

Том 9, 2012, № 2
Vol. 9, 2012, No. 2

ISSN: 1812-5220

Научно-практический журнал

Проблемы анализа риска

Scientific and Practical Journal

Issues of Risk Analysis



Общероссийская
общественная организация
«Российское научное общество
анализа риска»



ФГУ «Всероссийский научно-
исследовательский институт
по проблемам гражданской
обороны и чрезвычайных ситуаций
МЧС России» (ФЦ)



Инвестиционная группа
«Бизнес Центр»

Издательский дом



Финансовый издательский дом
«Деловой экспресс»

УДК 551.466.62+550.344.42 (265)

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2012

Совершенствование оперативного прогноза цунами и тревоги цунами. Анализ последних цунами

Ю. П. Королев,Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
г. Южно-Сахалинск**Т. Н. Ивельская,**Центр цунами ФГБУ
«Сахалинское УГМС»,
г. Южно-Сахалинск

Аннотация

В статье описаны и проанализированы действия Сахалинской службы предупреждения о цунами. Показано, что службой предупреждения был выполнен весь комплекс действий, предусмотренных регламентом в рамках нормативного времени.

Сформулирована постановка задачи оперативного прогноза цунами, опирающегося на гидрофизические способы. Предложен способ и алгоритм расчета форм цунами в заданных пунктах по данным глубоководных станций измерения уровня океана в оперативном режиме. Для прогноза формы волны цунами необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения.

Предложенный способ применен для моделирования процесса оперативного прогноза некоторых событий 2009—2011 гг. Сравнение результатов расчета формы цунами с результатами инструментальных и визуальных наблюдений за произошедшими цунами показывает, что предложенный способ дает адекватный прогноз. Применение способа оперативного прогноза цунами в практике служб предупреждения позволит подавать обоснованные тревоги с оптимальной заблаговременностью только в те пункты, в которых цунами действительно представляет опасность. Тем самым количество ложных тревог будет уменьшено.

На основании результатов настоящей статьи и с учетом новых возможностей службы предупреждения о цунами сделаны предложения о возможных изменениях регламента объявления тревоги цунами.

Ключевые слова: цунами, краткосрочный прогноз, оперативный прогноз, тревога цунами, ложная тревога цунами, измерения уровня океана, численное моделирование цунами.

Содержание

Введение

1. Тревоги цунами 2006—2011 гг.
 2. Постановка задачи и способ оперативного прогноза цунами
 3. Результаты численных экспериментов
 4. Обсуждение
- Заключение
Литература

Введение

В 2006—2011 гг. произошло несколько сильных землетрясений в районах Курильских островов, островов Океании, у берегов Чили, Японии, вызвавших цунами, некоторые из которых сопровождались катастрофическими последствиями.

Актуальной для стран бассейнов Тихого и Индийского океанов является проблема оперативного, или краткосрочного, прогноза цунами. До настоящего времени она остается не вполне решенной задачей во всем мире.

Действуя в соответствии с принятым регламентом, основанном на магнитудно-географическом критерии, российские службы предупреждения о цунами не допустили пропуска ни одного сколь угодно значительного цунами. В то же время количество ложных тревог, поданных службами предупреждения о цунами в период до 1997 г., превышает 75% всех тревог [7]. Проблема состоит в том, чтобы давать адекватный, дифференцированный по участкам побережья, заблаговременный прогноз времен прихода первой, максимальной волн цунами в заданный пункт и их амплитуд.

Использование детальной сейсмологической информации о механизме землетрясения, размерах очаговой области позволяет выполнять расчеты цунами и получать результаты, хорошо совпадающие с наблюдениями (например [13, 22]). Однако в настоящее время в оперативном режиме такие расчеты выполнены быть не могут, поскольку очаговая область определяется по наблюдениям за афтершоковой последовательностью в течение суток и более после главного землетрясения [27].

В различных странах проблема оперативного прогноза цунами решается по-разному. Например, в Японии, Новой Зеландии в основу положен способ предварительного расчета различных сценариев возникновения цунами. Расчет высот волн цунами выполняется от предполагаемых очагов в цунами-генных зонах для различных магнитуд, гипоцентров землетрясений с наиболее вероятным механизмом [23, 24].

В настоящее время в практике Российской службы предупреждения о цунами предлагается один из вариантов совершенствования оперативного прогноза. Предполагается, что, как и прежде, тревога цунами будет объявляться на основании магнитуд-

ного критерия. Прогнозирование ожидаемых высот волн цунами основывается на специально создаваемой базе теоретических мареограмм в точках, где располагаются посты наблюдения за уровнем моря, и в точках, для которых составляется прогноз. Теоретические мареограммы рассчитываются от элементарных источников, распределенных в соответствии с сеймотектоническими особенностями акватории вокруг защищаемой территории, которые строятся на основе наиболее вероятной пространственной дислокационной модели очага землетрясения [11]. Есть серьезные основания сомневаться в том, что такое усовершенствование способа оперативного прогноза цунами действительно будет успешным. Критические замечания относительно такого подхода сделаны в [6]. Подобный подход предлагался еще в 1996 г. [25]. Впоследствии от такого подхода как неперспективного отказались в пользу гидрофизического способа [15, 20, 21, 24].

Улучшить качество оперативного прогноза можно, например, на основе информации о сформировавшемся цунами, получаемой в открытом океане. Такое предложение сформулировано почти одновременно в СССР и США в конце 60-х годов прошлого века [10, 12].

Эта идея успешно реализуется в США [24]. Предварительный прогноз цунами осуществляется на основе магнитудно-географического критерия, но конкретизируется с использованием данных о сформировавшемся цунами, получаемых станциями слежения за уровнем океана системы DART [31]. По этим данным рассчитывается форма волны ожидаемого цунами в конкретных пунктах, и в результате предварительное предупреждение подтверждается или тревога цунами не объявляется (гидрофизический способ оперативного прогноза цунами).

Краткий обзор некоторых способов оперативного прогноза цунами дан в [4, 6]. До недавнего времени Россия не располагала удаленными от побережья станциями измерения уровня океана, по данным которых можно было бы уточнять прогноз цунами, выполненный по магнитудному критерию. В ноябре 2010 г. была осуществлена постановка первой российской глубоководной станции измерения уровня океана 21401 системы DART восточнее южных Курильских островов [26]. В перспективе постановка

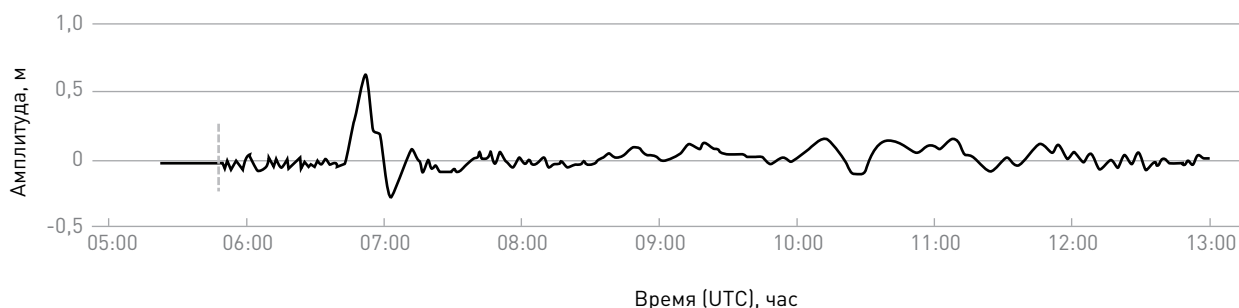


Рис. 1. Цунами, зарегистрированное глубоководной станцией 11 марта 2011 года [31]

еще двух станций в районе Курило-Камчатского желоба. В марте 2011 г. станция зарегистрировала слабое цунами 09.03.2011 и сильнейшее цунами 11.03.2011 [31] (рис. 1).

Цунами 11 марта 2011 г. было необычным: амплитуда цунами превышала величину, предсказываемую расчетами для землетрясения с магнитудой 9.0. Амплитуда волны, возникшей после главного толчка, зарегистрированная станциями измерения уровня ТМ1 и ТМ2, принадлежащими Японскому метеорологическому агентству (ЯМА), составляла 2 м. Спустя 11 мин. амплитуда увеличилась до 5 м [29] (рис. 2).

Качественное объяснение этого эффекта дано в [19, 33]. Предположительно, он аналогичен эффекту подводного оползня.

Эта ситуация показывает, что способ прогноза цунами, основанный на предварительных расчетах, на который опирается ЯМА, а также предполагаемое усовершенствование оперативного прогноза в России, основанное на предварительном моделировании, не всегда могут давать верный прогноз.

Способы (программные комплексы), с помощью которых по данным станций измерения уровня океана возможно оперативно рассчитывать формы (высоты) ожидаемых цунами на побережье, рабо-

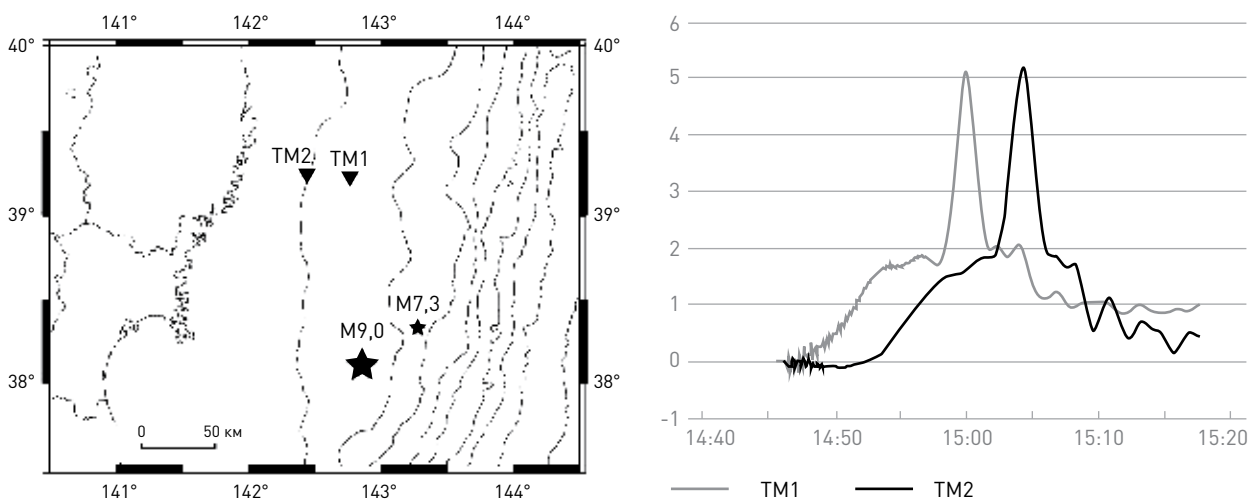


Рис. 2. Регистрация цунами 11.03.2011 вблизи очага

Положение эпицентра землетрясения с $M = 9,0$ и станций измерения уровня ТМ1 и ТМ2 — слева. Форма цунами, зарегистрированная станциями, — справа [29]

тающие хотя бы в опытном режиме, в России отсутствуют.

В работах [3, 4, 7, 16] предложен способ расчета формы прогнозируемого цунами на основе данных об уровне океана в удаленных от побережья точках в режиме реального времени, являющийся развитием идеи [10, 12]. Для выполнения прогноза цунами необходима сейсмологическая информация только о времени главного толчка и координатах эпицентра землетрясения. Показано, что способ работает в режиме реального времени. Способ расчета не зависит от природы источника цунами, он может применяться в случаях цунами, возникающих в результате подводных оползней.

Результаты применения этого способа для расчета форм Андрияновского 1996 г. и Симуширских цунами 2006, 2007 и 2009 гг. на основе реальных данных представлены в работах [5, 6, 17]. Во всех численных экспериментах наблюдалось хорошее совпадение рассчитанных и зарегистрированных форм цунами. Качество совпадения достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами. Показано, что способ работает при различных взаимных расположениях эпицентра землетрясения, пункта наблюдения за уровнем и пункта, для которого выполняется прогноз. Для выполнения прогноза использовалась сейсмологическая информация только о координатах эпицентра землетрясения.

В настоящей статье применяется понятие амплитуда — отклонение уровня от среднего после удаления приливных составляющих. Представляется, что понятие амплитуда более адекватно характеризует степень опасности цунами, поскольку при затоплении берега говорят о высоте затопления, отсчитываемой от среднего уровня на урезе воды, которая определяется по амплитуде волны.

Под первым вступлением цунами понимается время, когда фиксируется первое максимальное положительное (или отрицательное) отклонение от среднего уровня.

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей предложенного способа оперативного прогноза цунами для пунктов Курильских островов, главным образом, по данным российской станции 21401 системы DART во время цунами 11.03.2011, анализ проявлений цунами, действий службы предупреждения о цунами, а также опреде-

ление возможных путей изменения регламента объявления тревоги цунами.

1. Тревоги цунами 2006—2011 гг.

В настоящем пункте приведены краткие описания действий службы предупреждения о цунами во время некоторых цунами 2006—2011 гг. на Курильских островах на основании принятого регламента с целью анализа процесса выработки решения об объявлении тревоги цунами, а также для сравнения с возможными сценариями действий на основе гидрофизических способов оперативного прогноза.

Симуширское цунами 15 ноября 2006 г. Землетрясение магнитудой $M = 8,3$, произошедшее в 11:14 (всюду, если не оговорено, указано всемирное скоординированное время UTC, местное, сахалинское время для описываемых событий равно UTC + 10 час.) восточнее о. Симушир с эпицентром в точке 46.592° с.ш., 153.266° в.д. [32], вызвало цунами, проявившееся не только на побережьях Курильских островов и Японии, но и на Западном побережье США. В 11:30 было выпущено предупреждение об опасности цунами на побережье всех Курильских островов, объявлена тревога цунами. Произведена эвакуация населения из опасных зон. Эвакуированы около 900 человек. Судам предписано выйти в открытое море. Отбой тревоги был дан в 13:19.

Цунами в ноябре 2006 г. вызвало большие (до 30 метров) высоты заплеска на ближайших к очагу островах [8]. Амплитуды волн цунами составили в Южно-Курильске 20 см, в Малокурильском 77 см [9].

Симуширское цунами 15 ноября 2006 г., сопровождавшееся большими заплесками на ближайших к очагу островах, но малыми амплитудами на северных и южных Курильских островах, в то же время нанесло заметный ущерб в Кресент-Сити на Западном побережье США [14, 18].

Симуширское цунами 13 января 2007 г. Землетрясение с несколько меньшей магнитудой $M=8.1$ произошло также восточнее о. Симушир в 4:23. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 46.243° с.ш., 154.524° в.д. [32]. Тревога цунами объявлена на побережье всех Курильских островов в 4:36. Эвакуированы в безопасные зоны около 340 человек. 16 судов, находившихся в портах, выведены в открытое море.

Зарегистрированы волны цунами амплитудой 5—6 см в Южно-Курильске и 36 см в Малокурильском. Ввиду слабого проявления цунами на побережьях Курильских островов, Камчатки и Алеутских островов тревога цунами была отменена в 7:49 [9].

Симуширское цунами 15 января 2009 г. Землетрясение, возникшее также восточнее о. Симушир в 17:49, имело магнитуду 7,4. Координаты эпицентра землетрясения 46.857° с.ш., 155.154° в.д. [32]. Землетрясение с такой магнитудой по действовавшему регламенту относилось к цунамигенным. После событий 2006 и 2007 гг. ввиду слабого проявления этих цунами на побережьях северных и южных Курильских островов регламент для землетрясений в районе средних Курильских островов был изменен, установлена пороговая магнитуда 7,5. Предупреждение о цунами 15.01.2009 не выпускалось. Особенностью этого события является то, что цунами зарегистрировано ближайшей к Курильским островам станцией 21416 системы DART и регистратором уровня в Северо-Курильске.

Чилийское цунами 27 февраля 2010 г. Землетрясение с моментной магнитудой $M = 8,8$ произошло в 6:34 у берегов Чили. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 36.122° ю.ш. и 72,898° з.д. [32].

В 6:46 Тихоокеанским центром предупреждения о цунами была выпущена тревога цунами для побережья Чили и Перу, которая позже была распространена на другие страны Тихоокеанского бассейна.

Около 12 часов в Сахалинский Центр цунами поступило сообщение о регистрации на Гавайских островах цунами высотой около двух метров, что и явилось определяющим фактором для выпуска тревоги цунами.

С учетом того факта, что в расчетное время подхода волны должна отмечаться фаза прилива, Центром цунами было принято решение объявить тревогу цунами по всем Курильским островам 28 февраля в 0:47.

В 0:50 (10:50 сахалинского времени) началось оповещение населения в пунктах на Курильских островах, в 1:05 оповещение завершено. В Северо-Курильске, Южно-Курильске, Малокурильском население было эвакуировано, суда были выведены в море.

Регистрация цунами в Северо-Курильске (о. Парамушир) началась в 4:12, что хорошо согласовывалось с предварительными расчетами. А через полтора часа цунами было зафиксировано и в Малокурильском (о. Шикотан). Заблаговременность объявления тревоги цунами составила 3 час. 22 мин. для Северо-Курильска и 4 час. 52 мин. для Малокурильского.

Уже после отбоя тревоги цунами в 8:20 по данным телеметрического регистратора Северо-Курильска отмечалось резкое повышение уровня моря, за 10 мин. уровень увеличился на 1 метр. Поскольку начался отлив, тревога повторно не объявлялась. Центром цунами были оповещены диспетчерские портов Курильских островов с рекомендацией капитанам судов держаться на безопасном расстоянии от берега [1].

Цунами Тохоку. 11 марта 2011 г. Информационно-обрабатывающим Центром (ИОЦ) «Южно-Сахалинск» 11 марта в 5:48 (15:48 сахалинского времени) было зарегистрировано сильное землетрясение у Северо-Восточного побережья о. Хонсю. По предварительным оценкам магнитуда землетрясения составила 8,5, координаты эпицентра 38.5° с.ш., 142.5° в.д. После уточнения $M = 9,0$, координаты 38.322° с.ш., 142.369° в.д. [32].

В 5:58 от ИОЦ «Южно-Сахалинск» в автоматизированную информационно-управляющую систему Центра цунами поступило сообщение об объявлении тревоги цунами по всем Курильским островам без параметров землетрясения. Одновременно были начаты оповещение и вывод населения, попадающего в зону воздействия волны цунами, на безопасные участки. Судам, находившимся на рейде и у пирсов, рекомендовано уйти в безопасную зону. В 6:30 (через 32 мин. после начала оповещения) вывод населения был завершен [35].

В 6:43 российской глубоководной станцией (расположенной юго-восточнее о. Итуруп) зарегистрирована волна цунами с амплитудой 67 см за 25 минут до регистрации первого вступления волны в Малокурильском (о. Шикотан).

Размах колебаний (от подошвы до гребня) в Малокурильском достигал 229 см. Приход цунами в Южно-Курильск зафиксирован в 7:44. Амплитуды волн, зарегистрированных в Южно-Курильске,



Рис. 3. Цунами 11 марта 2011 г. в Южно-Курильске. Приход первой волны — видно поднятие уровня воды на фоне причала (17:44, время сахалинское). Фото А. Гриценко [30, 35]



Рис. 4. Цунами 11 марта 2011 г. в Южно-Курильске. Виден автомобиль на берегу, прижатый волной (17:45, время сахалинское). Фото А. Гриценко [30, 35]



Рис. 5. Цунами 11 марта 2011 г. в Южно-Курильске. Приход второй волны (18:27, время сахалинское). Фото А. Гриценко [30, 35]



Рис. 6. Цунами 11 марта 2011 г. в Северо-Курильске, о. Парамушир. Устье ручья Матросский: следы заплеска цунами на высоте до 2,5 метра от уреза. Фото Л. Котенко [30]

составляли около или чуть выше 1 метра. Цунами достигло Северо-Курильска в 9 час. По информации с судов, стоявших в порт-ковше Северо-Курильск, уровень воды под килем колебался от 4,2 м до 2,6 м, перепад составил 1,6 м. По данным визуальных наблюдений в Буревестнике амплитуда волны составляла около 1 метра [35].

Колебания, вызванные цунами, до метра и выше продолжались 12 марта, поэтому продолжительность действия тревоги цунами составила около 20 часов, отбой тревоги цунами для всех Курильских островов был выпущен 12 марта в 2:20 (12:20 сахалинского времени).

12 марта в 6:36 Тихоокеанским центром предупреждения о цунами выпущен отбой тревоги цунами для всех стран Тихоокеанского бассейна. Японским метеорологическим агентством отбой тревоги цунами для Японии был дан 13 марта в 8:58 [2].

На рисунках 3—6 представлены снимки с места события в Южно-Курильске и последствия цунами в Северо-Курильске.

Все упомянутые тревоги относятся к оправдавшимся в соответствии с принятым регламентом. Сахалинской Службой предупреждения о цунами был выполнен весь комплекс действий, предусмотренных регламентом.

2. Постановка задачи и способ оперативного прогноза цунами

Анализ событий, связанных с цунами, показывает, что цунами на одних участках побережья может проявиться значительно, на других слабо, т. е. для одних пунктов тревога цунами является обоснованной, для других — ложной.

Получаемая информация о землетрясении, а также статистический характер магнитудного критерия в настоящее время не позволяют в оперативном режиме выполнить достаточно точный и подробный прогноз. Поэтому совершенствование оперативного прогноза является актуальной задачей для всех действующих служб.

Проблема оперативного прогноза цунами заключается в том, чтобы службы предупреждения объявляли не только обоснованные общие тревоги, но и дифференцированные по степени опасности для конкретных участков побережий. Идеально тревога цунами должна объявляться только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную опасность, и сопровождаться информацией о времени прихода первой волны, о высотах волн, их количестве и интервалах времени между ними и об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами).

Действующий на основе магнитудного критерия регламент не позволяет объявлять дифференцированную по отдельным пунктам тревогу, что приводит к появлению фактически ложных тревог.

Цунами относится к редким стихийным бедствиям, для которых возможно заблаговременное получение информации о степени опасности (оперативный, или краткосрочный, прогноз) и объявление тревоги.

Один из возможных способов оперативного прогноза цунами, по данным об уровне океана в удаленных от побережья точках, являющийся развитием идеи [10, 12], описан в [3, 4, 7, 16]. Для выполнения прогноза цунами необходима сейсмологическая информация только о координатах эпицентра землетрясения. Способ заключается в построении передаточной функции, с помощью которой по данным глубоководной станции измерения уровня рассчитывается форма ожидаемого цунами в заданных точках, и может быть применен для расчета цунами от источников различного происхождения, например от подводного оползня.

Алгоритм расчета формы волны цунами состоит из следующих шагов:

1. Получение сейсмологической информации о времени главного толчка и координатах землетрясения.

2. По получении информации о координатах эпицентра землетрясения начинается построение передаточной функции. Расчеты завершаются до того, как цунами достигнет ближайшей точки регистрации.

3. Одновременно с получением сейсмологической информации осуществляется прием уровневой информации с дискретностью 1 минута из пунктов регистрации (например, от удаленных глубоководных станций измерения уровня системы DART).

4. По мере поступления информации о цунами выполняется расчет формы ожидаемого цунами в режиме реального времени.

5. На основе результатов расчета после учета прилива на момент прихода первой (максимальной) волны принимается решение об объявлении тревоги цунами и времени начала эвакуации в конкретном пункте. Способ эффективен для пунктов, времена пробега цунами до которых или заблаговременность прогноза превышают, условно, 30 минут.

Представленный способ прогноза не требует какой-либо заранее созданной базы расчетных ма-реограмм и может применяться службами предупреждения о цунами на стадии создания сети уровневых станций.

В настоящей работе применялся способ оперативного прогноза цунами, описанный в [3, 4, 7, 16], модифицированный для расчета прогнозируемой формы волны цунами большой длительности. По ограниченной продолжительности уровневой информации в удаленной точке возможен прогноз цунами достаточно большой продолжительности, на основании которого можно оценивать длительность тревоги цунами.

3. Результаты численных экспериментов

3.1. Постановка численных экспериментов

Расчет формы волны цунами в заданных точках выполнялся в соответствии со способом [3, 4, 7, 16], исходя из единственной сейсмологической информации о координатах эпицентра землетрясения. Для

построения передаточной функции выполнялись вспомогательные расчеты формы волны в соответствующих точках от источника в виде кругового начального возвышения свободной поверхности. Центр источника совпадал с эпицентром землетрясения.

На рис. 7 представлена схема расчетной области. На этом рисунке указаны точки, для которых выполнялись расчеты.

Положение станции 21416 выходит за рамки схемы, ее истинное положение восточнее указанного на карте на долготе $163^{\circ} 30'$ в.д., истинное местоположение станции 21413 находится южнее отмеченного на карте в точке с широтой $30^{\circ} 31'$ с.ш.

3.2. Симуширское цунами 15.01.2009

Данные об этом относительно слабом землетрясении приведены в п. 1.

Вспомогательный источник для построения передаточной функции представлял собой аксиально-симметричное возвышение свободной поверхности с диаметром 50 км и максимальной амплитудой 8 м [6]. Глубина моря в эпицентре, по данным разностной сетки, равна 6887 м. Расчеты с использованием программы, описанной в [7], выполнялись на разностной схеме с шагом сетки 1 угловая минута.

Применялась меркаторская проекция с широтой масштабирования 52° .

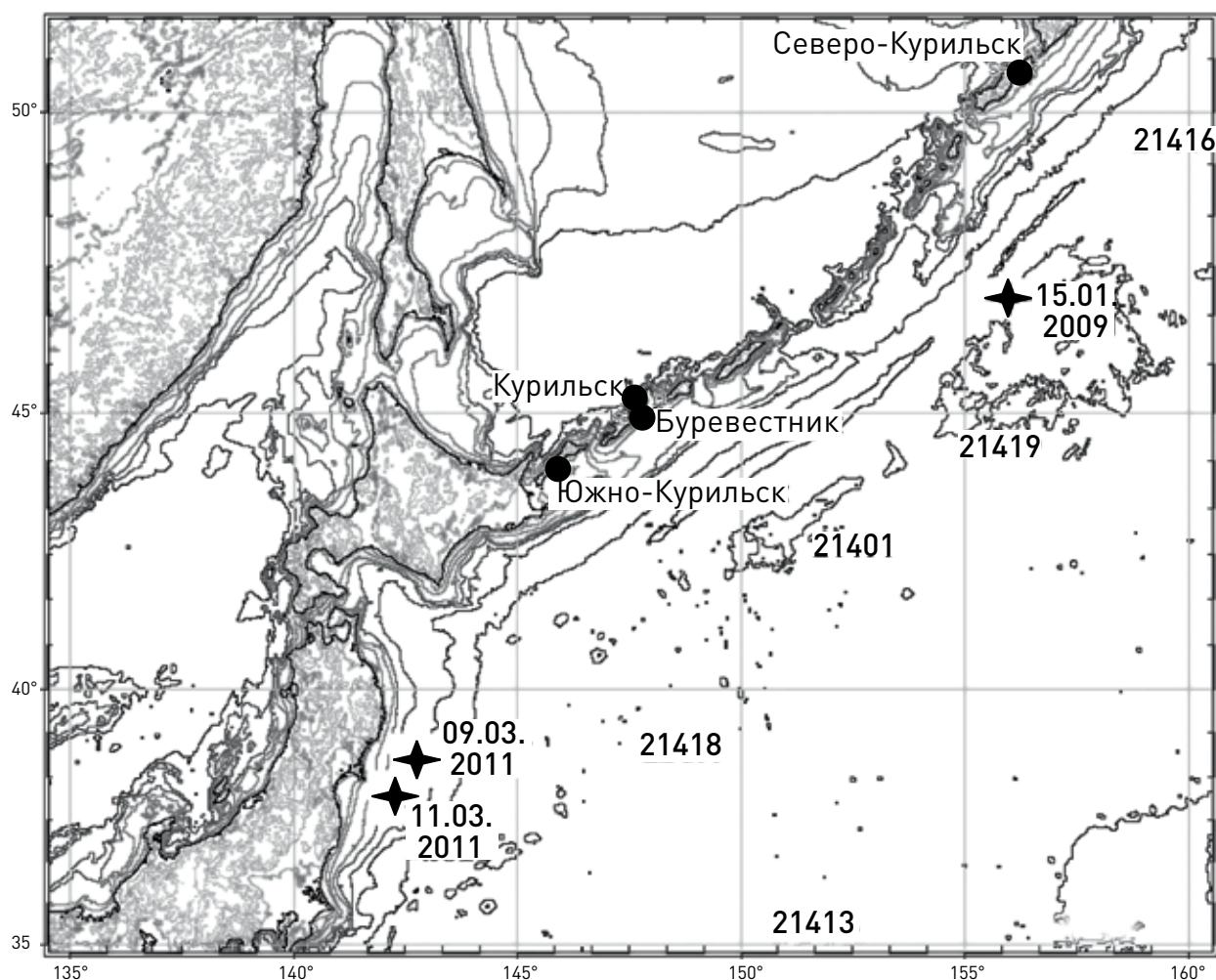


Рис. 7. Расчетная схема численных экспериментов

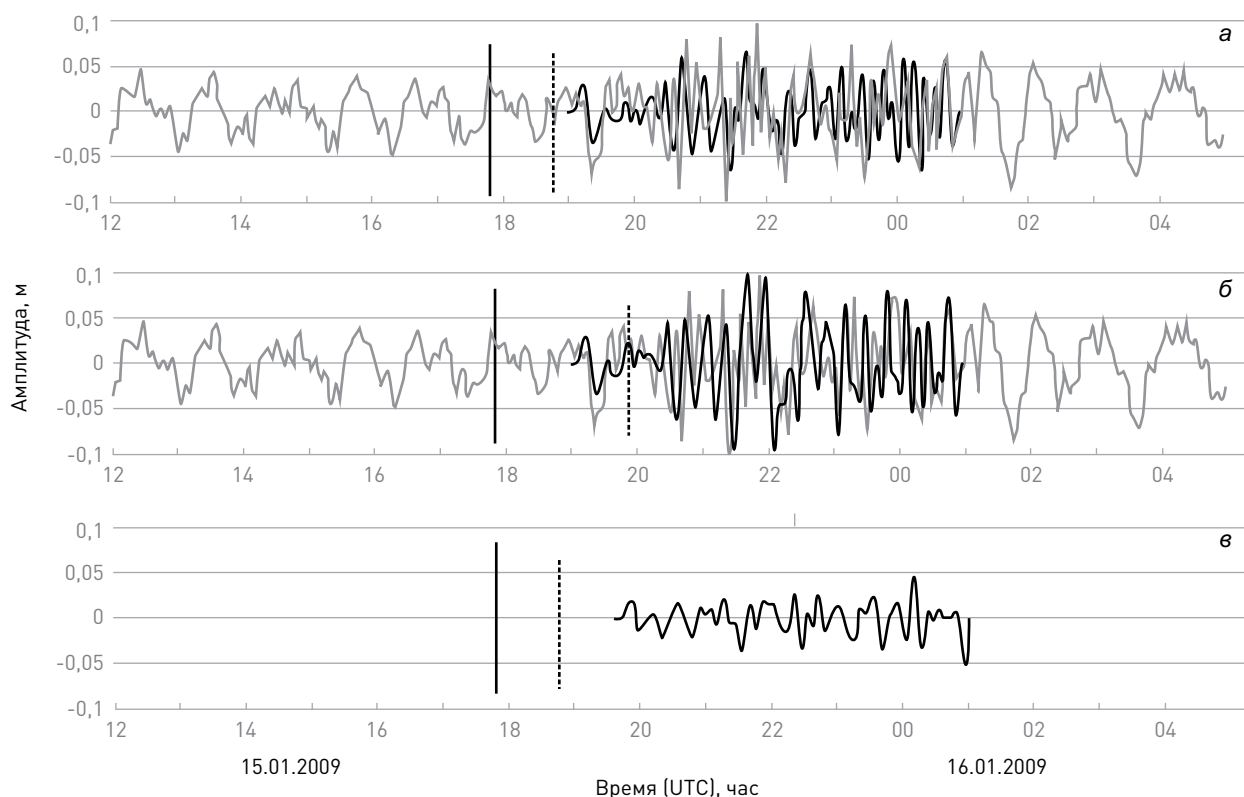


Рис. 8. Результаты прогноза вблизи Северо-Курильска и Южно-Курильска [6]

Синей линией обозначена форма колебаний уровня моря в порту Северо-Курильск, красной — прогноз: а) предварительный прогноз в Северо-Курильске, по данным станции 21416, длительностью 20 мин.; б) уточненный прогноз в Северо-Курильске, по данным станции 21416, длительностью 82 мин.; в) предварительный прогноз в Южно-Курильске, по данным станции 21416, длительностью 20 мин.

Результат расчета (прогноз) для точки вблизи Северо-Курильска с координатами $50^{\circ} 41'$ с.ш., $156^{\circ} 09'$ в.д., находящейся во Втором Курильском проливе на расстоянии около 1,5 км от берега на глубине 20 м, показан на рис. 8 (а, б).

Вертикальной сплошной линией на рис. 8 отмечен момент главного толчка землетрясения (17:49 UTC), вертикальной пунктирной линией показаны моменты времени выполнения соответствующего прогноза.

Форма прогнозируемого цунами (предварительный прогноз), по данным об уровне океана в точке 21416, длительностью 20 мин. изображена на рис. 8 (а). Уточненный прогноз по уровенным данным длительностью 82 мин. представлен на рис. 8 (б).

Прогноз, как предварительный, так и уточненный, показывает, что первое вступление цунами

ожидается в 19:20, через 90 мин. после главного толчка землетрясения, вслед за первой волной цунами через полтора часа следует ожидать волнение с большей амплитудой. Длительность цунами может быть оценена в 6—7 часов.

Прогноз цунами в точке вблизи Северо-Курильска мог быть дан за 30 мин. до прихода волны в эту точку.

Одновременно с прогнозом цунами для Северо-Курильска выполнен прогноз для Южно-Курильска. Точка с координатами $44^{\circ} 01'$ с.ш., $145^{\circ} 50'$ в.д., для которой выполнялся расчет, находилась в б. Южно-Курильская на расстоянии около 1,5 км от берега. Глубина воды в этой точке, по данным батиметрической сетки, равна 4,2 м.

Время пробега цунами до Южно-Курильска — 120 мин. С учетом времени распространения цунами до точки наблюдения (41 мин.) и време-

ни, необходимого для идентификации цунами (около 20 мин.), прогноз первой волны в Южно-Курильске мог быть дан за 1 час до прихода цунами.

Рисунок 8 (в) показывает, что первое вступление цунами в Южно-Курильске ожидается в 19:50, усиления волнения в течение 5 час. после прихода первой волны не ожидается, длительность цунами можно оценить в 6 часов.

К сожалению, регистрация цунами в Южно-Курильске не проводилась, выполнить сравнение расчетной формы цунами с фактической не представляется возможным.

Приведенный пример расчета показывает принципиальную возможность прогноза цунами на побережье Курильских островов, по данным станции измерения уровня океана, находящейся с океанской стороны Курило-Камчатского желоба.

3.3. Слабое цунами восточнее о. Хонсю 09.03.2011

Слабое цунами магнитудой 7.2, возникшее у восточного побережья о. Хонсю 09.03.2011 (координаты эпицентра 38.510° с.ш., 142.792° в.д.) [32], зарегистрировано небольшим числом станций системы DART. По данным ближайшей к очагу станции 21418 выполнен расчет формы цунами в области восточнее Курильских островов в точках 21401, 21419 и в Тихом океане на расстоянии около 1200 км к юго-востоку от Токио в точке 21413.

Вспомогательный источник для построения передаточной функции представлял собой аксиально-симметричное возвышение свободной поверхности с диаметром 100 км и максимальной амплитудой 10 м. Расчеты выполнялись на разностной схеме в меркаторской проекции с шагом сетки 5 км на широте 45°.

Результаты представлены на рис. 9.

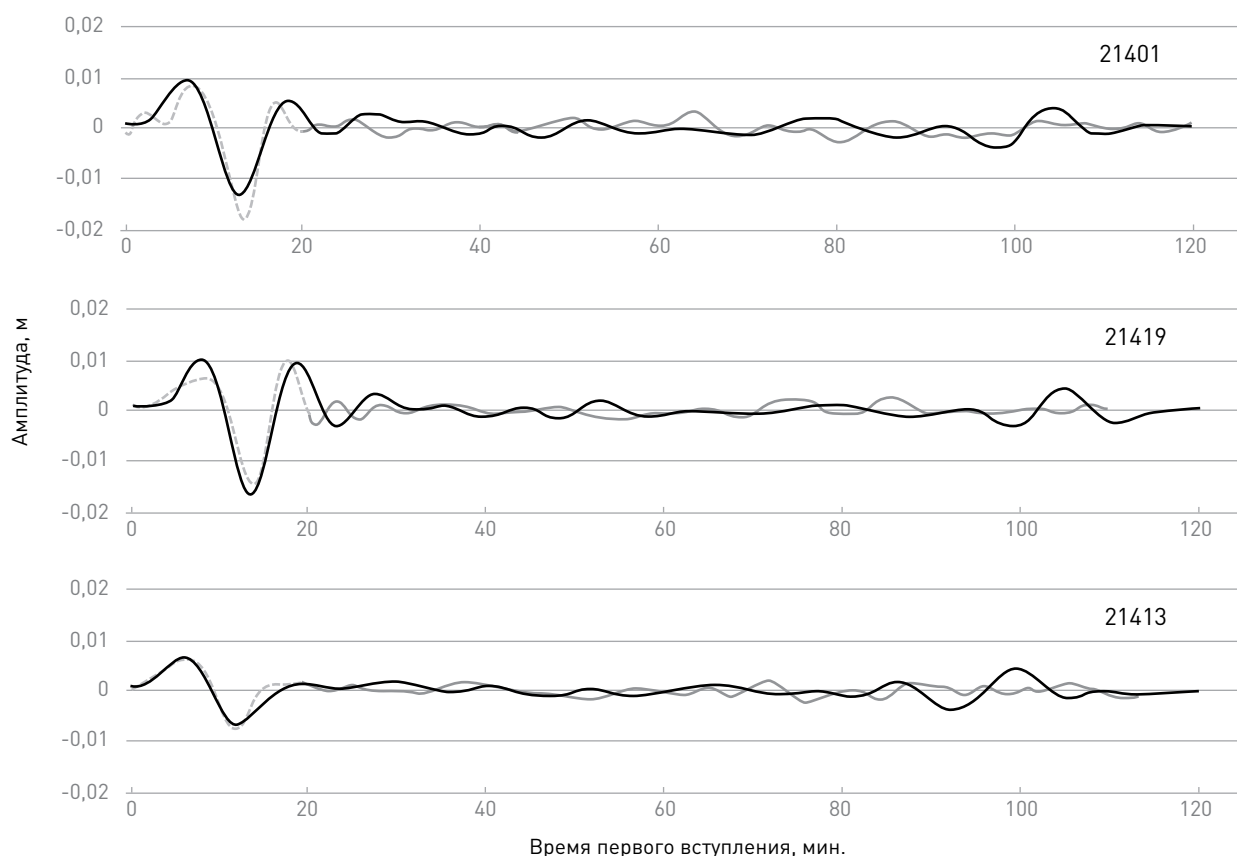


Рис. 9. Прогноз формы цунами, по данным станции DART 21418

Прогноз в точках расположения станций системы DART (номера станций указаны на фрагментах).

Синей линией обозначены реальные записи цунами, красной — прогноз

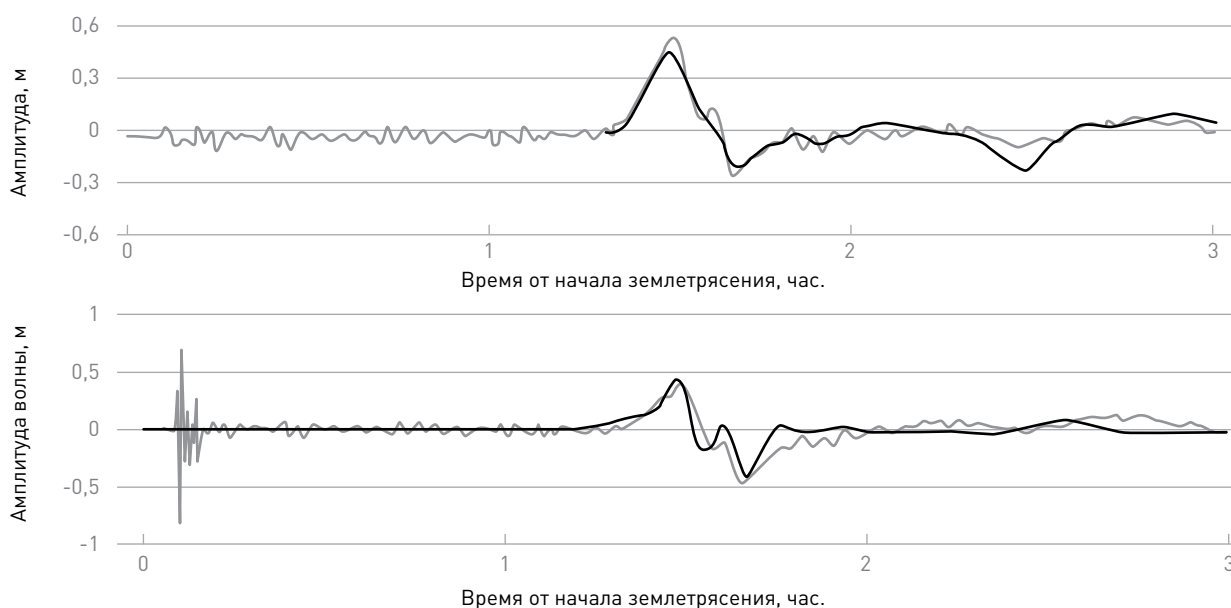


Рис. 10. Прогноз цунами в точке 21419, по данным станции 21401

Верхний рисунок — прогноз предложенным способом, нижний — способом [20, 24], рисунок взят из [28]

Расчеты выполнены для точек в открытом океане. На цунами в этих точках не оказывают влияния различные краевые эффекты. Приведенные результаты демонстрируют возможности предложенного способа. По данным станции 21418, находящейся восточнее эпицентра землетрясения, выполнен расчет формы цунами в направлениях на северо-восток от эпицентра (точки 21401 и 21419) и на юго-восток (точка 21413) (рис. 7). Представленные на рис. 9 результаты показывают хорошее совпадение расчетных форм с фактическими формами цунами.

3.4. Сильнейшее цунами восточнее о. Хонсю (цунами Тохоку 11.03.2011)

Землетрясение Тохоку магнитудой 9,0 вызвало сильнейшее цунами, большее, чем ожидалось. Данные о землетрясении и описание действий служб предупреждения о цунами приведены в п. 1.

Выполнено моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами 11 марта 2011 г. для населенных пунктов Курильских островов. В расчетах использовались данные станции 21401 различной продолжительности. Уровень океана, зарегистрированный станцией, изображен на рис. 1.

Для построения передаточной функции выполнены вспомогательные расчеты формы волны

в соответствующих точках от источника в виде кругового начального возвышения свободной поверхности диаметром 100 км с амплитудой 10 м. Центр источника совпадал с эпицентром землетрясения. Расчеты выполнялись на разностной схеме с шагом сетки 0,9 км. Применялась меркаторская проекция с широтой масштабирования 45°.

Прогноз выполнен по уровенным данным станции 21401 длительностью 20 мин. На рис. 10 (сверху) представлен результат расчета формы волны цунами в точке 21419 (красная линия). Получено хорошее соответствие расчетной и фактической форм цунами. Этого следовало ожидать, поскольку станция 21419 находится в открытом океане, на волновой процесс не оказывают влияние различные береговые, резонансные эффекты.

Способ, описанный в [20, 21, 24], был применен для расчета форм цунами в различных точках Тихого океана, в том числе в точке 21419 [28] (рис. 10, снизу), что позволяет сравнить результаты расчета различными способами. Как видно, степень совпадения расчетной и зарегистрированной форм волны цунами как в случае расчета по [20, 24], так и в случае расчета способом, представленным в настоящей статье, достаточно высока. Качество прогноза, выполненного разными способами, сравнимо.

Результаты расчета (прогноза) формы волны цунами длительностью 6—7 часов, выполненного для пунктов Курильских островов, представлены на рис. 11.

Время выполнения вспомогательных расчетов для построения передаточной функции не превышало 25 мин., в то время как пробег цунами до станции 21401 равен 58 мин. Вспомогательные расчеты для построения передаточной функции завершаются до регистрации цунами станцией 21401. С учетом времени распознавания цунами в точке 21401 (первый полупериод длительностью 20 мин.) предварительный прогноз мог быть дан через 78—80 мин. после главного толчка землетрясения.

Расчетная форма цунами для Южно-Курильска хорошо согласуется с зарегистрированной. Расчетная точка находилась в точке с координатами 44° с.ш., $145^{\circ} 55'$ в.д. на расстоянии 5,4 км от берега. Глубина воды в точке 29 м. Совпадают время прихода цунами в точку, структура цунами, времена прихода всех четырех основных волн, амплитуды волн. Согласно прогнозу, амплитуда максимальной волны не должна превышать 1 м, что согласуется с измерениями. Заблаговременность прогноза, т. е. время между окончанием расчетов и первым вступлением цунами, составляет 46—48 минут. Для такого населенного пункта, как представляется, этого времени достаточно для проведения эвакуации. Длительность тревоги цунами не должна превышать 7 часов.

Расчет формы цунами в Курильске показывает ярко выраженную пакетную структуру волнения. Расчет выполнен для точки с координатами $45^{\circ} 13.5'$ с.ш., $147^{\circ} 52'$ в.д. при глубине 3,2 м на расстоянии от берега 0,8 км. Расчетные временные характеристики (периоды волнения) хорошо совпадают с характеристиками зарегистрированного волнения. Однако расчет дает завышенные амплитудные характеристики, особенно для третьего пакета. Согласно прогнозу, амплитуды волнения не должны превышать 1 метра. Заблаговременность прогноза первого вступления для Курильска около 40 минут. Заблаговременность прогноза максимальных волн (с амплитудой около 1 метра) составляет 7 часов.

Согласно выполненному прогнозу для Буревестника, амплитуды волн не должны превышать 1 м. Результаты расчетов согласуются с данными наблюдений: амплитуда волны по визуальным наблюдениям составляла около 1 метра [35]. Координаты расчетной точки $44^{\circ} 56'$ с.ш., $147^{\circ} 40'$ в.д., глубина воды 30 м, расстояние до берега 2,1 км. Заблаговременность прогноза для Буревестника около 20 минут. В данной ситуации гидрофизический способ прогноза цунами для Буревестника может оказаться неэффективным. Такой же вывод можно сделать и для всего побережья Малой Курильской гряды.

Расчет для Северо-Курильска выполнен в точке с координатами $50^{\circ} 41'$ с.ш., $156^{\circ} 09'$ в.д. при

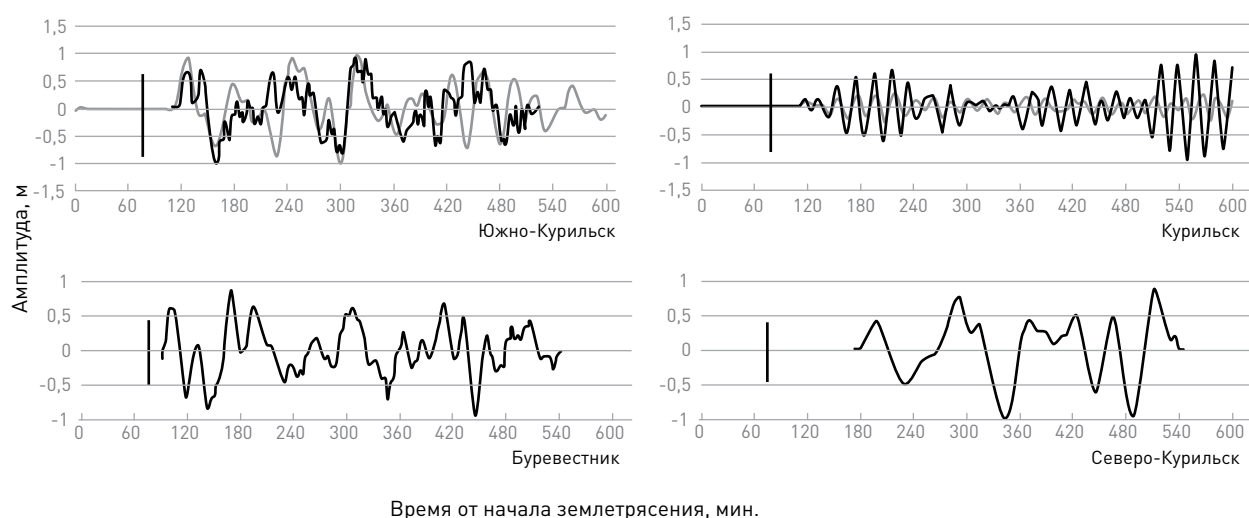


Рис. 11. Прогноз формы цунами 11 марта 2011 г. по данным станции 21401

Наименования пунктов прогноза указаны на фрагментах. Синим цветом обозначены реальные записи цунами [34], красным — прогноз. Вертикальной черной линией отмечен момент выработки прогноза

глубине воды 16 м на расстоянии от берега 1,1 км. В Северо-Курильске возможно усиление амплитуды последующих волн почти до 1 м. Размах колебаний уровня не должен превышать 1,8—2 метров. Этот результат хорошо согласуется с данными наблюдений в Северо-Курильске: по информации с судов перепад уровня (размах колебаний) составлял 1,6 м [35]. Заблаговременность прогноза для Северо-Курильска составляет 2 часа.

Расчеты, выполненные по данным об уровне станции 21401, с длительностью, большей 20 мин., не приводят к сколько-нибудь заметному изменению формы прогнозируемого цунами. Это объясняется тем, что цунами представляло собой практически одиночный импульс с периодом около 30 мин.

К сожалению, регистрация цунами в Буревестнике и Северо-Курильске не проводилась, выполнить сравнение расчетной формы цунами с фактической не представляется возможным.

Численные эксперименты показывают, что, несмотря на аномальный механизм возбуждения цунами 11.03.2011, прогноз, выполненный только по данным станции измерения уровня 21401, без привлечения дополнительной сейсмологической информации, дает адекватный результат.

4. Обсуждение

На примерах цунами 2009—2011 гг. показано, что способ оперативного прогноза цунами позволяет, по данным одной глубоководной станции системы DART, рассчитывать форму ожидаемого цунами в заданных точках. При этом используется сейсмологическая информация только о координатах эпицентра землетрясения.

Для пунктов в открытом океане наблюдается хорошее совпадение расчетных и зарегистрированных форм цунами. Для точек вблизи побережья на расстояниях в несколько километров совпадение расчетных и зарегистрированных форм цунами вполне хорошее, достаточное для определения степени опасности цунами и принятия решения об объявлении тревоги цунами в конкретном пункте. Удовлетворяются требования к оперативному прогнозу цунами, сформулированные в п. 2.

Предлагаемый в статье способ оперативного прогноза цунами, использующий информацию о сформировавшемся цунами в открытом океане,

не опирается ни на магнитуду, ни на механизм землетрясения, поэтому с его помощью можно выполнить расчет формы ожидаемого цунами в редких случаях возбуждения цунами подводным оползнем даже в случаях землетрясений с малыми магнитудами. Как отмечалось во Введении, цунами 11 марта 2011 г. было аномальным: амплитуда волны существенно превышала ожидаемую, рассчитанную для землетрясения с магнитудой 9,0. Предположительно на возбуждение цунами оказал влияние механизм, аналогичный подводному оползню. Расчет ожидаемой формы цунами Тохоку 11.03.2011 в открытом океане и вблизи побережья Курильских островов показывает, что прогноз цунами, по данным уровня станций, действительно не зависит от природы возбуждения цунами и дает адекватный результат.

Результаты численных экспериментов подтверждают предположение о том, что способы прогноза цунами, основанные на предварительных расчетах, например, применяемые Японским метеорологическим агентством, не всегда дают достоверный прогноз.

В рамках действующего регламента объявления тревоги цунами при отсутствии количественной информации об ожидаемом цунами в конкретном пункте действия службы предупреждения о цунами во время рассмотренных в статье событий 2006—2011 гг. являлись обоснованными, несмотря на то, что в отдельных пунктах амплитуды волн не превышали 10 сантиметров.

Результаты моделирования процесса оперативного прогнозирования цунами, сравнение характерных времен (длительность расчета, момент времени выработки прогноза) с фактическими во время события позволяют по-новому взглянуть на процесс принятия решения об объявлении тревоги цунами и дать рекомендации по улучшению качества действий служб предупреждения.

При действующем регламенте, а также с учетом новых возможностей (постановки глубоководных станций измерения уровня океана) есть резерв повышения качества прогнозирования и понижения степени стрессовой ситуации для населения. При реализации предлагаемого гидрофизического способа прогноза действующий регламент может быть пересмотрен с целью уменьшения количества фактически ложных тревог. Предлагаемый способ может быть использован как региональными, так

и локальными службами, если последние имеют возможность принимать первичную сейсмологическую информацию и данные глубоководных уровней станций в режиме реального времени. Для принятия решения об объявлении тревоги цунами в конкретном населенном пункте, на конкретном участке побережья такие локальные (районные) службы, действующие под руководством Центра цунами, могут быть созданы.

Предлагаемый способ не заменит существующий сейсмологический (магнитудный) способ прогноза цунами, но обеспечит достоверность, обоснованность объявления тревоги цунами. Предварительный, выработанный по магнитудному признаку, прогноз (предупреждение) цунами может быть подтвержден или отвергнут на основании расчетов по данным уровней станций для каждого конкретного пункта. В случае подтверждения опасности цунами тревога должна подаваться в пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу, с оптимальной для этого пункта заблаговременностью. Эта заблаговременность должна быть определена с учетом интересов населения, возможностей своевременного выхода судов в открытое море, возможностей служб спасения. Следует определить также критический уровень амплитуды цунами, в соответствии с которым дифференцировать тревогу цунами по степени опасности: подавать отдельно для населения, работников прибрежных предприятий и судов, находящихся у причалов.

В частности, в случаях незначительных цунами, когда ожидаемая амплитуда волн не превышает критической, эвакуация населения может не проводиться, но должно быть дано предупреждение об опасности нахождения непосредственно вблизи береговой черты. При этом в зависимости от амплитуды волны предупреждение о цунами может сопровождаться требованием выхода судов в открытое море.

Заключение

В статье описаны и проанализированы действия Сахалинской службы предупреждения о цунами, которой был выполнен весь комплекс действий, предусмотренных регламентом, в рамках нормативного времени. При отсутствии количественной информации о возможном проявлении цунами в населенных пунктах объявленные в 2006—2011 гг. тревоги цунами на Ку-

рильских островах были оправданными. Тем не менее, как представляется, заблаговременность объявления тревог цунами в ряде случаев излишне велика. Например, в Северо-Курильске во время Чилийского цунами (27.02.2010) и цунами Тохоку (11.03.2011) тревога цунами была объявлена более чем за 3 часа до прихода цунами. Как показали недавние события, цунами амплитудой около 1 м не наносят какого-либо ущерба.

Сформулирована постановка задачи оперативного прогноза цунами, опирающегося на гидрофизические способы. Кратко описаны способ и алгоритм расчета форм цунами в заданных пунктах по данным глубоководных станций измерения уровня океана. Применение предложенного способа оперативного прогноза цунами не требует априорной детальной информации об очаге землетрясения. Для расчетов необходима сейсмологическая информация лишь о координатах эпицентра землетрясения. Способ не использует информацию о механизме генерации цунами, поэтому применим и в редких случаях возбуждения цунами подводными оползнями. Последнее подтверждается моделированием события 11.03.2011. Расчет формы прогнозируемого цунами может выполняться в режиме реального времени.

Построение передаточных функций для расчета формы цунами выполняется непосредственно после получения информации о координатах эпицентра землетрясения. Передаточные функции позволяют по данным станций измерения уровня океана рассчитывать форму цунами в заданном пункте. Более того, в период создания системы краткосрочного предупреждения о цунами способ может применяться, если введена в действие хотя бы одна станция слежения за уровнем океана. Это особенно актуально для Сахалинской службы предупреждения о цунами, в настоящее время располагающей одной глубоководной станцией измерения уровня океана. В ближайшей перспективе постановка еще двух станций. Для надежности прогноза может быть создана база передаточных функций. Однако ввиду большой трудоемкости такой работы базу целесообразно создавать после ввода в эксплуатацию новых глубоководных станций измерения уровня.

Предложенный способ применен для моделирования процесса оперативного прогноза некоторых недавних событий на Курильских островах. Сравнение результатов расчета формы цунами с результа-

тами инструментальных и визуальных наблюдений за произошедшими цунами показывает, что предложенный способ дает вполне адекватный прогноз. Результаты подобных расчетов позволят службам предупреждения о цунами определять времена прихода первой, максимальной волн, принимать решение об объявлении тревоги, оценивать длительность тревоги цунами для каждого пункта.

На основании результатов настоящей статьи, а также [5, 6], с учетом новых возможностей службы предупреждения о цунами сделаны предложения о возможных изменениях регламента объявления тревоги цунами: об оптимальной заблаговременности объявления тревоги, установлении критерия (степени) опасности цунами по прогнозируемой амплитуде волны. В соответствии с этим критерием может объявляться либо общая тревога с эвакуацией населения, судов, находящихся у причалов, либо тревога для работников прибрежных предприятий и судов без эвакуации населения.

Предложенные способ оперативного прогноза цунами и изменения регламента принятия решения об объявлении тревоги могут являться инструментом, позволяющим своевременно и достоверно давать информацию об ожидаемом цунами и с оптимальной заблаговременностью объявлять тревогу только в тех пунктах, в которых цунами будет представлять реальную угрозу. Тем самым будет уменьшен ущерб, связанный с ложными тревогами.

Литература

- Ивельская Т.Н., Храмушин В.Н., Шевченко Г.В. Чилийское цунами 27 февраля 2010 года: проверка состояния службы предупреждения о цунами // Проблемы анализа риска. 2010. Т. 7, № 2. С. 34—47.
- Кайстренко В.М., Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Проявления цунами Тохоку 11 марта 2011 г. на Тихоокеанском побережье России // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38, № 1. С. 41—64.
- Королев Ю.П. О возможности применения принципа взаимности при оперативном прогнозе цунами. Цунами и сопутствующие явления. Южно-Сахалинск, 1997. С. 60—71. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. VII).
- Королев Ю.П. Расчет цунами по измерениям уровня моря в удаленных точках при оперативном прогнозе // Океанология. 2004. Т. 44, № 3. С. 373 — 379.
- Королев Ю.П. Ретроспективный краткосрочный прогноз Андрияновского (Алеутские острова) цунами 1996 г. // Океанология. 2011. Т. 51, № 3. С. 409—417.
- Королев Ю.П. О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 2. С. 32—47.
- Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России / А.А. Поплавский, В.Н. Храмушин, К.И. Непоп и др. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.
- Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Б.В. Левин, В.М. Кайстренко, А.В. Рыбин и др. Докл. АН. 2008. Т. 419, № 1. С. 118—122.
- Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года / И.Н. Тихонов, Н.Ф. Василенко, Д.Е. Золотухин и др. Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 3—16.
- Соловьев С.Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов. Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7—50.
- Andreev A., Borodin R., Kamaev D. et. al. Automatic information and management system for the tsunami warning center. 24th International Tsunami Symposium. Novosibirsk, 2009.
- Cox, D.C. Performance of the seismic sea wave warning system, 1948—1967. HIG-68-2. 1968. 80 p.
- Fujii, Y., Satake, K. Tsunami Sources of the November 2006 and January 2007 Great Kuril Earthquakes // Bul. Seis. Soc. Am. June 2008. Vol. 98, №. 3. P. 1559—1571.
- Horrillo J., Knight W. and Kowalik Z. The Kuril Islands Tsunami of November 2006. Part II: Impact at Crescent City by local enhancement // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113, C01021. 12 p.
- Wei, Y., Cheung, K.F., Curtis, G.D. et. al. Inverse Algorithm for Tsunami Forecasts // J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering. ASCE. 2003. 129(2). P. 60—69.
- Korolev Yu. The Method of the Early Tsunami Warning Using Data of Remote Level Gauges. Proc. of the 22nd International Tsunami Symposium, Chania, Crete Island, Greece, 27—29 June, 2005. 2005. P. 113—119.
- Korolev, Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. 11. P. 3081—3091.
- The Kuril Islands Tsunami of November 2006. Part I: Impact at Crescent City by distant scattering / Kowalik Z.,

- Horrillo J., Knight W. and Logan Tom // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113, C01020. 11 p.
19. Pararas-Carayannis, G. Tsunamigenic Source Mechanism and Efficiency of the March 11, 2011 Sanriku Earthquake in Japan // Science of Tsunami Hazards. 2011. 30 (2). P. 126—152.
20. Gonzalez F.I., Titov V.V., Avdeev A.A. et. al. Real-time tsunami forecasting: challenges and solutions / Математические методы в геофизике: труды Международной конференции: в 2 частях. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2003. Ч. I. С. 225—228.
21. Titov, V.V., Gonzalez, F.I., Bernard, E.N. et. al. Real-time Tsunami Forecasting: Challenges and Solutions // Natural Hazards. 2005. 35(1). P. 35—41.
22. Satake, K. Inversion of tsunami waveform for the estimation of a fault heterogeneity: method and numerical experiments // J. Phys. Earth. 1987. 35(3), 241—254,
23. Tatehata, H. The New Tsunami Warning System of the Japan Meteorological Agency. Perspectives on Tsunami Hazard Reduction (Advances in Natural and Technological Hazards Research, v. 9). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997. P. 175—188.
24. Titov, V.V. Tsunami Forecasting. The Sea. Vol. 15. Eds. E.N. Bernard and A.R. Robinson. Harvard University Press, Cambridge, MA and London, England, 2009. P. 367—396.
25. Whitmore, P.M. and Sokolowski, T. J. Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings // Science of Tsunami Hazards. 1996. 14 (3). P. 147—166.
26. URL: http://decoltd.ru/news/sistema_rannego_preduprezhdenija_cunami/2010-11-18-15 (дата обращения: 06.02.2012).
27. URL: <http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami.html> (дата обращения: 06.02.2012).
28. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/> (дата обращения: 06.02.2012).
29. URL: http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/eng (дата обращения: 06.02.2012).
30. URL:<http://www.kunashir.ru/phpBB2/viewtopic.php?t=242> (дата обращения: 03.05.2011).
31. URL: <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (дата обращения: 06.02.2012).
32. URL: http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (дата обращения: 06.02.2012).
33. URL: <http://www.nippon-sekai.com/main/articles/great-east-japan-earthquake-of-2011/nhk-special-mega-tsunami/> (дата обращения: 06.02.2012).
34. URL: <http://www.rtw.s.ru/измерения-уровня-моря/сеть-измерений-уровня-моря-российской-спц.aspx> (дата обращения: 06.02.2012).
35. URL: [http://www.rtw.s.ru/центр-цунами-гу-сахалинское-угмс/события-цунами/хронология-действий-сахалинской-службы-предупреждения-о-цунами-\(спц\)-в-ходе-землетрясения-и-цунами-11-12-марта-2011-года.aspx](http://www.rtw.s.ru/центр-цунами-гу-сахалинское-угмс/события-цунами/хронология-действий-сахалинской-службы-предупреждения-о-цунами-(спц)-в-ходе-землетрясения-и-цунами-11-12-марта-2011-года.aspx) (дата обращения: 06.02.2012).

Сведения об авторах

Королев Юрий Павлович: кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории цунами, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН)

Количество публикаций: 73 публикации, в том числе 3 монографии в соавторстве, 3 авторских свидетельства на изобретения

Область научных интересов: физика океана, волновые процессы в океане, математическое моделирование в естественных науках, динамика идеальной жидкости, математическая физика

Контактная информация

Адрес: 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16
Тел.: +7 (4242) 79-61-54, факс +7 (4242) 79-15-17
E-mail: yury@imgg.ru, Yu_P_K@mail.ru

Ивельская Татьяна Николаевна: кандидат физико-математических наук, начальник Центра цунами ФГБУ «Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

Количество публикаций: 66 публикаций

Область научных интересов: физика океана, океанография, волновые процессы

Контактная информация

Адрес: 693000, г. Южно-Сахалинск, ул. Западная, 78
Тел.: +7 (4242) 43-70-51, факс +7 (4242) 72-28-20
E-mail: tanya.ivelskaya@gmail.com