

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ НА ТИХООКЕАНСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ, ВОЗНИКШИХ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАН 15 ЯНВАРЯ 2022 ГОДА

© 2024 г. И. П. Медведев^{1,*}, Т. Н. Ивельская², А. Б. Рабинович¹,
Е. С. Цуканова¹, А. Ю. Медведева^{1,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Центр цунами Сахалинского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды,
Южно-Сахалинск, Россия

³Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: patamates@gmail.com

Поступила в редакцию 10.07.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 18.12.2023 г.

Извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. вызвало цунами, которое затронуло весь Тихий океан. Было установлено, что зарегистрированные волны цунами от этого события были сформированы как волнами, приходящими из района источника со скоростью океанских длинных волн (~200–220 м/с), так и атмосферной волной, распространяющейся со скоростью звука (~315 м/с). Такой двойной механизм источника создал серьезную проблему и явился настоящим вызовом для существующих служб предупреждения о цунами в Тихом океане. Подробно рассматривается работа Российской службы предупреждения о цунами (Южно-Сахалинск) во время этого события. Цунами было четко зарегистрировано на побережье северо-западной части Тихого океана и в прилегающих окраинных морях, включая Японское, Охотское и Берингово. В работе исследуются полученные с высоким разрешением (1 мин) записи 20 мареографов и 8 станций атмосферного давления в этом регионе за период 14–17 января 2022 года. На российском побережье самые большие волны с высотой от подошвы до гребня 1.3 м были зарегистрированы на станциях Малокурильское (о. Шикотан) и Водопадная (юго-восточное побережье Камчатки). Используя методы численного моделирования и анализа данных, океанские «гравитационные» волны были отделены от «атмосферных» волн давления. В целом, было обнаружено, что на внешних (океанских) побережьях и южном побережье Охотского моря преобладают океанические волны цунами, в то время как на побережье Японского моря океанические и атмосферные волны цунами имеют близкие высоты.

Ключевые слова: цунами, вулкан Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, Тихий океан, волны Лэмба, Охотское море, Японское море, Служба предупреждения о цунами, извержение вулкана

DOI: 10.31857/S0030157424020021 **EDN:** RWXLXG

ВВЕДЕНИЕ

Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (далее Хунга-Тонга) — подводный вулкан, расположенный в южной части Тихого океана между двух необитаемых островов Хунга-Тонга и Хунга-Хаапай, примерно в 65 км к северу от Тонгатапу, главного острова архипелага Тонга. Данный вулкан — один из элементов протяженной «горячей» сейсмоактивной субдукционной зоны Тонга—Кермадек, протянувшейся от Новой Зеландии до островов Фиджи (рис. 1). После семилетнего затишья (с 2014 г.) вулкан начал активно извергаться во второй половине декабря 2021 г. [17, 36]. Резкая интенсификация процесса нача-

лась 14 января 2022 г. На следующий день, 15 января 2022 г. в 04:15 UTC, произошел сильнейший взрыв вулкана, который был зафиксирован на многочисленных спутниковых фотографиях (см., например, [15, 21, 56]). Атмосферные волны, вызванные извержением, достигли ионосферы [19, 50, 57] и несколько раз обогнули земной шар [16, 35, 38].

По своему масштабу и глобальному эффекту это событие для современной инструментальной эпохи является уникальным. Известны только два сходных исторических события подобного масштаба: (1) взрыв вулкана Санторин (о. Тира) в Средиземном море, произошедший около 1600 лет до н.э. (см., например, [36, 43]);

(2) катастрофическое извержение вулкана Кракатау в Зондском архипелаге (Индонезия) в 1883 г., которое также вызвало сильнейшие атмосферные волны и другие аномальные геофизические явления [24, 45].

Как показывают современные оценки, взрыв вулкана Санторин сгенерировал сильнейшее цунами, которое обрушилось на острова Эгейского моря, в частности на северное побережье о. Крит, и, как предполагают ученые, стало одной из причин гибели минойской цивилизации. Естественно, никаких достоверных измерений цунами в то время не существовало и никакие хроники до нашего времени не дошли, но некоторые оценки высот волн были получены на основе численного моделирования, археологических данных и данных об отложениях цунами [43].

В противоположность взрыву вулкана Санторин, произошедшему 3600 лет назад, извержение вулкана Кракатау в 1883 г. хорошо задокументировано, и его описание вошло в многочисленные книги и учебники (см., например, [7, 9]). Атмосферные волны были зарегистрированы по всему земному шару [22]. Извержение вызвало катастрофические волны цунами высотой свыше 30 м и привело к гибели 36 тыс. жителей близлежащих индонезийских островов [9]. Цунами было зарегистрировано примерно на 30 мареографах, расположенных в различных районах Мирового океана, включая столь удаленные как Гавр (Франция), Портленд и Давенпорт (оба Великобритания) в проливе Ла-Манш, Колон (Панама), Сан-Франциско (Калифорния, США) и Кодьяк (Аляска, США) [44]. При этом, как было показано в работах [22, 24, 27], колебания уровня моря на этих удаленных станциях были вызваны не прямой волной цунами, пришедшей из источника, а атмосферными волнами, взаимодействующими с океаном, т.е. фактически это были «метеоцунами» [41]. Заметим, что в 1883 г. как регистрации атмосферных волн, так и регистрации волн цунами мареографами представляли собой аналоговые бумажные записи; соответственно для анализа этих записей требовалась их предварительная аккуратная оцифровка [44].

Ситуация со взрывом вулкана Хунга-Тонга иная. Это событие, в отличие от взрыва Кракатау, не сопровождалось многочисленными жертвами: в общей сложности погибло шесть человек, из них четверо — на островах Тонга и двое — в Перу; еще 19 человек было ранено (https://en.wikipedia.org/wiki/2022_Hunga_Tonga%E2%80%9393Hunga_Na%27apai_eruption_and_tsunami). Однако это подводное извержение и волны от него имели

планетарный масштаб, они были зарегистрированы тысячами высокоточных цифровых приборов, включая микробарографы, береговые мареографы и глубоководные измерители волн цунами (см., например, [16, 31, 32, 34, 35, 37, 49] и др.). Как и при извержении вулкана Кракатау, взрыв вулкана Хунга-Тонга привел к формированию океанских волн цунами под действием двух различных механизмов внешнего воздействия. Первый тип волн цунами сформировался непосредственно вблизи области извержения вулкана и в дальнейшем распространялся по Тихому океану со скоростью длинных океанских волн (~200–220 м/с в глубоководной части океана). Взрыв вулкана также сгенерировал более быстрые атмосферные волны Лэмба [16, 35, 38], которые распространялись вокруг земного шара со скоростью звука (около ~300–320 м/с), т.е. примерно в полтора раза быстрее океанских волн. Эти атмосферные волны сгенерировали второй тип волн цунами, которые можно назвать «метеоцунами» или «атмосферными цунами»; они проявились во многих частях Мирового океана, включая Тихий, Атлантический и Индийский океаны, Средиземное море, Мексиканский залив и др. (см., например, [16, 18, 30, 31, 35, 42, 48, 49]).

Оба типа волн, образовавшихся вследствие извержения вулкана Хунга-Тонга, ярко проявились на Тихоокеанском побережье России [2, 51]. При этом Российской службе предупреждения о цунами (СПЦ) удалось успешно преодолеть проблемы, возникшие при оперативном прогнозе столь сложного явления. Большую помощь в этом отношении оказали глубоководные станции DART¹, установленные в северо-западной части Тихого океана, а также островные и японские береговые мареографы. В настоящем исследовании рассматриваются вопросы, связанные с функционированием СПЦ во время этого экстраординарного события, анализируется характер проявления волн цунами на побережье России и в близлежащих районах, оцениваются основные статистические параметры наблюдаемых волн.

ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ ЦУНАМИ

Российская СПЦ — это важный элемент Тихоокеанской системы предупреждения о цунами (ТСПЦ)². Отечественная СПЦ была создана в 1958–1959 гг. как реакция на катастрофическое цунами 5 ноября 1952 г., которое, по разным данным, привело к гибели от 2–4 тыс. [14] до 15–17 тыс. человек [11] на Курильских о-вах и Камчатке. При ее создании изначально предполагалось,

¹ Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) — глубоководная система датчиков, развернутая Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA, США) вдоль сейсмически активных областей Тихого океана для мониторинга волн цунами.

² Pacific Tsunami Warning System (PTWS).

что наибольшую угрозу для российского побережья представляют землетрясения с очагами, непосредственно прилегающими к этому побережью (т.е. землетрясения, происходящие в Курило-Камчатской, Алеутской и Японской зонах субдукции). Однако сокрушительное Чилийское цунами 22 мая 1960 г. показало, что удаленные землетрясения, особенно с очагами, расположенными в Чилийской зоне субдукции, также представляют серьезную угрозу для побережья России [4, 14, 40]. Чилийское цунами было вызвано землетрясением с моментной магнитудой $M_w = 9.5$, самым за все время инструментальных измерений. Образовавшаяся волна прошла через весь Тихий океан, приведя к многочисленным человеческим жертвам и серьезным разрушениям на побережьях Гавайских о-вов, Филиппин и Японии [12, 33]. Через проливы Курильской гряды волна зашла в Охотское море и обрушилась на о. Сахалин и северо-западное материковое побережье. В бухте Нагаева в районе Магадана высота волны (от подошвы до вершины) превысила 4 м; на северо-восточном шельфе о. Сахалин (т.е. в районе, где в настоящее время ведутся активные работы по добыче нефти и газа) наблюдались волны цунами до 2.5 м [4, 14]. Это событие наглядно показало, что волны цунами — это глобальное явление, и без широкого международного сотрудничества эффективное предупреждение и борьба с ним невозможны.

Именно после Чилийского цунами 1960 г. была создана ТСПЦ с центром в Гонолулу на Гавайских островах, США (ТЦПЦ)¹, и налажена конструктивная система оперативной связи между всеми тихоокеанскими странами, находящимися под угрозой волн цунами [33]. Большую помощь в этом оказывает Межправительственная координационная группа по Системе предупреждения цунами в Тихом океане², которая работает под патронажем Межправительственной океанографической комиссии (МОК) ЮНЕСКО, активным участником которой является Россия. Российская СПЦ успешно взаимодействует с ТСПЦ и Японской СПЦ (ЯСПЦ); никакие политические разногласия или проблемы не мешают взаимодействию служб предупреждения о цунами. В частности, телеграмма Японского метеорологического агентства (ЯМА), сообщившая об угрозе цунами 7 ноября 1958 г., позволила объявить тревогу цунами для Южно-Курильского района за 15–18 мин до прихода волн [13, 14]. Активное взаимодействие международных СПЦ сыграло ключевую роль в своевременном и эффективном предупреждении о разрушительном Тохоку цунами в Японии

в 2011 г., вызванном сильнейшем землетрясением $M_w = 9.1$ с очагом у северо-восточного побережья о. Хонсю (Япония). Большую помощь при оценке степени опасности этого цунами также оказали глубоководные станции DART, установленные вдоль океанского шельфа Аляски, Алеутских о-вов, Камчатки, Курильских и Японских о-вов. Именно благодаря этим двум факторам (международному сотрудничеству и обмену информацией и высокоточным данным о высотах волн цунами в открытом океане на подходе к берегам России) удалось избежать человеческих жертв и минимизировать разрушения на российском побережье. Эти же два фактора позволили обеспечить достаточно точный оперативный прогноз Тонга цунами в 2022 г.

Методология и система существующей в настоящее время Российской СПЦ описана в работе [14]. Дополнительные подробности, связанные с оперативным прогнозом отдельных событий, приведены в работе [8]. Основным критерий, который используется СПЦ при оценке степени опасности отдельных землетрясений, — магнитудно-географический: для различных сейсмоактивных районов Мирового океана установлено пороговое значение магнитуды M_s (определяемой по поверхностным волнам), при котором для российского побережья объявляется тревога цунами [14]. Нижнее «цунамигенное» значение магнитуды составляет $M_s = 7.0$. Считается, что при меньших значениях магнитуды землетрясений цунами в Тихом океане не образуются. Однако этот критерий относится только к цунами, вызванным подводными землетрясениями, и не применим для цунами другой природы. Сейсмический толчок, сопровождавший взрыв вулкана Хунга-Тонга, был всего $M_w \sim 5.5$, т.е. формально такое событие не должно было считаться опасным для побережья России. Однако 15 января в 22:25 Сахалинского времени (SAKT³, 11:25 UTC) в Российскую СПЦ поступило сообщение из Национального центра предупреждения о цунами (НЦПЦ) о том, что в 04:27 UTC в районе островов Тонга произошло извержение подводного вулкана (на самом деле основной взрыв произошел в 04:15 UTC) и что данное событие может сгенерировать цунами за пределами эпицентра. 16 января в 00:11 SAKT было получено предупреждение из Тихоокеанского центра (ТЦПЦ) об угрозе цунами для районов, находящихся в зоне трехчасового добега зародившейся волны. При этом была дана следующая оценка: “Нет возможности предсказать амплитуду волн. Дан прогноз добега волн и регистрации цунами”.

¹ Тихоокеанский центр предупреждения о цунами (PTWC = NOAA Pacific Tsunami Warning Center, Honolulu, Hawaii: <https://www.un-spider.org/noaa-pacific-tsunami-warning-center-ptwc>) отвечает за весь Тихий океан. Национальный центр предупреждения о цунами, NTWC, National Tsunami Warning Center, Palmer, Alaska: <https://www.tsunami.gov/?page=history#2>, отвечает за северо-восточную часть Тихого океана.

² Intergovernmental Coordination Group for the Pacific Tsunami Warning and Mitigation System (ICG/PTWS), бывшая ITSU.

³ SAKT — Сахалинское время, UTC+11.

В дальнейшем НЦПЦ и ТЦПЦ продолжали передавать сообщения о тревоге. В результате в 01:08 САКТ дежурный океанолог передал в ЦУКС МЧС России по Сахалинской области сообщение о необходимости оповещения портов и портопунктов Курильских островов о возможности подхода слабого цунами с рекомендациями ограничения работ в порту, соблюдения правил безопасности на берегу. Руководство СахУГМС было поставлено в известность о развитии событий, установлены постоянные наблюдения за уровнем моря на ГМС Курильских о-вов.

В 02:15 САКТ получен бюллетень от ЯСПЦ: предупреждение цунами действует для южной части Японских островов; для Тихоокеанского побережья северных Японских островов действует режим «консультация» цунами. Спустя 11 минут ЯСПЦ передало первые сообщения о времени и высотах волн цунами на японских станциях; в дальнейшем, по мере распространения волн цунами, уточняющая информация передавалась непрерывно, что было чрезвычайно ценно для Российской СПЦ. Также непрерывно поступала оперативная информация из НЦПЦ и ТЦПЦ. В 04:00 САКТ информация о событии была передана в ТАСС. В 05:15–05:18 САКТ режим оповещения продлен для всей территории Курильских островов. В 07:30–09:00 САКТ продолжает поступать информация из ЯСПЦ, НЦПЦ и ТЦПЦ, подтверждающая, что угроза цунами сохраняется. В 09:10–12:00 САКТ поступают бюллетени от NOAA и различных зарубежных служб с данными высот зарегистрированных цунами по наблюдениям береговых мареографов и глубоководных станций DART; сохраняется консультативный режим и угроза цунами для соответствующих Тихоокеанских побережий. В 12:18 САКТ получено фото мареографной ленты с записью цунами высотой 1.3 м на ГМС «Малокурильское»; в дальнейшем стала приходить информация о регистрации данного цунами от автоматизированных постов наблюдений за уровнем моря Сахалинской области, Камчатки и Приморского края.

В 13:55 САКТ получен финальный бюллетень ТЦПЦ об окончании угрозы цунами и передана информация о зарегистрированных высотах волн цунами по всей акватории Тихого океана. В 14:51 САКТ объявлено об окончании режима «оповещение портов и портопунктов» на Курильских о-вах. Продолжительность действия оповещения о цунами составила 13 часов.

Данное цунами оказалось очень сложным для прогноза и оперативного оповещения. Российская служба СПЦ столкнулась с тремя основными проблемами:

1. Отсутствие какой-либо информации о начальном очаге цунами, что не позволило получить даже самые грубые предварительные оценки ожидаемых высот волн. В бюллетенях ТЦПЦ (Гонолулу, США) указывалось на невозможность выполнения расчетов высот волн цунами ввиду отсутствия подобной информации.

2. Возбуждение при взрыве сильных атмосферных колебаний (волн Лэмба), распространявшихся со скоростью звука (т.е. в полтора раза быстрее длинных океанских волн), которые, в свою очередь, вызвали генерацию волн цунами, наблюдавшихся не только в Тихом, но и в Атлантическом и Индийском океанах, Карибском бассейне и Средиземном море. При этом в отдельных акваториях возникали вторичные источники волн цунами (подобно тому, как это происходило в 1883 г. во время извержения вулкана Кракатау [24]); прогнозировать в такой ситуации высоты волн цунами и время их прихода крайне затруднительно; выявить волны цунами можно только в процессе их распространения по факту регистрации. Следует подчеркнуть, что прогнозирование волн цунами несейсмического происхождения является серьезным вызовом для научного сообщества и требует разработки принципиально новых подходов.

3. Работа «вслепую» при отсутствии современной цифровой аппаратуры на океанской стороне Курильской гряды (т.е. в районе, наиболее подверженном угрозе волн цунами) и крайней затруднительности визуальных наблюдений в ночное время значительно осложнила оценку степени угрозы волн цунами для российского побережья. Максимальные зарегистрированные высоты волн цунами, до 1.3 м, были получены в Малокурильском (о. Шикотан)¹ с помощью архаичного аналогового мареографа, установленного в этом поселке несколько десятков лет назад. Эта проблема требует скорейшего решения, подобного тому, как это в последние годы было выполнено в целом ряде других стран, подверженных угрозе волн цунами (Чили, Мексика, Индонезия, Индия, островные государства Тихого и Индийского океанов). Необходима установка высокоточных цифровых приборов, обеспечивающих непрерывный мониторинг волн цунами и родственных явлений вдоль всего Дальневосточного побережья России.

Как отмечалось выше, оперативное оповещение об угрозе волн цунами и защиту населения прибрежных районов Дальневосточного региона во многом удалось решить благодаря активному использованию международной системы мониторинга волн цунами и эффективному взаимодействию с ЯСПЦ, НЦПЦ и ТЦПЦ.

¹ На станции Водопадная высота волн цунами составляла также 1.3 м.

ДАННЫЕ

Для анализа проявления на российском побережье волн цунами, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга, были использованы все доступные ряды наблюдений: 20 цифровых записей изменений уровня моря Российской СПЦ с дискретностью 1 минута и одна аналоговая запись (Малокурильское). Семь приморских станций (Посъет, Владивосток, Находка, Преображение, Рудная Пристань, Сосуново и Советская Гавань) и две сахалинские (Холмск и Углегорск), которые расположены на северном и северо-западном побережьях Японского моря (рис. 1, таблица); станции Корсаков, Стародубское, Поронайск и Курильск измеряют изменения уровня Охотского моря; четыре станции (Озерная, Водопадная, Петропавловск-Камчатский, Семячик) расположены на Тихоокеанском побережье Камчатского п-ва, одна (Никольская) — на Командорских о-вах (о. Беринга) и две (Оссора и Корф) — на западном берегу Берингова моря. В период извержения вулкана Хунга-Тонга и распространения волн цунами мареографы в Семячике, Корфе и Сосуново работали со сбоями, вследствие чего в настоящем исследовании данные по этим станциям не использовались. Для сравнения были также проанализированы записи Тонга цунами, полученные на четырех зарубежных береговых станциях: Кушимото (о. Хонсю, Япония), Ханасаки (о. Хоккайдо, Япония), Мукхо (япономорское побережье Южной Кореи) и Адак (Алеутские о-ва, США). Все посты, за исключением Малокурильского, были оснащены современным автоматическим измерительным оборудованием, включающим в себя гидростатический датчик уровня моря и блок компенсации атмосферного давления. Уровень моря измерялся с дискретностью по времени 1 минута и по высоте 1 см¹.

Дополнительно для анализа были использованы записи шести глубоководных станций DART: 21413, 21415, 21416, 21418, 21419 и 21420 (рис. 1). В зависимости от станции и периода наблюдений временное разрешение этих данных составляло 15 с, 1 мин или 15 мин (в том случае, если данная станция не находилась в “тревожном режиме”). Также для станций Водопадная, Никольское, Поронайск, Углегорск, Холмск, Мукхо, Ханасаки и Кушимото были использованы записи высокочастотных колебаний атмосферного давления.

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

Атмосферная волна Лэмба, сгенерированная извержением вулкана Хунга-Тонга, распро-

странялась от источника со скоростью около 310 м/с. Примерно в 11:00 UTC (через 7 часов после извержения) атмосферная волна достигла Курильских о-вов, в 11:20 — южного побережья полуострова Камчатка, в 11:30 — южного берега о. Сахалин и в 11:40 — Приморского края (рис. 2а). Атмосферная волна на своем пути генерировала волну в океане, которая фактически представляет собой атмосферное (метео) цунами. Атмосферное цунами наблюдалось как на открытом побережье Тихого океана (Курильские острова и полуостров Камчатка), так и в изолированных морях, таких как Японское и Охотское [51].

Одновременно с возникновением атмосферной волны Лэмба, вследствие извержения вулкана возникла океанская волна цунами (рис. 2б), распространявшаяся по акватории Тихого океана со скоростью длинных океанских гравитационных волн $c = \sqrt{gH}$, где g — ускорение свободного падения, а H — глубина океана. В глубокой части (4000 м) Тихого океана эта волна имела скорость около 200 м/с, что примерно в 1.5 раза медленнее, чем атмосферная волна Лэмба. К побережью Курильских островов и Камчатского п-ва океанская волна цунами подошла через ~10–11 ч после извержения вулкана (около 15:00–15:30 UTC). На рис. 2б показано время распространения волн цунами в северо-западной части Тихого океана. Для расчета времени прихода океанских волн был использован высокоточный метод ориентации волнового фронта, предложенный в работе [23]. Этот метод основан на принципе Гюйгенса и информации об ориентации наступающего волнового фронта для расчета времени прохождения волн цунами от вулкана Хунга-Тонга до береговых мареографов и глубоководных станций DART.

На рис. 3 представлены записи изменения атмосферного давления на восьми станциях. Первая атмосферная волна Лэмба (A1) достигла рассматриваемых пунктов около 11:20–11:40 UTC. Сначала эта волна была зафиксирована на записях на станциях Водопадная (п-ов Камчатка), Никольское (о. Беринга), Ханасаки (о. Хокайдо) и Кушимото (Хонсю). До станций, расположенных на Корейском п-ове (Мукхо) и на о. Сахалин (Поронайск, Углегорск и Холмск), атмосферная волна пришла примерно на 15–30 мин позднее. Время прихода волны по данным наблюдений (рис. 3) хорошо согласуется с расчетным временем теоретического прихода волн Лэмба со скоростью 312 м/с (рис. 2а). Высота атмосферной волны от подошвы до гребня менялась в диапазоне от 1.1 гПа на станции Никольское до 2.5 гПа в Ханасаки.

¹ Подчеркнем, что при измерении цунами с дискретностью 1 мин разрешение по высоте в 1 см является недостаточным и приводит к серьезному искажению спектра регистрируемых волн. Современные международные требования, предъявляемые к подобной аппаратуре, требуют измерения уровня моря с точностью 0.1 см.

Таблица. Характеристики мареографных станций в северо-западной части Тихого океана и результаты анализа: теоретические расчеты времени (UTC, 15 января 2022 г.) прихода атмосферных волн (T_A) и океанских волн (T_O), время добегания (ч) атмосферной (t_A) и океанских (t_O) волн цунами до представленных станций, а также максимальные амплитуды (A_A и A_O) и высоты (H_A и H_O) атмосферной и океанской волн цунами

№	Широта (° с.ш.)	Долгота (° в.д.)	Станция	T_A	t_A , ч	A_A , см	H_A , см	T_O	t_O , ч	A_O , см	H_O , см
1	33.48	135.77	Кушимото, Япония	11:18	7.06	55.1	101.9	15:03	10.81	90.7	191.2
2	43.28	145.57	Ханасаки, Япония	11:29	7.24	49.2	91.8	15:09	10.91	57.1	112.7
3	43.87	146.82	Малокурильское	11:29	7.23	59.8	130.8	15:02	10.80	51.0	120.8
4	45.24	147.83	Курильск	11:33	7.30	6.5	14.4	15:19	11.08	12.2	27.9
5	46.60	142.74	Корсаков	11:52	7.62	6.5	15.7	16:56	12.70	14.0	27.0
6	47.43	142.83	Стародубское	11:55	7.68	5.7	10.6	16:20	12.09	22.9	39.6
7	49.19	143.14	Поронайск	12:03	7.80	5.0	11.9	17:58	13.72	15.5	28.2
8	49.07	142.02	Углегорск	12:05	7.84	2.5	4.7	18:33	14.30	4.9	9.3
9	47.05	142.04	Холмск	11:56	7.69	4.0	7.8	17:50	13.59	7.1	14.0
10	48.97	140.29	Советская Гавань	12:09	7.91	3.5	8.4	18:33	14.31	5.2	10.3
11	44.35	135.80	Рудная Пристань	12:02	7.79	15.2	29.6	17:05	12.84	23.0	43.7
12	42.91	133.92	Преображение	12:02	7.79	18.6	34.0	17:02	12.80	13.0	28.0
13	42.78	132.86	Находка	12:05	7.84	2.4	9.3	17:11	12.95	4.2	11.9
14	43.13	131.92	Владивосток	12:09	7.91	7.2	16.6	18:10	13.92	10.7	21.1
15	42.65	130.80	Посьет	12:11	7.94	5.3	13.4	17:55	13.68	3.1	8.7
16	37.55	129.12	Мукхо, Южная Корея	11:58	7.72	15.9	31.0	17:53	13.64	17.5	32.6
17	51.83	158.07	Водопадная	11:46	7.52	54.5	92.5	15:11	10.95	64.6	130.2
18	52.98	158.65	Петропавловск-Камчатский	11:51	7.61	3.6	8.7	15:39	11.40	4.9	15.7
19	51.48	156.48	Озерная	11:46	7.53	3.5	10.0	16:03	11.80	8.5	14.8
20	59.25	163.06	Оссора	12:20	8.09	4.5	7.8	17:33	13.31	7.1	15.6
21	55.20	165.98	Никольское	11:54	7.66	4.6	8.2	15:28	11.22	8.4	18.9
22	51.86	176.63 ¹	Адак, США	11:24	7.16	22.8	50.2	14:56	10.69	42.2	89.8

¹ Для станции Адак указана з.д.

Обратная атмосферная волна (N1), распространявшаяся из антинодальной точки, расположенной в Африке, по записям атмосферного давления на северо-западном побережье Тихого океана трудно различима (синяя область на рис. 3). Вторая прямая атмосферная волна Лэмба (A2), обогнувшая земной шар, наблюдалась примерно в 00:00 UTC 17 января. Она также вначале была зафиксирована на камчатских и японских станциях, а уже потом — на станциях, расположенных на Корейском п-ове и на о. Сахалин, что соответствует теоретическому распространению фронта атмосферной волны (рис. 2). На японских и сахалинских станциях амплитуда второй атмосферной волны была в 2–3 раза меньше, чем у первой. В то же время на станциях Водопадная, Никольское и Мукхо амплитуда второй волны имела близкие значения к характеристикам первой волны. Вторая прямая волна пришла

примерно через 35.8 ч после первой, что соответствует скорости распространения ~311.2 м/с.

На рис. 4 показаны записи гидростатического давления на шести станциях DART: 21413, 21415, 21416, 21418, 21419 и 21420. Первая волна в записях на станциях DART, отмеченная на рис. 4 розовой полосой, представляет собой сумму скачка атмосферного давления, вызванного прохождением атмосферной волны Лэмба, и ответных колебаний уровня моря. Характер этого скачка давления по записям на станциях DART похож на форму волны Лэмба, записанную на береговых метеостанциях (рис. 3). Дисперсия колебаний давления на дне океана значительно увеличивается после прихода первой атмосферной волны. Еще одно повышение давления на дне океана было зафиксировано примерно через три часа после прохождения атмосферной волны. Оно вызвано приходом «прямой» океанской волны цунами,

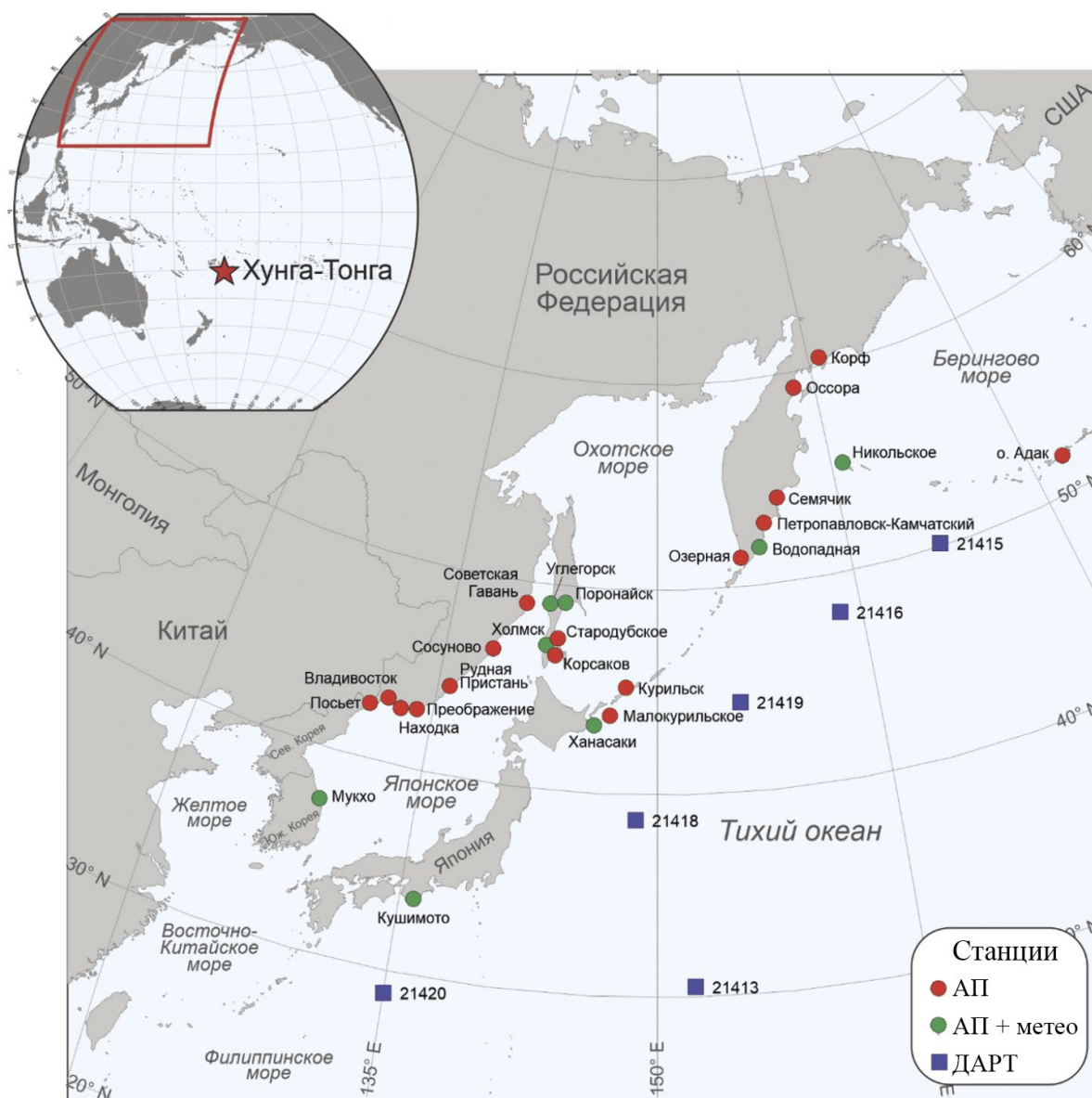


Рис. 1. Расположение станций, данные которых были использованы в настоящем исследовании. Красной линией на врезке показан периметр рассматриваемого полигона, АП — автоматические посты, а красной звездочкой — вулкан Хунга-Тонга.

сформировавшейся в районе очага извержения вулкана. Их расчетное время прихода отмечено серой полосой.

На рис. 5 представлены записи колебаний уровня моря на береговых станциях, расположенных вдоль побережья Японского моря. Как было показано в работе [51], океанская волна цунами, образованная непосредственно вследствие извержения вулкана и распространявшаяся по акватории Тихого океана со скоростью длинных океанских волн, проникла в акваторию Японского моря со значительным запаздыванием относительно волны, вызванной атмосфер-

ным возмущением, и с заметным уменьшением амплитуды. Волны цунами, зафиксированные на записях береговых мареографов в Японском море, имеют преимущественно атмосферное происхождение. Максимальная амплитуда волны цунами ($A_{\max}$) была зарегистрирована на станции Рудная Пристань — 0.23 м, а высота (от подошвы до вершины) достигала 0.44 м. В [51] было высказано предположение, что максимум высоты ($H_{\max}$) цунами в Рудной Пристани все же был связан с проникновением океанской волны через проливы Курильской гряды и далее через пролив Лаперуза.

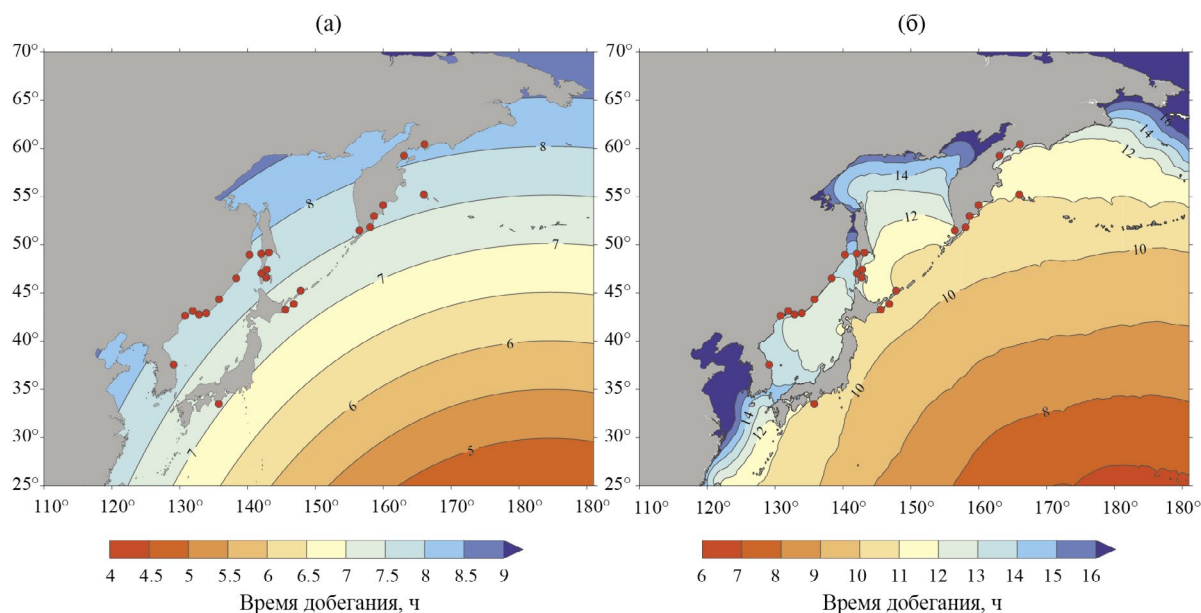


Рис. 2. Карты времен распространения (а) атмосферной волны Лэмба и (б) океанской волны цунами.

На станциях Малокурильское, Ханасаки и Кушимото (рис. 6), расположенных на открытом побережье Тихого океана (см. рис. 1), можно выделить оба типа волн цунами. Сначала происходит увеличение дисперсии колебаний уровня, вызванное приходом атмосферной волны Лэмба (примерно 11:30–11:40 UTC). Своих максимальных амплитуд зарегистрированные колебания достигают примерно через 3–4 часа, когда до этих станций доходит океанская волна цунами. Максимальная амплитуда и высота волн цунами на станции Ханасаки составляли $A_{\max} = 0.57$ м, $H_{\max} = 1.13$ м, в Кушимото $A_{\max} = 0.91$ м, $H_{\max} = 1.91$ м, а в Малокурильском $A_{\max} = 0.60$ м, $H_{\max} = 1.31$ м. На станциях, расположенных на побережье Охотского моря (Курильск, Корсаков, Стародубское и Поронайск), влияние волн цунами, сгенерированных непосредственно прохождением атмосферной волны Лэмба над близлежащей акваторией (около 11:40–12:00 UTC), на характере записей колебаний уровня моря практически не сказывается. Явное усиление происходит также через 3–4 часа, когда до этих станций доходит океанская волна цунами. Так, на станции Курильск усиление колебаний уровня моря наблюдается после 15:00 UTC, когда $A_{\max}$ достигает 0.12 м, в Поронайске и Стародубском $A_{\max}$ достигается после 22:30 UTC: 0.16 и 0.23 м соответственно.

На береговых станциях, расположенных на побережье Камчатского полуострова и Алеутских островов (рис. 7), анализ высокочастотных записей неперiodических колебаний уровня моря позволяет выделить время прихода как волн цунами

атмосферного происхождения, так и океанских волн, сгенерированных непосредственно вблизи вулкана Хунга-Тонга. Так, на записях на станциях Водопадная, Адак, Петропавловск-Камчатский и Никольское после 12:00 UTC меняется характер колебаний уровня моря и наблюдается увеличение дисперсии процесса. Это связано с приходом волн цунами, сгенерированных под влиянием атмосферных волн Лэмба. В работе [51] было высказано предположение, что атмосферные волны Лэмба на пути своего распространения формируют вторичные источники цунами, откуда волны цунами распространяются как обычные длинные волны со скоростями $c = \sqrt{gH}$. Вследствие этого на записях колебаний уровня на станциях Водопадная, Адак, Петропавловск-Камчатский и Никольское видно непрерывное увеличение высоты колебаний уровня, что связано с приходом все большего количества волн цунами из этих вторичных источников, расположенных все ближе и ближе к источнику. Около 15:10–15:30 UTC до этих станций дошла прямая океанская волна, сгенерированная вблизи вулкана Хунга-Тонга. На станции Никольское $A_{\max} = 0.08$ м, $H_{\max} = 0.19$ м, в Адак $A_{\max} = 0.42$ м, $H_{\max} = 0.90$ м, а на станции Водопадная $A_{\max} = 0.65$ м, $H_{\max} = 1.30$ м.

Для определения генезиса аномальных колебаний уровня моря был проведен спектрально-временной анализ (СВАН) и рассчитаны частотно-временные диаграммы (рис. 8). Для СВАН-диаграмм для станций, расположенных на открытом океанском побережье (рис. 8а, б, д, е), характерно резкое увеличение энергии в диапазо-

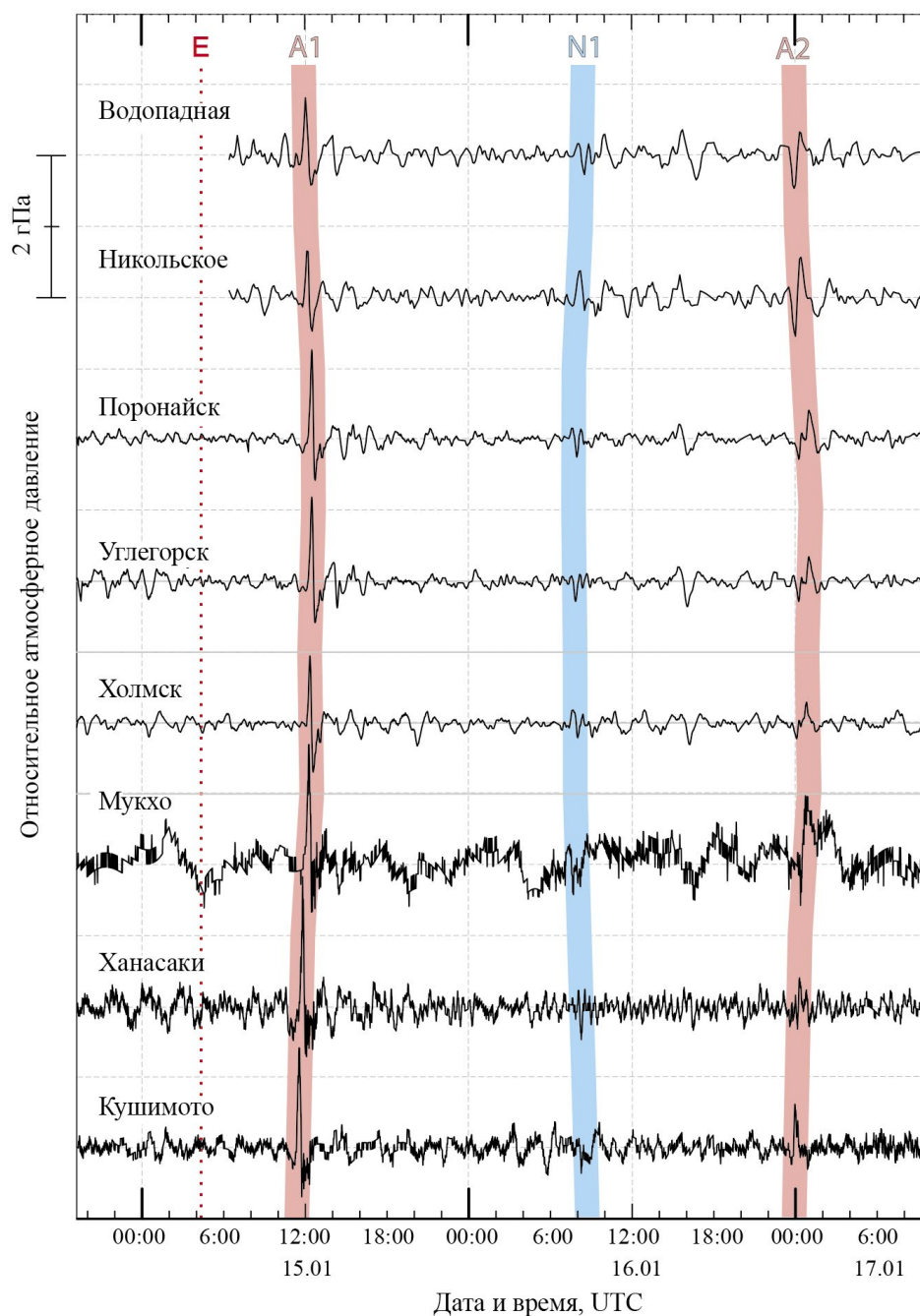


Рис. 3. Записи атмосферного давления на станциях Дальневосточного региона. Красной полосой показаны приходы прямых атмосферных волн Лэмба, а синей — обратных волн. Пунктирной вертикальной красной линией с символом «Е» указан момент извержения вулкана Хунга-Тонга.

не периодов от 5 мин до часа, связанное с приходом атмосферной волны Лэмба. После прихода океанской волны цунами происходит увеличение энергии в узком индивидуальном частотном диапазоне. Так, на станции Водопадная усилились колебания с периодом 8–10 мин, в Адаке — с периодом 12–15 мин, в Курильске — с периодом 15–20 мин, а в Кушимото ярко выражены две по-

лосы периодов: 10–14 мин и 20–25 мин. Преобладающий период колебаний, видимо, определялся частотно-избирательными свойствами соответствующей акватории (залива, бухты, прилегающего шельфа), в которой располагалась береговая станция. Для СВАН-диаграмм станций, расположенных внутри Японского моря (рис. 8в, г), заметны повышенные значения дисперсии

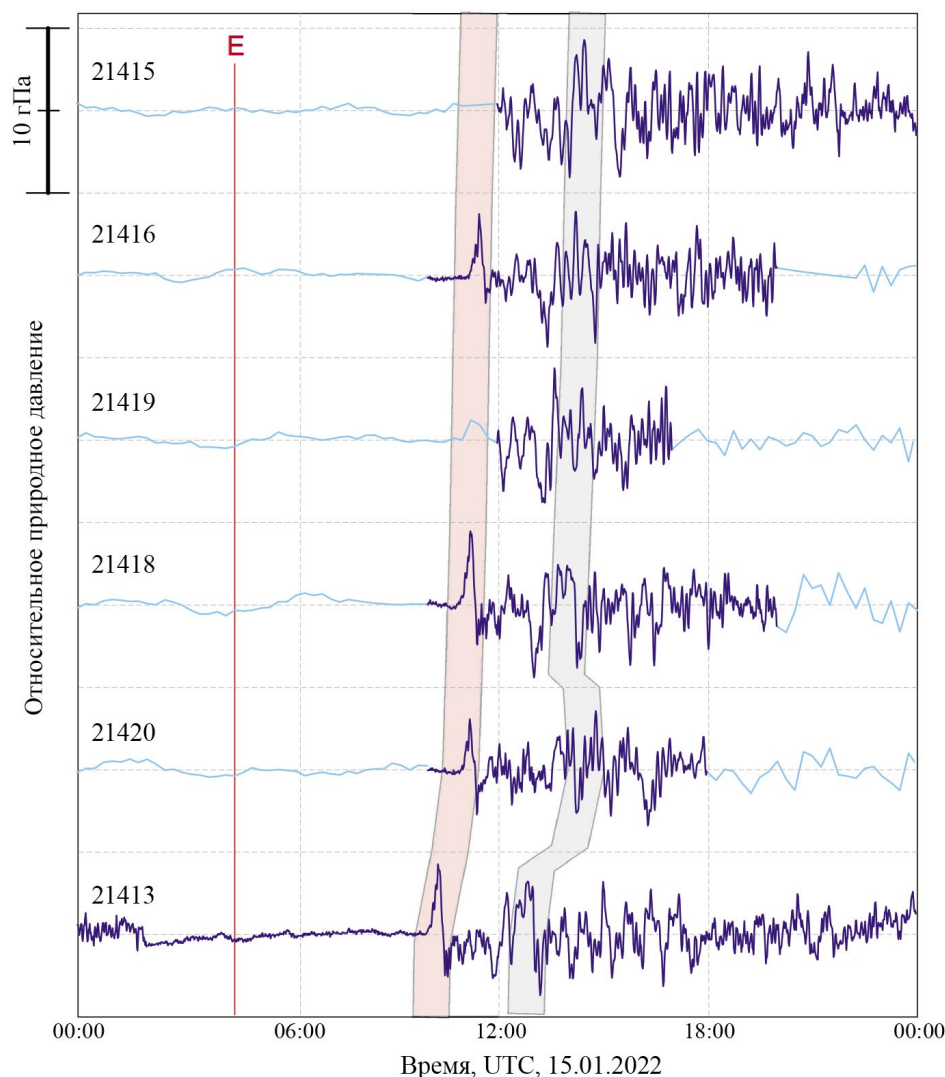


Рис. 4. Записи цунами 15 января 2022 г., вызванного извержением вулкана Хунга-Тонга, полученные на шести глубоководных станциях сети DART, положение которых показано на рис. 1. Временные ряды с шагом 15 с и 1 мин показаны синим цветом, а с шагом 15 мин — голубым цветом. Красной полосой показан приход первой волны цунами, атмосферного происхождения, серой полосой отмечен момент прихода волны цунами океанского происхождения. Сплошной вертикальной красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана Хунга-Тонга.

фоновых колебаний уровня моря до прихода атмосферной и океанских волн цунами. Так, во Владивостоке наблюдаются сильные колебания в диапазоне периодов 30 мин — 1 ч (рис. 8в). После прихода атмосферной волны Лэмба усиливаются колебания с периодом около 45 мин, а после прибытия океанской волны — с периодом 30–35 мин, а также на периодах 12 и 8 мин. В Рудной Пристани до прихода волн цунами наблюдается повышенная энергия в высокочастотной области СВАН-диаграмм (рис. 8г), которая может быть вызвана инфрагравитационными волнами и влиянием ветрового волнения, что наблюдается на данной станции при прохождении тайфунов [10, 39]. После прихода атмосферной волны Лэм-

ба происходит увеличение дисперсии в широком диапазоне частот от 1 до 20 цикл/час. После проникновения океанской волны в бассейн Японского моря на СВАН-диаграмме в Рудной Пристани заметно увеличение колебаний с периодом около 8 мин. Причем это резкое увеличение соответствует проникновению волн цунами не из Сангарского пролива (наикратчайший путь от вулкана до станции), а распространению океанской волны через проливы Курильской гряды и пролив Лаперуза, что подтверждает выводы работы [51].

На основе анализа записей колебаний уровня моря в северо-западной части Тихого океана за временной промежуток с 00:00 15 января

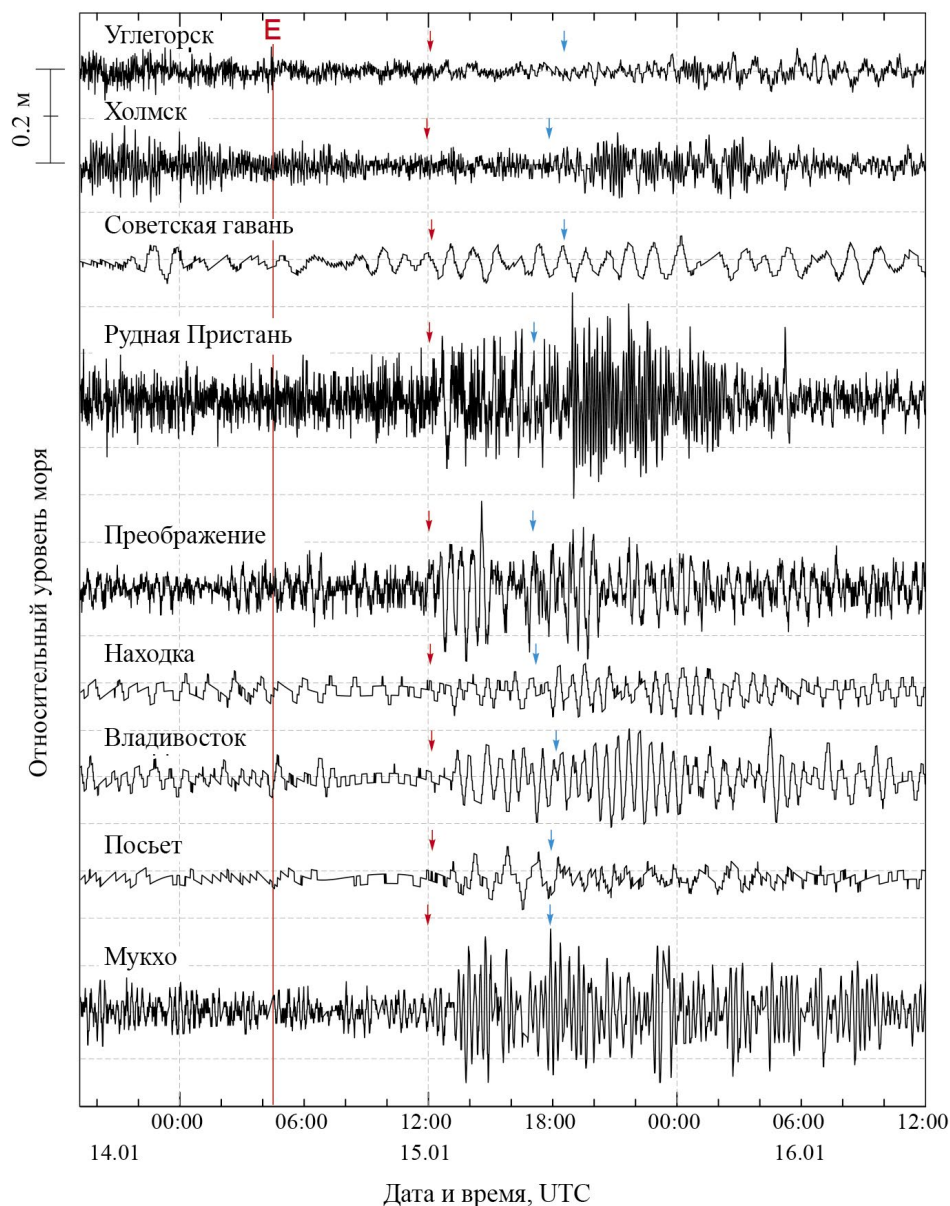


Рис. 5. Записи волн цунами, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга, полученные на побережье Японского моря. Красными стрелками отмечено расчетное время прихода первой волны цунами атмосферного происхождения, синими стрелками — расчетное время прихода волны цунами океанского происхождения. Сплошной вертикальной красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана. Ступенчатый характер записей на станциях Находка, Владивосток и Посьет связан с недостаточным разрешением по высоте на соответствующих мареографах.

по 12:00 16 января были оценены максимальные амплитуды и высоты волн цунами атмосферного и океанского происхождения (таблица, рис. 9). Максимальные амплитуды/высоты волн цунами атмосферного происхождения рассчитывались для временного промежутка после расчетного времени прихода атмосферной волны Лэмба («А» на рис. 5–7) и до расчетного времени прихода океанской гравитационной волны цунами («О» на рис. 5–7). Максимальные амплитуды/высоты волны цунами, сформированной непосредствен-

но извержением вулкана и распространявшейся от источника в виде свободной гравитационной волны, оценивались для временного промежутка от расчетного времени прихода океанской волны до 12:00 16 января. Временные промежутки для оценки высот различались в зависимости от станции (см. таблицу и рис. 5–7).

Максимальные высоты цунами как атмосферного, так и океанского происхождения наблюдаются на открытом побережье Тихого океана.

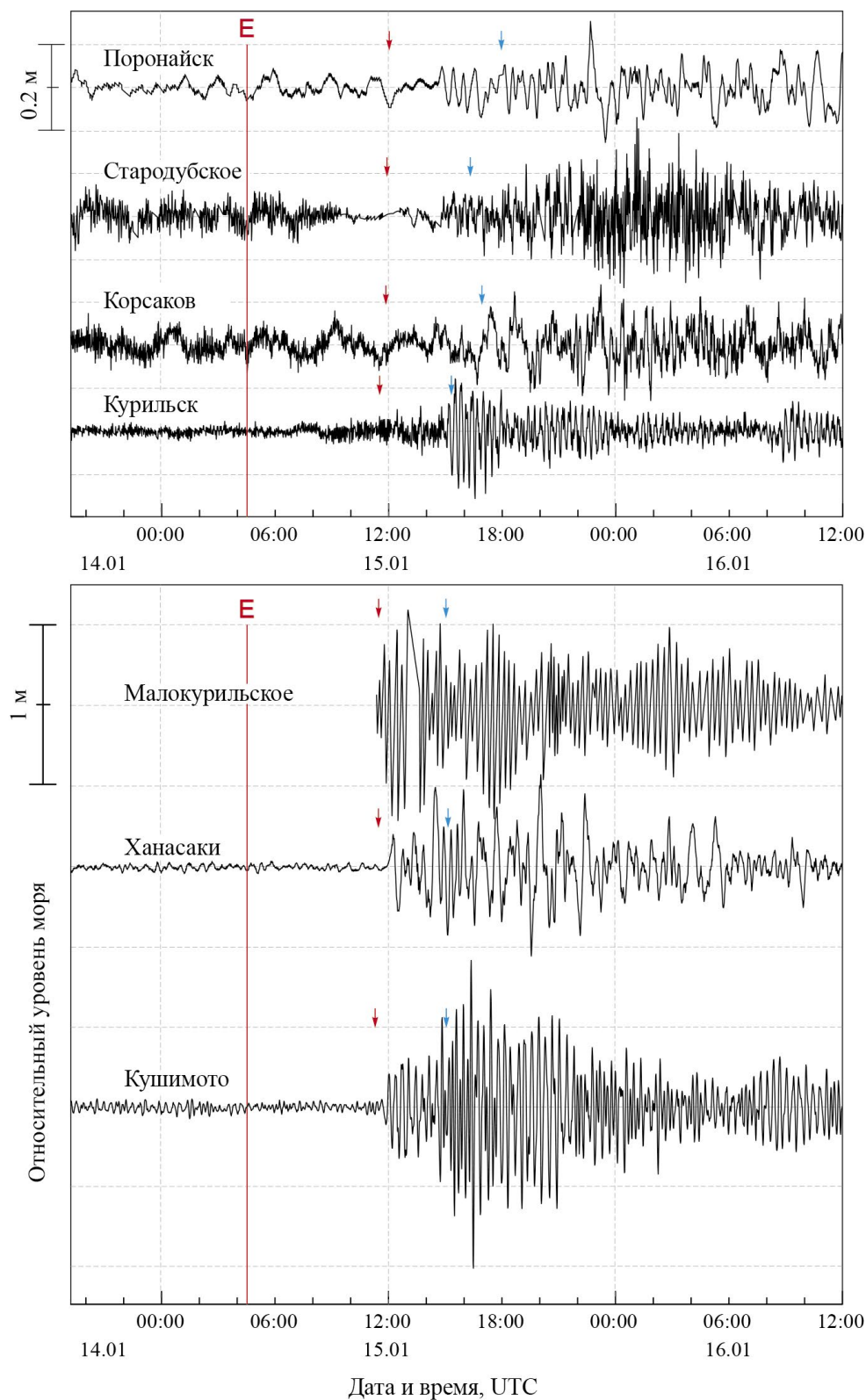


Рис. 6. Записи цунами, вызванного извержением вулкана Хунга-Тонга, полученные на побережьях Охотского моря, Курильских о-вов и северо-восточном побережье о. Хоккайдо. Аналоговая запись на станции Малокурильское была оцифрована с дискретностью 1 мин. Красными стрелками отмечено расчетное время прихода первой волны цунами атмосферного происхождения, синими стрелками — расчетное время прихода волны цунами океанского происхождения. Сплошной вертикальной красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана Хунга-Тонга.

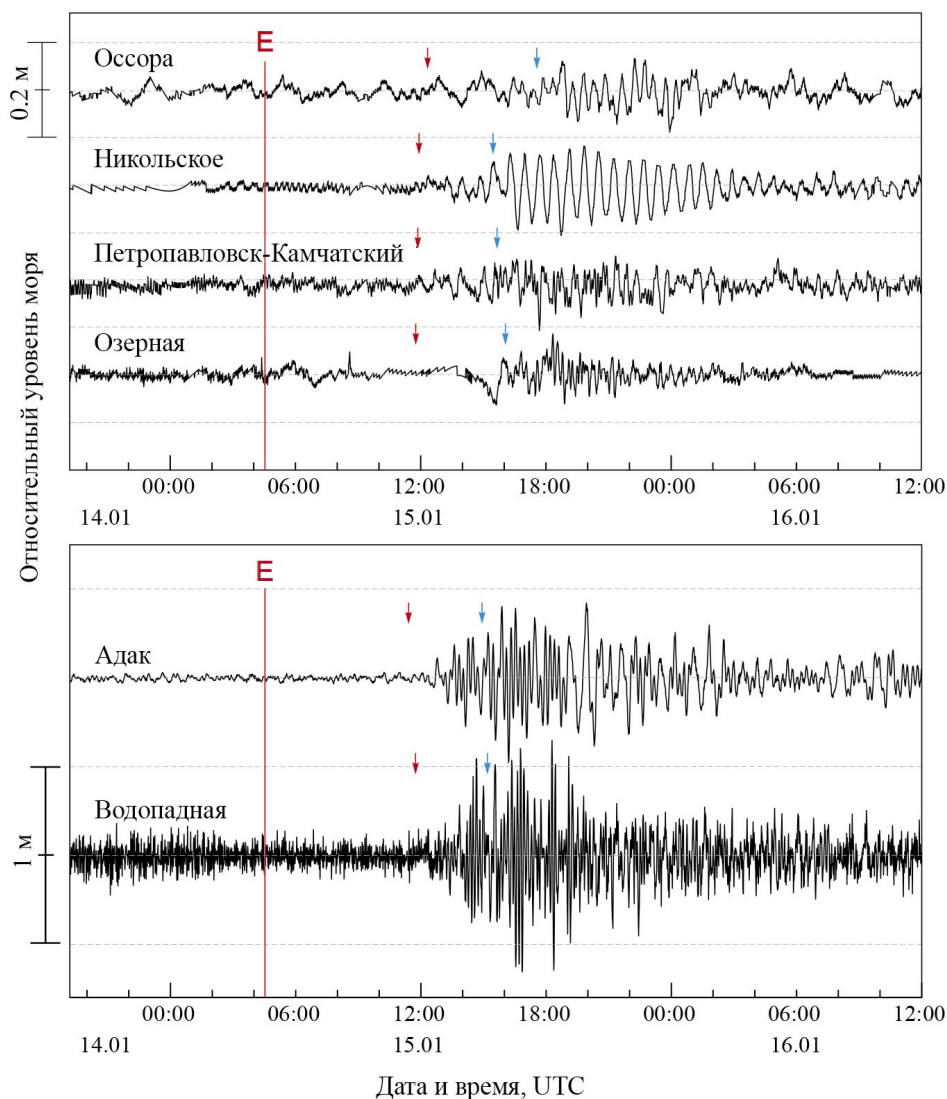


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для станций, расположенных на побережьях п-ва Камчатка и Алеутских о-вов.

На станциях Кушимото, Ханасаки, Малокурильское и Водопадная высота атмосферной волны цунами составляет 90–130 см, а океанской — 113–190 см. На большинстве станций в окраинных и внутренних морях высота океанской волны также превосходит высоту волны атмосферного происхождения. Исключением являются станции Посъет и Преображение.

ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемая в данном исследовании северо-западная часть Тихого океана — один из самых интересных районов Мирового океана с точки зрения проявления волн цунами, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга. Курильские о-ва с системой узких проливов между ними, про-

лив Лаперуза, Корейский и Сангарский проливы, соединяющие Охотское и Японское моря с Тихим океаном, неоднородная топография океанского дна и сложная форма береговой линии — все это приводит к возникновению уникальной картины отклика колебаний уровня моря на распространяющуюся волну цунами. Как было показано в работе [51], океанская волна цунами, приходящая из Тихого океана в Японское море, существенно ослаблялась при прохождении узких и мелководных проливов. Вследствие этого, в частности, в акватории Японского моря оказалось достаточно сложно выделить океанскую волну Тонга цунами в записях уровня моря. Напротив, на открытом Тихоокеанском побережье Японии волны цунами двух типов, вызванные атмосферным воздействием и океанские, пришедшие из начального источника, хорошо выделялись.

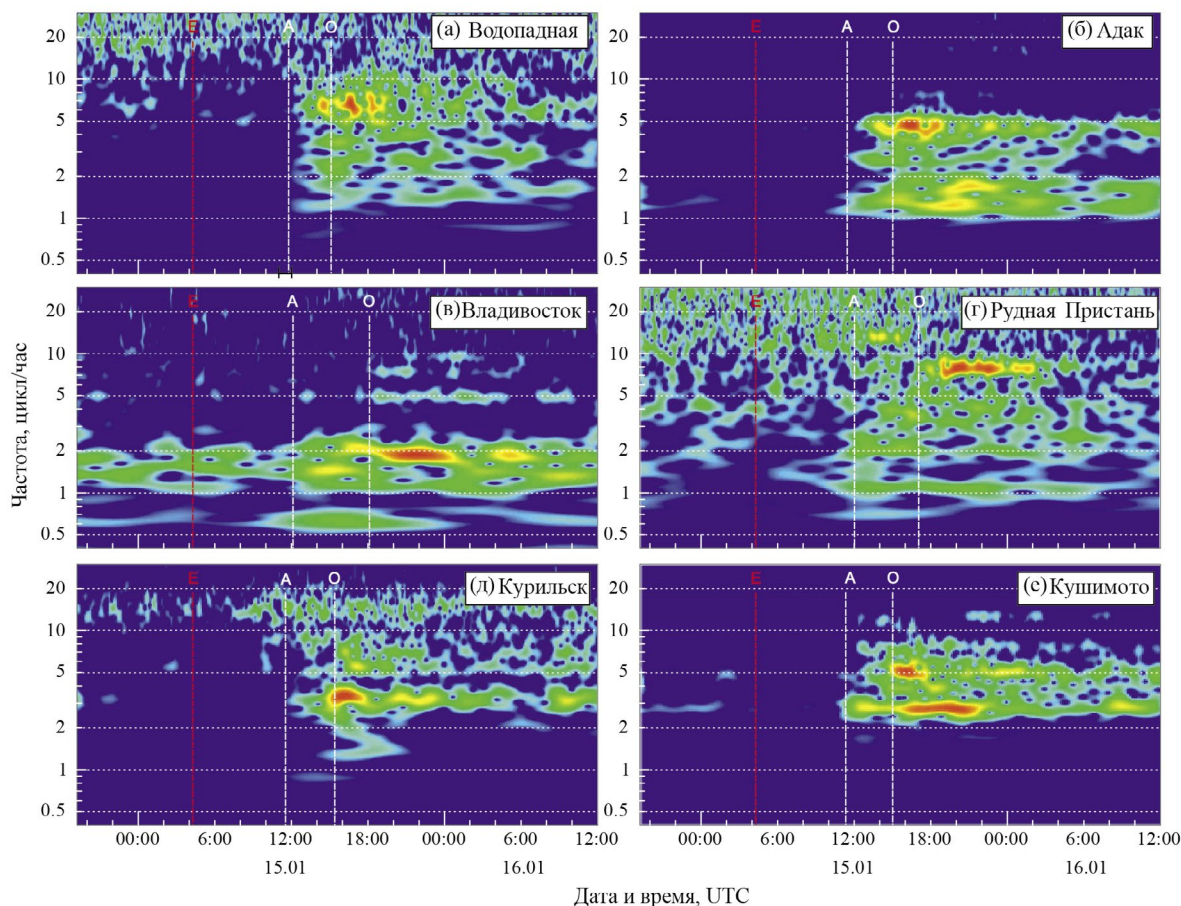


Рис. 8. Частотно-временные (СВАН) диаграммы колебаний уровня моря с 14 по 16 января 2022 г. Вертикальной штриховой красной линией с символом «Е» показан момент извержения вулкана Хунга-Тонга. Белыми вертикальными штриховыми линиями отмечены моменты прихода атмосферной волны Лэмба (символ «А») и волны цунами океанского происхождения (символ «О»).

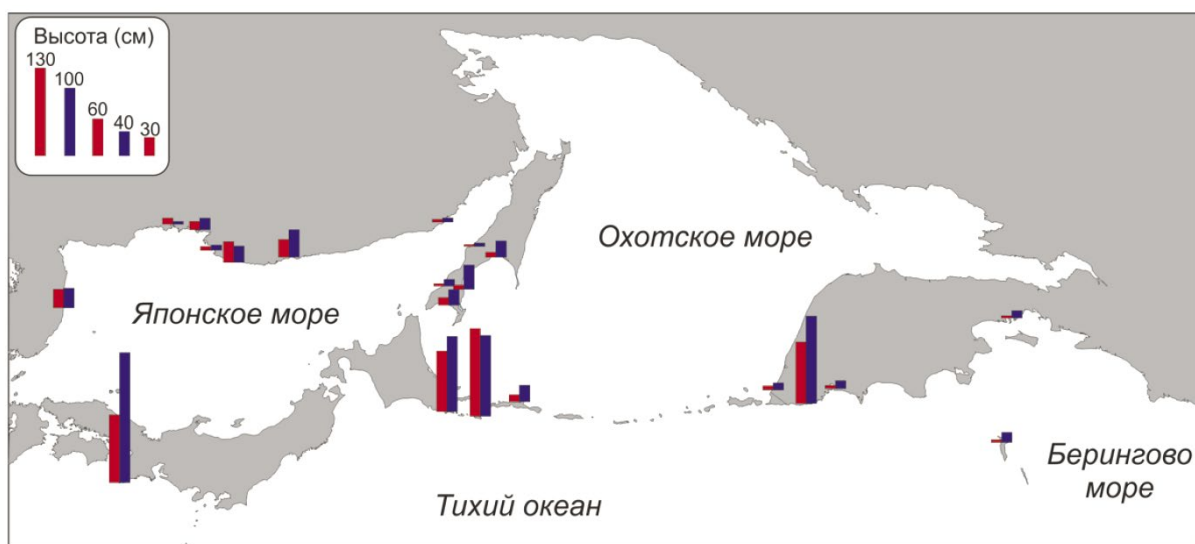


Рис. 9. Высоты волн цунами атмосферного (красные столбики) и океанского (синие столбики) происхождения по данным береговых мареографов.

Двойственный механизм цунами (а точнее, даже тройственный, учитывая вторичные источники в открытой части Тихого океана), вызванного извержением вулкана Хунга-Тонга, создал серьезные проблемы для СПЦ, как российской, так и международной. В значительной степени эти проблемы удалось решить в результате широкой международной кооперации и оперативного обмена информацией. Однако данное конкретное событие поставило перед существующими СПЦ принципиальный вопрос: как предсказывать и осуществлять оперативное оповещение об угрозе вулканических цунами, а также других цунами несейсмического происхождения?

Вулканические цунами — явление нечастое, но практически всегда катастрофическое. Как уже отмечалось, извержение вулкана Санторин 3600 лет назад в Средиземном море существенно повлияло на минойскую цивилизацию [9, 36], взрыв вулкана Кракатау в Зондском архипелаге в 1883 г. привел к гибели 36 тыс. человек [24, 44], а извержение его «сыночка» (Anak Krakatau — «Дитя Кракатау») 22 декабря 2018 г. вызвало локальное разрушительное цунами: 437 человек погибло и еще 14059 ранено [47]. Серьезная угроза катастрофических цунамигенных извержений вулканов существует в районе Малых Антильских островов (Атлантический океан/Карибское море), в Средиземном море (вулкан Стромболи), на Алеутских островах. Одним из наиболее опасных районов с этой точки зрения является вулканическая гряда Курильских островов. Бухта Броутона в северо-западной части о. Симушир и залив Львиная Пасть на юго-западном побережье о. Итуруп — это реликты сильнейших исторических вулканических извержений [4], причем образовавшиеся в результате этих извержений волны цунами по своему масштабу должны были быть сопоставимы с цунами, вызванным взрывом вулкана Кракатау. Одним из наиболее активных вулканов Курильской гряды является вулкан Алаид на о. Атласова, который потенциально может вызвать мощнейшее вулканогенное цунами в Охотском море.

Не меньшую опасность представляют цунами оползневого происхождения. В последние годы подобным цунами уделяется повышенное внимание. Надводные и подводные оползни и связанные с ними цунами могут быть вторичным эффектом происшедших землетрясений; так, видимо, катастрофическое Палу-Сулавеси цунами 28 сентября 2018 г. (4340 погибших, 10679 раненых [47]) было связано не непосредственно с землетрясением с моментной магнитудой M_w 7.5, а с вызванным им локальным подводным оползнем в бухте Палу [47]. Однако достаточно

часто оползни в прибрежной зоне возникают под действием различных гидрометеорологических факторов (например, ливневых дождей) или являются следствием аномально низких приливов [6]. В некоторых районах земного шара оползни и сопутствующие цунами происходят регулярно (Аляска, Британская Колумбия, Норвегия, Гренландия), причем заплески этих цунами порой достигают колоссальных высот (свыше 100 м). Одним из районов высокого риска оползневых цунами является восточный шельф о. Сахалин [1, 3], т.е. район активной добычи нефти и газа.

Еще одним видом опасных несейсмических волн цунами являются *метеоцунами*. До недавнего времени считалось, что это редкое и экзотическое явление, которое наблюдается только в нескольких специфических районах (Балеарские о-ва, Адриатика, Сицилия, юго-западное побережье Японии, Флорида, Великие озера [41]). Однако данные последних лет показывают, что метеоцунами возникают повсеместно, причем часто в районах, где ранее они никогда не отмечались [25, 26, 46, 53]. Так, 19 марта 2017 г. сильнейшее метеоцунами произошло в Персидском заливе; несколько человек погибло, прибрежной инфраструктуре был нанесен значительный ущерб [29]. Персидский залив, где ранее никогда подобные явления не наблюдались, — это основной мировой район нефтедобычи; цунами в этом районе может привести к экологической катастрофе. Нефтегазоносный полигон на северо-восточном шельфе Сахалина в определенном смысле является аналогом Персидского залива; метеоцунами на побережье Сахалина наблюдались в прошлом [5, 13] и, видимо, будут происходить в будущем. Оценка опасности метеоцунами для этого района и их оперативный прогноз являются важнейшей задачей.

Извержение вулкана Хунга-Тонга в некотором смысле объединило все эти три типа несейсмических цунамигенных явлений: (1) взрыв вулкана породил вулканогенное цунами, (2) лавовые потоки, сопутствующие извержению, сгенерировали локальное оползневое цунами, а (3) атмосферные волны Лэмба, вызванные извержением, породили метеоцунами, наблюдавшиеся по всему Мировому океану и ярко проявившиеся у берегов России.

Существующие СПЦ (как российская, так и международные) в первую очередь рассчитаны на прогноз сейсмогенных цунами, вызванных подводными землетрясениями. К сожалению, в настоящее время не существует надежных методов оперативного прогноза цунами несейсмического происхождения¹. При этом три вы-

¹ Единственным исключением являются метеоцунами, для которых в некоторых странах, в частности, в Испании и Хорватии, такие методы развиваются, и соответствующая служба создается (см., например, [54]).

шеперечисленных типа несейсмических цунами (вулканогенные, оползневые и метеорологические) представляют серьезную угрозу для Дальневосточного побережья России.

Имеется еще два аспекта явления, которые следует отметить:

1. Серьезные разрушения береговой инфраструктуры, повреждения заякоренных судов, различных портовых объектов часто вызываются не непосредственно волнами цунами, а сопутствующими им сильными течениями. Так, Курильское (Симуширское) цунами 15 ноября 2006 г. привело на противоположной стороне Тихого океана к убыткам около 30 млн. долларов в порту Кресент-Сити (Калифорния) в результате экстремальных течений, сформировавшихся в этом порту под действием цунами [20]. Еще более сильный ущерб в этом и других портах Южной Калифорнии был нанесен Чилийским цунами 2010 г. и Тохоку цунами 2011 г. [55]. Разрушительные течения могут быть вызваны цунами и метеоцунами даже со сравнительно небольшими высотами, как это наблюдалось 27 июня 2003 г. в бухте Мали-Стон в Хорватии [52]. Оценки течений, выполненные в работе [28] для характерных высот метеоцунами в портах Японии, показывают, что при прохождении Хунга-Тонга цунами опасные течения со скоростями несколько узлов также могли наблюдаться в некоторых портах побережья Тихого океана.

2. Результаты анализа наблюдений, выполненного в работах [10, 28, 39], показали сугубо индивидуальную реакцию колебаний уровня океана на внешнее воздействие в отдельных портах данного региона. То же мы наблюдаем и для Хунга-Тонга цунами (см. рис. 5–7). Видимо, это объясняется различной степенью защищенности отдельных пунктов побережья, а также локальными и региональными особенностями топографии и геометрии линии берега (этот вопрос рассматривался, в частности, в работе [13]).

Все перечисленные эффекты показывают, с одной стороны, исключительную важность тщательного изучения Хунга-Тонга цунами 2022 г., а с другой — необходимость разработки надежных подходов к оперативному и долгосрочному прогнозу подобных несейсмических явлений. Сложность подобной задачи очевидна, но один аспект проблемы является несомненным: необходим постоянный высокоточный мониторинг волн цунами с хорошим разрешением по времени (≤ 1 мин) и по пространству (~ 100 км). Более того, крайне желательно, чтобы одновременно проводились и прецизионные измерения атмосферного давления с точностью ~ 0.01 гПа или лучше — подобно тому, как сейчас уже делается во многих странах мира (Канада, США, Южная Корея и др.). Такой непрерывный мониторинг позволит получить ис-

ключительно ценный научный материал, который даст возможность глубже понять физику соответствующих явлений, улучшит качество оперативного прогноза сейсмических цунами и позволит наметить пути прогноза несейсмических цунами. Очевидно также, что для надежного оперативного оповещения о цунами (как сейсмических, так и несейсмических) для побережий внутренних морей России (Охотского, Японского) необходима установка донных кабельных или автономных станций в глубоководных частях этих морей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Взрыв вулкана Хунга-Тонга 15 января 2022 г. привел к формированию широкого спектра волн в атмосфере и океане, которые были зарегистрированы тысячами высокоточных цифровых приборов, включая микробарографы, береговые мареографы и датчики придонного давления в открытых частях Мирового океана. Атмосферные волны Лэмба, образовавшиеся в результате взрыва вулкана, распространялись со скоростью $\sim 300\text{--}320$ м/с и на своем пути генерировали отклик в океане — “метеоцунами”. Извержение вулкана также вызвало “океанские” волны цунами, которые распространялись непосредственно от источника со скоростью длинных волн $\sim 200\text{--}220$ м/с в глубоководной части океана.

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей проявления данного события на Дальневосточном побережье России и в близлежащих районах (Япония, Южная Корея, США). Для анализа использованы записи береговых мареографов, глубоководных станций DART и высокоточных микробарографов. При этом особое внимание было уделено работе Российской СПЦ по обеспечению безопасности российского побережья во время этого события и взаимодействию Российской СПЦ с Международной СПЦ.

На основе анализа измерений уровня моря и флуктуаций атмосферного давления вблизи российского побережья были оценены параметры волн цунами различного происхождения, сформированных извержением вулкана Хунга-Тонга. Высота измеренной атмосферной волны Лэмба от подошвы до гребня менялась в диапазоне от 1.1 гПа на станции Никольское (Командорские о-ва) до 2.5 гПа в Ханасаки (Япония). По времени прихода были оценены высоты волн цунами атмосферного и океанского происхождения. При этом выяснилось, что на большинстве станций, как на внешнем (океанском) побережье, так и во внутренних морях, высоты “океанской” волны преобладали. Так, на станциях Кушimoto, Ханасаки, Малокурильское и Водопадная высо-

ты атмосферной волны цунами составляли 90–130 см, а океанской — 113–190 см.

Российской СПЦ удалось успешно преодолеть проблемы, возникшие при оперативном прогнозе этого сложного явления. Использование оперативных измерений на островных и японских береговых мареографах, измерений станций системы DART в северо-западной части Тихого океана и активное взаимодействие с Международной СПЦ позволили эффективно решить задачи оперативного оповещения об угрозе волн цунами и защиты населения прибрежных районов Дальневосточного региона.

Данное событие позволило выявить и некоторые недостатки Российской СПЦ, главным из которых является отсутствие современной цифровой измерительной аппаратуры на океанской стороне Курильской гряды — районе, наиболее подверженном угрозе волн цунами. Отсутствие автоматизированных постов высокочастотных измерений колебаний уровня моря и атмосферного давления на протяженном участке Дальневосточного побережья России значительно осложняет оперативное прогнозирование опасности волн цунами для всего региона и создает серьезные проблемы для последующего исследования данного явления. Необходима установка высокоточных цифровых приборов, обеспечивающих непрерывный мониторинг волн цунами и родственных явлений вдоль всего Дальневосточного побережья России с хорошим разрешением по времени (≤ 1 мин) и по пространству (~ 100 км).

Существующие СПЦ, как Российская, так и мировая, в первую очередь рассчитаны на прогноз сейсмогенных цунами, вызванных подводными землетрясениями. К сожалению, в настоящее время не существует надежных методов оперативного прогноза цунами несейсмического происхождения. При этом несейсмические цунами (вулканогенные, оползневые и метеорологические) представляют серьезную угрозу для Дальневосточного побережья России. Для надежного оперативного оповещения о цунами (как сейсмических, так и несейсмических) для побережий внутренних морей России (Охотского, Японского) необходима установка донных кабельных или автономных станций в глубоководных частях этих морей.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Куликов Е.А. и др. Оползни на восточном склоне о. Сахалин как источники возможных цунами // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 3. С. 334–337.
2. Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Долгих Г.И., Долгих С.Г. Регистрация возмущений в Японском море, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга-Хаапай в архипелаге Тонга 15.01.2022 // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 259–264.
3. Иванова А.А., Куликов Е.А., Файн И.В., Баранов Б.В. Генерация цунами подводным оползнем вблизи восточного побережья о. Сахалин // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика. Астрономия. 2018. № 2. С. 111–116.
4. Ким Х.С., Рабинович А.Б. Цунами на северо-западном побережье Охотского моря / В Сб.: “Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе”, Южно-Сахалинск, ИМГиГ ДВНЦ АН СССР. 1990. Т. 1. С. 206–218.
5. Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Хузеева М.О. Сейши, вызываемые атмосферными возмущениями в диапазоне периодов метеоцунами, у побережья южной половины острова Сахалин // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36. № 4. С. 437–450. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-4-437-450>
6. Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. и др. Генерация цунами оползнями на тихоокеанском побережье Северной Америки и роль приливов в этом процессе // Океанология. 1998. Т. 38. № 1. С. 361–367.
7. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
8. Лобковский Л.И., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. и др. Курильские землетрясения и цунами 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. (наблюдения, анализ и численное моделирование) // Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 181–197.
9. Мурти Т. Сейсмические морские волны цунами. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 447 с.
10. Смирнова Д.А., Медведев И.П. Экстремальные колебания уровня Японского моря, вызванные прохождением тайфунов Майсак и Хайшен в сентябре 2020 г. // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 718–732. <https://doi.org/10.31857/S0030157423050179>
11. Смышляев А. Время красной рыбы. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2003. 426 с.
12. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 310 с.
13. Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н. Цунами и другие опасные морские явления в портах Дальневосточного региона России (по инструментальным измерениям). Южно-Сахалинск, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 2013. 44 с.
14. Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н., Кайстренко В.М. Цунами 5 ноября 1952 г. в Северо-Курильске и его эхо в последующие 70 лет // Природа. 2022. № 4. С. 12–26.
15. Adam D. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere // Nature. 2022. V. 601. № 497. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00127-1>

16. Amores A., Monserrat S., Marcos M. et al. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49, e2022GL098240. <https://doi.org/10.1029/2022GL098240>
17. Brenna M., Cronin S.J., Smith I.E.M. et al. Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific // *Lithos*. 2022. V. 412–413. № 106614. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106614>
18. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. № 6, e2022GL098153. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>
19. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y. et al. Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022 // *Remote Sens*. 2022. V. 14. Issue 9. <https://doi.org/10.3390/rs14092179>
20. Dengler L., Uslu B., Barberopoulou A. et al. The vulnerability of Crescent City, California, to tsunamis generated by earthquakes in the Kuril Islands region of the northwestern Pacific // *Seismol. Res. Lett.* 2008. V. 79. № 5. P. 608–619.
21. Duncombe J. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves // *Eos*. 2022. V. 103. <https://doi.org/10.1029/2022EO220050>
22. Ewing M., Press F. Tide-gage disturbances from the great eruption of Krakatoa // *Transactions, American Geophysical Union*. 1955. V. 36. № 1. P. 53–60.
23. Fine I.V., Thomson R.E. A wavefront orientation method for precise numerical determination of tsunami travel time // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. V. 13. № 11. P. 2863–2870. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2863-2013>.
24. Garrett C.J.R. A theory of the Krakatoa tide gauge disturbances // *Tellus*. 1970. V. 22. P. 43–52.
25. Gusiakov V.K. Global occurrence of large tsunamis and tsunami-like waves within the last 120 years (1900–2019) // *Pure Appl. Geophys.* 2020. V. 177. P. 1261–1266. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02437-9>
26. Gusiakov V.K. Meteotsunamis at global scale: Problems of event identification, parameterization and cataloguing // *Natural Hazards*. 2021. V. 106. P. 1105–1123. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04230-2>
27. Harkrider D., Press F. The Krakatoa air-sea waves: An example of pulse propagation in coupled systems // *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 1967. V. 13. P. 149–159.
28. Heidarzadeh M., Rabinovich A.B. Combined hazard of typhoon-generated meteorological tsunamis and storm surges along the coast of Japan // *Natural Hazards*. 2021. V. 106. № 2. P. 1639–1672. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04448-0>
29. Heidarzadeh M., Šepić J., Rabinovich A.B. et al. Meteorological tsunami of 19 March 2017 in the Persian Gulf: Observations and analyses // *Pure Appl. Geophys.* 2020. V. 177. № 3. P. 1231–1259. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02263-8>
30. Heinrich P., Gailler A., Dupont A. et al. Observations and simulations of the meteotsunami generated by the Tonga eruption on 15 January 2022 in the Mediterranean Sea // *Geophysical Journal International*. 2023. V. 234. № 2. P. 903–914.
31. Hu G., Li L., Ren Z., Zhang K. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2023. V. 23. P. 675–691. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-675-2023>
32. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T. et al. Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022 // *Pure Appl. Geophys.* 2022. V. 179. № 5. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-030xx-x>
33. Kong L.S.L., Dunbar P.K., Arcos N. (Eds.), *Pacific Tsunami Warning System: A Half-Century of Protecting the Pacific, 1965–2015*, Honolulu, International Tsunami Information Center, 2015. 188 p.
34. Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption // *Science*. 2022. V. 377. № 6601. P. 91–94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
35. Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E. et al. Acoustic-gravity Lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami // *Pure Appl. Geophys.* 2022. V. 179. № 5. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>
36. Kusky T.M. Déjà vu: Might future eruptions of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano be a repeat of the devastating eruption of Santorini, Greece (1650 BC)? // *Journal of Earth Science*. 2022. V. 33. № 2. P. 229–235. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1624-2>
37. Lynett P., McCann M., Zhou Z. et al. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption // *Nature*. 2022. V. 609. № 7928. P. 728–733. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05170-6>
38. Matoza R.S., Fee D., Assink J.D. et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga // *Science*. 2022. V. 377. № 6601. P. 95–100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>
39. Medvedev I.P., Rabinovich A.B., Šepić J. Destructive coastal sea level oscillations generated by Typhoon Maysak in the Sea of Japan in September 2020 // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. № 8463. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12189-2>
40. Medvedeva A., Medvedev I., Fine I. et al. Local and trans-oceanic tsunamis in the Bering and Chukchi seas based on numerical modeling // *Pure Appl.*

- Geophys. 2023. V. 180. P. 1639–1659. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03251-9>
41. *Montserrat S., Vilibić I., Rabinovich A.B.* Meteotsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2006. V. 6. № 6. P. 1035–1051. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-1035-2006>
 42. *Omira R., Ramalho R.S., Kim J. et al.* Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source // *Nature*. 2022. V. 609. № 7928. P. 734–740. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04926-4>
 43. *Pararas-Carayannis G.* The tsunami generated from the eruption of the volcano of Santorin in the Bronze Age // *Natural Hazards*. 1992. V. 5. № 2. P. 115–123. <https://doi.org/10.1007/BF00127000>
 44. *Pelinovsky E., Choi B.H., Stromkov A. et al.* Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami / In: K. Satake (Eds.) *Tsunamis: Case Studies and Recent Developments*. Dordrecht, Springer, 2005. P. 57–78; https://doi.org/10.1007/1-4020-3331-1_4
 45. *Press F., Harkrider D.* Air-sea waves from the explosion of Krakatoa // *Science*. 1966. V. 154. P. 1325–1327.
 46. *Rabinovich A.B.* Twenty-seven years of progress in the science of meteorological tsunamis following the 1992 Daytona Beach event // *Pure Appl. Geophys.* 2020. V. 177. № 3. P. 1193–1230. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02349-3>
 47. *Rabinovich A.B.* (Ed.). *Two 2018 Destructive Indonesian Tsunamis: Palu (Sulawesi) and Anak Krakatau*, Basel: Springer, 2022. 442 p.
 48. *Ramírez-Herrera M.T., Coca O., Vargas-Espinosa V.* Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano eruption, Tonga // *Pure Appl. Geophys.* 2022. V. 179. № 4. P. 1117–1137. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03017-9>
 49. *Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T.* Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption // *Earth, Planets and Space*. 2022. V. 74. № 61. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>
 50. *Themens D.R., Watson C., Žagar N. et al.* Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption // *Geophysical Research Letters*. 2022. V. 49. e2022GL098158. <https://doi.org/10.1029/2022GL098158>
 51. *Tsukanova E., Medvedev I.* The observations of the 2022 Tonga-Hunga tsunami waves in the Sea of Japan // *Pure Appl. Geophys.* 2022. V. 179. № 12. P. 4279–4299. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03191-w>
 52. *Vilibić I., Domijan N., Orlić M. et al.* Resonant coupling of a traveling air pressure disturbance with the east Adriatic coastal waters // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. V. 109. № C10001. <https://doi.org/10.1029/2004JC002279>
 53. *Vilibić I., Rabinovich A.B., Anderson E.J.* Special issue on the global perspective on meteotsunami science: editorial // *Natural Hazards*. 2021. V. 106. № 2. P. 1087–1104. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04679-9>
 54. *Vilibić I., Šepić J., Rabinovich A., Monserrat S.* Modern approaches in meteotsunami research and early warning // *Frontiers in Marine Science*. 2016. V. 3. № 57. P. 1–7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00057>
 55. *Wilson R.I., Admire A.R., Borrero J.C. et al.* Observations and impacts from the 2010 Chilean and 2011 Japanese tsunamis in California (USA) // *Pure Appl. Geophys.* 2013. V. 170. № 6–8. P. 1127–1147.
 56. *Wright C.J., Hindley N.P., Alexander M.J. et al.* Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption // *Nature*. 2022. V. 609. P. 741–746. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>
 57. *Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E. et al.* Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2022. V. 9. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>

OBSERVATIONS OF TSUNAMI WAVES ON THE PACIFIC COAST OF RUSSIA ORIGINATING FROM THE HUNGA TONGA-HUNGA HA’APAI VOLCANIC ERUPTION ON JANUARY 15, 2022

**I. P. Medvedev^{a, #}, T. N. Ivetskaya^b, A. B. Rabinovich^a, E. S. Tsukanova^a
and A. Yu. Medvedeva^{a, c}**

^a *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b *Sakhalin Tsunami Warning Center, State Institution of the Sakhalin Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

^c *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: patamates@gmail.com*

The Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcanic eruption on January 15, 2022 generated a tsunami that affected the entire Pacific Ocean. Tsunami from the event have been generated both by incoming waves from the source area, with a long-wave speed in the ocean of ~ 200–220 m/s, and by an atmospheric wave propagating

at a sound speed ~ 315 m/s. Such a dual source mechanism created a serious problem and was a real challenge for the Pacific tsunami warning services. The work of the Russian Tsunami Warning Service (Yuzhno-Sakhalinsk) during this event is considered in detail. The tsunami was clearly recorded on the coasts of the Northwest Pacific and in the adjacent marginal seas, including the Sea of Japan, the Sea of Okhotsk and the Bering Sea. We examined high-resolution records (1-min sampling) of 20 tide gauges and 8 air pressure stations in this region for the period of January 14–17, 2022. On the Russian coast, the highest waves, with a trough-to-crest wave height of 1.3 m, were recorded at Malokurilskoe (Shikotan Island) and Vodopadnaya (the southeastern coast of Kamchatka). Using numerical simulation and data analysis methods, we were able to separate the oceanic “gravity” tsunami waves from propagating atmospheric pressure waves. In general, we found that on the outer (oceanic) coasts and the southern coast of the Sea of Okhotsk, oceanic tsunami waves prevailed, while on the coast of the Sea of Japan, oceanic and atmospheric tsunami waves had similar heights.

Keywords: tsunami, Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano, Pacific Ocean, Lamb waves, Sea of Okhotsk, Sea of Japan, Tsunami Warning Service, volcanic eruption