

УДК 551.466.62+550.344.42 (265)

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2011

О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами

Ю. П. Королев,
Институт морской
геологии и геофизики
Дальневосточного
отделения Российской
академии наук,
г. Южно-Сахалинск

Аннотация

Дан обзор событий, связанных с объявлением тревог цунами в северной части Тихого океана с 1986 г. Рассмотрены последствия оправдавшихся и ложных тревог.

Описаны способ и алгоритм расчета формы прогнозируемого цунами на основе данных об уровне океана в удаленных от побережья точках в режиме реального времени. Для выполнения прогноза цунами необходима сейсмологическая информация только о времени главного толчка и координатах эпицентра землетрясения.

Представлены результаты численного моделирования процесса оперативного прогноза Симуширских цунами 2006, 2007 и 2009 гг. для северной части Тихого океана. Во всех экспериментах наблюдалось хорошее совпадение рассчитанных и зарегистрированных форм цунами при различном взаимном расположении очага цунами, станции измерения уровня океана и пунктов, для которых выполняется прогноз. Качество совпадения достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами в пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу. Правильно прогнозируется начальная фаза цунами: повышение или понижение уровня.

Результаты моделирования оперативного прогноза слабого Симуширского цунами 2009 г. в пунктах Курильских островов показали, что расчетная форма цунами достаточно хорошо совпадает с формой зарегистрированного цунами. Впервые показано, что по ограниченной информации об уровне в удаленной точке возможен прогноз цунами достаточно большой продолжительности, на основании которого можно оценивать длительность тревоги цунами. Подтверждена возможность выполнения прогноза в пунктах Курильских островов по данным станций измерения уровня океана, находящихся с океанской стороны Курило-Камчатского желоба.

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

Содержание

Введение

1. Способ оперативного прогноза цунами
2. Ретроспективный прогноз Симуширских цунами 2006, 2007 и 2009 гг.
3. Анализ прогнозных данных

Заключение

Литература

Введение

Побережье Дальнего Востока России, находящееся в зоне активных процессов земной коры, подвержено опасным природным явлениям, зачастую катастрофическим. Одним из них являются цунами. Предотвратить цунами в настоящее время невозможно, однако действующие службы предупреждения о цунами способны дать своевременный прогноз опасности цунами и объявить тревогу. После разрушительных цунами на Гавайских о-вах (1946 г.), на северных Курильских о-вах (1952 г.) службы предупреждения о цунами были созданы в США и СССР. В Японии служба цунами создана в 1946 г. После катастрофического цунами в декабре 2004 г. службы предупреждения о цунами создаются в странах бассейна Индийского океана. В задачи круглосуточных служб предупреждения о цунами входит обмен информацией, оповещение о цунами, подача тревоги цунами в районах или пунктах, в которых возможно проявление цунами. В настоящее время решение об объявлении тревоги цунами принимается на основе эмпирических соотношений между магнитудой землетрясения и интенсивностью цунами на ближайших берегах, выведенных в середине прошлого века (магнитудно-географический критерий). Тревога цунами объявляется, если магнитуда землетрясения превышает некоторое пороговое значение.

При объявлении тревоги в населенных пунктах, в которых возможно цунами, прекращается работа предприятий, расположенных в непосредственной близости от моря, стоящие у причалов или на рейде суда выходят в открытое море, население эвакуируется в безопасные места, зачастую глубокой ночью.

В разных случаях ущерб от события, сопровождающегося тревогой цунами, различен как количественно, так и качественно. Различают оправдавшиеся и ложные тревоги цунами.

В случаях оправдавшейся тревоги ущерб проявляется в виде неизбежных потерь: повреждений, разрушений зданий, сооружений, оборудования, находящихся в зоне воздействия цунами.

В редких случаях пропусков цунами к этим потерям могут добавиться потери в виде повреждений, затоплений судов, находящихся у причалов или на ближнем рейде, а также человеческие жертвы.

Случаи ложных тревог также сопровождаются ущербом, нередко значительным. Неизбежные по-

тери при этом отсутствуют, но причиняется ущерб, связанный с остановкой производства прибрежных предприятий, экстренным выходом судов в открытое море. Немаловажным негативным фактором является создание неоправданной стрессовой ситуации для населения [8].

Ущерб от ложной тревоги значительно меньше ущерба от состоявшегося цунами. Однако ввиду большого числа ложных тревог итоговые потери от них сравнимы с ущербом от цунами. Со времени основания службами предупреждения о цунами подано свыше 75% ложных тревог [8, 34].

В результате ложных тревог в 1986, 1994 и 1996 гг. только в штате Гавайи по данным Департамента коммерции ущерб составил 40, 30 и 60 млн долл. в ценах соответствующего года [34]. Ущерб от ложных тревог в России не оценивается.

В ноябре 2003 г. по данным первых уровней станций системы DART были оценены высоты волн ожидаемого цунами на Гавайских островах в результате землетрясения вблизи западных Алеутских островов. В соответствии с этим прогнозом объявленная на основе сейсмологического критерия тревога цунами была своевременно отменена. В результате эвакуация населения в штате Гавайи не проводилась, был предотвращен ущерб в 68 млн долл. по оценкам Департамента коммерции штата [35].

В России за последние 8 лет тревоги цунами объявлялись в сентябре 2003 г., ноябре 2006 г., в январе 2007 г. и в феврале 2010 г. Тревога цунами в сентябре 2003 г., объявленная на всем побережье Курильских островов и части побережья Камчатки протяженностью около полутора тысяч километров, оказалась ложной: в Южно-Курильске (о. Кунашир) высота волны цунами составила 13 см, в Малокурильском (о. Шикотан) — 78 см. Цунами в ноябре 2006 г. вызвало большие (до 30 метров) высоты заплеска на ближайших к очагу островах [9]. Высоты волн цунами составили в Южно-Курильске 40 см, в Малокурильском 155 см. В январе 2007 г. зарегистрировано цунами высотой 11 см в Южно-Курильске и 72 см в Малокурильском. В 2010 г. (Чилийское цунами) цунами было зарегистрировано во многих пунктах дальневосточного побережья России. Наибольшие волны зарегистрированы в Северо-Курильске, где максимальная высота волны составила 2,28 м. Цунами такой интенсивности, происходившее на фазе

отлива, не представляло угрозы для объектов береговой инфраструктуры, но являлось опасным для оставшихся вблизи берега судов и находящихся в прибрежной зоне людей. Во всех случаях тревога сопровождалась эвакуацией населения, экстренным выходом судов на рейд или в открытое море [4, 10]. Все упомянутые тревоги относятся к оправдавшимся в соответствии с принятым регламентом, т. к. высота волны составляла более 0,5 м.

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 [19, 22].

Как показали события последних лет, на одних участках побережья цунами может проявиться значительно, на других слабо.

Объявление тревог цунами, оказавшихся впоследствии фактически ложными в пунктах, где ожидалось цунами, не свидетельствует о неудовлетворительной работе сейсмологической службы, ответственной за объявление тревог и действующей в строгом соответствии с регламентом, а лишний раз демонстрирует несовершенство основанного на магнитудно-географическом критерии способа оперативного прогноза цунами.

Однозначного критерия оправдавшейся или ложной тревоги в настоящее время не существует. Считается, что тревога является оправдавшейся, если хотя бы на одном участке побережья амплитуда цунами превысила критическое значение вне зависимости от того, является ли этот участок заселенным или нет.

Представляется, что этот критерий следует пересмотреть и использовать применительно к конкретному пункту.

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 трево-

ги, 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.

Известное время прихода цунами позволит населению без паники покинуть жилища и эвакуироваться в безопасные места, предприятиям организовано прекратить работу и эвакуировать персонал, судам без излишней спешки выйти в открытое море.

Информация о высотах волн и интервалах времени между ними позволит аварийно-спасательным службам при необходимости выполнить экстренные спасательные, аварийные работы.

Знание предполагаемого времени окончания цунами позволит понизить уровень стресса у населения, который повышается в условиях неопределенности.

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

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 [11, 17]. Долгое время поставленная задача не имела решения, несмотря на первую успешную опытную реализацию: в 1980 г. экспериментальная станция, установленная на шельфе о. Шикотан, впервые зарегистрировала слабое цунами [3]. К сожалению, в силу ряда причин эти работы не получили развития. Главной причиной невостребованности уровней измерений являлся дефицит идей по использованию этой информации.

В решении проблемы оперативного прогноза цунами в настоящее время существуют два основных

направления: прогноз на основе сейсмологической информации и предварительных численных расчетов и прогноз, опирающийся на данные о цунами в открытом океане (гидрофизический способ). В статье не предполагалось дать обзор опубликованных работ по проблеме оперативного прогноза, поэтому ниже приведен список только первых публикаций авторов, посвященных гидрофизическому способу прогноза цунами.

Первые работы, в которых предлагались способы краткосрочного прогноза цунами по данным об уровне в открытом океане, появились лишь в середине 90-х годов прошлого века [15, 16, 21, 29]. Затем были опубликованы работы, в которых предлагались другие подходы к решению задачи оперативного прогноза цунами [1, 18, 30]. В целом работы преследовали одну цель: оперативный прогноз цунами должен вырабатываться для каждого пункта или участка побережья, подверженного действию цунами, и сопровождаться детальной информацией об ожидаемом цунами.

Результаты этих работ в различной степени востребованы в работе служб цунами США, России, Японии, Республики Корея.

Наиболее востребованным и реализованным в плане практических применений оказался способ оперативного предупреждения о цунами [18, 30], поддерживаемый правительством США. Согласно этому способу, форма ожидаемого цунами в заданной точке строится как линейная комбинация расчетных мареограмм от элементарных источников, находящихся в окрестности эпицентра землетрясения. Коэффициенты линейной комбинации (весовые коэффициенты вкладов элементарных источников в сформированную волну цунами) рассчитываются методом наименьших квадратов, исходя из сравнения расчетной волны с уровенными данными, получаемыми глубоководными станциями системы DART. Элементарные источники плотно покрывают сейсмически активные области потенциальных очагов цунами. Мареограммы от каждого из элементарных источников (синтетические мареограммы) заблаговременно рассчитываются в точках, где находятся станции системы DART, и в точках, для которых предполагается прогнозирование. База синтетических мареограмм при каждом изменении парка станций, или изменении координат станций

после подъема и профилактических работ, или при необходимости выполнять прогноз в новых пунктах должна корректироваться. Этот способ успешно применялся для расчетов ожидаемых цунами во время событий последних нескольких лет [27, 32, 33]. Тем не менее в ноябре 2006 г. прогноз для Кресент-Сити не оказался достоверным.

Современное состояние оперативного прогноза показывает, что эта задача еще не полностью решена и является актуальной как для России, так и для других стран бассейнов Тихого и Индийского океанов.

1. Способ оперативного прогноза цунами

В настоящей работе представлен способ расчета формы волны цунами в любой заданной точке вблизи побережья по известным координатам эпицентра землетрясения и данным об уровне океана в удаленной от побережья точке. Такая постановка задачи, которую можно назвать потребительской, рациональна с позиций тех, кого тревога цунами касается: население, административные органы, службы спасения. С математической точки зрения такая постановка некорректна: задача не имеет однозначного решения. Тем не менее выполнялись работы по поиску специальных способов ее решения. Первая публикация, в которой описана идея расчета, появилась в 1995 г. [21]. В этой и последующих работах предложен специальный подход, основанный на принципе взаимности, дающий приближенное решение задачи.

Принцип взаимности в акустике для монохроматических волн известен достаточно давно, с 1873 г. (Гельмгольц, Рэлей) [25]. Он является отражением свойства симметрии функции Грина для волнового уравнения. В дальнейшем доказана справедливость принципа взаимности в неоднородных средах, при наличии отражающих, поглощающих и импедансных границ [2, 7, 12]. Показано, что он выполняется также в случаях нестационарных волн [14]. Практическое применение принцип взаимности находит в гидроакустике для градуировки гидрофонов [28]. Применительно к длинным волнам на воде принцип взаимности, по-видимому, впервые использован в работе [21]. Подробно алгоритм расчета формы волны цунами в любой заданной точке вблизи

побережья, апробированный в численных экспериментах, опубликован в [5, 6, 20].

В предположении, что численные расчеты адекватно описывают процесс распространения и трансформации волн, на основе соотношений взаимности предложено расчетное соотношение, позволяющее по данным об уровне моря в одной точке рассчитывать форму уровня в другой [5, 6]:

$$\zeta(A,s) = \zeta(M,s) \cdot F(A,M,s). \quad (1)$$

Здесь $\zeta(A,s)$ — форма ожидаемого цунами в пункте A , $\zeta(M,s)$ — данные об уровне моря в точке M . Обе функции являются образами интегральных преобразований (спектрами Лапласа, Фурье или z -преобразования). $F(A,M,s)$ — передаточная функция, позволяющая использовать данные об уровне моря в удаленной от побережья точке для расчета формы ожидаемого цунами вблизи берега. При известной передаточной функции обратное интегральное преобразование дает искомый результат, т. е. форму ожидаемого цунами в заданной точке. Аргументы A и M функций в (1) обозначают как названия, так и координаты соответствующего пункта.

Для построения передаточной функции требуется информация о координатах эпицентра землетрясения, вызвавшего цунами. Она представляет собой отношение спектральных функций. В числителе — спектр расчетной формы волны в точке, для которой выполняется прогноз (точка A), в знаменателе — спектр расчетной формы волны в точке измерения уровня моря (точка M):

$$F(A,M,s) = \eta(A,s)/\eta(M,s). \quad (2)$$

Для получения этих спектров выполняется расчет форм волн в заданных точках от вспомогательного источника с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения.

Строго говоря, вспомогательный источник должен удовлетворять некоторым условиям подобия, учитывать механизм и основные характеристики землетрясения, вызвавшего цунами. Характеристики землетрясения не всегда возможно получить в оперативном режиме. Поэтому для практической реализации предложенного способа сделано важное предположение.

Согласно этому предположению, вспомогательный источник может быть задан как круговое на-

чальное возвышение свободной поверхности с диаметром 50—75 км с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Этот диаметр является характерным поперечным размером очага цунами. При этом нет необходимости в детальной сейсмологической информации о землетрясении. Достаточно информация лишь о координатах эпицентра землетрясения. Это позволит хоть приблизительно, но в степени, достаточной для практического применения, оперативно давать прогноз цунами в заданных точках побережья.

В расчетное соотношение не входят функции, описывающие источник, поэтому оно может быть применимо для расчета цунами от источников различного происхождения, например от подводного оползня.

После построения передаточной функции выполняется обратное интегральное преобразование. При этом длительность прогнозного равна длительности ряда уровенных измерений (функции $\zeta(M,s)$ в (1)). Способы обратного преобразования описаны в [5, 6].

В [20] показано, что способ может работать в режиме реального времени.

Алгоритм расчета формы волны цунами с использованием данных об уровне моря в удаленных точках состоит из следующих шагов.

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

2. По получении сейсмологической информации начинается расчет форм волн в точках, где находятся измерители уровня (функция $\eta(M,s)$), и в точках, для которых выполняется прогноз ($\eta(A,s)$). Вспомогательным источником является круговое начальное возвышение свободной поверхности с диаметром 50—75 км с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Расчеты (построение передаточной функции) завершаются до того, как цунами достигнет ближайшей точки регистрации.

3. Одновременно с получением сейсмологической информации осуществляется прием уровенной информации с дискретностью 1 минута из пунктов регистрации ($\zeta(M,s)$).

4. По мере поступления информации о цунами выполняется расчет по предложенному расчетному

соотношению для заданных пунктов в режиме реального времени.

5. На основе результатов расчета принимается решение об объявлении тревоги цунами.

2. Ретроспективный прогноз Симуширских цунами 2006, 2007 и 2009 гг.

2.1. Общая информация о численных экспериментах

Описанный в п. 1 способ был применен для моделирования процесса оперативного прогноза Симуширских цунами 2006, 2007 и 2009 гг. Цунами были зарегистрированы рядом глубоководных станций измерения уровня океана системы DART, расположенных вдоль Алеутских островов и западного побережья США. В 2007 и 2009 гг. станция 21413 юго-восточнее Токио и в 2009 г. станция 21416 восточнее Курильских островов зарегистрировали соответствующие цунами.

К сожалению, данные о цунами на российском Дальнем Востоке, пригодные для проверки

предложенного способа оперативного прогноза цунами, практически отсутствуют. Поэтому при моделировании использовались записи станций системы DART, содержащие данные об уровне с дискретностью 1 мин. [36]. Для демонстрации возможностей способа использовались данные, полученные в открытом океане, поскольку они свободны от фоновых колебаний, таких как сейшеские или штормовые.

Моделирование выполнено с использованием программы, описанной в [8]. При расчетах использовались батиметрические данные [26], интерполированные в сетку с пространственным шагом 3000 м. Расчетная схема численного эксперимента с указанием положений глубоководных станций, а также эпицентра землетрясения 15 ноября 2006 г. приведена на рис. 1. Цифровые обозначения на схеме — названия станций системы DART. Положение станций — в центре соответствующей надписи.

В качестве критерия совпадения мареограмм прогнозируемого и зарегистрированного цунами выбран коэффициент корреляции между соответствующими кривыми.

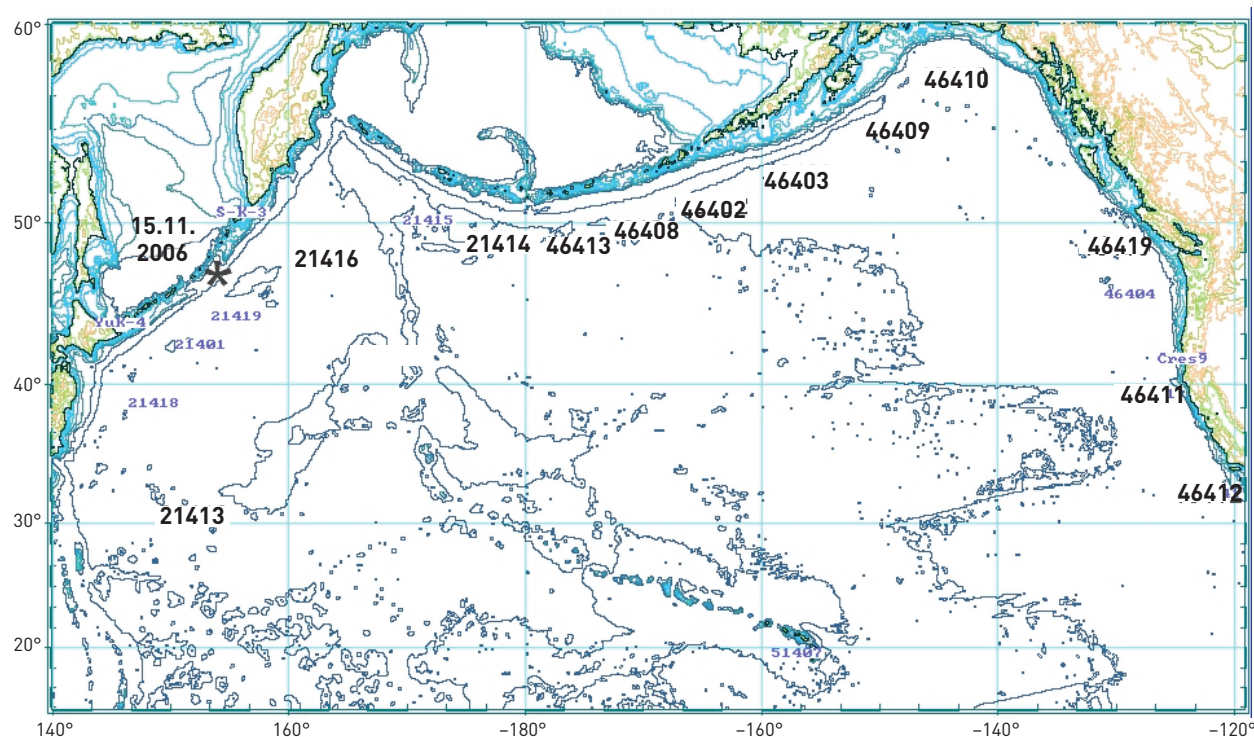


Рис. 1. Расчетная схема численных экспериментов

2.2. Симуширское цунами 15 ноября 2006 г.

Цунами возникло в результате землетрясения восточнее о. Симушир (центральные Курильские острова). Координаты эпицентра землетрясения $46^{\circ}35'31''$ с.ш., $153^{\circ}15'58''$ в.д. [37]. Другие сейсмологические данные о землетрясении в расчетах не используются.

Для построения передаточной функции выполнен расчет форм волн в точках, где находятся станции измерения уровня системы DART. Вспомогательный источник представлял собой аксиально-симметричное возвышение свободной поверхности с диаметром 75 км и максимальной амплитудой 10 м. Центр источника совпадал с эпицентром землетрясения. Глубина моря в эпицентре по данным разностной сетки равна 2803 м.

Данные ближайших к очагу цунами станций использовались для прогноза цунами в более удаленных точках в восточной части Алеутских островов и вблизи западного побережья США. Время пробега цунами до ближайшей точки регистрации 21414 составило около 150 мин., до удаленных 6—7 час. Время, необходимое для выполнения вспомогательных

расчетов, занимает менее 40 минут на портативном компьютере Acer TravelMate 4150. Выполнены расчеты форм волн от вспомогательных источников с дискретностью 1 мин. Использовались данные уровенных измерений также с дискретностью 1 мин. Из уровенных данных удалялись приливные составляющие.

Один из результатов прогноза приведен на рис. 2. На этом, а также на следующих рисунках сплошной линией обозначена форма прогнозируемого цунами, пунктиром — форма зарегистрированного цунами. Время отсчитывается от момента прихода цунами в соответствующую точку.

Как видно из представленного рисунка, формы прогнозируемого и зарегистрированного цунами достаточно хорошо совпадают как в точках вдоль Алеутских островов (46402, 46403, 46410), так и в точках вдоль западного побережья США (46419, 46411, 46412). Наблюдаются расхождения в хвостовых частях волновых пакетов. Совпадение головных частей хорошее. Представляется, что для практических целей оценки степени опасности цунами результат вполне хороший. Коэффициенты корреляции, рассчитанные по длительности 40 мин., со-

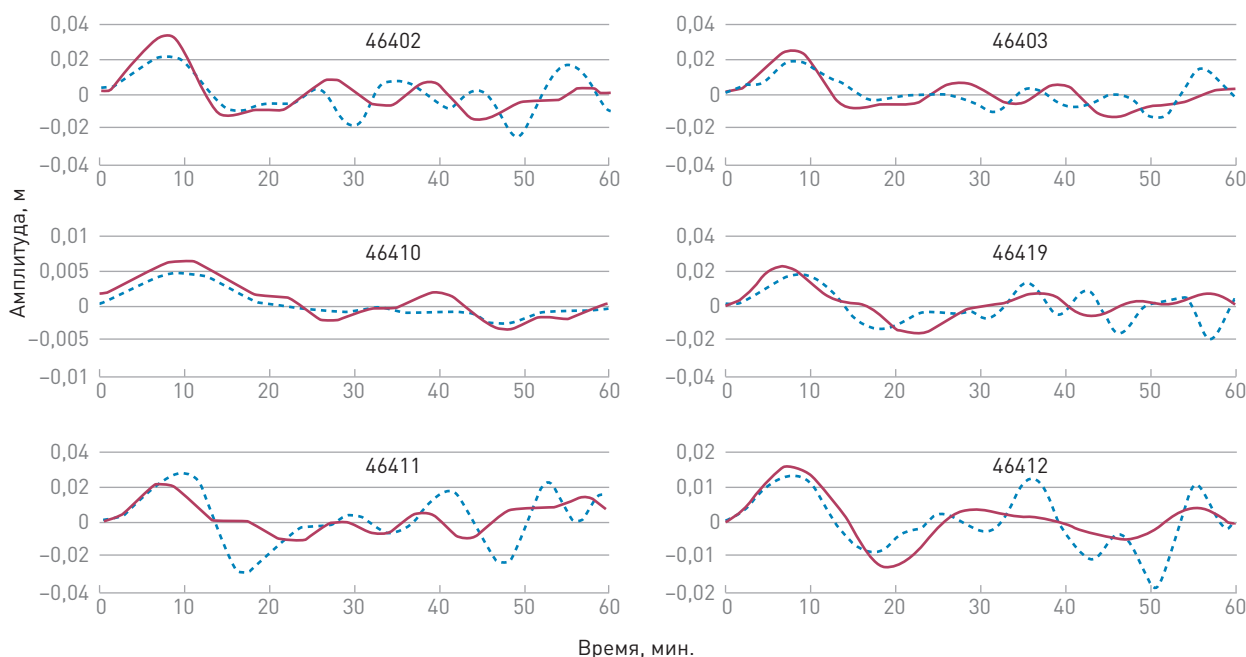


Рис. 2. Прогноз цунами 2006 г. по данным станции 21414. На рисунке указаны наименования точек прогноза

ставляют 0,70—0,85. Аналогичное качество прогноза наблюдается при использовании данных других станций.

2.3. Симуширское цунами 13 января 2007 г.

Цунами произошло в результате землетрясения восточнее о. Симушир (центральные Курильские острова). Координаты эпицентра землетрясения $46^{\circ}14'35''$ с.ш., $154^{\circ}31'26''$ в.д. [37].

Для построения передаточной функции выполнен расчет форм волн в точках, где находятся станции измерения уровня системы DART. Вспомогательный источник представлял собой аксиально-симметричное возвышение свободной поверхности с диаметром 75 км и максимальной амплитудой 10 м. Центр источника совпадал с эпицентром зем-

летрясения. Глубина моря в эпицентре по данным разностной сетки равна 6878 м. Схема расчетной области с указанием положений станций измерения уровня приведена на рис. 1. Положение очаговой области несколько отличается от положения очага цунами 15 ноября 2006 г., на рисунке не указано. Цунами зарегистрировано меньшим числом станций, чем во время предыдущего события.

Условия, в которых выполнялись численные эксперименты, относившиеся к событию 2006 г., таковы, что уровенные станции и пункт, для которого выполняется прогноз, находились в пределах некоторого одного лучевого сектора, по одну сторону от эпицентра. Представляло интерес выяснить, какими будут результаты, если направления лучей, соединяющих эпицентр с точкой уровенной станции и пунктом прогноза, сильно различаются, особенно

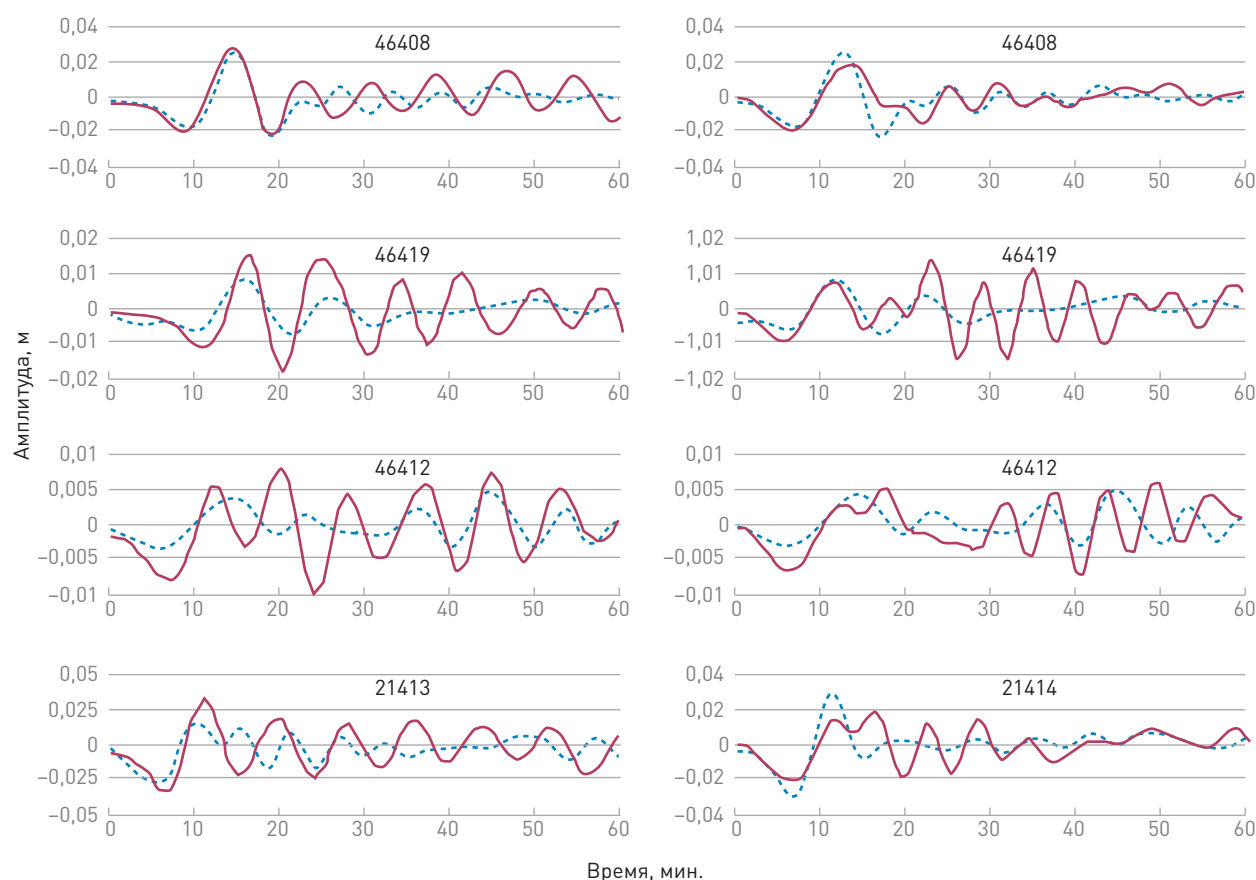


Рис. 3. Прогноз цунами 2007 г. по данным станций 21414 (левая колонка) и 21413 (правая колонка). На рисунке указаны наименования точек прогноза

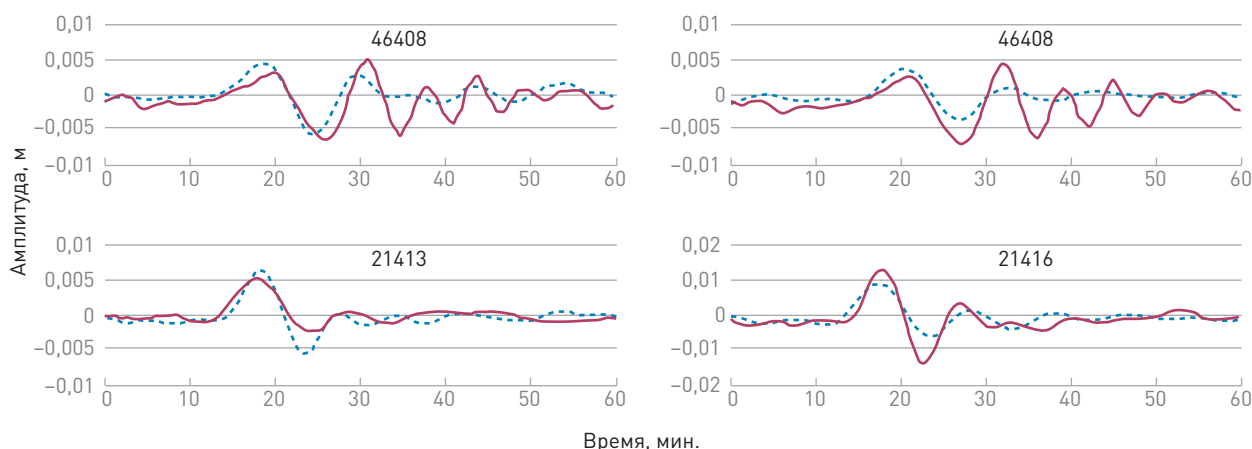


Рис. 4. Прогноз цунами 2009 г. по данным станций 21416 (левая колонка) и 21413 (правая колонка). На рисунке указаны наименования точек прогноза

если эти лучи направлены в противоположные стороны. В январе 2007 г. цунами было зарегистрировано станцией 21413, находящейся к югу от очага (690 морских миль к юго-востоку от Токио).

Результаты прогноза представлены на рис. 3.

Прогноз по данным станции 21414, находящейся к востоку от эпицентра, демонстрирует удовлетворительное качество совпадения расчетной и наблюдавшейся форм волн не только в восточном направлении (точки 46408, 46419 и 46412), но и в направлении на юг от эпицентра землетрясения (точка 21413). Аналогичное качество совпадения получено при использовании данных станции 21413. Во всех случаях расчетные формы волн правильно отражают фазу вступления цунами, начинающуюся с понижения уровня. Коэффициенты корреляции между расчетными и зарегистрированными формами волн находятся в пределах 0,50—0,72.

Результаты численного эксперимента показывают, что прогноз цунами возможен при различных взаимных положениях очага цунами, станции измерения уровня моря и пункта, для которого выполняется прогноз.

2.4. Симуширское цунами 15 января 2009 г.

Слабое цунами явилось результатом землетрясения восточнее о. Симушир (центральные Курильские острова). Координаты эпицентра землетрясения 46°51'25" с.ш., 155°09'14" в.д. [37].

Вспомогательный источник для построения передаточной функции представлял собой аксиально-симметричное возвышение свободной поверхности с диаметром 50 км и максимальной амплитудой 8 м. Глубина моря в эпицентре по данным разностной сетки равна 6887 м. Схема расчетной области с указанием положений станций измерения уровня приведена на рис. 1. Положение очаговой области несколько отличается от положения очага цунами 15 ноября 2006 г., на рисунке не указано. Цунами зарегистрировано лишь несколькими станциями, в том числе наиболее близкой к эпицентру станцией 21416 (240 морских миль к юго-востоку от полуострова Камчатка).

На рис. 4 представлены результаты расчета формы цунами по данным станции 21416, находящейся восточнее очага цунами, в точке 46408 в том же направлении и в направлении на юг от очага в точке 21413. Совпадение форм расчетных и зарегистрированных волн достаточно хорошее. На этом же рисунке показаны результаты расчета формы цунами в восточном направлении от очага по данным станции 21413, расположенной в южном направлении. Коэффициенты корреляции между расчетными и фактическими формами цунами достаточно велики и лежат в интервале 0,75—0,80.

Результаты эксперимента подтверждают вывод п. 2.3 о возможности прогноза цунами в различных направлениях.

2.5. Симуширское цунами 2009 г., прогноз для пунктов Курильских островов

В 2009 г. во время события 15 января цунами было зарегистрировано ближайшей к Курильским островам станцией 21416, а также регистратором уровня в порту Северо-Курильска в точке с координатами $50^{\circ}40'$ с.ш., $156^{\circ}07'$ в.д. Представляет интерес выяснить, возможно ли по данным уровня станции, находящейся восточнее Курило-Камчатского желоба, произвести расчет и выполнить оперативный прогноз цунами на побережье Курильских островов.

Несмотря на то что цунами было слабым, а амплитуда фоновых колебаний в точке, для которой производился расчет, сравнима с амплитудой ожидаемого цунами, был выполнен эксперимент по прогнозированию цунами вблизи Северо-Курильска и Южно-Курильска.

Расчетная схема численного эксперимента с указанием положения уровня станции 21416,

эпицентра землетрясения и пунктов, для которых выполнялся прогноз, приведена на рис. 5. Расчеты с использованием программы, описанной в [8], выполнялись на разностной схеме с шагом сетки 1000 м.

Точка, в которой выполнялся расчет цунами, находилась во Втором Курильском проливе вблизи Северо-Курильска (координаты точки $50^{\circ}41'$ с.ш., $156^{\circ}09'$ в.д.). Глубина воды в расчетной точке по данным батиметрической сетки равна 20 м.

Для выполнения прогноза цунами вблизи Северо-Курильска производились вспомогательные расчеты для построения передаточной функции. В качестве вспомогательного источника выбрано совмещенное с эпицентром цунами круговое начальное возвышение свободной поверхности с диаметром 50 км, максимальной амплитудой 8 м. Глубина воды в эпицентре по данным разностной сетки 6645 м. Использовались данные станции 21416 [36]. Длительность записи уровня станцией 21416 в режиме с дискретностью 1 мин. составила

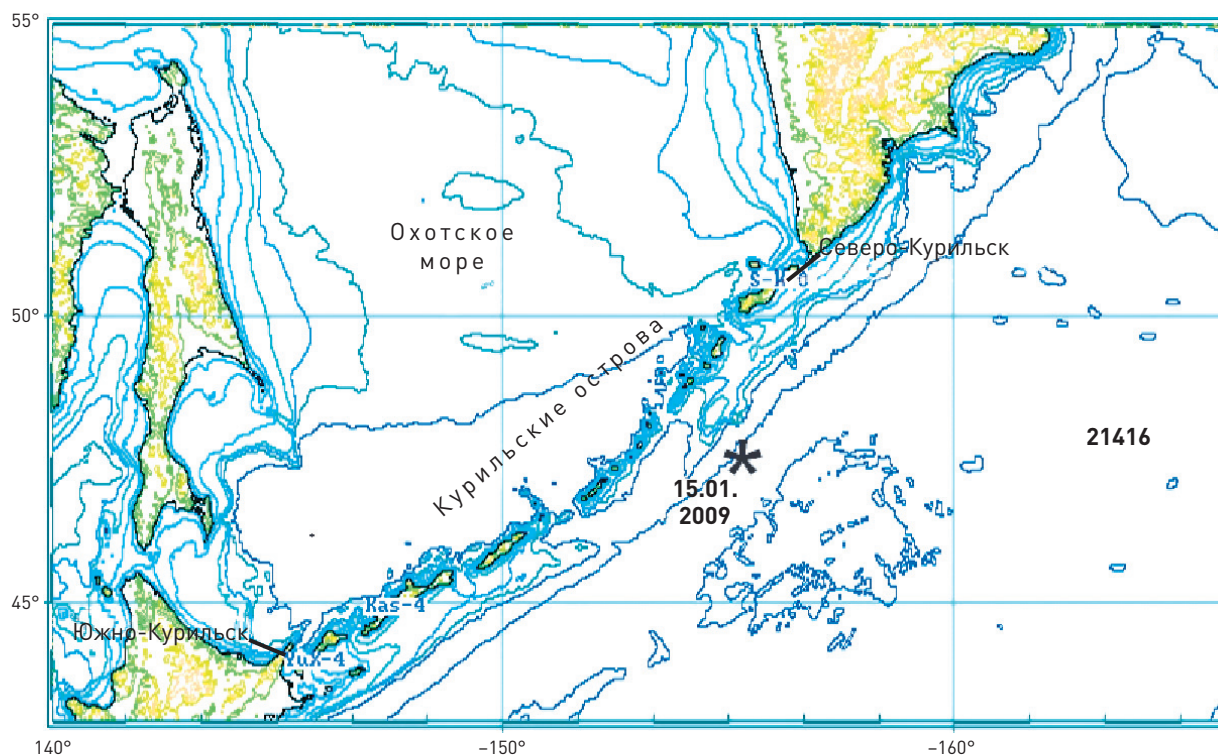


Рис. 5. Расчетная схема численного эксперимента

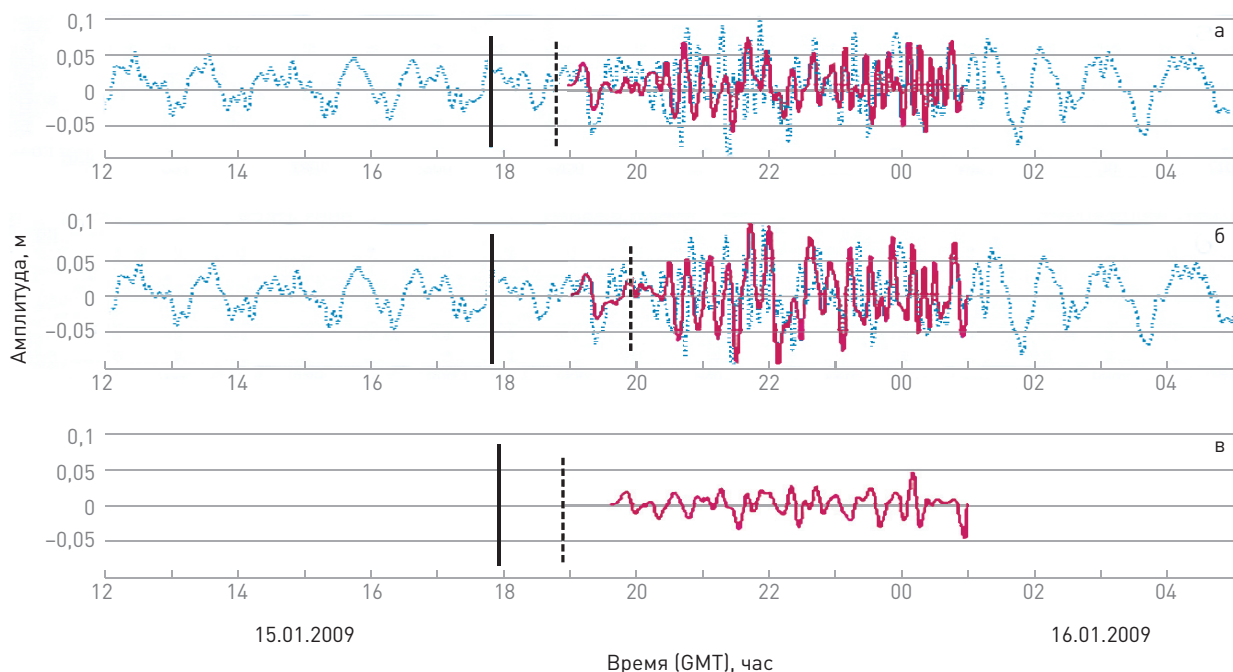


Рис. 6. Форма колебаний уровня моря в порту Северо-Курильска (пунктир) и результаты прогноза вблизи Северо-Курильска и Южно-Курильска (сплошная линия):

- 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.

195 мин., из которых 82 мин. — запись собственно цунами.

Расчеты, необходимые для построения передаточной функции, выполнены за 15 мин. при времени пробега цунами до точки 21416 — 41 мин., до Северо-Курильска — 75 мин. С учетом времени идентификации цунами по уровенным данным (20 мин.) и при условии оперативного получения уровенной информации предварительный прогноз цунами в точке вблизи Северо-Курильска может быть дан за 15 мин. до прихода волны в эту точку.

На рис. 6 (а, б) представлена запись регистратора уровня в порту Северо-Курильск (пунктир). На записи уровня моря видно, что до момента времени 19 час. регистрировались характерные собственные колебания в проливе. Затем характер колебаний изменился, что обусловлено приходом цунами. Спустя 6—7 часов установился характерный режим собственных колебаний, но с увеличенной амплитудой.

Результат расчета (прогноз) для точки, находящейся во Втором Курильском проливе на расстоянии около 3 км от берега, показан на рис. 6 (а, б).

Вертикальной сплошной линией на рис. 6 отмечен момент главного толчка землетрясения (17:49:39 GMT), 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. 6 (а). В дальнейшем по мере поступления уровенной информации прогноз уточняется. Уточненный прогноз по уровенным данным длительностью 82 мин. представлен на рис. 6 (б).

Прогноз, как предварительный, так и уточненный, показывает, что вступление цунами ожидается в 19 час., вслед за первой волной цунами следует ожидать волнение с большей амплитудой через пол-

тора — два часа. Длительность возможной тревоги цунами может быть оценена в 6—7 часов.

Несмотря на несовпадения во временных характеристиках формы прогнозируемого цунами с реальной записью уровня, в целом прогноз является удовлетворительным. Необходимо учесть, что цунами наложилось на собственные колебания пролива, а также то, что точка, для которой производился расчет, и пункт измерения уровня в порту находились на расстоянии около 3 км.

Одновременно с прогнозом цунами для Северо-Курильска выполнен прогноз для Южно-Курильска.

Время пробега цунами до Южно-Курильска — 107 мин. С учетом времени распространения цунами до точки наблюдения (41 мин.) и времени, необходимого для идентификации цунами (20 мин.), прогноз первой волны в Южно-Курильске может быть дан за 45 минут до прихода цунами. Точка, для которой выполнялся расчет, с координатами 44°01' с.ш., 145°50' в.д. находилась в бухте Южно-Курильская на расстоянии около 1,5 км от берега. Глубина воды в этой точке по данным батиметрической сетки равна 4,2 м.

Рисунок 6 (в) показывает, что первое вступление цунами в Южно-Курильске ожидается в 19:40, наибольшие волны придут спустя 2 час. 20 мин. после прихода первой волны, длительность тревоги 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.

Численный эксперимент выполнен в соответствии с алгоритмом, отличным от примененного в предыдущих экспериментах. В настоящее время этот алгоритм не является отработанным. Возможно, что такой прогноз, выполненный вблизи Кресент-Сити, позволил бы адекватно оценить опасность цунами в порту этого города.

Моделирование выполнено в условиях, когда уровенная станция находилась к востоку от очага, а точки, для которых давался прогноз, находились к северу и юго-западу от очага. Эксперимент в очередной раз подтверждает возможность прогнозирования цунами при различных взаимных положениях очага цунами, точки (станции) слежения

за уровнем океана и пунктов, для которых дается прогноз.

Симуширское цунами 2009 г. оценивается как слабое, высокий уровень фоновых колебаний не позволяет четко идентифицировать цунами вблизи побережья. Станция 21416 установлена без учета возможности использования ее данных для оперативного прогноза на Курилах. Поэтому заблаговременность прогноза цунами для Северо-Курильска оказалась недостаточной. Тем не менее 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.

Результаты численного эксперимента в очередной раз показывают, что станции должны быть расположены в открытом море. Станции (мареографы) вблизи берега, в особенности если находятся в бухтах с выраженными резонансными свойствами, не пригодны для оперативного прогноза.

Выполненные численные эксперименты показали, что предложенный в статье способ позволяет произвести расчет и дать прогноз ожидаемого цунами по данным удаленной от побережья станции слежения за уровнем океана. При этом удовлетворяются требования к прогнозу, сформулированные в п. 1: оцениваются момент прихода цунами, характер цунами, момент прихода наибольших волн, ожидаемое время отбоя тревоги.

3. Анализ прогнозных данных

При моделировании процесса оперативного прогноза Симуширских цунами 2006, 2007 и 2009 гг. кроме уровенных данных использовалась единственная сейсмологическая информация только о координатах эпицентра землетрясения. При практической реализации предложенного способа для выполнения прогноза цунами необходима сейсмологическая информация только о времени главного толчка и координатах эпицентра землетрясения (эта задача оперативно решается сетью сейсмостанций), расширение сети сейсмостанций для целей оперативного прогноза цунами не улучшит его качества.

Во всех экспериментах наблюдалось вполне хорошее совпадение рассчитанных и зарегистриро-

ванных форм цунами. Качество совпадения достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами.

Качество прогноза одинаково хорошее как в случаях, когда станции измерения уровня и пункты прогноза находятся в одном, восточном, направлении от эпицентра землетрясения (событие 2006 г.), так и в случаях, когда станции и пункты находятся в существенно разных направлениях, перпендикулярных и противоположных относительно очага цунами (события 2007 и 2009 гг.). Правильно прогнозируется начальная фаза цунами: повышение или понижение уровня.

В большинстве экспериментов прогноз выполнялся для пунктов в открытом океане. Результаты экспериментов демонстрируют возможности предлагаемого способа прогноза: в этих точках колебания уровня океана свободны от фоновых колебаний и позволяют произвести сравнение расчетных и зарегистрированных форм волн. Представляет большой интерес выполнить расчеты и сравнить их с фактическими формами цунами в пунктах вблизи побережья.

Подтверждена возможность выполнения прогноза в пунктах Курильских островов по данным станций измерения уровня океана, находящихся с океанской стороны Курило-Камчатского жёлоба.

На примере прогноза слабого Симуширского цунами 2009 г. в Северо-Курильске впервые показано, что по ограниченной уровневой информации возможен прогноз цунами достаточно большой продолжительности, на основании которого можно оценивать длительность тревоги цунами.

Численные эксперименты подтвердили предположение о том, что передаточная функция может быть построена как отношение расчетных спектров волн от простого аксиально-симметричного источника с центром, совмещенным с эпицентром землетрясения.

Другие результаты по прогнозированию Симуширских цунами по данным об уровне океана представлены в работах [27, 32, 33]. Критерий качества прогноза в настоящее время не выработан. Результаты, как правило, представляются в графическом виде. Поэтому объективно сравнить качество прогноза, представленного в настоящей работе и в упо-

мянутых работах, не представляется возможным. Как представляется, качество прогнозов, выполненных разными способами, одинаково.

Представленный в статье способ прогноза, кроме принципиальных различий в подходе к решению задачи оперативного прогноза, отличается от способа [18, 27, 30, 32, 33] тем, что он не требует заранее созданной базы расчетных мареограмм. Поэтому предложенный способ может применяться службами предупреждения о цунами на стадии создания сети уровневых станций.

В настоящее время в практике Российской службы предупреждения о цунами предполагается усовершенствование способа оперативного прогноза. Предполагается, что, как и прежде, тревога цунами будет объявляться на основании магнитудного критерия. Дополнительно предполагается прогнозирование ожидаемых высот волн цунами, основанное на предварительных численных расчетах.

Прогнозирование осуществляется на основании специально создаваемой базы теоретических мареограмм в точках, где располагаются посты наблюдения за уровнем моря, и в точках, для которых составляется прогноз. Эти теоретические мареограммы рассчитываются от элементарных источников, распределенных в соответствии с сейсмотектоническими особенностями акватории вокруг защищаемой территории. Источники строятся на основе пространственной дислокационной модели очага землетрясения.

Такая модель характеризуется рядом параметров. Рассчитанные по формулам Окады [24] с использованием этих параметров смещения дна в эпицентральной области землетрясения используются в качестве начальных данных для задачи распространения цунами, которая решается разностным методом в рамках линейной модели мелкой воды [13].

Есть серьезные основания сомневаться в том, что такое усовершенствование способа оперативного прогноза цунами действительно будет успешным. Построение источников основано лишь на предположениях. Прогноз в случаях, когда механизм землетрясения будет отличаться от предполагаемого, может оказаться недостоверным. Адекватные результаты расчетов возможны лишь при точном за-

дании источника. Ряд авторов признает, что результаты расчетов весьма чувствительны к изменению параметров очага (например, [23]).

При возникновении цунамигенного землетрясения после объявления тревоги выполняется выборка значений высот волн в заданных точках из предварительно созданной базы данных. Данные, поступающие в оперативном режиме с постов инструментальных наблюдений за уровнем моря, используются для уточнения первоначального прогноза ожидаемых высот волн в защищаемых пунктах.

Уточнение первоначального прогноза высот волн осуществляется на основе процедуры интерполяции, или коррекции, использующей данные постов инструментальных наблюдений [13]. Выполнить дополнительные расчеты во время события невозможно, поскольку параметры очага в настоящее время невозможно получить в оперативном режиме. Процедура интерполяции, или коррекции, никак не проработана. Но в любом случае она требует от оператора определенных знаний, опыта и интуиции. При отсутствии этих качеств вмешательство оператора не гарантирует безошибочность прогноза.

Подобный подход предлагался еще в 1996 г. [31]. Впоследствии от такого подхода, как неперспективного, отказались в пользу гидрофизического способа [18, 30].

Предлагаемый в статье способ не привязан к конкретному, predetermined, механизму землетрясения и позволяет выполнить прогноз по ограниченной информации о землетрясении с качеством, достаточным для принятия решения об объявлении тревоги цунами в любом заданном пункте побережья.

Заключение

1. Применение предложенного способа оперативного прогноза цунами не требует априорной детальной информации об очаге землетрясения. Для расчетов необходима сейсмологическая информация лишь о времени главного толчка и координатах эпицентра землетрясения. Расчет формы прогнозируемого цунами может выполняться в режиме реального времени.

2. Преимуществом предлагаемого способа с непосредственной подготовкой передаточной функции во время события является возможность применения его в тех областях, для которых нет заранее подготовленной базы расчетных мареограмм.

3. Способ оперативного прогноза может служить базой для создания единого программного комплекса оперативного прогноза цунами, включающего блок фильтрации от приливных и высокочастотных составляющих и блок предвычисления прилива в заданных точках. Он может быть реализован в рамках региональных или локальных служб предупреждения о цунами. При этом алгоритм действий оператора крайне прост: при возникновении землетрясения достаточно ввести координаты эпицентра землетрясения; прием и обработка информации об уровне океана в удаленных от побережья точках осуществляется в автоматическом режиме. Вмешательство оператора в процесс расчета не требуется. При реализации предложенный способ оперативного прогноза цунами может применяться в системах предупреждения о цунами на стадии их создания.

4. Предложенный способ может являться инструментом, позволяющим своевременно и достоверно давать информацию об ожидаемом цунами и объявлять тревогу только в тех пунктах, в которых цунами будет представлять реальную угрозу. Тем самым будет уменьшен ущерб, связанный с ложными тревогами.

Литература

1. Авдеев А.В., Горюнов Э.В., Лаврентьев М.М.-мл. Общественная задача цунами: определение параметров источника//Природно-техногенная безопасность Сибири: в 2 томах. Т. 1: Тр. научн. мероприятий. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001. С. 131—138.
2. Бреховских Л.Н., Гордин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
3. Дыхан Б.Д., Жак В.М., Куликов Е.А. и др. Первая регистрация цунами в открытом океане//Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 5. С. 1088—1092.
4. 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.

5. 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).
6. Королев Ю.П. Расчет цунами по измерениям уровня моря в удаленных точках при оперативном прогнозе// Океанология. 2004. Т. 44, № 3. С. 373—379.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 томах. Т. VI: Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
8. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России / Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непоп К.И. и др. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.
9. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др.//Докл. АН. 2008. Т. 419, № 1. С. 118—122.
10. Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года/ Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е. и др.//Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 3—16.
11. Соловьев С.Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов//Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7—50.
12. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн: в 2 томах. М.: Мир, 1978. Т.1. 486 с.
13. Andreev A., Borodin R., Kamaev D. et al. Automatic information and management system for the tsunami warning center//24th International Tsunami Symposium. Novosibirsk, 2009.
14. Chertock, G. Transient Flexural Vibrations on Ship-Like Structures Exposed to Underwater Explosions//J. Acoust. Soc. America. 1970. 48, 1(2). P. 170—180.
15. Chubarov, L.B. and Shokin, Yu.I. Mathematical modeling in mitigating the hazardous effect of tsunami waves in the ocean. A priori analysis and timely on-line forecast//Science of Tsunami Hazards. 1995. 13(1). P. 27—44.
16. Chung J.Y., Kim S.D., Ivanov V.V. Tsunami Wave Hindcasting in the Japan Sea//Tsunamis: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning (Advances in Natural and Technological Hazards, v. 4). Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 85 — 98.
17. Cox, D.C. Performance of the seismic sea wave warning system, 1948—1967. HIG-68-2. 1968. 80 p.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Korolyov Yu.P., Poplavsky A.A. Method of Tsunami Estimation for Short-Range Forecast Service//IUGG, XXI General Assembly. Boulder, Colorado, 1995. P. A335.
22. Kowalik Z., Horrillo J., Knight W. et al. The Kuril Islands Tsunami of November 2006. Part I: Impact at Crescent City by distant scattering// J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113, C01020. 11 p.
23. Lee, J.L. Tsunami Warning System for the Use of Emergency Management Officials//Proceedings of the Fifth International Symposium Ocean Waves Measurement and Analysis. Madrid, Spain, 2005.
24. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space//Bul. Seis. Soc. Am. 1985. Vol. 75, № 4. P. 1135—1154.
25. Rayleigh Lord (J.W. Strutt): The Theory of Sound. Dover, New York, 1945. Vol. 2. 476 p.
26. Smith, W.H.F. and Sandwell, D.T.: Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry//J. Geophys. Res. 1994. 99 (21). P. 803—824.
27. 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.
28. Uric, R.J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1975.
29. Voronina T.A., Tcheverda V.A. Reconstruction of tsunami initial form via level oscillation//Bul. of Novosibirsk Computer Center, ser. Mathematical Methods in Geophysics. 1998. № 4. P. 127—136.

30. 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.
31. 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.
32. Yamazaki, Y., Wei, Y., Cheung, K. F. et al. Forecast of Tsunamis from the Japan-Kuril-Kamchatka Source Region// Natural Hazards. 2006. 38(3). P. 411—435.
33. Yushiro Fujii and Kenji Satake. Tsunami Sources of the November 2006 and January 2007 Great Kuril Earthquakes// Bul. Seis. Soc. Am. June 2008. Vol. 98, № 3. P. 1559—1571.
34. <http://www.magazine.noaa.gov/stories/mag153.htm>.
35. http://nctr.pmel.noaa.gov/news_goldmedal.htm.
36. <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml>.
37. http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml.

Сведения об авторе

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)

67 публикаций, 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, ИМГиГ ДВО РАН

Тел.: (4242)796154, факс (4242)791517

E-mail: yury@imgg.ru, Yu_P_K@mail.ru