

Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза*

Ю. П. Королёв[@], П. Ю. Королев

^{@E-mail:} Yu_P_K@mail.ru

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

Резюме. Целью работы являлось подтверждение возможности прогнозирования цунами несейсмического (вулканического) происхождения экспресс-методом оперативного прогноза. Образовавшаяся в результате взрывного извержения вулкана 15.01.2022 поверхностная волна представляла собой суперпозицию вынужденных (барических) волн, вызванных волной атмосферного давления, и свободных (гравитационных) волн, генерированных распадом возмущения в очаге. Для расчета гравитационной составляющей поверхностной волны применен экспресс-метод оперативного прогноза цунами. Способ позволяет по данным станций измерения уровня океана в режиме реального времени рассчитывать форму цунами в любой точке океана и вблизи побережья. Расчет цунами 15.01.2022, его гравитационной составляющей, на удаленных от очага станциях системы DART выполнен по данным ближайших к вулкану станций DART 51425 и 52406. Для адекватного прогноза достаточно информации о цунами ближайших к очагу станций DART длительностью четверть первого периода, что особенно важно в условиях оперативного режима. Результат удовлетворяет определению понятия «прогноз цунами», сформулированному Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО. Подтверждено, что экспресс-метод может давать прогноз цунами независимо от механизма его возбуждения. Остается невыясненным вопрос, насколько адекватной является оценка амплитуды поверхностных волн по данным о давлении на дне.

Ключевые слова: цунами, оперативный прогноз цунами, службы предупреждения о цунами, Тихий океан, измерения уровня океана, волны Лэмба, вынужденные волны, свободные волны

Assessment of the tsunami in the Pacific Ocean caused by the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano on January 15, 2022, using the express method of operational forecasting*

Yury P. Korolev[@], Pavel Yu. Korolev

^{@E-mail:} Yu_P_K@mail.ru

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

Abstract. The aim of the study was to confirm the possibility of forecasting tsunamis of non-seismic (volcanic) origin using the express method of operational forecasting. The surface wave formed as a result of the explosive volcanic eruption on January 15, 2022 was a superposition of forced (baric) waves caused by an atmospheric pressure wave and free (gravity) waves generated by the disintegration of the disturbance in the source. The express method of operational tsunami forecasting was used to compute the gravitational component of the surface wave. The method allows one to

* Перевод данной статьи на английский язык напечатан в журнале «Геосистемы переходных зон», 2025, т. 9, № 1, с. 56–65.

<https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065>; <https://www.elibrary.ru/kktwzl>

Full text of this article in English published in the “Geosystems of Transition Zones” journal, 2025, vol. 9, No. 1. pp. 56–65.

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.9.1.056-065>; <https://www.elibrary.ru/kktwzl>

compute the tsunami waveform at any point in the ocean and near the coast in real time based on the data from the sea level measurement stations. The computation of the tsunami on 15.01.2022, its gravitational component, at the DART stations remote from the source was performed based on the data from the DART stations 51425 and 52406 closest to the volcano. For an adequate forecast, the information on the tsunami of the DART stations closest to the source with the duration of a quarter of the first period is sufficient, which is especially important in the operational mode. The result satisfies the definition of the concept of “tsunami forecast” formulated by the Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. It has been confirmed that the express method can provide a tsunami forecast regardless of the mechanism of its excitation. It remains unclear how adequate the assessment of the amplitude of surface waves is based on the bottom pressure data is.

Keywords: tsunami, operational tsunami forecast, tsunami warning services, Pacific Ocean, sea level measurements, Lamb waves, forced waves, free waves

Для цитирования: Королев Ю.П., Королев П.Ю. Оценка цунами в Тихом океане, вызванного взрывом вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай 15 января 2022 г., экспресс-методом оперативного прогноза. [Электронный ресурс]. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 1. <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-1-4.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065>

For citation: Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. Assessment of the tsunami in the Pacific Ocean caused by the explosion of the Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano on January 15, 2022, using the express method of operational forecasting. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 1, pp. 56–65. (In Russ. & in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2025.9.1.056-065>; <https://www.elibrary.ru/kktwz1>

Введение

Мощное эксплозивное извержение вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай (далее Тонга), произошло в южной части Тихого океана 15 января 2022 г.* Оно оценивается как крупнейшее извержение подводного вулкана за почти полтора столетия с момента катастрофического разрушения Кракатау в Индонезии в 1883 г. Образованный незадолго до извержения вулканический остров был полностью разрушен. Продукты взрыва поднялись на высоту 58 км [1]. Эффект от взрыва наблюдался во всех средах: ионосфере, атмосфере, в толще океана и на его поверхности [2].

Извержение вулкана вызвало катастрофическое цунами на ближних островах архипелага Тонга – до 22 м на расстоянии около 90 км от вулкана. Цунами нанесло ущерб не только ближайшим островным государствам, включая Королевство Тонга и Фиджи, но и прибрежным территориям вдоль тихоокеанского побережья, включая Новую Зеландию, Японию и Перу [1]. Наблюдались заплески до 1.3 м в Японии, выше 3.5 м в Калифорнии, около 1 м в Чили и до 1 м в Перу*.

Волна повышенного давления в атмосфере зарегистрирована множеством барографов не только на островах Тихого океана, но и на материках. Волна давления над поверхностью океана (называемая также волной Лэмба), распространяющаяся со скоростью, близкой к скорости звука в атмосфере, вызвала возмущения свободной поверхности океана в виде вынужденной волны, движущейся с той же скоростью. Такую волну далее мы называем барической. Наряду с этим изменения уровня поверхности воды в области взрыва генерировали гравитационные (свободные) волны в океане, распространявшиеся со скоростью длинных волн. Барическая и/или гравитационная волны зарегистрированы множеством глубоководных донных станций системы DART** в Тихом океане (по данным Национального центра сбора данных – National Data Buoy Center NOAA; https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml). Небольшое количество станций зарегистрировало полностью обе волны от момента вступления барической волны. В силу различия в скоростях распространения гравитационная волна заметно отстает от барической. Амплитуды барической и гравитационной волн по данным

* NOAA National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-search> (дата обращения: 08.02.2025).

** NOAA Center for Tsunami Research. URL: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart> (дата обращения: 08.02.2025).

глубоководных станций сопоставимы даже на больших расстояниях от возмущения. Затухание амплитуды барических и гравитационных волн одинаково и обратно пропорционально квадратному корню из расстояния от источника [3]. Волны такого типа, описываемые в пространстве двух переменных, имея передний фронт, не имеют заднего. Колебания позади фронта, затухая, продолжают длительное время.

Механизм возбуждения волн как в атмосфере, так и на поверхности океана процессами, происходившими в очаге извержения вулкана Тонга, довольно сложный. Возможно, волны давления в атмосфере вызваны не одиночным взрывом. В [4] предполагается, что в области вулкана в течение получаса-часа произошло пять взрывов разной интенсивности. Быстрое (взрывное) изменение атмосферного давления само по себе является источником гравитационных волн. Сдвиг (расталкивание) водных масс и/или продуктов разрушения вулканического острова также может быть дополнительным источником гравитационных волн. В любом случае поверхностные волны представляют собой суперпозицию барических и гравитационных волн после прихода последних в точку наблюдения.

Различные аспекты явлений в атмосфере, на поверхности и на дне океана изложены в многочисленных работах. Волны давления в атмосфере по натурным данным анализировались в работах [5, 6]. Численное моделирование волн давления на основе специально построенного источника выполнено в статье [3]. Влияние атмосферных волн давления на генерацию волн на поверхности океана на основе численного моделирования изучалось в [3, 7–12] и на сайте NOAA Center for Tsunami Research*. Процесс генерации гравитационных волн в результате возмущений водной поверхности в очаге рассмотрен с помощью численной модели в [3, 13]. Параметры источника возмущений выбирались исходя из степени совпадения форм расчетных и зарегистрированных волн в океане.

В работе [14] рассмотрена одномерная модель возбуждения вынужденных волн в слое

жидкости под действием волны повышенного давления в атмосфере. Показано, что амплитуда вариаций давления на дне выше амплитуды вариаций давления над свободной поверхностью в $U^2/(U^2 - gH)$ раз, где U – скорость волны давления в атмосфере, H – глубина слоя жидкости, g – ускорение свободного падения. Справедливость этого утверждения проверена сравнением данных о давлении на дне океана, измеренном глубоководными станциями DART 21418, 21420 и 51407, и данных ближайших к этим станциям наземных барографов [2, 14]. Амплитуда вариаций придонного давления, выраженная в сантиметрах водяного столба, больше амплитуды вынужденных волн на свободной поверхности в U^2/gH раз. Эффекты, исследованные в [2, 14], в перечисленных выше работах не рассматривались.

Во всех работах, упомянутых выше, вопросы, связанные с оперативным прогнозом цунами, не обсуждались. Отмечалось лишь, что действующие службы предупреждения о цунами не были готовы к прогнозу такого рода событий [3, 5, 8]. Предлагается дополнить существующие способы краткосрочного прогноза цунами алгоритмами, позволяющими учитывать возбуждение цунами атмосферными волнами давления [1, 3–5, 8].

Служба предупреждения о цунами США, опирающаяся на действующий способ NOAA, известный также как способ SIFT**, не выполнила прогноз цунами 15.01.2022, его гравитационной составляющей, в силу того, что для области извержения в базе данных отсутствуют соответствующие синтетические мареограммы. В соответствии с методикой, положенной в основу этого способа, после события проведен расчет цунами в Тихом океане. Для получения формы гравитационной волны выполнен расчет синтетических мареограмм от 9 источников гауссовой формы в очаговой области вулкана. Расчет волновых форм цунами в удаленных точках проводился с использованием расчетных синтетических мареограмм и данных трех станций DART. Данные этих станций не включали начальные части

* NOAA Center for Tsunami Research: Volcano-generated Tsunami Event – January 15, 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apa Tsunami. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/> (дата обращения: 08.02.2025).

** NOAA Center for Tsunami Research: Tsunami Forecasting. URL: <https://nctr.pmel.noaa.gov/tsunami-forecast.html> (дата обращения: 08.02.2025).

записей, соответствующие только барическим волнам. Суперпозиция барических и гравитационных волн в записях DART усложнила анализ цунами и процесс инверсии источника для моделирования события (<https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/>). Амплитуды расчетных волн в основном воспроизводятся, даже для удаленных мест. Сложность инвертирования смешанных данных записей DART может быть основной причиной некоторых недостатков модели.

При других событиях данные об уровне океана, которые используются для прогноза, могут искажаться также наличием сигналов (шума) в результате прохождения сейсмических волн по дну океана. Такое возможно, когда станции слежения за уровнем находятся близко к очагу, например станция DART 46409 во время события 23.01.2018 вблизи о. Кадык. В таких случаях могут возникать затруднения с идентификацией собственно цунами. Расчет цунами по данным об уровне океана, содержащим шуму сейсмического происхождения, проведен в работе [15], где показано, что расчетные волновые формы могут быть искажены, но, тем не менее, позволяют оценивать степень опасности ожидаемого цунами.

Мы полагаем, что прогноз цунами 15.01.2022 мог быть выполнен экспресс-методом оперативного прогноза цунами [16]. Ранее [17, 18] при моделировании цунами Тохоку 2011 г. было показано, что способ дает адекватный результат, несмотря на то что тектонический механизм возбуждения сопровождался, предположительно, подводным оползнем [19]. Способ является приближенным, но позволяет давать адекватную оценку ожидаемого цунами в заданной точке в режиме реального времени.

Цель работы и постановка задачи

Целью настоящей работы являлось подтверждение применимости экспресс-метода оперативного прогноза в случаях возбуждения цунами источниками несейсмического происхождения. Извержение вулкана Тонга – хороший пример для демонстрации возможностей экспресс-метода.

В соответствии с алгоритмом экспресс-метода [16] для построения передаточной

функции проведены вспомогательные расчеты волн от элементарного источника круговой формы с центром, совпадающим с эпицентром извержения вулкана. Никаких предположений о механизме возбуждения этих волн не делалось. В оперативном режиме расчет выполняется сразу после получения информации о координатах источника цунами. По данным о цунами в океане с помощью передаточной функции рассчитываются формы ожидаемого цунами в заданных пунктах. В режиме реального времени – после получения информации о прохождении цунами через станцию измерения уровня океана. В событии 15.01.2022 для прогноза использованы данные ближайших к месту взрыва донных станций DART 51425 или 52406. Применялась только часть записи, содержащая гравитационную составляющую. Расчет выполнялся для станций DART, записи которых содержат и барическую и гравитационную составляющие.

В отличие от способа NOAA, для вспомогательных расчетов использовался только один элементарный источник, расчет цунами проведен по данным одной станции DART.

В условиях оперативного режима для формирования прогноза желательно использовать по возможности короткие отрезки ряда данных станции DART (например, четверть первого периода). Качество расчета (прогноза) оценивается возможностью адекватного определения степени опасности ожидаемого цунами при сравнении с имеющимися фактическими данными.

Результаты и обсуждение

Предварительные эксперименты

Расчетная схема численных экспериментов с указанием эпицентра и местоположения станций системы DART приведена на рис. 1. Координаты станций взяты с сайта National Data Buoy Center (https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml).

Для проверки адекватности дальнейших вычислений предварительно по данным ближайшей к очагу станции рассчитаны волновые формы цунами на удаленных станциях DART разной длительности: от четверти периода

до полного периода и более. Эти данные содержат информацию как о гравитационной, так и о барической составляющих, разделить которые невозможно. Наличие барической компоненты может повлиять на адекватность оценки гравитационной волны в удаленных точках. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета волновых форм на станции DART 52401 по данным станции DART 51425 различной длительности (17, 22, 30 и 42 мин), соответствующим гравитационной волне.

Волновые формы, натурные и рассчитанные по исходным данным различной длитель-

ности, от четверти до полного первого периода, в целом неплохо совпадают. Наблюдаются незначительные расхождения расчетных форм, что обусловлено приближенным характером экспресс-метода, а также наличием барической составляющей в исходных данных. Дальнейшее увеличение отрезка данных не приводит к улучшению прогноза, так как данные станций DART 51425 и DART 52401 содержат в себе информацию о барической волне. Результат показывает, что в условиях оперативного режима использование коротких отрезков ряда данных дает вполне адекватный прогноз ожидаемого цунами.



Рис. 1. Схема расчетной области. Звездочка – эпицентр взрыва. Пятизначные числа – положения станций системы DART. Синим цветом (более крупным шрифтом) обозначены станции, зарегистрировавшие как барическую, так и гравитационную волны.

Fig. 1. Map of the area used for computation. The asterisk shows the epicenter of the explosion. Five-digit numbers are the positions of the DART system stations. The stations that registered both baric and gravity waves are marked in blue (in larger font).

Расчет гравитационных составляющих волн, вызванных извержением вулкана Тонга

Экспресс-методом оперативного прогноза цунами выполнен расчет гравитационных волн, возбужденных в результате взрывного извержения вулкана Тонга, в точках в океане, где находятся станции DART (данные взяты с сайта National Data Buoy Center; https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml). Для вспомогательных расчетов применялся элементарный источник в виде кругового начального возвышения свободной поверхности океана в эпицентральной области извержения. Использовались данные станций DART 51425 или DART 52406, наиболее близких к эпицентру взрыва. Применялись части записей, содержащие гравитационные составляющие, вступление которых определялось по времени пробега волны от вспомогательного источника. Для станции DART 51425 это время равно 120 мин от начала извержения, для станции DART 52406 – 252 мин. Как отмечалось выше, записи содержат как барическую, так и гравитационную составляющие.

Расчет выполнялся для станций системы DART в океане, зарегистрировавших как барическую, так и гравитационную волны. Номера этих станций на рис. 1 изображены более крупным шрифтом.

Исходные данные станции DART 51425 представлены на рис. 2 в левой колонке сверху. Отрезок ряда (четверть первого периода), использованный для расчетов, выделен красным цветом (от 120 до 137 мин от момента взрыва вулкана).

Данные станций DART, отраженные на рис. 3, включают как барическую, так и гравитационную составляющие.

Результаты расчета экспресс-методом по данным станции DART 51425 длительностью в четверть первого периода представлены на рис. 3.

Расчет показывает приход гравитационной волны, начинающейся с понижения уровня. На некоторых, наиболее удаленных от очага станциях амплитуды расчетных волн ниже, чем зарегистрированных. Это объясняется, во-первых, тем, что исходные данные

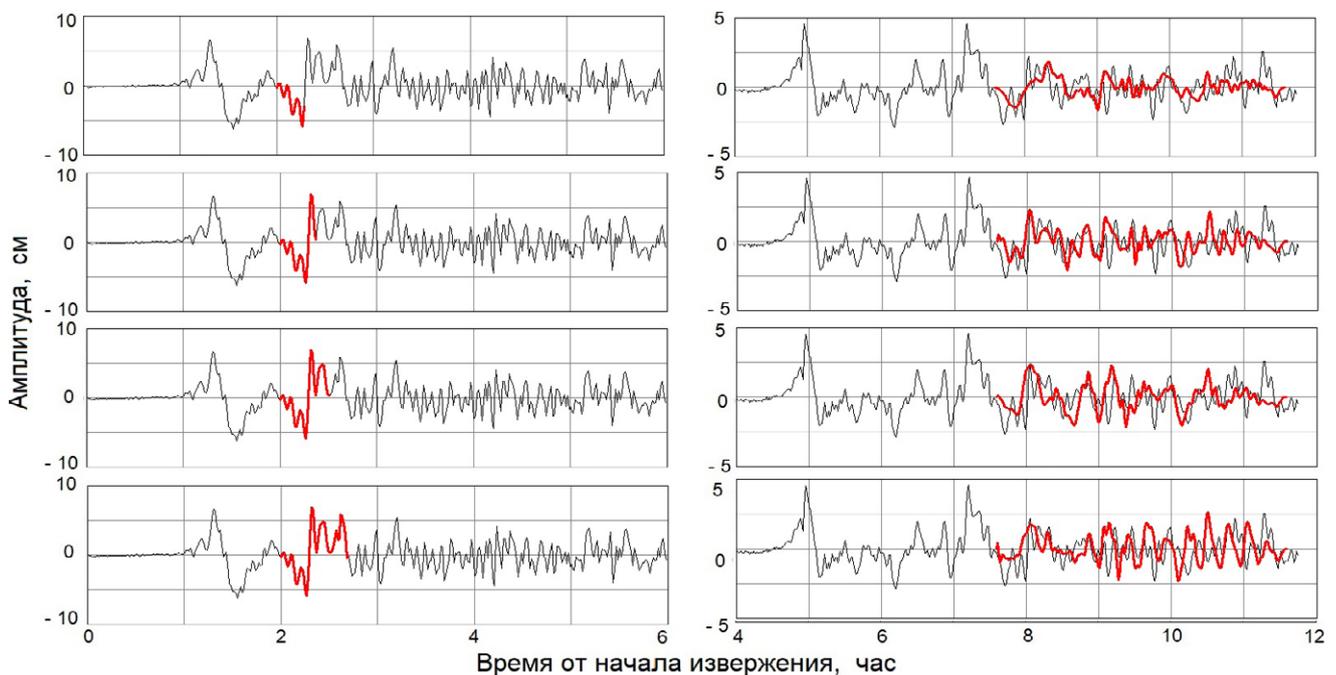


Рис. 2. Левая колонка – данные станции DART 51425 различной длительности (17, 22, 30 и 42 мин). Красной линией выделен отрезок ряда данных, использованный для расчетов. Правая колонка – волновые формы на станции DART 52401: натурные (тонкая черная линия) и рассчитанные по данным станции DART 51425 различной длительности (красная линия), начиная со 120 мин от начала извержения.

Fig. 2. The left column shows the data from the DART 51425 station of varying duration (17, 22, 30 and 42 min). The red line highlights the section of the data series used for calculations. The right column shows waveforms at the DART 52401 station: natural (thin black line) and computed based on the data from the DART 51425 station of varying durations (red line), starting from 120 minutes after the start of the eruption.

для расчета содержат барическую составляющую, а во-вторых, тем, что записи удаленных станций также содержат обе составляющие.

Качественно формы расчетных волн совпадают с низкочастотными компонентами зарегистрированных волн, включающих барическую и гравитационную составляющие. Детальный спектральный анализ сигналов не входил в задачи работы.

Результаты аналогичных расчетов по данным другой станции – DART 52406 представлены на рис. 4. Запись этой станции показана тонкой черной линией (левая колонка, сверху), где красным цветом выделен отрезок ряда, использованный для расчетов (четверть периода, от 252 до 273 мин от взрыва вулкана).

Как отмечено в [2, 14], амплитуды вынужденных поверхностных (барических) волн, оцениваемые по данным донных станций, являются, видимо, завышенными. К части ба-

рической составляющей, предшествующей приходу гравитационной волны, применен корректирующий множитель gH/U^2 в соответствии с [2, 14]. Значения корректирующих множителей приведены в таблице. При расчетах множителей скорость распространения атмосферной волны давления принята равной 312 м/с [14]. Скорректированные формы барических волн показаны на рис. 4 жирной черной линией. На этом же рисунке изображены нескорректированные данные станций DART (тонкая черная линия), включающие как барическую, так и гравитационную составляющие. Видно, что скорректированные амплитуды вынужденных волн на поверхности океана меньше измеренных донными датчиками почти в 2 раза. Применение корректирующего множителя для данных, содержащих одновременно барическую и гравитационную составляющие, неправомерно.

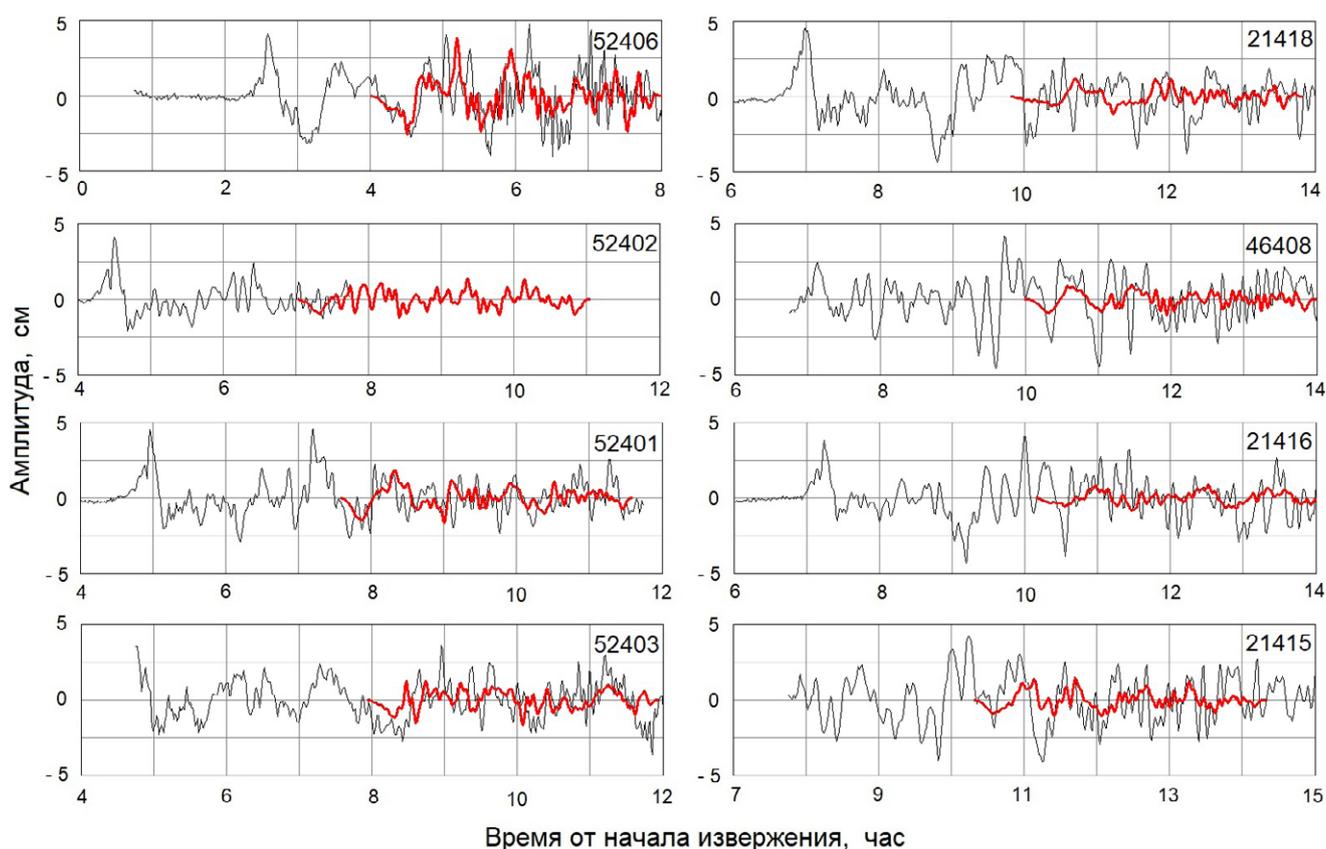


Рис. 3. Волновые формы цунами, полученные экспресс-методом оперативного прогноза цунами (красная линия) по данным станции DART 51425 длительностью 17 мин. Данные станций DART (в сантиметрах водяного столба) показаны тонкой черной линией. В каждом фрагменте этого и следующего рисунков указан номер станции DART.

Fig. 3. Tsunami waveforms obtained by the express method of operational tsunami forecasting (red line) based on the 17-minute data from the DART station 51425. The DART station data in centimeters of water column are shown by a thin black line. Each fragment of this and the following figure shows the DART station number.

На том же рисунке 4 показаны результаты расчета гравитационной составляющей (красная линия) по данным станции DART 52406. Как и при расчете по данным станции DART 51425, приход гравитационной волны начинается с понижения уровня. На некоторых станциях амплитуды расчетных волн ниже, чем зарегистрированных, что объясняется наличием барической составляющей в исходных данных станции DART 52406 для расчета и в записях удаленных станций. Структуры низкочастотных колебаний расчетных и фактических в целом соответствуют друг другу.

Формы гравитационных составляющих волн, рассчитанных по данным станций DART 51425 и DART 52406, совпадают с точностью, необходимой для оценки степени опасности цунами.

Структура волны на свободной поверхности довольно сложная и включает в себя как волну, вызванную основной волной атмосферного давления, так и вторичные волны, возбужденные при прохождении волны атмосферного давления над неоднородностями земной поверхности. Кроме того, при прохождении над областями океана с неоднородным дном волна атмосферного давления генерирует свободные гравитационные волны. На эти волны накладывается свободная гравитационная волна, возбужденная взрывом вулкана и другими сопутствующими эффектами в очаге. Разделить эти составляющие невозможно. Значения амплитуд волн на поверхности океана, возбуждаемых волнами атмосферного давления, оцениваемые по данным донных станций, как показано в [2, 14], являются, видимо,

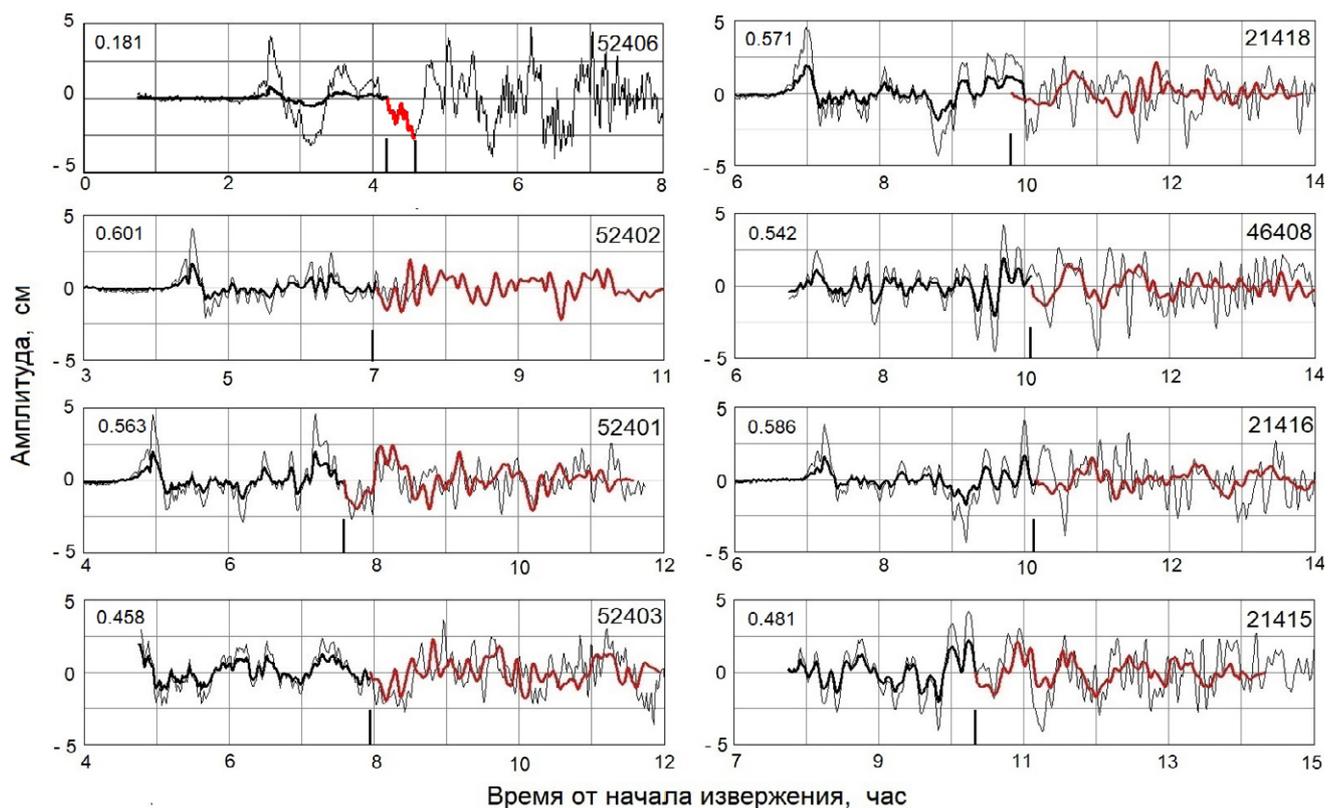


Рис. 4. Волновые формы цунами (красная линия), рассчитанные по данным станции DART 52406 длительностью 21 мин (левая колонка, сверху; красным цветом и вертикальными линиями выделен отрезок ряда данных, использованный для расчетов). Момент вступления гравитационной составляющей отмечен вертикальной линией. Данные донных станций (в сантиметрах водяного столба) изображены тонкой черной линией. Амплитуда части записи, предшествующей гравитационной волне, умножена на корректирующий множитель gH/U^2 (жирная черная линия). Значение множителя указано для каждой станции DART (слева сверху на каждом фрагменте).

Fig. 4. Tsunami waveforms (red line) computed based on the 21-min data from the DART 52406 station data (left column, top; the section of the data series used for the computation is highlighted in red and marked with vertical lines). The moment of entry of the gravitational component is marked by a vertical line. The bottom station data are shown by a thin black line. The amplitude of the part of the record preceding the gravity wave is multiplied by the correction factor gH/U^2 (thick black line). The value of the factor is indicated for each DART station (top left in each fragment).

Таблица. Значения корректирующего множителя**Table.** Correction factor values

Показатель	Станция DART							
	52406	52402	52403	52401	21418	46408	21416	21415
Глубина океана H , м	1800	5963	4542	5590	5664	5374	5812	4775
Множитель gH/U^2	0.181	0.601	0.458	0.563	0.571	0.542	0.586	0.481

Примечание. U – скорость волны давления в атмосфере, H – глубина слоя жидкости, g – ускорение свободного падения. Глубины океана в местах нахождения станций DART, приведенные в таблице, взяты с сайта National Data Buoy Center (https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml).

Note. U is the velocity of the pressure wave in the atmosphere, H is the depth of the liquid layer and g is the acceleration due to gravity. The ocean depths at the locations of the DART stations given in the table were taken from the National Data Buoy Center website (https://ndbc.noaa.gov/to_station.shtml).

завышенными. Применение корректирующего множителя к суммарной волне невозможно без разделения составляющих. В связи с этим возникает вопрос, насколько адекватной является оценка амплитуд поверхностных волн по данным о давлении на дне.

В целом рассчитанные формы цунами (гравитационной составляющей) дают вполне адекватный результат, несмотря на помехи, вызванные барической составляющей. Это подтверждает предположение о применимости экспресс-метода для прогноза цунами несейсмического происхождения. Качество расчета сопоставимо с качеством расчета цунами действующим способом NOAA.

Оценка волновых форм цунами вблизи побережья не входила в задачи работы. Тем не менее, результат удовлетворяет определению понятия «прогноз цунами», сформулированному Межправительственной океанографической комиссией ЮНЕСКО*: дается время прихода ожидаемого цунами в заданную точку, определяются амплитуды отдельных волн и время их прихода. Ранее [18] было показано с использованием фактических данных, что экспресс-методом возможен заблаговременный прогноз цунами вблизи побережий по данным о цунами в океане. Момент выработки прогноза определяется временем получения информации о прохождении первой четверти периода цунами через точку регистрации.

Выводы

Экспресс-методом оперативного прогноза цунами выполнен расчет гравитационной составляющей волны от взрывного извержения вулкана Тонга 15.01.2022.

Показано, что для адекватного прогноза достаточно информации о цунами от ближайших к очагу станций DART длительностью четверть первого периода, что особенно важно в условиях оперативного режима.

Получено неплохое соответствие волновых форм, рассчитанных экспресс-методом оперативного прогноза цунами, и волновых форм, зарегистрированных донными станциями DART измерения уровня в океане. Различия в этих волновых формах объясняются наличием в данных о давлении на дне барических составляющих.

Подтверждено, что экспресс-метод может давать прогноз цунами независимо от механизма возбуждения. Экспресс-метод, как и другие способы оперативного прогноза цунами, может быть дополнен алгоритмом расчета барических волн. Вместе с тем остается невыясненным вопрос, насколько адекватной является оценка амплитуды поверхностных волн по данным о давлении на дне в событиях, подобных рассмотренному.

* Tsunami Glossary / Intergovernmental Oceanographic Commission. 2019. 4 Ed. Paris: UNESCO, p. 35–36. (IOC Technical Series; 85). URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000188226> (дата обращения: 04.03.2025).

Список литературы

1. Terry J.P., Goff J., Winspear N., Bongolan V.P., Fisher S. **2022**. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geoscience Letters*, 9(24). <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>
2. Nosov M.A., Kolesov S.V., Sementsov K.A. **2023**. Interpretation of signals recorded by ocean-bottom pressure gauges during the passage of atmospheric lamb wave on 15 January 2022. *Remote Sensing*, 15(12), 3071. <https://doi.org/10.3390/rs15123071>
3. Gusman A.R., Roger J., Noble C., Wang X., Power W., Burbidge D. **2022**. The 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha’apai volcano air-wave generated tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 179: 3511–3525. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03154-1>
4. Purkis S.J., Ward S.N., Fitzpatrick N.M., Garvin J.B., Slayback D., Cronin S.J., Palaseanu-Lovejoy M., Dempsey A. **2023**. The 2022 Hunga-Tonga megatsunami: Near-field simulation of a once-in-a-century event. *Science Advances*, 9(15). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf5493>
5. Hu G., Li L., Ren Z., Zhang K. **2023**. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23: 675–691. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-675-2023>
6. Shrivastava M.N., Sunil A.S., Maurya A.K., Aguilera F., Orrego S., Sunil P.S., Cienfuegos R., Moreno M. **2023**. Tracking tsunami propagation and Island’s collapse after the Hunga Tonga Hunga Ha’apai 2022 volcanic eruption from multi-space observations. *Scientific Reports*, 20109. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46397-1>
7. Miyashita T., Nishino A., Ho T.-C., Yasuda T., Mori N., Shimura T., Fukui N. **2023**. Multi-scale simulation of subsequent tsunami waves in Japan excited by air pressure waves due to the 2022 Tonga volcanic eruption. *Pure and Applied Geophysics*, 180: 3195–3223. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03332-9>
8. Fujii Y., Satake K. **2024**. Modeling the 2022 Tonga eruption tsunami recorded on ocean bottom pressure and tide gauges around the Pacific. *Pure and Applied Geophysics*, 181: 1793–1809. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03477-1>
9. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. **2022**. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*, 74, 61. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>
10. Kubo H., Kubota T., Suzuki W., Aoi S., Sandanbata O., Chikasada N., Ueda H. **2022**. Ocean-wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks. *Earth, Planets and Space*, 74, 104. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01663-w>
11. Omira R., Ramalho R.S., Kim J., González P.J., Kadri U., Miranda J.M., Carrilho F., Baptista M.A. **2022**. Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source. *Nature*, 609: 734–740. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04926-4>
12. Kubota T., Saito T., Nishida K. **2022**. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, 377(6601): 91–94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
13. Heidarzadeh M., Gusman A.R., Ishibe T., Sabeti R., Sepic J. **2022**. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modeling. *Ocean Engineering*, 261, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
14. Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прядун В.В. **2022**. Проявления атмосферной волны Лэмба в вариациях придонного давления. *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия*, 6: 66–73.
15. Королев Ю.П., Королев П.Ю. **2020**. Оперативный прогноз локальных цунами по данным ближайших к очагам глубоководных станций, содержащим шумы сейсмического происхождения. *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 447–460. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.447-460.461-473>
16. 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(11): 3081–3091. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011>
17. Королев Ю.П., Ивельская Т.Н. **2012**. Совершенствование оперативного прогноза цунами и тревоги цунами. Анализ последних цунами. *Проблемы анализа риска*, 9(2): 76–91.
18. Королев Ю.П. **2024**. Экспресс-метод оперативного прогноза цунами: возможность применения на тихоокеанском побережье России. *Морской гидрофизический журнал*, 40(5): 782–800. EDN: MSGZQX
19. Pararas-Carayannis G. **2011**. Tsunamigenic source mechanism and efficiency of the March 11, 2011 Sanriku earthquake in Japan. *Science of Tsunami Hazards*, 30(2): 126–152. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHV0130N2Y2011.pdf>

References

1. Terry J.P., Goff J., Winspear N., Bongolan V.P., Fisher S. **2022**. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geoscience Letters*, 9, 24. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>
2. Nosov M.A., Kolesov S.V., Sementsov K.A. **2023**. Interpretation of signals recorded by ocean-bottom pressure gauges during the passage of atmospheric lamb wave on 15 January 2022. *Remote Sensing*, 15(12), 3071. <https://doi.org/10.3390/rs15123071>
3. Gusman A.R., Roger J., Noble C., Wang X., Power W., Burbidge D. **2022**. The 2022 Hunga Tonga–Hunga

- Ha'apai volcano air-wave generated tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 179: 3511–3525. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03154-1>
4. Purkis S.J., Ward S.N., Fitzpatrick N.M., Garvin J.B., Slayback D., Cronin S.J., Palaseanu-Lovejoy M., Dempsey A. **2023**. The 2022 Hunga-Tonga megatsunami: Near-field simulation of a once-in-a-century event. *Science Advances*, 9(15). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adf5493>
 5. Hu G., Li L., Ren Z., Zhang K. **2023**. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23: 675–691. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-675-2023>
 6. Shrivastava M.N., Sunil A.S., Maurya A.K., Aguilera F., Orrego S., Sunil P.S., Cienfuegos R., Moreno M. **2023**. Tracking tsunami propagation and Island's collapse after the Hunga Tonga Hunga Ha'apai 2022 volcanic eruption from multi-space observations. *Scientific Reports*, 20109. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46397-1>
 7. Miyashita T., Nishino A., Ho T.-C., Yasuda T., Mori N., Shimura T., Fukui N. **2023**. Multi-scale simulation of subsequent tsunami waves in Japan excited by air pressure waves due to the 2022 Tonga volcanic eruption. *Pure and Applied Geophysics*, 180: 3195–3223. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03332-9>
 8. Fujii Y., Satake K. **2024**. Modeling the 2022 Tonga eruption tsunami recorded on ocean bottom pressure and tide gauges around the Pacific. *Pure and Applied Geophysics*, 181: 1793–1809. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03477-1>
 9. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. **2022**. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*, 74, 61. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01614-5>
 10. Kubo H., Kubota T., Suzuki W., Aoi S., Sandanbata O., Chikasada N., Ueda H. **2022**. Ocean-wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks. *Earth, Planets and Space*, 74, 104. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01663-w>
 11. Omira R., Ramalho R.S., Kim J., González P.J., Kadri U., Miranda J.M., Carrilho F., Baptista M.A. **2022**. Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source. *Nature*, 609: 734–740. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04926-4>
 12. Kubota T., Saito T., Nishida K. **2022**. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, 377(6601): 91–94. <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>
 13. Heidarzadeh M., Gusman A.R., Ishibe T., Sabeti R., Sepic J. **2022**. Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modeling. *Ocean Engineering*, 261, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
 14. Nosov M.A., Sementsov K.A., Kolesov S.V., Pryadun V.V. **2022**. Atmospheric lamb wave manifestations in bottom pressure variations. *Moscow University Physics Bulletin*, 77(6): 896–904. <https://doi.org/10.3103/s0027134922060091>
 15. Korolev Yu.P., Korolev P.Yu. **2020**. Short-term forecast of local tsunamis based on data containing seismic noise from deep-ocean stations closest to the sources. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 461–473. (In Russ. & in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.447-460.461-473>
 16. 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(11): 3081–3091. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3081-2011>
 17. Korolev Yu.P., Ivelskaya T.N. **2012**. [Enhancement of operational tsunami forecast and tsunami alarms. Analysis of recent tsunamis]. *Problemy analiza riska = Issue Risk Analysis*, 9(2): 76–91. (In Russ.).
 18. Korolev Yu.P. **2024**. Express method for operational tsunami forecasting: possibility of its application on the Pacific coast of Russia. *Physical Oceanography*, 31(5): 736–754.
 19. Pararas-Carayanis G. **2011**. Tsunamigenic source mechanism and efficiency of the March 11, 2011 Sanriku earthquake in Japan. *Science of Tsunami Hazards*, 30(2): 126–152. URL: <http://www.tsunamisociety.org/STHVol30N2Y2011.pdf>

Об авторах

Королёв Юрий Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-7068-7341>), кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия, Yu_P_K@mail.ru

Королёв Павел Юрьевич (<https://orcid.org/0000-0003-3741-7654>), научный сотрудник, лаборатория цунами, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Южно-Сахалинск, Россия

About the Authors

Korolev, Yury P. (<https://orcid.org/0000-0002-7068-7341>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Tsunami Laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yu_P_K@mail.ru

Korolev, Pavel Yu. (<https://orcid.org/0000-0003-3741-7654>), Researcher, Tsunami Laboratory, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Поступила 20.02.2025

Принята к публикации 13.03.2025

Received 20 February 2025

Accepted 13 March 2025