

---

---

## О РЕГИСТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭФФЕКТА ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА

### REGISTRATION OF THE ATMOSPHERIC EFFECT OF THE HUNGA TONGA VOLCANO ERUPTION

---

---

**А.Г. Сорокин** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, sor@iszf.irk.ru***В.А. Добрынин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, dobrynin@iszf.irk.ru***A.G. Sorokin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, sor@iszf.irk.ru***V.A. Dobrynin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, dobrynin@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Приводятся результаты регистрации акустических волн, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга в южной части Тихого океана 15 января 2022 г., в Восточной Сибири на расстоянии около 11 230 км от места извержения. Полученный акустический сигнал интерпретируется как совокупность атмосферных волн в широком диапазоне колебаний. По структуре сигнал подобен зарегистрированным ранее сигналам от мощных источников, таких как термоядерный взрыв на Новой Земле 1961 г. и взрыв Тунгусского метеорита 1908 г. Акустический сигнал предваряют три цуга низкочастотных затухающих колебаний. Мы предполагаем, эти три цуга колебаний связаны с тремя стадиями в извержении вулкана Хунга-Тонга: 1) разрушении о-ва Тонга и образованием подводной кальдеры; 2) выход горячей магмы из кальдеры на поверхность океана и выброс в атмосферу большого объема перегретого пара; 3) образование слоистой структуры из смеси перегретого пара, пепла и тephры на поверхности океана и образование эруптивной конвективной колонны. Последовательные фазы извержения могли способствовать возбуждению акустических колебаний в широком диапазоне периодов, включая волны Лэмба, внутренние гравитационные волны (ВГВ) и инфразвук. В работе сравниваются структуры акустических сигналов, зарегистрированных 15.01.2022 в Сибири на расстоянии более 11 000 км и на Аляске на расстоянии более 9300 км от вулкана. На основе решения линеаризованного уравнения Кортевега — де Вриза дается оценка энергии, выделившейся при извержении вулкана.

**Ключевые слова:** атмосфера, акустическая волна, Лэмба волна, инфразвук, извержение вулкана, Тунгусский метеорит, однородная атмосфера, энергия извержения.

**Abstract.** The paper presents the results of recording of acoustic waves, caused by the Hunga Tonga volcano eruption in the South Pacific Ocean on January 15, 2022, in Eastern Siberia at a distance of about 11230 km from the eruption. The received acoustic signal is interpreted as a set of atmospheric waves in a wide range of oscillations. The structure of the signal is similar to signals from the previously known powerful sources: the thermonuclear explosion on Novaya Zemlya in 1961 and the explosion of the Tunguska meteorite in 1908. The acoustic signal was preceded by three trains of low-frequency damped oscillations. We assume that these three trains of oscillations are associated with three important stages in the Hunga Tonga volcano eruption: 1) destruction of Tonga island and formation of an underwater caldera; 2) release of hot magma from the caldera to the ocean surface and release of a large volume of superheated steam into the atmosphere 3) formation of a layered structure from a mixture of superheated steam, ash, and tephra on the ocean surface and formation of an eruptive convective column. Successive phases of the eruption might have contributed to the excitation of acoustic vibrations in a wide range of periods including Lamb waves, internal gravity waves (IGW), and infrasound. We compare the structure of the acoustic signal received in Siberia at a distance of more than 11000 km from the volcano and that of the acoustic signal recorded in Alaska at a distance of more than 9300 km. Using the solution of the linearized Korteweg — de Vries equation, we estimate the energy released during the volcanic eruption.

**Keywords:** atmosphere, acoustic wave, Lamb wave, infrasound, volcanic eruption, Tunguska meteorite, homogeneous atmosphere, eruption energy.

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

Пятнадцатого января 2022 г. в 04:14:45 UTC в южной части Тихого океана произошло грандиозное извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. По данным местных властей, площадь извержения составила около 5 км<sup>2</sup>, глубина образовавшейся под-

водной кальдеры составила около 200 м. Согласно данным Геофизической службы РАН, географические координаты извержения вулкана Хунга-Тонга 20.546 S и 175.39 E, магнитуда сопровождавшего его землетрясения  $M=5.8$ .

Извержение сопровождалось комплексом геофизических явлений — цунами, сейсмическими про-

цессами, сильными возмущениями на разных высотах в атмосфере и ионосфере [Adam, 2022; Duncombe, 2022; Vergoz et al., 2022; Гарова, Ферапонтов, 2022].

Волны давления в атмосфере, сгенерированные извержением Хунга-Тонга, были зарегистрированы в различных точках земного шара на станциях Международной системы мониторинга (IMS). На территории России волны давления были зарегистрированы на Дальнем Востоке [Dolgikh et al., 2022], в Сибири [Добрынин, Сорокин, 2023], в центральной части России (в Московской области) [Kulichkov et al., 2022; Рыбнов и др., 2023]. Акустические сигналы, обошедшие вокруг земного шара по крайней мере дважды, представляют собой, по мнению многих авторов, суперпозицию нескольких типов атмосферных волн, включающих инфразвуковые колебания, гравитационные волны и волны Лэмба. Принято считать, что волны Лэмба, возникающие при извержении вулканов и ядерных взрывах, являются основной энергонесущей модой при прохождении вдоль земной поверхности [Куличков, 1987; Госсард, Хук, 1978]. Эти волны являются двумерным атмосферным аналогом волн Лэмба, распространяющихся в реальной атмосфере со скоростью звука и периодами, превышающими периоды Брента—Вяйсяля [Pierce, Pousey, 1971; Госсард, Хук, 1978]. Геофизические эффекты извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 на большом расстоянии от источника представлены в работе [Адушкин и др., 2022], где описываются вариации электрического поля, связанные с прохождением акустической волны от вулкана Хунга-Тонга.

Предпринимались попытки оценить энергию, выделившуюся при извержении вулкана Хунга-Тонга [Vergoz et al., 2022; Рыбнов и др., 2023; Kulichkov et al., 2022]. Например, в работе [Kulichkov et al., 2022] использовалось предположение, что основной энергонесущей модой, возникшей при извержении вулкана, является низкочастотная волна Лэмба. На основе решения линеаризованного уравнения Кортевега — де Вриза, полученного Pierce, Pousey [1971], было представлено выражение для оценки выделившейся энергии, в котором определяющими параметрами являются амплитуда и соответствующий период первого колебания для волны Лэмба [Kulichkov et al., 2022].

Распространение акустической волны от извержения вулкана Хунга-Тонга имело глобальный характер, и ее прохождение было зарегистрировано на больших расстояниях от источника [Matoza et al., 2022]. На официальном аккаунте в Твиттере National Weather Service (NWS) Alaska Region было опубликовано 15.01.2022 сообщение о регистрации акустического сигнала от извержения вулкана Хунга-Тонга на Аляске [<https://twitter.com/NWSAlaska/status/1482431322740060162?xt=HHwWhMCrveHb05IpAAAA>], которое содержит информацию о моменте прихода акустического сигнала, его спектральном составе, амплитуде, продолжительности и т. д. (рис. 5).

В нашей работе представлены данные регистрации акустического сигнала от извержения вулкана Хунга-Тонга в Восточной Сибири и дается оригинальная интерпретация последовательных фаз извер-

жения вулкана и структуры акустического сигнала, т. е. волн Лэмба, предваряющих зарегистрированный сигнал (рис. 1, 4).

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Основная цель работы заключается в изучении особенностей структуры инфразвукового сигнала, зарегистрированного от удаленного мощного извержения вулкана Хунга-Тонга 15 января 2022 г. Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- подготовить данные регистрации на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН;
- провести анализ сильнейших извержений XIX–XXI вв. и определить место извержения вулкана Хунга-Тонга в этом ряду;
- сравнить два акустических сигнала от извержения Хунга-Тонга, зарегистрированные в Восточной Сибири и на Аляске, распространявшиеся в различных азимутальных направлениях по трассам разной длины;
- выяснить возможные причины различий в акустических сигналах, включая влияние метеорологических условий на трассах распространения;
- по методике, представленной в работе [Pierce, Pousey, 1971], оценить энергию извержения вулкана Хунга-Тонга.

## ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Международная система мониторинга (IMS) используется для отслеживания не только ядерных взрывов, но и событий естественного происхождения большой мощности, связанных с крупными извержениями вулканов, взрывами больших метеоритов и т. п., представляющих опасность для населения. Создание и развитие Международной системы мониторинга (IMS) [Brachett et al., 2010] привело к росту исследований в области атмосферной акустики.

Двадцать седьмого марта 1954 г. на атолле Бикини в архипелаге Маршалловы острова Соединенные Штаты провели испытание первой в мире термоядерной бомбы, акустические волны от которого достигли Японии и были зарегистрированы на расстоянии около 3900 км [Yamamoto, 1954]. Акустические сигналы, появившиеся в результате испытания советской термоядерной бомбы на Новой Земле мощностью 57 Мт в октябре 1961 г., имели схожую структуру с сигналами от извержений вулканов [Donn, Ewing, 1962], из-за колоссальной мощности взрыва совершили несколько проходов вокруг земного шара и были зафиксированы на севере Шотландии (Aberdeen) [Госсард, Хук, 1978; Donn, Ewing, 1962; Carpenter et al., 1961]. Акустические сигналы анализировались и сопоставлялись с ранее наблюдаемыми атмосферными волнами от крупного извержения вулкана Кракатау 1883 г., с атмосферным эффектом от падения Тунгусского метеорита 1908 г. Сравнительный анализ естественных сигналов и теоретических барограмм для многослойной среды дал возможность объяснить структуру полученного акустического сигнала [Harkrider, 1964]. В 1970-х гг.

## Анализ активности вулканов в XIX–XXI вв.

Название	VEI	Тип извержения	Высота извержения, км	Объем извержения, км <sup>3</sup>	Падение температуры, °С	Дальность обнаружения
Тамбора, 1815 г.	6–7	плинианский	43	100 км <sup>3</sup>	–1 до –5	нет данных
Кракатау, 1883 г.	6	плинианский	36 (до 70)	10 км <sup>3</sup>	–0.3	Африка, Ла-Манш
Сент-Хеленс, 1980 г.	4–5	нет сведений	19	1 км <sup>3</sup>	нет	США
Пинатубо, 1991 г.	5–6	плинианский	34	10 км <sup>3</sup>	–0.5	Юго-Восточная Азия
Хунга-Тонга, 2022 г.	5–6	плинианский	30–37	0.4·10 <sup>6</sup> т (SO) <sub>2</sub>	местное	кругосветная

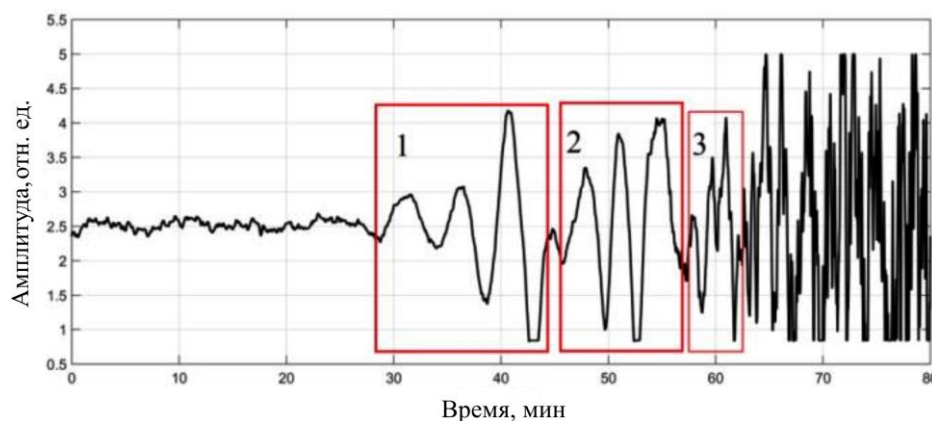


Рис. 1. Низкочастотный акустический сигнал, полученный на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН 15.01.2022 (1, 2, 3 — волновые цуги). Начало в 14:26:42 UT. Полная продолжительность сигнала составляет более 5 ч

была развита теория возбуждения фундаментальной моды колебаний земной атмосферы [Pierce, Rousey, 1971]. Первая попытка практического использования теории фундаментальной моды для изучения характеристик атмосферы была сделана в работе [Garrett, 1969]. Анализ использования теории фундаментальной моды в России представлен в работе [Куличков, 1987].

### РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ ВУЛКАНОВ ПО ИНДЕКСУ VEI

Краткий анализ активности вулканов с 1815 г. по настоящее время (см. таблицу) говорит о том, что мощные вулканические извержения — достаточно редкие явления и случаются раз примерно в 100 лет.

Из таблицы видно, что по индексу вулканической эксплозивности ( $VEI=7$ ) в доинструментальную эпоху лидирует извержение вулкана Тамбора 1815 г. Ближайшими по индексу вулканической эксплозивности ( $VEI=6$ ) к извержению вулкана Хунга-Тонга являются извержения вулканов Кракатау 1883 г. и Пинатубо 1991 г.

### ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА

В юго-восточной части Тихого океана между Австралией и Новой Зеландией в расположении о-ва Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай протяженностью около 2 км 15 января 2022 г. произошло сильное изверже-

ние. Первое извержение 14 января выбросило в атмосферу шлейф пепла шириной около 5 км на высоту более 20 км. На следующий день около 17:15 по местному времени (04:14:45 UT) началось более крупное извержение. Выбросы пепловой массы достигали высот более 30 км. Сильные взрывы были слышны на удалении 65 км от эпицентра. Взрывы были слышны также по всей Новой Зеландии, в Канаде и на Аляске. Спутник NASA Aqwa практически одновременно с извержением зарегистрировал ударные волны, распространявшиеся в атмосфере над Тихим океаном [Duncombe, 2022].

### СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ИСЗФ СО РАН, ИХ СВЯЗЬ С СЕЙСМИЧЕСКИМИ СОБЫТИЯМИ

Анализ последовательности цугов акустического сигнала основан на данных, полученных на инфразвуковой станции ( $51^{\circ}48'55.49''$  N,  $103^{\circ}04'14''$  E) Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, расположенной на юге Восточной Сибири в Тункинском районе Республики Бурятия. Инфразвуковая станция ИСЗФ СО РАН представляет собой группу из трех микробарометров, расположенных в вершинах прямоугольного треугольника с катетами 500 м. Три независимых микробарометра, образующих интерферометр, фиксируют последовательные приходы акустической волны. Основные параметры инфразвуковой станции описаны в работе [Сорокин, 2013]. Акустический сигнал, полученный на инфра-

звуковой станции (см. рис. 1), можно интерпретировать следующим образом.

1. Вступление самого первого и сильного цуга низкочастотного сигнала (цуг 1) в 14:26:42 UT соответствует начальной стадии сильного взрыва, разрушению острова и образованию подводной кальдеры с раскаленной магмой.

2. Вторая часть низкочастотного акустического сигнала (цуг 2), вероятно, соответствует стадии извержения, когда происходит соединение раскаленной магмы с водами океана и образование надводного пульсирующего облачного слоя, состоящего из перегретого пара.

3. Цуг 3 низкочастотного акустического сигнала, по нашему мнению, связан с излучением акустических волн высотной ~30-километровой конвективной колонной, образованной из смеси перегретого пара и продуктов извержения. Механизм подобного излучения на примере сильного пожара был описан в работе [Гостинцев и др., 1985].

За третьим цугом в структуре сигнала следуют колебания в диапазоне инфразвука, связанные с извержением вулкана и продолжавшиеся около 5 ч.

Похожая последовательность взрывных событий извержения вулкана Хунга-Тонга представлена в работе [Astafyeva et al., 2022] без указания соответствия взрывов конкретным событиям. Изучение ковулканических ионосферных возмущений полного электронного содержания (ПЭС) показывает, что от 4 до 5 UT произошло пять взрывных вулканических событий. Интересно, что эти вариации ПЭС не похожи по форме на квазипериодический сигнал, наблюдавшийся в предыдущих исследованиях. Эти ковулканические ионосферные возмущения представляют собой сигналы сложной формы с явным появлением N-волн при резком увеличении ПЭС, что, по мнению Astafyeva et al. [2022], является признаком источника ударно-акустической волны.

Подобный сценарий события хорошо укладывается в картину, описанную в статье [Wright et al., 2022] как серия из пяти импульсов атмосферного давления, зарегистрированная в этот же период времени поблизости (64 км) от извержения вулкана Хунга-Тонга.

Первый цуг, состоящий из наиболее интенсивных колебаний, представляет собой основную энергонеущую моду акустического сигнала — волну Лэмба. Она возбуждается при извержении вулкана практически первой и распространяется вдоль земной поверхности со скоростью, близкой к скорости звука [Куличков, 1987; Kulichkov et al., 2022]. Соответственно, эта низкочастотная мода проявляется на записях регистратора акустической станции в самом начале. Что же представляют собой эти колебания? Обратимся к классической работе [Maeda, Young, 1966], где дисперсионное уравнение для атмосферных волн выводится из трех фундаментальных уравнений: уравнения движения, уравнения непрерывности и уравнения термодинамики. Их комбинация дает уравнение для вертикальной вариации скорости волн. Изучение детерминанта этого уравнения приводит к случаям, когда корни уравнения

являются вещественными или мнимыми, т. е. из его анализа мы имеем три ветви колебаний:

1)  $\omega > \omega_A > \omega_B$  — такие частоты соответствуют чисто акустической ветви колебаний;

2)  $\omega < \omega_A < \omega_B$  — такие частоты соответствуют гравитационной ветви колебаний;

3)  $\omega_A > \omega > \omega_B$  — на этих частотах существует ветвь поверхностных колебаний (волны Лэмба).

Здесь  $\omega_A$  — частота атмосферного резонанса,  $\omega_B$  — частота Брента—Вяйсяля.

Действительно, мы наблюдаем волну с периодом колебаний 5.4 мин. Это соответствует третьей ветви колебаний, и это не классические акустические волны и не внутренние гравитационные волны (ВГВ). Поскольку средняя скорость распространения волны по трассе оценена из наблюдений и равна 305 м/с, именно эти колебания представляют собой быструю поверхностную волну Лэмба.

Извержение вулкана — процесс нестационарный и сопровождается чередующимися вулканическими взрывами и выбросами продуктов извержения, которые, в свою очередь, сопровождаются интенсивным звуковым шумом, в том числе инфразвуковыми сигналами, имеющими звуковую скорость распространения. Поэтому инфразвуковой шум от извержения вулкана поступает на акустическую станцию вторым.

Если следовать этим рассуждениям, то мы приходим к выводу, что группа сигналов от извержения, связанных с ВГВ, имеющими относительно невысокую скорость, должна появиться в завершающей части волнового пакета сигнала. Однако этого не наблюдается. Из спутниковых данных в работе [Liu et al., 2022] видно, что пространственная зона наблюдения ВГВ от извержения является ограниченной и на большом удалении от места извержения ВГВ не регистрируются, вероятно, вследствие диссипации.

Наши расчеты спектров мощности излучения акустических сигналов (цуг 1 – цуг 3) показали три основных гармоники (рис. 2). Для временного интервала 240000 отсчетов ( $t \sim 80$  мин) при расчетах в программе Matlab использовалась функция Хемминга (приложение Hemming (92160, 46080, 46080, 50, 0)). В головной части сигнала выделено несколько характерных периодов волн:  $T_1 \sim 322.6$  с;  $T_2 \sim 192.3$  с;  $T_3 \sim 106.4$  (5.4 мин, 3.2 мин, 1.8 мин соответственно).

Исследования инфразвуковых волн имеют давнюю историю. В работах [Гордеев и др., 2013; Fee, Matoza, 2013] рассматриваются инфразвуковые волны от извержений вулканов на Камчатке и на Аляске. Инфразвуку от грозных разрядов посвящены работы [Dessler, 1973; Ерущенков и др., 1976; Pasko, 2009; Сорокин, Добрынин, 2022]. В работе [Мартинес-Беденко и др., 2023] приводятся сведения о необычайно высокой молниевой активности в период извержения вулкана Хунга-Тонга. Действительно, зона молниевой активности извержения достаточно обширна [<https://www.reuters.com/graphics/TONGA-VOLCANO/LIGHTNING/zgpmjdbypd/>]. Однако сильные молниевые разряды, возбуждающие инфразвуковые волны с характерными частотами 0.5–5 Гц, существенно ограничены районом атмосферы, где наблю-



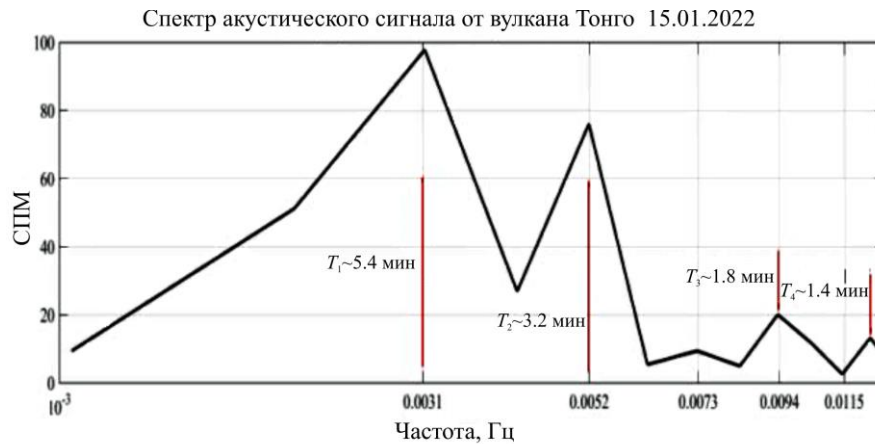


Рис. 2. Спектр низкочастотных колебаний акустического сигнала, записанного на станции ИСЗФ СО РАН 15.01.2022:  $T_1 \sim 322.6 \text{ с} \sim 5.4 \text{ мин}$ ;  $T_2 = 192.3 \text{ с} \sim 3.2 \text{ мин}$ ;  $T_3 = 106.4 \text{ с} \sim 1.8 \text{ мин}$

даются интенсивные вулканические выбросы и конвективные потоки вулканических газов в виде эруптивных колонн высотой около 30–40 км и протяженностью 20–25 км. При распространении в атмосфере на большие расстояния колебания в высокочастотной области (0.5–5 Гц) инфразвукового диапазона подвержены сильному молекулярному поглощению, поэтому заметного вклада инфразвуковых сигналов от молниевых разрядов, возбуждаемых в эпицентре извержения, в сигнале, зарегистрированном на большом расстоянии от извержения, не наблюдается.

Извержение подводного вулкана Хунга-Тонга 15 января 2022 г. вызвало целый ряд геофизических откликов, в том числе сильный сейсмический сигнал. Согласно работе [Thurin et al., 2022], магнитуда землетрясения, сопровождавшего извержение, составила  $M_w \sim 6.3$ . Сейсмическая станция США (район о-ва Фиджи) на удалении около 700 км к юго-западу от места извержения вулкана Хунга-Тонга зафиксировала несколько последовательных сейсмических событий на начальной стадии извержения вулкана (рис. 3).

Сопоставление акустических сигналов на инфразвуковой станции ИСЗФ (см. рис. 1) с вариациями сейсмической активности на начальной стадии извержения 15 января 2022 г., зарегистрированными на сейсмической станции в районе о-ва Фиджи (см. рис. 3), показывает, что в обоих случаях наблюдается однотипная последовательность из трех сильных взрывов, связанных с извержением.

Первая красная линия S1 на рис. 3 — это сейсмические поверхностные волны, бегущие со скоростью волны Рэлея ( $\sim 3600 \text{ м/с}$ ), задержанные на 32.5 с относительно времени начала извержения по каталогу USGS (Геологической службы США). Второй пакет волн Рэлея (красная штриховая линия S2) приходит через 200 с. Общая продолжительность подобных сейсмических сигналов для данного случая составляет около 400 с. Thurin et al. [2022] сообщают, что, вероятно, присутствуют и дополнительные события; третья серая полоса выделяет сигналы от вероятного третьего сейсмического события. Синяя штриховая линия показывает распро-

странение звуковой волны атмосферного давления со скоростью 340 м/с.

### СРАВНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА 15.01.2022, ПОЛУЧЕННЫХ В СИБИРИ И НА АЛЯСКЕ

Опыт наблюдений распространения акустических волн от предыдущих крупных извержений (Кракатау 1883 г.; Пинатубо 1991 г.) свидетельствует о глобальном характере событий. Сопоставление данных наблюдений в Восточной Сибири (ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия) на расстоянии 11230 км (рис. 4) и на Аляске (Alaska Volcano Observatory, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, USA) на расстоянии 9360 км (рис. 5) от эпицентра извержения наглядно доказывает глобальное распространение в атмосфере акустических волн от извержения вулкана Хунга-Тонга. Видно, что характер акустических сигналов в целом совпадает, за исключением некоторых деталей, которые можно объяснить разной протяженностью трасс распространения, различными метеорологическими условиями на трассах и различиями в регистрирующей аппаратуре. Подтверждается: а) глобальный характер распространения таких волн; б) высокая интенсивность излучения акустических волн (как в случае извержения Кракатау 1883 г.).

Время распространения сигнала до Восточной Сибири составило около 10 ч 13 мин, до Аляски — 8 ч 15 мин. Средние скорости распространения акустического сигнала оказались разными и составили 305 и 315 м/с соответственно, что, по-видимому, объясняется разными длинами трасс распространения сигналов и метеорологическими условиями на трассах.

На рис. 6 и 7 показаны высотные разрезы ветрового поля в атмосфере, построенные на основе метеоданных реанализа ERA5 (по оси Y — высоты до 50 км, по оси X — расстояние от вулкана Хунга-Тонга (справа) до станции приема (слева)). Видно, что на трассе Тонга—Иркутск (около 11230 км) преимущественное направление ветра совпадает с направле-

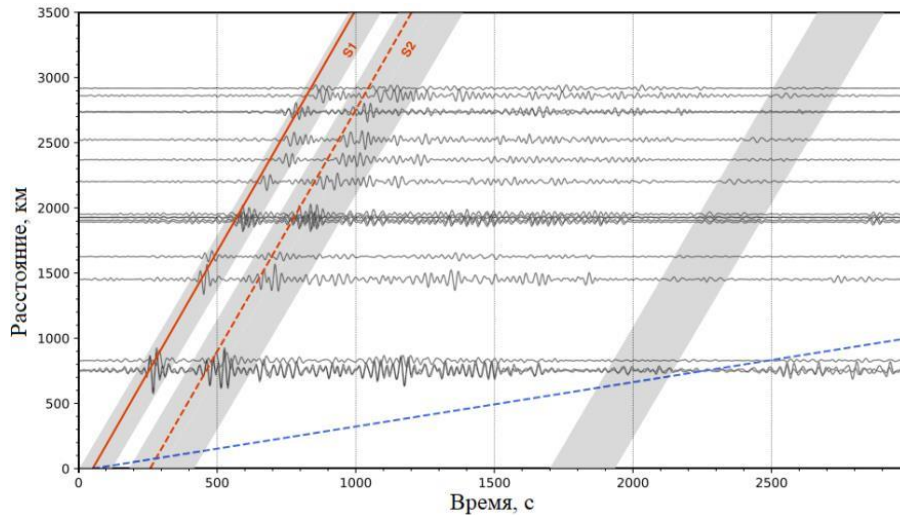


Рис. 3. Сейсмограммы вертикальной компоненты, записанные на о-ве Фиджи. Данные отфильтрованы в интервале периодов 25–70 с. Синяя штриховая линия отображает звуковую волну атмосферного давления, бегущую со скоростью 340 м/с [Thurin et al., 2022]

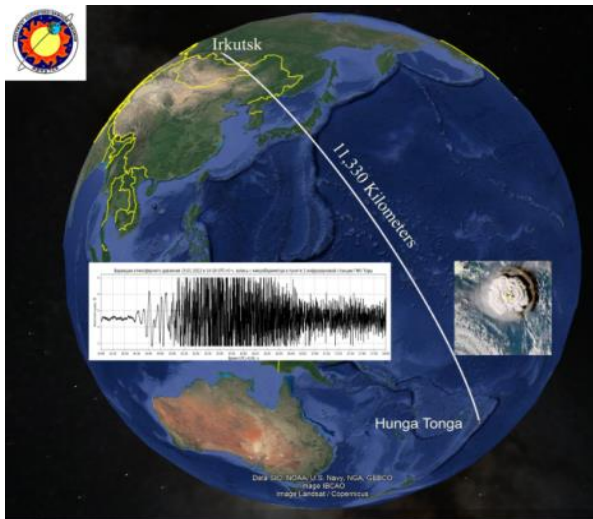


Рис. 4. Акустические волны от извержения вулкана Хунга-Тонга 15.01.2022 в Иркутске (ИСЗФ СО РАН, Восточная Сибирь, Россия)

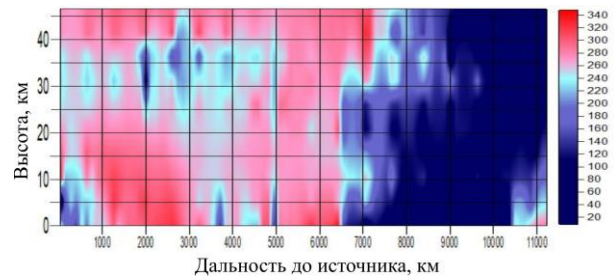


Рис. 6. Высотные направления ветров на трассе Тонга—Иркутск (Тонга — справа)

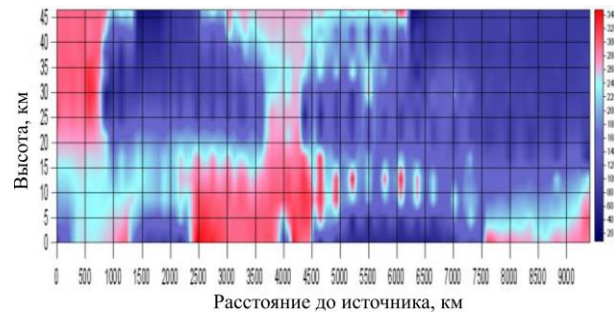


Рис. 7. Высотные направления ветров на трассе Тонга—Аляска (Тонга — справа)

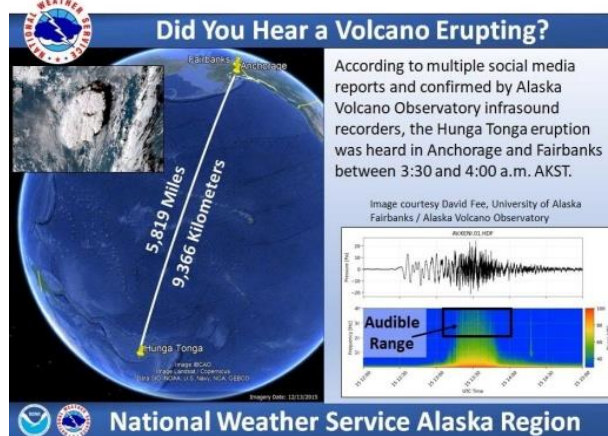


Рис. 5. Акустические волны от извержения вулкана Хунга-Тонга 15.01.2022, зарегистрированные в Анкоридже и Фэрбанксе (сообщение NWS Alaska Region от 15.01.2022 [https://twitter.com/NWSAlaska/status/1482431322740060162?ext=HHwWhMCrveHb05IpAAAA])

нием распространения акустического сигнала, в то время как на трассе Тонга—Аляска (9360 км), преобладают ветра, направленные практически поперек трассы распространения. Следовательно, различия в средней скорости распространения и форме акустических сигналов могут быть связаны с различной структурой поля ветра на трассах.

### ОЦЕНКА ЭНЕРГИИ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА

Рассматривая возможность оценки энергии извержения вулкана как эквивалентного поверхностного взрыва, Pierce и Rousey [1971] получили решение линейризованного уравнения Кортевега — де Вриза (КдВ) для моды Лэмба в следующем виде:

$$\psi(t, s, \theta) = \frac{T_\gamma}{\tau_D} \pi^{-1/2} \int_0^\infty Ai\left(\frac{\tau_a - t}{\tau_D} + \mu \frac{T_\gamma}{\tau_D}\right) \times M(\mu) d\mu \quad (1)$$

Здесь  $\psi(t, s, \theta)$  — волновая функция;  $t$  — текущее время;  $s$  и  $\theta$  — криволинейные цилиндрические координаты с началом координат ( $s=0$ ) вблизи источника;  $\theta$  — азимут угла выхода луча;  $T_\gamma$  — характерное время взрыва;  $\tau_D$  является характерным временным масштабом дисперсии для волны Лэмба [Pierce, Pousey, 1971]. При учете сферичности земной поверхности время прохождения  $\tau_a$  моды Лэмба по криволинейной траектории луча с заданным азимутом выхода  $\theta$  от начала координат  $s=0$  до точки на расстоянии  $s$  от источника задается формулой

$$\tau_a = \int_0^s ds / c_e,$$

где  $c_e$  — средняя скорость моды Лэмба, которая учитывает: а) усредненную по высоте составляющую скорости ветра вдоль траектории луча (считается, что скорость ветра мала по сравнению со скоростью звука); б) усредненные по высоте отклонения скорости звука и скорости ветра от их значений в изотермической атмосфере (постоянная скорость звука) при постоянной скорости ветра. Функция  $M(\mu)$  описывает форму сигнала, генерируемого источником на некотором близком к нему расстоянии. В качестве модели сигнала, генерируемого взрывом, часто используется так называемый импульс Гласстоуна:  $M(\mu) \equiv p(t) = \Delta p(t - t/T_\gamma) \exp(t - t/T_\gamma)$ , где  $t$  — текущее время,  $\Delta p$  и  $T_\gamma$  — соответственно амплитуда и длительность положительной фазы сжатия этого импульса, а  $\mu = t/T_\gamma$ . Волновая форма сигнала  $\psi$  (1) определяется функцией Эйри  $Ai(x)$  и при значениях отношения  $T_\gamma/\tau_D \sim 0.5$  показана на рис. 8 как функция безразмерного времени  $(\tau_a - t)/\tau_D$ .

Для данных условий мы сделали попытку оценить энергию вулканического извержения Хунга-Тонга. Методика оценки описана в работе [Kulichkov et al., 2022] и заключается в следующем. Используя решение линейризованного уравнения КдВ [Pierce, Pousey, 1971], рассчитывается модель акустического сигнала в атмосфере с дисперсионными свойствами, близкими к реальному акустическому сигналу. Подбором параметров достигается удовлетворительное подобие, и оценивается характерный временной масштаб дисперсии на близком к источнику расстоянии.

При достаточно коротком времени взрыва  $T_\gamma (\mu = 1)$ , что имеет место в рассматриваемом случае, на расстояниях несколько тысяч километров от источника волновая форма сигнала стабилизируется, и сигнал принимает форму (1) [Pierce, Pousey, 1971; Куличков, 1987].

В нашем случае адекватное подобие модельного (для импульса Гласстоуна) и реального сигнала достигается при следующих параметрах: при первоначальном периоде  $T_\gamma = 1$  акустического сигнала в источнике (продолжительность положительной фазы импульса Гласстоуна) при распространении в атмосферной среде с характерным временным масштабом дисперсии  $\tau_D$  период сигнала расплывается и увеличивается вдвое уже при  $(\tau_a - t)/\tau_D = 40$  [Pierce, Pousey, 1971; Куличков, 1987].

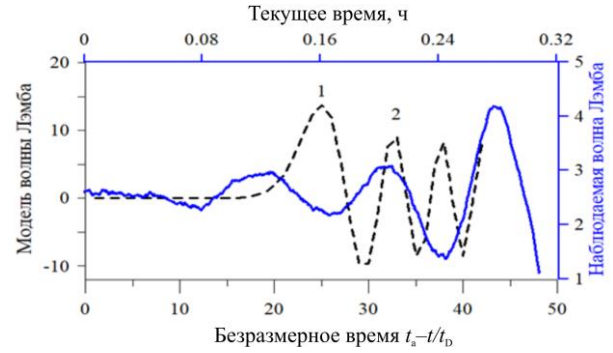


Рис. 8. Атмосферный аналог двухмерной волны Лэмба, записанный на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН (сплошная синяя кривая), и модель волны Лэмба, полученная на основе решения линейризованного уравнения Кортевега — де Вриза (штриховая кривая)

Таким образом, мы полагаем, что искусственный сигнал, полученный на основе решения уравнения КдВ, близок к реальному акустическому сигналу, для которого можно пользоваться соотношением для оценки энергии [Pierce, Pousey, 1971]

$$E = 13P \left( r_E \sin(r / r_E) \right)^{1/2} H_s \left( cT_{1,2} \right)^{3/2}.$$

Энергия взрыва вулкана  $E$  оценивается исходя из следующих параметров наблюдаемого акустического сигнала и параметров атмосферы: амплитуда акустического сигнала  $P = 184$  Па, радиус Земли  $r_E = 6400$  км, расстояние источник — приемник  $r = 11230$  км, высота однородной атмосферы  $H_s = 8$  км, период первого цуга колебаний  $T_{1,2} = 330$  с. Для этих параметров  $E = 1.631 \cdot 10^{18}$  джоулей или  $E = 0.398 \cdot 10^6$  т в тротиловом эквиваленте (ТНТ).

Альтернативные подходы для оценки энергии извержения основаны на статистическом анализе выхода энергии для большого числа взрывов различных типов и сравнении с энергетическими характеристиками землетрясений и других эруптивных явлений. Подобная методика предполагает построение эмпирической зависимости периода  $T$  волн давления, возбуждаемых в атмосфере, от мощности взрыва  $W$ .

Например, работа [Edwards et al., 2006] посвящена разработке и уточнению эмпирических соотношений, связывающих периоды инфразвуковых волн при взрывах метеороидов с энергией их разрушения. Цель работы [Edwards et al., 2006] — с использованием большого объема данных по различным типам взрывов получить эмпирические соотношения, в том числе исследовать статистические свойства инфразвуковых сигналов в зависимости от атмосферных ветров. Полученные эмпирические соотношения применялись для оценки энергии взрывов метеороидов ранее зарегистрированных инфразвуковых событий.

Наиболее общее эмпирическое соотношение было разработано для Американского военно-воздушного Центра технических приложений (AFAC) еще в 1997 г. [ReVelle, 1997]:

$$\log(W/2) = 3.34 \log T - 2.58 \quad \text{для } W/2 \leq 100 \text{ кт}; \quad (1a)$$

$$\log(W/2) = 4.14 \log T - 3.61 \quad \text{для } W/2 \geq 40 \text{ кт}. \quad (1б)$$



Здесь  $W$  — энергия метеороида в килотоннах тротилового эквивалента;  $T$  — период инфразвуковой волны максимальной амплитуды в секундах для двух диапазонов энергии [Сорокин, 2013]. Соотношение (1а) для верхнего диапазона энергий дает оценку  $W/2 \approx 0.639$  Мт, соотношение (1б) —  $W/2 \approx 6.077$  Мт.

Энергию вулканического взрыва можно оценить также на основе измерений полного электронного содержания с помощью ГНСС [Неки, 2006]. В работе [Неки, 2006] предложен эмпирический метод, основанный на анализе амплитуд ковулканических ионосферных возмущений по отношению к фоновому состоянию ПЭС и сравнении реакции ПЭС на взрывы известной мощности [Calais et al., 1998]. Энергия взрыва вулкана Асама в Японии с  $VEI=2$ , оцененная этим методом, составила  $\sim 4 \cdot 10^4$  т в тротиловом эквиваленте или  $2 \cdot 10^{14}$  Дж [Неки, 2006].

Следует заметить, что, помимо фонового электронного содержания, на амплитуду ковулканических ионосферных возмущений дополнительно влияют два других фактора — конфигурация магнитного поля и угол между линией прямой видимости источника и волновым фронтом. Однако, как полагают Astafyeva et al. [2022], в случае очень сильного извержения вулкана Хунга-Тонга фоновое ПЭС оказалось значительно ниже возмущенного, а конфигурацией магнитного поля и направлением волнового фронта в пределах геометрической видимости при грубой оценке можно пренебречь. Таким образом, мощность извержения Хунга-Тонга была оценена от 9 до 37 Мт в тротиловом эквиваленте [Astafyeva et al., 2022]. Можно сделать вывод, что, несмотря на разницу в подходах к оценке энергии извержения вулкана Хунга-Тонга, абсолютная величина выхода энергии имеет очень большое значение — это десятки мегатонн в тротиловом эквиваленте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Представлены результаты наблюдения акустических волн от сильного извержения вулкана Хунга-Тонга, произошедшего в юго-западной части Тихого океана 15 января 2022 г. В данной работе проводится первичный анализ и интерпретация полученных результатов. Можно сделать следующие выводы.

Зарегистрированный акустический сигнал имеет сложную структуру, аналогичную волновой структуре сигналов от мощных ядерных взрывов, падения Тунгусского метеорита [Госсард, Хук, 1978], а также акустическим сигналам от извержения вулкана Хунга-Тонга, представленным в работах [Kulichkov et al., 2022; Dolgikh et al., 2022]. Подобная форма сигнала интерпретируется как результат суперпозиции волн Лэмба, инфразвука и ВГВ.

Выявлена характерная временная последовательность трех цугов в головной части сигнала (волна Лэмба). Эта последовательность связывается с тремя стадиями извержения: 1) сильный взрыв и разрушение о-ва Хунга-Тонга; 2) выход на поверхность воды раскаленной магмы и образование большого количества перегретого пара, пульсирующего в атмосфере; 3) подъем в атмосферу высотной эруптивной колонны, которая может быть источником низкочастотного акустического излучения.

Проведено сравнение акустических сигналов

от извержения вулкана Хунга-Тонга, записанных в Восточной Сибири и на Аляске, и получены оценки средней скорости распространения сигналов на этих трассах. Регистрация акустического сигнала от мощного извержения вулкана Хунга-Тонга в различных точках Земли свидетельствует о глобальном характере распространения сигналов.

Дальнейшая работа по этой теме, по нашему мнению, требует объединения данных, полученных в России, и концентрации усилий в развитии методики определения средних характеристик атмосферы по трассе распространения акустического сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке базового проекта «Геофизический мониторинг и комплексные наблюдения параметров атмосферы Земли и околоземного космического пространства для исследований в солнечно-земной физике» (№ 0278-2021-0004). Данные получены на инфразвуковой станции, входящей в состав Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

Авторы выражают благодарность рецензентам, взявшим на себя труд ознакомиться с работой и сделавшим ряд замечаний, которые способствовали ее существенному улучшению.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Геофизические эффекты извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022. *Доклады Академии наук. Науки о Земле. Вулканология*. 2022. Т. 504, № 2. С. 156–162. DOI: [10.31857/S2686739722060032](https://doi.org/10.31857/S2686739722060032).
- Гарова Е. Феррапонтов И. Четыре сигнала Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Как из Москвы выглядел взрыв вулкана в Тихом океане. *N Plus*. 21.01.2022. URL: <https://nplus1.ru/material/2022/01/21/tonga> (дата обращения 12 июня 2023 г.).
- Гордеев Е.И., Фирстов П.П., Куличков С.Н., Махмудов Е.Р. Инфразвуковые волны от извержения вулканов Камчатки. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49, № 4. С. 456–468.
- Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Анисимов С.В. и др. О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами. *Доклады Академии наук*. 1985. Т. 283, № 3. С. 573–576.
- Добрынин В.А., Сорокин А.Г. Атмосферные эффекты извержения вулкана Тонга. *Сборник Трудов XXXV сессии Российского акустического общества*. М.: ГЕОС, 2023. С. 489–494. DOI: [10.34756/GEOS.2023.17.38487](https://doi.org/10.34756/GEOS.2023.17.38487).
- Ерущенко А.И., Филиппов А.Х., Макухин В.Л. Инфразвуковые волны от молниевых разрядов. *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. 1976. Вып. 38. С. 73–78.
- Куличков С.Н. О распространении волн Лэмба в атмосфере вдоль земной поверхности. *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1987. Т. 23, № 12. С. 1251–1261.
- Мартинес-Беденко В.А., Пилипенко В.А., Шиокава К., Акбашев Р.Р. Электромагнитные УНЧ/КНЧ-колебания, вызванные извержением вулкана Тонга. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С. 41–59. DOI: [10.12737/szf-91202306](https://doi.org/10.12737/szf-91202306).
- Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Крашенинников А.В., Рыбнов С.Ю. Вариации геофизических полей при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. *Динамические процессы в геосферах*. 2023. Т. 15, № 1. С. 63–72. DOI: [10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_1\\_63](https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_63).
- Сорокин А.Г. Инфразвуковое излучение Челябинского



метеороида. *Солнечно-земная физика*. 2013. Вып. 24. С. 58–63.

Сорокин А.Г., Добрынин В.А. О методике исследования инфразвуковых волн от гроз. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 62–69. DOI: [10.12737/szf-81202208](https://doi.org/10.12737/szf-81202208).

Adam D. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere. *Nature*. 2022. Vol. 601. P. 497. DOI: [10.1038/d41586-022-00127-1](https://doi.org/10.1038/d41586-022-00127-1).

Astafyeva E., Maletkii B., Mikesell T.D., et al. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49. e2022GL098827. DOI: [10.1029/2022GL098827](https://doi.org/10.1029/2022GL098827).

Brachett N., Brown D., Mialle P., et al. Monitoring the Earth's Atmosphere with the Global IMS Infrasound Network. *Geophysical Research Abstracts*. 2010. Vol. 12. EGU2010-10773.

Calais E., Minster J.B., Hofton M.A., Hedlin H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements. *Geophysical Journal International*, 1998. Vol. 132, iss. 1. P. 191–202. DOI: [10.1046/j.1365-246x.1998.00438.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00438.x).

Carpenter E.W., Harwood G., Whiteside T. Microbarograph records from Russian large nuclear explosions. *Nature*. 1961. Vol. 192, no. 4805. P. 847.

Dessler A.J. Infrasonic thunder. *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78, no. 12. P. 1889–1896.

Dolgikh G., Dolgikh S., Ovcharenko V. Initiation of infrasonic geosphere waves caused by explosive eruption of Hunga Tonga-Hunga Haapai volcano. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, 1061. DOI: [10.3390/jmse10081061](https://doi.org/10.3390/jmse10081061).

Donn W.L., Ewing M. Atmospheric waves from nuclear explosions. Part II. The Soviet Test 30 October, 1961. *J. Atmos. Sci.* 1962. Vol. 19, iss. 3. P. 264–273.

Duncombe J. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves. *Eos*. 2022. DOI: [10.1029/2022EO220050](https://doi.org/10.1029/2022EO220050).

Edwards W.N., Brown P.G., ReVelle D.O. Estimates of meteoroid kinetic energies from observations of infrasonic airwaves. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68. P. 1136–1160. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.02.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.010).

Fee D., Matoza R.S. An overview of volcano infrasound: From hawaiian to plinian, local to global. *J. Volcanology and Geothermal Res.* 2013. Vol. 249. P. 123–139. DOI: [10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002).

Garrett C.J.R. Atmospheric edge waves. *Quart. J. Roy. Meteorological Soc.* 1969. Vol. 95. P. 731–753.

Harkrider D.C. Theoretical and observed acoustic-gravity waves from explosion sources in the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1964. Vol. 69, no. 24. P. 5295–5321.

Heki K. Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances. *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33, iss. 14. L14303. DOI: [10.1029/2006GL026249](https://doi.org/10.1029/2006GL026249).

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 tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*. 2022. Vol. 179. P. 1533–1548. DOI: [10.1007/s00024-022-03046-4](https://doi.org/10.1007/s00024-022-03046-4).

Maeda K., Young J.J. Propagation of the Pressure Waves Produced by Auroras. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*. 1966. Vol. 18, no. 2. P. 275–299.

Matoza R., Fee D., Assink J., et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*. 2022. Vol. 377, iss. 6601. P. 95–100. DOI: [10.1126/science.abo7063](https://doi.org/10.1126/science.abo7063).

Pasko V.P. Mechanism of infrasonic pulses from thunderclouds. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, D08205. DOI: [10.1029/2008JD011145](https://doi.org/10.1029/2008JD011145).

Pierce A.D., Pousey J.W. Theory of excitation and propagation of Lamb's atmospheric edge mode from nuclear explosions. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1971. Vol. 26. P. 341–368.

ReVelle D.O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1997. Vol. 822. P. 284–302. DOI: [10.1111/j.1749-6632-1997.tb48347.x](https://doi.org/10.1111/j.1749-6632-1997.tb48347.x).

Thurin J., Tape C., Modrak R. Multi-Event Explosive Seismic Source for the 2022 Mw 6.3 Hunga Tonga Submarine Volcanic Eruption. *The Seismic Records*. 2022. Vol. 2, iss. 4. P. 217–226. DOI: [10.1785/0320220027](https://doi.org/10.1785/0320220027).

Vergoz J., Hupe P., Listowski C., et al. IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga Tonga: A global analysis. *Earth and Planet. Sci.* 2022. Vol. 591. 117639. DOI: [10.1016/j.epsl.2022.117639](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639).

Wright C.J., Hindley N., Alexander M.J., et al. Tonga eruption triggered waves propagating globally from surface to edge of space. *Earth and Space Science Open Archive*. 2022. Vol. 609, iss. 7928. P. 741–746. DOI: [10.1002/essoar.10510674.1](https://doi.org/10.1002/essoar.10510674.1).

Liu X., Xu J., Yue J., Kogure M. Strong gravity waves associated with Tonga volcano eruption revealed by SABER observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, iss. 10, e2022GL098339. DOI: [10.1029/2022GL098339](https://doi.org/10.1029/2022GL098339).

Yamamoto R. The microbarographic oscillations produced by the explosions of hydrogen bombs. *Bull. Inst. Chem. Res. Kyoto Univ.* 1954. Vol. 32. P. 120–133.

URL: <https://twitter.com/NWSAlaska/status/1482431322740060162?ext=HHwWhMCrveHb05fpAAAA>

(дата обращения 12 июня 2023 г.).

URL: <https://www.reuters.com/graphics/TONGA-VOLCANO/LIGHTNING/zgpomjdbypd/> (дата обращения 12 июня 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Сорокин А.Г., Добрынин В.А. О регистрации атмосферного эффекта извержения вулкана Хунга-Тонга. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 1. С. 59–67. DOI: [10.12737/szf-101202408](https://doi.org/10.12737/szf-101202408).