

УДК 551.466.62+550.344.42
ВАК 25.00.36, 05.26.02
<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16->

ISSN 1812-5220
© Проблемы анализа риска, 2019

Проблемы оперативного прогноза цунами

Ю. П. Королев,

Институт морской геологии
и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН,
693022, РФ, г. Южно-Сахалинск,
ул. Науки, 16

Аннотация

Рассмотрен риск цунами в оперативном режиме, когда имеется непосредственная угроза цунами. Показано, что риском цунами при таких событиях можно управлять, т.е. влиять на тяжесть последствий (величину ущерба) в различных ситуациях. Главным образом это касается адекватности оперативного (краткосрочного) прогноза цунами.

Проблема заключается в том, чтобы службы предупреждения объявляли не только обобщенные 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 временах прихода первой волны, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) в соответствии с определением прогноза цунами, сформулированным МОК ЮНЕСКО в 2013 г.

Показано на примерах произошедших событий 2006—2014 гг., что экспресс-метод оперативного прогноза цунами, использующий данные о сформировавшемся цунами, полученные в открытом океане, в отличие от действующего регламента, позволит службам предупреждения принимать решение об объявлении тревоги цунами с разумной заблаговременностью только в тех населенных пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу, и тем самым уменьшить количество ложных тревог цунами, понизить неоправданный ущерб.

Рассмотрены проблемы оперативного прогноза цунами и предложены возможные пути их решения.

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

Для цитирования: Королев Ю. П. Проблемы оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2019. Т.16. № 2. С. , <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16->

Problems of the short-term tsunami forecast

Yury. P. Korolev

Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS,
693022, Russia,
Yuzhno-Sakhalinsk, Nauki St., 1b

Annotation

The risk of a tsunami in an operational mode when there is a direct threat of a tsunami is considered. It is shown that the tsunami risk in such events can be controlled, i.e. to influence the severity of the consequences (the amount of damage) in different situations. This mainly concerns the adequacy of the operational (short-term) tsunami forecast.

The problem is that the warning services declare not only reasonable general alarms, but also differentiated by the degree of danger for specific areas of the coasts. Ideally, the tsunami alarm should be declared with reasonable advance only at those points where the tsunami is a real danger, and be accompanied by information on the arrival times of the first wave, the maximum wave, their amplitudes, as well as the expected end time of the tsunami (tsunami alarm) in accordance with the definition of the tsunami forecast formulated by UNESCO IOC in 2013.

It is shown on the examples of the events of 2006—2014 that the rapid method of operational tsunami forecast, using data on the formed tsunami, obtained in the open ocean, in contrast to the current regulations, will allow the warning services to decide on the announcement of tsunami alarm with reasonable advance only in those settlements where the tsunami is a real threat, and thereby reduce the number of false tsunami alarms, reduce unnecessary damage.

The problems of operational tsunami forecast are considered and possible ways of their solution are offered.

Keywords: tsunami, short-term forecast, tsunami alarm, false tsunami alarm, sea level measurements, numerical simulation, DART, risk, hazard, risk assessment.

For citation: Yury. P. Korolev. Problems of the short-term tsunami forecast // Issues of Risk Analysis. 2019. Vol. 16. № 2. P. , <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16->

Содержание

Введение

1. Тревоги цунами на Курильских островах
2. Предлагаемые пути совершенствования систем предупреждения о цунами
3. Гидрофизические способы оперативного прогноза цунами
4. Моделирование процесса оперативного прогноза цунами 2006, 2007, 2010, 2011, 2014 гг.
5. Обсуждение

Заключение

Литература

Введение

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

В долгосрочной перспективе риск цунами может быть оценен исходя из статистики наблюдений за произошедшими цунами (в зависимости от статистики землетрясений или независимо от нее). Риск цунами возможно оценить и как вероятность возникновения, и как возможный ущерб. При этом принимаются во внимание максимально возможные оценки ущерба и затрат на ликвидацию последствий стихийного бедствия и восстановление разрушенного. Такие оценки необходимы при проектировании строительства в прибрежной зоне. Управление риском возможно на стадии проектирования или позднее путем строительства защитных сооружений.

Чрезвычайно актуальной является оценка риска (ущерба) в оперативном режиме, когда происходит цунамигенное землетрясение, т. е. когда имеется непосредственная угроза цунами. Известно, что не каждое цунамигенное землетрясение вызывает заметное цунами. Вследствие этого службы предупреждения о цунами, опираясь на магнитудно-географический критерий, объявляют значительное количество (до 75—80%) ложных тревог. В каждой конкретной ситуации реализации риска, будь то состоявшееся или несостоявшееся цунами, была ли тревога цунами оправданной или ложной, ущерб различен. Управление риском (влияние на степень тяжести результата реализации риска) возможно путем адекватной оценки (прогноза) степени опасности цунами в конкретных пунктах и своевременного объявления только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу, тревоги цунами и проведения эвакуации населения, движимого имущества и плавсредств в безопасные места.

Если в цунамигенной зоне произошло землетрясение, способное вызвать цунами (землетрясение с критической и выше магнитудой), то, поскольку однозначной зависимости между магнитудой землетрясения и интенсивностью цунами нет, возможны различные ситуации (для отдельно взятого пункта).

- Первая (самая неблагоприятная, она же самая маловероятная, — пропуск цунами): цунами возникло, но службы предупреждения по какой-то причине допустили пропуск (не объявили тревогу) цунами.

Ущерб в этой ситуации состоит из неизбежных потерь в зависимости от интенсивности цунами (повреждения, разрушения зданий, сооружений, находящихся в зоне затопления), потерь, которых можно избежать (суда, плавсредства, находящиеся у берега, у причалов, движимое имущество), а главное — людские потери. Такие ситуации практически отсутствуют (редкие исключения — пропуск Симуширского цунами 2006 г. в Кресент-Сити от землетрясения с магнитудой $M = 8,3$, события 28 сентября 2018 г. в Индонезии, $M = 7,5$).

- Вторая (неблагоприятная, — оправданная тревога цунами): цунами возникло, службы предупреждения своевременно объявили тревогу цунами. Ущерб состоит только из неизбежных потерь.

- Третья (наиболее часто встречающаяся, также неблагоприятная, — ложная тревога цунами): возникло слабое (очень слабое) цунами, службы предупреждения о цунами, не имея возможности адекватно оценить степень опасности, опираясь только на магнитудный критерий, объявили тревогу цунами.

Ущерб (непрямой, неоправданный) — расходы на вывод плавсредств в открытое море, движимого имущества в безопасные места, расходы, связанные с эвакуацией населения (собственно эвакуация, потери в результате остановки производства). Количество ложных тревог цунами во всем мире — свыше 75% всех тревог (примеры: Симуширские цунами 2006, 2007 гг. на северных и южных Курильских островах, $M = 8,3; 8,1$, Индонезийские цунами 2012 г., $M = 8,6; 8,2$).

- Четвертая (благоприятная): возникло слабое (очень слабое) цунами, службы предупреждения о цунами, имея возможность адекватно оценить степень опасности, не объявили тревогу цунами.

Ущерб в такой ситуации отсутствует.

Очевидно, что неизбежные потери значительно выше непрямых потерь во время одного цунами. Но в силу большого количества ложных тревог суммарный ущерб от них может быть сравним с неизбежным ущербом от состоявшегося цунами.

Проблема ложных тревог является главной проблемой оперативного прогноза цунами. Ложные тревоги цунами, объявляемые зачастую с излишней заблаговременностью, приносят значительный

непрямой ущерб, связанный с остановкой производства в опасных местах, эвакуацией населения, выводом судов в открытое море. При этом всякая деятельность в прибрежной зоне останавливается на несколько часов.

Серьезной проблемой является недоверие населения к тревогам цунами и их игнорирование из-за большого количества ложных тревог, что 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 временах прихода первой волны, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) [1]. Именно эти характеристики цунами перечислены в определении прогноза цунами, сформулированном МОК ЮНЕСКО в 2013 г. [2].

На основе действующего регламента, магнитудно-географического критерия, такой прогноз не возможен. В силу этого службы предупреждения о цунами объявляют большое количество ложных тревог.

Возможно ли эффективно управлять риском, улучшить прогноз цунами, т. е. свести ситуации третьего типа к благоприятным, к ситуациям четвертого типа, исключить непрямой ущерб?

Это и явилось целью работы: показать, что возможно эффективно управлять риском цунами в оперативном режиме при непосредственной угрозе цунами на основе данных, получаемых глубководными станциями измерения уровня океана.

В работе проанализированы действия служб предупреждения во время ряда последних, локальных и трансокеанских цунами; проанализирована действенность предлагаемых в настоящее время мер повышения эффективности служб предупреждения о цунами; проанализирована эффективность гидрофизических способов, предлагаемого экспресс-метода оперативного прогноза цунами.

1. Тревоги цунами на Курильских островах

Ситуации с тревогами цунами на Курильских островах не являются широко известными. Представляет интерес раскрытие некоторых подробностей, связанные с тревогами цунами на Курильских островах во время событий 2006—2014 гг. Рассматриваются события как ближних (локальных), так и дальних (трансокеанских) цунами.

1.1. Симуширское цунами 15 ноября 2006 г.

Цунами произошло в результате землетрясения магнитудой $M = 8,3$ восточнее центральных Курильских островов (о. Симушир).

В соответствии с действующим регламентом при $M > 7,0$ одновременно на всех Курильских островах была объявлена тревога. Из опасных зон эвакуированы около 900 человек. Судам предписано выйти в открытое море [3].

Заблаговременность тревоги (интервал времени между объявлением тревоги и приходом первой волны) составила для Южно-Курильска (о. Кунашир) 1 час. 44 мин., Северо-Курильска (о. Парамушир) 1 час. 14 мин., Курильска (о. Итуруп) 36 мин. и пос. Буревестник (о. Итуруп) 51 мин.

Зарегистрированы цунами с амплитудами¹ 40 см в Южно-Курильске и 77 см в Малокурильском (о. Шикотан) [3]. Волны с такими амплитудами не представляют опасности.

Длительность тревожного режима составила около 2 час.

1.2. Симуширское цунами 13 января 2007 г.

Второе Симуширское цунами произошло в результате землетрясения с магнитудой $M = 8,1$ восточнее предыдущего.

В соответствии с регламентом была объявлена тревога цунами одновременно на побережье всех Курильских островов. Эвакуированы в безопасные зоны около 340 человек, 16 судов выведены в открытое море [3].

¹ Под амплитудой цунами понимается отклонение уровня моря от осредненного уровня после удаления приливных составляющих, в отличие от понятия высота волны, рассчитываемого как разность между уровнем гребня и соседней впадины (размах колебаний).

Заблаговременность объявления тревоги для Южно-Курильска — 1 час 47 мин.

Амплитуды зарегистрированных волн цунами в Южно-Курильске 5—6 см и в Малокурильском 36 см [3].

Длительность тревоги — около 3 час.

Впоследствии, летом 2007 г., при полевых обследованиях проявления цунами на центральных Курильских островах (Симушир, Матуа и др.) обнаружены следы заплесков на высотах до 20 м от уровня моря [4, 5].

1.3. Катастрофическое цунами (Тохоку цунами) 11 марта 2011 г.

Сильное землетрясение магнитудой $M = 9,0$ к северо-востоку от о. Хонсю вызвало катастрофическое цунами (Тохоку цунами) на северо-восточном побережье острова.

По всем Курильским островам была объявлена тревога цунами, работники береговых предприятий и жители прибрежных домов выведены на безопасные участки. Судам, находящимся на рейде и у пирсов, рекомендовано уйти в безопасную зону [6].

Заблаговременность подачи тревоги цунами для Южно-Курильска 1 час 30 мин., Северо-Курильска 2 час. 30 мин. и Буревестника 1 час.

В Южно-Курильске зарегистрированы волны с амплитудой около 1 м, в Малокурильском (о. Шикотан) — от 84 до 150 см [6].

В поселке Буревестник (бух. Касатка о. Итуруп) амплитуда волны по визуальным наблюдениям составляла около 1 метра. По информации с судов, стоявших в порт-ковше Северо-Курильск, уровень воды под килем колебался от 4,2 м до 2,6 м, перепад составил 1,6 м.

Продолжительность тревоги цунами составила около 20 часов [3].

1.4. Чилийское цунами 27 февраля 2010 г.

Землетрясение с моментной магнитудой $M = 8,8$ произошло у берегов Чили.

На основании информации, которая является ориентиром для российских служб предупреждения о цунами, о регистрации на Гавайских островах цунами высотой около двух метров сахалинским Центром цунами было принято решение объявить тревогу цунами по всем Курильским островам. В Севе-

ро-Курильске, Южно-Курильске, Малокурильском население было эвакуировано, суда были выведены в море.

Заблаговременность тревоги составила для Малокурильского (о. Шикотан) 4 час. 52 мин., для Северо-Курильска — 3 час. 22 мин. [3].

Амплитуды цунами в населенных пунктах Курильских островов не превышали 0,3 м.

Уже после отбоя тревоги цунами по данным телеметрического регистратора Северо-Курильска отмечалось резкое повышение уровня моря: за 10 мин. уровень увеличился на 1 метр. Поскольку начался отлив, тревога повторно не объявлялась.

Длительность тревожного режима составила около 4 час.

1.5. Чилийское цунами 1 апреля 2014 г.

Землетрясение с $M_w = 8,2$ произошло у северного побережья Чили. 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 метров [7].

Российская служба предупреждения о цунами приняла решение об объявлении тревоги цунами на Курильских островах откладывая в течение 15 часов до получения информации о проявлении цунами на Гавайских островах, являющейся ключевой для такого рода цунами. По получении информации об амплитудах цунами на Гавайских островах, равных примерно 10 см и лишь в отдельных местах достигших 0,5 м [7], в 02:00 сахалинского времени 3 апреля (за 6—7 час. до подхода ожидаемого цунами к Курильским островам) Центром цунами принято решение тревогу на Курильских островах не объявлять.

При анализе приведенных выше описаний событий возникает ряд вопросов.

Все ли описанные тревоги были оправданными? Тревоги во время Симуширских цунами 2006 и 2007 гг., с точки зрения службы предупреждения, — да: тревоги объявлены в строгом соответствии с действующим регламентом (на берегах ближайших к очагу островов заплеск цунами достигал 20 м). С точки зрения руководителей прибрежных

предприятий, населения эти тревоги оказались ложными: волны с амплитудами до 1 м не представляли угрозы. Объявление тревоги цунами в третьем случае (2011 г.) для населенных пунктов Курильской гряды было оправданным: волны с амплитудами более 1 м представляли опасность для находящихся в портах судов, а также работников предприятий и жильцов домов, расположенных в прибрежной зоне. Тревога в четвертом случае с точки зрения руководителей прибрежных предприятий, населения была, по-видимому, ложной, хотя представители служб предупреждения о цунами с этой оценкой несогласны.

Не является ли заблаговременность объявления тревог цунами, объявляемых одновременно во всех пунктах Курильских островов (в описанных случаях от 0,5 до почти 5 час.), завышенной для некоторых пунктов? Ранее [8], с учетом того, что количество эвакуируемых не превышает 1 тыс., время, необходимое для эвакуации населения, оценивалось в четверть часа.

Не слишком ли велика длительность тревоги цунами 2011 г.?

И наконец, возможно ли улучшить ситуацию, объявлять тревоги в соответствии с определением прогноза цунами МОК ЮНЕСКО?

2. Предлагаемые пути совершенствования систем предупреждения о цунами

В настоящее время службами предупреждения о цунами в Тихом океане внедряется новый регламент оценки опасности цунами [9], который основан на предварительных расчетах с использованием упрощенной модели источника. Прогноз дается для крупных регионов, позволяет лишь ориентировочно оценить опасность возникшего цунами. Принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры предупреждения о цунами. Эти центры должны, видимо, самостоятельно разрабатывать способы детального прогнозирования цунами в своем районе.

Предлагаемый новый регламент не отвечает определению оперативного прогноза цунами, данному МОК ЮНЕСКО.

Есть основания сомневаться в том, что основанный на предполагаемом механизме землетрясения

прогноз окажется адекватным. Подход, основанный на предварительных расчетах, предлагался еще в 1996 г. [10] в начале развития системы регистрации цунами в океане. Впоследствии от такого подхода как неперспективного отказались в пользу гидрофизического способа, основанного на данных о сформировавшемся цунами в открытом океане.

В рамках ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации» последних лет предусматривались меры по улучшению оперативного прогноза цунами. К ним относились мероприятия по совершенствованию систем связи и оповещения об угрозе цунами, увеличение количества сейсмостанций, развитие сети автоматизированных постов (АП) измерения уровня океана.

В Сахалинской области введена в эксплуатацию система инструментальных наблюдений за уровнем моря в составе 11 береговых АП (большая часть на Сахалине). Предполагается, что автоматизированные посты наблюдений за уровнем моря для предупреждения угрозы цунами появятся на трех островах Курильской гряды — Итуруп, Уруп и Си-мушир.

Эффективно ли применение таких автоматизированных постов на Курилах? Установленные на берегах Курильских островов АП едва ли сыграют положительную роль в улучшении оперативного прогноза цунами на Курильских островах (а именно они наиболее подвержены цунами): времена пробега цунами до этих постов сравнимы с временами добега цунами до населенных пунктов. Очевидно, что АП не могут обеспечить необходимую заблаговременность объявления тревоги цунами.

Для прогноза цунами в Охотском море (например, в Магадане) АП, установленные на Курильских островах, возможно, будут полезны, но при условии, что данные о цунами не сильно искажаются береговыми эффектами (нелинейностью, собственными колебаниями акватории и т. п.).

3. Гидрофизические способы оперативного прогноза цунами

Гидрофизические способы прогнозирования цунами не опираются на магнитуду землетрясения. Достоверной для оценки степени опасности цунами является информация о сформировавшемся цуна-

ми, получаемая в океане станциями системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis — оценка и передача данных о цунами в океане) [11].

Одним из способов прогнозирования цунами является способ, развиваемый в США [12, 13]. 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. По записям цунами на нескольких ближайших к области землетрясения станциях системы DART определяются коэффициенты линейной комбинации синтетических мареограмм от этих источников, наилучшим образом аппроксимирующей сигнал на этих станциях. Линейная комбинация синтетических мареограмм (с рассчитанными 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 [14]. Способ SIFT с успехом применялся к расчету всех значительных цунами в Тихом океане с 1996 г.

Применяемый в настоящей работе способ (экспресс-метод) оперативного прогноза цунами [15, 16] является одним из возможных гидрофизических способов. Он 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, используется информация только о координатах эпицентра землетрясения. Способ слабо чувствителен к ошибкам в определении координат эпицентра землетрясения. Способ позволяет по ограниченной информации о цунами в открытом океане (первый полупериод/первый период

волны) давать прогноз ожидаемого цунами достаточно большой длительности. Учитываются возможные вторичные волны значительной амплитуды, нередко приходящие с задержкой в несколько часов. На основании прогноза тревога цунами может объявляться с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых существует реальная угроза [16].

Способ применим к прогнозу как ближних (локальных), так и дальних (трансокеанских) цунами [17, 18].

Способ (экспресс-метод) оперативного прогноза цунами не требует создания гигантских баз расчетных мареограмм и может применяться местными службами предупреждения о цунами, если имеется возможность получения данных о цунами от удаленных станций в режиме реального времени.

Россия располагала двумя глубоководными станциями измерения уровня океана (DART 21401 и 21402), установленными в 2010 и 2012 гг. Первая из них зарегистрировала слабое цунами 09.03.2011 и сильнейшее цунами 11.03.2011. Данные успешно применены при моделировании экспресс-методом этих цунами на Курильских островах [3]. В настоящее время обе станции не работают, исключены из списка станций Тихого океана.

4. Моделирование процесса оперативного прогноза цунами 2006, 2007, 2010, 2011, 2014 гг.

Подтверждением того, что экспресс-метод действительно может давать адекватную оценку ожидаемого цунами, являются результаты ретроспективного и оперативного моделирования локальных и трансокеанских цунами 2006—2014 гг. Результаты моделирования, расчета ниже называются прогнозом.

Анализ результатов моделирования приведен в том же порядке, что и описания действий служб предупреждения и проявлений цунами. Оценивалось совпадение расчетных и зарегистрированных форм цунами (амплитуды, характерные периоды, структура волнового пакета) в соответствии с определением прогноза цунами, данным МОК ЮНЕСКО, а также заблаговременность выполнения прогноза. Расчетная схема численных экспериментов приведена на рис. 1.

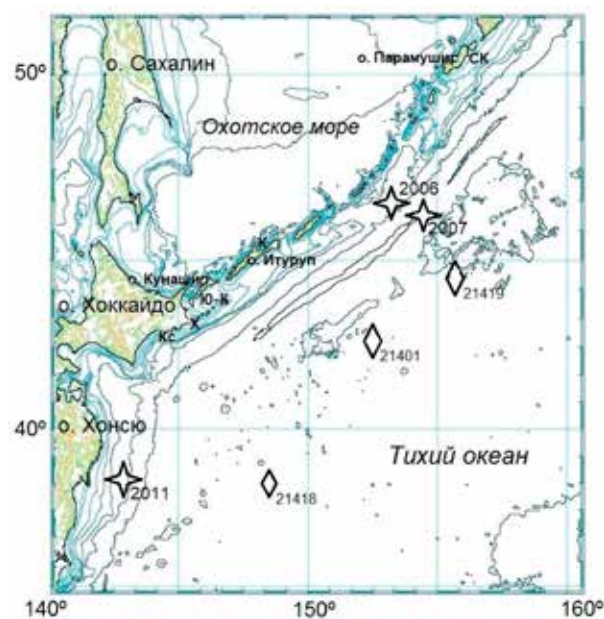


Рис. 1. Расчетная схема для моделирования локальных цунами. Звездочки — эпицентры очагов цунами, ромбы — положение станций измерения уровня океана. На схеме обозначено: СК — Северо-Курильск (о. Парамушир), К — Курильск (о. Итуруп), ЮК — Южно-Курильск (о. Кунашир), Х — Ханасаки и Кс — Кусиро (о. Хоккайдо).

Picture 1.

4.1. Симуширские цунами 2006, 2007 гг.

Выполнен расчет (ретроспективный прогноз) формы цунами в населенных пунктах Курильских островов и острова Хоккайдо по реконструированным данным ближайшей к очагу станции DART 21419, расположенной восточнее Курило-Камчатского желоба, во время событий 2006 и 2007 гг. [18]. Результаты прогноза представлены на рис. 2.

В условиях экспериментов при пробеге цунами 2006 г. до станции DART 21419, равном 15 мин. (при цунами 2007 г. — 20 мин.), момент времени выработки прогноза (по первому периоду цунами на станции DART 21419) после начала землетрясения равен 21 мин. для 2006 г. и 36 мин. для 2007 г.

В условиях эксперимента заблаговременность прогноза цунами для Ханасаки и Кусиро составляет 50—60 мин., для Южно-Курильска составляет около

1,5 час., для Северо-Курильска — около 1 часа, для Курильска — около 30 мин. Для этих населенных пунктов Курильских островов, как представляется, времени вполне достаточно для принятия решения об объявлении тревоги цунами и, при необходимости, проведения эвакуации населения и вывода судов в открытое море.

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.

В пунктах Курильских островов прогнозировались амплитуды ожидаемого цунами в пределах меньше 1 м для события 2006 г. и меньше 0,3 м для 2007 г. Регистрация цунами в пунктах Курильских островов (кроме Южно-Курильска) не проводилась. Прогноз для Южно-Курильска дал завышенные по сравнению с фактическими амплитуды ожидаемого цунами, однако и завышенные амплитуды не являются опасными).

На основании прогноза тревогу в населенных пунктах Курильских островов можно было не объявлять во время обоих событий.

4.2. Тохоку цунами 2011 г.

В [3] выполнено моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами 11 марта 2011 г. для населенных пунктов Курильских островов и острова Хоккайдо. Расчетная схема представлена на рис. 1. В расчетах использовались данные станций измерения уровня океана DART 21401 и 21418. Форма цунами, зарегистрированная станцией DART 21418, изображена на рис. 2.

Заблаговременность прогноза по данным российской станции DART 21401 составила для Северо-Курильска 105 мин., для Южно-Курильска 43 мин., для Курильска 20 мин.

Прогноз, выполненный по данным другой, более близкой к очагу, станции DART 21418, обеспечивает заблаговременность прогноза для Северо-Курильска — 2,5 час., Южно-Курильска — 1,5 час., Курильска — 1 час. и для островов Малой Курильской гряды от 0,5 до 1 час.

Несмотря на аномальный механизм возбуждения цунами Тохоку 11.03.2011, расчет, выпол-

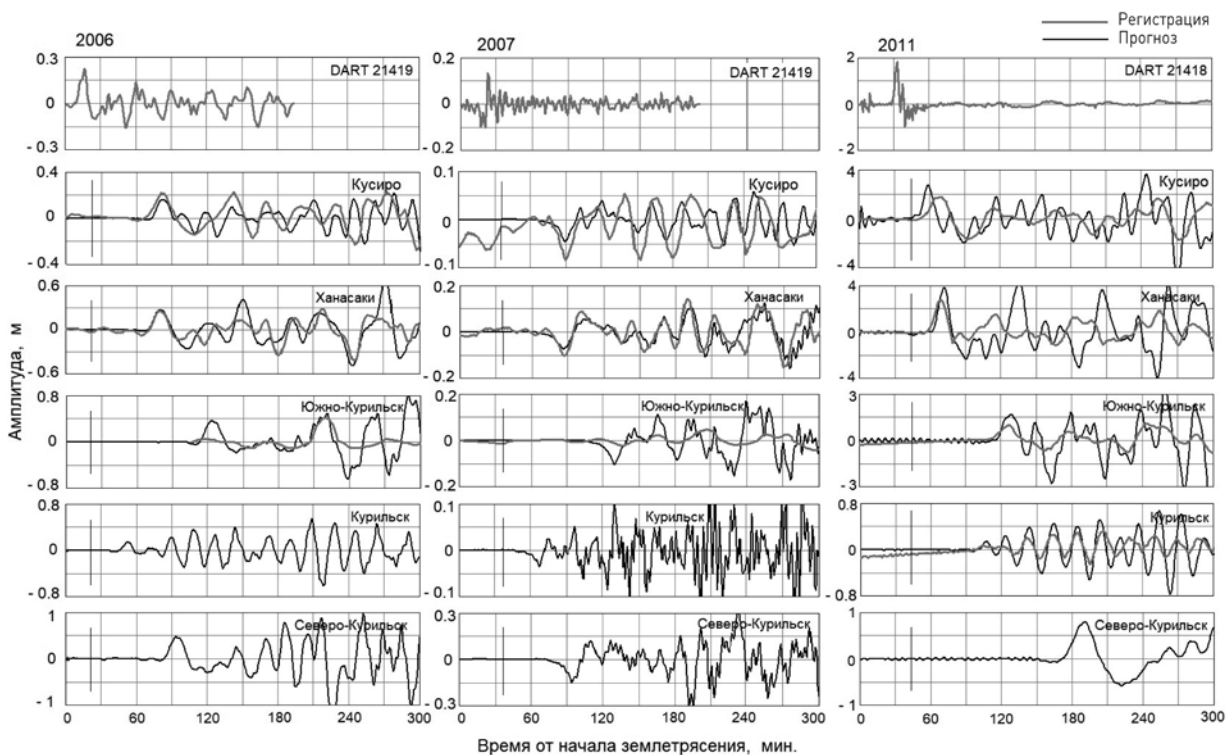


Рис. 2. Исходные данные для расчетов (верхняя строка) и результаты прогноза цунами 2006, 2007 и 2011 гг. в пунктах Курильских о-вов и о. Хоккайдо.

Picture 2.

ненный по данным станций DART 21401 и DART 21418 с использованием информации лишь о координатах эпицентра землетрясения, дает адекватный результат (рис. 2). Результаты расчета для Курильских островов подтверждаются как инструментальными измерениями (хорошее совпадение структуры, амплитуд цунами на станции DART 21419, в Южно-Курильске и Курильске), так и другими свидетельствами: данными судового эхолота (Северо-Курильск), визуальными наблюдениями (портпункт Буревестник) [6]. Для Куширо и Ханасаки прогноз дает завышенные амплитуды ожидаемого цунами.

По результатам расчета должно быть принято решение об объявлении тревоги в населенных пунктах Курильских островов последовательно, начиная с пунктов Малой Курильской гряды, с разумной заблаговременностью.

4.3. Чилийское цунами 2010 г.

Результаты моделирования процесса оперативного прогноза этого трансокеанского цунами представлены в [19], [20]. Расчетная схема численных экспериментов приведена на рис. 3.

Расчет цунами выполнялся по записи цунами станции DART 32412, ближайшей к очагу. В точке, где расположена станция DART 32412, цунами представляло собой головную волну заметной амплитуды с характерным периодом около 60 мин., сопровождающуюся хвостом малой амплитуды (рис. 4).

На рис. 4 приведены расчетные и зарегистрированные формы цунами в открытом океане и в населенных пунктах Курильских островов.

Расчетные формы цунами в открытом океане на станциях DART 21413 и 21416 [14] хорошо совпадают с формами зарегистрированного цунами.

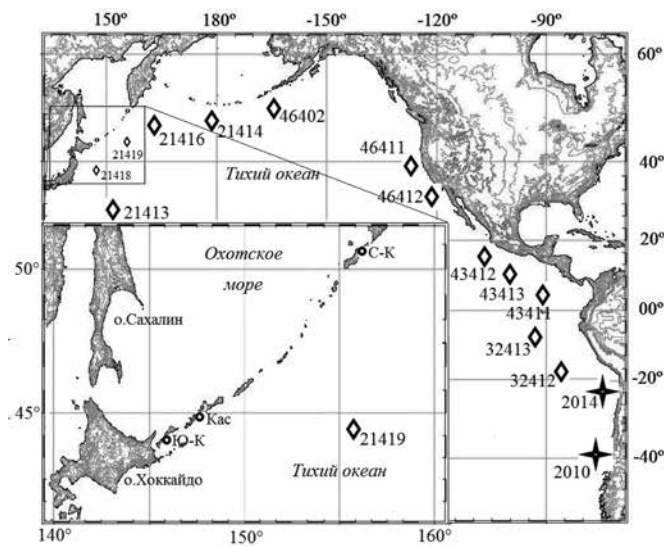


Рис. 3. Расчетная схема для моделирования трансокеанских цунами.

Звездочки — эпицентры очагов цунами с указанием года, ромбы — положения станций измерения уровня океана. На схеме обозначено: С-К — Северо-Курильск, Кас — зал. Касатка (о. Итуруп), Ю-К — Южно-Курильск.

Picture 3.

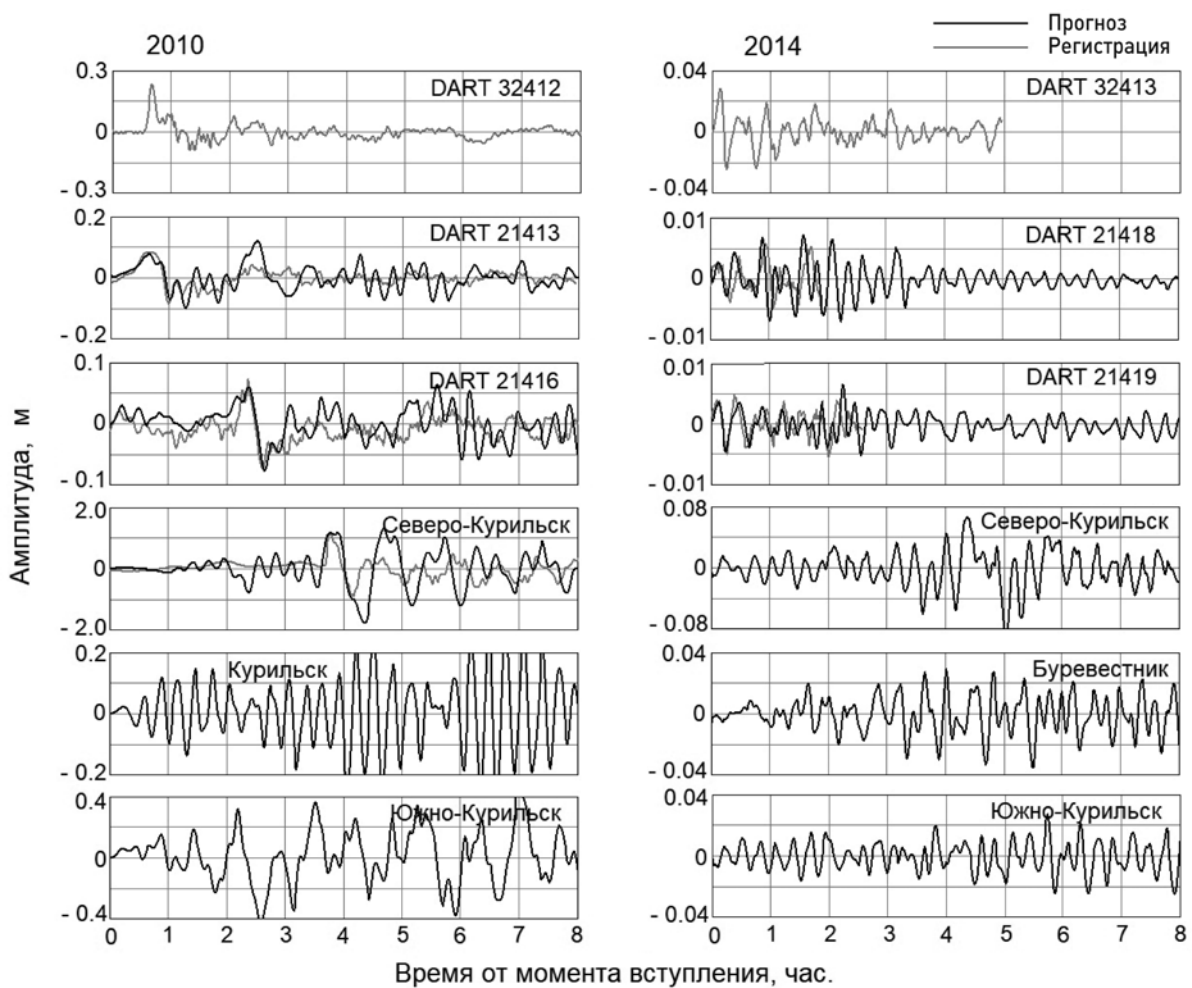


Рис. 4. Исходные данные (верхняя строка) и результаты прогноза Чилийских цунами 2010 и 2014 гг.

Picture 4.

Для Северо-Курильска расчет дает головные волны небольших амплитуд, несколько превышающих амплитуды зарегистрированных волн, в течение 220 мин. Прогнозируется приход максимальных волн с амплитудами, превышающими 1 м, спустя 4 час. после первого вступления. Согласно прогнозу, тревога могла быть объявлена через 3 часа после расчетного времени прихода цунами, длительность ее могла составить 3 часа. Фактически тревога цунами в Северо-Курильске объявлялась за 3 час. 22 мин. до ожидаемого прихода первой волны, но была отменена до прихода максимальных волн. Регистрация Чилийского цунами в Южно-Курильске, Курильске не проводилась, сравнить результат расчета с фактическим цунами не представляется возможным.

4.4. Чилийское цунами 2014 г.

Прогноз Чилийского цунами 1 апреля 2014 г. впервые в России выполнен практически в режиме реального времени. Схема расчетной области приведена на рис. 3. Прогноз выполнен по данным станции DART 32413 (рис. 4), данные которой к моменту начала расчетов были доступны в Интернете [14]. Сравнение результатов прогноза цунами в океане с имевшимися на момент окончания промежуточных расчетов данными станций DART показало достаточно высокую точность совпадения.

Прогноз амплитуд ожидаемого цунами на Курилах дал незначительную их величину: в основном до 4 см, приход максимальных волн с амплитудой до 8 см в Северо-Курильске с задержкой около 3,5 час. В пос. Буревестник (зал. Касатка) и в Южно-Курильске амплитуды ожидаемых волн также незначительны, в пределах 3—4 см (рис. 4).

Прогноз для Курильских островов получен за 4,0 час. до получения информации о проявлении цунами на Гавайских островах и за 9,5—10,5 час. до прихода волны к побережью Курильских островов. На основании этих расчетов в 21 час. 2 апреля по сахалинскому времени можно было принять решение тревогу цунами не объявлять.

Полное время расчета (осуществления прогноза) составило около 2 час. при том, что расчеты были начаты через 10 час. после начала землетрясения, после получения информации о цунами на станциях DART, при времени распространения цунами от очага до Курильских островов 21—22 час. [17].

5. Обсуждение

Приведенные описания событий и результаты соответствующих численных экспериментов показывают, что имеется принципиальная возможность управлять риском цунами во время события в оперативном режиме. Понизить количество и исключить необоснованный ущерб от ложной тревоги цунами можно путем совершенствования прогноза.

Тревоги цунами в случаях локальных землетрясений объявляются филиалами Единой геофизической службы РАН (сейсмологическая подсистема службы предупреждения о цунами), которые, не располагая информацией о цунами, опираются только на магнитудно-географический критерий. Центры цунами Росгидромета (гидрофизическая подсистема службы предупреждения о цунами) объявляют тревогу в случаях опасных дальних, трансокеанских цунами. К их обязанностям относятся также инструментальная регистрация цунами и визуальные наблюдения, а также отмена тревоги.

Каждая из подсистем службы предупреждения о цунами в деле совершенствования прогноза преследует свои цели, не связывая их между собой.

Для совершенствования службы предупреждения о цунами предусмотрены такие меры, как развитие системы оповещения об угрозе цунами, увеличение числа сейсмостанций для более точного определения координат гипоцентра землетрясения, развитие сети береговых автоматизированных постов наблюдений за уровнем моря для предупреждения об угрозе цунами.

Представляется, что увеличение количества сейсмостанций именно с целью повышения качества оперативного прогноза цунами, как представляется, является излишним: ошибки определения координат эпицентра землетрясения в пределах очага цунами слабо влияют на результат прогноза гидрофизическим способом.

Ввиду того, что Россия не располагает глубководными станциями измерения уровня океана, а информация других станций системы DART в режиме реального времени недоступна, ставка делается на береговые автоматизированные посты наблюдений за уровнем моря. Однако АП, установленные на Курильских островах, едва ли существенно повысят качество оперативного прогноза цунами на самих Курильских островах.

Возможным путем решения проблемы в России является создание российских глубоководных станций измерения уровня океана, развертывание сети глубоководных станций для получения информации о сформировавшемся цунами с целью раннего предупреждения о цунами. К сожалению, такие планы даже не рассматриваются.

Способ (экспресс-метод) оперативного прогноза цунами, использующий данные о цунами глубоководных станций, мог бы быть одним из средств повышения качества оперативного прогноза цунами.

Проблемой является то, что экспресс-метод, являясь эффективным средством оперативного прогноза, не находит практического применения, главным образом по причине отсутствия российских станций измерения уровня океана.

Как отмечалось, за прогноз цунами, объявление тревоги отвечают две подсистемы, использующие критерии, выработанные 60 лет назад. По-видимому, назрела необходимость пересмотреть требования к качеству оперативного прогноза в свете определения прогноза цунами МОК ЮНЕСКО, принять новые критерии опасности цунами, выработать новый регламент действий при угрозе цунами.

Заключение

Представленный способ (экспресс-метод) оперативного прогноза цунами по данным глубоководных станций измерения уровня океана позволяет заблаговременно рассчитывать (прогнозировать) форму ожидаемого цунами в заданном пункте. Результат прогноза удовлетворяет определению МОК ЮНЕСКО.

Для выполнения прогноза от сейсмологической подсистемы требуется информация только о координатах землетрясения. Способ не зависит от механизма землетрясения, может учитывать дополнительные эффекты в результате подводных оползней.

Результаты численных экспериментов демонстрируют соответствие расчетных и фактических форм цунами с точностью, достаточной для принятия решения об объявлении тревоги цунами, и с заблаговременностью, достаточной для принятия решения об объявлении тревоги цунами, проведения эвакуации населения.

Способ (экспресс-метод) применим для прогноза локальных и трансокеанских цунами.

Экспресс-метод оперативного прогноза цунами не требует создания гигантских баз вспомогательных мареограмм. Для реализации способа (экспресс-метода) необходимо располагать подробной батиметрией районов, для которых выполняется прогноз, применять технологию быстрого счета с включением методов вложенных сеток.

С применением таких технологий прогноз может осуществляться в режиме реального времени на любом компьютере. При условии оперативного приема сейсмологической информации о координатах эпицентра землетрясения и информации ближайших к очагу станций измерения уровня океана способ может применяться на местном уровне, что позволит более детально рассчитывать амплитуды ожидаемого цунами в пределах острова, населенного пункта.

В численных экспериментах показано, что при возникновении землетрясений в районе Курило-Камчатской глубоководной впадины возможно прогнозирование цунами по данным глубоководных станций измерения уровня океана, расположенных восточнее впадины. В частности, при возникновении землетрясений в районе центральных Курильских островов при условии регистрации цунами станцией DART 21419 и оперативного получения информации возможен заблаговременный прогноз (за 0,5—1,5 час. до прихода первой волны) для населенных пунктов северных и южных Курильских островов. В численных экспериментах расчетные формы цунами по структуре, амплитудам волн хорошо совпали с зарегистрированными в Ханасаки и Кусиро, в Южно-Курильске.

В подобных ситуациях для центральных Курильских островов (Матуа, Симушир и др.), время пробега цунами до которых составляет 15—20 мин., гидрофизические способы прогноза не позволяют давать заблаговременный прогноз. В таких случаях тревога цунами должна объявляться немедленно после получения первичной информации о землетрясении в соответствии с действующим в настоящее время регламентом.

Способ (экспресс-метод) оперативного прогноза, в отличие от действующего регламента, позволит службам предупреждения принимать решение об объявлении тревоги цунами с разумной заблаговременностью только в том населенном пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу.

При его реализации в виде единого программного комплекса, а также при условии получения в оперативном режиме информации уровневых станций, способ может стать инструментом, который позволит существенно уменьшить количество ложных тревог и тем самым повысить качество прогнозирования цунами, поднять уровень доверия населения к тревогам цунами.

Литература [References]



1. Королев Ю.П. О гидрофизическом способе оперативного прогноза цунами // Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 2. С. 32—47. [Korolev Yu.P. Hydrophysical method for real-time forecast of tsunami // Issues of Risk Analysis. 2011. Vol. 8. P. 32—47 (Russia)]
2. 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: 27.11.2018).
3. 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. [Korolev Yu.P., Ivetskaya T.N. Improving Real-Time Forecast of Tsunami and Tsunami Alert. Analysis of Recent Tsunamis // Issues of Risk Analysis. 2012. Vol. 9. P. 76—91 (Russia)]
4. 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.
5. MacInnes B.T., Pinegina 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).
6. 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.
7. NOAA National Centers for Environmental Information. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=70&d=7> (дата обращения: 25.11.2018).
8. Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непоп К.И. и др. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России / Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.
9. User's 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. URL: http://itic.ioc-unesco.org/images/stories/ptws/ptwc_new_enhanced_products/ts105-Rev2_eo_220368E.pdf (дата обращения: 27.11.2018).
10. 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. Vol. 14, № 3. P. 147—166.
11. NOAA Center for Tsunami Research. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html> (Дата обращения: 27.11.2018).
12. 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. Pp. 367—396.
13. 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, № 2. P. 60—69.
14. National Data Buoy Center. URL: <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (Дата обращения: 27.11.2018).
15. Королев Ю.П. Расчет цунами по измерениям уровня моря в удаленных точках при оперативном прогнозе // Океанология. 2004. Т. 44, № 3. С. 376—382.
16. Korolev Yu.P. An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2011. V. 11. P. 3081—3091. (Doi:10.5194/nhess-11-3081-2011).
17. 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.
18. Королев Ю.П., Лоскутов А.В. О достоверном оперативном прогнозе цунами // Проблемы анализа риска, том 15, 2018, № 1. С. 56—63. [Korolev Yu.P., Loskutov A.V. On the reliable short-term tsunami forecast // Issues of Risk Analysis. 2018. Vol. 15. № 1. P. 56—63 (Russia) <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2018-15-1-26-33>]
19. Korolev Yury. A New Approach to Short-Term Tsunami Forecasting. In: Tsunami — Analysis of a Hazard — From

Physical Interpretation to Human Impact. InTech: 2012. P. 141—180.

20. Королев Ю. П. Моделирование оперативного прогноза цунами вблизи побережья Курильских островов. Материалы Четвертой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 30 сентября — 4 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский. URL: <http://emsd.ru/conf2013lib/pdf/tsunami/KorolevModel.pdf> (Дата обращения 30.11.2018).

Сведения об авторе

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

Количество публикаций: 90, 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) 79-61-54

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

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Дата поступления: 11.12.2018

Дата принятия к публикации: 11.03.2019

Дата публикации: 30.04.2019

The author declare no conflict of interest

Came to edition: 11.12.2018

Date of acceptance to the publication: 11.03.2019

Date of publication: 30.04.2019