

Научная статья

УДК 550.344.42+551.466.62

EDN: MSGZQX

Экспресс-метод оперативного прогноза цунами: возможность применения на Тихоокеанском побережье России

Ю. П. Королёв

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

✉ *Yu_P_K@mail.ru*

Поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 27.06.2024;
принята к публикации 17.07.2024.

Аннотация

Цель. Целью работы являлось исследование возможности краткосрочного прогноза цунами на Курильских островах по данным о цунами в открытом океане.

Методы и результаты. Рассмотрены способы, лежащие в основе действий служб предупреждения о цунами в северо-западной части Тихого океана. Службы предупреждения, опирающиеся на первичную сейсмологическую информацию о землетрясении (магнитудный критерий), выпускают большое количество ложных тревог цунами. Адекватный прогноз дают службы, использующие информацию о сформировавшемся цунами в открытом океане (гидрофизические способы). Описана проблема краткосрочного (оперативного) прогноза цунами для Курильских островов. Приведены сведения о действиях служб предупреждения о цунами во время событий. Выполнено численное моделирование процесса прогнозирования экспресс-методом оперативного прогноза цунами в предположении получения информации о цунами в океане в режиме реального времени. Моделировались события 2006–2020 гг. в северо-западной части Тихого океана. Результаты численных экспериментов с использованием фактических данных подтвердили, что на основе экспресс-метода возможен краткосрочный прогноз цунами в конкретных пунктах Курильских островов с заблаговременностью, достаточной для своевременного принятия решения об объявлении тревоги и эвакуации населения из опасных мест.

Выводы. Развитие экспресс-метода краткосрочного прогноза цунами при условии оперативного получения информации о цунами в океане позволит в перспективе повысить качество прогнозирования и тем самым уменьшить количество ложных тревог цунами на Курильских островах. Показана необходимость создания собственных российских глубоководных станций измерения уровня океана.

Ключевые слова: цунами, прогноз цунами, краткосрочный прогноз цунами, оперативный прогноз цунами, тревога цунами, ложные тревоги цунами, цунами Тохоку, уровень океана, измерения уровня океана, службы предупреждения о цунами, Тихий океан, Курильские острова

Благодарности: автор благодарит рецензентов за полезные замечания и предложения, которые были учтены при доработке статьи.

Для цитирования: *Королёв Ю. П.* Экспресс-метод оперативного прогноза цунами: возможность применения на Тихоокеанском побережье России // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 5. С. 782–800. EDN MSGZQX.

© Королёв Ю. П., 2024

Express Method for Operational Tsunami Forecasting: Possibility of its Application on the Pacific Coast of Russia

Yu. P. Korolev

*Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*
✉ Yu_P_K@mail.ru

Abstract

Purpose. The work is aimed at studying the possibility of short-term tsunami forecasting in the Kuril Islands based on the data on tsunamis in the open ocean.

Methods and Results. The methods underlying the actions of tsunami warning services in the northwestern Pacific Ocean are considered. The warning services relying on primary seismological information on an earthquake (magnitude criterion), produce a large number of false tsunami alarms. An adequate forecast is provided by the services that use information on a tsunami formed in the open ocean (hydrophysical methods). The problem of short-term (operational) tsunami forecasting for the Kuril Islands is described. Information on the actions of tsunami warning services during the events is provided. The process of forecasting using the express method of tsunami operational forecast is numerically simulated under the assumption of obtaining real-time information on tsunamis in the ocean. The events of 2006–2020 in the northwest Pacific Ocean are simulated. The results of numerical experiments involving actual data confirms the fact that the express method can be used for a short-term tsunami forecast in specific locations of the Kuril Islands with an advance time sufficient for taking a timely decision to declare an alarm and evacuate the population from hazardous places.

Conclusions. Development of the express method for short-term tsunami forecasting, provided that information on tsunamis in the ocean is available quickly, will make it possible to improve in future the quality of forecasting and thereby reduce the number of false tsunami alarms on the Kuril Islands. The necessity of creating own, Russian, deep-sea ocean level measurement stations is shown.

Keywords: tsunami, tsunami forecast, short-term tsunami forecast, operational tsunami forecast, tsunami alarm, false tsunami alarms, Tohoku tsunami, ocean level, ocean level measurements, tsunami warning services, Pacific Ocean, Kuril Islands

Acknowledgments: The author is grateful to the reviewers for their useful comments and suggestions, which were taken into account when finalizing the article.

For citation: Korolev, Yu.P., 2024. Express Method for Operational Tsunami Forecasting: Possibility of its Application on the Pacific Coast of Russia. *Physical Oceanography*, 31(5), pp. 736-754.

Введение

Краткосрочный (оперативный) прогноз цунами до настоящего времени остается нерешенной проблемой в ряде стран бассейнов Тихого, Индийского и Атлантического океанов. Службы предупреждения о цунами этих стран при возникновении подводных землетрясений своевременно объявляют тревоги цунами, среди которых часто встречаются ложные [1, 2]. Общепринято, что под ложной тревогой цунами понимается событие, когда объявляется тревога, производится эвакуация населения, однако волны не вызывают затопления, не причиняют ущерба [1]. Ложные тревоги цунами, часто объявляемые с излишней заблаговременностью, не наносят прямых потерь, но причиняют ущерб, связанный с остановкой производства в опасных местах, эвакуацией населения в безопасные зоны, выводом судов в открытое море. При этом вся-

кого рода деятельность в прибрежной полосе останавливается на несколько часов [3].

Задачей оперативного (краткосрочного) прогноза цунами является заблаговременное получение информации об ожидаемом цунами. Эта информация должна включать в себя время прихода первой волны, количество волн, их амплитуды, интервалы времени между ними, продолжительность цунами [4]. Эти характеристики цунами перечислены также в определении понятия «прогноз цунами», сформулированном Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО в 2013 г.¹ На основании такой информации должно приниматься решение об объявлении тревоги цунами с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную угрозу. Под заблаговременностью прогноза понимается время, которое проходит от момента выработки прогноза до прихода ожидаемого цунами в заданный пункт.

Целью оперативного прогноза цунами является обеспечение безопасности населения, движимого имущества, устойчивости функционирования прибрежной инфраструктуры, прибрежных территорий в условиях вероятной угрозы цунами.

Обзор состояния дел в области прогноза цунами дан в [1, 2]. В работах описаны принципы, положенные в основу действий различных служб предупреждения о цунами (СПЦ). Принципы действия СПЦ в северо-западной части Тихого океана описаны в [3].

В практике СПЦ применяются два основных подхода, основанные на информации о землетрясении или о цунами в открытом океане. Первый из них, магнитудно-географический способ, предложенный около 60 лет назад, в самом начале развития служб предупреждения о цунами, основан на эмпирических соотношениях между магнитудой землетрясения и интенсивностью цунами. Такой подход является причиной большого количества (не менее 75 %) ложных тревог цунами, объявленных всеми службами [1, 5, 6]. Подходы, основанные на связи магнитуды землетрясения и его вероятного механизма, предлагаются и реализуются службами предупреждения о цунами в Японии², Австралии [7], России [8]. Прогнозирование цунами выполняется с использованием базы расчетных мареограмм вблизи побережий от множества сейсмических источников с наиболее вероятным механизмом.

Другой подход связан с развитием сети глубоководных станций системы *DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis* – оценка и сообщение о цунами в океане) наблюдений за уровнем океана³. Прогноз ожидаемого цунами осуществляется гидрофизическим способом прогноза *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration* – Национальное управление океани-

¹ Tsunami Glossary / Intergovernmental Oceanographic Commission. Fourth Edition. Paris : UNESCO, 2019. P. 35–36. (IOC Technical Series ; 85). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226> (дата обращения: 15.06.2024).

² Users' Guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. Paris : UNESCO, 2019. 35 p. (IOC Technical Series ; no. 142). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93> (дата обращения: 15.06.2024).

³ NOAA Center for Tsunami Research. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/> (дата обращения: 15.06.2024).

ческих и атмосферных исследований)³, известным также как способ *SIFT* (*Short-term Inundation Forecasting for Tsunamis* – краткосрочный прогноз затопления от цунами)⁴ [9, 10]. По данным о цунами в океане выполняется расчет волновых форм в заданных точках в океане или вблизи побережья на основе заранее созданной гигантской базы синтетических мареограмм. При вычислениях степень совпадения расчетных волновых форм и реальных мареограмм не оценивается³. Прогнозы цунами способом *NOAA* соответствуют определению МОК ЮНЕСКО. Эта методология прогнозирования в режиме реального времени в настоящее время официально используется службами предупреждения о цунами США [2]. Для областей, для которых отсутствует заранее рассчитанная база синтетических мареограмм, способ *NOAA* (*SIFT*) не применим [3].

Близкий, но более строгий подход, предложенный в [11], определяет наиболее информативные точки для прогнозирования цунами. Использование набора таких точек, специфичных для каждого события, может быть полезным при разработке оптимальной системы наблюдений за цунами. Этот подход предполагает возможность оперативного прогнозирования цунами.

Дальневосточное побережье Российской Федерации, особенно тихоокеанское побережье Курильских о-вов, относится к цунамиопасным территориям⁵.

В 2024 г. исполняется 72 года со дня разрушительного цунами 4–5 ноября 1952 г. на северных Курильских о-вах. Цунами возникло в результате землетрясения с магнитудой 9 юго-восточнее п-ова Камчатка и вызвало затопление на побережьях о. Парамушир и о. Шумшу (северные Курильские о-ва)⁶ высотой до 23 м. Были уничтожены г. Северо-Курильск и все населенные пункты на этих островах. Имеется большое количество публикаций, посвященных этому событию, например работа⁷.

После цунами 1952 г. в России была создана система предупреждения о цунами, ориентированная на информацию о землетрясениях (магнитуду и координаты эпицентра).

Сильнейшее землетрясение с магнитудой 9,1 восточнее о. Хонсю 11 марта 2011 г. вызвало затопление побережья Курильских о-вов с максимальным заплеском высотой до 2,5 м на о. Парамушир, выше 2 м на о. Кунашир и до 2 м на о. Итуруп⁶. На основании магнитуды землетрясения и информации в Интернете станции *DART 21401* своевременно объявлена тревога цунами на Курильских о-вах, произведена эвакуация населения [12].

В 2006 и 2007 гг. произошли два землетрясения восточнее о. Симушир (центральные Курильские о-ва). Первое из них (15.11.2006) имело магнитуду 8,3, второе (13.01.2007) – 8,1. В обоих случаях во всех населенных пунктах Курильских о-вов в соответствии с регламентом на основании магнитудного

⁴ Development of the Forecast Propagation Database for NOAA's Short-Term Inundation Forecast for Tsunamis (SIFT) / E. Gica [et al.]. Seattle, WA : Department of Commerce, 2008. 95 p. (NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-139).

⁵ Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. URL: <http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami> (дата обращения: 15.06.2024).

⁶ National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (дата обращения: 15.06.2024).

⁷ Цунами 1952 года, Северо-Курильск. URL: http://www.sakhalin.ru/Region/Tsunami_1952/tsunami_1952.htm (дата обращения: 15.06.2024).

критерия одновременно были объявлены тревоги цунами, выполнена эвакуация населения. Заплески цунами составили до 21,9 м на ближайших ненаселенных центральных Курильских о-вах [13, 14]. В то же время в населенных пунктах цунами были незначительными, не представлявшими опасности: например в Южно-Курильске максимальная амплитуда составила 0,28 м в первом событии и 0,06 м во втором ⁶.

25 марта 2020 г. восточнее о. Онекотан (северные Курильские о-ва) в 13:49 по сахалинскому времени (*SAKT*) произошло землетрясение с магнитудой 7,5. Ввиду того, что информация о действиях служб предупреждения во время события обычно не публикуется, ниже описаны действия СПЦ во время этого события. Это позволит понять порядок действий СПЦ в настоящее время и оценить возможные изменения в будущем.

Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (ТЦПЦ) в 13:57 по сахалинскому времени выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 1000 км от эпицентра землетрясения. Тревога цунами по Северо-Курильскому району сейсмостанцией Южно-Сахалинск на основе магнитудного критерия объявлена в 14:00. Консультативный центр по цунами в северо-западной части Тихого океана, а именно Японское метеорологическое агентство (ЯМА), в 14:16 также предупредил о возможных разрушительных волнах цунами на побережье Курильских о-вов с амплитудой 1–3 м. Приход цунами в Северо-Курильск ожидался в 15:04. Эвакуация 400 человек была завершена в 14:30, за полчаса до ожидаемого прихода волны. Высота волны в ожидаемое время вне населенного пункта, по визуальной оценке, на фоне штормового волнения составила 50 см ⁵. Данные о проявлении цунами в порту Северо-Курильска отсутствуют. Длительность тревожного режима составила около 4 ч [15]. В последних трех событиях, ввиду малой амплитуды волн в населенных пунктах, объявленные в них тревоги были явно ложными.

В настоящее время российские центры предупреждения о цунами при принятии решения об объявлении тревоги цунами опираются на магнитудно-географический критерий, выработанный около 60 лет назад, и предупреждения, выпускаемые ТЦПЦ и ЯМА, что приводит к объявлению ложных тревог цунами. Российская СПЦ не располагает собственными глубоководными станциями измерения уровня океана, позволяющими осуществлять наблюдения за уровнем океана и оперативный прогноз цунами, в своей деятельности не использует данные о цунами в открытом океане ⁸. По этой причине, а также вследствие отсутствия у нее современных действующих способов прогноза центры цунами не дают адекватный прогноз цунами на побережье Дальнего Востока. Способ *NOAA (SIFT)* для прогноза цунами на Дальневосточном побережье России ввиду отсутствия соответствующей базы синтетических мареграмм не применим.

Возникает законный вопрос: возможно ли коренное улучшение работы служб предупреждения о цунами, существенное повышение качества прогноза?

⁸ Камчатский филиал геофизической службы РАН. URL: <https://emsd.ru/conf2019/pdf/solution.pdf> (дата обращения: 07.10.2024) ; URL: https://emsd.ru/files/conf2021/resolution_tsunami.pdf (дата обращения: 07.10.2024) ; URL: <https://emsd.ru/files/conf2023/result.pdf> (дата обращения: 07.10.2024).

Цель работы и постановка задачи

У российской службы предупреждения трансокеанские цунами, возникающие у побережий Южной Америки, не вызывают озабоченности. Принятие решения об объявлении тревоги опирается на информацию о проявлении цунами на Гавайских о-вах. Однако критерий опасности цунами на Курильских о-вах в зависимости от высот цунами на Гавайских о-вах не выработан. Волны с амплитудами 2 м, зарегистрированные на Гавайских о-вах, не рассматриваются как фактор возникновения опасности заметного цунами на Курильских о-вах [16, 17].

При возникновении цунами вблизи Курильских о-вов решение об объявлении тревоги принимается на основе магнитудно-географического способа. При магнитуде выше пороговой объявляется тревога цунами во всех населенных пунктах островов.

Исходя из поставленного выше вопроса целью работы являлось исследование возможности оперативного достоверного прогноза цунами на Курильских о-вах по данным о цунами в открытом океане.

Для достижения цели выполнялось численное моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами экспресс-методом в предположении получения информации о цунами в океане в условиях режима реального времени. Предполагалось, что момент времени выработки прогноза и момент времени объявления тревоги цунами совпадают. Использовалась информация глубоководных станций измерения уровня океана системы *DART*, расположенных вблизи Курильских о-вов, действовавших во время события, или реконструированные данные станций, действовавших ранее или установленных позднее.

Качество прогноза цунами оценивается по его способности определить степень угрозы и необходимость объявления тревоги только в тех местах, в которых цунами представляет реальную угрозу [3].

Способ оперативного прогноза цунами

Как отмечалось, центры цунами в настоящее время не дают адекватный прогноз цунами на побережье Дальнего Востока. Детальная информация об ожидаемом цунами по данным об уровне океана могла быть получена экспресс-методом оперативного прогноза [4].

Экспресс-метод заключается в расчете формы ожидаемого цунами в заданной точке A по данным о цунами в океане в точке M с помощью передаточной функции (отношение в правой части) в соответствии с соотношением

$$\zeta(A, s) = \zeta(M, s) \cdot \frac{\eta(A, s)}{\eta(M, s)}. \quad (1)$$

Все функции, входящие в формулу (1), являются образами (спектрами) дискретного интегрального преобразования Лапласа соответствующих рядов данных. Выражение (1) является следствием соотношения подобия спектров волновых форм в точках A и M двух разных цунами (функции $\zeta(A, s)$, $\zeta(M, s)$)

и функции $\eta(A, s)$, $\eta(M, s)$ с одним и тем же эпицентром $\frac{\zeta(A, s)}{\zeta(M, s)} = \frac{\eta(A, s)}{\eta(M, s)}$,

которое выведено из фундаментального принципа взаимности [4].

Если известны функции $\eta(M, s)$ и $\eta(A, s)$ для каждого пункта A , то обратное преобразование Лапласа соотношения (1) дает волновые формы ожидаемого цунами в каждой из этих точек. Практически в силу того, что в оперативном режиме о землетрясении известны лишь координаты эпицентра (магнитуда не играет роли), в качестве второго цунами принимается численная модель волн, распространяющихся от модельного (вспомогательного) источника в виде начального возвышения свободной поверхности круговой формы произвольной амплитуды, например 10 м, с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Диаметр источника – характерный поперечный горизонтальный размер очага цунами (100 км). Это является главным допущением способа. Предполагается, что подобие, хотя и приближенно, но соблюдается. Расчет волновых форм от вспомогательного источника в точках M и A выполняется во время события сразу после получения информации о координатах эпицентра землетрясения. При этом нет необходимости в создании гигантской базы расчетных мареограмм. В силу приближенного характера способа не предполагается полное совпадение расчетных и фактических волновых форм. Ожидается достаточно точное прогнозирование основных характеристик ожидаемого цунами: время прихода, амплитуда и длительность головной волны, время прихода и амплитуда максимальной волны.

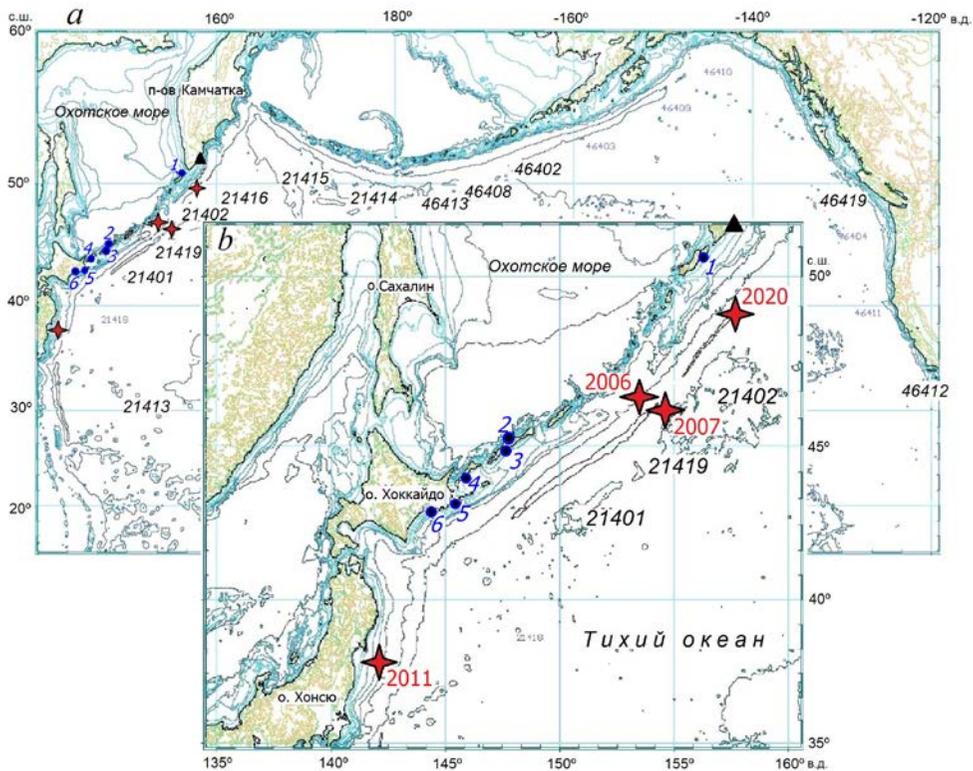
Первоначальная версия способа описана в [4]. Позднее для применения в оперативном режиме предложено использовать данные о цунами длительностью, равной первому полупериоду/периоду цунами в океане [18]. В работе [4] показана успешность способа краткосрочного прогноза цунами при расчетах волновых форм на станциях *DART*, зарегистрировавших цунами 2006, 2007 и 2009 гг. в северной части Тихого океана. Эффективность экспресс-метода для прогнозирования трансокеанских цунами, возникающих вблизи побережья Южной Америки, в океане, а также у Курильских о-вов показана в [3, 19]. Качество прогноза цунами для точек в океане экспресс-методом и способом *NOAA* сопоставимо [3].

Результаты

Моделировались процессы оперативного прогнозирования симуширских 2006, 2007 гг. и онекотанского 2020 г. цунами, а также цунами Тохоку 2011 г. на Курильских о-вах.

В численных экспериментах выполнялись действия, подобные тем, которые производились бы в реальных условиях, с соблюдением временных рамок: получение информации о координатах эпицентра землетрясения (через 7–11 мин после главного толчка), построение передаточной функции сразу после получения этой информации, прием информации об уровне океана от ближайшей к очагу станции. Построение передаточной функции должно быть завершено до получения информации об уровне. Современные методы быстрого счета позволяют сделать это в короткое время [20]. Выполнение окончательных расчетов (обратное преобразование Лапласа) осуществляется

сразу после получения информации о прохождении первой четверти первого периода, полупериода или полного периода цунами через точку регистрации. Определялась заблаговременность прогноза. Момент прихода цунами в заданную точку оценивался как момент первого вступления волны (иногда под этим моментом понимается время прихода первого максимума волны). В дальнейшем по мере поступления уроченной информации прогноз может уточняться.



Р и с. 1. Схема расчетных областей: *a* – положение станций системы *DART* в северной части Тихого океана, данные которых использовались для сравнения с расчетными; *b* – область вблизи Курильских о-вов, использованная при моделировании процесса оперативного прогноза цунами (черными цифрами обозначено местоположение станций системы *DART*; красными звездочками – эпицентры землетрясений с указанием года; черным треугольником – местоположение автоматизированного поста «Водопадная» (юго-восточная оконечность Камчатки); синими цифрами – населенные пункты: 1 – Северо-Курильск (о. Парамушир), 2 – Курильск (о. Итуруп), 3 – Буревестник (о. Итуруп), 4 – Южно-Курильск (о. Кунашир), 5 – Ханаски (о. Хоккайдо) и 6 – Кусиро (о. Хоккайдо))

F i g. 1. Scheme of the computation areas: *a* – location of *DART* stations in the northern Pacific Ocean, the data from which are used for comparison with the calculated ones; *b* – the area near the Kuril Islands used in modeling the process of operational tsunami forecasting (black numbers indicate the location of *DART* stations; red stars – the earthquake epicenters with the year indicated; black triangle – the location of automated tide gauge “Vodopadnaya” (southeastern tip of Kamchatka); blue numbers – the settlements: 1 – Severo-Kurilsk (Paramushir Island), 2 – Kurilsk (Iturup Island), 3 – Burevestnik (Iturup Island), 4 – Yuzhno-Kurilsk (Kunashir Island), 5 – Hanasaki (Hokkaido Island) and 6 – Kushiro (Hokkaido Island))

Схема расчетных областей с указанием эпицентров землетрясений (очагов цунами), местоположений глубоководных станций измерения уровня океана системы *DART* и пунктов на побережьях Курильских о-вов и о. Хоккайдо, для которых выполнялся прогноз, представлена на рис. 1. На рис. 1, *a* показано положение станций *DART* в северной части Тихого океана. Данные этих станций сравнивались с расчетными для подтверждения адекватности результатов. Расчеты выполнены в сферических координатах. Шаг разностной сетки, охватывающей северную часть Тихого океана, равен 3800 м на широте 40°. При расчетах распространения волн в океане использовались батиметрические данные [21, 22]. Расчетная область района Курильских о-вов (рис. 1, *b*) применялась для моделирования процесса оперативного прогноза цунами экспресс-методом. Шаг разностной сетки этой области равен 900 м на широте 45°.

Использовались данные станций *DART*⁹ и береговых мареографов^{10, 11}. При расчетах из записей удалены приливные составляющие и колебания, вызванные прохождением сейсмических волн по дну (шумы сейсмического происхождения).

Вблизи Курильских о-вов находятся или находились ранее несколько станций системы *DART*, установленных в разное время: *DART 21401* (годы работы 2009–2014), *21402* (2012–2017), *21419* (с 2009 г.). Местоположение станций является оптимальным для каждого конкретного случая в зависимости от близости к очагу цунами. Для событий 2006 и 2007 гг. оптимальным является положение станции *DART 21419*, для события 2020 г. – положение станции *DART 21402*. Ввиду того, что в период соответствующего цунами станции не действовали, предварительно была выполнена реконструкция волновых форм цунами на этих станциях по данным более удаленных станций экспресс-методом. Исходные и реконструированные волновые формы для каждого описываемого события приведены ниже. По реконструированным данным выполнялся расчет волновых форм цунами на более удаленных станциях и вблизи населенных пунктов.

Заблаговременность прогнозирования цунами напрямую связана с оперативностью получения данных о цунами в океане: использование более коротких временных интервалов для анализа позволяет давать прогнозы раньше. Это особенно важно в случаях землетрясений, происходящих недалеко от береговой линии. Были проведены вычисления форм волн цунами на основе восстановленных данных станции *DART 21419* длительностью 16 мин после начала землетрясения (включая четверть первого волнового периода), 20 мин (включая половину периода), 32 мин (включая один полный период) и 108 мин. Результаты вычислений оказались практически идентичными, что подтверждено сравнением с фактическими данными о симуширском цунами 2006 г.

⁹ National Data Buoy Center : site. URL: https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml (дата обращения: 15.06.2024).

¹⁰ Российская служба предупреждения о цунами. URL: <http://rtws.ru/sea-level/> (дата обращения: 15.04.2024).

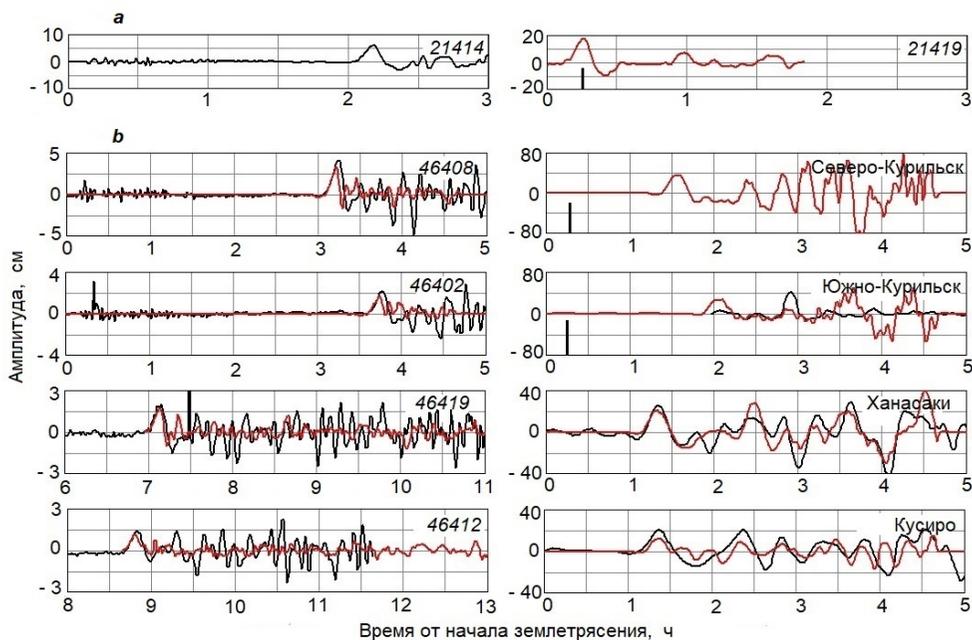
¹¹ Sea Level Station Monitoring Facility. URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc> (дата обращения: 15.06.2024).

В последующих численных экспериментах для расчетов волновых форм цунами в каждом событии использовались данные соответствующей станции *DART* начиная с момента начала землетрясения, охватывающие первую четверть периода.

Симуширское цунами 2006 г.

Землетрясение произошло 15.11.2006 на западном склоне Курило-Камчатского желоба⁶. Эпицентр находился в 90 км восточнее о. Симушир.

Возникшее цунами (эпицентр показан на рис. 1) было зарегистрировано станциями *DART*, расположенными вдоль Алеутских о-вов, Западного побережья США до п-ова Калифорния⁹. Ближайшей к Курильским о-вам являлась станция *DART 21414* (рис. 1), время пробега цунами до которой составляло более 2 ч (рис. 2, *a*). Время пробега цунами до точки, в которой в 2009 г. была установлена станция *DART 21419*, равно 10 мин. В этом событии положение станции было бы оптимальным (см. рис. 1). Реконструированная форма цунами в точке 21419 по данным станции *DART 21414* применялась для прогноза. Исходные данные и результат реконструкции представлены на рис. 2, *a*.



Р и с. 2. Волновые формы симуширского цунами 2006 г.: *a* – зарегистрированная станцией *DART 21414* (слева) и реконструированная на станции *DART 21419* (справа); *b* – зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по реконструированным данным станции *DART 21419*. Здесь и далее на каждом графике указан номер станции *DART* или название населенного пункта, вертикальная черная линия – граница данных, используемых при прогнозе, а также момент выработки прогноза для пунктов на Курильских о-вах

F i g. 2. Waveforms of the 2006 Simushir tsunami: *a* – recorded by *DART 21414* station (left) and reconstructed at *DART 21419* station (right); *b* – recorded (black line) and computed (red line) based on the reconstructed data from *DART 21419* station. Here and further on, each graph is indicated by the *DART* station number or the settlement name, vertical black line is the boundary of the data used in forecasting, as well as the moment of forecast generation for the points on the Kuril Islands

Для подтверждения адекватности реконструированной формы цунами в точке 21419 по этим данным выполнены расчеты в точках в океане, в которых находились более удаленные станции *DART*. Использовался ряд реконструированных данных станции *DART 21419* длительностью 16 мин от начала землетрясения (рис. 2, *a*, *справа*). Результаты для некоторых станций представлены на рис. 2, *b* (*слева*). Наблюдается хорошее совпадение головных волн реальных и расчетных волновых форм.

Цунами зарегистрировано мареографами в Южно-Курильске, Ханасаки и Кусиро. Построение передаточных функций для пунктов на Курильских о-вах и о. Хоккайдо начиналось через 7–11 мин после возникновения землетрясения (момент получения данных о координатах эпицентра) и завершалось до прохода первой четверти периода цунами через точку 21419 (16 мин после начала землетрясения). Прогноз для выбранных пунктов по реконструированным данным *DART 21419* длительностью 16 мин представлен на рис. 2, *b* (*справа*).

В Северо-Курильске регистрация цунами не производилась. Согласно расчету, ожидаемое цунами не представляло серьезной опасности. Какие-либо свидетельства о проявлении цунами в Северо-Курильске отсутствуют. В Южно-Курильске, хотя структуры расчетной и фактической волн не совпадают, значения максимальных амплитуд находятся в неплохом согласии, до 0,5 м, что свидетельствует о незначительном цунами, не представляющем опасности. Вполне хорошее совпадение реальных и расчетных волновых форм наблюдается для Ханасаки и Кусиро.

Более ранний, чем в Южно-Курильск, приход цунами в Ханасаки и Кусиро объясняется тем, что волна в эти пункты распространяется над глубоководной впадиной, в то время как в Южно-Курильск – над более мелководными шельфом и проливом.

При выработке прогноза по данным станции *DART 21419* в момент времени 16 мин от начала землетрясения заблаговременность прогноза для Северо-Курильска и Южно-Курильска составляет 66 и 94 мин соответственно.

Этого времени достаточно для принятия решения о необходимости объявления тревоги цунами. Момент объявления тревоги не регламентирован, но практика показывает, что для населенных пунктов Курильских островов тревога может объявляться за 30 мин до ожидаемого прихода цунами.

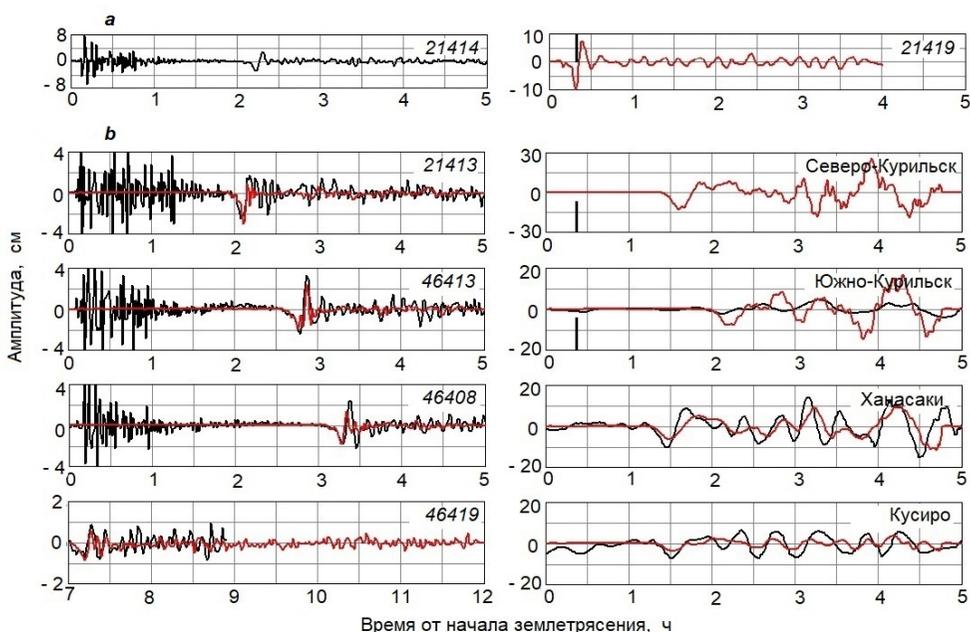
Симуширское цунами 2007 г.

Спустя два месяца произошло землетрясение на восточном склоне Курило-Камчатского желоба примерно в 170 км юго-восточнее о. Симушир 13.01.2007⁶.

В этом событии цунами зарегистрировано станциями вдоль Алеутских о-вов, Западного побережья США до п-ова Калифорния⁹. Кроме того, цунами зарегистрировано станцией *DART 21413*, находившейся к югу от очага. По данным станции *DART 21414* (рис. 3, *a*, *слева*) реконструирована форма цунами в точке 21419, где впоследствии установлена станция *DART 21419*, пробег волны до которой составляет 15 мин. Результаты реконструкции представлены на рис. 3, *a* (*справа*).

По реконструированной в точке 21419 форме цунами выполнены расчеты в точках в океане, в которых находились более удаленные станции *DART*. Использовался ряд длительностью 19 мин от начала землетрясения. Результаты для некоторых станций представлены на рис. 3, *b* (слева). Получено хорошее совпадение головных волн реальных и расчетных волновых форм как в восточном, так и в южном направлении от очага цунами. Во всех случаях вступление цунами начинается с понижения уровня океана.

Цунами зарегистрировано мареографами в Южно-Курильске, Ханасаки и Кусиро. Как и для предыдущего события, построение передаточных функций для пунктов на Курильских о-вах и о. Хоккайдо начиналось через 7–11 мин после возникновения землетрясения и завершалось до прохода первой четверти волны цунами через точку 21419 (19 мин после начала землетрясения).



Р и с. 3. Волновые формы симуширского цунами 2007 г.: *a* – зарегистрированная станцией *DART* 21414 (слева) и реконструированная на станции *DART* 21419 (справа); *b* – зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по реконструированным данным станции *DART* 21419

Fig. 3. Waveforms of the 2007 Simushir tsunami: *a* – recorded by the *DART* 21414 station (left) and reconstructed at *DART* 21419 station (right); *b* – recorded (black line) and computed (red line) based on the reconstructed data from *DART* 21419 station

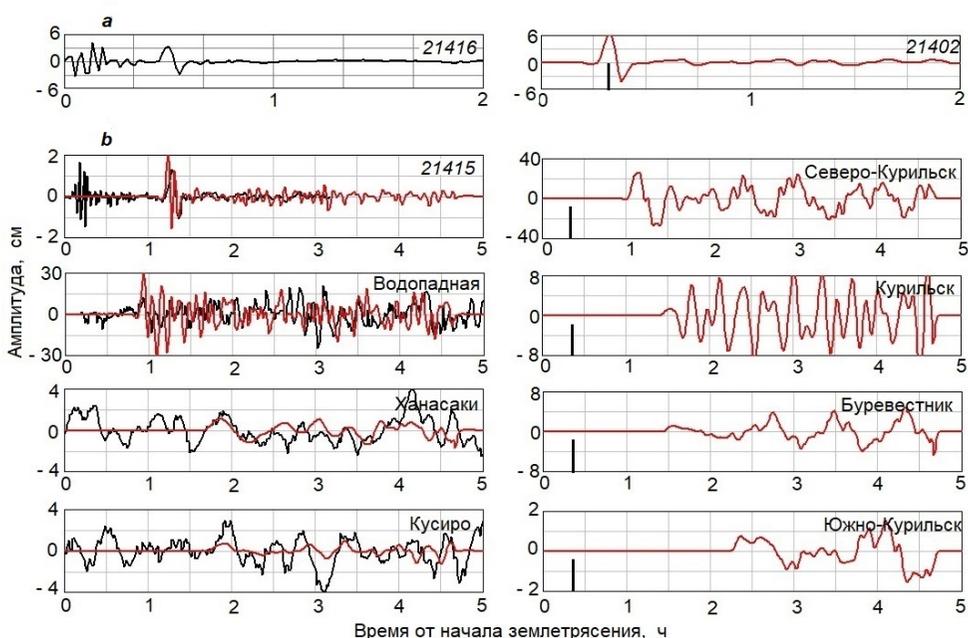
В Северо-Курильске, как и во время предыдущего события, регистрация цунами не производилась. Согласно расчету, ожидаемое цунами не представляло серьезной опасности. Свидетельства о проявлении цунами в районе Северо-Курильска отсутствуют. В Южно-Курильске, хотя структуры расчетной и фактической волн не совпадают, значения максимальных амплитуд находятся в неплохом согласии, до 0,1 м, что свидетельствует о незначительном

цунами, не представляющем опасности. Достаточно хорошее совпадение реальных и расчетных волновых форм наблюдается для Ханасаки и Кусиро.

При выработке прогноза в момент времени 19 мин от начала землетрясения заблаговременность прогноза для Северо-Курильска и Южно-Курильска составляет 69 и 101 мин соответственно.

Онекотанское цунами 2020 г.

Землетрясение восточнее о. Онекотан, в 220 км от о. Парамушир (северные Курильские о-ва) произошло 25.03.2020⁶. Возникшее слабое цунами зарегистрировано станциями *DART 21415*, *21416* и *21419*⁹, а также автоматизированным постом измерения уровня моря (АП) «Водопадная»¹⁰. Ближайшей к очагу являлась станция *DART 21416* (рис. 1), пробег цунами до которой составил 25 мин. Наиболее близким к очагу цунами из указанных на рис. 1 является положение ранее действовавшей российской станции *DART 21402*. Пробег цунами до этой точки составляет около 15 мин. Прогноз цунами по данным этой станции мог быть получен раньше, чем по данным станции *DART 21416* [15].



Р и с. 4. Волновые формы онекотанского цунами 2020 г.: *a* – зарегистрированная станцией *DART 21416* (слева) и реконструированная на станции *DART 21402* (справа); *b* – зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по реконструированным данным станции *DART 21402*

Fig. 4. Waveforms of the 2020 Onkotan tsunami: *a* – recorded by *DART 21416* station (left) and reconstructed at *DART 21402* station (right); *b* – recorded (black line) and computed (red line) based on the reconstructed data from *DART 21402* station

Реконструкция волновой формы цунами в точке *21402* выполнена экспресс-методом по данным станции *DART 21416* (рис. 4, *a*). Восстановленная

форма цунами на станции *DART 21402* приведена на рис. 4, *a* (справа). Расчет волновых форм цунами (по готовой передаточной функции) в заданных пунктах мог быть произведен сразу после получения данных станции *DART 21402* о прохождении первой четверти периода цунами (на 20-й минуте после начала землетрясения). Расчет цунами по реконструированному ряду данных станции *DART 21402* (рис. 4, *a*) длительностью 20 мин выполнялся для станции *DART 21415* и АП «Водопадная» (юго-восток Камчатки) (см. рис. 1, *a*) и населенных пунктов (рис. 1, *b*). Результаты расчета приведены на рис. 4, *b*. Получено неплохое соответствие расчетных и зарегистрированных волн на станции *DART 21415*. Колебания, предшествующие цунами на записях этой станции, являются эффектом волн Рэля на океанском дне. Неплохое соответствие амплитуд получено между расчетной формой волны вблизи АП «Водопадная» и записью, полученной этим постом [15].

По результатам расчетов, ожидаемое время прихода первой волны в Северо-Курильск равно 69 мин после начала землетрясения, расчетная амплитуда равна 15 см. Амплитуда 15 см получена в ближайшем к берегу узле разностной сетки, где глубина моря равна 17 м. В соответствии с известным законом Грина, согласно которому амплитуда волны a_1 на глубине D_1 связана с амплитудой a_0 на глубине D_0 соотношением $a_1/a_0 = (D_0/D_1)^{1/4}$, пересчет амплитуды 15 см в точке, в которой глубина равна 1 м, дает величину амплитуды около 30 см. Визуальная оценка высоты волны (от гребня до впадины) 50 см сделана в 1,2 км южнее порта Северо-Курильск вблизи уреза воды при глубине около 1 м [15]. Отсутствие инструментальных измерений уровня моря в Северо-Курильске, как и на всех Курильских о-вах, не позволяет подтвердить ни визуально оцененную высоту цунами 50 см, ни расчетную амплитуду 30 см.

Согласно расчетам, в других населенных пунктах Курильских о-вов амплитуда ожидаемого цунами должна быть незначительной.

Заблаговременность прогноза по данным станции *DART 21402*, составляющая для Северо-Курильска 43 мин, для Курильска 65 мин, для Буревестника 65 мин и для Южно-Курильска 116 мин, вполне достаточна для принятия решения об объявлении тревоги в этих пунктах [15].

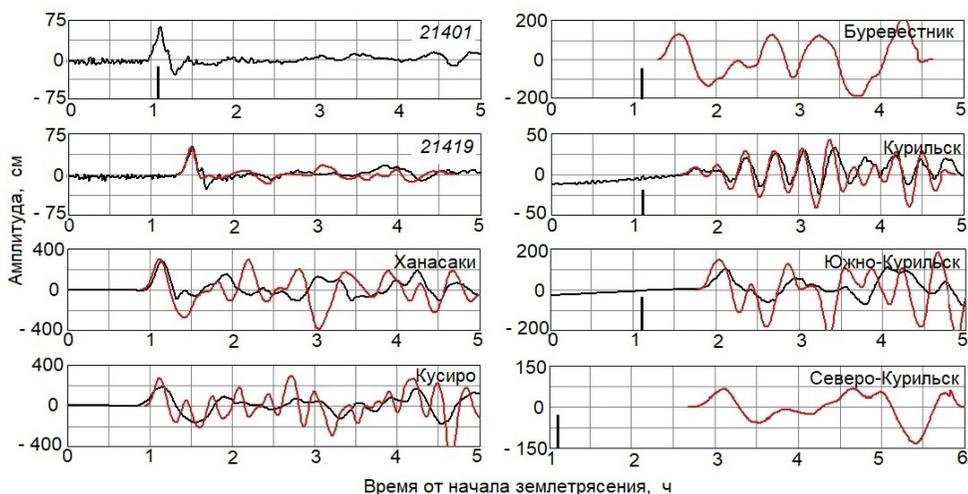
Предупреждение, выпущенное ЯМА, о возможных разрушительных волнах на Курильских о-вах с амплитудами 1–3 м не подтвердилось. Событие 25.03.2020 показывает, что способ прогноза цунами, основанный на магнитудном критерии, предварительных расчетах, на который опирается ЯМА, не всегда может давать верный прогноз.

Цунами Тохоку 2011 г.

Сильнейшее землетрясение 11 марта 2011 г. произошло у северо-восточного побережья о-ва Хонсю⁶. Возникшее цунами было необычным: его амплитуда 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 [18]. Качественное объяснение этого эффекта дано в [23]. Предположительно, он аналогичен эффекту подводного оползня.

В районе Курильских о-вов цунами зарегистрировано станциями *DART 21419* и российской *21401*⁹, береговыми мареографами в Курильске и Южно-Курильске, а также в Ханасаки и Кусиро на о. Хоккайдо¹¹.

Расчеты выполнялись по данным станции *DART 21401* длительностью 68 мин, включающим первую четверть периода волны (рис. 5).



Р и с. 5. Волновые формы цунами Тохоку 2011 г.: зарегистрированные (черная линия) и расчетные (красная линия) по данным станции *DART 21401*

F i g. 5. Waveforms of the 2011 Tohoku tsunami: recorded (black line) and computed (red line) based on the data from *DART 21401* station

Получено хорошее совпадение расчетной и фактической форм волны на ближайшей к островам станции *DART 21419* (рис. 5). Качество прогноза экспресс-методом на этой станции и качество расчетов волновых форм цунами в океане, выполненных способом *NOAA*, сопоставимо¹². Результаты расчета формы волны цунами вблизи населенных пунктов Курильских о-вов и о. Хоккайдо представлены на рис. 5.

Хорошо соответствуют друг другу расчетные и зарегистрированные волновые формы цунами в Ханасаки и Кусиро. В Южно-Курильске также наблюдается согласие между модельными и реальными формами волн. Совпадают время прихода цунами в точку прогноза, структура волны. Согласно прогнозу, амплитуда максимальной волны не должна превышать 1,5 м. В Курильске (охотская сторона о. Итуруп) хорошо совпадают структура, амплитуды и характерные периоды волн. В Северо-Курильске расчетный размах колебаний уровня не должен превышать 1,5 м, что согласуется с информацией судов, стоявших вблизи Северо-Курильска, где уровень воды под килем колебался от 4,2 до 2,6 м с разницей 1,6 м [18]. Расчетные амплитуды волн (до 2 м) соответствуют визуальным наблюдениям в портпункте Буревестник (о. Итуруп) [12].

¹² NOAA Center for Tsunami Research. Tohoku (East Coast of Honshu) Tsunami, March 11, 2011. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/> (дата обращения: 19.06.2024).

Заблаговременность прогноза составляет для Северо-Курильска 92 мин, для Южно-Курильска 37 мин, для Курильска 30 мин. Она вполне достаточна для принятия решения об объявлении тревоги цунами. Тревоги цунами могли бы объявляться последовательно в Курильске, Южно-Курильске и в Северо-Курильске. Ввиду малой амплитуды ожидаемой волны в Курильске, тревога могла бы не объявляться или быть своевременно отменена, если объявлялась по магнитудному критерию. Для портпункта Буревестник время прихода волнового фронта практически совпадает с моментом выработки прогноза. Для этого пункта, а также пунктов на о. Шикотан и островах Малой Курильской гряды тревога цунами должна объявляться, в соответствии с действующим регламентом, по магнитудному критерию. При расчетах, выполненных в работе [18], использовались данные станции *DART 21401* длительностью 20 мин (первый период волны), приход цунами оценивался как вступление первого гребня волны. Этим объясняется разница в оценке заблаговременности.

Результаты эксперимента подтверждают, что, несмотря на аномальный механизм возбуждения цунами Тохоку 11.03.2011, расчет, выполненный по данным станции измерения уровня *DART 21401* с использованием информации только о координатах эпицентра землетрясения без привлечения дополнительной сейсмологической информации, дает адекватный результат.

Обсуждение

В работе показано, что прогноз цунами на Курильских о-вах, основанный на магнитудно-географическом способе, используемом российскими СПЦ, является неэффективным. Тревоги цунами, объявляемые одновременно на всех Курильских о-вах, нередко оказываются фактически ложными в населенных пунктах ввиду малой амплитуды волны. Однако причиной этого являются не действия Центра цунами, а утвержденный регламент, опирающийся на магнитудный критерий. Консультативный центр по цунами в северо-западной части Тихого океана (ЯМА), опирающийся на предварительно рассчитанные мареограммы от ряда источников в цунамигенных зонах с наиболее вероятными механизмами землетрясений, также не всегда может давать верный прогноз.

В настоящее время эффективными являются гидрофизические способы, использующие информацию о сформировавшемся цунами в открытом океане. Способ *NOAA (SIFT)* с использованием данных станций *DART* успешно применяется для прогноза цунами в США. Но большую сложность прогноза представляют случаи возникновения цунами вблизи побережий. Часто информация о цунами со станций *DART* поступает позднее, чем цунами достигает ближайших побережий.

Как отмечено выше, способ *NOAA* не может быть применен для прогноза цунами на Курильских о-вах. Для таких ситуаций может быть применен экспресс-метод краткосрочного прогноза цунами. Для выполнения прогноза экспресс-методом требуется сейсмологическая информация только о координатах эпицентра землетрясения и информация о цунами от станций *DART*, получаемая в режиме реального времени.

Момент выработки прогноза определяется временем (от начала землетрясения) прохождения цунами через точку регистрации. Прогноз для кон-

кретного пункта будет успешным, если его заблаговременность не меньше времени, необходимого для эвакуации населения, своего для каждого пункта. Для пунктов на Курильских о-вах заблаговременность прогноза может оцениваться не менее чем в 30 мин. Соответственно, тревога цунами может объявляться за 30 мин до ожидаемого прихода цунами в соответствующий пункт. Оценка времени добега цунами до конкретного населенного пункта выполняется в оперативном режиме. Если заблаговременность прогноза ниже 30 мин, тревога цунами должна объявляться по магнитудному критерию. Тревога может быть своевременно отменена при поступлении информации о неопасности цунами.

Целью работы являлось исследование возможности оперативного прогноза цунами на Курильских о-вах по данным о цунами в открытом океане. Рассмотрены цунами 2006–2020 гг., произошедшие вблизи Курильских о-вов. Показано, что при оперативном получении информации о координатах эпицентра землетрясения и о цунами в океане оперативный прогноз цунами в населенных пунктах возможен с необходимой заблаговременностью. Несмотря на приближенный характер, экспресс-метод позволяет адекватно оценивать степень опасности ожидаемого цунами для любого участка побережья. При этом достаточно информации о прохождении четверти первого периода цунами через станцию регистрации, находящуюся в оптимальном для каждого события месте. В случаях землетрясений в районе центральных Курильских о-вов оптимальным является положение станции *DART 21419*. Заблаговременность прогноза для населенных пунктов северных и южных островов составляет 66–101 мин. При землетрясениях в районе северных Курильских о-вов оптимальным является положение ранее действовавшей российской станции *DART 21402*. Заблаговременность прогноза в таких случаях составляет 43–116 мин. При землетрясениях у восточного побережья Японии ранее действовавшая российская станция *DART 21401* позволяла бы выполнять прогноз в оперативном режиме. Заблаговременность прогноза цунами в этих событиях составляет 30–92 мин для ближних и более удаленных населенных пунктов.

Заключение

Цунамиопасными в Сахалинской области являются многие районы, в особенности Курильские о-ва. Проблема оперативного прогноза цунами в настоящее время не является окончательно решенной. Объявление тревоги цунами на Тихоокеанском побережье России основано на магнитудном методе, созданном в середине прошлого века. Имеет место большое количество (свыше 75 %) ложных тревог. Эти тревоги, объявляемые часто с излишней заблаговременностью, сопровождаются ущербом, вызванным остановкой производства, другой деятельности в прибрежной зоне на длительное время.

В настоящее время на Дальнем Востоке России гидрофизическая подсистема СПЦ, которая осуществляла бы наблюдения за волновым режимом в океане и оценивала опасность цунами, отсутствует. СПЦ нуждается в создании такой подсистемы с целью повышения оперативности, надежности и достоверности предупреждений о цунами.

Для побережья Российского Дальнего Востока может быть применен экспресс-метод оперативного прогноза цунами. Реализация экспресс-метода оперативного прогноза цунами в виде единого комплекса при условии получения информации о цунами в океане позволит в перспективе повысить качество прогнозирования и тем самым уменьшить количество ложных тревог цунами на Курильских о-вах. Действовавшие ранее российские станции *DART 21401* (в 2010–2014 гг.) и *DART 21402* (в 2012–2017 гг.) могли бы обеспечивать с достаточной заблаговременностью достоверный прогноз цунами на Курильских о-вах в случаях землетрясений в районах северных, центральных Курильских о-вов, восточного побережья Японии.

Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами. Возникает необходимость создания собственных российских глубоководных станций измерения уровня океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bernard E., Titov V.* Evolution of tsunami warning systems and products // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373. 20140371. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0371>
2. *Tsunamis: bridging science, engineering and society / U. Kanoglu [et al.]* // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373. 20140369. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0369>
3. *Королёв Ю. П.* Оценка эффективности экспресс-метода оперативного прогноза на примерах перуанского (2007 года), чилийских (2010, 2014 и 2015 годов) цунами // *Морской гидрофизический журнал*. 2023. Т. 39, № 3. С. 342–358. EDN JQDHES. <https://doi.org/10.29039/0233-7584-2023-3-342-358>
4. *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. Vol. 11, iss. 11. P. 3081–3091. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011>
5. *Gusiakov V. K.* Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. Vol. 168, iss. 11. P. 2033–2041. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2>
6. *Гусяков В. К.* Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57, № 9. С. 1601–1615. <https://doi.org/10.15372/GiG20160901>
7. *Allen S. C. R., Greenslade D. J. M.* A Pilot Tsunami Inundation Forecast System for Australia // *Pure and Applied Geophysics*. 2016. Vol. 173. P. 3955–3971. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1392-y>
8. Опыт модернизации российской системы предупреждения о цунами / А. В. Фролов [и др.] // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 6. С. 5–21. EDN OYSKXF.
9. Extraction of tsunami source coefficients via inversion of DART® buoy data / D. B. Percival [et al.] // *Natural Hazards*. 2011. Vol. 58, iss. 1. P. 567–590. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9688-1>
10. *Titov V. V.* Tsunami forecasting // *Tsunamis*. Cambridge, MA ; London, England : Harvard University Press, 2009. P. 367–396. (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas ; vol. 15).
11. *Voronina T. A., Voronin V. V.* Data selection method for restoring a tsunami source form // *Геосистемы переходных зон*. 2023. Т. 7, № 3. С. 292–303. <https://doi.org/10.30730/trz.2023.7.3.292-303>

12. *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.
13. Проявления цунами 15 ноября 2006 г. на центральных Курильских островах и результаты моделирования высот заплесков / Б. В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419, № 1. С. 118–122.
14. Field Survey and Geological Effects of the 15 November 2006 Kuril Tsunami in the Middle Kuril Islands / В. Т. Macinnes [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2009. Vol. 166. P. 9–36. <https://doi.org/10.1007/s00024-008-0428-3>
15. *Королев Ю. П., Королев П. Ю.* Моделирование процесса оперативного прогнозирования Онкотанского цунами 25.03.2020 // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4, № 2. С. 259–265. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.2.259-265>
16. Новые данные о проявлениях цунами на тихоокеанском побережье России по инструментальным измерениям 2009–2010 гг. / Г. В. Шевченко [и др.] // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438, № 6. С. 823–828. EDN NXQPHF.
17. The 2009 Samoan and 2010 Chilean Tsunamis Recorded on the Pacific Coast of Russia / G. Shevchenko [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2013. Vol. 170. P. 1511–1527. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0562-9>
18. *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.
19. *Королев Ю. П., Храмушин В. Н.* Об оперативном прогнозе цунами 1 апреля 2014 г. вблизи побережья Курильских островов // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 86–93. EDN VSZHUD.
20. Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchatka and Kuril Islands // M. Lavrentiev [et al.] // Science of Tsunami Hazards. 2019. Vol. 38, no. 1. P. 1–13. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHVol38N1Y2019.pdf> (дата обращения: 15.04.2024).
21. *Smith W. H. F., Sandwell D. T.* Bathymetric prediction from dense satellite altimetry and sparse shipboard bathymetry // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1994. Vol. 99, iss. B11. P. 21803–21824. <https://doi.org/10.1029/94JB00988>
22. *Smith W. H. F., Sandwell D. T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. Vol. 277, iss. 5334. P. 1956–1962. <https://doi.org/10.1126/science.277.5334.1956>
23. *Pararas-Carayannis G.* Tsunamigenic Source Mechanism and Efficiency of the March 11, 2011 Sanriku Earthquake in Japan // Science of Tsunami Hazards. 2011. Vol. 30, no. 2. P. 126–152. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHVol30N2Y2011.pdf> (дата обращения: 15.06.2024).

Об авторе:

Королёв Юрий Павлович, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (693022, Россия, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 16), кандидат физико-математических наук, доцент, член Русского географического общества, **SPIN-код: 8002-5020, ORCID ID: 0000-0002-7068-7341, Yu_P_K@mail.ru**