The 2009 Samoan and 2010 Chilean tsunamis recorded on the Pacific coast of Russia / G. Shevchenko, T. Ivelskaya, A. Loskutov, A. Shishkin // *Pure and Applied Geophysics*. – 2013. – Vol. 170, № 9/10. – P. 1511-1527.
6. Tsunami Forerunner of the 2011 Tohoku Earthquake Observed in the Sea of Japan / S. Murotani, M. Iwai, K.Satake, G. Shevchenko, A. Loskutov // *Pure and Applied Geophysics*. – 2015. – Vol. 172, № 3. – P. 683-697.
7. Shevchenko, G.V. Instrumental measurements of 2009–2011 tsunamis on the Russian Pacific coast / G.V. Shevchenko, T.N. Ivelskaya, A.V. Loskutov // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2014. – Vol. 50, № 5. – P. 459-473.
8. Shevchenko, G. Characteristics of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Russian Far East Coast: Deep-Water and Coastal Observations / G. Shevchenko, T. Ivelskaya, A. Loskutov // *Pure and Applied Geophysics*. – 2014. – Vol. 171, № 12. – P. 3329-3350.