

УДК 551.46

РЕГИСТРАЦИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЯПОНСКОМ МОРЕ, ВЫЗВАННЫХ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХААПАЙ В АРХИПЕЛАГЕ ТОНГА 15.01.2022

© 2022 г. Член-корреспондент РАН А. И. Зайцев^{1,*}, Е. Н. Пелиновский²,
академик РАН Г. И. Долгих³, С. Г. Долгих³

Поступило 25.04.2022 г.
После доработки 06.06.2022 г.
Принято к публикации 17.06.2022 г.

15 января 2022 г. случилось катастрофическое извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай на архипелаге Тонга, сопровождавшееся сильной взрывной волной, ощущавшейся на очень больших расстояниях от вулкана, а также вызвавшее волны цунами на ближайших островах и колебания уровня моря вдали от вулкана. В работе представлен анализ возмущений, обусловленных этим извержением, зафиксированных на российском побережье Японского моря.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, вулкан, Японское море

DOI: 10.31857/S2686739722600564

ВВЕДЕНИЕ

15 января 2022 г. произошло сильнейшее извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, расположенного на архипелаге Тонга (рис. 1). Энергия этого извержения оценивается от 4–18 до 150–200 мегатонн, что эквивалентно $1.7–7.6 \times 10^{16}$ Дж [1, 2]. Консультативный центр по вулканическому пеплу [3] выпустил уведомление для авиакомпаний. Пепел от извержения был особенно заметен на острове Тонгатапу, за ним скрылось Солнце. Громкие взрывы были слышны в 65 км от Нукуалофы, с неба сыпались мелкие камни и пепел. Они были слышны на Самоа, примерно в 840 км от вулкана и по всей Новой Зеландии и даже в Юконе (Канада). Зафиксированы звуковые волны, распространяющиеся по всему земному шару [1]. Колебания уровня моря, связанные с извержением вулкана, регистрировались повсеместно [4–6].

¹ Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований
Дальневосточного отделения Российской академии наук,
Южно-Сахалинск, Россия

² Институт прикладной физики
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

³ Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия

*E-mail: aizaytsev@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН ЦУНАМИ ОТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ОЧАГА

Атмосферные возмущения, связанные со взрывным извержением вулкана, регистрировались во многих городах России. Наряду с колебаниями атмосферного давления имеются записи колебаний водной поверхности на российском побережье Тихого океана. Эти мареограммы приведены на сайте [7]. Первые волны с высотой не более 10 см наблюдаются через 9.5 ч после начала сильного извержения. Хотя было понятно сразу, что эти волны не могут прийти так быстро в Японское море непосредственно от архипелага Тонго, но мы решили подтвердить это прямым расчетом распространения волн в рамках уравнений мелкой воды. Вообще говоря, мы должны воспользоваться дисперсионными уравнениями, так как характерный размер очага цунами достаточно мал и сравним с глубиной океана. Для вулканов обычно используется эквивалентный гидродинамический очаг [8], который неоднократно использовался при расчетах цунами, в частности, для интерпретации цунами вулканического происхождения в Карымском озере на Камчатке [9]. Высота смещения уровня воды в очаге в рамках такой модели для энергии извержения вулкана в 100 мегатонн составляет сотню метров, так что волны необходимо считать в рамках сильно нелинейной и дисперсионной модели. Однако, если мы хотим получить оценку времени прихода волн, то достаточно использовать уравнения мелкой воды и достаточно малый источник по интен-

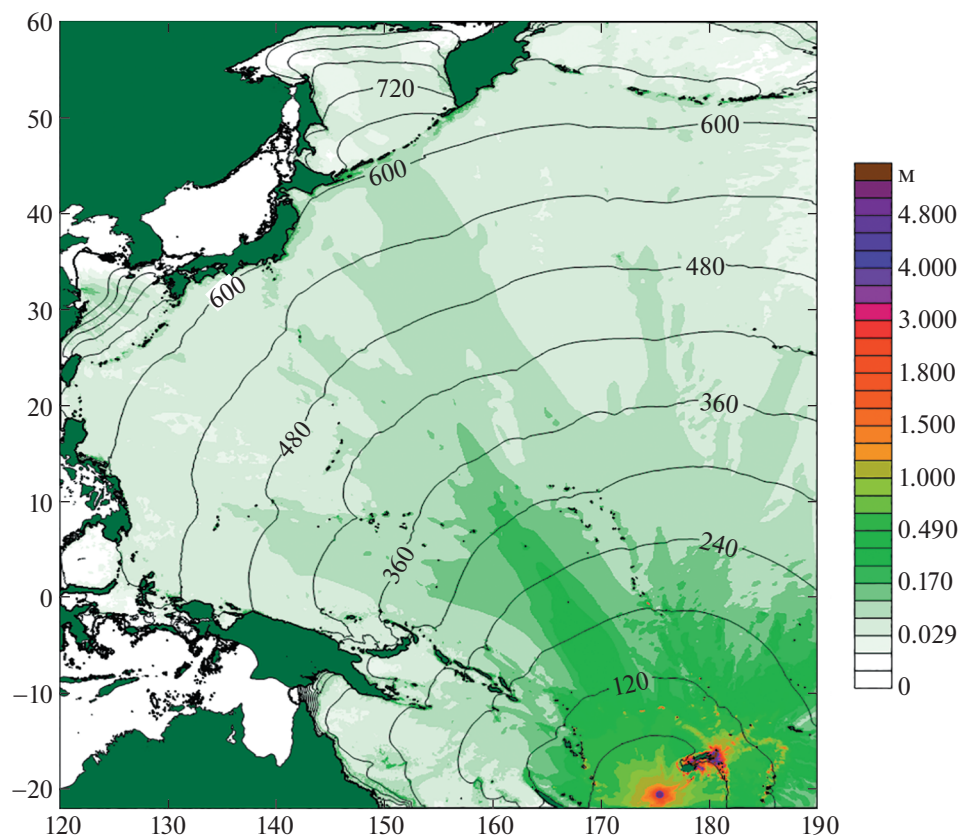


Рис. 1. Распределение максимальных амплитуд цунами и время прихода первой волны при использовании гидродинамического источника.

сивности. В сущности, для этого достаточно использовать лучевой метод, но нам оказалось проще провести моделирование программным комплексом НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE) [10]. В наших расчетах был выбран гидродинамический очаг, который представляет собой полушару высотой 5.5 м и диаметром около 100 км (повторим, что для оценки времени прихода первой волны параметры очага не важны). Результаты моделирования, представленные на рис. 1, показывают, что первые волны к японским островам подходят через 10 ч, а проникновение волн в Японское море практически не происходит. Таким образом, это относительно простое моделирование подтвердило, что волны цунами не могут подойти к российскому побережью Японского моря непосредственно от архипелага Тонга за наблюдаемое время.

РЕГИСТРАЦИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Наряду с колебаниями водной поверхности в акватории Японского моря так же были зарегистрированы

изменения давления. Выделим здесь регистрацию сигнала на морской экспериментальной базе ТОИ ДВО РАН “м. Шульца” в Приморском крае (рис. 2). На рис. 3 показано изменение давления, зарегистрированное лазерным нанобарографом [11]. Данный прибор создан на основе равноплечего интерферометра Майкельсона и позволяет регистрировать вариации атмосферного давления в частотном диапазоне до 1000 Гц с точностью 50 мкПа. Заметное изменение давления началось в 12:06, причем пик сигнала приходится на 12:26. Таким образом, возмущения давления пришли примерно через 446 мин (7 ч 26 мин) после начала извержения. Если считать, что расстояние от точки измерения до вулкана около 9000 км, а скорость звука в атмосфере примерно 320 м/с, то время распространения получается около 437 мин (7 ч 17 мин), что свидетельствует в пользу атмосферных возмущений. Сразу скажем, что генерация атмосферных возмущений (так называемых волн Лэмба) была отмечена сразу многими исследователями; и важно подчеркнуть, что такие явления происходили и ранее, в частности при извержении вулкана Кракатау в 1883 г. [12].

Учитывая, что колебания уровня воды вдали от Кракатау в 1883 г. были обусловлены звуковы-

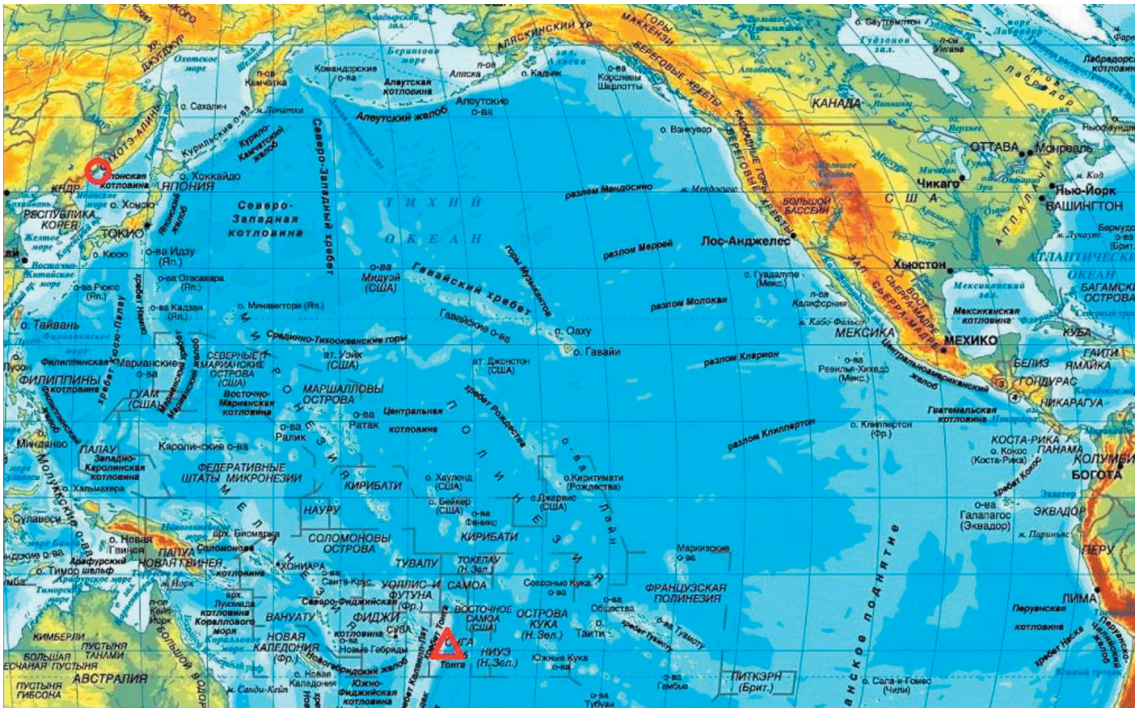


Рис. 2. Местоположение вулкана на архипелаге Тонга в Тихом океане (отмечено треугольником), местоположение экспериментальной базы ТОИ ДВО РАН “м. Шульца” (отмечено кругом).

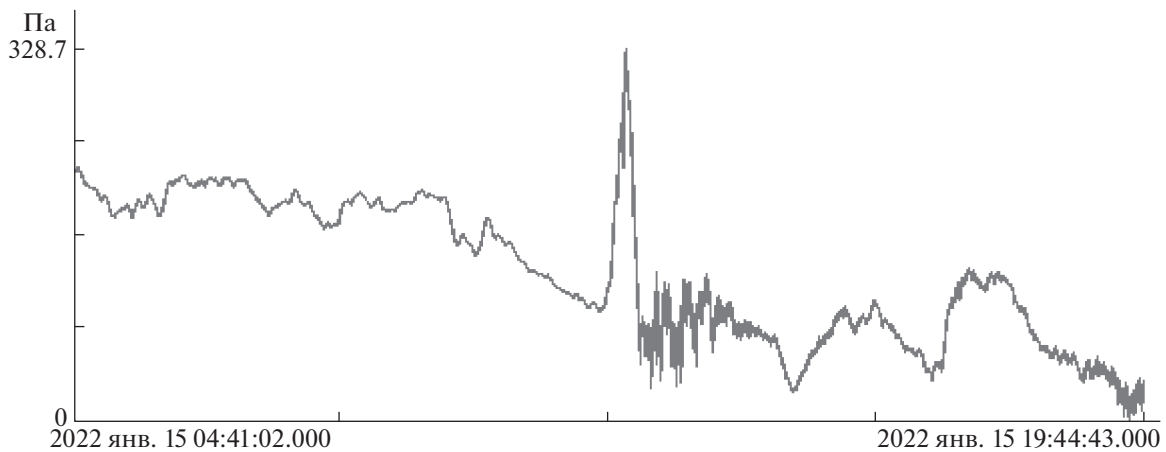


Рис. 3. Запись лазерного нанобарографа, установленного на морской экспериментальной базе ТОИ ДВО РАН “м. Шульца”.

ми волнами, мы сосредоточились на исследовании волн на воде, вызванных атмосферными возмущениями. Простейшая оценка вариации уровня воды под действием атмосферных возмущений следует из закона “обратного барометра” (для статических возмущений)

$$\eta = -\zeta_a = -\frac{hp_{\text{atm}}}{\rho c^2}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, p_{atm} – атмосферное давление, h – глубина, c – скорость распространения

волны. При глубине 1000 м, вариации атмосферного давления в 225 Па приведут к смещению водной поверхности на высоту чуть более 1 см. Если же учитывать движение атмосферного фронта со скоростью V , то возникает резонанс Праудмена, и высота волны определяется по формуле (см., например, нашу работу [13]):

$$\eta(x, t) = \frac{c^2}{V^2 - c^2} \zeta_a(x - Vt). \quad (2)$$

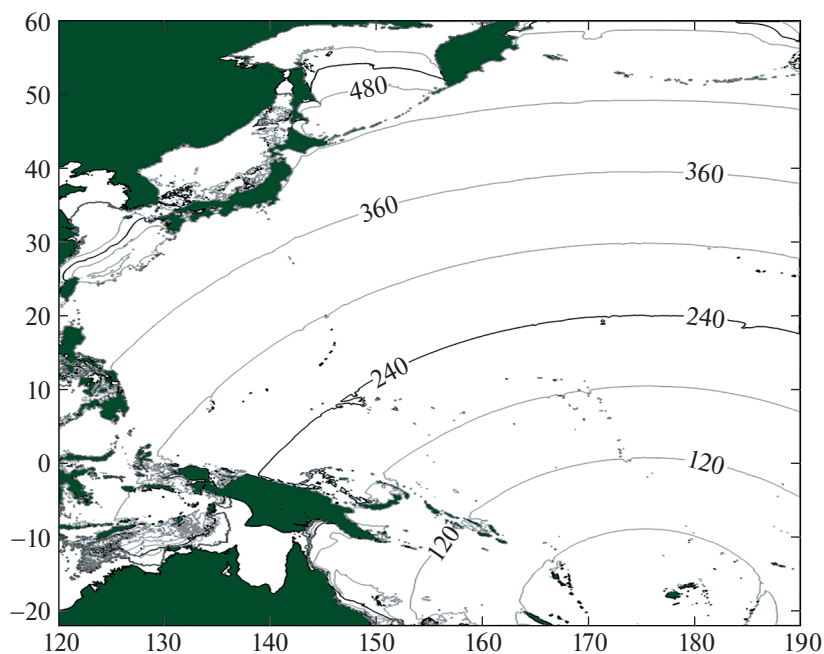


Рис. 4. Время прихода первой волны в минутах (источник – давление).

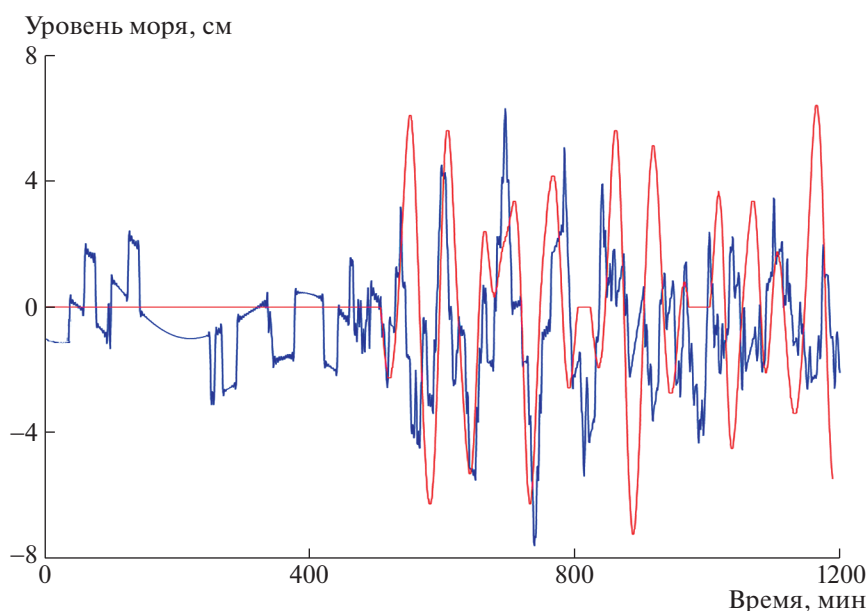


Рис. 5. Смещение водной поверхности в п. Посыет. Точка 0 по временной шкале соответствует началу извержения вулкана по времени. Синяя линия – реальная запись. Красная линия – расчет.

Скорость морских волн в Японском море около 135 м/с (при глубине в 1800 м), что в 2.5 раза меньше скорости звука (320 м/с), так что высота волны все равно остается малой. Учитывая, что в реальности на высоту волны влияют неоднородности рельефа дна, приводящие к фокусированию волновой энергии, мы выполнили расчеты генерации волн на воде атмосферными возмуще-

ниями в рамках двумерных уравнений нелинейно-дисперсионной теории с помощью программного комплекса НАМИ-ДАНС (NAMI-DANCE-P) [13]. Начальные условия предполагались нулевыми.

В качестве источника задавались возмущения атмосферного давления в области диаметром почти 400 км и вариаций давления 1400 Па, которые разбегались из центра со скоростью 320 м/с (ци-

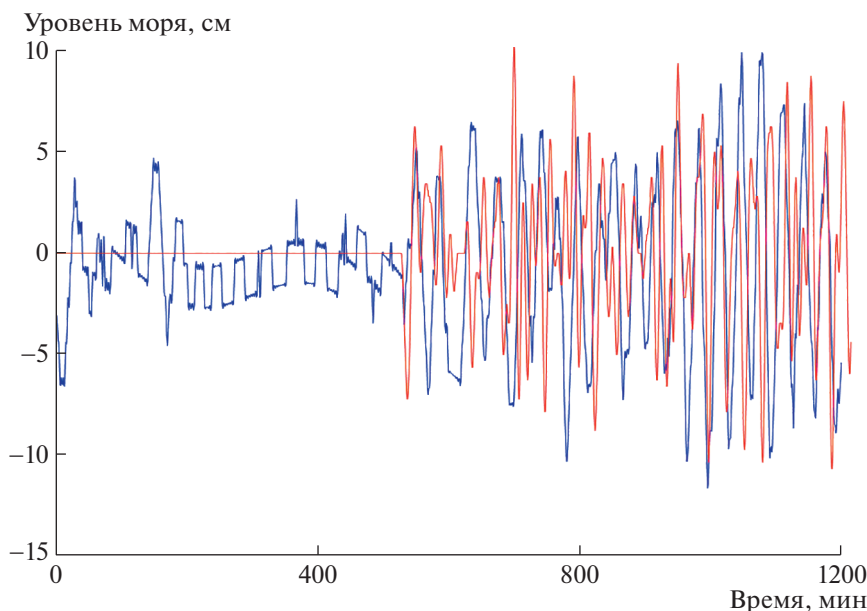


Рис. 6. Смещение водной поверхности на станции Владивосток. Точка 0 по временной шкале соответствует началу извержения вулкана по времени. Синяя линия – реальная запись. Красная линия – расчет.

линдрическая волна). В этом случае давление убывает с расстоянием пропорционально $\sqrt{R/r}$, где R – радиус очага, а r – расстояние до Приморья. Через 9000 км максимальное значение атмосферного давления падает приблизительно в 4.74 раза и совпадает с наблюдаемыми вариациями давления, зарегистрированными на м. Шульца.

Рассчитанное время прихода первой волны цунами (рис. 4) показывает, что первые волны к японским островам подходят менее чем за 7 ч. Более детально рассчитанные мареограммы в заливе Посьета и Владивостоке показаны на рис. 5 и 6. Здесь же дано сопоставление с наблюдаемыми мареограммами. Как видим, совпадение весьма хорошее, как по времени прихода, так и по амплитудам волн. Это доказывает, что данные возмущения уровня моря обусловлены приходом взрывной волны в атмосфере, образованной при извержении вулкана.

ВЫВОДЫ

Мы демонстрируем, что возмущения атмосферного давления и колебания водной поверхности, связанные с извержением вулканов, оказались зарегистрированными на российском шельфе Японского моря на расстоянии около 9000 км от архипелага Тонга. Рассчитанные колебания уровня моря, вызванные прохождением звуковой волны от взрыва, оказываются в согласии с данными наблюдений на станциях залива Посьета и Владивосток.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Представленные результаты получены в рамках выполнения государственных заданий СКБ САМИ ДВО РАН “Прибрежные риски, связанные с природными катастрофами с учетом инженерных и социально-экономических приложений” и ТОИ ДВО РАН “Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане”, а так же гранта РФФИ № 20-05-00162.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yuen David A., et al.* Under the Surface: Pressure-Induced Planetary-Scale Waves, Volcanic Lightning, and Gaseous Clouds Caused by the Submarine Eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano Provide an Excellent Research Opportunity. // *Earthquake Research Advances*. 100134. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>
2. *Kulichkov S., Chunchuzov I., Popov O., Gorchakov G., Mishenin A., Perepelkin V., Bush G., Skorokhod A., Vinogradov Yu., Semutnikova E., Šepic J., Medvedev I., Gushchin R., Kopeikin V., Belikov I., Gubanova D., Karpov A., Tikhonov A.* 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 and Applied Geophysics*. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4>
3. *Zaytsev A.I., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Yalçiner A.* The Use of the NAMI-DANCE Comp. Complex on the Problem of Tsunami Waves // *Journal of Applied*

- Mechanics and Technical Physics. 2020. 61 (7). P. 1140–1152.
4. Carvajal M., Sepulveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami // Geophysical Research Letters. 2022. 49. e2022GL098153. <https://doi.org/10.1029/2022GL098153>
 5. Imamura F., Suppasri A., Arikawa Y., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. Preliminary Observations and Impact in Japan of the Tsunami Caused by the Tonga Volcanic Eruption on January 15. // Pure and Applied Geophysics. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03058-0>
 6. Ramirez-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 and Applied Geophysics. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03017-9>
 7. <http://rtws.ru/sea-level/>
 8. Le Mehaute B., Wang S. Water Waves Generated by Underwater Explosion // In: World Scientific. Advanced Series on Ocean Engineering. 1996. V. 10.
 9. Torsvik T., Paris R., Didenkulova I., Pelinovsky E., Belousov A., Belousova M. Numerical simulation of tsunami event during the 1996 volcanic eruption in Karymskoe lake, Kamchatka, Russia // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2010. V. 10. P. 2359–2369.
 10. Zaytsev A.I., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Yalçiner A. The Use of the NAMI-DANCE Computational Complex on the Problem of Tsunami Waves // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2020. 61 (7). P. 1140–1152.
 11. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швеиц В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при изучении баро-деформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.
 12. Choi B.H., Pelinovsky E., Kim K.O., Lee J.S. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2003. 3 (5):321–332.
 13. Metin A.D., Pelinovsky E., Zaytsev A., Tarakcioglu G.O., Yalçiner A.C., Didenkulova I. Long waves generation and coastal amplification due to atmospheric pressure disturbances // Natural Hazards. 2021. V. 106. № 2. P. 1195–1221.

RECORDING DISTURBANCES IN THE SEA OF JAPAN CAUSED BY THE 15.01.2022 ERUPTION OF THE HONG-TONGA-HUNG-HAAPAI VOLCANO IN THE TONGA ARCHIPELAGO

A. I. Zaytsev^{a,#}, E. N. Pelinovsky^b, Academician of the RAS G. I. Dolgikh^c, and S. G. Dolgikh^c

^a Specific Research Bureau of Automation of Marine Research, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

^b Institut of Applied Physics Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russian Federation

^c V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

[#]E-mail: aizaytsev@mail.ru

On January 15, 2022, a catastrophic eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano in the Tonga archipelago occurred, accompanied by a strong explosive wave felt at very long distances from the volcano, as well as causing tsunami waves on nearby islands and sea level fluctuations away from the volcano. The paper presents an analysis of perturbations caused by this eruption recorded on the Russian coast of the Sea of Japan.

Keywords: tsunami, numerical modeling, volcano, Sea of Japan