

ОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОСФЕРЕ:
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
HAZARDOUS PROCESSES IN THE HYDROSPHERE:
FUNDAMENTAL AND ENGINEERING ASPECTS

УДК 550.344

DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.126

ПОСЛЕДСТВИЯ ИЗВЕРЖЕНИЯ
ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-
ХУНГА-ХААПАЙ

CONSEQUENCES OF THE
ERUPTION OF THE HUNGA-
TONGA-HUNGA-HAAPAI
VOLCANO

Г.И. Долгих, А.В. Давыдов, С.Г. Долгих,
В.В. Овчаренко, В.А. Чупин, В.А. Швец
*Тихоокеанский океанологический институт
имени В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток,
Россия*
dolgikh@poi.dvo.ru

Grigory I. Dolgikh, Aleksandr V. Davydov,
Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko,
Vladimir A. Chupin, Vaycheslav A. Shvets
*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
FEB RAS, Vladivostok, Russia*
dolgikh@poi.dvo.ru

Аннотация. К катастрофическим явлениям Земли надо отнести извержения вулканов, которые иногда приводят к гибели людей, но в основном к значительным экономическим потерям. В качестве яркого примера большой катастрофичности данных явлений можно привести события, связанные с извержением вулкана Кракатау, начавшееся в мае 1883 года и завершившееся серией мощных взрывов 26 и 27 августа 1883 года, в результате которых большая часть острова Кракатау была уничтожена. Это извержение вулкана считается одним из самых смертоносных и разрушительных в истории: около 36 417 человек погибли в результате самого извержения и вызванного им цунами, были полностью уничтожены 165 городов и поселений. Совсем недавно произошло примерно такое же событие, но мощность его была гораздо меньше мощности извержения и взрыва вулкана Кракатау. 20 декабря 2021 года на острове Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай на архипелаге Тонга началось извержение вулкана, а 15 января 2021 года в 04:15 UTC извержение перешло в активную взрывную фазу, на заключительном этапе которой вулкан взорвался. Центральная часть кальдеры вулкана площадью примерно 5 км²

Abstract. The catastrophic phenomena of the Earth should include volcanic eruptions, which sometimes lead to the death of people, but mostly to significant economic losses. As a vivid example of the great catastrophism of these phenomena, we can cite the events associated with the eruption of the Krakatoa volcano, which began in May 1883 and ended with a series of powerful explosions on August 26 and 27, 1883, as a result of which most of the island of Krakatoa was destroyed. More recently, approximately the same event occurred, but its power was much less than the power of the eruption and explosion of the Krakatoa volcano. On December 20, 2021, a volcanic eruption began on the island of Hunga-Tonga-Hunga-Haapai in the Tonga archipelago, and on January 15, 2021, at 04:15 UTC, the eruption turned into an active explosive phase, at the final stage of which the volcano exploded. After the explosion, a shock wave formed, which circled the Earth several times, exciting on its way regional fluctuations of individual layers of the atmosphere, seas and their parts, elastic vibrations of the Earth's crust in the infrasound frequency range. In addition, according to some data, atmospheric Lamb waves were excited, and tsunami waves were generated in certain areas of the Pacific Ocean. The article focuses on the excitation of infrasound vibrations in the

находилась на глубинах от 150 до 200 м. По оценке специалистов NASA мощность взрыва составила 10 мегатонн в тротиловом эквиваленте. После взрыва образовалась ударная волна, которая несколько раз обогнула Землю, возбуждая на своём пути региональные колебания отдельных слоёв атмосферы, сейши морей и их частей, упругие колебания земной коры в инфразвуковом диапазоне частот. Кроме того, по отдельным данным были возбуждены атмосферные волны Лэмба, а на отдельных акваториях Тихого океана – волны цунами. В статье основное внимание уделено возбуждению инфразвуковых колебаний в системе «атмосфера – гидросфера – литосфера», вызванных проходящим атмосферным импульсом, сгенерированным при взрыве вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай.

Ключевые слова: вулкан; извержение; взрыв; ударная волна; инфразвуковые колебания; волны Лэмба.

Введение

15 января 2022 года в 04:14:45 UTC в Тихом океане произошло катастрофическое извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (рисунок 1), сопровождающееся сейсмическими и сильными волновыми возмущениями различных слоёв атмосферы¹, включая ионосферу [Adam, 2022; Duncombe, 2022]. Волны давления в атмосфере, вызванные извержением вулкана, были зарегистрированы на многих станциях системы инфразвукового мониторинга [Marty, 2019] и на барографах, расположенных в разных точках Земли.

Эти волны, которые облетели Землю по меньшей мере дважды, были зарегистрированы

atmosphere–hydrosphere–lithosphere system caused by a passing atmospheric pulse generated during the explosion of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano.

Keywords: volcano; eruption; explosion; shock wave; infrasound vibrations; Lamb waves.

на различных полигонах мира. Некоторыми учёными эти волны были идентифицированы как волны Лэмба. Волны Лэмба характеризуются горизонтальным распространением со скоростью звука вдоль поверхности Земли (вертикальная составляющая колебательной скорости равна нулю) и периодами, превышающими периоды Брента – Вайсалы (около 5 минут), типичными для внутренних гравитационных волн [Gossard, Nooke, 1975]. В одной из первых² публикаций, появившихся после извержения вулкана, энергия извержения оценивалась в 18 мегатонн в тротиловом эквиваленте, что в 1 200 раз превышало энергию атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму в 1945 году.

¹ Гарова Е., Феропонтов И. Четыре сигнала Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Как из Москвы выглядел взрыв вулкана в Тихом океане // N+1 [Электронный ресурс]. URL: <https://nplus1.ru/material/2022/01/21/tonga>.

² Wall M. Tonga undersea volcano eruption released up to 18 megatons of energy // Space.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.space.com/tonga-volcano-eruption-18-megatons>.



Рисунок 1. Извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай.

Figure 1. The eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano.

Одной из отличительных и редко наблюдаемых особенностей атмосферных проявлений эффектов извержения вулканов является «рябь» внутренних гравитационных волн в облачной системе в области извержения, которую можно чётко наблюдать на спутниковых снимках. Центральная часть кальдеры вулкана площадью около 5 км^2 находилась под водой на глубине 200 м (рисунок 2). По оценкам Единой геофизической службы РАН, извержение произошло в районе с географическими координатами 20.546°S и 175.39°W , с эквивалентной магнитудой землетрясения $M=5,8$. Энергия сейсмических колебаний была оценена приблизительно в $3,16 \cdot 10^{13}$ Дж. На рисунке 3 приведены времена прихода атмосферной волны в различные точки Земли.

Анализ записей датчиков, расположенных в Тихом океане по пути следования атмосферного импульса взрыва (рисунок 4) показывает, что скорости распространения этих возмущений для всех приёмных точек примерно равны скорости звука в воздухе. Это свидетельствует о том, что сигнал от места извержения до точек регистрации пришёл по воздуху, а не по воде. То есть записанные сигналы относятся скорее к метеоцунами, вызванные атмосферными возмущениями, созданными мощным взрывом.

Эти возмущения были зарегистрированы микробарографами на расстоянии в несколько тысяч километров от вулкана. Наряду с импульсом в атмосфере при анализе спутниковых данных были обнаружены атмосферные гравитационные волны, сформировавшиеся в результате вертикальных перемещений частиц от поверхности моря в ионосферу [Adam, 2022].

Атмосферный импульс взрыва вулкана распространился по всей планете. Но после прохождения точек регистрации, приведённых на рисунке 4 в Тихом океане, он распространился в Японское море, где были зарегистрированы последствия его воздействия на атмосферу, водную поверхность и земную кору. В трёх точках Японского моря, отмеченных на рисунке 4, приёмными станциями были зарегистрированы колебания водной поверхности, вызванные воздействием этого импульса. На мысе Шульца Японского моря импульс взрыва и дальнейшие колебания, вызванные им, были зарегистрированы лазерным нанобарографом [Долгих и др., 2004], записывающим вариации атмосферного давления, и двумя лазерными деформографами [Долгих и др., 2017], предназначенными для регистрации вариаций деформаций верхнего слоя земной коры в месте их постановки.

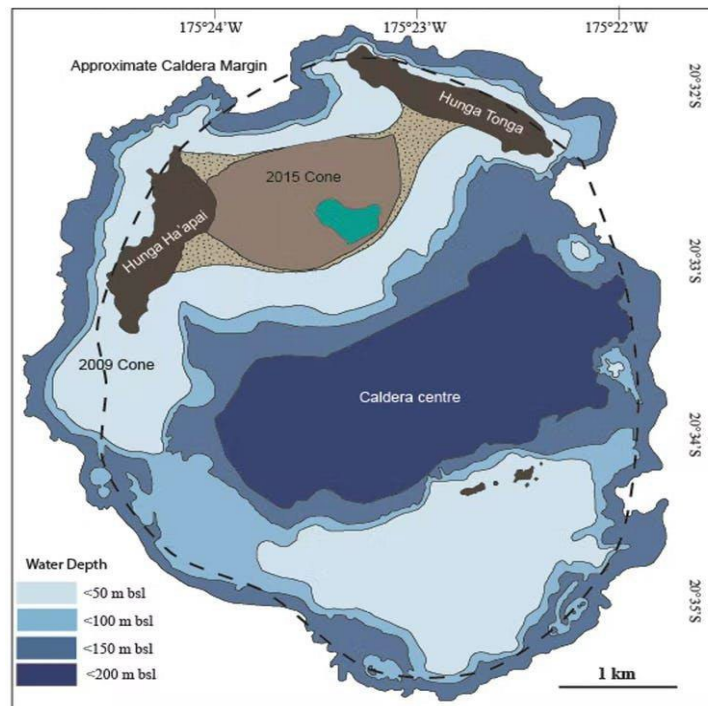


Рисунок 2. Глубины. Центр кальдеры на глубине от 150 до 200 м.
Figure 2. Depths. The center of the caldera is at a depth of 150–200 m.

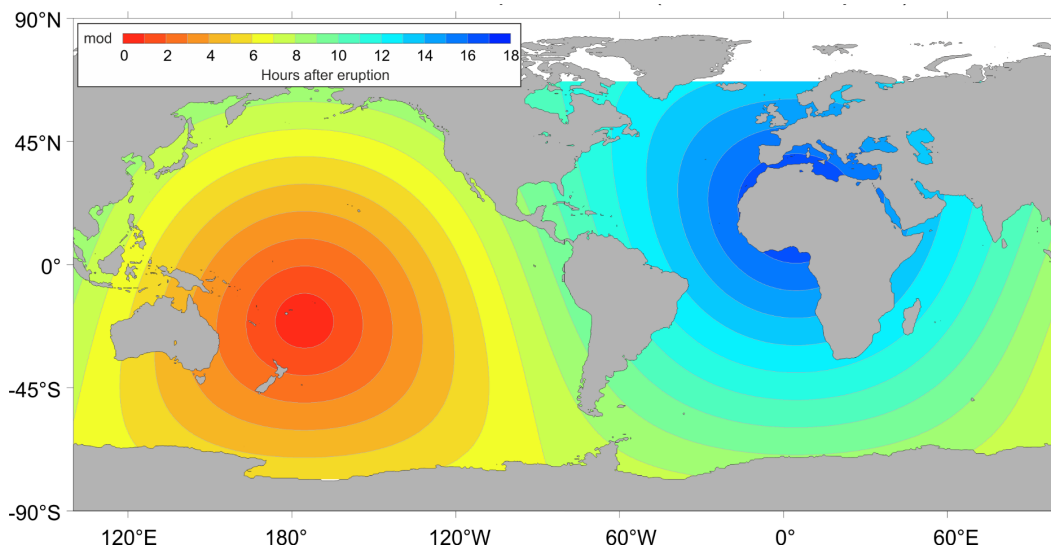


Рисунок 3. Время прихода атмосферной волны в часах после извержения вулкана.
Figure 3. The time of arrival of the atmospheric wave in hours after the eruption of the volcano.

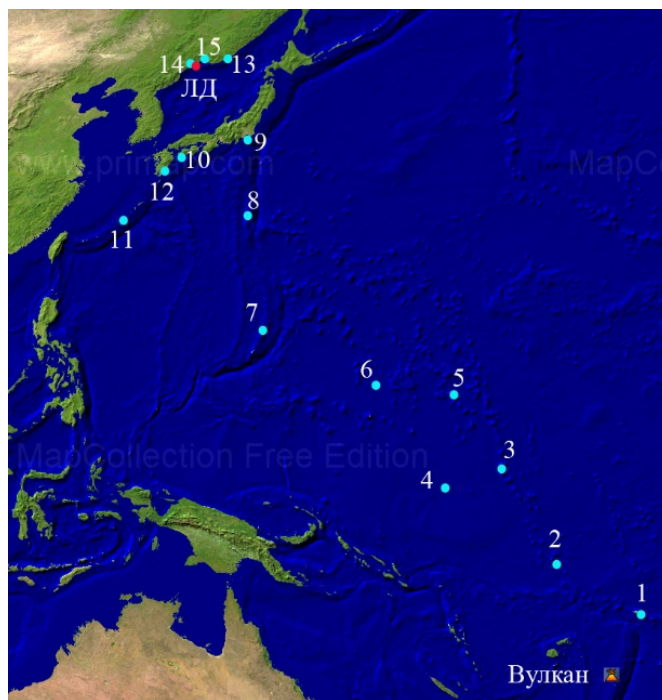


Рисунок 4. Расположение регистрирующих станций.

Условные обозначения: 1–12 – станции, расположенные в Тихом океане;

13–15 – станции в Японском море вблизи побережья Приморского края России.

Красным кружком отмечено место расположения лазерно-интерференционных приёмных систем.

Figure 4. Location of recording stations.

Symbols: 1–12 – stations located in the Pacific Ocean; 13–15 – stations in the Sea of Japan near the coast of the Primorsky Territory of Russia. A red circle marks the location of the laser interference receiving systems.

Геосферный полигон «м. Шульца»

На морской экспериментальной станции «м. Шульца» Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук с 2000 года в режиме постоянного времени начал функционировать геосферный полигон «м. Шульца», основными инструментальными средствами которого в настоящее время стали лазерно-интерференционные системы, созданные на основе равноплечих и неравноплечих интерферометров Майкельсона и частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазеров: лазерные деформографы неравноплечевого типа с длинами плеч 52,5 и 17,5 м, лазерный

нанобарограф и лазерный измеритель вариаций гидросферного давления. Условная схема расположения приборов в настоящее время приведена на рисунке 5.

Лазерные деформографы, установленные на мысе Шульца обладают следующими основными характеристиками: точность измерения вариаций смещений участка земной коры при применяемых методах интерферометрии – 10 пм; рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1 000 Гц; динамический диапазон практически неограничен при регистрации естественных процессов, не вызывающих полное уничтожение интерференции; долговременная частотная стабильность применяемых лазеров – 9–11 знаков.



Рисунок 5. Международный научно-образовательный геосферный полигон.

Условные обозначения: 1 – лазерный деформограф с длиной плеча 52,5 м;
 2 – лазерный деформограф с длиной плеча 17,5 м; 3 – лазерный нанобарограф;
 4 – лазерный измеритель вариаций гидросферного давления; 5 – здание лаборатории.

Figure 5. International scientific and educational geosphere polygon. Symbols: 1 – laser strainmeter with a shoulder length of 52.5 m; 2 – laser strainmeter with a shoulder length of 17.5 m; 3 – laser nanobarograph; 4 – laser meter of hydrosphere pressure variations; 5 – laboratory building.

Лазерный нанобарограф собран по схеме равноплечего интерферометра Майкельсона с применением частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, обеспечивающего долговременную стабильность в 9 знаке. Чувствительным элементом в лазерном нанобарографе является анероидная коробка с зеркальным напылением или с вклеенным небольшим зеркалом. Основные характеристики лазерного нанобарографа: точность измерения вариаций атмосферного давления 50 мПа; рабочий диапазон частот от 0 (условно) до 1 000 Гц; динамический диапазон практически неограничен при регистрации естественных процессов, не вызывающих полное уничтожение интерференции.

Лазерный измеритель вариаций гидросферного давления (позиция 4 на рисунке 5) устанавливается эпизодически, и во время разбираемого в статье события не был установлен на шельфе.

Полученная информация по кабельным линиям поступает в лабораторное помещение, где после предварительной обработки заносится в

ранее созданную базу экспериментальных данных.

Обработка и анализ полученных экспериментальных данных

В этом разделе статьи будем анализировать результаты, полученные при обработке данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа, а также доступных в интернете экспериментальных данных с морских приёмных систем, установленных в Тихом океане и в Японском море на пути движения атмосферного импульса взорвавшегося вулкана.

На рисунке 6 приведены участки записей лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 м, лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 17,5 м и лазерного нанобарографа. Необходимо обратить внимание на то, что записи, содержащие возмущения, вызванные взрывом вулкана, очень похожи друг на друга. При этом в начальной стадии пришедшего возмущения наблюдается мощный импульс, сформированный при взрыве. Далее, после взрыва наблюдаются постепенно затухающие низкочастотные колебания. Большая

схожесть участков записей лазерных деформографов и лазерного нанобарографа говорит о том, что зарегистрированное возбуждение (импульс) пришло по земной коре или по атмосфере. Используя время регистрации данного возмущения, время взрыва и предполагаемое прошедшее расстояние, получаем скорость распространения импульса чуть больше 300 м/с, что говорит о том, что импульс пришёл по атмосфере. Более того, колебания, зарегистрированные лазерными деформографами и лазерным нанобарографом, – это колебания, которые возбудились в атмосфере в момент прихода импульса, а не пришли от места взрыва вулкана. Колебания эти, скорее всего, относятся к собственным колебаниям атмосферных слоёв, или одного атмосферного слоя, но с возбуждением не одной, а нескольких мод этого слоя. Данное утверждение подтверждается и тем, что на записи не прослеживается дисперсионной расходимости зарегистрированных колебаний. Но, глядя на импульс, можно отметить, что несмотря на пройденное расстояние, форма его очень хорошая, то есть импульс распространялся в среде, где малое затухание или где нелинейность и дисперсия хорошо компенсируют друг друга. Ещё следует отметить интересный факт. Длины плеч лазерных деформографов относятся друг к другу как 3 к 1, т.е. измерительное плечо одного лазерного деформографа в три раза больше измерительного плеча другого лазерного деформографа. А это значит, что величины зарегистрированных смещений на лазерных деформографах должны относиться друг к другу как 3 к 1 при воздействии атмосферного возмущения, не обладающего поляризационными свойствами, если они стоят на однородной среде. Но они стоят на средах с немного разными упругими характеристиками. В работе [Dolgikh et al., 2017] было установлено, что при одинаковой атмосферной нагрузке зарегистрированные смещения лазерными деформографами должны относиться не как 3 к 1, а как 2,8 к 1. Это было установлено в тёплое, сухое время года. В нашем случае измерения выполнялись зимой, когда упругие характеристики верхнего слоя почвы

изменились. Все основные конструктивные элементы этих лазерных деформографов находятся под землёй на глубине 3–5 м. Устои лазерного деформографа с длиной плеча 52,5 м смонтированы так: один устой смонтирован на скале, а другой на суглинке. Устои 17,5-метрового лазерного деформографа смонтированы на суглинке на глубинах меньших, чем устои 52,5-метрового лазерного деформографа. Таким образом зимний период привёл к тому, что сильно изменились упругие характеристики сред для одного лазерного деформографа по сравнению с другим лазерным деформографом. Это привело к тому, что отношение смещений равно 1,5 вместо 2,8, что подтверждается результатами работы [Roumelioti, Hollender, Guéguen, 2020], в которой установлено, что упругие характеристики верхнего слоя земной коры сильно зависят от метеорологических параметров. Конечно, в наших рассуждениях мы считаем, что пришедший импульс не имеет поляризации.

С целью точного определения времени фиксации атмосферного возмущения на геосферном полигоне «м. Шульца» были отфильтрованы записи 52,5-метрового лазерного деформографа и лазерного нанобарографа полосовым фильтром Хэмминга с подавлением боковых лепестков на уровне 92 дБ в полосе предполагаемого атмосферного возбуждения, то есть в полосе 0,00028–0,0033 Гц. На рисунке 7 представлены неотфильтрованные и отфильтрованные записи лазерного деформографа и лазерного нанобарографа. При анализе записей лазерного деформографа с длиной измерительного плеча 52,5 м и лазерного нанобарографа установлено, что обеими установками зарегистрировано несколько приходов атмосферного возмущения, вызванного взрывом вулкана. Первый приход атмосферного возмущения был зарегистрирован лазерным нанобарографом 15.01.2022 в 12:10 UTC, то есть через 7 ч 50 мин после взрыва. Высота этого импульса составила 220 Па (рисунок 7а). На записях лазерного деформографа также был зарегистрирован импульс в это же время, его высота составила 6,4 мкм (рисунок 7б).

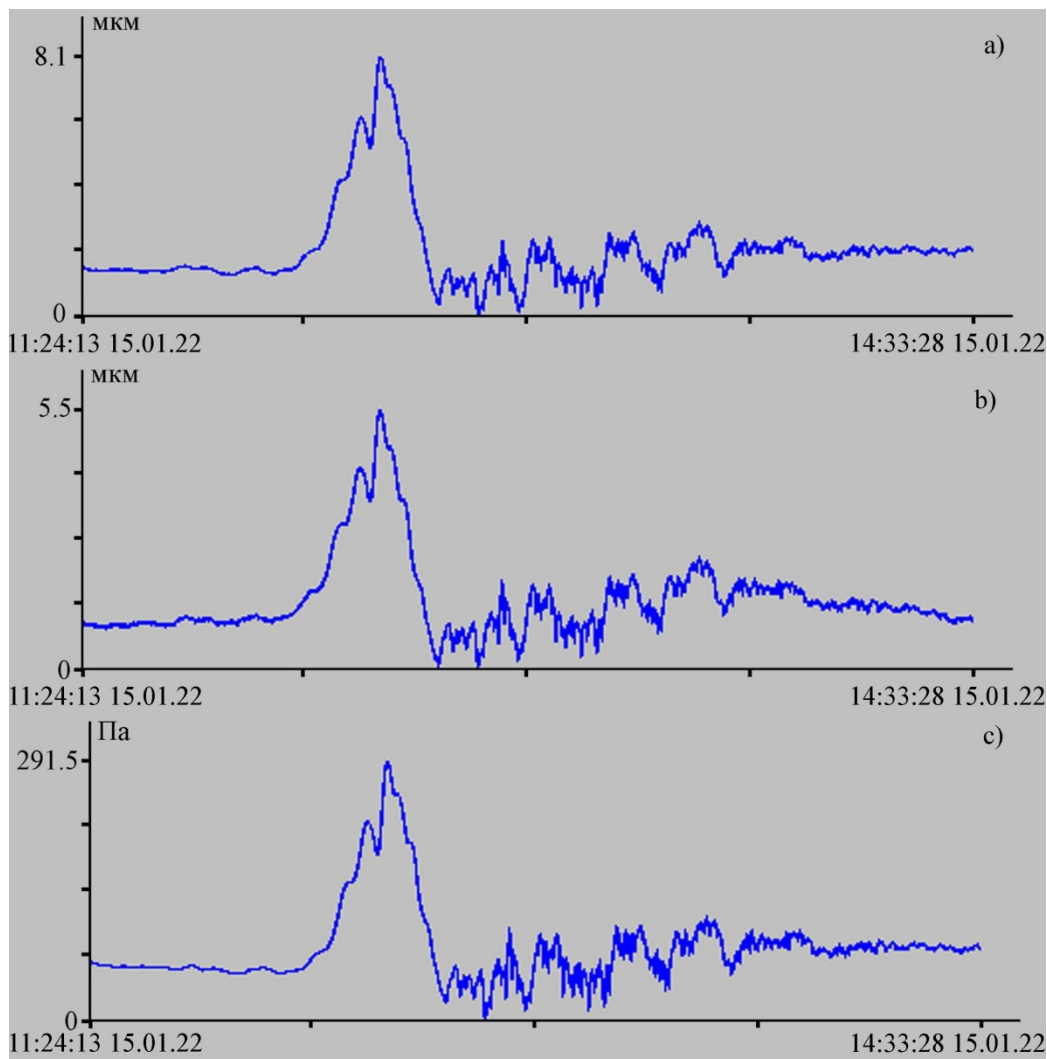


Рисунок 6. Синхронные участки записей 52,5-метрового лазерного деформографа (а), 17,5-метрового лазерного деформографа (б) и лазерного нанобарографа (с).

Figure 6. Synchronous sections of recordings of 52.5-meter laser strainmeter (a), 17.5-meter laser strainmeter (b) and laser nanobarograph (c).

Затем, обогнув земной шар, этот же импульс был зарегистрирован обоими приборами 17.01.2022. На рисунке 7а представлен участок записи лазерного нанобарографа, где стрелками обозначены оба импульса, пришедшие 15.01.2022 и 17.01.2022 в 00:44 UTC. Второй приход прямого импульса был зарегистрирован через 36 ч 40 мин после извержения. На записи лазерного нанобарографа высота импульса составила 102 Па. На участке записи лазерного деформографа (рисунок 7б) обозначены стрелками оба этих импульса, первого и

обогнувшего земной шар. Высота второго импульса составила 3 мкм. Антиподальные импульсы, то есть импульсы, прошедшие от вулкана до приёмников в обратном направлении, на рисунке 7 (с, d) представлены красными стрелками. На обоих приборах этот импульс был зарегистрирован 16.01.2022 в 01:12 UTC, то есть через 20 ч 57 мин после взрыва вулкана. На записи лазерного нанобарографа высота импульса составила 47 Па, а на записи лазерного деформографа 1,3 мкм.

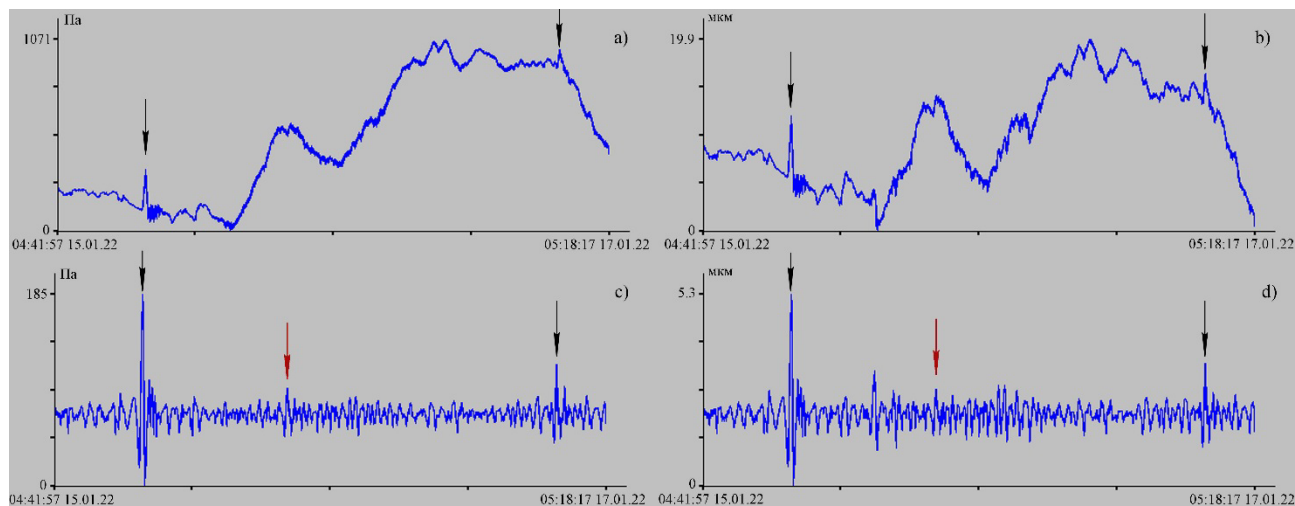


Рисунок 7. Синхронные участки записей лазерного нанобарографа (а), лазерного деформографа (б) и отфильтрованные синхронные участки записей лазерного нанобарографа (с), лазерного деформографа (д).

Figure 7. Synchronous sections of laser nanobarograph recordings (a), laser strainmeter (b) and filtered synchronous sections of laser nanobarograph recordings (c), laser strainmeter (d).

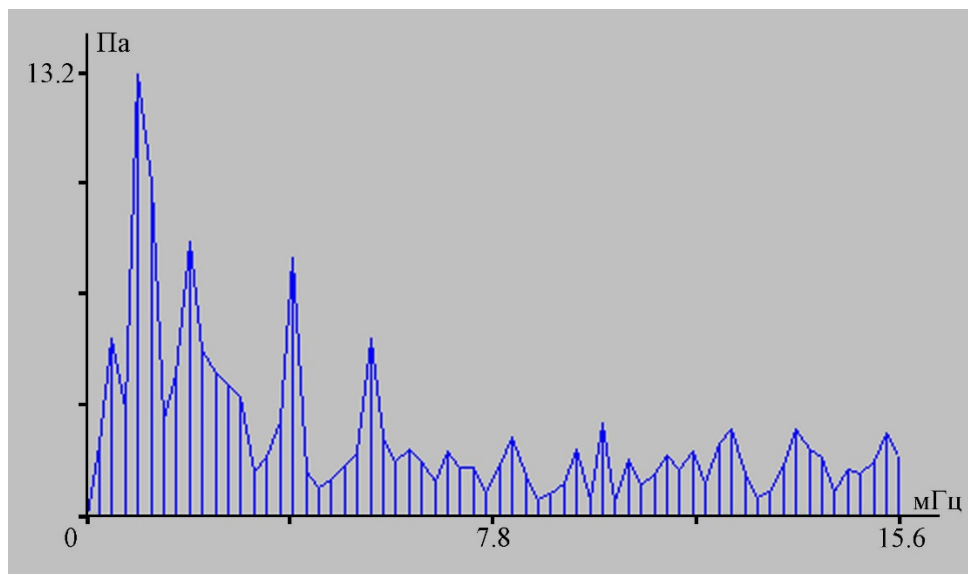


Рисунок 8. Спектр участка записи лазерного нанобарографа.

Figure 8. The spectrum of the recording area of the laser nanobarograph.

В свете вышеизложенного считаем, что пришедший импульс, сформированный взрывом вулкана, возбудил в месте расположения лазерно-интерференционных установок собственные колебания части атмосферы. Из нижнего графика рисунка 6 видно, что после атмосферного импульса в записи лазерного нанобарографа присутствуют низкочастотные колебания. При спектральной обработке этого участка записи лазерного нанобарографа (длительность участка 4 096 с при частоте дискретизации 1 Гц) получен спектр, приведённый на рисунке 8. На рисунке

можно выделить четыре мощных пика на периодах: 17 мин 04,0 с (амплитуда 13,2 Па), 8 мин 32,0 с (амплитуда 8,2 Па), 4 мин 16,0 с (амплитуда 7,7 Па), 3 мин 06,2 с (амплитуда 5,3 Па), а также пик с периодом 1 мин 42,4 с (амплитуда 2,8 Па). Все выделенные колебания, кроме двух последних, можно отнести к одному объекту. По-видимому, этим объектом должен быть выделенный слой атмосферы, возможно один из геометрических размеров которого равен около 80–90 км.

Из интернета мы получили данные со всех измерительных станций, находящихся в Тихом океане и со станций, находящихся в Японском море и территориально относящиеся к России. Все эти станции записывали изменения уровня воды в Тихом океане и в Японском море. Но нигде мы не смогли обнаружить записи, характерные для цунами в соответствии с работой [Adam, 2022]. Везде время прихода возмущения, вызванного взрывом вулкана, соответствовало времени прихода возмущения по воздуху. Мы не смогли выделить сигналы с большей скоростью. Таким образом, по данным, которые можно найти в интернете, взрыв вулкана не вызвал возбуждения цунами в классическом виде. Все эти колебания, которые возникли в воде и были зарегистрированы указанными станциями можно отнести к метеоцунами, то есть цунами, которые были вызваны атмосферными процессами. В данном случае они вызваны проходящим атмосферным импульсом и возбуждёнными колебаниями атмосферных областей. При совпадении частот атмосферных колебаний и собственных колебаний отдельных частей акваторий может наблюдаться значительная по амплитуде метеоцунами, что крайне опасно для людей и техники. В таблице 1 приведены результаты спектральной обработки экспериментальных данных морских станций регистрации сигналов, указанных в первом столбце. Длительность каждого обработанного участка данных составляла 4096 с при частоте дискретизации 1 Гц. Метод обработки – быстрое преобразование Фурье. При обработке для каждой станции были выбраны по два участка – фон (до прихода сигнала возмущения) и участок

сигнала возмущения. В таблице введены следующие обозначения: в первом столбце приведены названия морских станций регистрации сигналов, во втором столбце – названия участков в фоновый период и в период регистрации сигналов возмущения, в столбцах третий – пятый приведены периоды выделенных максимумов и значения относительных амплитуд, в шестом столбце – расчётная скорость распространения сигнала возмущения от вулкана до точки регистрации. Совпадающие максимумы выделены цветом.

Что надо отметить главным. Были обработаны данные четырнадцати станций, из которых в девяти станциях были выделены спектральные максимумы с периодами, совпадающими с максимумами фоновых периодов наблюдений. Это свидетельствует о том, что возбуждение данных сигналов произошло во время прихода воздушного импульса, возникшего в результате взрыва вулкана. На наш взгляд все выделенные колебания при спектральной обработке относятся к собственным (сейшам) колебаниям отдельных водных объектов или их частей, которые возбудились атмосферными процессами. Интересно отметить, что расчётные скорости везде меньше скорости звука воздуха на определённой высоте. Это свидетельствует о том, что при расчёте данных скоростей мы брали не совсем верно пройденный путь импульсом от вулкана до мест регистрации. Мы здесь не приводим сами записи всех станций, поскольку это очень громоздко (14 графиков). Они находятся в свободном доступе в интернете, их можно легко взять и проверить наши результаты.

Таблица 1. Статистические данные результатов обработки фоновых данных и данных сигналов возбуждения.

Table 1. Statistical data of the results of processing background data and excitation signal data.

Морская станция	Участок	Максимум1	Максимум2	Максимум3	Скорость, м/с
Апия Юполу, Самоа	Фон	1 ч 04 мин 13 с (0,002)	25 мин 41,4 с (0,0016)	18 мин 21,0 с (0,0015)	
	Сигнал	11 мин 56,9 с (0,032)	30 мин 13,4 с (0,027)	18 мин 21,0 с (0,021)	218
Фонгафале, Тувалу	Фон	42 мин 48,9 с (0,0014)	8 мин 01,7 с (0,0011)	6 мин 35,2 с (0,00098)	
	Сигнал	9 мин 52,8 с (0,0092)	42 мин 48,9 с (0,0086)	20 мин 33,1 с (0,0053)	209
Бетио Тарава, Кирибати	Фон	32 мин 02,7 с (0,0056)			
	Сигнал	32 мин 02,7 с (0,0068)	7 мин 25,8 с (0,0051)	10 мин 03,2 с (0,0046)	212
Науру, Науру	Фон	51 мин 22,7 с (0,0015)	39 мин 31,3 с (0,0013)	13 мин 53,2 с (0,001)	
	Сигнал	6 мин 15,9 с (0,0045)	36 мин 41,9 с (0,0043)	28 мин 32,6 с (0,0039)	222
Кваджалейн, Маршалловы острова	Фон	58 мин 48,5 с (0,0026)	5 мин 14,4 с (0,0024)	37 мин 48,3 с (0,0022)	
	Сигнал	13 мин 55,7 с (0,014)	48 мин 07,0 с (0,011)	9 мин 37,4 с (0,0089)	235
Декехтик Понпеи, Микронезия	Фон	56 мин 58,1 с (0,0017)	16 мин 01,3 с (0,00077)	5 мин 53,6 с (0,00051)	
	Сигнал	5 мин 53,6 с (0,0056)	51 мин 16,3 с (0,0035)	6 мин 29,4 с (0,0029)	248
Сайпан, США	Фон	56 мин 51 с (0,0019)	23 мин 15,4 с (0,0017)	7 мин 12,4 с (0,0013)	
	Сигнал	11 мин 53,9 с (0,011)	9 мин 50,4 с (0,011)	13 мин 49,7 с (0,01)	279
Чичидзима, Япония	Фон	20 мин 28,0 с (0,0055)	16 мин 30,3 с (0,0051)	13 мин 49,7 с (0,003)	
	Сигнал	20 мин 28,0 с (0,12)	15 мин 02,9 с (0,091)	12 мин 47,5 с (0,043)	286
Мера, Япония	Фон	6 мин 09,9 с (0,0051)	5 мин 19,8 с (0,0047)	22 мин 14,7 с (0,0044)	
	Сигнал	22 мин 14,7 с (0,11)	6 мин 05,5 с (0,044)	6 мин 38,7 с (0,042)	290
Тосашимидзу, Япония	Фон	20 мин 28,0 с (0,015)	39 мин 21,4 с (0,0072)		
	Сигнал	20 мин 28,0 с (0,14)	24 мин 21,8 с (0,11)	42 мин 38,2 с (0,054)	290
Наха, Япония	Фон	26 мин 55,7 с (0,008)			
	Сигнал	24 мин 21,8 с (0,057)	10 мин 26,5 с (0,011)		
	Сигнал	22 мин 14,7 с (0,11)	25 мин 34,9 с (0,089)	19 мин 40,7 с (0,067)	288
Преображение, Россия	Фон	31 мин 58,7 с (0,01)	15 мин 59,3 с (0,0035)		
	Сигнал	30 мин 05,8 с (0,033)	9 мин 28,5 с (0,011)	15 мин 59,3 с (0,0074)	293
Посъет, Россия	ФОН	31 мин 58,7 с (0,0029)	17 мин 38,6 с (0,0018)	10 мин 53,2 с (0,0012)	
	Сигнал	30 мин 05,8 с (0,0072)	17 мин 38,6 с (0,0035)	11 мин 22,2 с (0,0012)	287
Владивосток, Россия	Фон	39 мин 21,4 с (0,0081)	31 мин 58,7 с (0,0062)		
	Сигнал	31 мин 58,7 с (0,032)			286

Заключение

При обработке записей лазерного нанобарографа и двух лазерных деформографов, расположенных на морской экспериментальной станции «м. Шульца» на побережье Японского моря выделены три прямых прохода и один антиподальный проход атмосферного импульса и низкочастотных колебаний, образованных в результате взрыва вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Установлено, что колебания земной коры в месте расположения лазерных деформографов и выделенных из их записей на периодах 17 мин 04,0 с, 8 мин 32,0 с и 4 мин 16,0 с можно отнести к собственным колебаниям отдельных областей атмосферы, сгенерированных импульсом, который сформирован в результате взрыва вулкана. Показано, что колебания с периодом 17 мин 04,0 с имеют региональное происхождение и наблюдаются в другие времена при возбуждении атмосферных процессов. Колебания, близкие к выделенному периоду 3 мин 06,2 с, регистрируются в различных регионах планеты (Забайкалье (Россия), Приморский край (Россия), Тайвань), что свидетельствует об их планетарном

Литература

- Давыдов А.В., Долгих Г.И. Регистрация сверхнизкочастотных колебаний 52,5-метровым лазерным деформографом // Физика Земли. 1995. № 3. С. 64–67.
- Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Корень И.А., Новикова О.В., Овчаренко В.В., Окунцева О.П., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный нанобарограф и его применение при его изучении бародеформационного взаимодействия // Физика Земли. 2004. № 8. С. 82–90.
- Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А., Овчаренко В.В. Двухкоординатный лазерный деформограф // Физика Земли. 1998. № 11. С. 76–81.
- 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).

происхождении. Первоисточник всех выделенных волновых процессов находится в атмосфере.

Атмосферный импульс при своём распространении над акваториями Тихого океана в каждом отдельном регионе возбудил собственные колебания водных масс (сейши) мест расположения регистрирующей аппаратуры. В Японском море, кроме региональных сейш, были возбуждены сейши Японского моря на периоде (30 мин 05,8 с – 31 мин 58,7 с), выделенных на всех станциях, расположенных в Японском море. Ранее данные колебания нами выделялись из записей лазерных деформографов после мощных геодинамических событий [Давыдов, Долгих, 1995].

Благодарности

Работа выполнена по теме в рамках выполнения темы государственного задания (№ АААА-А20-120021990003-3) «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей в Мировом океане».

References

- 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).
- Davydov A.V., Dolgikh G.I. Recording of ultralow-frequency oscillations by a 52.5-m laser strainmeter. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1995, vol. 31, no. 3, pp. 248–251. (Russ. ed.: Davydov A.V., Dolgikh G.I. Registratsiya sverkhnikhochastotnykh kolebaniy 52,5-m lazernym deformografom. *Fizika Zemli*, 1995, no. 3, pp. 64–67).
- Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.V., Yakovenko S.V. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, vol. 142, iss. 4, pp. 1990–1996. DOI: [10.1121/1.5006904](https://doi.org/10.1121/1.5006904).
- Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren I.A., Novikova O.V., Ovcharenko V.V., Okuntseva O.P., Shvets V.A., Chupin V.A.,

Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., Chupin V.V., Yakovenko S.V. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. Vol. 142. Iss. 4. Pp. 1990–1996. DOI: [10.1121/1.5006904](https://doi.org/10.1121/1.5006904).

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

Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 456 p.

Marty J. The IMS infrasound network: Current status and technological developments // *Infrasound monitoring for atmospheric studies* / Под ред. A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne. Springer Nature Switzerland AG, 2019. P. 3–62. DOI: [10.1007/978-3-319-75140-5_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_1).

Roumelioti Z., Hollender F., Guéguen Ph. Rainfall-Induced Variation of Seismic Waves Velocity in Soil and Implications for Soil Response: What the ARGONET (Cephalonia, Greece) Vertical Array Data Reveal // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2020. Vol. 110. No. 2. P. 441–451. DOI: [10.1785/0120190183](https://doi.org/10.1785/0120190183).

Yakovenko S.V. A laser nanobarograph and its application to the study of pressure-strain coupling. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2004, vol. 40, no. 8, pp. 683–691. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Kovalev S.N., Koren' I.A., Novikova O.V., Ovcharenko V.V., Okuntseva O.P., Shvets V.A., Chupin V.A., Yakovenko S.V. Lazernyi nanobarograf i ego primenenie pri ego izuchenii baro-deformatsionnogo vzaimodeistviya. *Fizika Zemli*, 2004, no. 8, pp. 82–90).

Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren I.A., Ovcharenko V.V. A Two-Coordinate Laser Strainmeter. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 1998, vol. 34, no. 11, pp. 946–950. (Russ. ed.: Dolgikh G.I., Kovalev S.N., Koren' I.A., Ovcharenko V.V. Dvukhkoordinatnyi lazernyi deformograf. *Fizika Zemli*, 1998, no. 11, pp. 76–81).

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

Marty J. The IMS infrasound network: Current status and technological developments In A. Le Pichon, E. Blanc, A. Hauchecorne (eds.), *Infrasound monitoring for atmospheric studies*. Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 3–62. DOI: [10.1007/978-3-319-75140-5_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_1).

Gossard E.E., Hooke W.H. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 456 p.

Roumelioti Z., Hollender F., Guéguen Ph. Rainfall-Induced Variation of Seismic Waves Velocity in Soil and Implications for Soil Response: What the ARGONET (Cephalonia, Greece) Vertical Array Data Reveal. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, vol. 110, no. 2, pp. 441–451. DOI: [10.1785/0120190183](https://doi.org/10.1785/0120190183).