

УДК 550.344.42+551.466.62+551.509.59(265)

Оперативный прогноз цунами в Тихом океане

© Ю.П. Королёв

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

E-mail: y.korolev@imgg.ru

Проблема оперативного прогноза цунами до настоящего времени остается актуальной. Предлагаемый способ оперативного прогноза цунами позволяет на основе информации о цунами в открытом океане (например, получаемой глубоководными донными станциями) с достаточной заблаговременностью давать подробный прогноз ожидаемого цунами в любом пункте. Способ работает в режиме реального времени. Для выполнения прогноза от сейсмологической службы требуются данные только о координатах эпицентра землетрясения. Работоспособность предлагаемого метода проверена на примерах ближних и удаленных цунами (например, Тохоку 2011 г., Чили 2010, 2014 гг.). Способ может применяться не только централизованной службой предупреждения о цунами, но и любым пунктом, объектом, если он имеет возможность принимать в режиме реального времени информацию о цунами от удаленных станций слежения в открытом океане.

Ключевые слова: цунами, оперативный прогноз, тревога цунами, ложная тревога цунами.

The short-term tsunami forecast in the Pacific Ocean

Yu.P. Korolev

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

E-mail: y.korolev@imgg.ru

The problem of a short-term tsunami forecasting is actual at present. The proposed method of the short-term tsunami forecasting allows, based on information on tsunamis in the open ocean (for example, obtained by deep-sea bottom stations), with sufficient accuracy to give a detailed forecast of the expected tsunami at any point. The method works in a real time. To fulfill the forecast, the only a time of the start and the coordinates of the earthquake epicenter are required from the seismological service. The efficiency of the proposed method is tested on examples of local and remote tsunamis (for example, Tohoku 2011, Chile 2010, 2014). The method can be used not only by the centralized tsunami warning service, but also by any local service, if it is able to receive real-time tsunami information from remote sea-level stations in the open ocean.

Keywords: tsunami, short-term forecast, tsunami alarm, false tsunami alarm.

Введение

Цунами относится к числу серьезных стихийных бедствий, наносящих большой ущерб, нередко с человеческими жертвами. Побережье Дальнего Востока подвержено этому стихийному явлению. В особенности от цунами страдают побережья п-ова Камчатка и Курильских островов. Опасными являются не только локальные цунами, источники которых в Курило-Камчатской зоне, в Японском море, но и удаленные, возникающие, например, у побережья Южной Америки. Цунами представляет опасность не

только для населения, сооружений на берегу, судов, находящихся у причалов, но и для объектов вблизи береговой черты, на шельфе.

Цунами является длинной волной на мелкой воде, длина которой много больше глубины океана. При распространении цунами захватывает всю толщу воды. Поэтому неоднородности дна океана: подводные возвышенности, хребты – оказывают влияние на распространение волны, играя роль фокусирующих линз, волноводов.

При распространении цунами вдоль гра-

ниц океанов серьезное влияние на волны оказывает континентальный шельф. Шельф, как протяженная область вдоль границы континента, служит своего рода волноводом, вдоль которого волны могут распространяться на большие расстояния без заметного ослабления. Волны, отражаясь поочередно от берега и границы шельфа, могут усиливаться. Такие волны запаздывают относительно головной волны на несколько периодов, но имеют заметно большие амплитуды. Такой эффект наблюдался во время Симуширского цунами 2006 г. в Кресент-Сити (штат Калифорния США), когда волны с большими амплитудами достигли города уже после отбоя тревоги цунами. Аналогичная картина наблюдалась во время Чилийского цунами 2010 г. в Северо-Курильске: головные волны имели незначительную амплитуду до 30 см. Почти сразу после отбоя тревоги цунами наблюдалась волна амплитудой около 1 м, к счастью на фоне отлива. Возбуждение краевых, шельфовых волн относительно большой амплитуды зависит от взаимного расположения шельфа и очага цунами. Если источник цунами находится на шельфе, что нередко бывает вблизи побережья Чили, возбуждаются краевые волны, распространяющиеся на большие расстояния без заметного ослабления. Нередко подобные волны вызывают течения вдоль шельфа [Ефимов и др., 1985].

Вблизи береговой черты волновая картина усложняется: в бухтах, проливах возбуждаются сейшевые колебания. Сложная картина волновых движений наглядно продемонстрирована в многочисленных видеосвидетельствах цунами Тохоку 11 марта 2011 г. в Интернете.

Как собственно цунами, так и перечисленные сложные явления, краевые волны, течения, сопровождающие цунами, оказывают воздействие на берега, могут оказывать влияние на различные объекты освоения шельфа.

Тихоокеанское побережье Дальнего Востока подвержено не только локальным цунами, но и удаленным. Известно, что цунами, возникающие у побережья Чили, потенциально опасны для побережий российского Дальнего Востока. Во время Чилийского цунами 1960 г. от землетрясения с магнитудой

9.5 на побережье п-ова Камчатка и Курильских островов зарегистрированы заплески высотой до 7 м [National Centers...].

Делаются попытки защититься от цунами с помощью дамб. Однако и такие сооружения не дают полной гарантии. В случаях, когда амплитуда цунами превышает расчетную, защитные сооружения могут не выполнить своего предназначения. Подобное наглядно видно на видеороликах о событиях 11 марта 2011 г. в Японии.

Очевидно, что цунами невозможно предотвратить, но можно предупредить население об опасности. В настоящее время действующим способом предупреждения о цунами является сейсмологический, или магнитудно-географический, разработанный в середине прошлого века. В тихоокеанских странах после сильных трансокеанских цунами середины XX в. (Алеутское 1946 г., Камчатское 1952 г.) с целью предупреждения о цунами были созданы соответствующие национальные службы. Российская служба предупреждения о цунами (СПЦ) создана в 1958 г.

В силу статистического характера магнитудного способа с момента создания до 2009 г. службы цунами подали большое количество (до 75 %) ложных тревог, при этом пропустив некоторое количество цунами [Гусяков, 2010; Gusiakov, 2011]. Тревога объявляется на побережьях большой протяженности без информации об ожидаемых высотах волн. Понятие «ложная тревога цунами» до сих пор не имеет строгого определения. Согласно действующему регламенту, тревога считается оправдавшейся, если хотя бы на одном участке побережья заплеск составлял 1 м. В то же время высоты цунами на других участках могут быть незначительными. В таких случаях тревога может быть оправданной для одних и ложной для других участков побережья. Примерами таких тревог могут быть тревоги во время Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. Эти цунами сопровождалась заплесками до 20 м на ближайших к очагу незаселенных средних Курильских островах Симушир, Матуа, Кетой [Левин и др., 2008], в то время как на южных Курильских островах максимальные амплитуды составляли

40–70 см [Лобковский и др., 2009; Тихонов и др., 2008]. Подобные волны не представляют угрозы, тем не менее эти тревоги, согласно регламенту, относятся к оправдавшимся. Во всех случаях тревога сопровождалась эвакуацией населения, экстренным выходом судов на рейд или в открытое море [Тихонов и др., 2008]. Ложные тревоги цунами не только создают неоправданные стрессовые ситуации для населения, но и приносят значительный материальный ущерб, связанный с остановкой производства, всякой деятельности в опасных местах, выводом судов в открытое море. Объявление тревог цунами, оказавшихся впоследствии фактически ложными в пунктах, где ожидалось цунами, не свидетельствует о неудовлетворительной работе службы предупреждения, ответственной за объявление тревог и действующей в строгом соответствии с установленным регламентом, а демонстрирует несовершенство сейсмологического способа прогноза цунами.

Очевидно, что при многообразии волновых процессов, сопровождающих цунами, невозможно на основании только сейсмологических данных (практически только магнитуда землетрясения) давать адекватный прогноз цунами, тем более адресный.

Проблему оперативного прогноза цунами в России нельзя считать решенной. Актуальность этой задачи в дальнейшем будет только возрастать в связи с освоением не заселенных в настоящее время средних Курильских островов.

Проблема 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, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) [Королев, 2004; Королев, 2011].

Невысокая эффективность СПЦ привела к идее измерения цунами в открытом океане с целью раннего предупреждения. Пред-

ложение об использовании информации о сформировавшемся цунами, получаемой в открытом океане, сформулировано почти одновременно в СССР и США в конце 60-х годов прошлого века [Соловьев, 1968; Сох, 1968]. В соответствии с этой идеей удаленные от побережья станции измерения уровня способны обеспечить достоверность, оперативность, достаточную заблаговременность прогноза. Способы прогноза, основанные на информации о цунами в открытом океане, называются гидрофизическими способами предупреждения о цунами.

В статье [Фролов и др., 2012] представлены результаты работ по модернизации российской службы предупреждения о цунами. Основными задачами модернизации СПЦ являлись повышение надежности оповещения, исключение пропуска цунами и уменьшение количества ложных тревог. Прогресс в модернизации достигнут за счет развития сети сейсмологических наблюдений, более оперативного и точного определения магнитуды землетрясений, развития системы связи и оповещения об угрозе цунами.

В этой же статье [Фролов и др., 2012] описана названная современной концепция оперативного прогнозирования цунами. 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.

Подобный подход предлагался еще в 1996 г. [Whitmore, Sokolowski, 1996] в начале развития системы гидрофизических наблюдений. Впоследствии от такого подхода, как неперспективного, отказались в пользу гидрофизического способа, основанного на данных о сформировавшемся цунами в открытом океане [Titov, 2009; Wei et al, 2003].

В США эта идея реализуется практически [NOAA Center...; Titov, 2009; Wei et al, 2003]. Система (прогноз) SIFT (Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis – краткосрочный прогноз затопления от цунами) дает заблаговременную численную оценку амплитуды, времени пробега, других свойств

цунами с использованием данных наблюдений за цунами в открытом океане. В этой технологии применяются заранее рассчитанные (синтетические) мареограммы в точках расположения измерителей уровня и в заданных пунктах побережья от большого числа элементарных источников, расположенных в зонах возможных цунамигенных землетрясений. Затем по записям цунами на нескольких ближайших к области землетрясения станциях системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis – оценка и сообщение о цунами в океане) [NOAA Center...] определяются коэффициенты линейной комбинации синтетических мареограмм от этих источников, наилучшим образом аппроксимирующих сигнал на этих станциях. Из выбранных элементарных источников конструируется очаг цунами. Линейная комбинация синтетических мареограмм (с соответствующими коэффициентами) в заданных точках побережья дает форму ожидаемого цунами в этих точках. Объем базы синтетических мареограмм к настоящему времени оценивается в несколько терабайт. В настоящее время только в Тихом океане установлено более 40 глубоководных донных станций измерения уровня океана системы DART [National Data...]. Способ SIFT с успехом применялся к расчету всех значительных цунами в Тихом океане с 1996 г.

В настоящее время службами предупреждения о цунами в Тихом океане внедряется новый регламент оценки опасности цунами [Users Guide..., 2014], который основан на предварительных расчетах с использованием упрощенной модели источника. Приближенно оцениваются максимальные амплитуды волн на некотором расстоянии от побережья и, в соответствии с известным законом Грина, вблизи берега на глубинах 1 м. При этом принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры.

Способ оперативного прогноза цунами

Оригинальный способ расчета формы волны цунами в любой заданной точке вблизи побережья по данным об уровне океана

в удаленной от побережья точке был предложен в ИМГиГ ДВО РАН [Королев, 2004]. Он опирается на известный принцип взаимности. Основные алгоритмы этого способа (способа оперативного прогноза цунами) разработаны в рамках ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года». В дальнейшем способ модифицирован [Korolev, 2011].

Для расчета формы ожидаемого цунами в любой точке A по данным о цунами в удаленной от побережья точке M в [Королев, 2004] предложено соотношение

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

Здесь $\zeta(s, A)$ – спектр (образ интегрального преобразования) формы ожидаемого цунами, $\zeta(s, M)$ – спектр данных о цунами в открытом океане, $F(s, M, A)$ – передаточная функция.

Передаточная функция позволяет по данным о цунами в океане (в точке M) рассчитывать форму ожидаемого цунами в заданной точке A . Она представляет собой отношение спектров расчетных форм волн в точках A и M от вспомогательного кругового источника, центр которого совпадает с эпицентром землетрясения, вызвавшего цунами:

$$F(s, M, A) = \zeta_2(s, A) / \zeta_2(s, M).$$

Передаточная функция строится в режиме реального времени после получения информации о координатах эпицентра землетрясения. Обратное интегральное преобразование дает форму ожидаемого цунами в любом заданном пункте A .

Способ не опирается на конкретный механизм землетрясения, его магнитуду, размер очага, поэтому возможен прогноз цунами, возбуждаемых различными механизмами, в частности в результате взрыва подводного вулкана или схода подводного оползня.

Для выполнения прогноза от сейсмологической подсистемы необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения. При этом нет необходимости в расширении сети сейсмологических станций. Прогноз выполняется в режиме реального времени.

Момент времени выработки прогноза определяется временем пробега цунами до пункта регистрации в открытом море плюс время распознавания цунами по данным регистрации (первый полупериод – первый период длительностью 15–30 мин).

Заблаговременность прогноза – разность между временем добегания цунами до населенного пункта и временем выработки прогноза – должна гарантировать своевременные подачу тревоги, эвакуацию населения в безопасные места и выход судов в открытое море.

Модифицированный способ позволяет рассчитывать форму ожидаемого цунами произвольной длительности. Достаточно большая длительность расчетной формы цунами позволяет учесть возможные вторичные волны, нередко имеющие амплитуды, значительно превышающие амплитуды головных волн, а также оценить длительность возможной тревоги цунами.

Расчетное соотношение способа выведено на основе принципа взаимности, справедливого для линейных процессов. Поэтому способ позволяет производить расчет волновых форм до глубин, на которых влияние нелинейности несущественно, ориентировочно до 10 м.

В силу произвольности выбора вспомогательного источника для построения передаточной функции способ оперативного прогноза цунами является приближенным. Однако выявляет все особенности распространения волн, включая волноводные эффекты дна океана, краевые эффекты.

Предложенный способ оперативного прогноза цунами не требует создания гигантских баз расчетных мареограмм и может применяться местными службами предупреждения о цунами, любыми объектами, если имеется возможность получения данных о цунами от удаленных станций в режиме реального времени.

Применения способа

Способ применялся для моделирования (ретроспективного прогноза) большинства цунами последнего десятилетия и показал свою

работоспособность [Королев, 2011а, 2011б, 2013; Королев, Ивельская, 2011; Korolev, 2011].

В работе представлены результаты моделирования процесса оперативного прогнозирования ближних (Симуширское 2009 г. и Тохоку 2011 г.) и трансокеанских (Чилийские 2010 и 2014 гг.) цунами. Расчетная схема с указанием местоположений станций системы DART, а также эпицентров землетрясений изображена на рис. 1. Координаты станций системы DART и данные об уровне океана доступны на сайте National Data Buoy Center. При расчете форм трансокеанских цунами вблизи Курильских островов выполнялся переход на разностную сетку с меньшим шагом, фрагмент которой изображен на врезке рис. 1.

Для построения передаточной функции применялись вспомогательные круговые источники с диаметрами 50–100 км. Величина диаметра возмущения в таких пределах не оказывает влияния на результат расчета.

Симуширское цунами 15 января 2009 г.

Слабое цунами явилось результатом землетрясения магнитудой 7.4 восточнее о-ва Симушир (средние Курильские острова) с координатами эпицентра 46°51'25" с.ш., 155°09'14" в.д. [National Centers...].

Цунами было зарегистрировано ближайшей к Курильским островам станцией DART 21416, станцией DART 21413, находящейся к югу от Курильских островов, а также регистратором уровня в порту Северо-Курильска. Представляло интерес выяснить, возможно ли по данным уровенной станции DART 21416, находящейся восточнее Курило-Камчатского желоба, произвести расчет и выполнить оперативный прогноз цунами вблизи некоторых пунктов Курильских островов.

Для выполнения прогноза использовались данные станции DART 21416 длительностью 20 мин, соответствующие времени от 40 до 60 мин с момента начала землетрясения (рис. 2).

Расчеты, необходимые для построения передаточной функции, выполнены за 15 мин при времени пробега цунами до станции DART

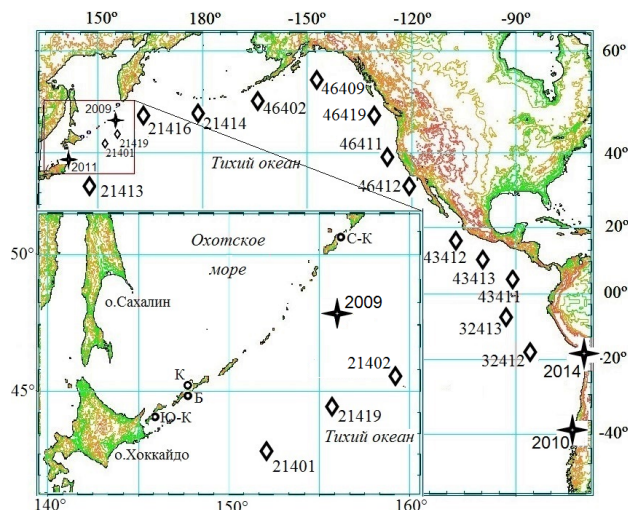


Рис. 1. Расчетная схема. С-К – Северо-Курильск, К – Курильск, Б – Буревестник, Ю-К – Южно-Курильск, звездочки – эпицентры землетрясений 2009, 2010, 2011 и 2014 гг., ромбы – положение станций системы DART.

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 мог быть дан за 15 мин до прихода волны в эту точку.

Результаты расчета для Северо-Курильска (на расстоянии от берега 1.5 км на глубине 15 м) представлены на рис. 2. Вертикальной сплошной линией на рисунке отмечен момент выработки прогноза.

Цунами было слабым, а амплитуда фоновых колебаний в точке, для которой производился расчет, сравнима с амплитудой ожидаемого цунами. Тем не менее получено неплохое соответствие амплитуд расчетного и зарегистрированного цунами. После прохождения цунами волнение через 6 ч вернулось к режиму собственных колебаний в проливе.

Согласно расчету, ожидаемое вступление цунами – через 75 мин после главного толчка землетрясения. Вслед за первой волной цунами следовало ожидать волнение с большей амплитудой через 1.5–2 ч. Длительность возможной тревоги цунами оценивается в 6–7 ч.

Выполнен расчет цунами в точке, в которой находилась станция DART 21413, для сравнения с зарегистрированной этой станцией формой цунами.

Совпадение форм расчетных и зарегистрированных волн в Северо-Курильске и на станции DART 21413 достаточно хорошее

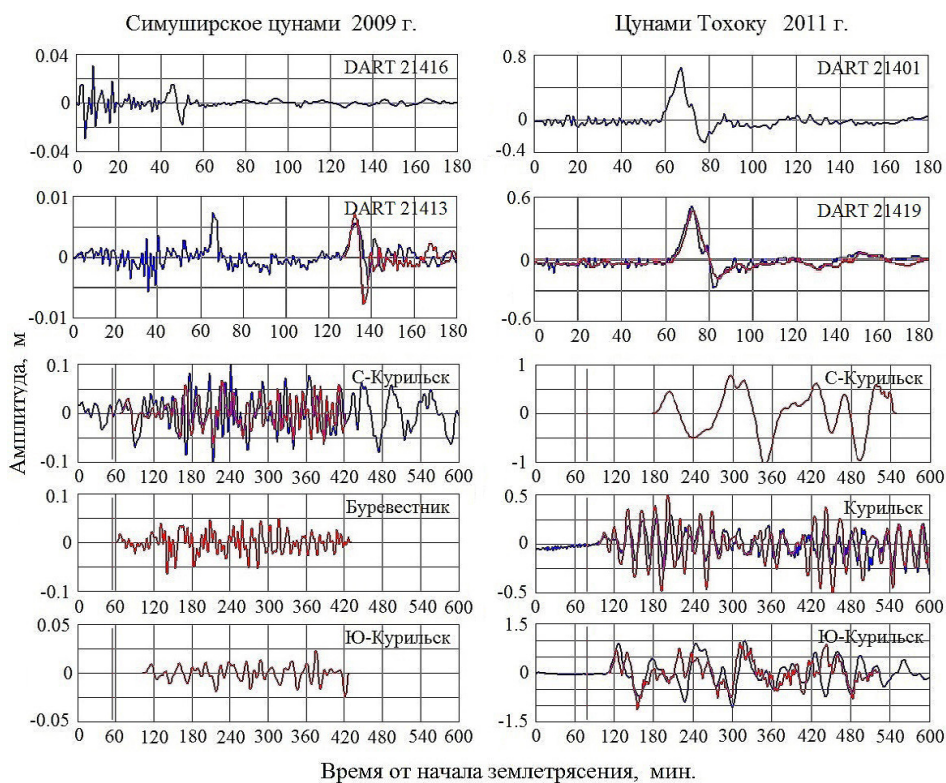


Рис. 2. Результат расчета цунами 2009 и 2011 гг. по данным станций системы DART. Здесь и на рисунках 3, 4 красная линия – расчет, синяя – наблюдения.

(рис. 2). Результаты эксперимента подтверждают сделанное ранее предположение о возможности прогноза цунами в различных относительно очага цунами направлениях.

На рис. 2 приведены формы расчетной волны вблизи Южно-Курильска (расстояние до берега 2 км, глубина 4 м) и портпункта Буревестник (расстояние до берега 4 км, глубина 30 м).

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 времени прихода первой волны в Южно-Курильске мог быть дан за 45 мин до прихода цунами, длительность тревоги цунами можно оценить в 6 ч.

Для Буревестника момент окончания расчетов и момент прихода цунами практически совпадают. В данном случае предложенный способ оперативного прогноза для Буревестника не является эффективным.

Станция DART 21416 установлена без учета возможности использования ее данных для оперативного прогноза на Курилах. Поэтому заблаговременность прогноза цунами для Северо-Курильска и Буревестника 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. При постановке станции DART в точке, до которой пробег цунами составлял бы 15 мин, например в точке DART 21419, заблаговременность прогноза для Северо-Курильска, Буревестника и Южно-Курильска составила бы 40, 25 и 70 мин соответственно.

Цунами Тохоку 11 марта 2011 г.

Сильное землетрясение с магнитудой 9.0 произошло у северо-восточного побережья о-ва Хонсю. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 38°17'49" с.ш., 142°22'23" в.д. [National Centers... ; NOAA Center...]. Цунами было необычным: его ам-

плитуда превышала величину, предсказываемую расчетами для землетрясения с магнитудой 9.0. Первоначальная амплитуда волны, возникшей после главного толчка, составляла 2 м. Спустя 11 мин она неожиданно увеличилась до 5 м. Качественное объяснение этого эффекта дано в [Pararas-Carayanis, 2011]. Предположительно, он аналогичен эффекту подводного оползня.

Расчет формы волны цунами выполнен для точек, находящихся вблизи населенных пунктов Курильских островов. Результаты расчета формы волны длительностью до 7 ч представлены на рис. 2.

Для расчета использовались данные российской станции DART 21401 длительностью 17 мин, соответствующие времени от 60 до 77 мин (рис. 2).

Для подтверждения работоспособности предложенного способа выполнен расчет формы цунами для точки в океане, в которой находилась ближайшая к островам станция DART 21419. Получено очень хорошее совпадение расчетной и фактической форм волны.

Несмотря на аномальный механизм возбуждения цунами Тохоку 11.03.2011, расчет, выполненный по данным станции измерения уровня DART 21401 с использованием информации лишь о координатах эпицентра землетрясения, без привлечения дополнительной сейсмологической информации, подтверждается не только инструментальными измерениями (DART 21419, Южно-Курильск, Курильск), но и другими свидетельствами: данными судового эхолота (Северо-Курильск), визуальными наблюдениями (портпункт Буревестник) [Кайстренко и др., 2011].

Как видно из сравнения расчетных и зарегистрированных форм цунами, в Курильске (удаленность от берега 0.8 км, глубина 3.2 м) и Южно-Курильске (5.4 км и 29 м) достаточно хорошо совпадают структура, амплитуды и характерные периоды волн. В Северо-Курильске (1.1 км и 16 м) размах колебаний уровня не должен превышать 1,8–2 метров. Этот результат хорошо согласуется с данными наблюдений в Северо-Курильске: по ин-

формации с судов перепад уровня (размах колебаний) составлял 1,6 м.

Результаты расчетов, подтвержденные инструментальными и другими свидетельствами, позволяют надеяться на то, что расчеты для других пунктов, в которых отсутствуют измерения, также адекватны реальным амплитудам.

Время построения передаточной функции не превышало 25 мин, тогда как время пробега цунами до ближайшей станции DART 21401 равно 58 мин. С учетом времени распознавания цунами в точке регистрации (первый полупериод длительностью 17 мин) предварительный прогноз мог быть дан через 75 мин после главного толчка землетрясения. Момент окончания расчетов отмечен на рис. 2 вертикальной сплошной линией. Заблаговременность расчетов составляет для Северо-Курильска 105 мин, для Южно-Курильска 43 мин, для Курильска 20, для портпункта Буревестник – 10 мин [Королев, Ивельская, 2011].

По результатам расчета могло быть принято решение об объявлении тревоги в Юж-

но-Курильске и Северо-Курильске. Для Курильска заблаговременность прогноза мала, но амплитуда цунами, даже несколько завышенная, не является опасной. Для Буревестника и пунктов Малой Курильской гряды тревога должна объявляться в соответствии с магнитудным методом.

Чилийское цунами 27 февраля 2010 г.

Землетрясение магнитудой 8.8 произошло вблизи побережья Чили. Эпицентр землетрясения находился в точке с координатами 36°07'19" ю.ш., 72°53'53" з.д. [National Centers... ; NOAA Center...].

Расчет цунами выполнялся по данным ближайшей к очагу цунами станции DART 32412, зарегистрировавшей цунами. Форма цунами представлена на рис. 3 и 4. В точке, где расположена станция DART 32412, цунами представляло собой головную волну заметной амплитуды с первым полупериодом около 20 мин, сопровождавшуюся хвостом малой амплитуды.

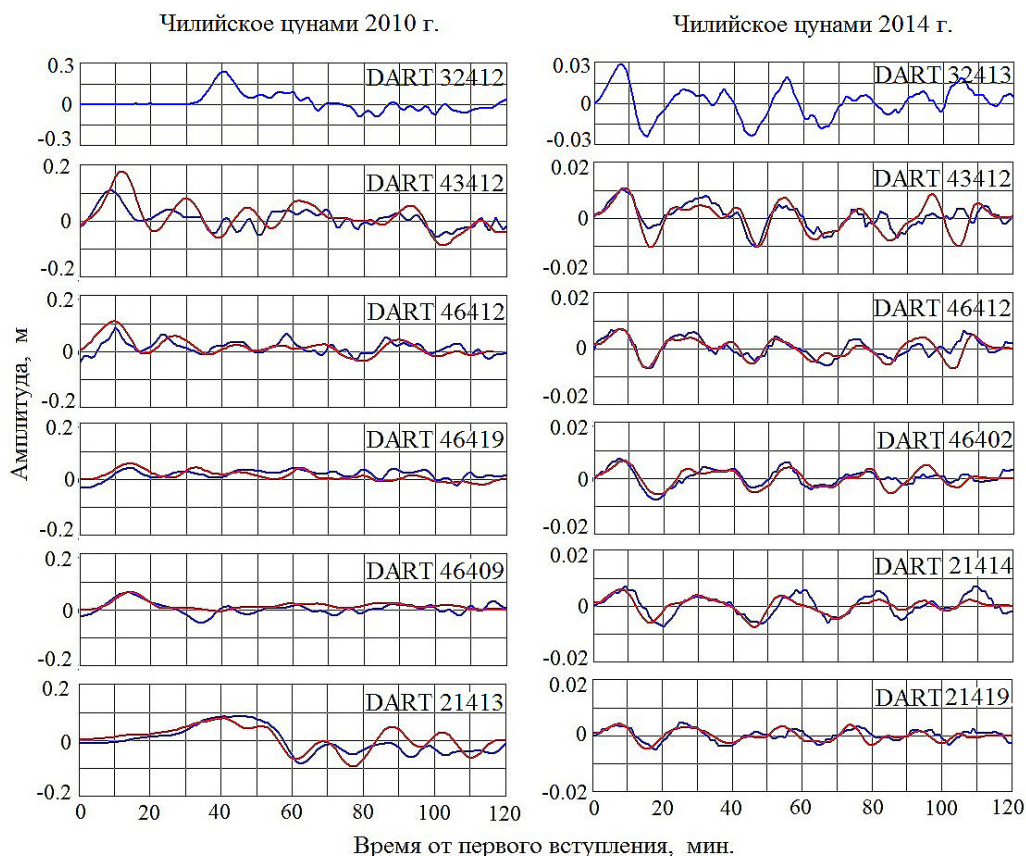


Рис. 3. Результат расчета цунами 2010 и 2014 гг. в открытом океане по данным станций системы DART.

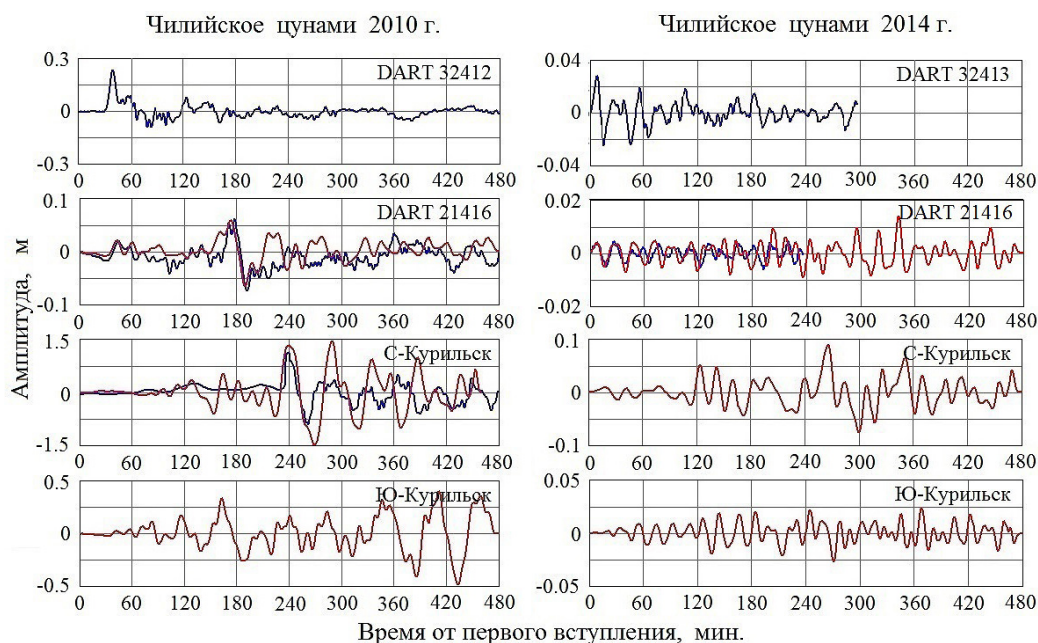


Рис. 4. Результат расчета цунами 2010 и 2014 гг. вблизи побережья Курильских островов по данным станций системы DART.

Расчет формы цунами длительностью более 120 мин в точках, где находились станции системы DART 43412, 46412, 46419, 46409 вблизи западного побережья Северной Америки и DART 21413 вблизи Японии в открытом океане, показывает неплохое совпадение головных волн, структуры волн с зарегистрированным цунами (рис. 3). Расчет выполнен с использованием разностной сетки с шагом 5 км на экваторе.

Результаты расчета цунами в районе Курильских островов, выполненного после перехода на сетку с шагом 1 км по длительности записи на станции DART 32412, равной 20 мин, представлены на рис. 4.

Для Северо-Курильска (точка на расстоянии от берега 0.9 км на глубине 15 м) расчет дает головные волны небольших амплитуд, несколько превышающих амплитуды зарегистрированных волн, в течение 220 мин. Прогнозировался приход максимальных волн с амплитудами, превышающими 1 м, спустя 3.5 ч после первого вступления. Фактически тревога цунами в Северо-Курильске объявлялась, но была отменена до прихода максимальных волн.

Получено вполне хорошее совпадение расчетной формы с зарегистрированным на станции DART 21416 цунами.

Два последних случая демонстрируют качество прогноза, достаточное для принятия решения об объявлении тревоги цунами.

Регистрация Чилийского цунами в Южно-Курильске (расстояние от берега 2.0 км, глубина 8.5 м) не проводилась, сравнить результат расчета с фактическим цунами не представляется возможным [Королев, 2013].

Чилийское цунами 1 апреля 2014 г.

Землетрясение с магнитудой 8.2 произошло у северного побережья Чили с эпицентром в точке с координатами 19.642° ю.ш., 70.817° з.д. [National Centers... ; NOAA Center...]. На побережье Чили, Эквадора и Коста-Рики была объявлена тревога цунами и произведена эвакуация населения с опасных территорий. Возникшее цунами вызвало затопление ближайшего к очагу участка побережья Чили высотой до 4 м [National Centers... ; NOAA Center...].

К моменту начала расчетов были доступны данные станции DART 32413 (см. рис. 3 и 4), взятые в качестве опорных, по которым выполнялся прогноз.

Расчеты сравнивались с имевшимися фактическими данными некоторых станций в океане (DART 43412, 46412, 46402, 21414 и

21419) (рис. 3). Расчет выполнялся на разностной сетке с шагом 5 км на широте экватора.

При распространении от Калифорнии вдоль западного побережья США, вдоль Алеутских островов до Курильских островов и Японии цунами оставалось практически неизменным: сохранялась форма волны, амплитуда, составлявшая 0.5–1.0 см.

Хорошее совпадение результатов расчета с формами зарегистрированного в открытом океане станциями DART цунами позволяло надеяться, что прогноз для Курильских островов будет адекватным.

Расчет цунами для Курильских островов был выполнен после перехода на разностную сетку с более подробной батиметрией (шаг разностной сети 0.9 км на широте 45°). Единственной станцией вблизи Курильских островов, зарегистрировавшей цунами в течение 240 мин, была станция DART 21419. Сравнение расчета и фактической формы цунами на этой станции представлено на рис. 4.

В Северо-Курильске, о-в Парамушир (точка С-К на рис. 1 на расстоянии 1.1 км к востоку от порта при глубине 16 м), прогнозировались головные волны амплитудой до 4 см, время прихода цунами 2 апреля 2014 г. в 20:40 (7:40 сахалинского времени 3 апреля). Структура прогнозированной волны цунами в Северо-Курильске аналогична структуре цунами 2010 г.: приход волн с максимальными амплитудами до 8 см с запозданием относительно первого вступления на 3.5 ч.

В Южно-Курильске, о-в Кунашир (точка Ю-К на расстоянии 5.4 км к востоку от порта на глубине в этой точке 29 м), прогнозировались волны амплитудой до 3 см, ожидаемое время прихода цунами-2 апреля 2014 г. в 21:40 (по сахалинскому времени в 8:40 3 апреля). В других пунктах Курильских островов также прогнозировались волны с амплитудой до 3 см.

Расчет выполнен к 22 ч 2 апреля (время сахалинское).

Прогноз Чилийского цунами 1 апреля 2014 г. на побережье Курильских островов впервые в России выполнен практически в режиме реального времени [Королев, Храму-

шин, 2016]. Сравнение результатов расчета цунами в океане с данными станций DART демонстрирует достаточно высокую точность расчета волновых форм.

Прогноз для Курильских островов получен за 9.5–10.5 ч до прихода волны к побережью Курильских островов. На основании этих расчетов возможно было принятие решения не объявлять тревогу цунами.

К сожалению, сравнить прогноз с реальным цунами на основе инструментальных наблюдений не представляется возможным: регистраторы службы предупреждения о цунами в указанных пунктах были демонтированы летом 2013 г.

Обсуждение

Как видно из представленных результатов, расчетные формы цунами для точек в открытом океане хорошо совпадают с формами цунами, зарегистрированными станциями системы DART.

Расчетные формы цунами вблизи Курильских островов в целом довольно хорошо совпадают по структуре волн. Описываются собственные колебания в заливах, вызванные приходом цунами, головные волны малой амплитуды и вторичные волны, имеющие амплитуды, значительно превышающие амплитуды головных волн. Расчетные амплитуды совпадают с амплитудами зарегистрированных волн с точностью, достаточной для принятия решения об объявлении тревоги цунами в соответствующем пункте. Расхождения в деталях обусловлены грубостью расчетной разностной сетки. Для повышения точности расчетов, учета резонансных, краевых эффектов необходимы более подробные сетки. Однако применение мелких сеток приведет к увеличению времени расчетов, что может отразиться на заблаговременности прогноза.

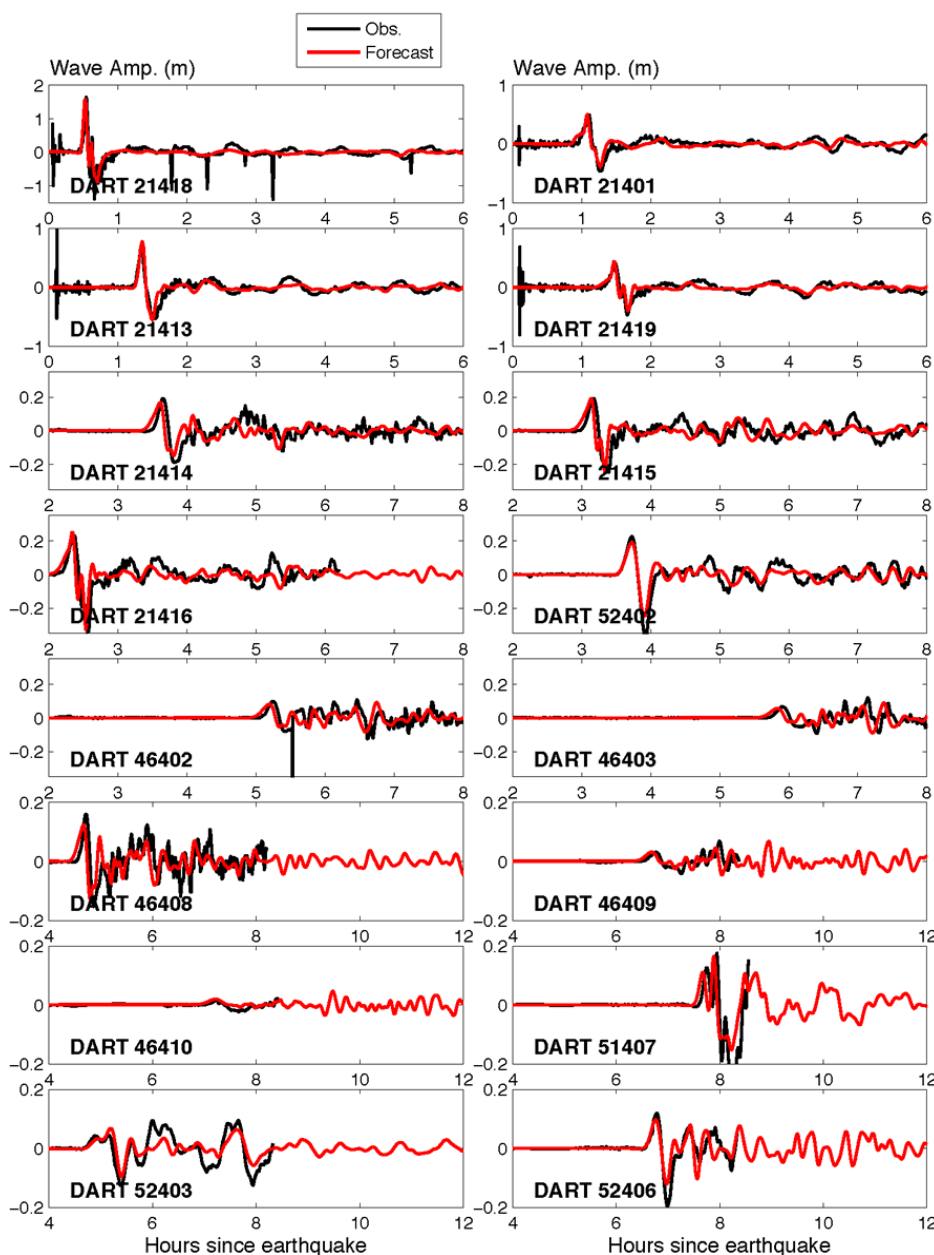
Способ не является универсальным. Заблаговременность прогноза в некоторых случаях, при малых временах добегания цунами до населенного пункта, может оказаться недостаточной. В таких случаях тревога цунами должна объявляться в соответствии с действующим в настоящее время регламентом (магнитудным критерием).

Изложение предложенного способа оперативного прогноза цунами было бы неполным без сравнения с основным способом предупреждения, разработанным для служб предупреждения о цунами в США. Сопоставление результатов позволит оценить качество прогноза, выполняемого разными способами.

Для сравнения ниже приведены некоторые результаты расчетов способом SIFT. Для

этого способа также справедливы приведенные выше замечания, касающиеся заблаговременности прогноза.

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчета этим методом цунами Тохоку 2011 г. и Чилийского цунами 2014 г. в открытом океане и сравнение с волновыми формами, зарегистрированными станциями системы DART. Расчетные и зарегистрированные формы цунами хорошо совпадают друг с другом.



 **DART model-data comparison plots**
NOAA Center for Tsunami Research

Рис. 5. Сравнение расчетных способом SIFT и зарегистрированных станциями DART форм цунами Тохоку 2011 г. (http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/images/comp_plots/20110311_darts_comp.png).

Comparison of the offshore forecast model of the April 1, 2014 Iquique, Chile tsunami with DART observations.

The time axes of the model data for DARTs 32402, 51407 and 51426 are shifted for comparison purposes by the amount indicated. DARTs 32401 and 32402 were used to constrain the model source. The rest of the plots are comparison of data with the forecast model.

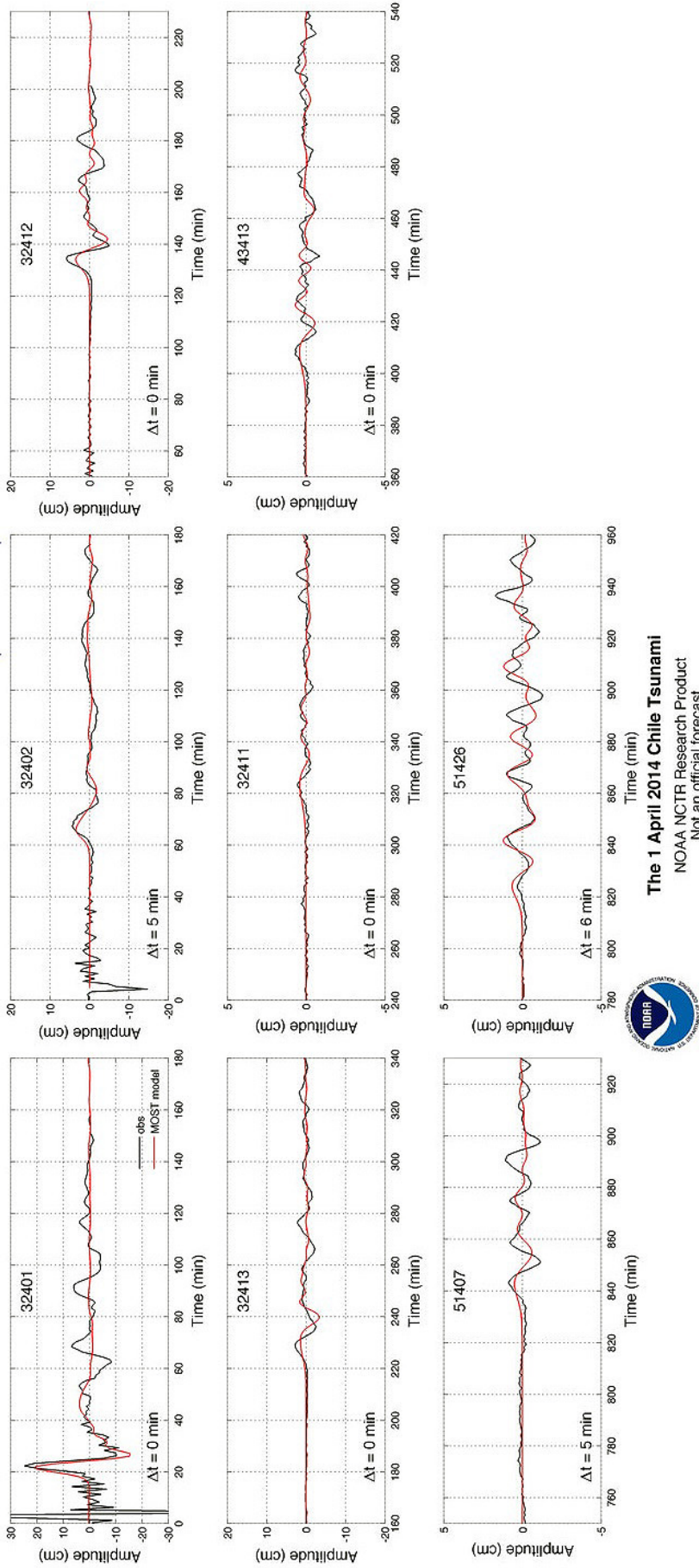


Рис. 6. Сравнение расчетных способом SIFT и зарегистрированных станциями DART форм Чилийского цунами 2014 г. (http://nctr.pmel.noaa.gov/chile20140401/websift02/f20140401_DARTs-1500.jpg).

Расчет форм ожидаемых цунами способом SIFT выполнялся для различных пунктов на побережьях Алеутских островов, Аляски, западного побережья США и других, в которых производилась регистрация цунами береговыми мареографами.

Результаты расчета форм цунами, например, вблизи побережья Аляски в 2014 г. не вполне хорошо совпадают с результата-

ми измерений мареографами (рис. 7). По-видимому, это связано с влиянием краевых эффектов на цунами, что не учитывается применяемой расчетной разностной сеткой.

Как видно из сравнения расчетных и фактических данных, качество прогноза в открытом океане, выполненного предложенным способом и способом SIFT, сопоставимо.

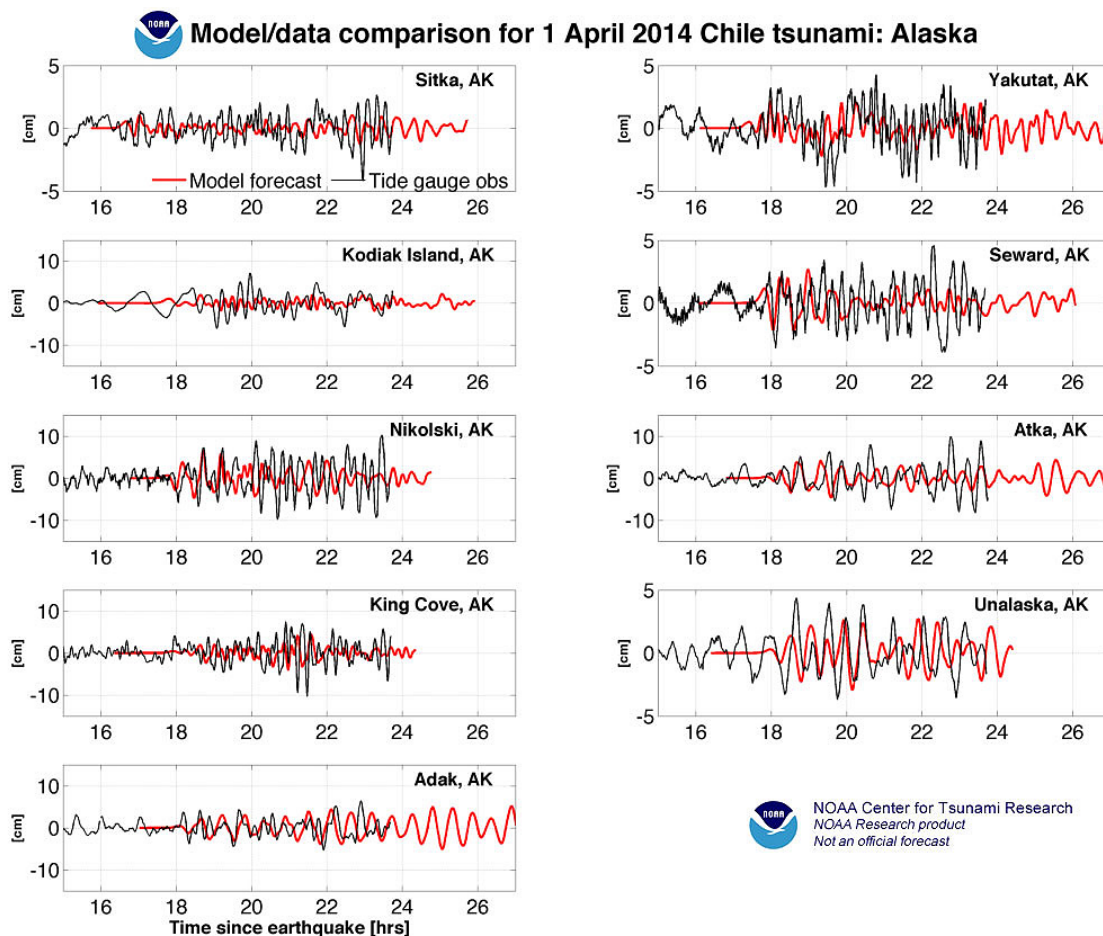


Рис. 7. Сравнение расчетных способом SIFT и зарегистрированных береговыми мареографами форм Чилийского цунами 2014 г. вблизи побережья Аляски (http://nctr.pmel.noaa.gov/chile20140401/websift02/tsplots_alaska.jpg).

Формы цунами, рассчитанные предложенным способом для точек вблизи населенных пунктов Курильских островов (Северо-Курильск, Курильск, Южно-Курильск), вполне хорошо совпадают с фактическими. Качество прогноза достаточно для принятия службой предупреждения о цунами решения об объявлении тревоги в этих пунктах. Причем по расчетным данным можно оценить длительность возможной тревоги. В то же время способ SIFT для некоторых пун-

ктов, например Ситка (Sitka), Кодьяк (Kodiak Island), Якутат (Yakutat), как показано на рис. 7 для Чилийского цунами 2014 г., может давать неадекватный прогноз, занижая амплитуду ожидаемого цунами.

Заключение

Известно, что цунами представляет собой не только волну, падающую на берег нормально, но и сопутствующие волны, распространяющиеся вдоль шельфа, волны, обу-

словленные резонансом на шельфе, в бухтах, проливах. Все эти процессы необходимо учитывать при проектировании работ на шельфе.

На основе действующего в настоящее время прогноза цунами, основанного на сейсмологическом методе, тревога цунами объявляется на большой территории, не учитывает сложную волновую картину на шельфе. Неадресный прогноз цунами приводит к большому количеству ложных тревог, сопровождающихся экономическим ущербом.

Улучшить качество прогноза цунами, уменьшить количество ложных тревог возможно внедрением гидрофизических способов, основанных на информации о цунами, получаемой в океане глубоководными донными станциями измерения уровня.

В статье представлен один из возможных способов оперативного прогноза цунами. Приведенные результаты применения данного способа показывают, что качество прогноза, осуществляемого заблаговременно, достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами, причем имеется возможность заранее определить те пункты, в которых цунами представляет реальную угрозу. Рассчитанная форма ожидаемого цунами позволяет определить главные характеристики цунами: время первого вступления, амплитуды волн, время прихода и амплитуду максимальных волн, а также время окончания цунами. Таким образом, прогноз цунами на основе предложенного способа отвечает всем требованиям, сформулированным в определении оперативного прогноза цунами МОК ЮНЕСКО [Intergovernmental... , 2013].

Предложенный способ оперативного прогноза цунами, являясь приближенным, позволяет рассчитывать форму волны в точках вблизи населенных пунктов на некотором удалении от берега на глубинах, на которых влиянием нелинейности процесса можно пренебречь. Представляется, что получаемой в результате расчета информации достаточно для принятия решения об объявлении тревоги в том пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу.

Качество прогноза, выполняемого предложенным способом оперативного прогноза

цунами, сопоставимо с качеством расчетов способом SIFT [Titov, 2009; Wei et al, 2003]. И хотя время расчета данным способом существенно больше времени расчета способом SIFT, однако он не требует создания гигантской базы синтетических мареограмм, как способ SIFT [Titov, 2009]. Для выполнения расчетов предложенным способом необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения. Способ может применяться службами предупреждения о цунами на стадии становления при наличии хотя бы одной станции измерения уровня в океане. Прогноз цунами может выполняться не только централизованно, региональными центрами цунами, но и любыми пунктами, любым объектом, если имеется возможность получения информации об уровне океана со станций системы DART. И хотя время расчета данным способом существенно больше времени расчета способом SIFT, однако он не требует создания гигантской базы синтетических мареограмм, как способ SIFT [Titov, 2009]. Для выполнения расчетов предложенным способом необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения. Способ может применяться службами предупреждения о цунами на стадии становления при наличии хотя бы одной станции измерения уровня в океане. Прогноз цунами может выполняться не только централизованно, региональными центрами цунами, но и любыми пунктами, любым объектом, если имеется возможность получения информации об уровне океана со станций системы DART.

Предложенный способ оперативного прогноза цунами при реализации его в едином программном комплексе может служить инструментом, который позволит повысить качество оперативного предупреждения о цунами, существенно уменьшив количество ложных тревог цунами.

Список литературы

1. Гусьяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 5–21.
2. Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.

3. 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.
4. Королев Ю.П., Храмушин В.Н. Об оперативном прогнозе цунами 1 апреля 2014 г. вблизи побережья Курильских островов // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 86–91.
5. Королев Ю.П. Моделирование оперативного прогноза цунами вблизи побережья Курильских островов // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды IV науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчат., 30 сент. – 6 окт. 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 269–273.
6. Королев Ю.П. О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011а. Т. 8, № 2. С. 32–47.
7. Королев Ю.П. Ретроспективный краткосрочный прогноз Андреевского (Алеутские острова) цунами 1996 г. // Океанология. 2011б. Т. 51, № 3. С. 409–417.
8. Королев Ю.П., Ивельская Т.Н. О совершенствовании оперативного прогноза цунами на Дальнем Востоке // III науч.-техн. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», Петропавловск-Камчат., 9–15 окт. 2011 г.: сб. докл. URL: <http://www.emsd.ru/files/konf111009/pdf/sb/index.html> (дата обращения: 26.04.2017).
9. Королев Ю.П. Расчет цунами по измерениям уровня моря в удаленных точках при оперативном прогнозе // Океанология. 2004. Т. 44, № 3. С. 376–382.
10. Левин Б.В., Кайстренко В.М., Рыбин А.В. и др. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков // Докл. АН. 2008. Т. 419, № 1. С. 118–122.
11. Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А., Иващенко А.И., Файн И.В., Томсон Р.Е., Ивельская Т.Н., Богданов Г.С. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49, № 2. С. 181–197.
12. Соловьев С.Л. Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7–50.
13. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Золотухин Д.Е. и др. Симуширские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 года и 13 января 2007 года // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 1. С. 3–16.
14. Фролов А.В., Камаев Д.А., Мартыщенко В.А., Шершаков В.М. Опыт модернизации российской системы предупреждения о цунами // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 5–21.
15. Cox D.C. Performance of the seismic sea wave warning system, 1948–1967. HIG-68-2. 1968. 80 p.
16. Gusiakov V.K. Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // Pure Appl. Geophys. 2011. Vol. 168 (11). P. 2033–2041. doi:10.1007/s00024-011-0286-2.
17. Korolev Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. Vol. 11. P. 3081–3091. doi:10.5194/nhess-11-3081-2011.
18. Pararas-Carayannis G. Tsunamigenic source mechanism and efficiency of the March 11, 2011 Sanriku Earthquake in Japan // Sci. Tsunami Hazards. 2011. Vol. 30, N 2. P. 126–152.
19. Titov V.V. Tsunami forecasting // The Sea / Eds. E.N. Bernard, A.R. Robinson. Harvard Univ. Press; Cambridge, MA; London, England, 2009. Vol. 15: Tsunamis. P. 367–396.
20. Wei Y., Cheung K.F., Curtis G.D. et al. Inverse algorithm for tsunami forecasts // J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering. ASCE. 2003. Vol. 129, N 2. P. 60–69.
21. Whitmore P.M., Sokolowski T.J. Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings // Sci. Tsunami Hazards. 1996. Vol. 14, N 3. P. 147–166.
22. Intergovernmental Oceanographic Commission. Rev. Ed. 2013. Tsunami Glossary, 2013. Paris, UNESCO. IOC Technical Series. N 85. (IOC/2008/TS/85rev). URL: http://ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442 (дата обращения: 27.03.2017).
23. National Centers for Environmental Information. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7> (дата обращения: 27.03.2017).
24. National Data Buoy Center. URL: <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (дата обращения: 27.03.2017).
25. NOAA Center for Tsunami Research. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/> (дата обращения: 27.03.2017).
26. Users Guide for the Pacific Tsunami Warning Center Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. IOC Technical Series. N 105, Rev. ed. UNESCO/IOC. 2014.

Сведения об авторе

КОРОЛЕВ Юрий Павлович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН.