

УДК 551.466.62+550.344.42

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2018

О достоверном оперативном прогнозе цунами

Ю. П. Королев,**А. В. Лоскутов,**Институт морской геологии
и геофизики ДВО РАН,
г. Южно-Сахалинск

Аннотация

Одним из негативных факторов, влияющих на нормальное функционирование муниципальных образований на побережье Дальнего Востока, являются ложные тревоги цунами. К настоящему времени из общего числа тревог ложные составляют не менее 75%. Ложные тревоги наносят ущерб, связанный с остановкой производства, другой деятельности в прибрежной зоне, эвакуацией населения, выводом судов в открытое море.

Проблема заключается в том, чтобы службы предупреждения о цунами объявляли тревоги с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную опасность, и сопровождали информацией о времени прихода первой, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами.

Целью работы являлось исследование возможности заблаговременного прогноза цунами вблизи побережья по данным глубоководных донных станций, расположенных в открытом океане, без привлечения детальной сейсмологической информации о землетрясениях. В численном эксперименте моделировался процесс оперативного прогнозирования Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. вблизи побережья Курильских островов и о. Хоккайдо. Для расчета волновых форм цунами вблизи побережья применялся способ оперативного прогноза цунами, позволяющий по данным о цунами в открытом океане в режиме реального времени с достаточной заблаговременностью рассчитывать волновую форму цунами в заданных пунктах побережья.

Показано, что возможен заблаговременный (за 0,5—1,5 часа до прихода первой волны) прогноз цунами 2006 и 2007 гг. для северных и южных Курильских островов.

Способ может стать инструментом, который позволит существенно уменьшить количество ложных тревог.

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

Содержание

Введение

1. Цель и задачи
2. Предварительная информация
3. Описание эксперимента
4. Результаты

Заключение

Литература

Введение

Цунами относится к числу серьезных стихийных бедствий, наносящих большой ущерб, нередко с человеческими жертвами.

Очевидно, что цунами невозможно предотвратить, но можно предупредить население об опасности. В настоящее время основным способом предупреждения о цунами является сейсмологический, или магнитудно-географический, разработанный в середине прошлого века. Действующие достаточно давно службы предупреждения о цунами практически не допускают пропусков, своевременно предупреждая о возможной опасности. Среди тревог цунами значительную часть составляют так называемые ложные тревоги, когда цунами проявляется крайне незначительно, не причиняя никакого материального ущерба. К настоящему времени из общего числа тревог ложные составляют не менее 75% [1]. Ложные тревоги цунами сопровождаются остановкой производства, другой деятельности в прибрежной зоне, эвакуацией населения в безопасные районы, выводом судов на рейд или в открытое море.

Достоверность, адекватность тревог цунами является главной проблемой оперативного прогноза. По оцененной в оперативном режиме магнитуде землетрясения тревога объявляется на побережьях большой протяженности без информации об ожидаемых высотах волн. Высоты цунами на одних участках побережья могут быть значительными, на других — незначительными. В таких случаях тревога является оправданной для одних и ложной для других участков. Примерами таких тревог в России являются тревоги во время Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. Тревога цунами в соответствии с магнитудным критерием в 2006 г. на Курильских островах была объявлена за 1 час 44 мин до прихода волны в Южно-Курильск, длительность тревоги составила около 2 часов (в 2007 г. 1 час 57 мин и около 3 часов соответственно) [2]. Эти цунами сопровождались заплесками до 20 м на ближайших к очагу незаселенных центральных Курильских островах, в то время как на южных Курильских островах максимальные амплитуды составляли 40—70 см [3, 4] и не представляли опасности. Тревоги, объявленные на всех островах, сопровождались эвакуацией населения, экстренным выходом судов на рейд или в открытое море. Эти тревоги, согласно регламенту, расцениваются как

оправдавшиеся, однако для северных и южных Курил они фактически оказались ложными. Наличие таких ситуаций не свидетельствует о некачественной работе службы предупреждения, а лишь в очередной раз подтверждает несовершенство магнитудно-географического метода прогноза цунами [2].

Ложные тревоги цунами, объявляемые зачастую с излишней заблаговременностью, хоть и не наносят прямого ущерба, но создают неоправданные стрессовые ситуации для населения, приносят значительный материальный ущерб, связанный с остановкой производства на опасных местах, эвакуацией населения, выводом судов в открытое море. Причем всякого рода деятельность в прибрежной полосе останавливается на несколько часов.

Серьезной проблемой является недоверие населения к тревогам цунами и их игнорирование, вызванные большим количеством ложных тревог. Это явилось одной из причин большого числа жертв во время цунами Тохоку 2011 г.

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 с разумной заблаговременностью 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) [2, 5, 6].

Гидрофизические способы прогнозирования цунами не зависят от точности определения магнитуды. Достоверной для оценки степени опасности цунами является информация о сформировавшемся цунами, получаемая в океане глубоководными донными станциями системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis — оценка и сообщение о цунами в океане) [7].

1. Цель и задачи

Целью работы являлось исследование возможности заблаговременного прогноза цунами вблизи побережья по данным глубоководных донных станций системы DART, расположенных в открытом океане, без привлечения сейсмологической информации о землетрясениях.

Задачами, которые решались в работе, являлись расчет (ретроспективный прогноз) формы цунами вблизи побережья Курильских островов и острова Хоккайдо по восстановленным данным ближайшей к очагу станции DART 21419, расположенной восточнее Курило-Камчатского желоба, во время событий 2006 и 2007 гг.; сопоставление прогноза с прямым расчетом цунами на основе данных о детальном смещении океанского дна в очаге; оценка заблаговременности выработки прогноза; оценка применимости способа оперативного прогноза цунами.

В итоге дается ответ на вопрос: возможен ли оперативный прогноз в случае повторения ситуаций 2006, 2007 гг.

2. Предварительная информация

На рис. 1 представлена расчетная схема эксперимента с указанием местоположений эпицентров землетрясений, станции DART 21419 и пунктов, для которых выполнялись расчеты.

Ввиду того, что станция DART 21419 не зарегистрировала цунами 2006 и 2007 гг., форма цунами в этой точке рассчитывалась (восстанавливалась) по данным более далекой станции DART 21414, время пробега цунами до которой составляло около 2 часов. Положение станции выходит за рамки схемы рис. 1, ее координаты $48^{\circ}58'3''$ с.ш., $178^{\circ}13'8''$ в.д.

Выбор пунктов прогноза обусловлен наличием в этих пунктах реальных записей цунами.

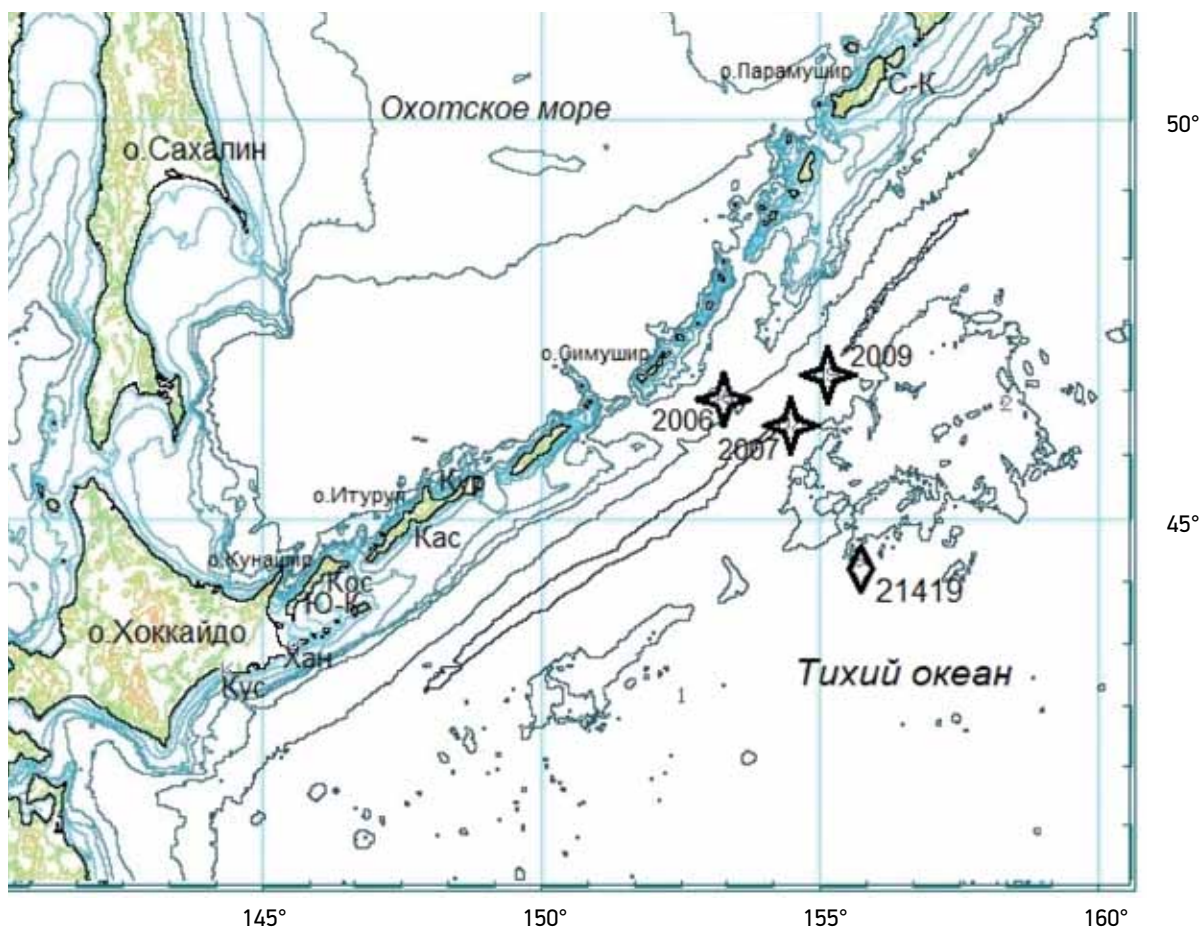


Рис. 1. Расчетная схема численного эксперимента. Звездочками обозначены эпицентры землетрясений, ромбом — положение станции системы DART. На схеме обозначено: Хан — Ханасаки, Кур — Курильск, Ю-К — Южно-Курильск, Кос — бух. Космодемьянская, Кас — зал. Касатка, Кур — Курильск, С-К — Северо-Курильск

Для расчета волновых форм цунами вблизи побережья применялся способ оперативного прогноза цунами [6]. Способ позволяет по данным о цунами в открытом океане в режиме реального времени с достаточной заблаговременностью рассчитывать волновую форму цунами в заданных пунктах побережья.

Способ не зависит от магнитуды землетрясения, более того, учитывает такие дополнительные факторы, как сопутствующие землетрясения подводные оползни. Для выполнения прогноза от сейсмологической подсистемы необходима информация только о координатах эпицентра землетрясения. Способ позволяет по ограниченной информации о цунами в открытом океане (первый полупериод/первый период волны) давать прогноз ожидаемого цунами достаточно большой длительности, оценить длительность возможной тревоги цунами. Учитываются возможные вторичные волны значительной амплитуды, нередко приходящие с задержкой в несколько часов. На основании прогноза тревога цунами может подаваться только для пунктов, для которых существует реальная угроза. Способ применим к прогнозу как ближних (локальных) [2], так и дальних (трансокеанских) [8] цунами.

Способ применялся ранее для моделирования процесса оперативного прогнозирования цунами 2006 и 2007 гг. в открытом океане по данным станции DART 21414 [5]. Получено хорошее соответствие расчетных и зарегистрированных форм волн. При этом точки (станции системы DART), для которых выполнялся расчет, находились дальше от очага цунами, чем станция DART 21414. При моделировании цунами 2007 г. в открытом океане правильно рассчитывалась начальная, отрицательная, фаза цунами. Ввиду отсутствия на момент написания ра-

боты [5] зарегистрированных данных моделирование для побережий и пунктов Курильских островов не выполнялось.

3. Описание эксперимента

Эксперимент состоял в расчете способом оперативного прогноза формы цунами вблизи побережья Курильских островов и острова Хоккайдо по восстановленным данным станции DART 21419, ближайшей к очагу, пробег цунами до которой составлял 15 мин (по первому гребню) в 2006 г. и 20 мин (по первой впадине) в 2007 г.

Независимо от расчетов способом оперативного прогноза было выполнено прямое моделирование цунами 2006 г. с использованием детального смещения океанского дна в очаге. Для моделирования распространения цунами в океане использовалась модель глобального рельефа — SRTM15. Данные массива представляют собой регулярную сетку в географических координатах с разрешением 15 угловых секунд.

Для расчета применялся вариант кода TUNAMI [9] для сферической Земли с распараллеливанием на GPU-процессоре. В качестве начальных условий в расчет вводилось начальное смещение поверхности океана в очаге цунами, оцениваемое с помощью инверсии сейсмических волн [10] и расчета косейсмических деформаций в очаге по формулам Окады [11].

Производилось сравнение результатов прямого моделирования, результатов прогноза и немногочисленных натуральных данных о цунами.

На рис. 2 представлен результат прямого расчета формы цунами 2006 г. на станции DART 21419 и восстановленные способом оперативного прогноза по данным станции DART 21414 формы цунами 2006 и 2007 гг. на станции DART 21419.



Рис. 2. Восстановленная волновая форма и форма, полученная прямым расчетом, цунами 2006 и 2007 гг. на станции DART 21419

Восстановленные формы цунами правильно показывают начальную фазу волн: положительную для 2006 г. и отрицательную для 2007 г. По этим данным длительностью 30 мин от начала землетрясений 2006 и 2007 гг. в дальнейшем выполнялся расчет (прогноз) форм цунами вблизи побережий. Длительности сигналов выбраны из соображений оперативности прогноза. В дальнейшем под термином «прогноз» понимается расчет цунами по восстановленной форме цунами в точке DART 21419 способом оперативного прогноза цунами.

Как видно из рис. 2, форма цунами, полученная прямым расчетом, имеет более крутой фронт, нежели восстановленная. Аналогичный эффект наблюдался при моделировании цунами Тохоку 2011 г. [12].

4. Результаты

4.1. Прогноз формы Симуширских цунами 2006 и 2007 гг.

Выполнены прогноз и прямой расчет формы цунами 2006 и 2007 гг. вблизи побережий северных, южных Курильских островов и о. Хоккайдо. Прогноз и прямой расчет выполнены в точках на расстояни-

ях 1,0—2,0 км от берега. Некоторые результаты, для которых имелась возможность сравнения с реальными записями, представлены на рис. 3.

Для Ханасаки и Кусиро в обоих событиях головные волны прогнозированной формы хорошо совпадают с формами зарегистрированных цунами. В целом структуры, амплитуды прогнозированных и зарегистрированных форм совпадают, причем правильно прогнозируется начальная фаза волны. Необходимости объявлять тревогу в этих пунктах не было.

Совпадения зарегистрированной формы волны с прогнозом и результатом прямого расчета для Южно-Курильска не наблюдается как в случае 2006 г., так и в случае 2007 г. Расчетные амплитуды волн превышают амплитуды реальных цунами. Объяснений несовпадения для Южно-Курильска в настоящее время нет. Однако даже завышенные оценки амплитуд позволяют определить ожидаемые цунами в этом пункте как неопасные.

Сопоставление результатов прямого расчета и прогноза для других пунктов Курильских островов, в которых регистрация не проводилась, представлено на рис. 4.

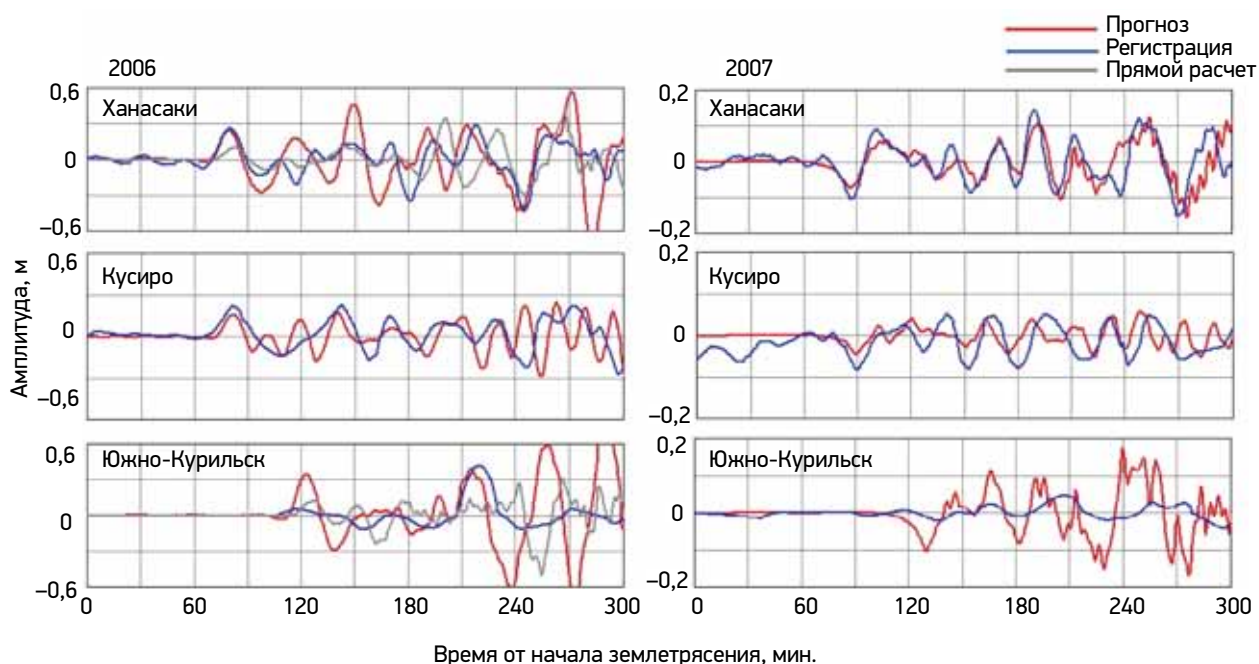


Рис. 3. Сравнение зарегистрированной формы и результатов прямого расчета и прогноза по восстановленным данным на станции DART 21419 цунами 2006 и 2007 гг.

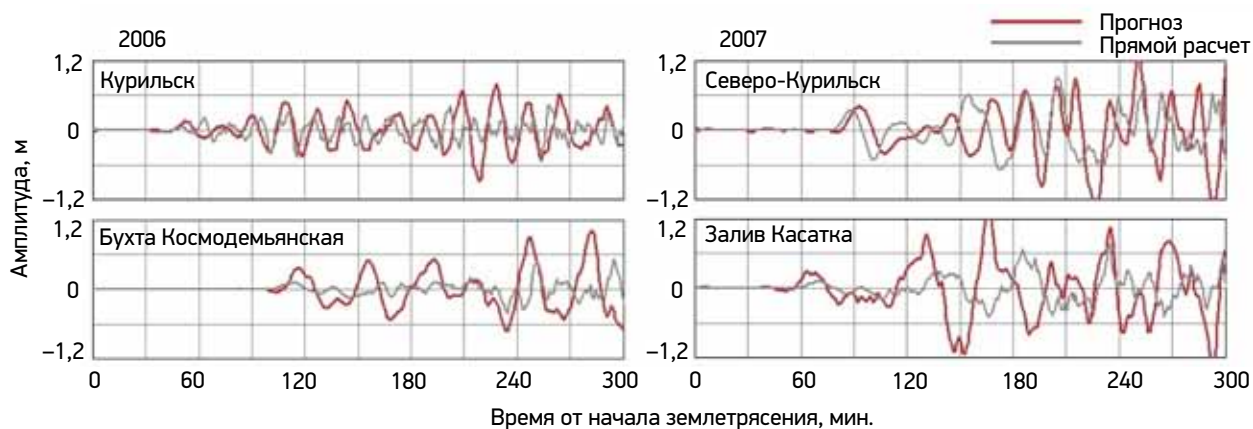


Рис. 4. Сравнение результатов прямого расчета и прогноза по восстановленным данным станции DART 21419 цунами 2006 г.

Получено неплохое соответствие прямого расчета и прогноза цунами для Курильска (о. Итуруп) и Северо-Курильска (о. Парамушир). Для бух. Космодемьянская (о. Кунашир) и зал. Касатка (о. Итуруп) прогноз дает завышенные амплитуды по сравнению с прямым расчетом. К сожалению, ни регистрации, ни визуальных наблюдений в этих пунктах не велось, сравнить результаты расчетов с фактическими цунами не представляется возможным.

4.2. Заблаговременность прогноза

В численном эксперименте оценена заблаговременность прогноза для пунктов Курильских островов.

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). В условиях эксперимента при пробеге цунами 2006 г. до станции DART 21419 15 мин (при цунами 2007 г. — 20 мин) момент времени выработки прогноза (по первому периоду цунами на станции DART 21419) после начала землетрясения равен 31 мин для 2006 г. и 36 мин для 2007 г.

Заблаговременность прогноза — разность между временем добегания цунами до населенного пункта и временем выработки прогноза — должна гарантировать своевременную подачу тревоги, эвакуацию населения в безопасные места и выход судов в открытое море. Время пробега цунами до защи-

щаемого пункта определяется как момент прихода гребня или впадины первой волны.

В условиях эксперимента заблаговременность прогноза цунами для Южно-Курильска составляет около 1,5 часа, для Северо-Курильска — около 1 часа. Для Буревестника (зал. Касатка о. Итуруп) заблаговременность составляет 34 мин, для Курильска — около 20 мин. Для этих населенных пунктов, кроме Курильска, как представляется, времени вполне достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами и при необходимости проведения эвакуации населения и вывода судов в открытое море.

Заключение

В настоящее время службами предупреждения о цунами в Тихом океане внедряется новый регламент оценки опасности цунами [13], который основан на предварительных расчетах с использованием упрощенной модели источника. Приблизительно оцениваются максимальные амплитуды волн на некотором расстоянии от побережья и в соответствии с известным законом Грина вблизи берега на глубинах до 1 м. Побережье российского Дальнего Востока входит в зону ответственности Северо-западного тихоокеанского консультативного центра цунами (NWPTAC). Прогноз дается для крупных регионов, позволяет лишь ориентировочно оценить опасность возникшего цунами. Детальный прогноз по отдельным островам, тем более по населенным

пунктам на островах, не дается. Принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры. Региональные центры предупреждения о цунами, ответственные за объявление тревоги, должны, видимо, самостоятельно разрабатывать способы детального прогнозирования цунами в своем районе.

Определение понятия «оперативный прогноз цунами» было дано в Глоссарии цунами, разработанном Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО (IOC UNESCO) лишь в 2013 г.: «Количественная оценка характеристик и степени опасности цунами, выполняемая заблаговременно. Характеристики, которые могут быть предсказаны, включают время прибытия первой волны, время прихода максимальной волны, амплитуды максимальных волн и продолжительность опасности цунами» [14].

Вышеописанный регламент в силу грубых оценок, расчетов, основанных на предположениях о механизме землетрясения, не отвечает определению МОК ЮНЕСКО.

Способ оперативного прогноза цунами, примененный в работе, в отличие от регламента, полностью соответствует определению МОК ЮНЕСКО при условии оперативного получения информации от станций измерения уровня океана (например, системы DART). Способ дает полную информацию об ожидаемом цунами.

Численный эксперимент показал, что при условии регистрации цунами станцией DART 21419 и оперативного получения информации возможен заблаговременный (за 0,5—1,5 часа до прихода первой волны) прогноз цунами 2006 и 2007 гг. для северных и южных Курильских островов. Для центральных Курильских островов при землетрясениях в том же районе никакой гидрофизический способ не может быть применим, для этих островов тревога цунами должна объявляться в соответствии с действующим в настоящее время регламентом (магнитудным критерием).

Предлагаемый способ может быть использован как региональными, так и локальными службами, если последние имеют возможность принимать первичную сейсмологическую информацию и данные глубоководных уровенных станций в режиме реального времени.

Предлагаемый способ не заменит существующий сейсмологический (магнитудный) способ прогноза цунами, но обеспечит достоверность, обоснованность объявления тревоги цунами. Предварительный, выработанный по магнитудному признаку, прогноз (предупреждение) цунами может быть подтвержден или отвергнут на основании расчетов по данным уровенных станций для каждого конкретного пункта. В случае подтверждения опасности цунами тревога должна подаваться в пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу, с оптимальной для этого пункта заблаговременностью.

Способ может стать инструментом, который позволит существенно уменьшить количество ложных тревог и тем самым обеспечить нормальное функционирование всех служб муниципальных образований, бесперебойную работу предприятий и исключить связанный с ними неоправданный ущерб, повысить доверие населения к тревогам цунами.

Литература

1. Гусяков В.К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958—2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 5—21.
2. Королев Ю.П., Ивельская Т.Н. Совершенствование оперативного прогноза цунами и тревоги цунами. Анализ последних цунами // Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9, № 2. С. 76—91.
3. 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. Академии наук. 2008. Т. 419, № 1. С. 118 — 122.
4. MacInnes B.T., Pinagina T.K., Bourgeois J. et al. Field Survey and Geological Effects of the 15 November 2006 Kuril Tsunami in the Middle Kuril Islands // Pure Appl. Geophys. 2009. 166. P. 9—36. (DOI 10.1007/s00024-008-0428-3).
5. Королев Ю.П. О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 2. С. 32—47.
6. Korolev Yu. P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 3081—3091. (Doi:10.5194/nhess-11-3081-2011).

7. NOAA Center for Tsunami Research. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/> (дата обращения: 27.03.2017).
8. 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.
9. Imamura F. Tsunami numerical simulation with the staggered leap-frog scheme (numerical code of TUNAMI-N1 and N2) // *Disaster Control Research Center, Tohoku University*. 1995.
10. Hayes G. Finite fault model. Updated result of the March 11, 2011 Mw 9.0 earthquake offshore Honshu, Japan // *USGS. Earthquake Hazards Program*. URL: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/%20usc0001xgp/finite_fault.php. (accessed: 15.05.2017)
11. 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.
12. Shevchenko G., Ivelskaya T. and Loskutov A. Characteristics of the 2011 Great Tohoku Tsunami on the Russian Far East Coast: Deep-Water and Coastal Observations // *Pure Appl. Geophys.* 2013. 171(12). P. 3329—3350. (DOI 10.1007/s00024-013-0727-1).
13. 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.
14. 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).

Сведения об авторах

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

Количество публикаций: 87 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, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16

Тел.: +7 (4242) 796-154

E-mail y.korolev@imgg.ru, Yu_P_K@mail.ru.

Лоскутов Артем Владимирович: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории цунами Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН)

Количество публикаций: 37

Область научных интересов: анализ и выявление физических закономерностей цунами по данным глубоководных и прибрежных регистраторов

Контактная информация:

Адрес: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16

Тел.: +7 (4242) 796-154

E-mail: loskutov-imgg@yandex.ru.