

Лоскутов Артём Владимирович

Родился в 25 декабря 1986 в Южно-Сахалинске и вырос в научной среде ИМГиГ ДВО РАН. Окончив с отличием среднюю школу, поступил на физико-математический факультет в Сахалинского государственного университета. В 2007 г., будучи студентом факультета математики физики и информатики Сахалинского государственного университета был принят на работу в качестве техника лаборатории цунами. При этом сразу же был вовлечен в научную работу под началом тогдашнего заведующего лабораторией – Кайстренко Виктора Михайловича. После успешного окончания обучения в СахГУ был зачислен в аспирантуру ИМГиГ по специальности 25.00.29 «Физика океана и атмосферы». Научным руководителем стал к.ф.-м.н. Кайстренко В. М.



Текущая научная работа Лоскутова А. В. связана с теоретическим исследованием цунами. Кроме того, автор имеет навыки в теории и практике обработки случайных данных, численном моделировании цунами и программировании. К настоящему времени у автора имеются публикации в отечественных и иностранных научных журналах, а также опыт выступления на региональных и местных конференциях.

В 2013 г. Артем Лоскутов готовится к защите диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук по теме: «Исследование цунами по данным глубоководных датчиков DART».

УДК 551.466.62

А. В. ЛОСКУТОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦУНАМИ ПО ДАННЫМ ГЛУБОКОВОДНЫХ И ПРИБРЕЖНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ

Рассматриваются некоторые аспекты натурных измерений уровня моря на примере сети донных регистраторов ИМГиГ ДВО РАН в прибрежной зоне во взаимосвязи с регистрацией цунами в открытом океане системой DART. Отмечены возможности теоретического анализа длинных гравитационных волн по натурным записям и роль подобных измерений в проблеме заблаговременного предупреждения и моделирования цунами. Отражены некоторые результаты исследования цунами с использованием уровенных данных.

Ключевые слова: цунами, уровень моря, донный датчик, источник, DART, дисперсия, спектры, численное моделирование, запись, сигнал, вейвлеты.

Tsunami study by data of deep-sea and near-shore gauges. A. V. LOSKUTOV
(Institute of marine geology and geophysics Far East branch of Russian academy of sciences)

Consider some aspects of measurements of sea level on the example of the network of bottom pressure gauges of IMGGE FEB RAS in the coastal zone in relation to tsunami registration in the open ocean by DART system. Possibilities for theoretical analysis of long gravity waves based on gauge records and its role in the problem of early warning and modeling of tsunami are shown. Some results of tsunami studies using sea-level data are shown.

Key words: tsunamis, sea level, bottom gauge, source, DART, dispersion, spectra, numerical simulation, recording, signal, wavelets.

Введение

Изучение реальных цунами в значительной мере базируется на натурных наблюдениях за уровнем моря. Многие исследовательские центры в России и за рубежом, занимающиеся проблемой цунами, используют измерительные комплексы, поставляющие натуральный материал по длинноволновой динамике как прибрежной зоны так и открытого океана. Так например, в ИМГиГ совместно лабораториями цунами и волновой динамики создана и поддерживается исследовательская сеть донных датчиков гидростатического давления в прибрежной зоне и на шельфе Сахалина и Курильских островов [11]. Эта система позволяет отслеживать динамику волн в широком диапазоне частот – от ветровых до приливных. И, конечно, сеть датчиков ИМГиГ позволила успешно зарегистрировать несколько цунами.

Получаемый материал используется для анализа проявлений уже случившихся цунами на побережье, позволяя изучать особенности проявлений цунами, зависящие от характера прибрежной батиметрии и береговой линии, а также бухтовые эффекты, сопровождающие цунами. Однако для целей Службы цунами необходима регистрация цунами на значительном удалении от побережья, задолго до подхода волны к побережью для того, чтобы заблаговременно предупредить население о надвигающейся с океана угрозе.

В настоящее время функционирует сеть глубоководных станций – DART NOAA (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis by National Oceanic and Atmospheric Administration). Эта современная сеть, развернутая преимущественно усилиями США, осуществляет наблюдения за уровнем в открытом океане в реальном времени более чем в 50 пунктах, расположенных из соображений заблаговременности и информативности, необходимых для Службы цунами. В дополнение к «служебным» функциям система датчиков DART предоставляет высококачественные данные о колебаниях уровня моря, поскольку датчики, расположенные на больших глубинах вдали от берега, дают

записи, не искаженные шельфовыми эффектами. Такие данные наиболее пригодны для решения «обратных» задач на оценку параметров исходного возмущения в очаге цунами.

В данной работе приведен ряд результатов с использованием прибрежных и глубоководных уровенных данных.

Сеть регистраторов уровня ИМГиГ ДВО РАН

В 60- 70-х годах прошлого века ИМГиГ ДВО РАН (ранее САХНИИ ДВНЦ АН СССР) стал пионером в области разработки и проведения натурных измерений уровня моря на различном удалении от берега посредством донных регистраторов давления [10]. Первые работы по регистрации цунами в океане проводились по инициативе академика С. Л. Соловьева на Гидрофизической обсерватории (ГФО), созданной на о. Шикотан. Разработчиком первых регистраторов цунами был В. М. Жак. 23 февраля 1980 г. на шельфе о. Шикотан была осуществлена первая в мире регистрация цунами в открытом океане при помощи кабельной станции [2].

В тяжелые 90-е годы регистрация уровня проводилась только эпизодически в некоторых бухтах южных Курильских островов. С 2006 года ИМГиГ ДВО РАН начал создавать сеть уровенной регистрации на новой приборной основе, и на настоящий момент на Сахалине и Курильских островах существует сеть кабельных и автономных регистраторов уровня (рис. 1). В целом конфигурация сети изменяется согласно решаемым задачам, однако в ряде пунктов поддерживается непрерывная регистрация уровня. В ходе этих измерений были получены прекрасные записи (рис. 2) колебаний уровня, вызванных цунами последних лет [11, 13, 14, 15].



Рис. 1. Часть исследовательской сети непрерывной уровенной регистрации ИМГиГ ДВО РАН на Южных Курильских островах (кабельные станции – синие квадраты, автономные – красные круги).

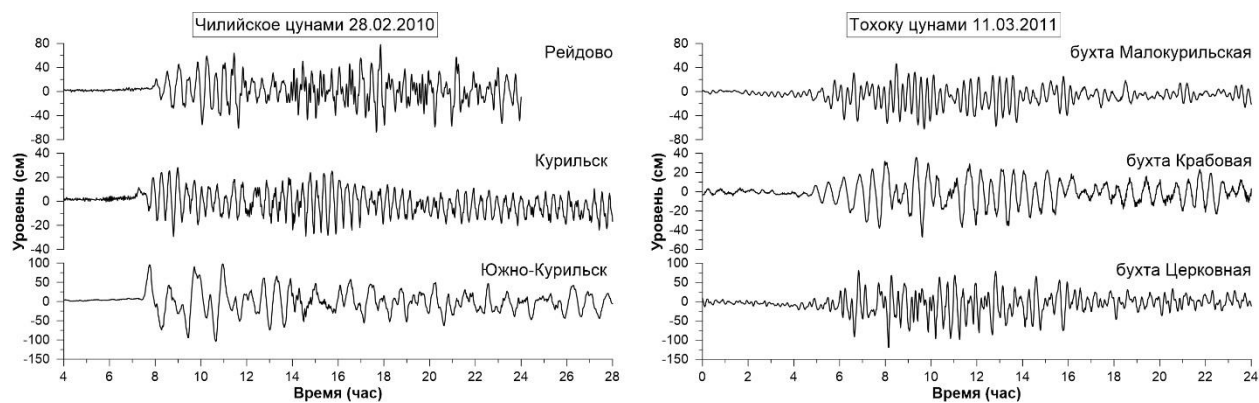


Рис. 2. Примеры записей Чилийского цунами 27 февраля 2010 г (слева) и Тохоку цунами 11 марта 2011 г. (справа) полученные датчиками сети ИМГиГ на Курильских островах.

Система DART PMEL NOAA

Чтобы обеспечить раннюю регистрацию цунами и получать важную информацию для прогнозирования цунами в реальном времени, в лаборатории

PMEL NOAA в 90-х годах прошлого века были разработаны первые глубоководные станции DART и начали вводиться в эксплуатацию в североамериканской части Тихого океана в районах с богатой цунамигенной историей. Постановка первой серии из 6 станций была завершена в 2001 г. В марте 2008 г. сеть была расширена уже до 39 станций по всему Тихому океану. В настоящее время имеется 58 станций: 6 в Индийском океане, 6 в Атлантическом океане и 46 в Тихом (рис. 3).

Каждая станция DART состоит из покоящегося дне датчика давления воды и температуры, и поверхностного буйа закрепленного около данной станции тяжелым якорем. В буй вмонтировано передающее устройство (рис. 3).

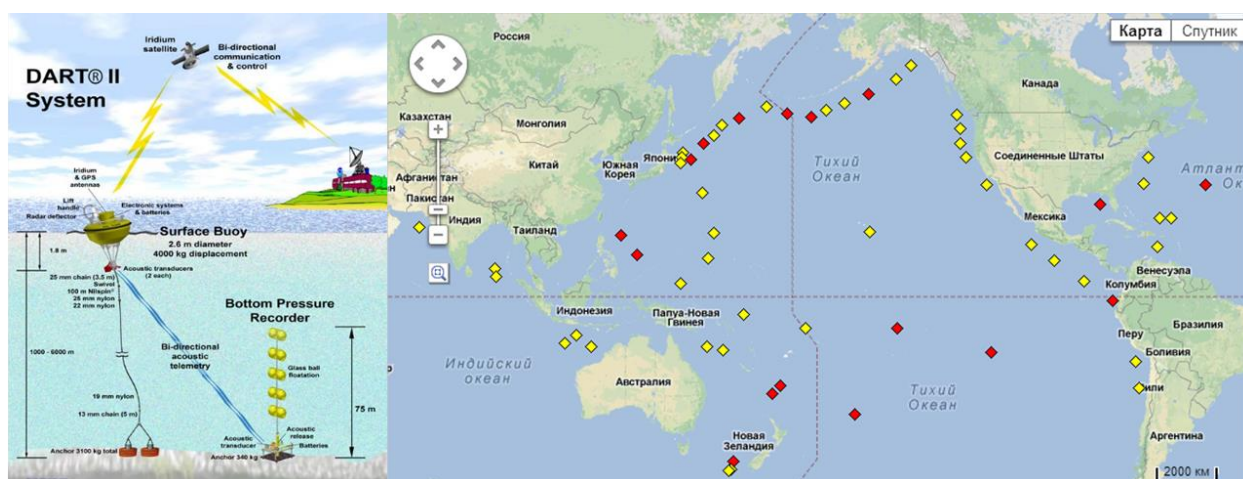


Рис. 3. Расположение станций DART в мировом океане на 2013 г.

Донный датчик, измеряя давление и температуру каждые 15 с, обрабатывает и передает информацию посредством акустического сигнала на буй, который, в свою очередь, передает информацию по спутниковому каналу связи в центры оповещения цунами. Благодаря эффективному встроенному алгоритму распознавания цунамиподобных возмущений система DART с высокой надежностью выдает сигнал о возможном цунами. Так, ни одно из крупных событий последнего десятилетия не было упущено, и по ним получены превосходные записи цунами. Кроме этого, система DART способна регистрировать (с искажениями) приходящие поверхностные волны Рэлея, которые создают высокочастотные колебания давления. Важно, что на записях отчетливо

видны моменты вступления сейсмических волн и последующих волн цунами (рис. 4).

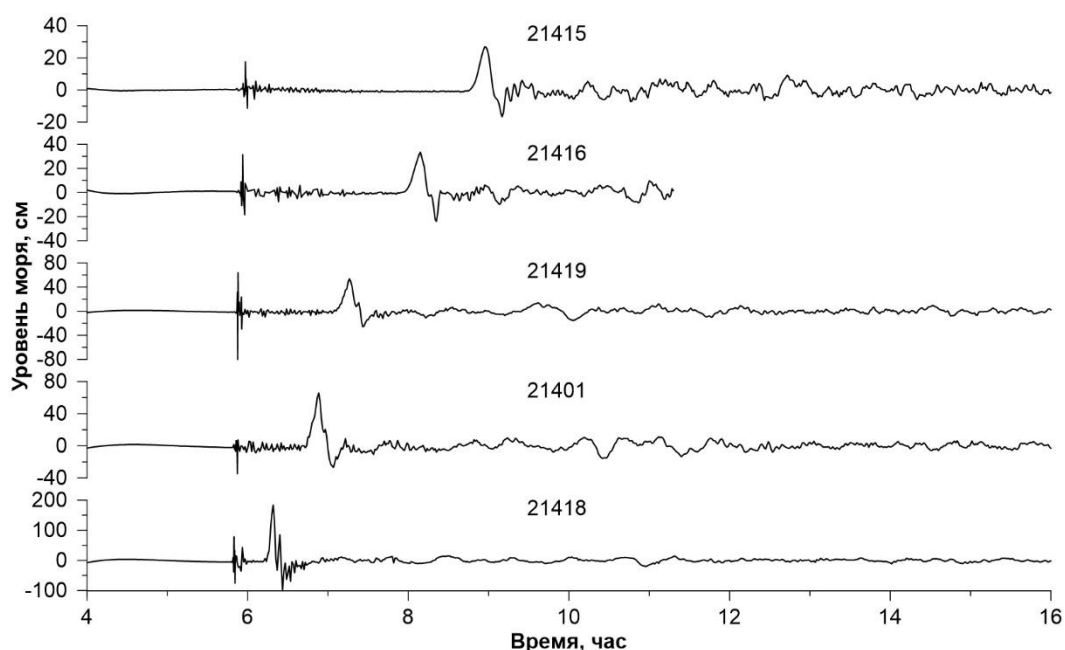


Рис. 4. Записи Тохоку цунами 11.03.2011 в Курило-Японской части Тихого океана.

Обработка и анализ материалов

Измерения уровня в диапазоне длинных волн с помощью датчиков давления, используемых в системе DART и регистраторах ИМГиГ, основано на пересчете регистрируемого давления воды на дне в возвышение свободной поверхности океана над невозмущённым положением уровня. В типовом режиме работы внутренняя система регистраторов ИМГиГ производит измерение давления с периодом порядка 1 с, фильтрует короткопериодные колебания в рядах полученных значений и записывает итоговые данные с периодом порядка 15–60 с. Для изучения ветрового и сопутствующего волнения, данные записываются с частотой порядка 10 Гц [3]. Станции системы DART имеют несколько режимов регистрации. В «приливном режиме», данные формируются с дискретностью 15 мин и хорошо описывают только прилив. В режиме цунами станция автоматически переходит на 1-минутный или 15-секундный отсчет.

Применяя принцип суперпозиции, можно с большой степенью точности рассматривать прилив независимо от остальных колебаний, поэтому при анализе полученных данных обычно производят вычитание прилива, – приливные волны хорошо детерминированы и предвычисляемы. Полученные остаточные ряды и составляют натурную основу исследования цунами, метеоцунами, сейш, шельфовых и других типов волн [9].

Данные прибрежных регистраторов позволяют производить оценку спектральных характеристик как приходящих цунами так и установившихся колебаний. Спектральный метод эффективен при анализе модового состава резонансных колебаний. А совместно с численным моделированием позволяет определять пространственные структуры собственных колебаний в акваториях портов и бухт [5, 6, 7, 8].

Широко применяется также спектрально-временной анализ (СВАН) или вейвлет-анализ записей. Данная методика позволяет отслеживать не только частотный состав колебаний, но и динамику энергии колебаний по времени и частоте. Этот метод позволяет эффективно отслеживать дисперсию волн на шельфе и в океане.

В настоящее время ведутся работы по применению данных о реальных цунами, полученных на DART, к наименее изученному вопросу цунами – о форме начального возмущения поверхности океана, которая и порождает цунами. Удовлетворительное, а главное – заблаговременное получение формы очага может сыграть решающую роль в точном прогнозе цунами на основе численного моделирования. С другой стороны, сами записи DART могут служить прекрасным проверочным материалом к существующим численными моделям. Существуют различные методы оценки параметров источника по записям DART, один из них заключается в применении метода наименьших квадратов с использованием базы синтетических мареограмм, полученных путем расчета цунами от модельных источников [16]. Существует также возможность проводить инверсию записей на основе физических представлений о дисперсии [4].

Расчет резонансных колебаний в бухтах

Одним из опасных проявлений цунами на побережье может стать резонансное усиление собственных колебаний в портах и бухтах, вызванное проходящими волнами с периодами, близкими к собственным периодам акватории. Для оценки опасности цунами в этом случае важно знать пространственное распределение максимумов колебаний (пучностей) и положение узловых линий – мест с наибольшими скоростями течений. Также весьма важно рассчитывать коэффициенты усиления амплитуд волн на входе по сравнению с прибрежной зоной и добротность бухты на резонансных периодах.

При возникновении сейшевых колебаний при цунами через некоторое время колебательный процесс в бухте можно считать приближенно стационарным и состоящим из затухающих гармонических колебаний. В таком случае эффективным методом оценки периодов и добротностей основных мод бухты является расчет параметров авторегрессионной модели (AR-процесса) [1, 5, 12]. Суть метода состоит в подборке коэффициентов разностного аналога дифференциального уравнения, наилучшим образом описывающего изучаемый случайный процесс. В результате применения такого метода мы получаем набор основных собственных частот акватории с соответствующими коэффициентами затухания.

Рассматривалась следующая последовательная методология расчета собственных мод:

1. Вычитание прилива из натурных данных донных датчиков сети ИМГиГ;
2. Фильтрация высоких частот и удаление трендов;
3. Оценка спектров мощности стационарного резонансного шума;
4. Построение AR-моделей обработанных данных;
5. Расчет параметров AR-модели и вычисление резонансных периодов и коэффициентов затухания (добротностей);
6. Численное моделирование колебаний уровня в бухте со случайным волновым (белым) шумом на входе в бухту;

7. Расчет полей коэффициента усиления на периодах, вычисленных в AR-модели (п. 5);
8. Визуализация пространственных структур мод.

Результаты применения последовательной методики на примере бухты Крабовая о. Шикотан представлены в таблице 1 и на рисунке 5.

Таблица 1. Оценки периодов и добротностей основных мод в б. Крабовая

Период, мин	Погрешность периода, мин	Время затухания, мин	Погрешность времени затухания, мин	Частота	Добротность
T	dT	β^{-1}	$d\beta^{-1}$	f	Q
3	0.1	7.2	1.6	0.32	7.2
6	0.1	7.5	1.4	0.18	4.2
12	0.4	7.6	0.9	0.08	2.0
30	0.4	50.5	8.6	0.03	5.3

Как видно из таблицы 1 и приведенных пространственных распределений, подобные оценки колебательных параметров главных мод бухты Крабовая вполне правдоподобны. Добротность бухты как резонатора показывает насколько медленно резонатор теряет энергию. Чем добротность выше, тем медленнее затухают собственные колебания. Небольшие значения добротностей и времен затухания согласуются с тем, что у бухт с открытой конфигурацией, как у б. Крабовая, сейши быстро затухают из-за интенсивного излучения волновой энергии в открытый океан.

Характер пространственной структуры низкочастотных мод собственных колебаний с периодами 30 и 12 мин, попадающими в диапазон периодов цунами показывает, что наибольшие высоты волн цунами будут наблюдаться в конечной части бухты, где собственно и расположены портовые сооружения.

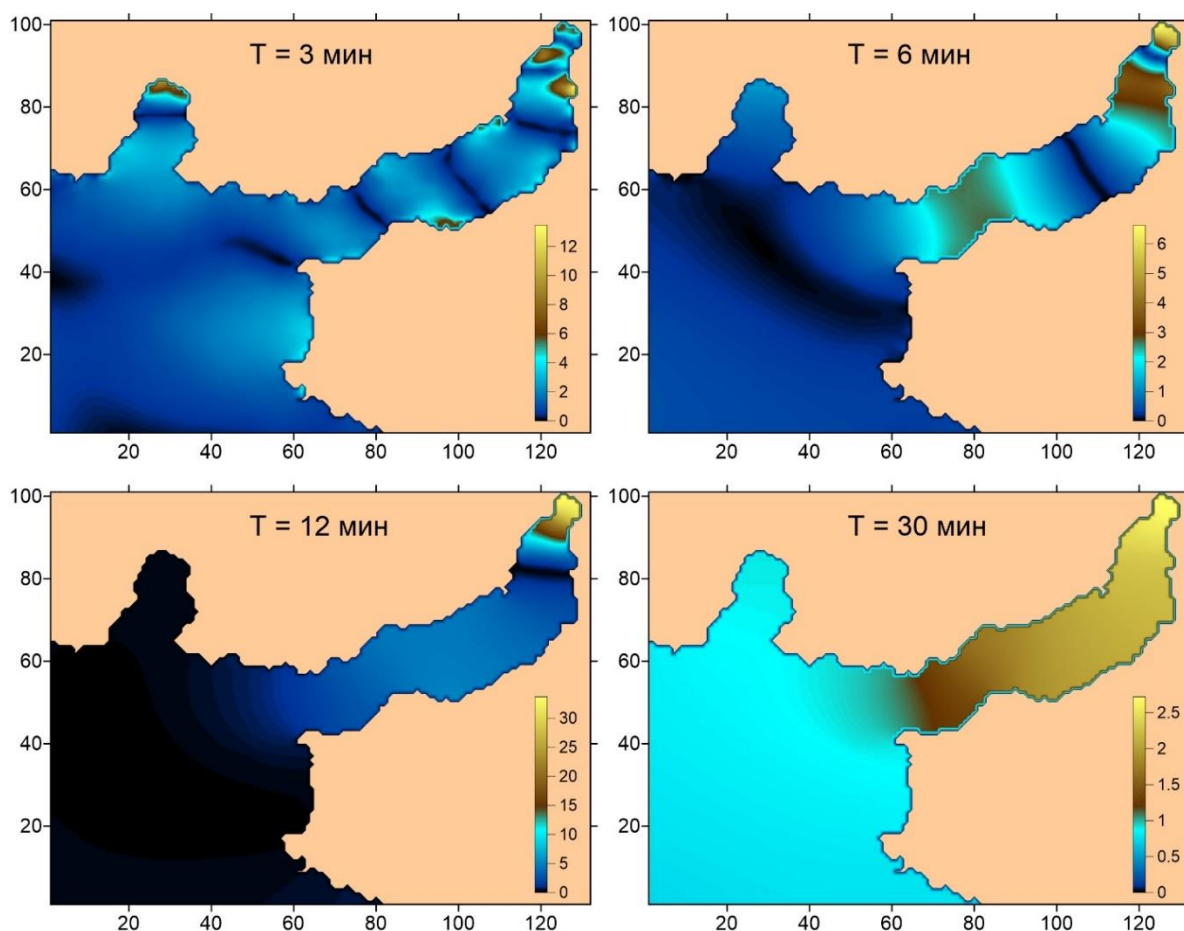


Рис. 5. Пространственная структура основных мод б. Крабовая, рассчитанная при помощи численного моделирования отклика бухты на случайный волновой шум на входе. Шкалы отражают градацию коэффициента усиления.

Инверсия DART-сигналов как решение обратной задачи цунами

Записи цунами DART не осложнены береговыми и шельфовыми эффектами и они открывают возможность выявить особенности дисперсии цунами практически в чистом виде. Дисперсия цунами обусловлена различной скоростью распространения волн разной частоты, и дисперсионное уравнение имеет вид

$$\omega^2 = gk \tanh kH, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота волны, k – волновое число, g – ускорение свободного падения, а H – средняя глубина океана. Из-за дисперсии компактный волновой пакет цунами растягивается по мере распространения: наиболее длинные волны опережают коротковолновую часть.

Метод применяемый в работе [4] и развитый с учетом кривизны луча распространения и неровностей дна вдоль него дает интересные результаты в применении к небольшим цунами, источник которых четко локализован в небольшой области океана.

Дисперсионное сжатие как процесс, обратный к «расплыванию» пакета во времени, с точки зрения обработки сигнала описывается фазовой инверсией. Одномерный вариант алгоритма такого обращения по времени, без учета радиального затухания, состоит из трех этапов:

1. Фурье-преобразование исходного сигнала: $F: x(t) \rightarrow X(\omega)$;
2. Фазовая поправка с учетом дисперсии (1): $X(\omega) \rightarrow e^{ik(\omega)\Delta s}X(\omega)$;
3. Обратное Фурье-преобразование $F^{-1}: e^{ik(\omega)\Delta s}X(\omega) \rightarrow x_0(t)$,

где $k(\omega)$ – волновое число, отвечающее Фурье-компоненте сигнала $x(t)$ с частотой ω согласно (1); Δs – расстояние от источника до точки (станции DART), в которой измеряется сигнал $x(t)$.

Таким образом, данная техника позволяет оценивать форму сигнала цунами вблизи источника. А при многократном вычислении на различных расстояниях позволяет оценить также и пространственное распределение начального возмущения цунами.

В качестве примера на рисунке 6 приведены результаты применения алгоритма фазовой инверсии записей слабого цунами 7 декабря 2012 года в 08:18 UTC ($M_w = 7.3$), произошедшего рядом с о. Хонсю.

Результаты показывают, что достаточно растянутые волновые пакеты, зарегистрированные станциями DART изначально были очень компактными и отвечали сравнительно небольшому очагу цунами диаметром около 100 км.

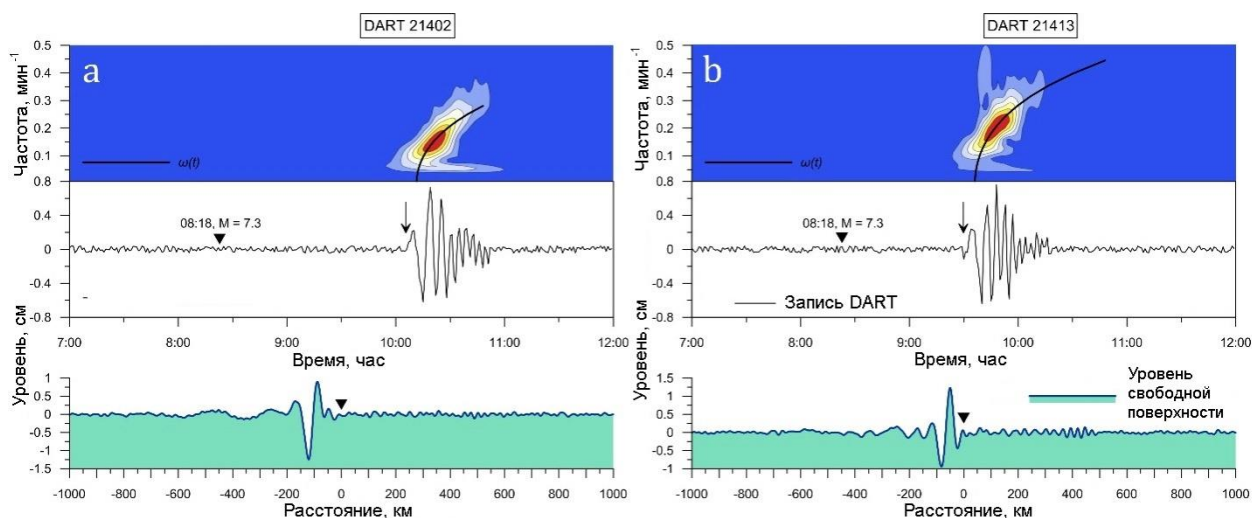


Рис. 6. Сверху вниз: Вейвлет-спектры, линии теоретической дисперсии (черная жирная линия), записи DART и рассчитанное начальное возвышение свободной поверхности в источнике.

Заключение

Исследования цунами и его проявлений базируется на натурных наблюдениях. Самым надежным и богатым источником информации о цунами служат инструментальные измерения уровня в прибрежной зоне и в открытом океане. С середины прошлого века в ИМГиГ и в ряде других организаций страны и за рубежом ведётся непрерывная работа по разработке, совершенствованию и расширению систем регистрации уровня моря на основе датчиков донного давления.

Глубоководные данные служат источником информации об источнике цунами и являются одной из основ современной службы цунами. Прибрежные измерения позволяют анализировать проявления цунами на побережье и количественно оценивать цунамиопасность.

В результате исследования уровенных рядов, полученных в бухтах и заливах на Курильских островах, на основе авторегрессионной модели, получены оценки периодов и декрементов затухания главных мод сейшевых колебаний. Показано, что AR-метод является надежным способом получения такой важной характеристики акватории, как ее добротность. Пример с бухтой Крабовая на о. Шикотан показал, что в бухтах вытянутой формы с открытым

входом возбуждаются главные моды с преимущественно продольной пространственной структурой собственных колебаний. Максимальные значения заплесков цунами в таких бухтах наблюдаются в ее удаленной части.

Получил развитие метод фазовой инверсии глубоководных записей для оценки параметров источника цунами. Теперь в методе учитываются кривизна луча распространения и неровности дна вдоль него.

Список источников

1. Джумагалиев В. А., Куликов Е. А., Соловьев С. Л. Анализ колебаний уровня в Малокурильской бухте, вызванных цунами 16 февраля 1991 г. // Изв. РАН сер. ФАО, 1993. Т. 29, № 6. С. 848-854.
2. Дыхан Б. Д., Жак В. М., Куликов Е. А., Лаппо С. С., Митрофанов В. Н., Поплавский А. А., Родионов А. В., Соловьев С. Л., Шишкин А. А. Первая регистрация цунами в открытом океане // ДАН СССР, 1981. Т. 257, № 5. С. 1088-1092.
3. Иволгин В. И., Ковалев Д. П., Ковалев П. Д., Кузнецов К. И. Регистрация ветрового волнения донным датчиком гидростатического давления // Вестн. Тамб. ун-та, Сер. Естеств. и техн. науки, 2011. Т. 16. Вып. 5. С. 1272-1276.
4. Куликов Е. А., Гонзалес Ф. И. Восстановление формы сигнала цунами в источнике по измерениям колебаний уровня океана удаленным датчиком гидростатического давления // ДАН СССР, 1995. Т. 344, № 6. С. 814-818.
5. Лоскутов А. В. Исследование модового состава колебаний в бухтах с использованием AR-модели // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. V Сахал. молодеж. науч. школа, Южно-Сахалинск, 8-11 июня 2010 г.: сб. докл. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2011. С. 292-298.

6. Лоскутов А. В. Исследование пространственной структуры собственных колебаний в бухтах Крабовая и Хромова, о. Шикотан // Мореходство и морские науки-2009: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции, Южно-Сахалинск, 23 сентября 2009 г. / ред. В.Н. Храмушин. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. С. 161-166.
7. Лоскутов А. В. Исследование пространственной структуры собственных колебаний в бухтах Крабовая и Церковная (о. Шикотан, Курильские острова) // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: IV Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 2-5 июня 2009 г.: сб. материалов. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2010. С. 198-203.
8. Лоскутов А. В., Богданов Г. С. Анализ волновых процессов в бухте Брутона (о. Симушир) // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: IV Сахалинская молодежная научная школа, Южно-Сахалинск, 2-5 июня 2009 г.: сб. материалов. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2010. С. 204-211.
9. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
10. Шевченко Г. В. История исследования цунами (ИМГиГ ДВО РАН) // Вестник ДВО РАН, 2011. № 6. С. 19-26.
11. Шевченко Г. В., Ковалев П. Д., Богданов Г. С., Шишкин А. А., Лоскутов А. В., Чернов А. Г. Регистрация цунами у берегов Сахалина и Курильских островов // Вестник ДВО РАН, 2008. № 6. С. 23-33.
12. Neumaier A., Schneider T., Estimation of parameters and eigenmodes of multivariate autoregressive models // ACM Trans. Math. Softw., 2001. Vol. 27. № 1. pp. 27-57, DOI 10.1145/382043.382304.
13. Shevchenko G., Ivelskaya T., Loskutov A., Shishkin A. The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia // Pure and Applied geophysics, 2012. DOI: 10.1007/s00024-012-0562-9.

14. Shevchenko G., Shishkin A., Bogdanov G., Loskutov A. Tsunami measurements in bays of Shikotan Island // Pure and Applied Geophysics, 2011. Vol. 168. pp. 2011-2021.
15. Shevchenko G. V., Chernov A. G., Kovalev P. D., Kovalev D. P., Likhacheva O. N., Loskutov A. V., Shishkin A. A. The tsunamis of January 3, 2009 in Indonesia and of January 15, 2009 in Simushir as recorded in the south Kuril islands // Science of Tsunami Hazards, 2011. Vol. 30. № 1. P. 43-61.
16. Wei, Y., Cheung, K., Curtis, G., McCreery C. Inverse Algorithm for Tsunami Forecasts // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2003. Vol. 129. № 2. P. 60–69.

Рис. 1. Часть исследовательской сети непрерывной уровенной регистрации ИМГиГ ДВО РАН на Южных Курильских островах (кабельные станции – синие квадраты, автономные – красные круги).

Рис. 2. Примеры записей Чилийского цунами 27 февраля 2010 г (слева) и Тохоку цунами 11 марта 2011 г. (справа) полученные датчиками сети ИМГиГ на Курильских островах.

Рис. 3. Расположение станций DART в мировом океане на 2013 г.

Рис. 4. Записи Тохоку цунами 11.03.2011 в Курило-Японской части Тихого океана [1].

Рис. 5. Пространственная структура основных мод б. Крабовая, рассчитанная при помощи численного моделирования отклика бухты на случайный волновой шум на входе. Шкалы отражают градацию коэффициента усиления.

Рис. 6. Сверху вниз: Вейвлет-спектры, линии теоретической дисперсии (черная жирная линия), записи DART и рассчитанное начальное возвышение свободной поверхности в источнике.

Таблица 1. Оценки периодов и добротностей основных мод в б. Крабовая.

Период, мин	Погрешность периода, мин	Время затухания, мин	Погрешность времени затухания, мин	Частота	Добротность
T	dT	β^{-1}	$d\beta^{-1}$	f	Q
3	0.1	7.2	1.6	0.32	7.2
6	0.1	7.5	1.4	0.18	4.2
12	0.4	7.6	0.9	0.08	2.0
30	0.4	50.5	8.6	0.03	5.3

Сведения об авторах:

Лоскутов Артем Владимирович

Младший научный сотрудник

ИМГиГ ДВО РАН, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 16. Тел.: (4242)-791-692. Факс: (4242)791-517.

E-mail: loskutov@imgg.ru