

Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения

© 2020 Ю. П. Королев*, П. Ю. Королев

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

*E-mail: Yu_P_K@mail.ru

Резюме. Достоверный оперативный прогноз цунами на Курильских островах при возникновении землетрясений в районе Курило-Камчатской впадины представляет наибольшую сложность. Прогноз традиционным магнитудным методом зачастую приводит к ложным тревогам цунами. На примерах событий 2006, 2007 и 2020 гг. на Курильских островах, а также события 2018 г. на Аляске показано, что по данным ближайших к очагу цунами станций измерения уровня океана, времена пробега цунами до которых составляют 10–20 мин, возможен заблаговременный адекватный прогноз цунами вблизи побережий, несмотря на то что записи таких станций содержат шумы сейсмического происхождения. Расчеты форм цунами вблизи побережья по данным, содержащим сейсмический шум, показали, что в результате формах волн присутствуют высокочастотные колебания. Однако эти колебания не препятствуют оценке реальной формы волны и степени опасности ожидаемого цунами. В отличие от методов прогноза, основанных на магнитудном критерии, примененный способ оперативного прогноза цунами позволяет рассчитать форму волны: амплитуды первой, максимальной волн, времена их прихода в заданную точку и предполагаемую длительность цунами. Предложенный способ может стать инструментом, который позволит повысить качество оперативного предупреждения о цунами, существенно уменьшив количество ложных тревог.

Ключевые слова: цунами, магнитуда землетрясения, тревога цунами, Онекотан, Курильские острова, Северо-Курильск, способ оперативного прогноза цунами, заблаговременность прогноза, DART, шумы сейсмического происхождения

Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources

Yury P. Korolev*, Pavel Yu. Korolev

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

*E-mail: Yu_P_K@mail.ru

Abstract. Reliable short-term tsunami forecast on the Kuril Islands when earthquakes occur in the Kuril-Kamchatka Trench is the most difficult. Forecasting by the traditional magnitude method often leads to false tsunami alarms. Based on the examples of the events of 2006, 2007 and 2020 on the Kuril Islands, as well as the event of 2018 in Alaska, it was shown that according to the data of the ocean level measuring stations closest to the tsunami source (tsunami travel time is 10–20 minutes) it is possible to adequately predict the tsunami near the coast. Calculations of tsunami waveforms near the coast from data containing seismic noise have shown that the resulting waveforms contain high-frequency oscillations. However, these fluctuations do not interfere with the assessment of the real waveform and the danger of the expected tsunami. In contrast to forecast methods based on the magnitude criterion, the applied method of short-term tsunami forecast makes it possible to calculate the waveform: the amplitudes of the first, maximum waves, their arrival time at a given point and the estimated duration of the tsunami. The proposed method can become a tool that will improve the quality of operational tsunami warning, significantly reducing the number of false tsunami alarms.

Keywords: tsunami, earthquake magnitude, tsunami alarm, Onekotan, Kuril Islands, Severo-Kurilsk, method of short-term tsunami forecast, forecast lead time, DART, seismic noise

Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 4, с. 447–473. (На рус. и англ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 447–473 (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>

Благодарности и финансирование

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания и предложения, которые были учтены при доработке статьи.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМГиГ ДВО РАН № АААА-А18-118012290123-8 «Наводнения на морских берегах: мониторинг, моделирование, прогноз».

Введение

Тревога цунами 25.03.2020 по Северо-Курильскому району (Сахалинская область) была объявлена в 14:00 (здесь и далее указывается сахалинское время, разница составляет +11 ч с UTC и +8 ч с московским временем). Информационно-обрабатывающим центром «Южно-Сахалинск» Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН на основании магнитудного критерия. Землетрясение магнитудой 7.3 с эпицентром в 220 км восточнее о. Онекотан произошло в 13:49. Впоследствии магнитуда уточнена до 7.5 (Search Tsunami Events of the National Centers for Environmental Information – <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>)¹.

Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (PTWC, Гонолулу) в 13:57 выпустил бюллетень с предупреждением об опасных волнах цунами для побережья в пределах 1000 км от эпицентра землетрясения. Японское метеорологическое агентство (JMA) в 14:16 также предупредило о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1–3 м, о чем сообщало Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (<http://sakhugms>.

ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami

). Положение эпицентра землетрясения указано на рис. 1. Это цунами по наименованию ближайшего острова можно называть Онекотанским цунами 2020 г. по аналогии с наименованием Симуширское цунами 2006 г.

В силу небольшой высоты волны, не представляющей опасности, тревога 25.03.2020 оказалась фактически ложной.

Приход цунами в Северо-Курильск ожидался в 15:04. Эвакуация населения в безопасную зону завершена к 14:30. Эвакуировано

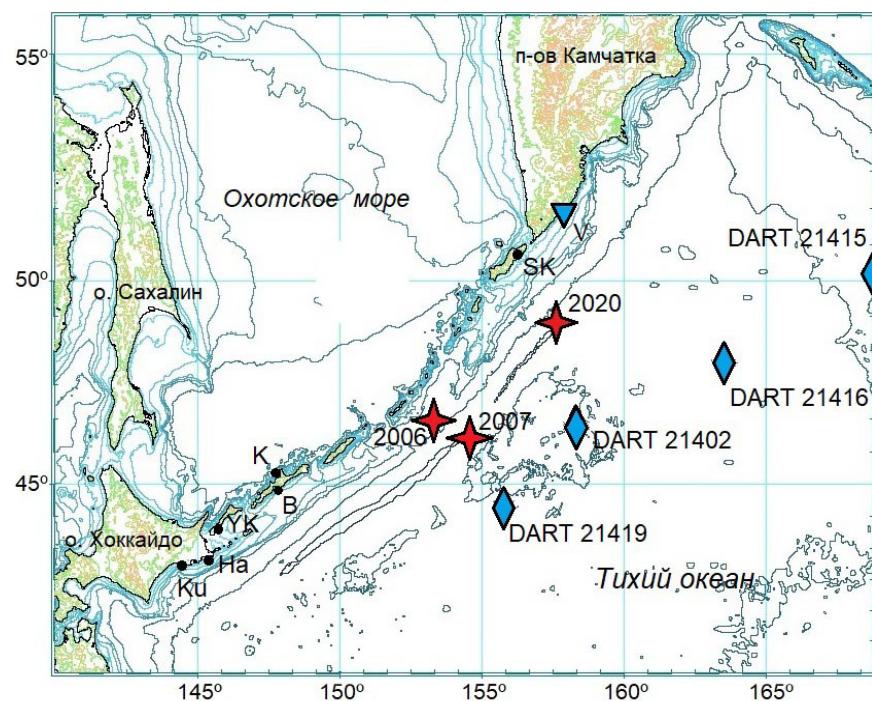


Рис. 1. Схема расчетной области. Звездочки – эпицентры землетрясений с указанием года, ромбы – положение станций системы DART, треугольник – пост измерений уровня моря «Водопадная» (V), SK – Северо-Курильск, K – Курильск, B – Буревестник, YK – Южно-Курильск, Ku – Кусиро, Na – Ханасаки.

¹ Полные сведения об источниках данных см. в конце статьи.

около 400 человек. Согласно визуальным наблюдениям с сопки Сигнальная в 1.2 км южнее порта Северо-Курильск, первая волна пришла через 1 ч после начала землетрясения. На фоне штормового волнения высота цунами оценивалась в 50 см. На рис. 2 представлен снимок прибрежной акватории в момент прихода цунами в район Северо-Курильска. Тревожный режим сохранялся до 17:57 (почти 4 ч) (<http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami>).

Приведенные описания действий российской службы предупреждения о цунами, а также международных служб цунами, в частности Японского метеорологического агентства, позволяют оценить недостатки действующих регламентов прогноза цунами.

Аналогичные ситуации имели место в 2006 и 2007 гг. (Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.). Объявлялись тревоги цунами по магнитудному критерию на побережьях всех Курильских островов, произведена эвакуация населения в безопасные места. Однако цунами для населенных пунктов не представляли опасности. Тревоги оказались фактически ложными.

При сильных цунами остановка производства, эвакуация персонала, населения из опас-

ных зон являются оправданными. При слабых же, когда амплитуда волн в населенных пунктах не превышает 0.5 м, как в событиях 2006, 2007 и 2020 гг., эти мероприятия сопровождаются неоправданным ущербом, связанным с остановкой производства, излишним стрессом для населения. К тому же длительность тревожного режима зачастую излишне велика. Частые ложные тревоги порождают негативное к ним отношение, недоверие. Игнорирование сигналов тревоги во время сильнейшего цунами Тохоку 2011 г. в Японии отчасти послужило причиной большого количества жертв.

Согласно современным представлениям, службы предупреждения о цунами должны объявлять не только обоснованные общие тревоги, но и дифференцированные по степени опасности для конкретных участков побережий. Идеально тревога цунами должна объявляться с разумной заблаговременностью только в тех пунктах, в которых цунами представляет реальную опасность, и сопровождаться информацией о времени прихода первой волны, максимальной волны, их амплитудах, а также об ожидаемом времени окончания цунами (отбой тревоги цунами) [Korolev, 2011]. Именно эти характеристики цунами перечислены в определении прогноза цунами, сформированном Межправительственной океанографической комиссией (МОК) ЮНЕСКО в 2013 г.² На основании магнитудно-географического критерия такой детальный прогноз невозможен.

Гидрофизические способы прогнозирования цунами не опираются на магнитуду землетрясения. Достоверной для оценки степени опасности цунами является информация о сформировавшемся цунами, получаемая в океане станциями системы DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis – оценка и передача данных о цунами в океане) (<http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart>).

Очевидно, что в случае локальных цунами (при землетрясениях в районе Курило-Камчатской впадины) оперативность, заблаговременность



Рис. 2. Подход серии волн цунами 25.03.2020 к о. Парамушир (около 1.2 км южнее порта Северо-Курильск). Фото Л. Котенко (<http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami>)

² Intergovernmental Oceanographic Commission. 3rd ed. Tsunami Glossary. 2016. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. (English, French, Spanish, Arabic, Chinese) (IOC/2008/TS/85 rev.2). URL: http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442 (accessed 6.11.2020)

прогноза зависит от близости станций к очагу цунами. Данные таких станций могут содержать наложенные на полезный сигнал шумы сейсмического происхождения, обусловленные прохождением по дну океана поверхностных волн (рэлеевские волны). Поскольку дискретность записей данных станций равна 1 мин, шумовая составляющая может иметь периоды 4 мин и более, что сопоставимо с характерными периодами цунами (около 15 мин). Применение критерия разделения полезного сигнала и шума, описанного в [Нурисламова, Носов, 2016], в такой ситуации, по-видимому, затруднительно или невозможно. Это обстоятельство может стать препятствием для получения адекватного прогноза. В условиях оперативного режима требуется за короткое время оценить степень опасности цунами, не занимаясь проблемой разделения сигналов.

Цель работы и постановка численных экспериментов

Целью работы явилось исследование возможности оперативного прогноза локальных цунами по данным ближайших к очагам станций измерения уровня океана, содержащим неустранимые шумы сейсмического происхождения.

Рассмотрены все известные события в северной и северо-западной частях Тихого океана, во время которых либо производилась регистрация, либо возможно восстановление (реконструкция) формы цунами вблизи очага.

Моделировался процесс оперативного прогнозирования Онекотанского (25.03.2020), Симуширских (15.11.2006 и 13.01.2007) цунами, возникших в районах северных и центральных Курильских островов, и Аляскинского цунами (25.03.2018) с эпицентром вблизи о. Кодьяк (Кадьяк). Моделирование осуществлялось по реконструированным данным виртуальных станций измерения уровня океана, в точках нахождения ранее существовавшей станции DART 21402, действующей станции DART 21419, ближайших к очагам цунами 2020, 2006 и 2007 гг., а также по реальным данным станции DART 46409 в 2018 г. Как реальные, так и реконструированные данные станций DART содержали шумы сейсмического происхождения.

Расчеты (реконструкция записей и расчет цунами) выполнялись способом оперативного прогноза цунами, описанным в работе

[Korolev, 2011]. Способ (экспресс-метод) заключается в построении передаточной функции для каждого пункта, позволяющей по данным станции DART рассчитывать форму ожидаемого цунами вблизи этого пункта. Построение передаточной функции производится сразу после получения информации о координатах эпицентра землетрясения, вызвавшего цунами. Основой для ее построения являются результаты расчета волновых форм от простого аксиально-симметричного источника с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения, в точках регистрации и прогноза. Данных о магнитуде землетрясения не требуется. При использовании технологий быстрого расчета цунами построение передаточной функции может быть завершено до момента прохода первого периода цунами через точку регистрации. Технология быстрого расчета распространения цунами представлена, например, в [Lavrentiev et al., 2019].

В численных экспериментах оценивались заблаговременность прогноза цунами (время между расчетным временем прихода цунами – первого гребня волны в заданную точку и временем выполнения прогноза) и качество прогноза. За критерий качества прогноза принята возможность оценки степени опасности ожидаемого цунами в заданном пункте, достаточно точной для принятия решения об объявлении тревоги.

В дальнейшем в численных экспериментах расчет формы цунами вблизи побережья называется ретроспективным прогнозом, или прогнозом.

Цунами 25.03.2020 зарегистрировано глубоководными станциями измерения уровня океана DART 21415, 21416 и 21419 (рис. 1) (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>). Небольшое цунами зарегистрировал пост измерения уровня моря «Водопадная» (Камчатка, Россия) (<http://rtws.ru/sea-level/>). По данным станций возможна адекватная оценка опасности цунами на побережье островов. Однако удаленность станций от побережья не может обеспечить необходимую заблаговременность прогноза и объявления тревоги в реальных условиях.

Положение ранее функционировавшей российской станции DART 21402 является оптимальным с точки зрения заблаговременности прогноза цунами для побережья северных

Курильских островов. Оперативный прогноз цунами по ее данным мог быть получен раньше, чем по данным станции DART 21416. В численном эксперименте вводится виртуальная станция в месте нахождения ранее функционировавшей российской станции DART 21402.

Для моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. выполнена реконструкция формы цунами в точке нахождения станции DART 21402 по фактической записи «чистого» цунами станции DART 21416. «Чистому» цунами соответствует ряд данных от 21 до 36 мин от начала землетрясения (рис. 3 а). Реконструированная форма «чистого» цунами на станции DART 21402 приведена на рис. 3 б.

Для анализа влияния сейсмического шума на возможность и качество прогноза цунами выполнена реконструкция возможного сейсмического шума в записях станции DART 21402 также по данным о шуме станции DART 21416. К рассчитанным формам цунами добавлены шумовые составляющие записей станции DART 21416 длительностью 21 мин от момента начала землетрясения. При расчете этих составляющих учтено изменение амплитуды волны Рэлея за счет цилиндрической расходности с расстоянием от эпицентра до точки регистрации. Реконструирован-

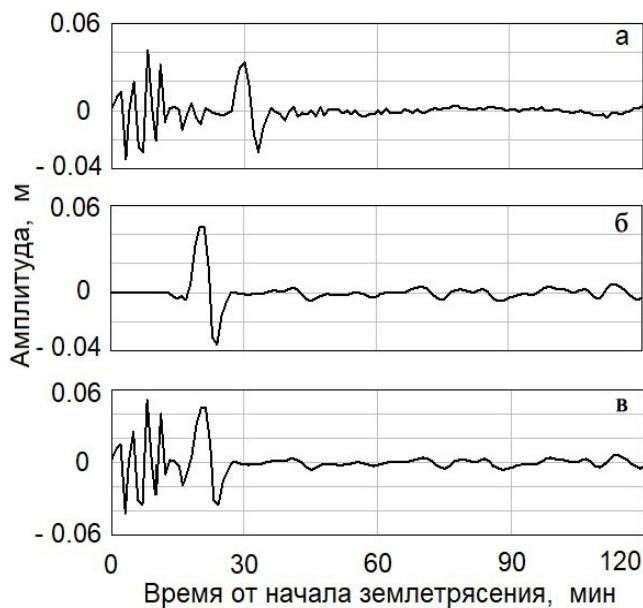


Рис. 3. Исходные данные численного эксперимента: а – запись станции DART 21416, б – реконструированная форма «чистого» цунами на виртуальной станции DART 21402, в – реконструированная запись с шумом на станции DART 21402.

ная запись виртуальной станции DART 21402, включающая шумовую компоненту, изображена на рис. 3 в.

Прогноз цунами 2020 г. на Курильских островах выполнен по реконструированной записи станции DART 21402 длительностью 28 мин.

Цунами 2006 и 2007 гг. зарегистрированы несколькими станциями системы DART, ближайшей к очагу является станция DART 21414. Станция находится в районе западных Алеутских островов на долготе 178° в.д., ее положение выходит за рамки схемы, изображенной на рис. 1. Время пробега цунами до этой станции превышает 2 ч, что заведомо не обеспечивает заблаговременность прогноза цунами на Курильских островах. Оптимальным для южных и северных Курильских островов с точки зрения заблаговременности прогноза цунами, возникающих в районе центральных Курильских островов, является положение станции DART 21419, установленной лишь в 2009 г. Для решения задачи моделирования процесса оперативного прогнозирования Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. выполнена реконструкция формы цунами в точке нахождения в настоящее время станции DART 21419 по фактическим данным станции DART 21414. К данным о цунами в этой точке добавлены реконструированные шумы сейсмического происхождения, зарегистрированные станцией DART 21414. Подробно моделирование процесса оперативного прогноза Симуширских цунами 2006 и 2007 гг. описано в работе [Королев, 2019].

На рис. 4 а, б представлены исходные данные, полученные станцией DART 21414 в 2006 и 2007 гг. (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>), реконструированные формы цунами («чистые» цунами) виртуальной станции DART 21419 (рис. 4 в, г), а также реконструированные записи этой станции с добавленным шумом (рис. 4 д, е).

Численный эксперимент по моделированию процесса оперативного прогноза цунами заключался в расчете формы ожидаемого цунами в населенных пунктах Курильских островов и о. Хоккайдо по реконструированным данным о цунами виртуальной станции DART 21419.

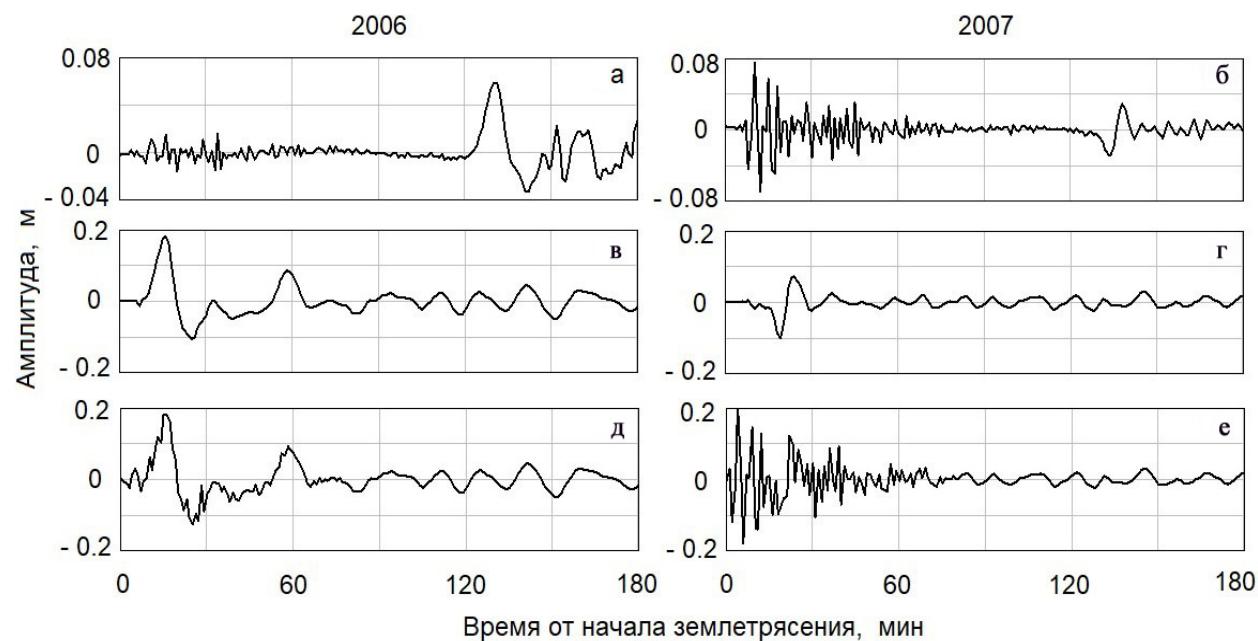


Рис. 4. Исходные данные численного эксперимента: а, б – запись станции DART 21414; в, г – реконструированная форма «чистого» цунами на станции DART 21419; д, е – реконструированная запись с шумом на станции DART 21419.

Аляскинское землетрясение 23.01.2018 с эпицентром в точке с координатами 56°02'46" с.ш., 149°04'23" з.д. вблизи о. Кадьяк (англ. Kodiak) вызвало слабое цунами, зарегистрированное рядом станций системы DART (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>), а также множеством береговых метеографов. Цунами не причинило ущерба, но событие предоставляет хорошую возможность проверить на фактическом материале справедливость различных моделей прямого расчета и оперативного прогноза цунами.

На рис. 5 изображена схема расчетной области.

Ближайшая к очагу цунами станция DART 46409 находилась на расстоянии около 90 км от эпицентра при времени пробега около 10 мин. Ввиду этого данные станции содержат запись как собственно цунами, так и шума, обусловленный сейсмическими причинами (волны Рэлея), наложенный на полезный сигнал (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>).

Исходными данными для прогноза являлась запись этой станции, из которой удалены только приливные составляющие. Согласно оценкам NOAA

Center for Tsunami Research: Kodiak (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>), в записи станции DART 46409 собственно цунами отвечают данные начиная с 7-й минуты записи (рис. 6). Предшествующие колебания обусловлены сейсмическим шумом.

Численный эксперимент заключался в моделировании процесса оперативного прогнозирования цунами 23.01.2018 для северной и северо-восточной частей Тихого океана по данным станции DART 46409.

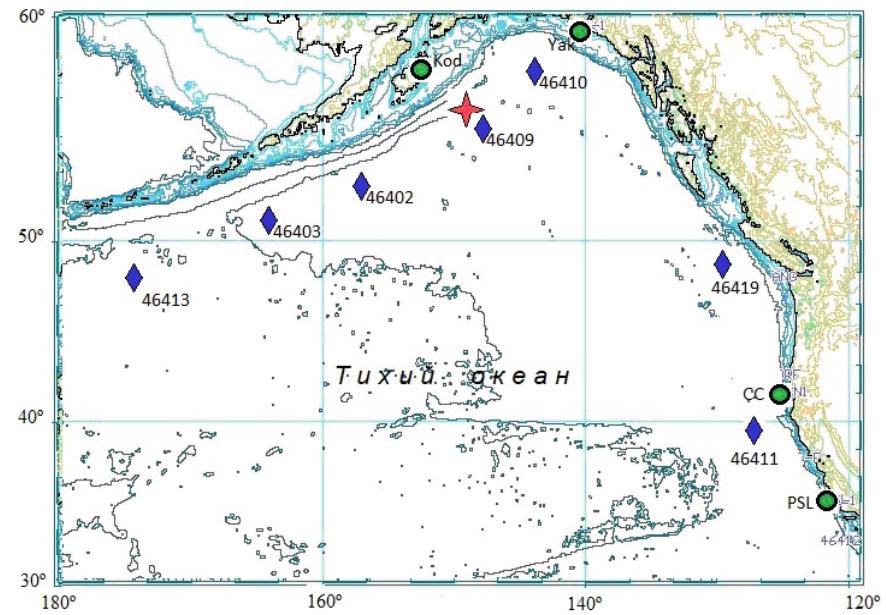


Рис. 5. Схема расчетной области. Звездочка – эпицентр землетрясения, ромб – положение станций системы DART, кружок – населенные пункты: Kod – Кадьяк, Yak – Якутат, CC – Кресент Сити, PSL – Порт Сан Луис.

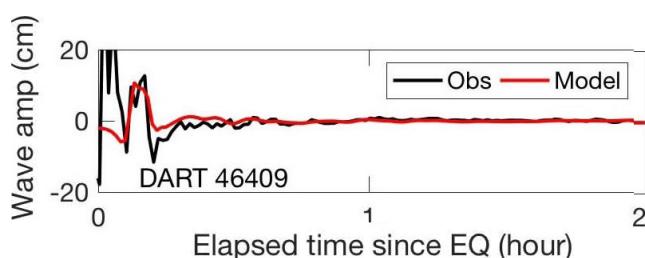


Рис. 6. Исходная (черная линия) запись станции DART 46409 на 23.01.2018 и восстановленная форма цунами (красная линия) (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>).

Результаты

Онекотанское цунами 2020 г.

Для построения передаточной функции решена вспомогательная задача расчета волновых форм в точках регистрации цунами и вблизи заданных населенных пунктов от кругового начального возвышения свободной поверхности диаметром 100 км и амплитудой 10 м с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения. Расчет выполнялся в сферических координатах с использованием разностной сетки с шагом 1 км на широте 45°. Расчетная область численного эксперимента представлена на рис. 1.

Расчеты вблизи населенных пунктов Курильских островов, а также вблизи поста измерения уровня моря «Водопадная» выполнены в точках, в которых глубины воды равны 10–20 м. Эти величины определяются возможностями разностной сетки, а также тем, что на этих глубинах волны заведомо являются линейными.

Для сравнения результатов расчета с фактическими данными выполнен расчет формы цунами на станции DART 21415 и у побережья Камчатки вблизи поста измерения уровня моря «Водопадная». Расчет выполнен по данным о «чистом» цунами станции DART 21402. Результат представлен на рис. 7.

Расчетная и зарегистрированная формы волны на станции DART 21415 достаточно хорошо соответствуют друг другу. Качество расчетов сопоставимо с подобными расчетами в (<https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325>). Аналогичное качество совпадения получено в расчетах цунами по детальной информации о землетрясении 25.03.2020 и начальному смещению уровня океана, представленных на сайте Научного совета по проблемам цунами при Отделении наук о Земле РАН (<http://ocean.phys>.

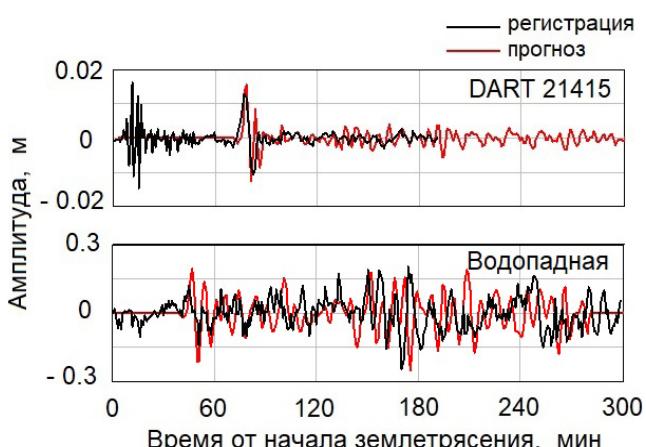


Рис. 7. Результаты расчета формы цунами по данным о «чистом» цунами станции DART 21402 во время Онекотанского цунами 2020 г.

msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/.

Неплохо согласуются расчетная форма волны вблизи поста измерений уровня моря «Водопадная» и запись, полученная этим постом. При необходимости расчетная форма волны вполне пригодна для оценки опасности цунами вблизи этого пункта.

Расчет ожидаемого цунами для населенных пунктов Курильских островов выполнен по реконструированным данным с шумом и без шума виртуальной станции DART 21402 длительностью 28 мин от начала землетрясения. Результат расчета представлен на рис. 8.

Рассчитанные по данным с шумом и без шума формы цунами для Курильска и Южно-Курильска практически не искажены и хорошо совпадают друг с другом.

Форма цунами вблизи Северо-Курильска, рассчитанная по данным с шумом, содержит высокочастотные колебания. Нетрудно понять, даже при небольшом опыте знакомства с зарегистрированными формами цунами, что высокочастотные осцилляции в расчетной форме не имеют отношения к цунами. Реальную же форму цунами и степень опасности вполне можно оценить, несмотря на наличие этих высокочастотных выбросов. Расчетная по данным без шума форма цунами также изображена на рис. 8.

На основании полученного расчета может быть сделан вывод о том, что в Северо-Курильске приход первой волны с амплитудой около 15 см ожидается через 69 мин после начала землетрясения. Визуальная оценка высоты волны

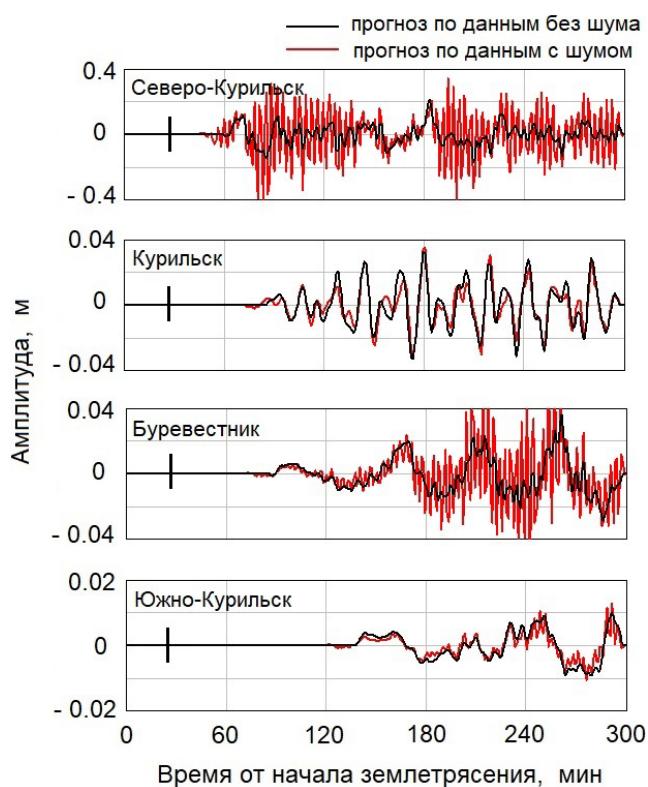


Рис. 8. Результаты ретроспективного моделирования процесса оперативного прогнозирования Онекотанского цунами 2020 г. по реконструированным данным без шума и с шумом станции DART 21402 вблизи населенных пунктов Курильских островов. Вертикальная черта – момент выработки прогноза.

50 см сделана вблизи уреза воды при глубине около 1 м. Рассчитанная амплитуда 15 см получена в точке, где глубина моря равна 17 м. В соответствии с известным законом Грина, согласно которому амплитуда волн 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 точку, где глубина равна 1 м, а волна остается линейной, дает величину амплитуды около 30 см.

Расчетная форма волны для Буревестника также содержит высокочастотные колебания. Как и в случае с расчетной формой волны для Северо-Курильска, их наличие не влияет на оценку степени опасности цунами.

Прогноз цунами в перечисленных пунктах по данным о «чистом» цунами действующей станции DART 21416 и виртуальной станции DART 21402 практически идентичны.

Заблаговременность прогноза определяется следующим: получение данных о координатах эпицентра землетрясения – через 11–15 мин после начала землетрясения, время от момента получения информации о коорди-

натах эпицентра, необходимое для построения передаточной функции, – до 15 мин. Суммарно момент времени готовности к выполнению прогноза – через 26–30 мин после начала землетрясения. К этому моменту времени станцией DART 21419 может быть получена информация, позволяющая идентифицировать цунами (в условиях эксперимента для расчетов выбирался первый период волны). Прогноз мог быть дан сразу после прохождения первого периода цунами через станцию DART 21402, т.е. через 28 мин после начала землетрясения. Этот момент времени отмечен на рис. 8 вертикальной чертой.

Заблаговременность прогноза составляет для Северо-Курильска 41 мин, для Курильска 65, для Буревестника (бухта Касатка) 71 мин и для Южно-Курильска 116 мин – этого вполне достаточно для принятия решения об объявлении тревоги. Ввиду малых амплитуд ожидаемых волн в этих населенных пунктах тревога могла не объявляться.

К сожалению, из-за отсутствия инструментальных наблюдений подтвердить или опровергнуть представленные результаты расчетов не представляется возможным.

Симуширские цунами 2006 и 2007 гг.

Прогноз цунами 2006 и 2007 гг. выполнен для пунктов Курильских островов и о. Хоккайдо [Королев, 2019]. На рис. 9 представлены результаты прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом виртуальной станции DART 21419 длительностью 32 и 35 мин от момента начала землетрясения и сравнение с реальными записями.

Результаты прогнозов цунами в Ханасаки хорошо совпадают с формами зарегистрированных цунами. Для события 2007 г. прогноз по данным с шумом отличается от прогноза по «чистым» данным наличием высокочастотных колебаний после 180 мин, не имеющих отношения к цунами. Впрочем, наличие таких колебаний не может повлиять на принятие решения об объявлении тревоги цунами.

Расчетные формы цунами в Кусиро для обоих событий достаточно хорошо совпадают с реальными. Прогнозы, выполненные по данным с шумом и без шума, практически не различаются.

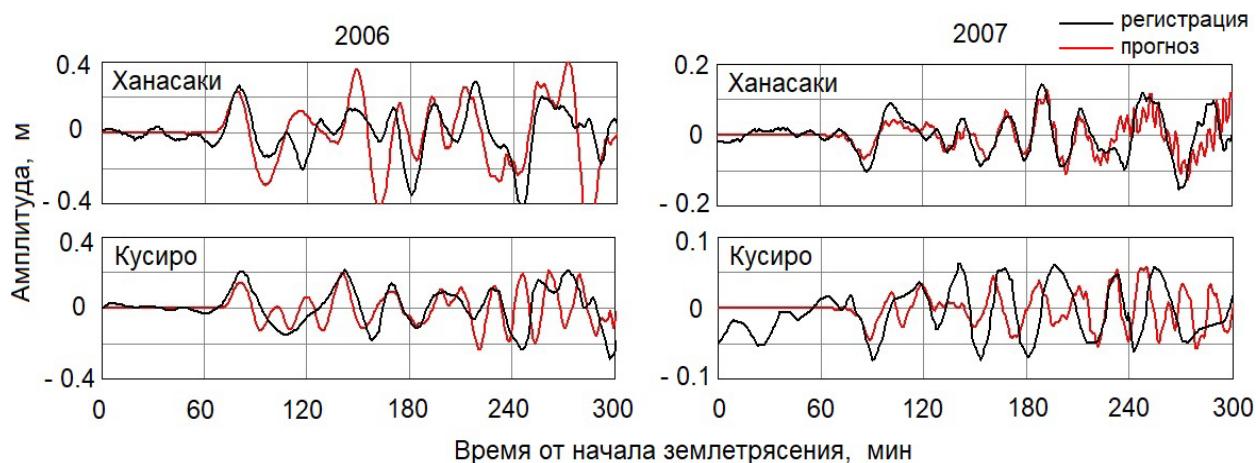


Рис. 9. Результаты ретроспективного прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом станции DART 21419 длительностью 32 мин (слева) и 35 мин (справа).

Вопреки опасениям, прогноз для Ханасаки и Кусиро по данным, осложненным шумом сейсмического происхождения, вполне адекватен. Качество прогноза позволяет достоверно оценить опасность ожидаемого цунами и принять решение об объявлении тревоги в этих пунктах.

Результаты прогноза для населенных пунктов Курильских островов не приведены ввиду отсутствия регистрации цунами в этих точках и невозможности сравнения расчетных и фактических форм цунами. Тем не менее возможно оценить заблаговременность прогноза для этих пунктов.

Заблаговременность прогноза по данным станции DART 21419 (первый период цунами) для населенных пунктов составляет для

Ханасаки 45 мин, Кусиро – 50 мин, Южно-Курильска – 1.5 ч, Буревестника (зал. Касатка о. Итуруп) – 34 мин, Курильска – около 20 мин и Северо-Курильска – около 1 ч. Такая заблаговременность прогноза для пунктов северных и южных Курильских островов обеспечивает своевременную подачу тревоги и эвакуацию населения в безопасные места.

Подобные расчеты по данным с шумом станции DART 21419 выполнены также для точек в океане, в которых находились станции системы DART. Расчеты выполнены в сферических координатах на разностной сетке с шагом 3.83×3.83 км на широте 40° с.ш. Станция DART 21413 находится в 700 морских милях к юго-востоку от Токио, станции DART 46402, 46408 и 46413 расположены вдоль Алеутских

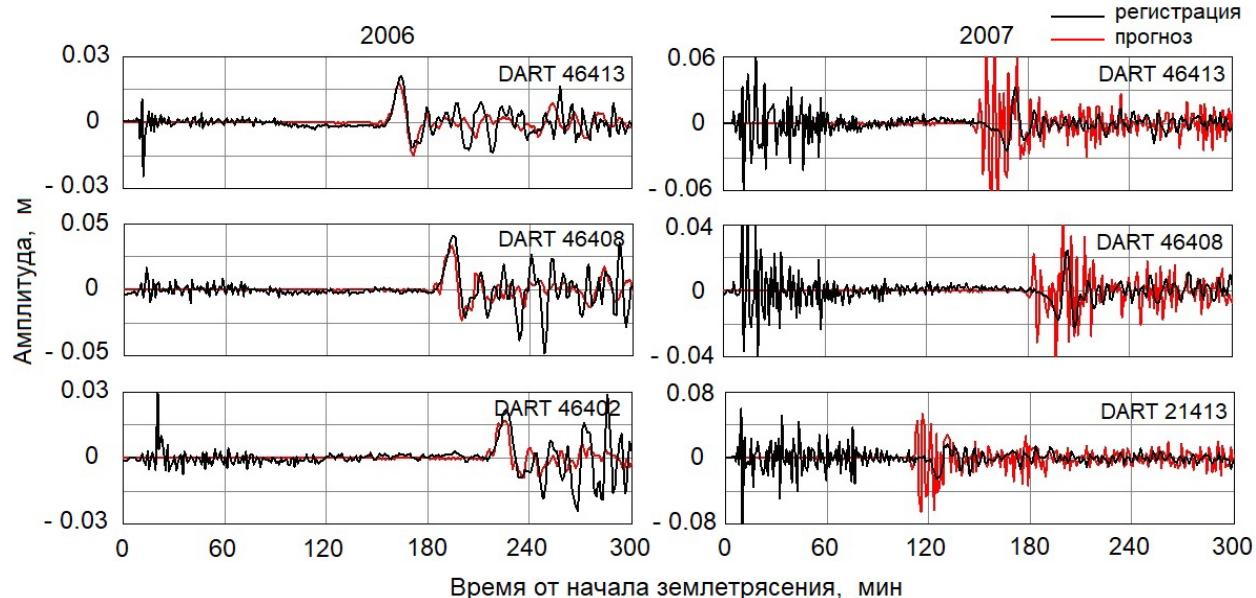


Рис. 10. Результаты ретроспективного прогноза цунами 2006 и 2007 гг. по реконструированным данным с шумом станции DART 21419 в местах нахождения станций системы DART в океане.

островов. На рис. 10 приведены результаты расчетов.

В событии 2006 г. наличие шумов в исходных данных (на станции DART 21419) не влияет на качество прогноза.

Для Симуширского цунами 2007 г. наличие шумов в исходных данных виртуальной станции DART 21419 приводит к появлению шумов в результирующих формах волн на станциях DART 46413, 46408 и 21413. Однако их наличие, как и в событии 2020 г. (прогноз для Северо-Курильска и Буревестника), не вызывает трудностей с оценкой формы собственно цунами и степени его опасности. Расчетные формы волн по данным без шума той же станции практически совпадают с зарегистрированными.

Аляскинское цунами 2018 г.

В численных экспериментах для построения передаточной функции использовался вспомогательный источник с центром, совпадающим с эпицентром землетрясения, диаметром 75 км и с максимальной амплитудой 8 м. Применялись сферические координаты на разностной сетке с шагом 3.83×3.83 км на широте 40° с.ш. Схема расчетной области представлена на рис. 4.

Прогноз выполнен по данным станции DART 46409 длительностью 16 мин от начала землетрясения, включающим записи как соб-

ственno цунами, так и сейсмического шума (рис. 5). Результаты прогноза в точках регистрации станциями системы DART в океане представлены на рис. 11. Для сравнения с формой реального цунами использовались данные станций системы DART (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>).

Несмотря на имеющиеся выбросы, получено достаточно хорошее соответствие расчетных и фактических форм. Результаты расчета позволяют оценить степень опасности цунами. Качество прогноза соответствует качеству расчетов, представленных в (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>).

Прогноз выполнен также для некоторых пунктов северо-восточной части Тихого океана. Результаты представлены на рис. 12. Данные метеографов для сравнения взяты из Sea Level Station Monitoring Facility (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc>). Влияние сейсмического шума в записи станции DART 46409 на рассчитанные формы цунами не проявляется.

Ввиду грубости разностной сетки расчетные точки находились на достаточно большом удалении от регистрирующих метеографов (от 3 до 15 км). Несмотря на значительные расхождения в местоположениях расчетных точек и метеографов, получено неплохое

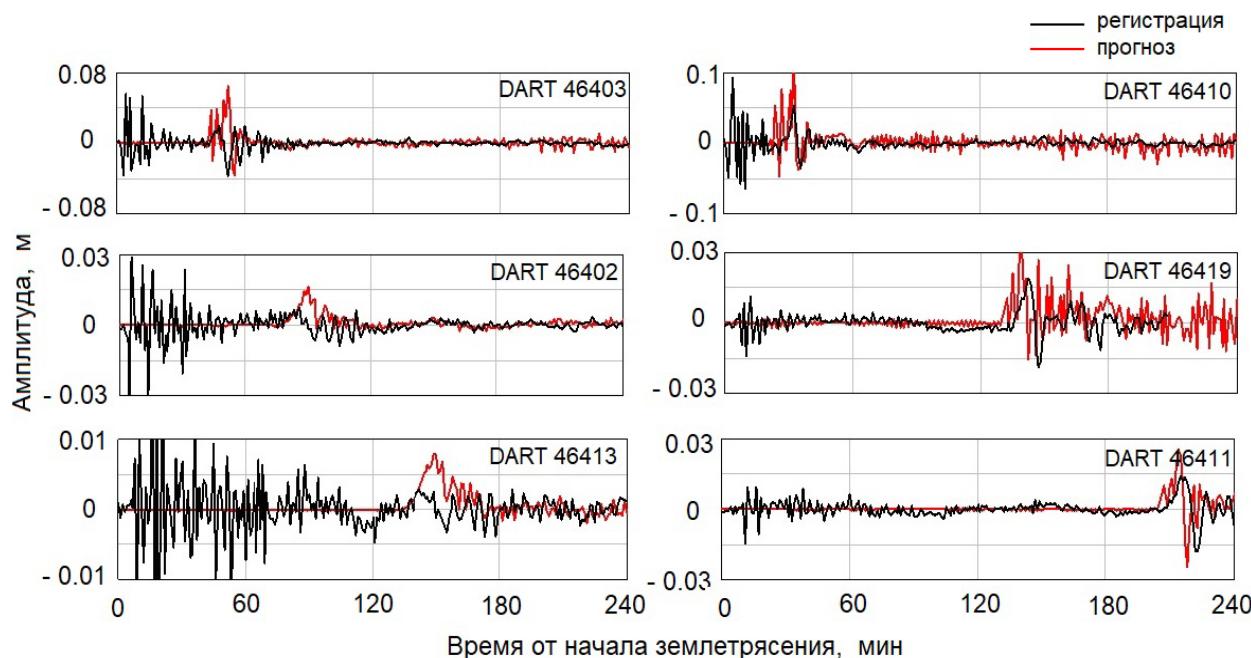


Рис. 11. Результаты прогноза цунами по данным станции DART 46409 в точках регистрации станциями системы DART в океане.

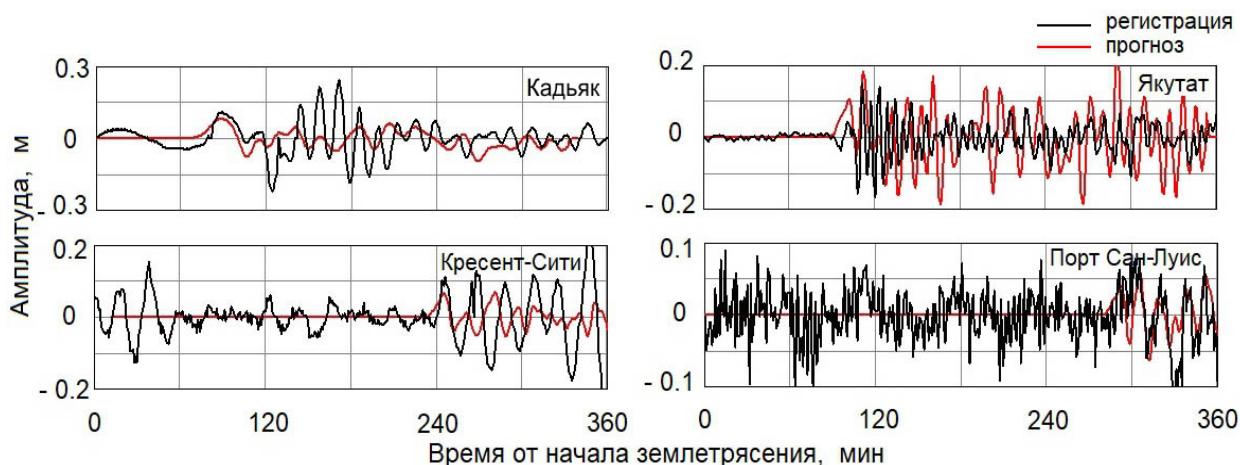


Рис. 12. Результаты прогноза цунами по данным станции DART 46409 вблизи населенных пунктов.

соответствие головных частей расчетных и фактических волновых форм.

Рассчитанные формы цунами позволяют оценить степень опасности цунами в населенных пунктах. Качество расчетов сопоставимо с подобными расчетами в (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>).

Аналогичный по качеству прогноз получен также по данным других ближайших к очагу станций DART – 49403 и 46410. Прогноз выполнялся по данным о «чистом» цунами, полученным этими станциями.

Обсуждение

Действия службы предупреждения о цунами в Сахалинской области 25.03.2020 в рамках действующего регламента в условиях отсутствия какой-либо информации об ожидаемом цунами являются оправданными. Тем более что международный Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (PTWC, Гонолулу) и Японское метеорологическое агентство сообщили о возможных разрушительных волнах цунами на Курильских островах с амплитудой 1–3 м. Однако, ввиду малой амплитуды цунами, объявленная тревога оказалась ложной по прогнозам как сахалинской, так и зарубежных служб. Необоснованным является и продление тревоги цунами уже после прихода первых волн малой амплитуды. И сахалинская служба цунами, и Тихоокеанский центр действовали на основании магнитудно-географического

метода, разработанного в середине прошлого века, который с корректировками в настоящее время является основным способом предупреждения о цунами. В силу статистического характера магнитудного способа службы цунами с момента создания до 2009 г. подали большое количество ложных тревог (75 % от общего числа), при этом пропустив некоторое количество цунами [Gusakov, 2011]. Тревога объявлялась на побережьях большой протяженности без информации об ожидаемых высотах волн.

В США гидрофизический способ SIFT (Short-term inundation forecasting for tsunamis – краткосрочный прогноз затопления от цунами) по информации о цунами в океане (система DART) дает заблаговременную численную оценку амплитуды, времени пробега, других свойств цунами (<https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html>; [Titov, 2009; Wei et al., 2003]). Расчеты выполняются для северо-западного побережья США, побережья Аляски и Алеутских островов. Для северо-запада Тихого океана, включая побережья Камчатки и Курильских островов, Тихоокеанский центр предупреждения о цунами дает прогноз на основе магнитудного критерия.

Японское метеорологическое агентство, ответственное за прогноз цунами на северо-западе Тихого океана, действует в соответствии с новым регламентом³. При выработке прогноза используется база данных о высотах

³ UNESCO/IOC. 2019. Users' guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. IOC Technical Series, 142. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93> (accessed 6.11.2020)

цунами в большом количестве точек в океане. В частности, для Курильских островов одна из точек находится в нескольких километрах к северу от о. Парамушир, другая – в нескольких километрах к востоку от северной оконечности о. Уруп. База данных основана на результатах предварительных расчетов высот цунами от сейсмических источников с наиболее вероятным механизмом землетрясения и различными магнитудами (8.5, 8.0, 7.5 и 7.0), а также различными глубинами гипоцентров (0, 20, 40, ..., 100 км). Источники достаточно плотно покрывают области вероятных цунамигенных землетрясений. Приближенно оцениваются максимальные амплитуды волн на некотором расстоянии от побережья и вблизи берега на глубинах 1 м в соответствии с известным законом Грина вне зависимости от амплитуды набегающей волны. При этом принятие решения об объявлении тревоги цунами возлагается на региональные центры. Подобный подход предлагался еще в 1996 г. [Whitmore, Sokolowski, 1996] в начале развития системы гидрофизических наблюдений. Впоследствии от такого подхода, как неперспективного, отказались в пользу гидрофизического способа, основанного на данных о сформировавшемся цунами в открытом океане [Titov, 2009; Wei et al, 2003].

Все три прогноза цунами 25.03.2020, основанные на магнитудном критерии, а прогноз JMA, по сути, также опирается на оценку магнитуды, оказались неэффективными: при прогнозируемых 1–3 м фактическая высота составила около 0.5 м.

Прогноз ни одной из перечисленных выше служб не отвечает определению прогноза цунами, данному МОК ЮНЕСКО⁴, из-за отсутствия детальной информации об ожидаемом цунами: не определяется ни структура волны, ни длительность тревоги.

В отличие от сейсмологических методов, опирающихся на информацию о магнитуде землетрясения, гидрофизические способы прогноза цунами, использующие данные о сформировавшемся цунами в океане, способны заблаговременно давать информацию об ожидаемом цунами в соответствии с определением МОК ЮНЕСКО.

Один из таких способов, способ оперативного прогноза цунами, требующий сейсмологическую информацию только о времени начала и координатах эпицентра землетрясения, может давать заблаговременный адекватный прогноз. Даже при наличии в исходных данных шумов сейсмического происхождения расчетная форма цунами позволяет оценивать степень опасности, достаточную для принятия решения об объявлении тревоги цунами. Присутствие высокочастотных колебаний в расчетной форме ожидаемого цунами не влияет на адекватность оценки опасности. Расчет волновых форм выполнялся в точках, где глубины воды равны 10–20 м, на расстояниях от береговой черты 1.5–3 км. Расчетные амплитуды служат ориентиром для принятия решения об объявлении тревоги службой предупреждения о цунами. Следует напомнить, что в работе применяется способ, т.е. действующие алгоритмы расчетов, но не программный комплекс, готовый к применению в практической работе. При реализации способа в программном комплексе возможен дальнейший расчет цунами вплоть до береговой черты, если позволяют условия оперативного режима, а также может и должна быть применена фильтрация от высокочастотных выбросов, учтен приливной режим.

К сожалению, в России гидрофизическая подсистема службы предупреждения о цунами не выполняет прогноз по гидрофизическим данным. Россия является едва ли не единственной страной бассейна Тихого океана, не имеющей глубоководных станций измерения уровня океана, позволяющих осуществлять оперативный прогноз цунами. Назрела необходимость разработки российских глубоководных станций измерения уровня океана для раннего и достоверного обнаружения и оперативного прогноза цунами⁵.

Более того, на Курильских островах, наиболее подверженных воздействию цунами, отсутствует регулярная регистрация морского волнения. На рис. 13 изображена схема размещения автоматических постов измерения уровня моря Российской службы предупреждения о цунами. Посты установлены и работают в Камчатском, Хабаровском и Приморском краях, но отсутствуют на Курилах.

⁴ http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442

⁵ Решение VII Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». 2019. URL: <http://emsd.ru/conf2019lib/pdf/solution.pdf> (дата обращения: 6.11.2020)

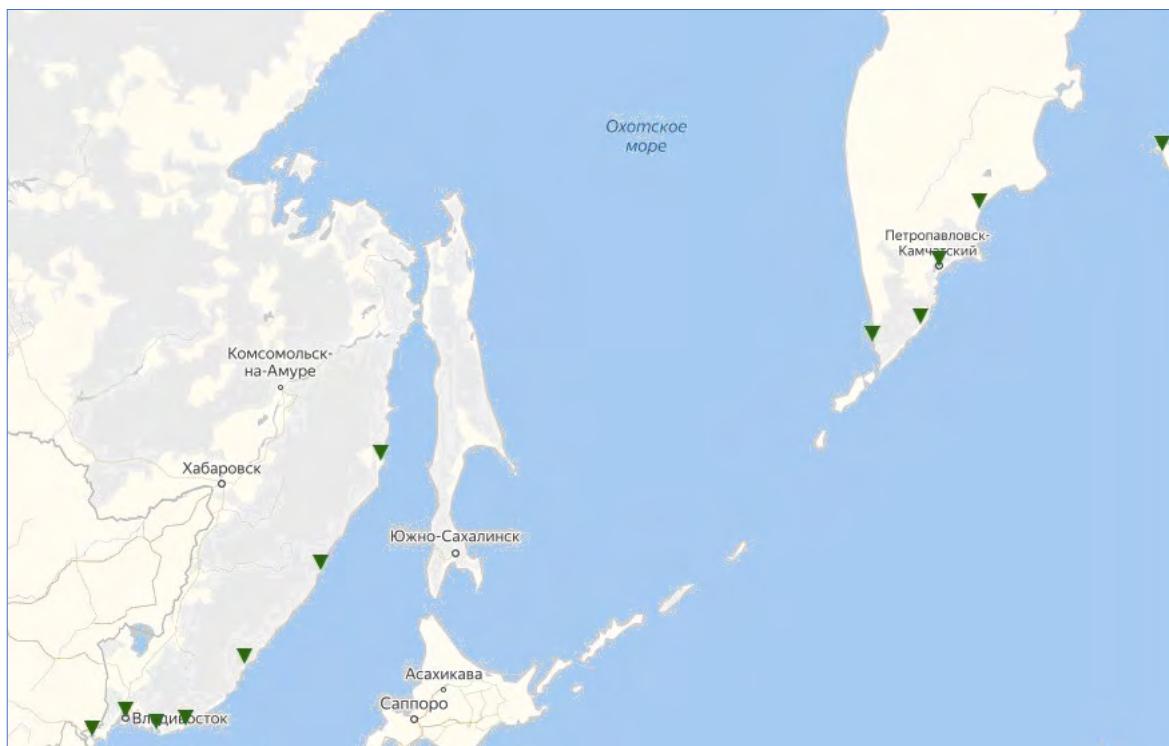


Рис. 13. Пункты измерения уровня моря на Дальнем Востоке (отмечены треугольниками) (<http://rtws.ru/sea-level/>).

Выводы

Выполнено моделирование процесса оперативного прогнозирования цунами 2006, 2007, 2018 и 2020 гг. по данным ближайших к очагам станций, содержащим неустранимые шумы сейсмического происхождения. Для цунами 2018 г. моделирование проводилось по фактическим данным находившейся в непосредственной близости к очагу станции DART 46409. Записи содержали шумы, обусловленные прохождением волн Рэлея. Для событий 2006, 2007 и 2020 гг. подобные данные отсутствуют, поэтому выполнена реконструкция записей ближайших к очагам виртуальных станций измерения уровня океана, включающих сейсмические шумы, по данным более удаленных от очагов станций DART.

Наличие неустранимого шума в данных близких к очагу станций приводит к появлению в результатах расчетов высокочастотных колебаний, наложенных на форму собственно цунами. Несмотря на это, возможна адекватная оценка формы цунами. Качество расчета достаточно для заблаговременного принятия решения об объявлении тревоги в том пункте, в котором цунами представляет реальную угрозу.

Результат полностью соответствует определению прогноза цунами МОК ЮНЕСКО.

Результаты расчетов хорошо совпадают с данными регистрации цунами прибрежными мареографами и станциями системы DART в океане. Качество прогноза, выполняемого предложенным способом оперативного прогноза цунами, сопоставимо с качеством расчетов гидрофизическим способом SIFT (США).

Вопреки предположению, что неустранимый сейсмический шум в записи цунами на ближних к очагу станциях может препятствовать получению адекватного прогноза, оперативный прогноз локальных цунами вполне возможен, несмотря на высокочастотные колебания, наложенные на форму ожидаемого цунами.

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

Список литературы

1. Королев Ю.П. **2019.** О возможности оперативного прогноза локальных цунами на Курильских островах. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 12(4): 14–20.
<https://doi.org/10.7868/s2073667319040026>
2. Нурисламова Г.Н., Носов М.А. **2016.** Горизонтальные движения водного слоя при прохождении волн цунами по данным густой сети глубоководных станций уровня моря. *Вестник Московского университета, Серия 3, Физика, астрономия*, 5: 50–55.
3. Gusiakov V.K. **2011.** Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11). 2033–2041. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2>
4. Korolev Yu.P. **2011.** An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 3081–3091.
<https://doi:10.5194/nhess-11-3081-2011>
5. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An., Oblaukhov K., Shadrin M. **2019.** Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchanka and Kuril Islands. *Science of Tsunami Hazards*, 38(1): 1–13.
6. Titov V.V. **2009.** Tsunami forecasting. In: E.N. Bernard, A.R. Robinson (eds). *The Sea. Vol. 15: Tsunamis*. Cambridge, MA; London, England: Harvard Univ. Press, 367–396.
7. Wei Y., Cheung K.F., Curtis G.D., McCreery Ch.S. **2003.** Inverse algorithm for tsunami forecasts. *J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering. ASCE*, 129(2): 60–69.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950x\(2003\)129:2\(60\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(2003)129:2(60))
8. Whitmore P.M., Sokolowski T.J. **1996.** Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings. *Science of Tsunami Hazards*, 14(3): 147–166.

Источники данных

1. Научный Совет по проблемам цунами при Отделении наук о Земле РАН: Результаты моделирования цунами 25.03.2020 с помощью модели NAMI-DANCE.
URL: <http://ocean.phys.msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/> (дата обращения: 6.11.2020)
2. Российская служба предупреждения о цунами: Измерения уровня моря.
URL: <http://rtws.ru/sea-level/> (дата обращения: 6.11.2020)
3. Сахалинское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: Об угрозе цунами после землетрясения у побережья Северо-Курильского района 25 марта 2020 года.
URL: <http://sakhgms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami> (дата обращения: 6.11.2020)
4. National Centers for Environmental Information: Search Tsunami Events.
URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (accessed 6.11.2020)
5. National Data Buoy Center. URL: <https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (accessed 6.11.2020)
6. NOAA Center for Tsunami Research: DART. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (accessed 6.11.2020)
7. NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak, Alaska Tsunami, January 23, 2018 Main Event Page.
URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123> (accessed 6.11.2020)
8. NOAA Center for Tsunami Research: Kuril Islands Tsunami, March 25, 2020 Main Event Page.
URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325> (accessed 29.11.2020)
9. NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html> (accessed 7.12.2020)
10. Sea Level Station Monitoring Facility (Unesco. IOC). URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc> (accessed 6.11.2020)

Об авторах

КОРОЛЕВ Юрий Павлович (ORCID 0000-0002-7068-7341), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Yu_P_K@mail.ru

КОРОЛЕВ Павел Юрьевич (ORCID 0000-0003-3741-7654), младший научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск

TRANSLATION

УДК 550.344.42+551.466.62

<https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>

Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources

Yury P. Korolev*, Pavel Yu. Korolev

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

*E-mail: Yu_P_K@mail.ru

Abstract. Reliable short-term tsunami forecast on the Kuril Islands when earthquakes occur in the Kuril-Kamchatka Trench is the most difficult. Forecasting by the traditional magnitude method often leads to false tsunami alarms. Based on the examples of the events of 2006, 2007, and 2020 on the Kuril Islands, as well as the event of 2018 in Alaska, it was shown that according to the data of the ocean level measuring stations closest to the tsunami source (tsunami travel time is 10–20 minutes) it is possible to adequately predict the tsunami off the coast. Calculations of tsunami waveforms near the coast by the data containing seismic noise has shown that the resulting waveforms contain high-frequency oscillations. However, these fluctuations do not interfere with the assessment of the real waveform and the danger of the expected tsunami. In contrast to forecast methods based on the magnitude criterion, the applied method of short-term tsunami forecast makes it possible to calculate the waveform: the amplitudes of the first and maximum waves, their arrival time at a given point and the expected duration of the tsunami. The proposed method can become a tool that will improve the quality of short-term tsunami warning, significantly reducing the number of false tsunami alarms.

Keywords: tsunami, earthquake magnitude, tsunami alarm, Onekotan, Kuril Islands, Severo-Kurilsk, method of short-term tsunami forecast, forecast lead time, DART, seismic noise

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 447–473 (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>

Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. Геосистемы переходных зон, 2020, т. 4, №. 4. с. 447–473. (На рус. и англ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>

Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to the reviewers for useful comments and suggestions, which were taken into account when finalizing the work.

The work is carried out within the framework of state assignment IMGG FEB RAS no. AAAA-A18-118012290123-8 “Coastal floods: monitoring, simulation, forecast”.

Introduction

The tsunami alarm on 25.03.2020 for the Severo-Kurilsk district (Sakhalin region) was announced at 14:00 (hereinafter Sakhalin time is indicated, the difference is 11 hours ahead of UTC and 8 hours ahead of Moscow time) by the “Yuzhno-Sakhalinsk” Informational Processing Center of the Sakhalin branch of the Federal Research

Center United Geophysical Survey RAS on the basis of the magnitude criterion. An earthquake with a magnitude of 7.3 with an epicenter 220 km east of Onekotan Island occurred at 13:49. The magnitude was subsequently clarified to 7.5 (Search Tsunami Events of the National Centers for Environmental Information – <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search>)¹.

¹ Full information about the data sources see in the end of the article.

Translation of the article published in the present issue of the Journal: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. Translation by G.S. Kachesova.

At 13:57, the Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, Honolulu) issued a tsunami warning bulletin for the coastal zone within 1000 km of the earthquake epicenter. At 14:16, the Japan Meteorological Agency (JMA) has also warned of possible devastating tsunami waves in the Kuril Islands with an amplitude of 1–3 m, as reported by the Sakhalin Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring (<http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami>). The location of the earthquake epicenter is shown in Figure 1. By the name of the nearest island, this tsunami can be called the 2020 Onekotan tsunami by analogy with the name of the 2006 Simushir tsunami.

Due to the low height of the wave, which is not dangerous, the alarm on 25.03.2020 turned out to be actually false.

The arrival of the tsunami in Severo-Kurilsk was expected at 15:04. Evacuation of the population to the safe zone was completed by 14:30. About 400 people were evacuated. According to visual observations from the Signalnaya hill 1.2 km south of the Severo-Kurilsk port, the first wave has arrived 1 hour after the earthquake beginning. Against the background of the storm waves, the tsunami height was estimated at 50 cm. Figure 2 shows a snapshot of the coastal waters when the tsunami has arrived at the vicinity of Severo-Kurilsk. The alarm mode was maintained until 17:57 (almost 4 hours) (<http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami>).

The above descriptions of the actions of the Russian tsunami warning service, as well as international tsunami services, in particular the Japan Meteorological Agency, allow us to assess the shortcomings of the current tsunami forecasting regulations.

Similar situations took place in 2006 and 2007 (Simushir tsunamis of 2006 and 2007). Tsunami alarms were announced by the magnitude

criterion on the coasts of all the Kuril Islands, and the population was evacuated to safe places. However, these tsunamis had posed no danger to human settlements. The alarms were actually false.

In the case of strong tsunamis, the stop of manufacture and evacuation of personnel and

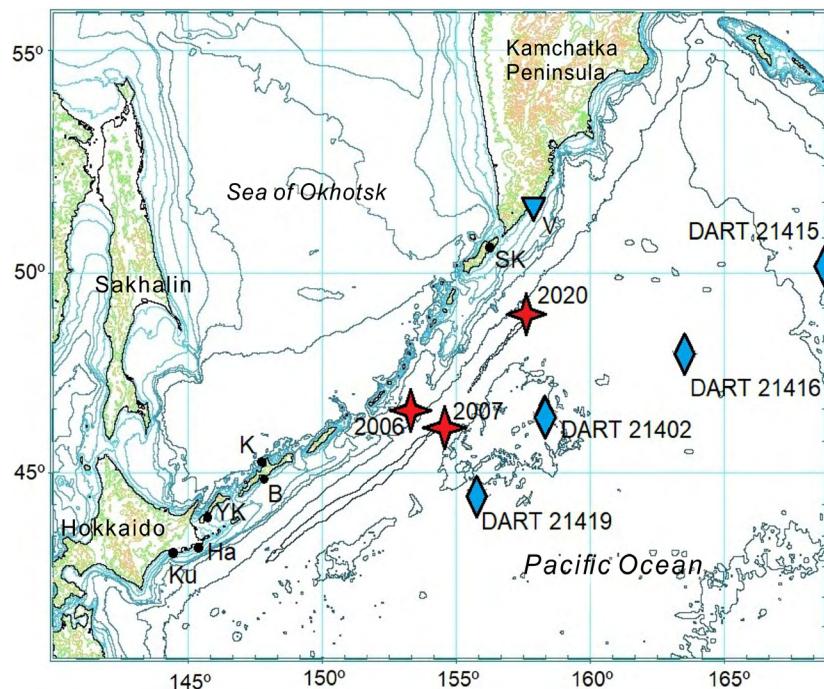


Figure 1. The scheme of the area of simulation. Asterisks – the earthquakes epicenters, diamonds – the DART stations location, triangle – the “Vodopadnaya” sea level measuring station (V), SK – Severo-Kurilsk, K – Kurilsk, B – Burevestnik, YK – Yuzhno-Kurilsk, Ku – Kushiro, Ha – Hanasaki.

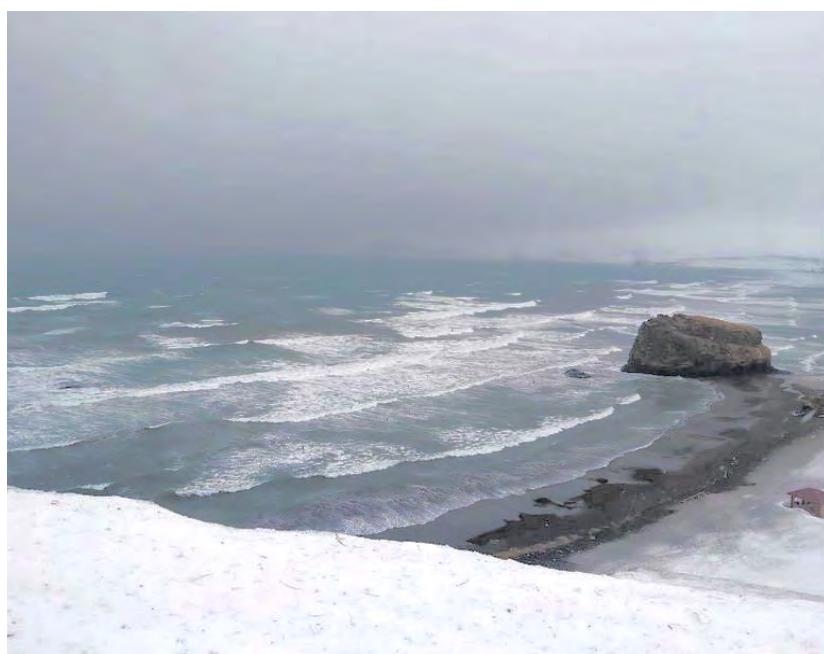


Figure 2. Arrival of a series of tsunami at Paramushir Island on 25.03.2020 (about 1.2 km south of the Severo-Kurilsk port). Photo by L. Kotenko (<http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami>)

population from hazardous areas are justified. For weak tsunamis, when the wave amplitude in settlements does not exceed 0.5 m, as for the events of 2006, 2007, and 2020, these actions are accompanied by unjustified damage associated with a stop of manufacture, an unnecessary stress for the population. In addition, the duration of the alarm mode is often too long. Frequent false alarms arise a negative attitude towards them and distrust. Ignoring the alarms during the worst 2011 Tohoku, Japan tsunami was partly responsible for numerous casualties.

According to the modern concepts, tsunami warning services should announce not only well-grounded general alarms, but also differentiated by the hazard degree for specific areas of the coast. Ideally, a tsunami alarm should be announced with a reasonable lead time only at those points where the tsunami poses a real danger, and be accompanied with information about the arrival time of the first wave, the maximum wave, and their amplitudes, as well as the expected time of the end of the tsunami (tsunami alarm clearing) [Korolev, 2011]. It is these characteristics of a tsunami that are listed in the definition of a tsunami forecast formulated by the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO in 2013². Such a detailed forecast is impossible on the basis of the magnitude-geographical criterion.

Hydrophysical methods of tsunami forecasting do not lean upon earthquake magnitude. Information about the formed tsunami obtained in the ocean by DART stations (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) is reliable for assessing the degree of tsunami hazard. (<http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart>).

Obviously, in the case of local tsunamis (during the earthquakes in the Kuril-Kamchatka depression), the timeliness and lead time of the forecast depend on the proximity of the stations to the tsunami source. The data from such stations may contain seismic noises superimposed on the desired signal due to the passage of surface waves (Rayleigh waves) along the ocean floor. Since the discreteness of the records of these stations is 1 min, the noise component can have periods of 4 min or more, which is comparable to the characteristic periods of a tsunami (about 15 min). The application of the criterion for useful signal and noise separation, described in [Nurislamova,

Nosov, 2016], appears to be difficult or impossible. This circumstance can become an obstacle to obtaining an adequate forecast. Under operational conditions, it is required to assess the degree of tsunami hazard in a short time without dealing with the problem of signal separation.

Aim of the work and numerical experiments set up

This work aimed to study the possibility of short-term (operational) forecast of local tsunamis based on the the data of ocean level measurement stations closest to the sources, containing unavoidable noise of seismic origin.

We considered all known events in the northern and northwestern parts of the Pacific Ocean, during which either the registration was made or the restoration (reconstruction) of the tsunami waveform near the source is possible.

The process of short-term forecasting of the Onekotan (25.03.2020), Simushir (15.11.2006 and 13.01.2007) tsunamis, which occurred in the regions of the northern and central Kuril Islands, and the Alaska tsunami (25.03.2018) with an epicenter near the Kodiak Island, was simulated. The simulation was carried out using the reconstructed data from virtual stations of ocean level measurement, at the locations of the previously existing DART 21402 station, the operating DART 21419 station, closest to the tsunami foci of 2020, 2006 and 2007, as well as the real data from the DART 46409 station in 2018. Both the real and reconstructed data from the DART stations contained noise of seismic origin.

Computations (reconstruction of records and calculation of tsunamis) were carried out using the method of short-term tsunami forecast described in [Korolev, 2011]. This method (express method) consists in constructing a transfer function for each point, which allows calculating the waveform of the expected tsunami near this point using the DART station data. The transfer function is constructed immediately after receiving information about the coordinates of the epicenter of the earthquake that caused the tsunami. The basis for its construction is the results of waveforms calculation from a simple axially symmetric source with a center, coinciding with the earthquake epicenter, at the points of registration and forecast.

² Intergovernmental Oceanographic Commission. 3rd ed. Tsunami Glossary. 2016. Paris, UNESCO. IOC Technical Series, 85. (English, French, Spanish, Arabic, Chinese) (IOC/2008/TS/85 rev.2). URL: http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442 (accessed 6.11.2020)

No earthquake magnitude data is required. When using the technologies for rapid tsunami calculation, the construction of a transfer function may be completed prior the moment the first tsunami period passes through the registration point. For example, the technology for rapid calculation of tsunami propagation is presented in [Lavrentiev et al., 2019].

In numerical experiments, the lead time of the tsunami forecast (the time between the estimated arrival time of the tsunami (first wave crest) at a given point and the time of the forecast execution) and the forecast quality were estimated. The possibility of assessing the hazard degree of the expected tsunami at a given point, which is sufficiently accurate to make a decision on the alert, is taken as the criterion of the forecast quality.

Further in numerical experiments, the calculation of the tsunami waveform near the coast is called retrospective forecast, or forecast.

Tsunami on 25.03.2020 was registered by the DART 21415, 21416, and 21419 deep-sea stations of ocean level measurement (Figure 1) (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>). A small tsunami was recorded by the “Vodopadnaya” sea level measuring station (post) (Kamchatka, Russia) (<http://rtws.ru/sea-level/>). According to the data of the DART stations, an adequate assessment of the tsunami hazard on the coast of the islands is possible. However, the remoteness of the stations from the coast cannot provide the necessary lead time for forecasting and announcing the alarm in real conditions.

The position of the previously functioning Russian DART 21402 station is optimal with regard to lead time of the tsunami forecast for the coast of the northern Kuril Islands. The short-term forecast of the tsunami by the data of this station could be obtained earlier than by the data of the DART 21416. In the numerical experiment, a virtual station is introduced at the location of the previously functioning Russian DART 21402 station.

To simulate the process of short-term forecasting of the 2020 Onekotan tsunami, the tsunami waveform was reconstructed at the location of the DART 21402 station based on the actual record of the “pure” tsunami from the DART 21416 station. A “pure” tsunami corresponds to a series of data from 21 to 36 minutes from the earthquake origin time (Figure 3 a). The reconstructed waveform of the “pure” tsunami at the DART 21402 is shown in Figure 3 b.

To analyze the influence of seismic noise on the possibility and quality of tsunami forecast, we reconstructed the possible seismic noise in the re-

cords of the DART 21402 station also by the data on noise of the DART 21416 station. The noise components of the records of the DART 21416 station with a duration of 21 min from the earthquake origin time were added to the calculated tsunami waveforms. When calculating these components, the change in the amplitude of the Rayleigh wave due to the cylindrical divergence with the distance from the epicenter to the registration point was taken into account. The reconstructed record of the DART 21402 virtual station, including the noise component, is shown in Figure 3 c.

The 2020 tsunami forecast for the Kuril Islands was made based on the reconstructed record of the DART 21402 station with a duration of 28 minutes.

Tsunamis of 2006 and 2007 have been recorded by several stations of the DART system, the DART 21414 station is the closest to the focus. The station is located in the western Aleutian Islands at a longitude of 178° E, its location is beyond the scope of the diagram shown in Figure 1. Tsunami travel time to this station exceeds 2 hours, that necessarily does not provide the lead time of the tsunami forecast on the Kuril Islands. The position of the DART 21419 station installed only in 2009 is optimal for the southern and northern Kuril Islands with regard to the lead time of forecast of tsunamis occurring in the area of the central Kuril Islands. To solve the problem of simulation of the process of operational forecast of the 2006 and

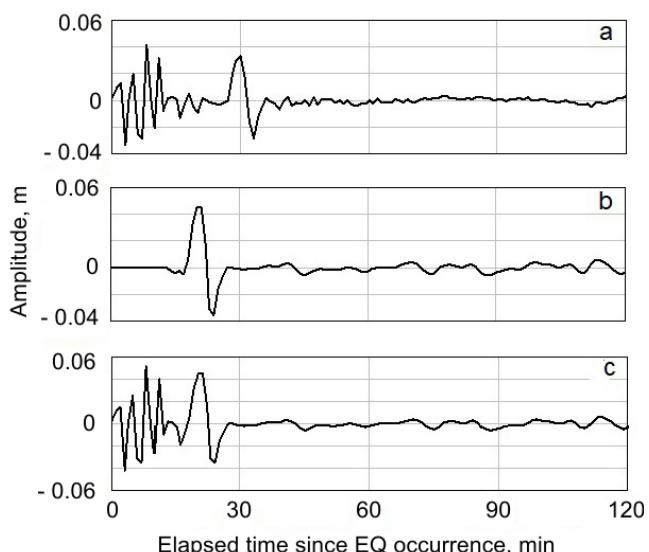


Figure 3. Initial data of the numerical experiment on 2020 Onekotan tsunami forecasting: a – record of the DART 21416 station, b – reconstructed waveform of a “pure” tsunami at the DART 21402 station, c – reconstructed record with noise at the DART 21402 virtual station.

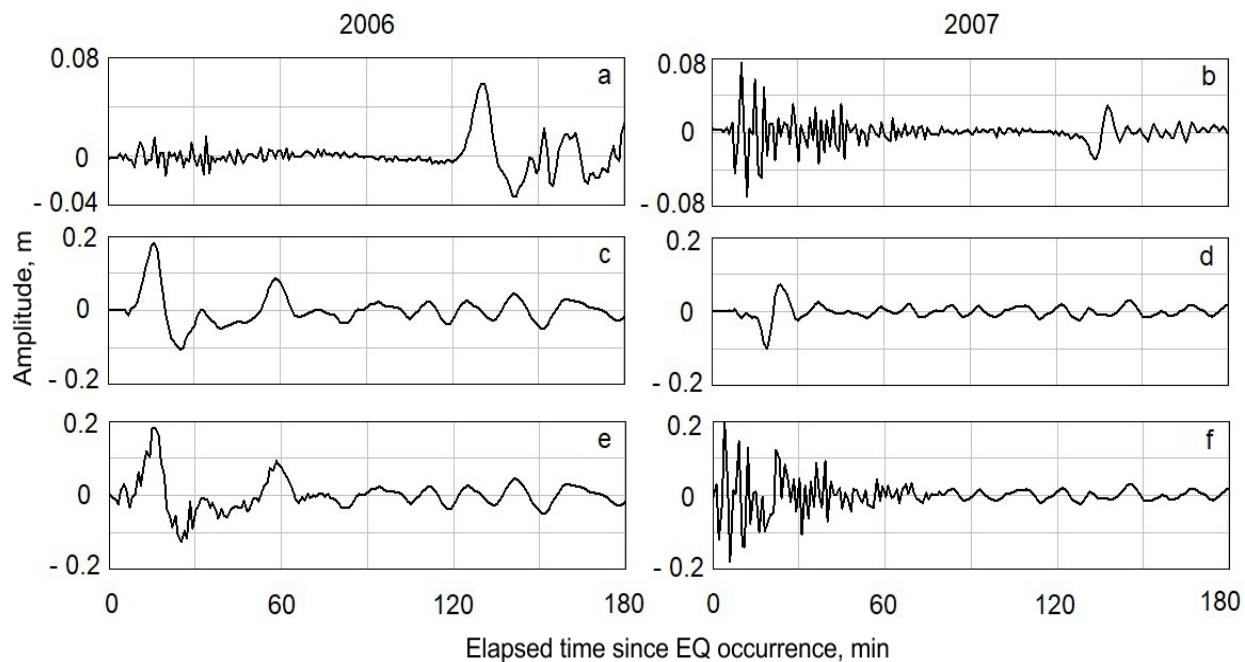


Figure 4. Initial data of the numerical experiment on 2006 and 2007 Simushir tsunamis forecasting: a, b – record of the DART 21414 station; c, d – reconstructed waveform of “pure” tsunami at the DART 21419 station; e, f – reconstructed record with noise at the DART 21419 station.

2007 Simushir tsunamis, the tsunami waveform was reconstructed at the current location of the DART 21419 using the actual data of the DART 21414. The reconstructed noises of seismic origin recorded by the DART 21414 station were added to the tsunami data at this point. A detailed simulation of the process of short-term forecast of the Simushir tsunamis in 2006 and 2007 is described in [Korolev, 2019].

Figure 4 a, b show the initial data obtained by the DART 21414 station in 2006 and 2007 (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>), reconstructed tsunami waveforms (“pure” tsunamis) of the DART 21419 virtual station (Figure 4 c, d), as well as the reconstructed records of this station with added noise (Figure 4 e, f).

A numerical experiment on simulation of the process of short-term tsunami forecast consisted in calculating the waveform of the expected tsunami in the human settlements of the Kuril Islands and Hokkaido Island using the reconstructed tsunami data from the DART 21419 virtual station.

Alaska earthquake on 23.01.2018 with an epicenter at the point with

coordinates of $56^{\circ}02'46''$ N, $149^{\circ}04'23''$ W near Kodiak Island caused a weak tsunami recorded by a number of the DART stations (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>), as well as by many coastal tide gauges. The tsunami did not cause any damage, but the event provides a good opportunity to test the validity of various models of direct calculation and short-term tsunami forecast using the factual material.

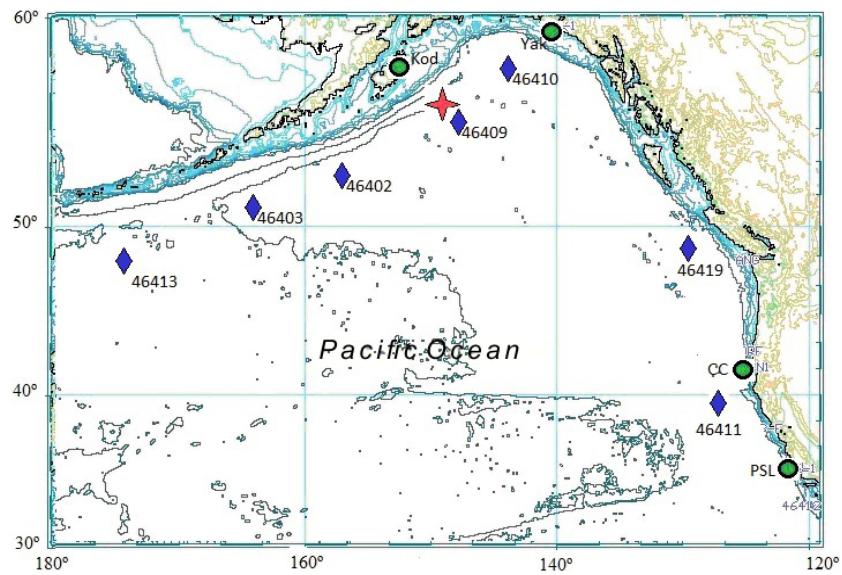


Figure 5. The scheme of the area of simulation. The asterisk is the epicenter of the earthquake, the diamonds are the positions of the DART stations, the circles are the settlements: Kod – Kodiak, Yak – Yakutat, CC – Crescent City, PSL – Port San-Luis.

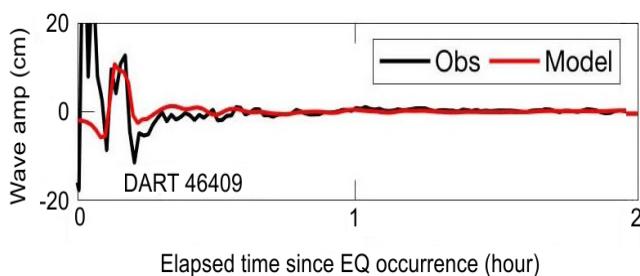


Figure 6. Initial (black line) record of the DART 46409 station in 2018.01.23 and reconstructed tsunami waveform (red line) (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>).

Figure 5 shows the scheme of area of simulation.

The DART 46409 station closest to the tsunami source was located at a distance of about 90 km from the epicenter with a travel time of about 10 min. Therefore, the data of this station contain a record of both the tsunami as such and the noise caused by seismic reasons (Rayleigh waves) superimposed on the useful signal (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>).

The initial data for the forecast was the record of this station, from which only the tidal components were removed. According to the NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>), in the record of the DART 46409 station, the tsunami itself corresponds to the data starting from the 7th minute of the record (Figure 6). The preceding oscillations are conditioned by seismic noise.

The numerical experiment consisted in simulation of the process of short-term forecast of the tsunami on 23.01.2018 for the northern and north-eastern parts of the Pacific Ocean using the data from the DART 46409 station.

Results

2020 Onekotan tsunami

To construct the transfer function, we solved the support task of waveforms calculating at the points of tsunami registration and near the given settlements from the circular initial elevation of the free surface with a diameter of 100 km and an amplitude of 10 m with a center coinciding with the earthquake epicenter. The calculation was carried out in spherical coordinates using a difference grid with a step of 1 km at a latitude of 45°. The calculated area of the numerical experiment is shown in Figure 1.

Calculations near the settlements of the Kuril Islands, as well as near the “Vodopadnaya” sea

level measuring station, were performed at the points where the water depths are 10–20 m. These values are determined by the capabilities of the difference grid, as well as by the fact that waves at these depths are obviously linear.

To compare the calculation results with the actual data, the tsunami waveform was calculated at the DART 21415 station and off the coast of Kamchatka near the “Vodopadnaya” sea level measuring station. The calculation was carried out by the data on the “pure” tsunami of the DART 21402 station. The results are shown in Figure 7.

The calculated and recorded waveforms at the DART 21415 station conform to each other well enough. The quality of the calculations is comparable with the similar calculations in (<https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325>). A similar quality of coincidence was obtained in tsunami calculations based on detailed information about the earthquake of 25.03.2020 and the initial shift of the ocean level presented on the website of the Scientific Council on Tsunami Problems at the Department of Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences (<http://ocean.phys.msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/>).

The calculated waveform near the “Vodopadnaya” sea level measuring station and the record obtained by this station agree well. If necessary, the calculated waveform is quite suitable for assessing the tsunami hazard near this point.

The calculation of the expected tsunami for the settlements of the Kuril Islands was carried out on the basis of reconstructed noisy and noise-free data from the DART 21402 virtual station with a

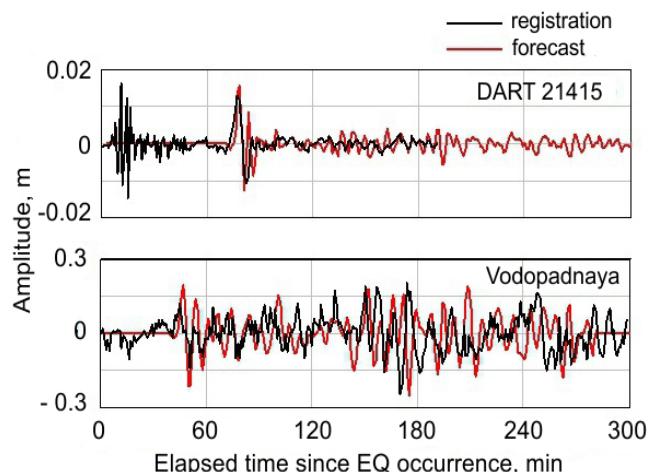


Figure 7. The results of the tsunami waveform calculation using the data on the “pure” tsunami by the DART 214 02 station during the 2020 Onekotan tsunami.

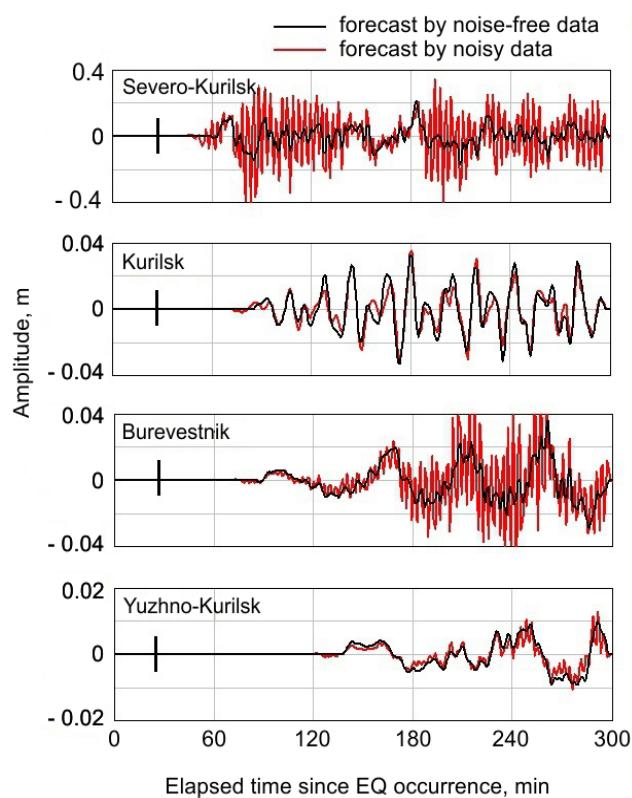


Figure 8. Results of the retrospective short-term forecast of the 2020 Onekotan tsunami according to the reconstructed noisy and noise-free data from the DART 21402 station. The vertical bar is the moment of forecast.

duration of 28 minutes from the earthquake origin time. The calculation result is shown in Figure 8.

The tsunami waveforms for Kurilsk and Yuzhno-Kurilsk, calculated using the noisy and noise-free data, are practically not distorted and coincide well with each other.

The tsunami waveform near Severo-Kurilsk calculated from noisy data contains high-frequency oscillations. Even having a little experience of acquaintance with the registered tsunami waveforms, it is easy to understand, that high-frequency oscillations in the calculated waveform are not related to tsunamis. The actual waveform of the tsunami and the hazard degree can be assessed well despite the presence of these high-frequency emissions. The tsunami waveform calculated by the noise-free data is also shown in Figure 8.

Based on the obtained calculation, we can conclude that in Severo-Kurilsk the arrival of the first wave with an amplitude of about 15 cm is expected 69 minutes from the earthquake origin time. A visual assessment of the wave height of 50 cm was made near the water's edge at a depth of about 1 m. The calculated amplitude of 15 cm was obtained at the point where the sea depth is 17 m.

In accordance with the well-known Green's law, under which the wave amplitude a_1 at the depth D_1 is related to the amplitude a_0 at the depth D_0 by the ratio $a_1/a_0 = (D_0/D_1)^{1/4}$, recalculation of the 15 cm amplitude to the point, where the depth is 1 m and the wave remains linear, gives an amplitude of about 30 cm.

The calculated waveform for the Burevestnik also contains high-frequency oscillations. As in the case of the calculated waveform for Severo-Kurilsk, their presence does not affect the assessment of the tsunami hazard.

The tsunami forecast for the listed points by the data on the “pure” tsunami of the DART 21416 operating station and the DART 21402 virtual station are practically identical.

The forecast lead time is determined by the following: the data on the coordinates of an earthquake epicenter should be obtained 11–15 minutes from the earthquake origin time, the time from the moment of receiving information on the epicenter coordinates, which is necessary to construct the transfer function, is up to 15 minutes. In total, the time of readiness for forecast execution is 26–30 minutes from the earthquake origin time. By this moment, the DART 21419 station can receive information that makes it possible to identify the tsunami (under the experimental conditions, the first wave period was selected for calculations). The forecast could be given immediately after the passage of the first tsunami period through the DART 21402 station, i.e. 28 minutes from the earthquake origin time. This time point is marked in Figure 8 with a vertical bar.

The forecast lead time is 41 minutes for Severo-Kurilsk, 65 – for Kurilsk, 71 minutes – for Burevestnik (Kasatka Bay), and 116 minutes – for Yuzhno-Kurilsk. This is enough to make a decision to declare an alarm. Due to the small amplitudes of the expected waves in these settlements, the alarm could not be announced.

Unfortunately, due to the lack of instrumental observations, it is not possible to confirm or refute the presented calculation results.

2006 and 2007 Simushir tsunamis

Forecast of tsunamis 2006 and 2007 was executed for the points of the Kuril Islands and Hokkaido Island [Korolev, 2019]. Figure 9 shows the results of the 2006 and 2007 tsunamis forecast according to the reconstructed noisy data from the DART 21419 virtual station with a duration of 32

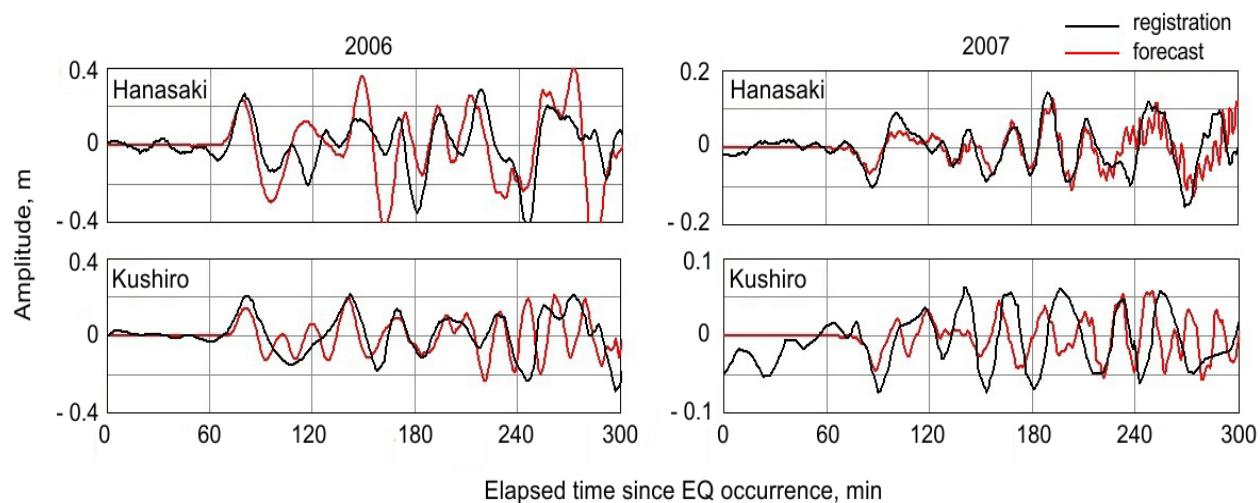


Figure 9. Results of the retrospective forecast of the tsunamis of 2006 and 2007 according to the reconstructed noisy data by the DART 21419 station with duration of 32 min (left) and 35 min (right).

and 35 minutes from the earthquake origin time and comparison with the real records.

The results of the tsunami forecasts in Hanasaki coincide well with the waveforms of the recorded tsunamis. For the event of 2007, the forecast based on noisy data differs from the forecast based on “pure” data by the presence of high-frequency oscillations after 180 minutes that are not related to the tsunami. However, the presence of such oscillations cannot affect the decision to declare the tsunami alarm.

The calculated waveforms of the tsunami at Kushiro for both events conform well to the real

ones. The forecasts made by the noisy and noise-free data are almost the same.

Contrary to the fears, the forecast for Hanasaki and Kushiro based on the data complicated with noise of seismic origin is quite adequate. The quality of the forecast makes it possible to reliably assess the hazard of the expected tsunami and make a decision to announce an alarm at these points.

The forecast results for the settlements of the Kuril Islands are not presented due to the absence of tsunami registration at these points and the impossibility of comparing the calculated and actual

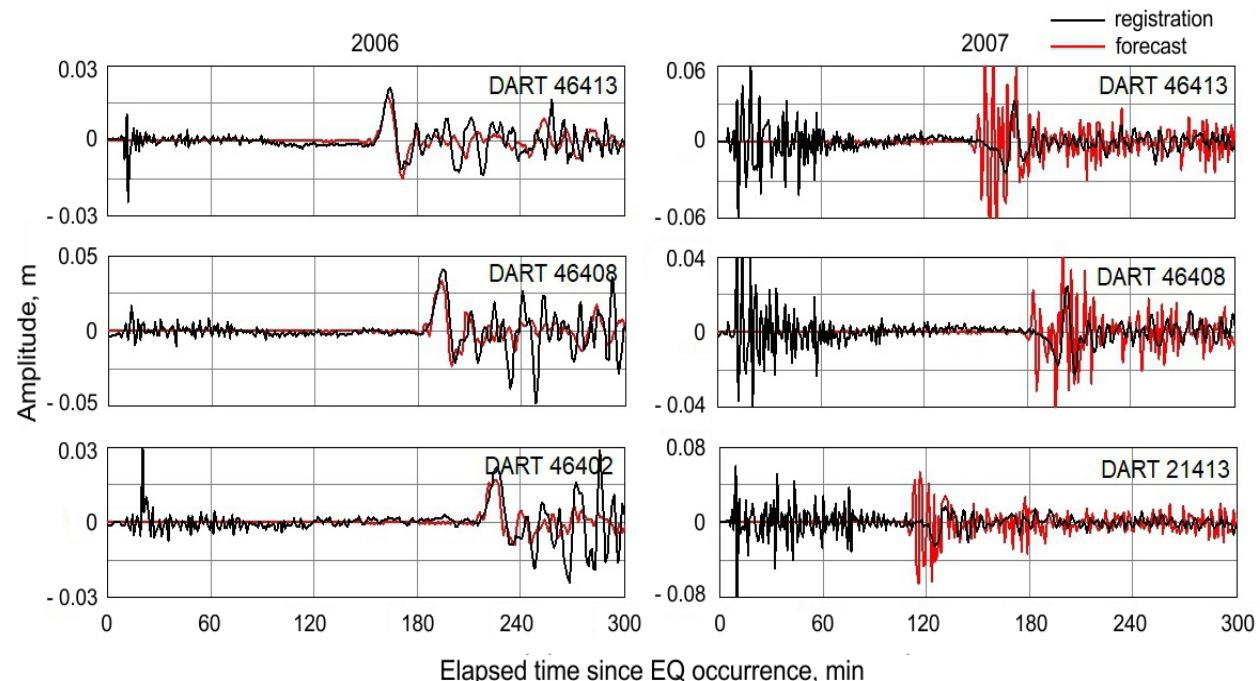


Figure 10. Results of the retrospective forecast of the tsunami 2006 and 2007 based on the reconstructed noisy data by the DART 21419 station at the locations of DART stations system in the ocean.

tsunami waveforms. Nevertheless, it is possible to assess the forecast lead time for these points.

The forecast lead time calculated according to the data of the DART 21419 station (the first tsunami period) for the settlements is 45 min for Hanasaki, 50 min – for Kushiro, 1.5 hours – for Yuzhno-Kurilsk, 34 min – for Burevestnik (Katsatka Bay, Iturup Island), about 20 min – for Kurilsk, and about 1 hour – for Severo-Kurilsk. Such a forecast lead time for points in the northern and southern Kuril Islands ensures timely alarm and evacuation of the population to safe places.

Similar calculations based on the noisy data from the DART 21419 station were also performed for the points in the ocean where the DART stations were located. The calculations were performed in spherical coordinates on a difference grid with a step of 3.83×3.83 km at a latitude of 40° N. The DART 21413 station is 700 nautical miles southeast of Tokyo and the DART 46402, 46408 and 46413 are located along the Aleutian Islands. Figure 10 shows the calculation results.

In the case of event of 2006, the presence of noise in the initial data (at the DART 21419) does not affect the forecast quality.

For the 2007 Simushir tsunami, the presence of noise in the initial data of the DART 21419 virtual station leads to the appearance of noise in the resulting waveforms at the DART stations 46413, 46408, and 21413. However, their presence, as

in the event of 2020 (forecast for Severo-Kurilsk and Burevestnik) does not cause the difficulties in assessing the waveform of the tsunami itself and its hazard degree. The calculated waveforms from the noise-free data of the same station practically coincide with the recorded ones.

2018 Alaska tsunami

In numerical experiments, an auxiliary source with a center coinciding with the earthquake epicenter, 75 km in diameter and with a maximum amplitude of 8 m was used to construct the transfer function. Spherical coordinates were used on a difference grid with a step of 3.83×3.83 km at a latitude of 40° N. The diagram of the area of simulation is shown in Figure 4.

The forecast was made using the data of the DART 46409 station with a duration of 16 min from the earthquake origin time, including records of both the tsunami itself and seismic noise (Figure 5). The forecast results at the points of registration by the DART stations in the ocean are shown in Figure 11. We used the data from the DART stations for comparison with the waveform of a real tsunami (<https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml>).

Despite the existing emissions, we obtained a good enough agreement between the calculated and real waveforms. The calculation results allow us to assess the degree of tsunami hazard.

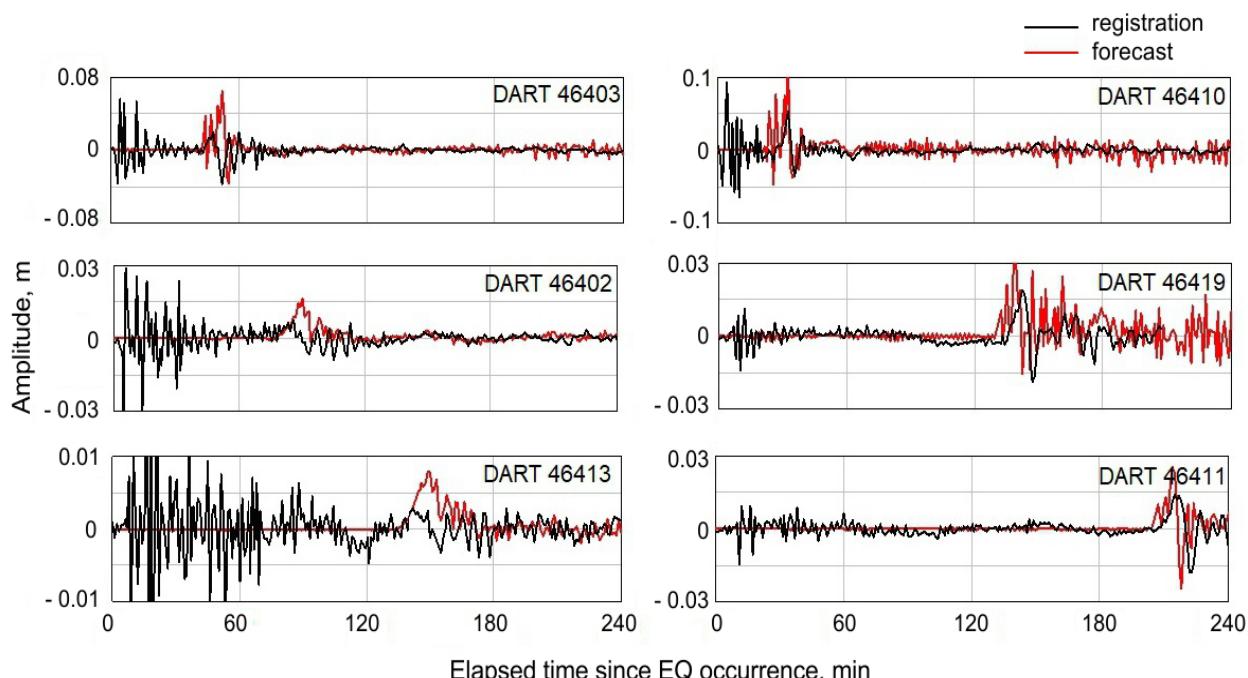


Figure 11. Results of the 2018 Alaska tsunami forecast based on the data from the DART 46409 station at registration points by the DART stations in the ocean.

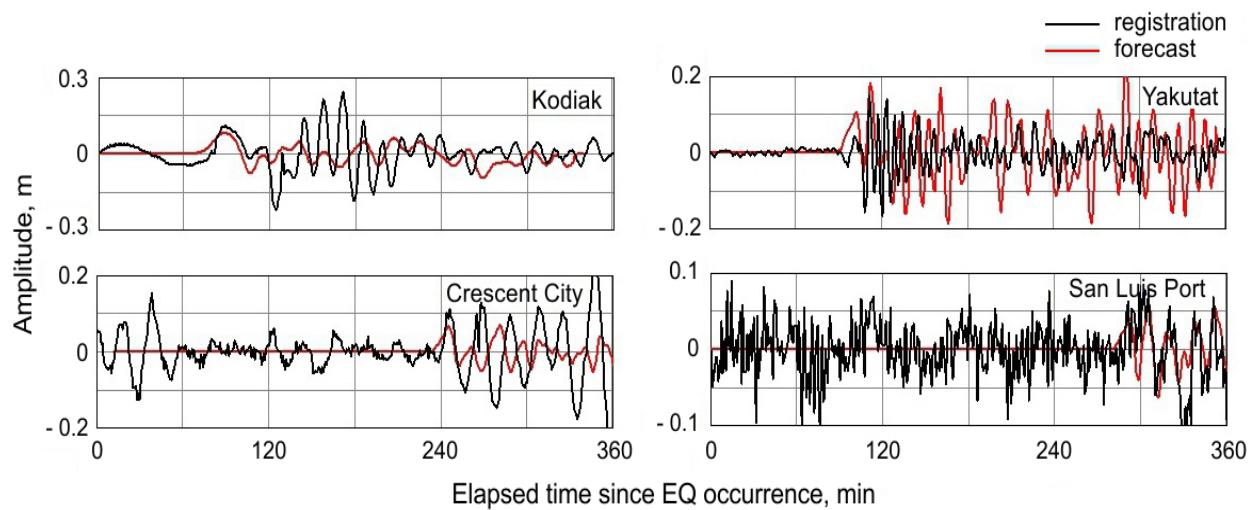


Figure 12. Results of the 2018 Alaska tsunami forecast based on the data from the DART 46409 station near populated areas.

The quality of the forecast corresponds to the quality of the calculations presented in (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>).

The forecast was also made for some points near the coast in the northeastern part of the Pacific Ocean. The results are shown in Figure 12. Tide gauge data are taken for comparison from the Sea Level Station Monitoring Facility (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc>). The influence of seismic noise in the record of the DART 46409 station on the calculated tsunami waveforms does not appear.

Due to the roughness of the difference grid, the calculated points were located at a sufficiently large distance from the registering tide gauges (from 3 to 15 km). Despite significant discrepancies in the locations of the calculated points and tide gauges, a good enough correspondence of the head parts of the calculated and actual waveforms was obtained.

The calculated tsunami waveforms allow us to assess the degree of tsunami hazard in populated areas. The quality of the calculations is comparable to similar calculations in (<https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123>).

A forecast of a similar quality was also obtained by the data of other DART stations closest to the source – 49403 and 46410. The forecast was carried out using the data on the “pure” tsunami received by these stations.

Discussion

The actions of the tsunami warning service in the Sakhalin Region on 25.03.2020 within the framework of the current regulations in the absence of any information about the expected tsunami are justified. Moreover, the International Pacific Tsunami Warning Center (PTWC, Honolulu) and the Japan Meteorological Agency reported about possible destructive tsunami waves in the Kuril Islands with an amplitude of 1–3 m. However, due to the small amplitude of the tsunami, the announced alarm appeared to be false by the forecast of both the Sakhalin service, and the foreign ones. The prolongation of the tsunami alarm after the arrival of the first low-amplitude waves was also groundless. Both the Sakhalin Tsunami Service and the Pacific Center have operated on the basis of the magnitude-geographic method developed in the middle of the last century, which, with some adjustments, is currently the main method of tsunami warning. Due to the statistical nature of the magnitude method, the tsunami service, since the moment of its creation until 2009, raise a large number (75% of the total number of alarms) of false alarms, while missing some tsunami [Gusiakov, 2011]. The alarm was announced on long coasts without information about the expected wave heights.

In the United States, the hydrophysical SIFT method (Short-term inundation forecasting for tsunamis) based on information about tsunami in

³ UNESCO/IOC. 2019. Users’ guide for the Northwest Pacific Tsunami Advisory Center (NWPTAC): Enhanced Products for the Pacific Tsunami Warning System. IOC Technical Series, 142. URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366546?posInSet=1&queryId=d1288da0-390e-47b1-8a51-a529b04abf93> (accessed 6.11.2020)

the ocean (DART system) provides an advance numerical estimate of the amplitude, travel time, and other properties of tsunami (<https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html>; [Titov, 2009; Wei et al, 2003]). Calculations are performed for the US West Coast, the coast of Alaska and the Aleutian Islands. For the Pacific Northwest, including the coast of Kamchatka and the Kuril Islands, the Pacific Tsunami Warning Center makes a forecast based on the magnitude criterion.

Japan Meteorological Agency in charge of tsunami forecast for the Pacific Northwest, acting under new regulation³. The database of tsunami heights at a large number of points in the ocean is used when forecasting. In particular, for the Kuril Islands, one of the points is located some kilometers north of the Paramushir Island, the other is a few kilometers east of the northern tip of Urup Island. The database is based on the results of preliminary calculations of tsunami heights from seismic sources with the most probable earthquake mechanism and various magnitudes (8.5, 8.0, 7.5 and 7.0), as well as different hypocenter depths (0, 20, 40, ..., 100 km). The sources cover areas of probable tsunamigenic earthquakes rather densely. The maximum wave amplitudes are estimated approximately at a certain distance from the coast and near the shore at depths of 1 m in accordance with the well-known Green's law, regardless of the incoming wave amplitude. In this case, the decision to declare a tsunami alarm is assigned to the regional centers. A similar approach was proposed as early as 1996 [Whitmore, Sokolowski, 1996] at the beginning of the development of the hydrophysical observation system. Subsequently, this approach, as unpromising, was abandoned in favor of the hydrophysical method based on the data on the formed tsunami in the open ocean [Titov, 2009; Wei et al, 2003].

All three forecasts of the tsunami on 25.03.2020, based on the magnitude criterion, and the JMA forecast, in fact, also relies on an estimate of a magnitude, appeared to be ineffective: with the forecasted height of 1–3 m, the actual one was about 0.5 m.

The forecast by any of the above services does not meet the definition of a tsunami forecast given by the UNESCO IOC⁴ due to the lack of detailed

information about the expected tsunami: neither the wave structure nor the duration of the alarm are determined.

In contrast to seismological methods based on information on the earthquake magnitude, hydrophysical methods for tsunami forecast using the data on the formed tsunami in the ocean are able to provide information about the expected tsunami in advance in accordance with the UNESCO IOC definition.

One of these methods, the method for short-term tsunami forecasting, that requires seismological information only about the origin time and coordinates of the earthquake epicenter, can provide an adequate early forecast. Even if the initial data contains the noise of seismic origin, the calculated tsunami waveform makes it possible to assess the hazard degree sufficient to make a decision to declare a tsunami alarm. The presence of high-frequency oscillations in the calculated waveform of the expected tsunami does not affect the adequacy of the hazard assessment. The calculation of waveforms was carried out at the points where the water depths are 10–20 m, at distances from the coastline of 1.5–3 km. The calculated amplitudes serve as a guideline for taking a decision on alarm by the tsunami warning service. It is recalled that the work uses the method, i.e. operating calculation algorithms, but not a software suite ready for use in practical work. When realizing the method in the software suite, it is possible to further calculate the tsunami up to the coastline, if the operating conditions allow it, and filtering from high-frequency emissions can and should be applied, the tidal regime should be taken into account.

Unfortunately, the hydrophysical subsystem of the tsunami warning service in Russia does not perform the forecast based on hydrophysical data. Russia is almost the only country in the Pacific Ocean basin that does not have deep-ocean level measuring stations allowing an short-term tsunami forecast. There is a need to develop Russian deep-ocean level measuring stations for early and reliable detection and short-term forecasting of tsunamis⁵.

Moreover, there is no regular registration of sea disturbance on the Kuril Islands, which are

⁴ http://legacy.ioc-unesco.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=10442

⁵ [Solution of VII All-Russian scientific and technical conference “Problems of complex geophysical monitoring in the Russian Far East”. 2019]. URL: <http://emsd.ru/conf2019lib/pdf/solution.pdf> (accessed 6.11.2020). (In Russ.).

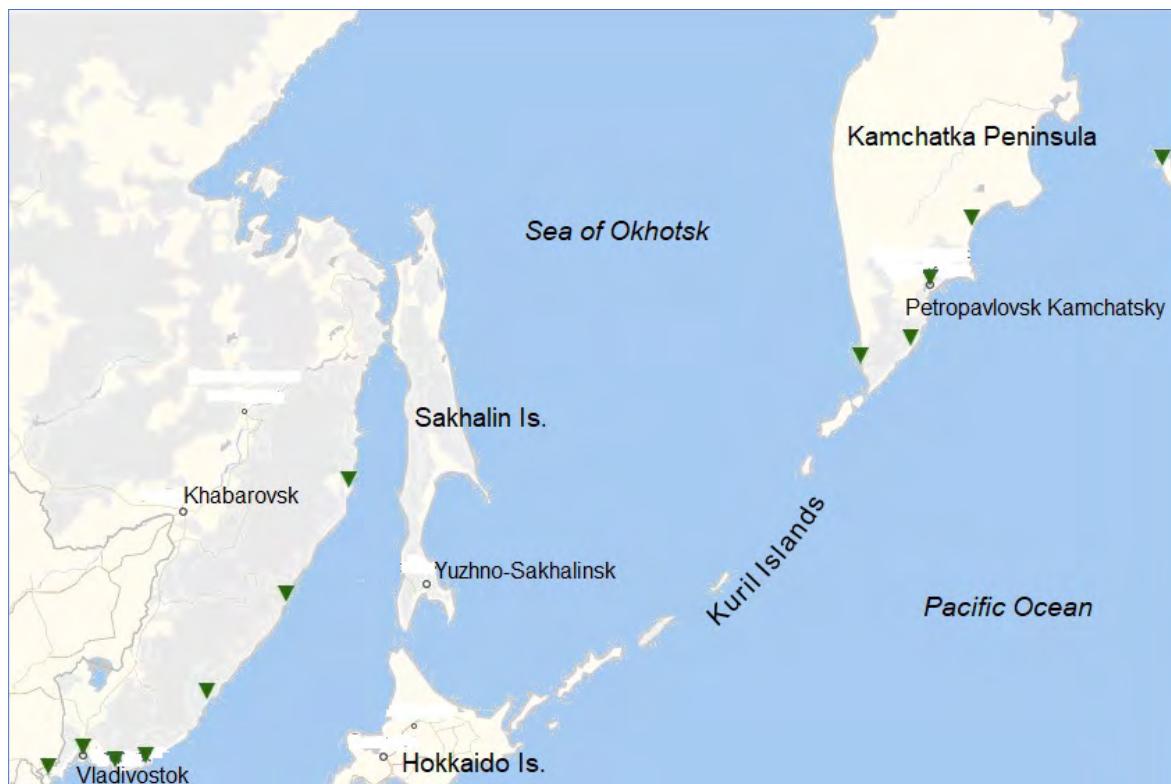


Figure 13. Sea level measurement posts in the Far East (marked with triangles) (<http://rtws.ru/sea-level/>).

most vulnerable to tsunami's impact. Figure 13 shows the layout of automatic posts for sea level measurement of the Russian Tsunami Warning Service. Posts have been installed and operate in the Kamchatka, Khabarovsk and Primorye, but they are absent in the Kuriles.

Conclusions

We carried out the simulation of the process of short-term forecast of the tsunami of 2006, 2007, 2018 and 2020 according to the data of the stations closest to the sources, containing unavoidable noise of seismic origin. For the tsunami of 2018, simulation was performed using actual data from the DART 46409 station located in the immediate vicinity of the source. The records contained noise conditioned by the passage of Rayleigh waves. There are no such data for events 2006, 2007 and 2020; therefore, the records of the virtual ocean level measuring stations closest to the sources, including seismic noise, were reconstructed from the data of the DART stations more remote from the sources.

The presence of unavoidable noise in the data of stations close to the source leads to the appearance of high-frequency oscillations superimposed on the waveform of the tsunami itself, in the re-

sults of calculations. Despite this, an adequate assessment of the tsunami waveform is possible. The quality of the calculation is sufficient for making an early decision to announce an alarm at the point where the tsunami poses a real hazard. The result is fully consistent with tsunami forecast definition by the UNESCO IOC.

The calculation results correspond well with the data of tsunami registration by the coastal tide gauges and the DART stations in the ocean. The quality of the forecast performed by the proposed method of short-term tsunami forecast is comparable to the quality of calculations using the SIFT method.

Contrary to the assumption that unavoidable seismic noise in a tsunami record at the stations close to the source may prevent from obtaining an adequate forecast, an operational forecast of local tsunamis is quite possible, despite high-frequency oscillations superimposed on the waveform of the expected tsunami.

The proposed method of short-term tsunami forecast, implemented within a single software package, can serve as a tool that will improve the quality of short-term tsunami warning, significantly reducing the number of false tsunami alarms.

References

1. Gusiakov V.K. **2011.** Relationship of tsunami intensity to source earthquake magnitude as retrieved from historical data. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11): 2033–2041. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0286-2>
2. Korolev Yu.P. **2011.** An approximate method of short-term tsunami forecast and the hindcasting of some recent events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 3081–3091. <https://doi:10.5194/nhess-11-3081-2011>
3. Korolev Yu.P. **2019.** On opportunity of short-term forecast for local tsunamis in the Kuril Islands. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika* [Fundamental and applied hydrophysics], 12(4): 14–20. (In Russ.)
4. Lavrentiev M., Lysakov K., Marchuk An., Oblaukhov K., Shadrin M. **2019.** Fast evaluation of tsunami waves heights around Kamchatka and Kuril Islands. *Science of Tsunami Hazards*, 38(1): 1–13.
5. Nurislamova G.N., Nosov M.A. **2016.** The horizontal motion of a water layer during the passage of tsunami waves based on data from a dense ocean-floor network of deepwater sea-level stations. *Moscow University Physics Bulletin*, 71(5): 520–525. <https://doi.org/10.3103/s0027134916050143>
6. Titov V.V. **2009.** Tsunami forecasting. In: E.N. Bernard, A.R. Robinson (eds). *The Sea*. Vol. 15: *Tsunamis*. Cambridge, MA; London, England: Harvard Univ. Press, 367–396.
7. Wei Y., Cheung K.F., Curtis G.D., McCreery Ch.S. **2003.** Inverse algorithm for tsunami forecasts. *J. Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering. ASCE*, 129(2): 60–69. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950x\(2003\)129:2\(60\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(2003)129:2(60))
8. Whitmore P.M., Sokolowski T.J. **1996.** Predicting tsunami amplitudes along the North American coast from tsunamis generated in the Northwest Pacific Ocean during tsunami warnings. *Science of Tsunami Hazards*, 14(3): 147–166.

Data sources

1. *National Centers for Environmental Information: Search Tsunami Events.*
URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (accessed 6.11.2020)
2. *National Data Buoy Center.* URL: <https://ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (accessed 6.11.2020)
3. *NOAA Center for Tsunami Research: DART.* URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (accessed 6.11.2020)
4. *NOAA Center for Tsunami Research: Kodiak, Alaska Tsunami, January 23, 2018 Main Event Page.*
URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/alaska20180123> (accessed 6.11.2020)
5. *NOAA Center for Tsunami Research: Kuril Islands Tsunami, March 25, 2020 Main Event Page.*
URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/kuril20200325> (accessed 29.11.2020)
6. *NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting.*
URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html> (accessed 7.12.2020)
7. *Sea Level Station Monitoring Facility* (Unesco. IOC). URL: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php?showall=a&output=general&order=location&dir=asc> (accessed 6.11.2020)
8. *Nauchnyy Sovet po problemam tsunami pri otdelenii nauk o Zemle RAN: Rezulaty modelirovaniya tsunami 25.03.2020 s pomoshchyu modeli NAMI-DANCE* [Research Council on the tsunami problems of Earth sciences department RAS: Results of simulation of tsunami 25.03.2020 using the NAMI_DANCE model].
URL <http://ocean.phys.msu.ru/tsunami-council/news/2020/04/200325-namidance/> (accessed 6.11.2020)
9. *Rossiyskaya sluzhba preduprezhdeniya o tsunami: Izmereniya urovnya morya* [Russian tsunami warning service: Measuring sea level]. URL: <http://rtws.ru/sea-level/> (accessed 6.11.2020)
10. [Sakhalin service for hydrometeorology and environmental monitoring: On the threat of a tsunami after the earthquake near the coast of the North Kuril region on March 25, 2020].
URL: <http://sakhugms.ru/index.php/o-nas/strutura/tsentr-tsunami> (accessed 6.11.2020)

About the Authors

KOROLEV Yury Pavlovich (ORCID 0000-0002-7068-7341), Cand. in Physics and Mathematics, lead researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Yu_P_K@mail.ru

KOROLEV Pavel Yurievich (ORCID 0000-0003-3741-7654), junior researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics of FEB RAS (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk