

УДК 551.466

ВУЛКАНОГЕННОЕ ЦУНАМИ 15.01.2022 ПО ДАННЫМ ГЛУБОКОВОДНЫХ СТАНЦИЙ DART

© 2022 г. М. А. Носов^{1,2}, К. А. Семенцов^{1,*}, С. В. Колесов^{1,2}, В. В. Прядун¹

Представлено академиком РАН И.И. Моховым 10.06.2022 г.

Поступило 10.06.2022 г.

После доработки 24.07.2022 г.

Принято к публикации 25.07.2022 г.

По данным глубоководных станций уровня моря DART и наземных барографов IRIS исследованы проявления взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 в тихоокеанском регионе. Установлено, что атмосферная волна Лэмба, вызванная взрывом вулкана, была сформирована в 04:27 UTC $\pm$ 4 мин и распространялась над акваторией Тихого океана со скоростью 312 ± 4 м/с. Показано, что первый отчетливо различимый импульс, регистрируемый всеми глубоководными станциями уровня моря DART, представляет собой прямое проявление атмосферной волны Лэмба. Выполнены теоретические оценки амплитуды проявления волны Лэмба в вариациях придонного давления. Показано, что в глубоком океане амплитуда вариаций придонного давления в разы превосходит амплитуду колебаний давления в волне Лэмба. Выполнены теоретические оценки амплитуды поверхностных гравитационных волн, возбуждаемых в океане на скачке глубин бегущим атмосферным возмущением.

Ключевые слова: вулканическое извержение, Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, волна Лэмба, цунами, DART

DOI: 10.31857/S2686739722601004

После 7-летней паузы 20.12.2021 началось очередное извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (Hunga Tonga-Hunga Ha'apai – НТННВ), которое перешло в активную взрывную фазу, характеризующую как извержение плинианского типа, 15.01.2022 [1]. Взрывная фаза извержения сопровождалась формированием волн цунами, которые наблюдались по всему Тихому океану с высотами до 15 м в ближней зоне и свыше 3 м в дальней зоне [2]. В результате мощного взрыва в атмосфере возникла волна Лэмба, обогнувшая Землю 4 раза [3, 4]. Атмосферное возмущение было зарегистрировано многочисленными наземными барографами и отчетливо наблюдалось с геостационарного спутника GOES-17 [4–6].

Основная цель настоящей работы – анализ и интерпретация сигналов, зарегистрированных во время этого события глубоководными станциями уровня моря DART, расположенными в акватории Тихого океана. Из 33 станций, функционирова-

вших 15.01.2022, только 9 станций зарегистрировали событие, включая его начальную фазу, с дискретностью не более 1 мин. Для остальных станций дискретность составляла 15 мин или имелись значительные пропуски в данных, что делало невозможным интерпретацию сигналов.

В качестве источника важной вспомогательной информации рассматривались данные 26 наземных барографов тихоокеанского региона сети IRIS (<http://ds.iris.edu/ds/>). Дискретность измерений атмосферного давления составляла 1 с. Взаимное расположение вулкана НТННВ, барографов и станций DART показано на рис. 1.

Вариации атмосферного давления, зарегистрированные барографами, представлены на рис. 2. Проявления волны Лэмба отчетливо видны на каждой из 26 записей. Волна биполярная: сначала следует положительная фаза, затем – отрицательная. Максимумы положительной фазы однозначно выделяются на записях – соответствующие моменты времени отмечены на рисунке серыми вертикальными линиями. Эти моменты времени мы далее будем ассоциировать с временами вступления волны Лэмба. Ближайший к вулкану барограф AFI (829 км) зарегистрировал размах вариаций давления 0.980 кПа, наиболее удаленный барограф OTAV (10 749 км) – 0.225 кПа. Период волны Лэмба составил примерно 1 ч.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: sebbest@yandex.ru

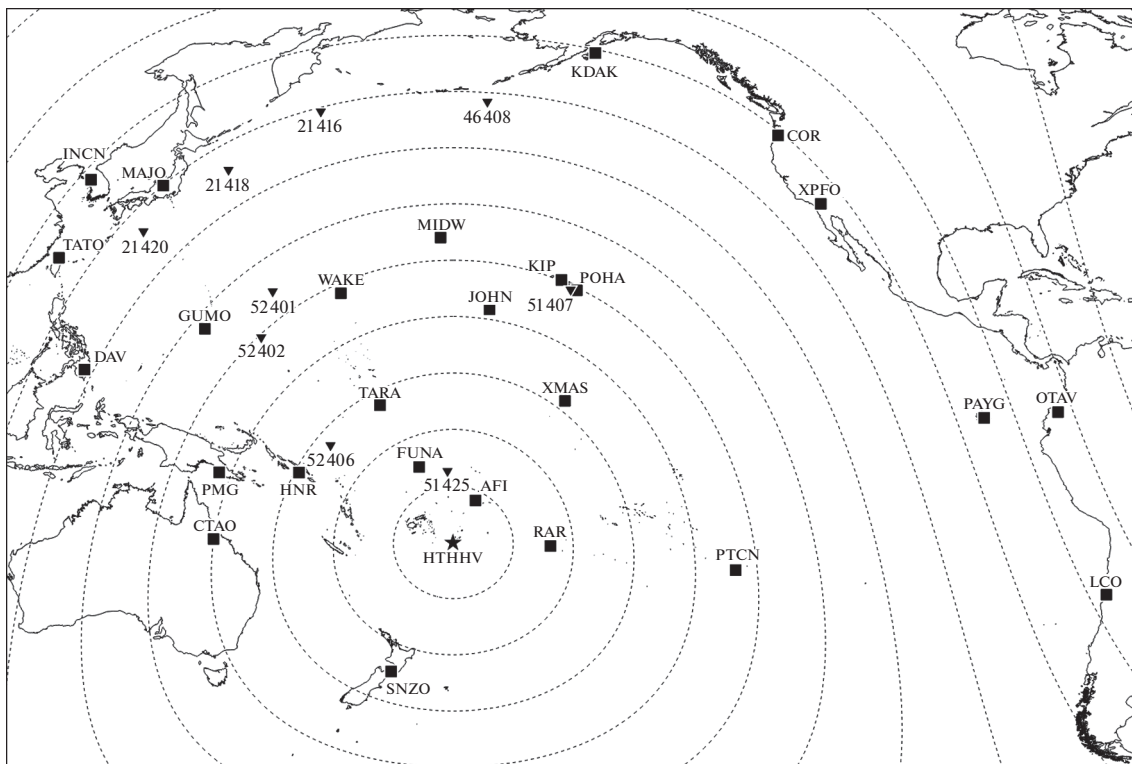


Рис. 1. Взаимное расположение вулкана НТННВ (звездочка), барографов (квадраты) и станций DART (треугольники). Пунктирные линии, показывающие удаление от вулкана, построены с интервалом 1000 км.

На рис. 3 построена зависимость времени вступления волны Лэмба от расстояния между вулканом и барографами. Четко прослеживается ожидаемая линейная связь. Пунктиром показана регрессионная зависимость, полученная методом наименьших квадратов. Регрессионная зависимость позволила оценить скорость распространения волны Лэмба 312 ± 4 м/с и время в источнике $04: 27 \text{ UTC} \pm 4$ мин. Интервальные оценки соответствуют 95% вероятности. Полученные нами оценки скорости волны Лэмба и времени взрыва вулкана хорошо согласуются с данными, представленными в [2, 4–6]. Отметим, что максимум положительной фазы, очевидно, наступает с заметной задержкой относительно истинного вступления волны Лэмба. В связи с этим оценка времени в источнике также оказывается смещена относительно времени взрыва вулкана, восстановленного по сейсмическим данным ($4:15 \text{ UTC}$, <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>).

На рис. 4 представлены записи вариаций придонного давления, зарегистрированные станциями DART. Из оригинальных сигналов предварительно была удалена низкочастотная приливная компонента (частота отсечки фильтра 10^{-4} Гц). На рисунке отмечены: полученное по нашим оценкам время в источнике (НТННВ), моменты вступления волны Лэмба (L) с учетом 95%-ного

доверительного интервала и расчетное время вступления длинных гравитационных волн (G). Моменты вступления волны Лэмба рассчитаны по регрессионной зависимости, исходя из расстояния между вулканом и станциями DART. Время вступления гравитационных волн определено с использованием длинноволнового блока численной модели цунами CPTM [7].

Из рис. 4 видно, что датчики придонного давления регистрируют сигнал с амплитудой около 0.1 м задолго (от 1 до 4 ч) до расчетного времени вступления длинных гравитационных волн. Это свидетельствует о том, что наблюдаемые возмущения не могли быть сформированы вблизи вулкана за счет “традиционных” для вулканогенных цунами механизмов (выброс в воду большого объема вещества, коллапс кальдеры, оползни и т.д.) [8]. Возмущения, опережающие гравитационные волны, своим возникновением обязаны волне Лэмба, распространяющейся в атмосфере быстрее, чем длинные волны в океане. Заметим, возникновение аналогичных опережающих возмущений наблюдалось при извержении вулкана Кракатау в 1883 г. [9, 10].

Из рис. 4 хорошо видно, что первый отчетливо различимый всплеск сигнала на записях DART, имеющий амплитуду, близкую к амплитуде последующих гравитационных волн, в точности со-

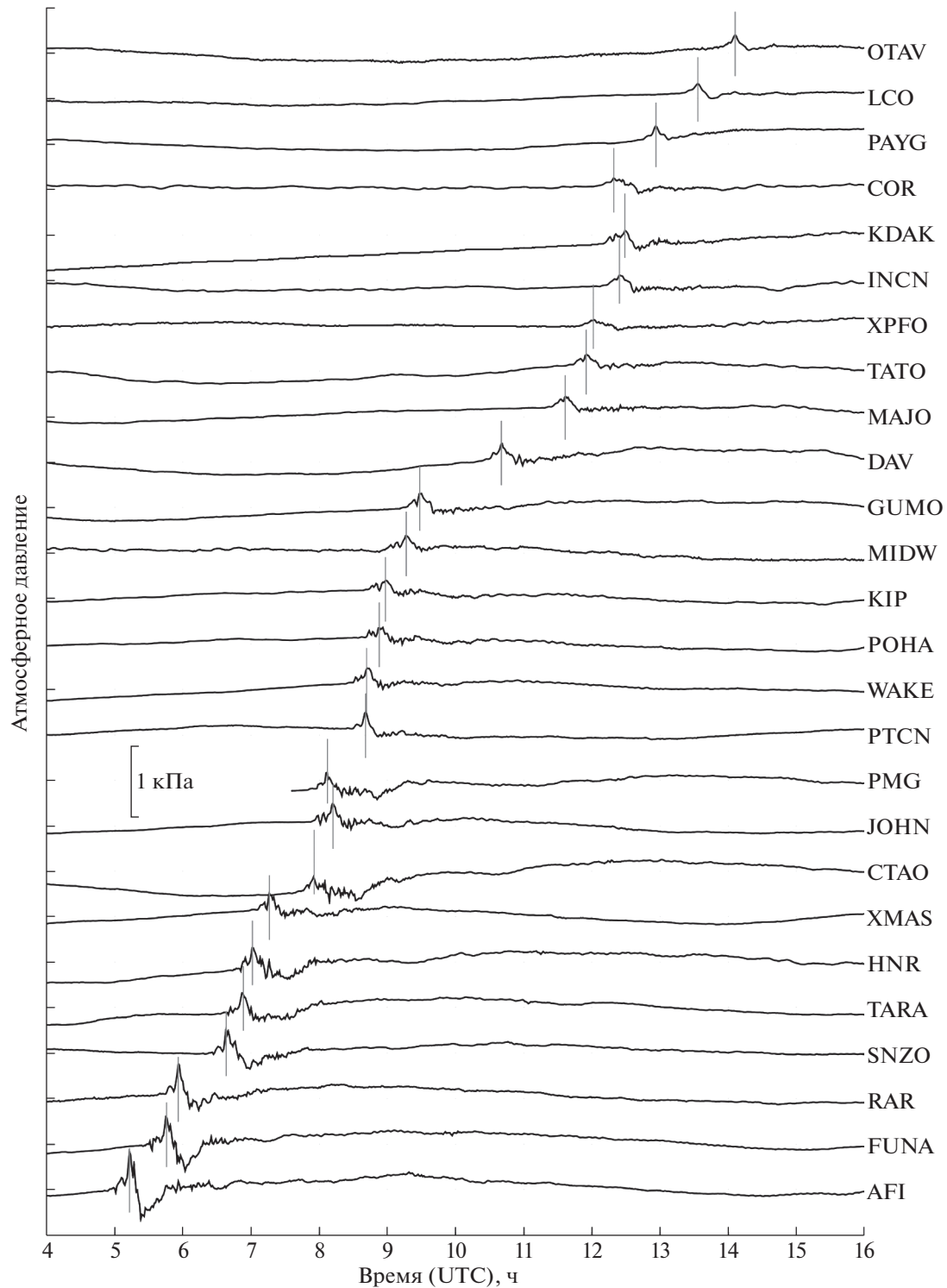


Рис. 2. Вариации атмосферного давления, зарегистрированные барографами сети IRIS в тихоокеанском регионе 15.01.2022. Записи построены на рисунке в порядке возрастания расстояния между вулканом и барографами (снизу—вверх).

ответствует времени прохождения волны Лэмба, следовательно, этот всплеск есть не что иное, как непосредственное проявление колебаний атмосферного давления в вариациях придонного дав-

ления. После проявлений волны Лэмба на записях начинаются продолжительные колебания, которые представляют собой волны цунами, вызванные прохождением атмосферного возмуще-



Рис. 3. Зависимость времени вступления волны Лэмба от расстояния между вулканом НТННВ и барографами IRIS (серые кружки). Пунктиром показана регрессионная зависимость. На оси времени отмечено время в источнике (4:27 UTC), получаемое путем экстраполяции регрессионной прямой на нулевое расстояние.

ния. Позже к ним присоединяются волны, сформированные вблизи вулкана, которые, как правило, не имеют четко выраженных моментов вступления. Единственным исключением здесь является сигнал, зарегистрированный ближайшей к источнику станцией DART51425.

В рамках теории длинных волн амплитуда вариаций давления на дне океана, вызванных бегущим возмущением атмосферного давления, определяется формулой [8]:

$$p_b = \frac{p_a U^2}{U^2 - gH}, \quad (1)$$

где p_b — вариации придонного давления, p_a — вариации атмосферного давления, U — скорость распространения атмосферного возмущения, g — ускорение силы тяжести, H — глубина океана.

На абиссальных глубинах (2500–5500 м), в соответствии с формулой (1), колебания атмосферного давления в волне Лэмба должны проявляться в вариациях придонного давления с усилением. Над глубоководными желобами скорость распространения волны Лэмба оказывается близкой к скорости длинных гравитационных волн, что соответствует резонансу Праудмена [8, 9].

Барограф РОНА и станция DART51407 расположены в непосредственной близости друг от друга (см. рис. 1). Это обеспечило возможность прямой проверки справедливости соотношения (1). Амплитуда сигнала, зарегистрированного барографом, составила $p_a = 0.259$ кПа, амплитуда ва-

риаций придонного давления, зарегистрированная станцией DART, — $p_b = 0.053$ м вод. ст. (0.545 кПа). Пересчет метров вод. ст. в кПа осуществлялся по формуле, представленной на официальном сайте системы DART (https://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=51407). С учетом глубины океана в точке постановки DART51407 ($H = 4793$ м) и скорости волны Лэмба ($U = 312$ м/с) получаем коэффициент усиления 1.93, т.е. оценка придонного давления по формуле (1) дает $p_b = 0.500$ кПа, что весьма близко к значению, измеренному датчиком давления.

В заключение приведем оценки амплитуды длинных гравитационных волн, вызываемых в океане волной Лэмба. Известно, что бегущее возмущение атмосферного давления $p_a(x - Ut)$ вызывает вынужденное возмущение водной поверхности аналогичной формы [8]

$$\xi = \frac{p_a H}{\rho(U^2 - gH)}, \quad (2)$$

где ρ — плотность воды. При этом в океане постоянной глубины свободные гравитационные волны не возникают. Но свободные волны могут возникнуть при прохождении атмосферного возмущения над резким изменением глубин. Получим оценки для амплитуд таких гравитационных волн.

Рассмотрим одномерную задачу вдоль оси Ox . Пусть в точке $x = 0$ глубина скачком меняется с H_1 на H_2 . Решения слева и справа “сшиваются” путем приравнивания смещений поверхности $\xi_1 = \xi_2$ и потоков массы $H_1 u_1 = H_2 u_2$, где u_1, u_2 — соответствующие скорости течения. В итоге получаем оценки амплитуд свободных гравитационных волн, бегущих в положительном и отрицательном направлении оси:

$$A^- = - \frac{(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2}) U^2 p_a}{(gH_1 - U^2)(\sqrt{gH_2} + U)\rho g}, \quad (3)$$

$$A^+ = \frac{(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2}) U^2 p_a}{(gH_2 - U^2)(\sqrt{gH_1} - U)\rho g}. \quad (4)$$

Если вблизи точки $x = 0$ глубина меняется не скачком, а плавно, то формулы (3) и (4) можно рассматривать как оценку сверху для амплитуд свободных гравитационных волн. Похожие формулы мы ранее получали для амплитуд свободных гравитационных волн, возбуждаемых при прохождении поверхностными сейсмическими волнами скачка глубин [11–13]. Но случай сейсмических волн заведомо далек от резонанса Праудмена. Для атмосферной волны Лэмба, бегущей со скоростью 312 м/с, ситуация принципиально иная. Резонанс реализуется при реальной глуби-

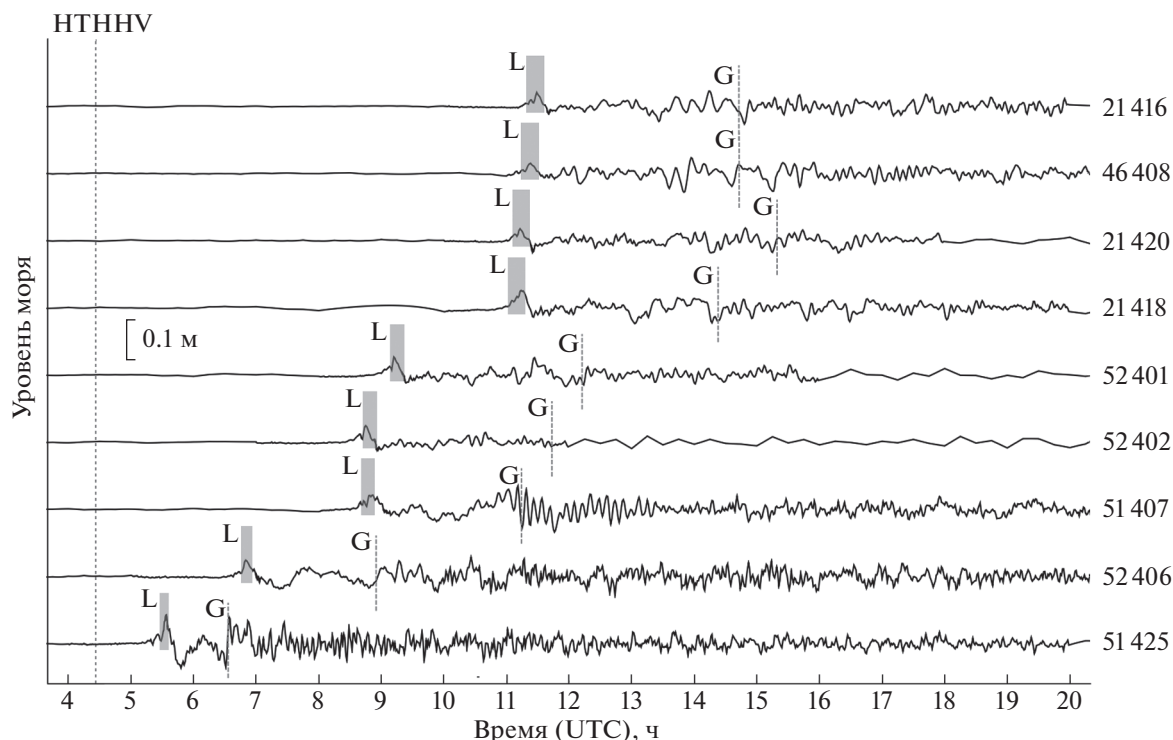


Рис. 4. Колебания уровня моря, зарегистрированные станциями DART. Из оригинальных сигналов предварительно была удалена приливная компонента. НТННВ – время в источнике (4: 27 UTC), L – моменты вступления волны Лэмба с учетом 95%-ного доверительного интервала, G – расчетное время вступления длинных гравитационных волн.

не океана $H = 9939$ м. Следовательно, на склонах глубоководных желобов волна Лэмба может эффективно возбуждать свободные гравитационные волны.

Простая оценка с использованием формул (3) и (4) показывает, что на скачке глубин от 1 до 9 км (е.g. западный склон желоба Тонга) волна Лэмба с амплитудой 0.5 кПа способна сформировать свободные гравитационные волны в океане с амплитудами $A^- \approx 0.018$ м и $A^+ \approx 0.50$ м. А при скачке глубин от 9 до 5 км (е.g. восточный склон желоба Тонга) – с амплитудами $A^- \approx 0.077$ м и $A^+ \approx 0.51$ м. Эти оценки не противоречат амплитудам волн, зарегистрированных станциями DART.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00415, <https://rscf.ru/project/22-27-00415/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao W., Sun C., Guo Z. Reawaking of Tonga volcano // The Innovation. 2022. V. 3. № 2. P. 100218.
2. National Geophysical Data Center // World Data Service: NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database. NOAA National Centers for Environmental Information. Доступно по: <https://www.ngdc.noaa.gov/hazel/view/hazards/tsunami/event-more-info/5824>. Ссылка активна на 1 июня 2022.
3. Lamb H. On the vibrations of an elastic sphere // Proceedings of the London Mathematical Society. 1881. V. 1. № 1. P. 189–212.
4. 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. P. 1–11.
5. 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 and Applied Geophysics. 2022. P. 1–16.
6. 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. № 6. P. e2022GL098240.
7. Носов М.А., Колесов С.В. Комбинированная численная модель цунами // Математическое моделирование. 2019. Т. 31. № 1. С. 44–62.
8. Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis. 2nd ed. Switzerland: Springer International Publishing AG; 2016.

9. *Press F., Harkrider D.* Air-sea waves from the explosion of Krakatoa // *Science*. 1966. V. 154. № 3754. P. 1325–1327.
10. *Choi B.H., Pelinovsky E., Kim K.O., et al.* Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2003. V. 3. № 5. P. 321–332.
11. *Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., и др.* Регистрация гравитационных волн, образованных в океане поверхностными сейсмическими волнами при землетрясении 11 марта 2011 г. у побережья Японии // *ДАН*. 2015. Т. 461. № 5. С. 593–598.
12. *Sementsov K.A., Nosov M.A., Kolesov S.V., et al.* Free gravity waves in the ocean excited by seismic surface waves: Observations and numerical simulations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2019. V. 124. № 11. P. 8468–8484.
13. *Семенцов К.А., Носов М.А., Колесов С.В., и др.* Механизмы генерации свободных гравитационных волн в океане поверхностными сейсмическими волнами // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. 2018. № 5. С. 1850903–1–1850903–8.

VOLCANOGENIC TSUNAMI ON JANUARY 15.01.2022 BASED ON THE DEEP-OCEAN DART STATIONS RECORDS

M. A. Nosov^{a,b}, K. A. Sementsov^{a,#}, S. V. Kolesov^{a,b}, and V. V. Pryadun^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Chair of Physics of Sea and Inland Water, Moscow, Russian Federation*

^b *Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: sebbest@yandex.ru*

Presented by Academician of the RAS I.I. Mokhov June 10, 2022

The manifestations of the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai volcano explosive eruption on 15.01.2022 in the Pacific were investigated using the data of the DART deep ocean sea level stations and the IRIS ground-based barographs. It has been found that the atmospheric Lamb wave, caused by the explosion of the volcano, was formed at 04:27 UTC $\pm$ 4 min and propagated over the Pacific Ocean at a speed of 312 ± 4 m/s. It is shown that the leading distinct pulse recorded by all DART deep ocean sea level stations is the direct manifestation of the atmospheric Lamb wave. Theoretical estimations of the Lamb wave amplitude manifestations in the bottom pressure variations have been performed. It is shown that in the deep ocean the amplitude of bottom pressure variations is a few times larger than the amplitude of pressure variations in the Lamb wave. Theoretical estimates of the surface gravity waves amplitude excited in the ocean by the travelling atmospheric disturbance passing a depth jump are carried out.

Keywords: volcanic eruption, Hunga Tonga-Hunga Ha’apai, Lamb wave, tsunami, DART