

УДК 550.375, 551.511

ГЛОБАЛЬНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАН 15 ЯНВАРЯ 2022 г. (обзор)

© 2023 г. Б. Г. Гаврилов*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: boris.gavrilov34@gmail.com*

Извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. и связанные с ним взрывные события, зарегистрированные сейсмическими и акустическими приборами по всей планете, вызвали значительные и продолжительные эффекты в атмосфере и ионосфере. Полученные с использованием рекордного количества наземных наблюдательных пунктов и систем космического базирования измерительные данные обеспечили беспрецедентный объем геофизической информации. Анализ параметров сейсмических и атмосферно-ионосферных возмущений позволил определить значение индекса вулканической активности для извержения Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай $VEI = 6$, что ставит его в ряд крупнейших из когда-либо зарегистрированных вулканических извержений. Среди уникальных или редко наблюдаемых событий можно выделить высоту подъема вулканического облака до границ мезосферы, рекордную грозовую активность, масштаб, амплитуду и продолжительность атмосферных, стратосферных и ионосферных возмущений, зарегистрированных по всей планете, самые сильные инфразвуковые сигналы, наблюдавшиеся в мире за последние 30 лет. Синхронная регистрация низкочастотных вариаций геомагнитного поля и возмущений амплитуды сигналов Шумановского резонанса позволили определить скорость распространения волн Лэмба, акустико-гравитационных и инфразвуковых волн, определить фазы извержения, ответственных за генерацию различного вида возмущений верхних геосфер и скорости распространения соответствующих агентов возмущений. Вместе с тем, полноценный анализ динамики и механизмов глобальных геофизических возмущений, вызванных извержением, затруднен отсутствием полноценной модели многофазного высокоэнергетического подводного извержения, трудностью совместного анализа всей совокупности выявленных геофизических эффектов извержения с использованием существующих моделей атмосферы и ионосферы. Очевидно, что понимание всего комплекса глобальных геофизических возмущений на планете, вызванных извержением, дает уникальный материал для исследования процессов межгеосферного взаимодействия, представляющих собой совокупность взаимозависимых и активно взаимодействующих физических явлений.

Ключевые слова: извержение вулкана, сейсмика, атмосферные и ионосферные возмущения.

Для цитирования: Гаврилов Б.Г. Глобальные геофизические эффекты, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. (обзор) // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 3. С. 73–94. http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_73

Введение

Статья представляет собой попытку обзора физической картины одного из самых мощных в истории инструментальных наблюдений геофизического явления – извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (ХТХ) 15 января 2022 г. Кратко описывается течение и хронология самих эруптивных событий, без чего трудно представить полную картину этого явления. Основное внимание уделяется геофизическим проявлениям или последствиям извержения, наблюдавшегося десятками наземных обсерваторий и космическими аппаратами. Объем и спектр полученных данных представил чрезвычайно сложную и далеко не полностью понятую картину возмущений земной коры и литосферы, атмосферы и ионосферы.

Извержение подводного вулкана ХТХ ($20^{\circ}34' \text{ S}$, $175^{\circ}22' \text{ W}$) в юго-западной части Тихого океана началось 20 декабря 2021 года. Наиболее сильный выброс наблюдался 15 января 2022 года в 04:14:45 UT. По-видимому, это было самое крупное извержение вулкана в этом столетии. Извержение вызвало цунами, гигантскую локальную молниевую активность и генерацию мощных атмосферных волн [Adam, 2022; Duncombe, 2022; Lin et al., 2022].

Сейсмические сигналы были зарегистрированы по всему миру. Синтезированная по показаниям десятков сейсмографов картина сейсмических возмущений оказалась коррелирующей с данными о распространении инфразвуковых волн и продемонстрировала как непрерывные, так и эпизодические сейсмические события, связанные с наиболее интенсивными этапами фрегоплинианского извержения.

Наиболее впечатляющим следствием ХТХ является, вероятно, масштаб и течение гигантских атмосферных возмущений (рис. 1). Явления такого типа характерны для всех крупных извержений. Гравитационные волны проходят через атмосферу и являются одним из факторов общей атмосферной циркуляции. Однако события такого масштаба наблюдались, по-видимому, впервые. По данным спутника NASA Aqua [<https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/index.php>] ХТХ возбудило гигантскую волну в стратосфере и ионосфере в обоих полушариях [Heki, 2022]. Такие атмосферные возмущения являются следствием воздействия на атмосферу магматических потоков тифры и пепла, водяных паров, расплава и газов, выброшенных извержением [Yuen et al., 2022].

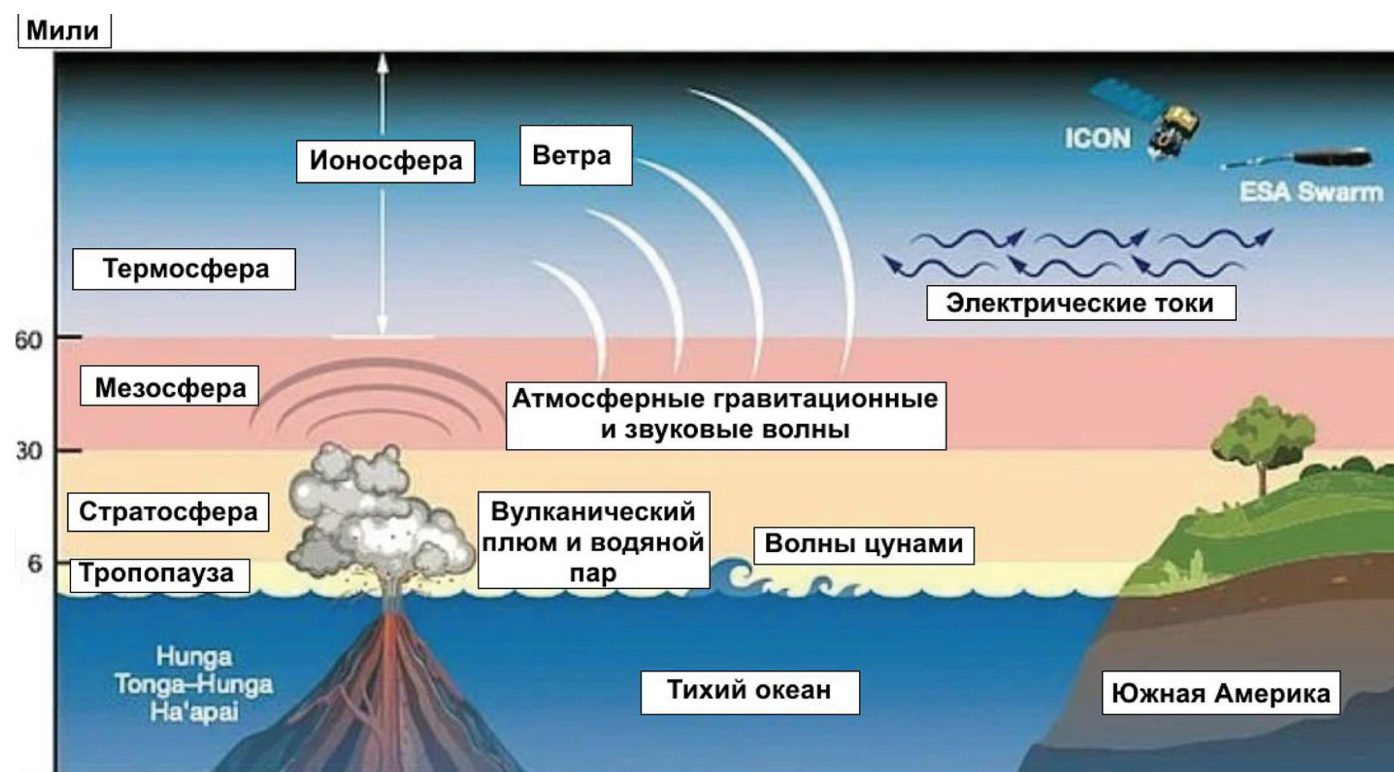


Рис. 1. Схема геофизических возмущений, вызванных извержением ХТХ 15 января 2022 г. (рисунок адаптирован с сайта NASA's Goddard Space Flight Center/Mary Pat Hrybyk-Keith/FOX Weather)

Распространение атмосферных возмущений в виде волн Лэмба и акустико-гравитационных волн вызвало возмущения плотности и проводимости ионосферы и, как следствие, изменение ионосферных токов и генерацию глобальных геомагнитных возмущений [Azeem et al., 2017; Themens et al., 2022].

Следующие разделы статьи имеют целью дать представление об общей картине извержения и самых значительных его геофизических последствиях. В Заключении приводятся некоторые предварительные итоги, полученные на основе данных инструментальных наблюдений и теоретического анализа представлений об этом уникальном геофизическом событии.

Извержение

ХТХ по своим масштабам сопоставимо с извержением Кракатау 1883 года [Matoza et al., 2022]. Через час после начала извержения 15.01.2022 г. диаметр облака составлял около 650 км. Максимальная высота подъема вулканического облака составила 58–60 км, то есть облако достигло мезосферы [Proud et al., 2022]. Возмущения приземного давления регистрировались барометрами по всему земному шару с магнитудой более 100 Па [Amores et al., 2022; Matoza et al., 2022].

В верхней атмосфере волновые сигнатуры были обнаружены в термосферном ветре и ионосферном экваториальном электроджете [Harding et al., 2022], дрейфе ионосферной плазмы и общем содержании электронов по данным регистрации полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, в том числе в магнитосопреженных точках [Astafyeva et al., 2022; Lin et al., 2022; Themens et al., 2022; Shinbori et al., 2022; Zhang et al., 2022]. Как и волна Лэмба в нижней атмосфере, волна в верхней атмосфере многократно распространилась вокруг земного шара [Liu et al., 2023].

По данным наблюдений изменения высоты плюма, полученных со спутников NOAA GOES-17 и Himawari-8 JAXA [NASA, 2022], в [Yuen et al., 2022] были оценены объемный и массовый расход плюма, составившие $9 \cdot 10^5$ м³/с и $1.3 \cdot 10^9$ кг/с соответственно. При длительности извержения ~12 ч, объем и масса извержения оцениваются в 1.9 км³ и ~3 млрд т, что соответствует $VEI = 5-6$. Наблюдались частота и интенсивность молний. Их генерация обеспечивалась образованием мелкодисперсного пепла в результате взаимодействия магмы с морской водой с сопутствующим высоким зарядом на единицу массы и высокой концентрацией растворенных летучих веществ перед извержением [Yuen et al., 2022 и ссылки в ней].

Известно, что электрификация вулканического пепла и возникновение связанных с ней вулканических молний являются типичными проявлениями взрывных извержений вулканов [Cimarelli, Genareau, 2022]. Количество молниевых разрядов при ХТХ были рекордными. В период с 5:19:00–10:00 UT 15 января мощное подводное извержение спровоцировало почти 400000 молниевых разрядов. На рис. 2 показан график изменения частоты молниевых разрядов, зарегистрированных 15 января [Yuen et al., 2022].

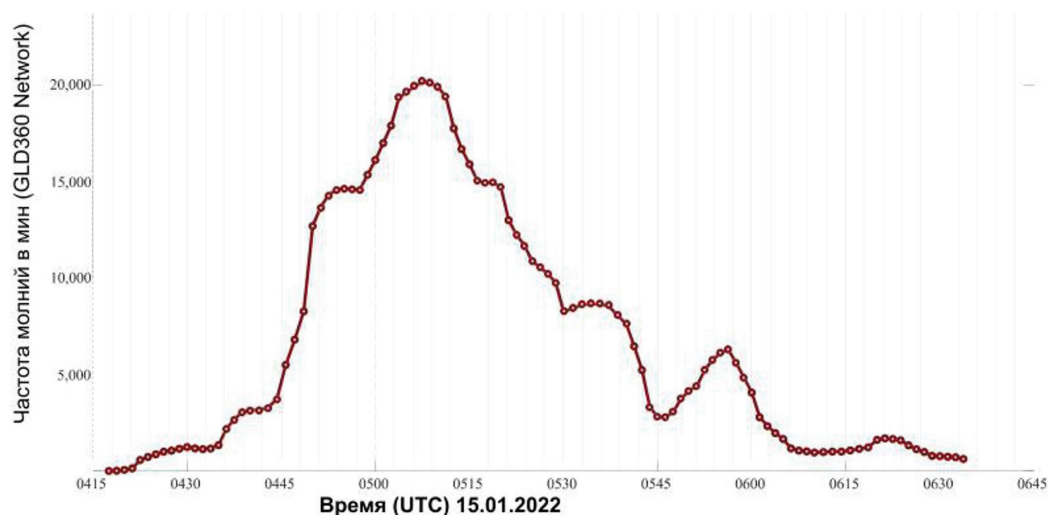


Рис. 2. Частота молниевых разрядов (число вспышек в минуту) в эруптивном облаке ХТХ 15 января 2022 г. (рисунок адаптирован из [Yuen et al., 2022])

Точный механизм взрывного извержения ХТХ остается неизвестным, и картина извержения осложняется тем, что вулкан является подводным. По оценке Геологической службы США (USGS) извержение соответствует землетрясению $M5.8$, начавшемуся в 04:14:45 UT (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/pt22015050/executive>). [Poli, Shapiro, 2022] на основе анализа длиннопериодных поверхностных волн, зарегистрированных сейсмическими станциями, рассчитали время начала извержения – 04:16:00.07 UT.

По зарегистрированной величине ПЭС по данным, полученным от приёмников Глобальной

навигационной системы GNSS (ГНСС), можно оценить энергию вулканического взрыва [Astafyeva et al., 2022; Dautermann et al., 2009]. Heki [Heki, 2006] предложил эмпирический метод, основанный на анализе амплитуд ионосферных возмущений, вызванных вулканическим извержением (*co-volcanic ionospheric disturbances – CVIDs*), по отношению к фоновому ПЭС и сравнении отклика ПЭС на взрывы с известной энергией. В [Calais et al., 1998] в качестве референтного события используется взрыв в шахте Вайоминг мощностью 1.5 килотонны в тротиловом (ТНТ) эквиваленте, который вызвал возмущение ПЭС с максимальной амплитудой 0.03 TECU на фоне абсолютного ПЭС, равного 10.6 TECU (Total Electron Content Unit, единица измерения ПЭС, равная 10^{16} электрон/м²).

В случае ХТХ на северо-западе и северо-востоке от вулкана обнаружены *CVIDs* с одинаковыми амплитудами 5–8 TECU при значении фонового ПЭС 18–23 TECU. На основе этих данных в [Astafyeva et al., 2022] оценена мощность взрыва ХТХ в $\sim 9\text{--}37$ мегатонн в тротиловом эквиваленте, или от $\sim 3.7 \times 10^{16}$ до 1.5×10^{17} Дж. Это значение примерно соответствует уровню взрыва вулкана Кракатау в 1883 г., для которого акустическая энергия оценивалась в 8.6×10^{16} Дж.

[Адушкин и др., 2022], из анализа возмущений атмосферного давления, амплитуды микробарических вариаций, времени их прихода и преимущественной частоты ~ 0.0007 Гц, используя методику [Adushkin et al., 2019], оценивают энергию источника при ХТХ в ~ 1018 Дж, что в пересчете на взрывной источник соответствует ~ 200 Мт ТНТ.

Климатические изменения

15 января 2022 г. извержение ХТХ привело к выбросу SO_2 и воды в среднюю стратосферу. Хотя инжекция SO_2 была незначительной для извержения такого масштаба, ХТХ направило в стратосферу Земли около 146 тг водяного пара, что составляет 10% воды, присутствующей в этом слое атмосферы [Millan et al., 2022].

Оксид серы быстро преобразуется в сульфатные аэрозоли. Аномалии аэрозолей и водяного пара сохранялись в Южном полушарии весь 2022 год. Водяной пар приводит к росту нисходящего потока ИК излучения, а аэрозоли уменьшают прямое солнечное воздействие. При этом уменьшение прямого солнечного потока больше, чем увеличение ИК потока и суммарное солнечное воздействие оказывается отрицательным.

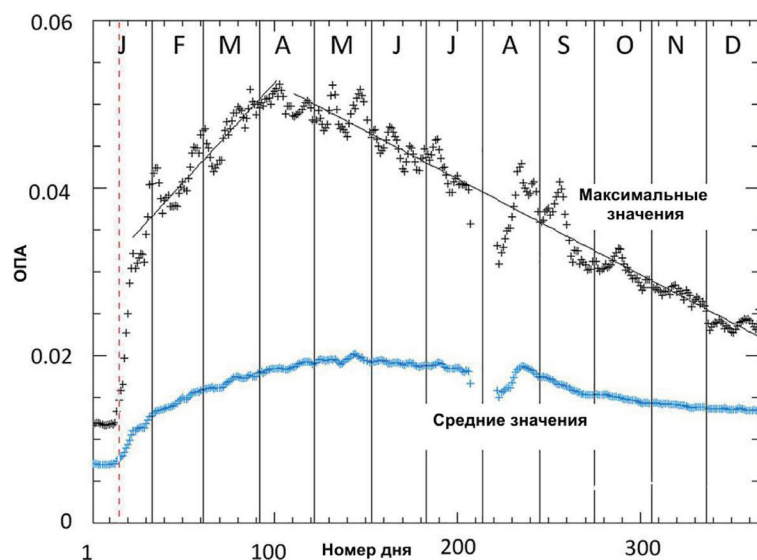


Рис. 3. Зависимость измеренной оптической плотности аэрозоля от номера дня после извержения Тонги в 2022 году. Черные крестики — максимальные значения ОПА, синие — средние значения за день наблюдений (рисунок адаптирован из [Schoeberl et al, 2023])

[Fujiwara et al., 2020] оценили снижение температуры поверхности тропосферы, вызванное извержением вулкана *Pinatubo* в июне 1991 г. [Schoeberl et al., 2023], и масштабируя их результаты на параметры плюма ХТХ, оценили вероятное изменение средней температуры поверхности Южного полушария в 2022 году в 0.037°C .

Для оценки ослабления солнечной радиации аэрозолем применяется такой параметр, как аэрозольная оптическая толщина (ОПА), которая является интегралом по высоте коэффициента аэрозольного ослабления излучения. Лимбовый сенсор (*LP – Limb Profiler*) инструментального комплекса по измерению озона (*OMPS – Ozone Mapping Profile Suite*), установленный на спутнике NOAA NPP/Suomi, обнаружил избыток аэрозоля в средней стратосфере на высоте 2545 км между 50° и 70° с. ш. [Schoeberl et al., 2023]. На рис. 3 показаны вариации ОПА по данным *OMPS-LP* в течение 2022 года. Можно видеть быстрое увеличение максимального значения ОПА после извержения, за которым следует постепенное его уменьшение до середины апреля.

По данным исследователей, после извержения вулкана Тонга в январе 2022 года резко возросла также концентрация углекислого газа CO_2 вблизи вулкана до 414 частей на миллион (ppm), что примерно соответствует годовому выбросу CO_2 на Земле.

Анализируя данные наблюдений за вариациями давления, электрического поля и концентрации микрочастиц в атмосфере, выполненных в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН (55.71°N; 37.57°E), [Рыбнов и др., 2023] показали, что прохождения АГВ 15 и 16 января сопровождались синхронными возмущениями как напряженности электрического поля, так и концентрации микрочастиц.

Инфразвук, сейсмика, гидрогеологический отклик

Извержение ХТХ 15 января 2022 г. вызвало самые сильные инфразвуковые сигналы, наблюдавшиеся в мире за последние 30 лет. [Yuen et al., 2022] использовали данные записей 117 инфразвуковых и 584 барометрических каналов IRIS DMC за период с 13 по 20 января 2022 года. На рис. 4 приводятся данные по изменению амплитуды пикового давления волны Лэмба в зависимости от расстояния и экстраполяция данных на другие расстояния в предположении цилиндрических и сферических волновых фронтов.

Рис. 4. Данные измерений амплитуды пикового давления волны Лэмба в зависимости от расстояния (показаны синими точками). Пунктирная черная линия – экстраполяция в предположении цилиндрических волновых фронтов, сплошная черная – расчет для сферической волны (адаптировано из [Yuen et al., 2022])

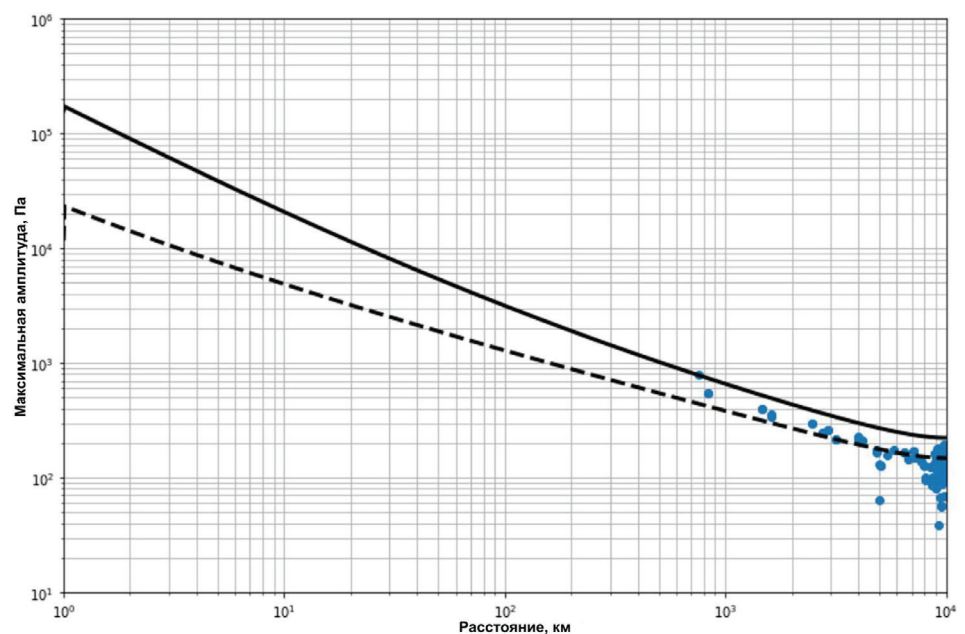


Рис. 5 демонстрирует записи отдельных барограмм и сейсмограмм по данным инфразвуковых и барометрических каналов IRIS [Yuen et al., 2022]. На барограммах в диапазоне частот от 10^{-4} до 10^{-1} Гц видны инфразвуковые волны, распространяющиеся вокруг земного шара со скоростью ~ 314 м/с, идентифицируемые как волна Лэмба [Bretherton, 1969]. Пурпурной линией выделены поверхностные сейсмические волны со скоростью 3.9 км/с и волны, индуцированные инфразвуковыми возмущениями, распространяющимися со скоростью ~ 300 м/с. На основе данных о телесейсмических волнах, [Poli, Shapiro, 2022] оценили для ХТХ величину $VEI = 6$.

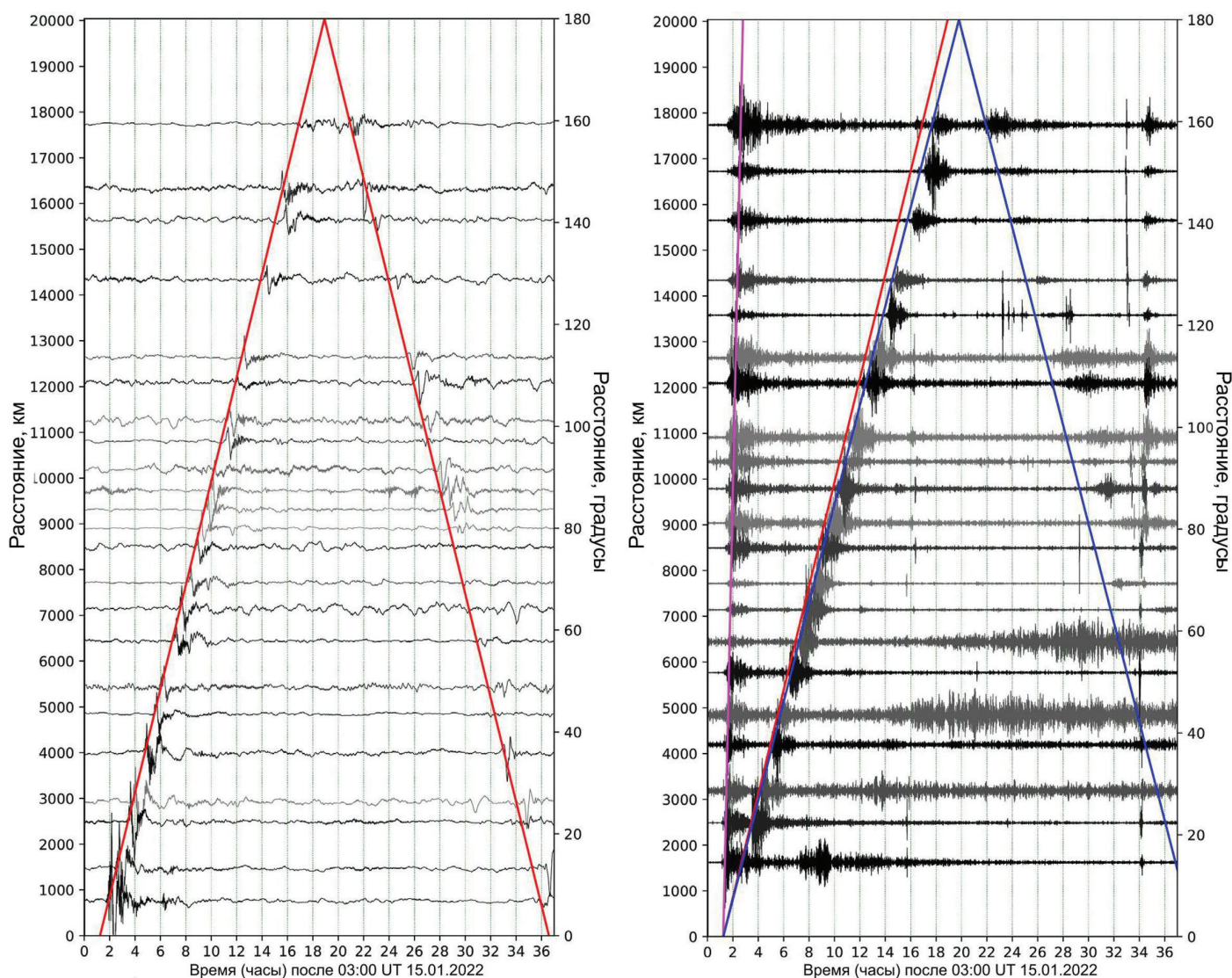


Рис. 5. Записи отдельных барограмм в диапазоне частот 10^{-4} до 10^{-1} Гц (левая панель) и сейсмограмм (правая панель). Красная линия – результат расчета скорости инфразвуковых волн, распространяющихся вокруг земного шара со скоростью ~ 314 м/с. Пурпурной линией выделены поверхностные сейсмические волны, распространяющиеся со скоростью 3.9 км/с. Синие линии – сейсмические возмущения, связанные с распространением инфразвуковых волн со скоростью ~ 300 м/с (рисунок адаптирован из [Yuen et al., 2022])

Регистрация вариаций атмосферного давления и амплитуды гидрогеологических откликов верхнего слабо-напорного и нижнего напорного водоносных горизонтов и их сопоставление с регистрацией сейсмических сигналов, вызванных ХТХ, велась геофизической обсерваторией «Михнево» (МІК) Института динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН [Горбунова и др., 2022] с использованием уникальной научной установки «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево»» (УНУ) [Кочарян и др., 2022].

Обсерватория МІК (54.96°N , 37.76°E) расположена в 80 км на юге от Москвы вне зоны активного техногенного воздействия. Геологическое строение территории (место расположения УНУ) характеризуется выраженной тектонической двухярусностью. Нижний структурный этаж – кристаллический фундамент на глубине 1.3 км представлен породами архея и нижнего протерозоя. Верхний структурный этаж выполнен осадочными отложениями верхнепротерозойской, палеозойской и кайнозойской групп. Верхняя зона активного водообмена мощностью 200–250 м состоит из серии разновозрастных водоносных горизонтов и комплексов, разделенных водоупорами.

Для характеристики барометрического отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления используется величина барометрической эффективности, которая определяется как отношение амплитуды отклика уровня к вертикальной барометрической нагрузке. По данным регистрации возмущений атмосферы, вызванных ХТХ, выделены 4 интервала продолжительностью 4 часа $R1-R4$, которые соответствуют прохождению двух атмосферных волн по малой дуге (прямые волны) и большой дуге (обратные волны) (рис. 6). Выполненные измерения позволили зафиксировать вариации уровней подземных вод при проходе волн Лэмба. Реакция водонасыщенного коллектора на прохождение сейсмических волн от извержения не отмечена. Волновые формы откликов разновозрастных водоносных горизонтов находятся в противофазе вариациям атмосферного давления и различаются по интенсивности.

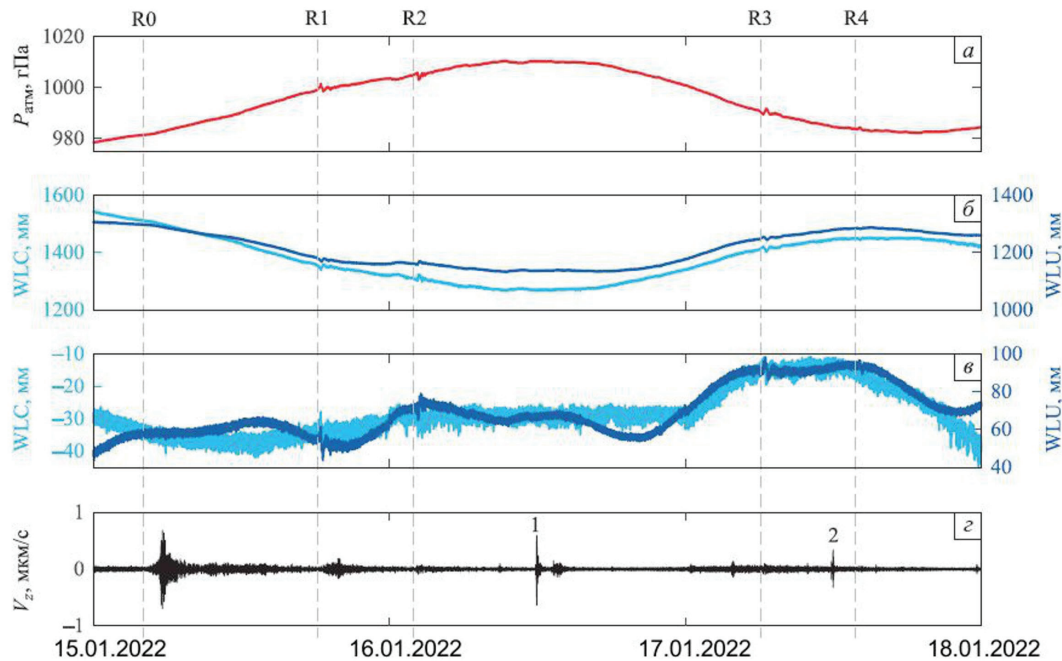


Рис. 6. Вариации атмосферного давления (а), исходных (б) и отфильтрованных от влияния атмосферного давления (в) уровней напорного (WLC) и слабонапорного (WLU) водоносных горизонтов, скорости смещения грунта по вертикальной компоненте (V_z) по данным станции «Обнинск», отфильтрованные в диапазоне 0.001–0.05 Гц (г). Вертикальными пунктирными линиями отмечены атмосферные фронты ($R0$ и $R1-R4$), цифрами 1 и 2 (г) отмечены моменты землетрясений 16.01.2022 г. с $M = 5.4$ в Эгейском море и 17.01.2022 г. с $M = 5.3$ в Северо-Западном Афганистане (рисунок адаптирован из [Горбунова и др., 2022])

Ионосферные эффекты

Наблюдавшиеся при извержении Тонги эффекты были известны и ранее. [Aoyama et al., 2016] описывают общую картину геофизических возмущений, наблюдавшуюся во время извержения вулкана Кальбуко в Чили в 2015 г.: атмосферные возмущения вызвали гравитационные волны, включая волны акустической моды, распространяющиеся в том числе в верхнюю ионосферу; нейтральный ветер, сопровождаемый волнами, привел в движение динамо-электрический ток в слое E ионосферы; расходящиеся динамо токи привели к возникновению продольных токов (ПТ).

Во время ХТХ атмосферные возмущения трижды обошли земной шар, возвращаясь к Тонге каждые 1.5 суток. Ионосферные реакции характеризовались мгновенным сверхзвуковым (~ 1 км/с) импульсом роста плотности плазмы и развитием ударных волн со значительными амплитудами ПЭС (до 3 TECU) и горизонтальными скоростями 600–700 м/с на расстоянии до 5000 км, включая Новую Зеландию на юге и Гавайи на востоке. В последующем наблюдались устойчивые (продолжительностью ~ 8 ч) медленно распространяющиеся перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) с периодами 10–30 мин, наиболее значимые в ближнем поле (≤ 5000 км).

Известно, что при извержениях и взрывах вулканов генерируются акустические и гравитационные волны, которые достигают ионосферы и вызывают ионосферные возмущения. Они часто представляют собой квазипериодические вариации ионосферной электронной плотности или ПЭС с периодами 12–30 мин. Кажущаяся скорость распространения может изменяться от 550 до 1100 м/с, что соответствует внутренним гравитационным, акустическим и ударно-акустическим волнам. Волны цунами, вызванные извержением, были медленнее, чем основная составляющая ионосферных волн, поэтому маловероятно, что они ответственны за глобальное распространение ПИВ [Terry, 2022].

Акустические волны большой амплитуды, генерируемые всеми перечисленными источниками, вызывают значительные возмущения и в верхней ионосфере, в том числе на высотах, где акустические волны полностью рассеиваются (> 700 км). Эти возмущения распространяются в виде ионных звуковых волн [Huba et al., 2000] и проявляются в F-области и выше, как возмущения плотности, температуры и скорости плазмы.

Основным источником данных о возмущениях верхней ионосферы являются измерения ПЭС с использованием приемников ГНСС. Пространственное распределение ионосферных возмущений рассчитывается по положению подионосферных точек, которые представляют собой проекции точек пересечения радиолучом спутник-приемник слоя ионосферы на высоте 300–320 км. [Astafyeva et al., 2022] использовали данные 15 станций ГНСС в диапазоне расстояний до 2000 км от вулкана. Ими выделены по крайней мере пять крупных взрывов во время извержения (рис. 7) в интервале времени ~ 4.45 – 5.6 UT. Предполагается, что эти пики представляют собой отдельные взрывы. Акустическая или ударно-акустическая природа наблюдаемых пиков может быть подтверждена по формам волн N-типа и их кажущихся скоростей. Аналогичный сложный отклик ПЭС наблюдался при крупнейших землетрясениях M9, например, в Тохоку-Оки (2011 г.) и на Суматре (2004 г.).

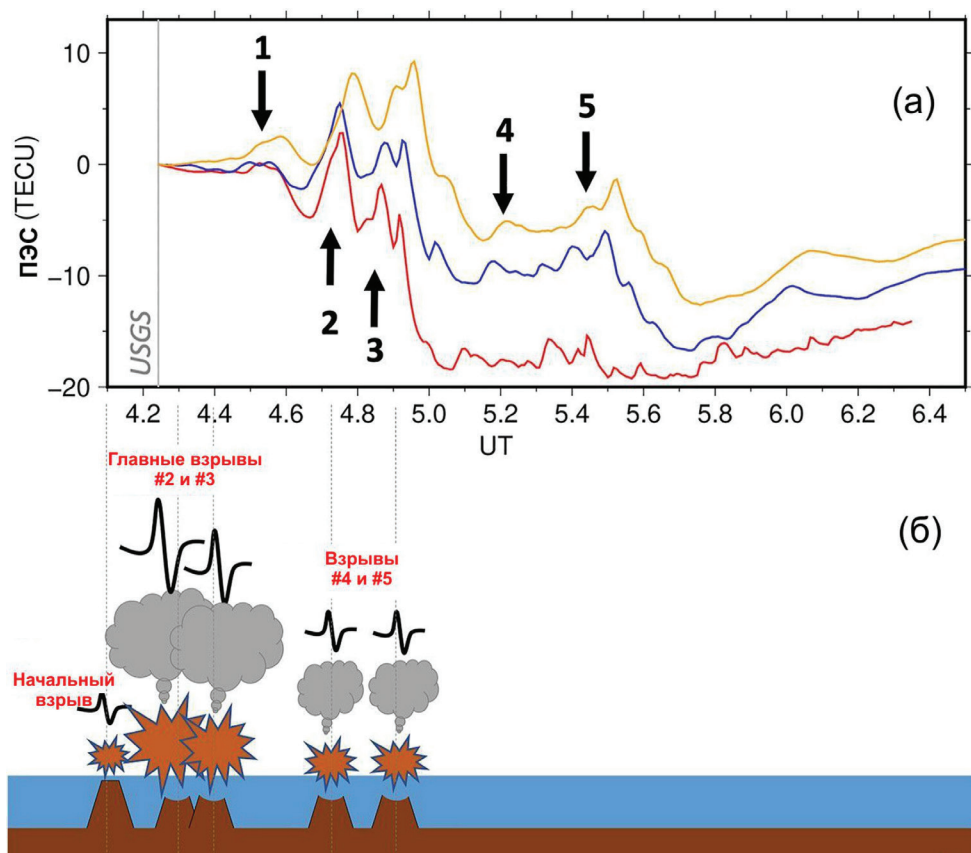


Рис. 7. Возмущения в ионосфере, соответствующие пяти взрывам 15 января 2022 г. (а). Серая вертикальная линия – время начала взрыва по данным USGS; (б) – предполагаемый сценарий и временная шкала взрывов вулкана ХТХ 15.01.2022 г. (адаптировано из [Astafyeva et al., 2022])

Сценарий множественных взрывов согласуется с выводами [Wright et al., 2022], сделанными на основе анализа данных измерений приземного давления на станции в Тонга, расположенной в 64 км от вулкана. Первый пик отмечен в 04:26 UT и еще четыре события в 04:36 UT, 05:10 UT, 05:51 UT и 08:46 UT.

Амплитуда отклика ПЭС на извержение достигла 5–8 TECU. Учитывая, что абсолютный фоновый вертикальный ПЭС вокруг вулкана в начале извержения изменяется от 18 до 23 TECU, можно сделать вывод, что вклад вулканических взрывов в фоновый ПЭС составил 21–44%. Это беспрецедентное значение по сравнению с данными предыдущих исследований, которые показали ~8% для извержений с индексом $VEI = 2$ и 15–18% для извержений с $VEI = 4$ [Astafyeva et al., 2022].

Начиная с ~4.7 UT, наблюдается значительное уменьшение ПЭС [Astafyeva et al., 2022]. Подобное ионосферное истощение ПЭС («дыра») наблюдалось во время землетрясения Тохоку-Оки и ряда других сильных землетрясений [Astafyeva et al., 2013]. Для землетрясения Тохоку-Оки (2011 г.) истощение длилось 30–50 мин и ПЭС уменьшился на 5–6 TECU по отношению к уровню до землетрясения. Зафиксированное при ХТХ понижение амплитуды от 13 до 18 TECU длительностью 1.5–2 ч является беспрецедентным как по величине, так и по продолжительности.

Возмущения нижней ионосферы и глобальные электромагнитные эффекты

Прямые измерения вариаций состояния нижней ионосферы представляют собой сложную научно-техническую задачу. В то же время существуют методы исследования пространственно-временных изменений в D- и E-областях ионосферы путем регистрации и анализа сопровождающих ионосферные возмущения вариаций геомагнитного поля. Известно, что распространение сильных атмосферных возмущений может вызывать волновые вариации плотности и проводимости ионосферы и, как следствие, изменение ионосферных токов (динамо токов) и соответствующих им изменений величины и направления геомагнитного поля на поверхности Земли [Azeem et al., 2017; Themens et al., 2022].

Если волновые процессы в атмосфере и ионосфере имеют глобальный характер, вызванные ими геомагнитные вариации подобны хорошо известному эффекту Кроше, сопровождающему солнечные вспышки [Curto, 2020]. Использование трехкомпонентных магнитометров позволяет восстановить величину и поляризацию геомагнитных возмущений на освещенной стороне планеты. Подобный эффект наблюдался и при распространении акустических возмущений, зарегистрированных при извержении ХТХ.

В [Gavrilov et al., 2022] для анализа геомагнитных возмущений, вызванных ХТХ, использовались данные сети Intermagnet [<https://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php>] и геофизической обсерватории МИК, где ведется непрерывная регистрация вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот от 0 Гц до 60 МГц, вариаций приземного электрического поля, параметров КНЧ/ОНЧ радиоизлучения от молниевых разрядов и сигналов СДВ радиостанций [Ryakhovskii et al., 2021]. Совместный анализ данных по вариациям разнообразных физических полей в одной точке позволяет исследовать параметры распространения и механизмы взаимосвязи геофизических возмущений в различных оболочках Земли [Gavrilov et al., 2022; Shinbori et al., 2022; Verzog et al., 2022].

На рис. 8 показано положение станций Intermagnet, данные которых использованы в [Gavrilov et al., 2022], и обсерватории МИК. Примеры записи трех компонент магнитного поля для двух станций Charters Towers (CTA) и Sable Island (SBL), находящихся на расстояниях 3984 и 13585 км от вулкана, представлены на рис. 9. Можно видеть, что в зависимости от азимута станции на вулкан и расстояния до него, сигналы для разных компонент магнитного поля сильно различаются, что затрудняет их совместный анализ. В то же время, в вариациях полного вектора магнитного поля B_F обнаруживается характерный сигнал в виде отрицательной бухты, который может быть использован для оценки времени появления и скорости распространения возмущений в ионосфере. На рис. 10 показана эта ситуация для четырех станций Intermagnet EYR, ASP, DIT и BOX, расположенных на расстояниях 2780, 5210, 9068 и 15040 км от вулкана.

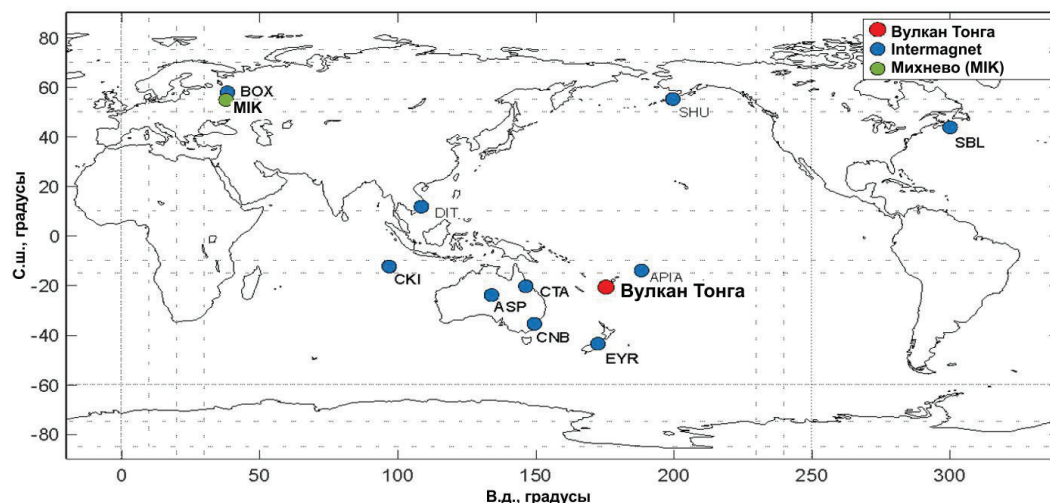


Рис. 8. Вулкан Тонга, положение станций Intermagnet, данные которых использованы в [Gavrilov et al., 2022], и обсерватории МИК

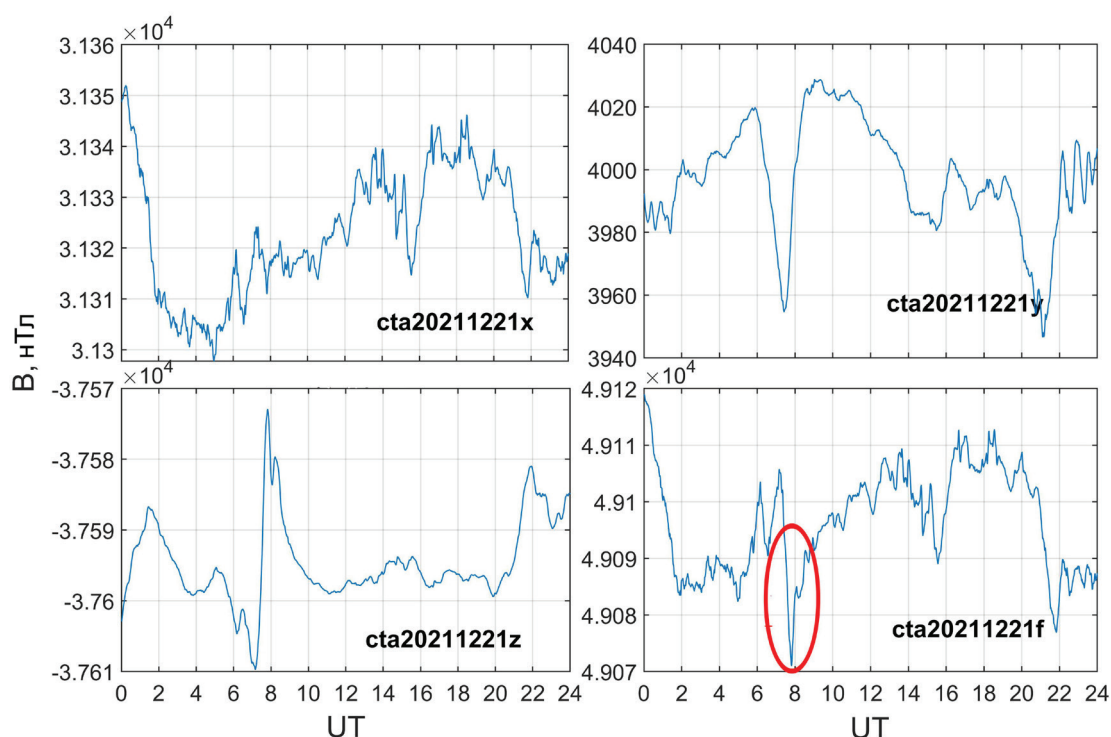


Рис. 9. Вариации трех компонент магнитного поля для станций Charters Towers (STA) (верхняя панель) и Sable Island (SBL) (нижняя панель), находящихся на расстояниях 3984 и 13585 км от вулкана. Красным овалом выделена отрицательная бухта в сигнале вектора полного поля B_F (адаптировано из [Gavrilov et al., 2022])

Измерения, выполненные на 10 измерительных пунктах Intermagnet, отмеченных на карте (рис. 8), показали, что наблюдается линейная зависимость времени регистрации отрицательной бухты сигнала от расстояния до источника (рис. 11). Это позволило определить время генерации атмосферных волн, вызвавших ионосферные возмущения – 4 ч 18' UT, то есть примерно через 3 минуты после наиболее сильного выброса по данным USGS. Скорость распространения волны оказалась равной ~ 270 м/с, что соответствует характерной скорости акустико-гравитационных волн.

В работе [Themens et al., 2022] анализируются данные измерений, проведенных с использованием более чем 4735 глобально распределенных приемников ГНСС. В пределах 3000 км от эпицентра наблюдались крупномасштабные ПИВ с длиной волны > 1600 и ~ 1350 км, распространявшиеся

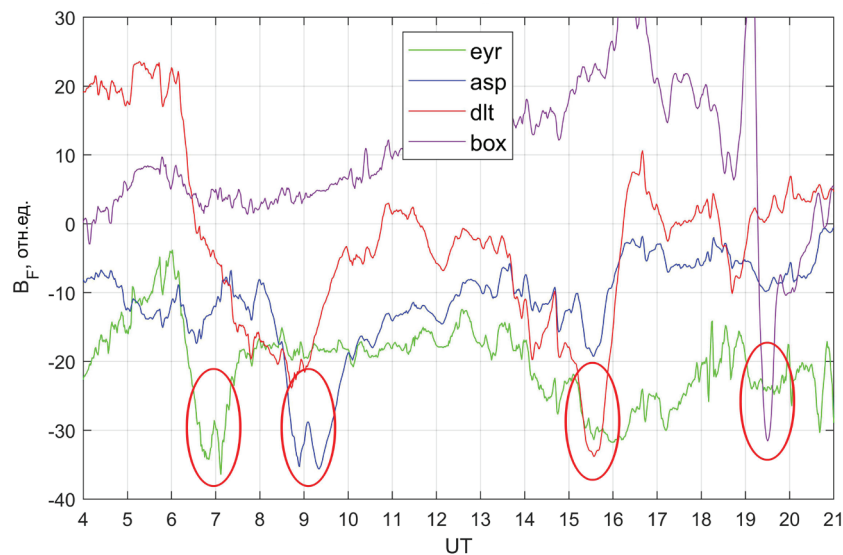


Рис. 10. Относительное изменение величины полного поля B_F для станций EYR, ASP, DIT и BOX, расположенных на расстояниях 2780, 5210, 9068 и 15040 км от вулкана (адаптировано из [Gavrilov et al., 2022])

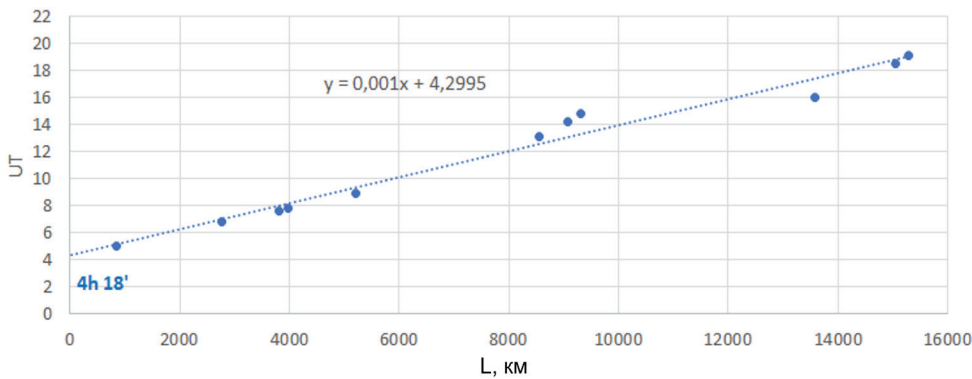


Рис. 11. Зависимость времени регистрации отрицательной бухты возмущения магнитного поля от расстояния до вулкана для обсерваторий, показанных на рис. 8 (адаптировано из [Gavrilov et al., 2022])

со скоростями ~ 950 и ~ 555 м/с, а затем замедляющиеся до ~ 600 и ~ 390 м/с соответственно. В течение шести часов после извержения наблюдались среднемасштабные ПИВ со скоростями 200–400 м/с. Генерацию начальных крупномасштабных ПИВ, распространяющихся с фазовой скоростью > 900 м/с, авторы считают наиболее впечатляющим проявлением ХТХ в атмосфере. Эта волна генерируется практически сразу после события со скоростью, почти втрое превышающей поверхностную акустическую скорость и близкой к акустической скорости в пике F-области. Волна является доминирующей структурой в окрестности места извержения, но быстро рассеивается, причем по-разному, в зависимости от направления движения. После распространения на расстояние ~ 2300 км эта волна быстро замедляется до 700 м/с в направлении Новой Зеландии, но не демонстрирует такого снижения скорости на Гавайских островах. В Австралии, в 4000–6000 км к западу от места извержения, она едва различима, но формирует доминирующий волновой отклик на Гавайях на аналогичных расстояниях к северо-востоку. Первоначальные крупномасштабные ПИВ являются, вероятно, акустическими волнами, порожденными начальной эруптивной ударной волной, а следующие за ними среднемасштабные ПИВ, распространяющиеся примерно со скоростью АГВ, генерируются последующими атмосферными возмущениями.

Шумановский резонанс

Еще одним каналом получения информации о возмущениях нижней ионосферы является реакция на них глобального Шумановского резонанса (ШР), возникающего в объемном сферическом резонаторе,

ограниченном земной поверхностью и нижней ионосферой, запитываемым глобальной грозовой активностью по всей планете [Kozakova et al., 2022; Poklad et al., 2022; Price, 2016]. Во время извержения ХТХ отмечена гигантская грозовая активность, которая не могла не отразиться на параметрах электромагнитных сигналов на частоте ШР. С 4:15 UT 15 января за шесть часов было зафиксировано почти 400000 молниевых разрядов [Yuen et al., 2022]. Появление локального источника огромного числа молниевых разрядов во время извержения привело к генерации мощного электромагнитного излучения в широком диапазоне частот и возбуждению основных гармоник ШР, зарегистрированных в десятках обсерваторий [Мартинес-Беденко и др., 2023; Gavrilov et al., 2022; Nickolaenko et al., 2022].

Исследования возмущений ШР, вызванных извержением ХТХ, были проведены в обсерватории МИК с использованием индукционных магнитометров MFS-06, антенны которых были ориентированы в направлениях Север-Юг (компонента H_x) и Запад-Восток (компонента H_y) в диапазоне частот от 5 до 25 Гц [Gavrilov et al., 2022]. Наибольшие амплитуды возмущений наблюдались на частотах первых гармоник ШР $SR1$ (7.5 Гц), $SR2$ (15 Гц) и $SR3$ (22.5 Гц).

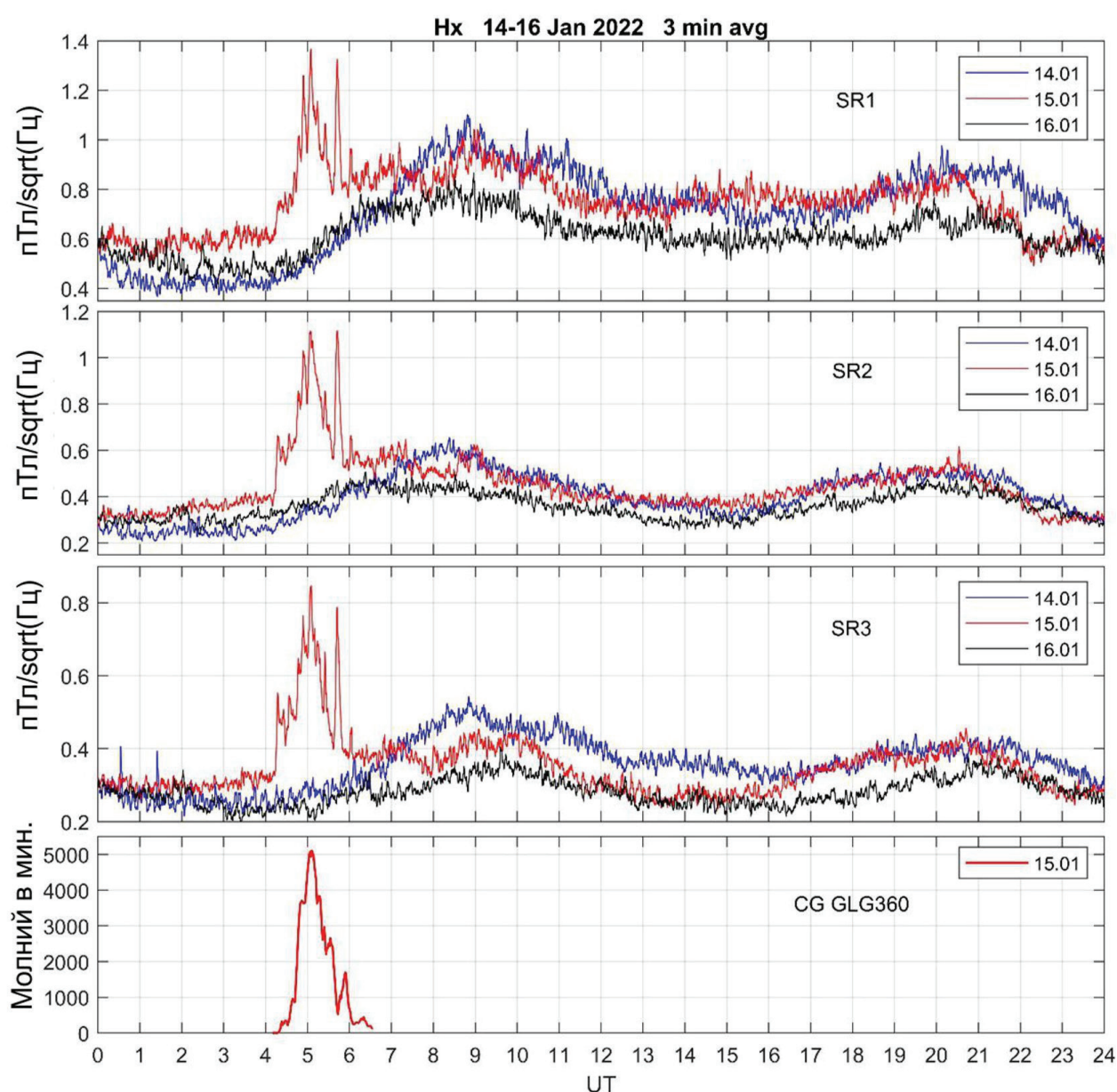


Рис. 12. Суточный ход изменения амплитуды сигналов для $SR1$, $SR2$ и $SR3$ гармоник ШР 14, 15 и 16 января и грозовая активность 15.01.2022 г. (адаптировано из [Gavrilov et al., 2022])

На рис. 12 показаны вариации амплитуды сигналов ШР во время извержения и грозовая активность в очаге по данным GLD360 [https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134] с 4:00 до 6:30 UT 15 января в сравнении со слабо возмущенными днями 14 и 16 января 2000 г. Очевидно, что значительное возбуждение ШР произошло именно во время максимума молниевой активности. Отметим, что извержение, практически, не повлияло на частотные характеристики ШР.

Рис. 13. Суточные вариации амплитуды SR (а) и геомагнитного поля в МІК (б) 15.01.2022 г. (адаптировано из [Gavrilov et al., 2022])

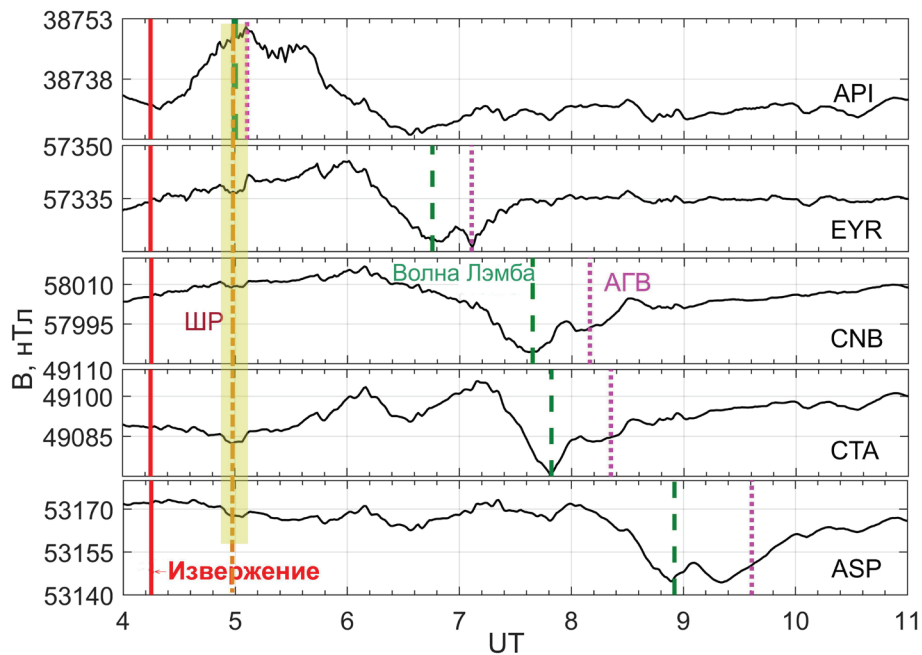
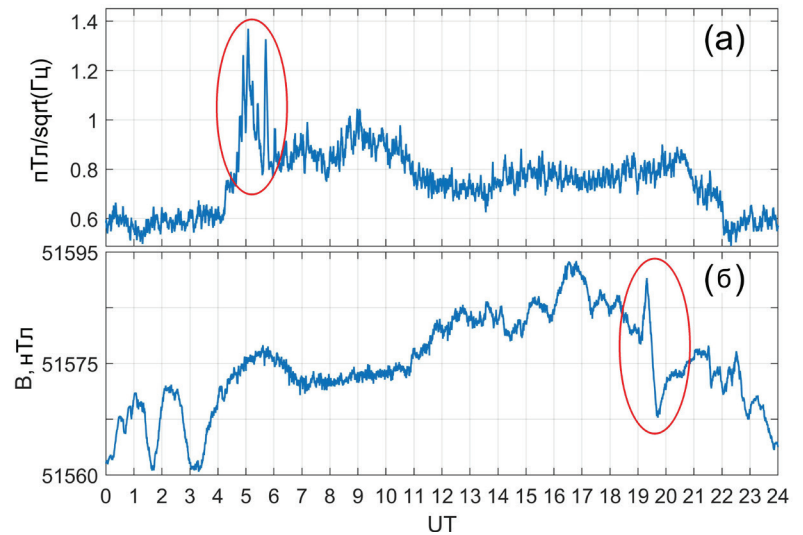


Рис. 14. Вариации вектора полного поля в обсерваториях API, EYR, CNB, CTA и ASP. Вертикальными линиями отмечены моменты извержения, возмущения ШР, время прихода волны Лэмба и АГВ (адаптировано из [Гаврилов и др., 2023])

Проведение в МІК синхронных измерений низкочастотных вариаций геомагнитного поля и возмущений амплитуды сигналов ШР позволило определить временную задержку времени прихода акустико-гравитационной волны, вызвавшей изменение величины магнитного поля на поверхности Земли на расстоянии 15300 км от вулкана, по отношению к сигналу, связанному с реакцией ШР на молниевую активность (рис. 13) [Gavrilov et al., 2022]. За время реакции ШР был принят момент максимальной амплитуды сигнала на частоте $SR1$, а время появления АГВ и соответствующего

геомагнитного возмущения определялось в момент регистрации отрицательной бухты полного вектора геомагнитного поля. Полученное значение скорости составило 293 м/с (рис. 10).

С учетом показанных выше результатов в [Гаврилов и др., 2023] была сделана попытка обнаружить в регистрограммах вариаций геомагнитного поля воздействие различных агентов возмущения ионосферы, связанных с извержением ХТХ. В работе [Wright et al., 2022] приводятся данные о скорости распространения волн Лэмба (308 ± 5 до 319 ± 4 м/с) и АГВ (238 ± 3 до 269 ± 3 м/с) в стратосфере. На рис. 14 показаны вариации вектора полного поля в обсерваториях API, EYR, CNB, СТА и ASP. Для анализа связи вариаций геомагнитного поля с приходом в точку измерения различного вида атмосферных и ионосферных возмущений были приняты наиболее характерные скорости для волн Лэмба – 310 м/с и АГВ – 270 м/с. Вертикальными линиями отмечены моменты извержения и возмущения ШР, время прихода волн Лэмба и АГВ. Приведенные данные показывают, что вариации магнитного поля на поверхности Земли могут являться результатом воздействия различных агентов геофизических возмущений.

Продольные токи

В ряде работ [Iyemori et al., 2022; Shinbory et al., 2022] обращается внимание на регистрацию синхронных пульсаций геомагнитного поля и вариаций ПЭС, вызванных ХТХ, в магнитосопреженных точках Северного и Южного полушарий. В Апия и в Гонолулу они обнаружены около 04:21 UT, примерно через 7 мин после начала извержения (рис. 15). Сходная картина наблюдалась при измерении ПЭС ионосферы на Гавайях и в Самоа (рис. 16). Естественным объяснением этого явления является передача энергии вдоль магнитных силовых линий в виде продольных токов. [Shinbory et al., 2022] приводит эквивалентную электрическую схему магнитосферно-ионосферной токовой системы, соединяющей освещенное Солнцем Южное полушарие с закатным Северным полушарием (рис. 17). Передача электрического поля вдоль силовых линий геомагнитного поля происходит с Альфвеновской

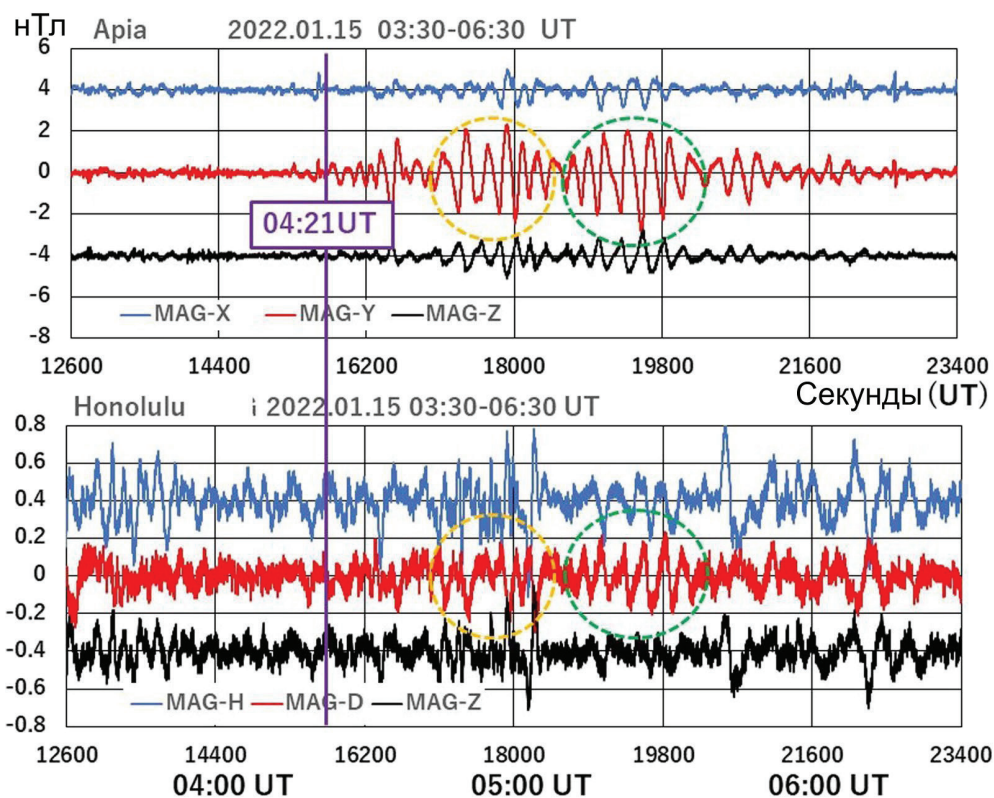


Рис. 15. Синхронные геомагнитные пульсации в Апия и Гонолулу около 04:21 UT, примерно через 7 мин после начала извержения (адаптировано из [Iyemori et al., 2022])

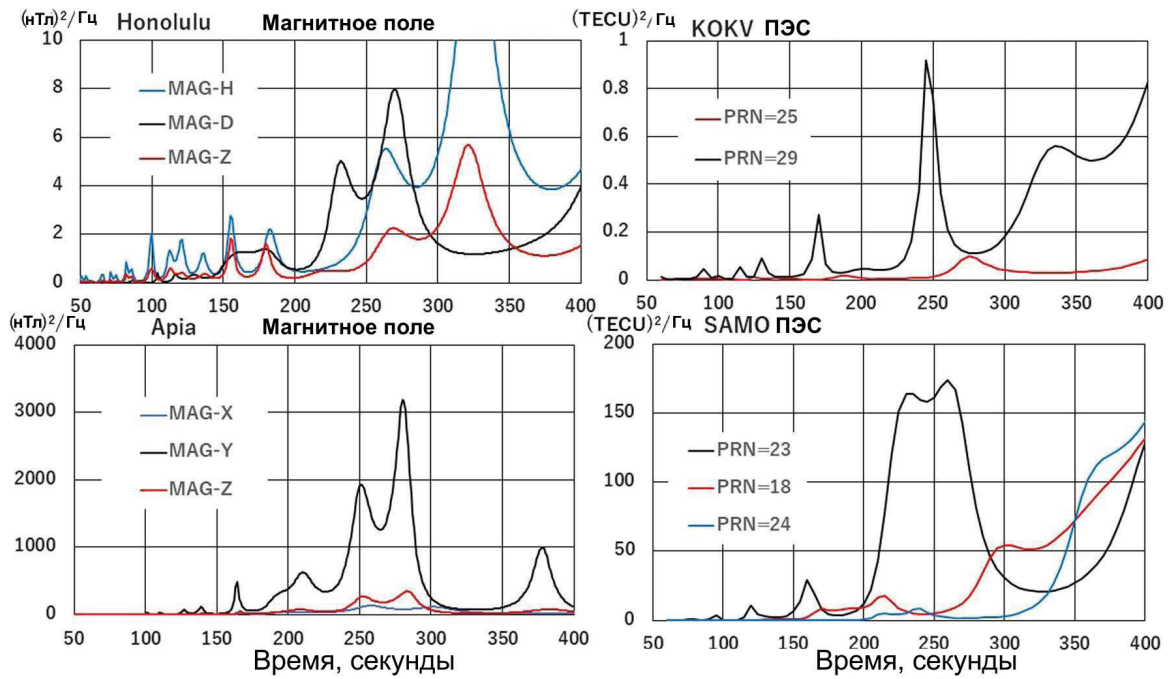


Рис. 16. Спектральная плотность мощности трёхкомпонентных геомагнитных вариаций и вариаций ПЭС, наблюдавшихся на Гавайях (верхние панели) и на Самоа (нижние панели) с 4:30 до 05:30 UT 15.01.2022 г. PRN – номера спутников ГНСС (адаптировано из [Yumori et al., 2022])

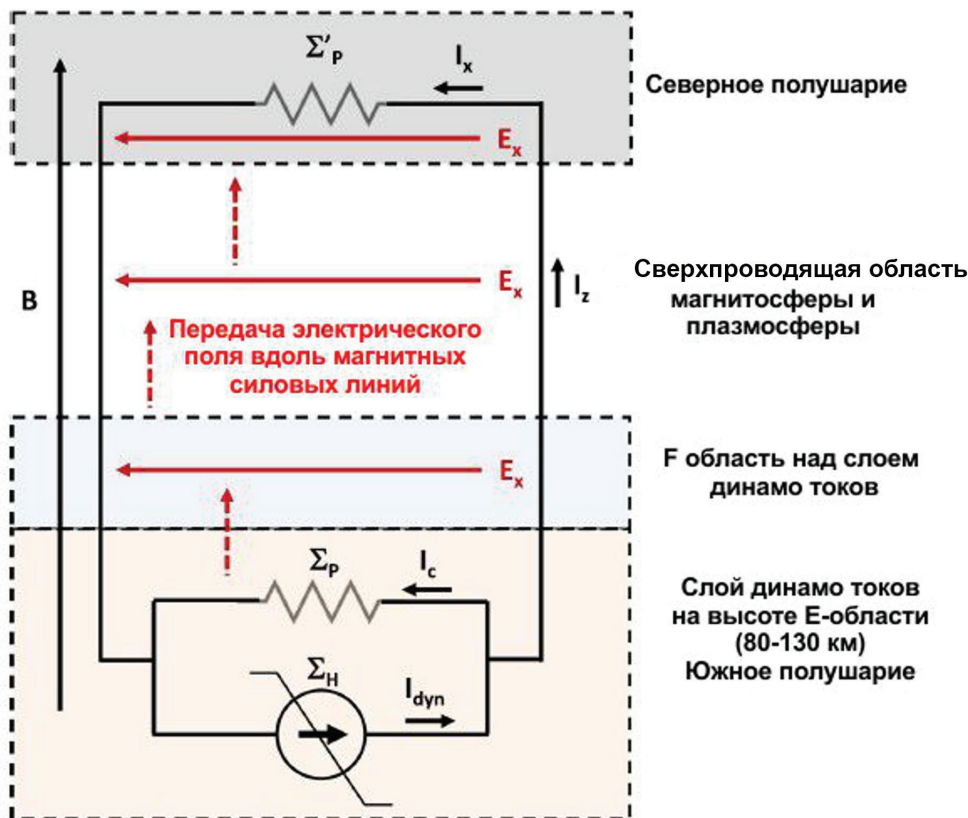


Рис. 17. Эквивалентная электрическая схема магнитосферно-ионосферной токовой системы, соединяющей южное и северное полушария. Красными стрелками показано динамо-электрическое поле в магнитосопреженных областях F-области ионосферы (адаптировано из [Shinbory et al., 2022])

скоростью (~ 1000 км/с), что и объясняет практическую синхронность зарегистрированных ионосферных возмущений. [Liu et al., 2023] отмечает, что сопряженность вариаций ПЭС отчетливо проявляется в первые 2 ч после извержения, когда дрейфовые возмущения ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) плазмы были наиболее значительными.

Акустический резонанс

Еще один существенный с точки зрения механизмов воздействия на ионосферу эффект ХТХ показан в работах [Мартинес-Беденко и др., 2023; Iyemori et al., 2022]. Он связан с возникновением над вулканом акустического резонанса между земной поверхностью и ионосферой. Колебания атмосферного воздуха явились причиной возбуждения специфических электромагнитных колебаний. По результатам численного моделирования, проведенного [Shinagawa et al., 2007], область барометрических вариаций, связанных с акустическим резонансом, возникающим в результате резких вертикальных движений земной поверхности при землетрясениях, ограничивается областью над эпицентром, размер которой зависит от масштаба землетрясения. Однако магнитный эффект акустического резонанса может наблюдаться в более широкой области, поскольку горизонтальные ионосферные токи могут растекаться вдоль проводящего слоя ионосферы за пределы области резонанса.

[Мартинес-Беденко и др., 2023] проанализировали данные измерений в сети Intermagnet в Тихоокеанском регионе. На ближайшей к архипелагу Тонга магнитной станции API (~ 800 км от вулкана) через ~ 15 мин после извержения регистрировались квазимонохроматические колебания, в спектре которых обнаруживались гармоники с частотами 3.5 и 4.0 мГц. По всем морфологическим признакам эти *Pc5*-пульсации не являются обычными магнитосферными колебаниями, а обусловлены акустическим резонансом. В периоды наибольшей молниевой активности на сонограммах появляется также широкополосный всплеск излучения пульсаций вида *Pc1*. На рис. 18 показаны сонограммы *Pc1*-колебаний (0.1–4.0 Гц) по данным станций ZGN, MGD, PTK, MSR и кривая числа молниевых разрядов в минуту. Очевидно, что всплеск пульсаций связан с молниевой активностью, и их затухание наблюдается при ее снижении.

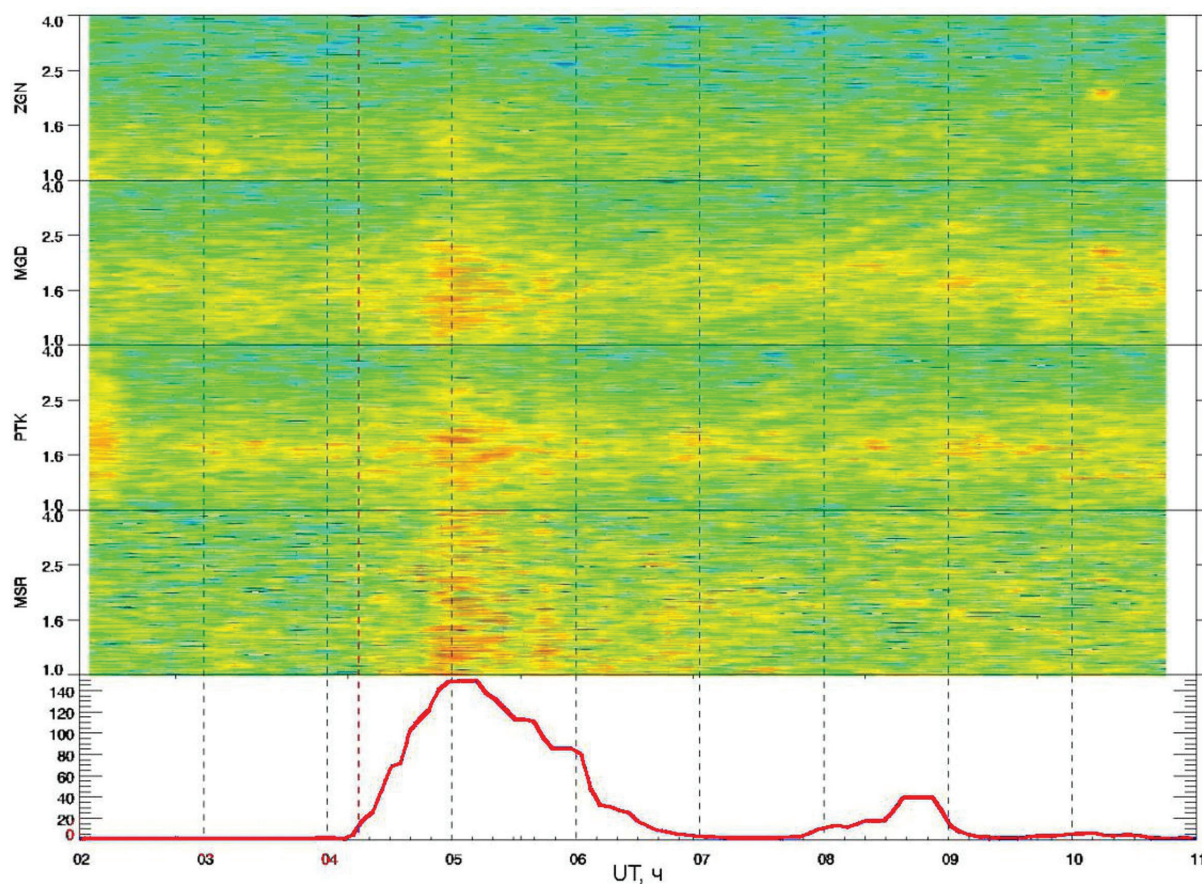


Рис. 18. Сонограммы *Pc1*-колебаний (0.1–4.0 Гц, *Y*-компонента) для временного интервала 02–11 UT 15.01.2022 г. на ст. ZGN, MGD, PTK, MSR. Нижняя панель – интенсивность вулканических молний (число разрядов в минуту) (адаптировано из [Мартинес-Беденко и др., 2023])

[Iyemori et al., 2022] также связывают возникновение геомагнитных пульсаций с вертикальным акустическим резонансом. На рис. 19 показана упрощенная ситуация, когда звуковые волны возбуждаются у земли и распространяются на высоту, где определенное время находятся в резонансе. На высоте около 40 и 120 км направление изменения фазы, обозначенное зелеными стрелками, попеременно изменяет знак в зависимости от числа гармоник. То есть, на этих высотах может быть сформирована пилообразная форма волны при соответствующей амплитудной комбинации гармоник.

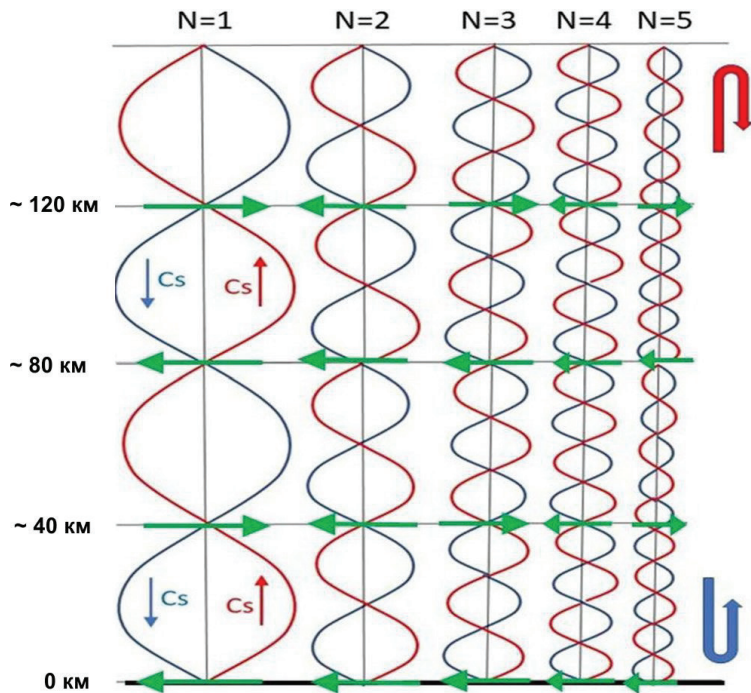


Рис. 19. Упрощенная модель вертикального акустического резонанса, предполагающая, что волны, распространяющиеся вверх или вниз, имеют одинаковую фазу у земли. Зеленые стрелки указывают изменение направления для каждой гармонической волны (адаптировано из [Iyemori et al., 2022])

Выводы

Экстраординарное извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и связанные с ним взрывные события вызвали значительные эффекты в ионосфере. Извержение предоставляет исключительную возможность для изучения редко фиксируемых физических явлений, включая глобальные и, вероятно, впервые наблюдаемые в таком количестве распределённых по планете наблюдательных пунктов, что обеспечило беспрецедентный объем измерительных данных. С другой стороны, это обстоятельство создает дополнительные трудности из-за неизбежного разброса данных, полученных с использованием самых разных методик и аппаратуры.

На основе данных о телесейсмических волнах сделана оценка [Poli, Shapiro, 2022] индекса вулканической активности для ХТХ $VEI = 6$, что ставит его в ряд крупнейших из когда-либо зарегистрированных вулканических извержений.

Суммируя приведенные в обзоре явления и последствия, вызванные извержением ХТХ, можно выделить ряд факторов, являющихся уникальными или чрезвычайно редко наблюдаемыми:

1. Инструментально подтверждён подъем вулканического облака до границ мезосферы на высоте около 60 км [Proud et al., 2022].
2. Зафиксирована рекордная грозовая активность. Основное извержение 15 января дало в общей сложности > 400000 вспышек [Yuen et al., 2022].
3. Гигантские атмосферные возмущения возбудили волны в стратосфере и ионосфере, наблюдаемые в обоих полушариях [Heki, 2022].
4. Извержение вызвало самые сильные инфразвуковые сигналы, наблюдавшиеся в мире за

последние 30 лет [Yuen et al., 2022]. Впервые обнаружены возмущения такого масштаба в верхней атмосфере и экваториальном электроджете [Harding et al., 2022].

5. При исследовании вариаций ПЭС ионосферы обнаружены возмущения с амплитудой 5–8 TECU при значении фонового ПЭС 18–23 TECU [Astafyeva et al., 2022], что является рекордом для естественных геофизических явлений.

6. Зарегистрированное после значительного роста амплитуды уменьшение ПЭС (ионосферное истощение) на величину до 18 TECU и длительностью 1.5–2 ч, является рекордным как по величине, так и по продолжительности [Astafyeva et al., 2022].

7. Генерацию начальных крупномасштабных ПИВ, распространяющихся с фазовой скоростью > 900 м/с [Themens et al., 2022], считают наиболее впечатляющим проявлением ХТХ в атмосфере. Волна генерируется сразу после события со скоростью, почти втрое превышающей поверхностную акустическую скорость и близкой к акустической скорости в пике F-области. Первоначальные крупномасштабные ПИВ, порожденные эруптивной ударной волной, и последующие среднемасштабные ПИВ наблюдались в течение шести часов после извержения. Атмосферные возмущения разного масштаба продолжались более 1.5 суток.

8. Проведенные в ряде геомагнитных обсерваторий синхронные измерения низкочастотных вариаций геомагнитного поля и возмущений амплитуды сигналов ШР позволили определить временную задержку геомагнитных сигналов, связанных с распространением атмосферных волн, по отношению к сигналу, связанному с реакцией ШР на молниевую активность [Gavrilov et al., 2022]. Эти данные дали возможность определения фаз извержения, ответственных за генерацию обоих событий и скорости распространения соответствующих возмущений в атмосфере.

9. Масштаб и амплитуда возмущений, вызванных ХТХ, позволили обнаружить прямую передачу энергии вдоль магнитных силовых линий в сопряженную ионосферу [Shinbory et al., 2022]. В [Liu et al., 2023] отмечается, что сопряженность вариаций ПЭС отчетливо проявляется в первые 2 ч после извержения, когда дрейфовые возмущения $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ плазмы были наиболее значительны.

[Matoza et al., 2022] резюмируют сложности, возникающие при анализе механизмов глобальных геофизических возмущений, вызванных извержением ХТХ:

- отсутствие в настоящее время модели высокоэнергетического подводного и многофазного извержения как с точки зрения источника возмущений, так и механизма перераспределения энергии в атмосфере и ионосфере;
- трудность учета многомасштабных событий, когда наблюдаемые атмосферные волны содержат энергию, распространяющуюся от акустико-гравитационного режима, включая сильную волну Лэмба, через инфразвуковой диапазон до звуковых частот;
- нелинейность распространения атмосферных волн, что приводит к каскадному преобразованию энергии на более высоких частотах, в особенности вдали от места события;
- существенные временные и пространственные вариации атмосферных условий на трассах распространения, которые делают невозможным применение существующих моделей атмосферы и ионосферы. Кроме того, проведенные измерения обнаружили заметные отклонения предсказанных траекторий распространения от дуги большого круга, что делает задачу моделирования эффектов ХТХ еще более неопределенной.

Очевидно, что полное понимание всего комплекса глобальных геофизических возмущений на планете, вызванных ХТХ, и представляющих собой совокупность взаимозависимых и активно взаимодействующих физических явлений, еще потребует значительных усилий научного сообщества.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900175-6).

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность д.ф.-м.н. Б. А. Иванову за внимательное прочтение статьи и ценные замечания и рекомендации.

Список литературы

- Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Геофизические эффекты извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. // Доклады Российской академии наук. 2022. Т. 504. № 2. С. 156–162. <http://dx.doi.org/10.31857/S2686739722060032>
- Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Ряховский И.А., Ермак В.М. Дистанционное зондирование электромагнитных эффектов извержения вулкана Тонга 15 января 2022 г. // Физика Земли. 2023. № 3. С. 122–130. <http://dx.doi.org/10.31857/S000233372303002X>
- Горбунова Э.М. Ряховский И.А., Гаврилов Б.Г., Поклад Ю.В., Петухова С.М., Беседина А.Н. Вариации геофизических полей при извержении вулкана Тонга по данным уникальной научной установки «Михнево» // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 4. С. 5–22. <http://dx.doi.org/10.21455/GPB2022.4-1>
- Кочарян Г.Г., Локтев Д.Н., Ряховский И.А., Санина И.А. Уникальная научная установка «Среднеширотный комплекс геофизических наблюдений «Михнево» // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. С. 2–6. <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0590>
- Мартинес-Беденко В.А., Пилипенко В.А., Шиокава К., Акбашиев Р.Р. Электромагнитные УНЧ/КНЧ-колебания, вызванные извержением вулкана Тонга // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. № 1. С. 51–59. <http://dx.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. <http://doi.org/10.26006/29490995>
- Adam D. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere // Nature. 2022. Vol. 602. P. 497. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00127-1>
- Adushkin V.V., Rybnov Y.S., Spivak A.A. et al. Relationship between the Parameters of Infrasound Waves and the Energy of the Source // Izv. Phys. Solid Earth. 2019. Vol. 55. P. 897–906. <http://dx.doi.org/10.1134/S106935131905001X>
- Amores A., Monserrat S., Marcos M., Argüeso D., Villalonga J., Jorda G., Gomis D. Numerical simulation of atmospheric lamb waves generated by the 2022 HungaTonga volcanic eruption // Geophys. Res. Lett. 2022. Vol. 49 (6). P. e2022GL098240. <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL098240>
- Aoyama T., Iyemori T., Nakanishi K. et al. Localized field-aligned currents and 4-min TEC and ground magnetic oscillations during the 2015 eruption of Chile's Calbuco volcano // Earth, Planet and Sp. 2016. Vol. 68 (148). <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-016-0523-0>
- Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T.D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P. et al. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations // Geophys. Research Letters. 2022. Vol. 49 (10). P. e2022GL098827. <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL098827>
- Astafyeva E., Shalimov S., Olshanskaya E., Lognonné P. Ionospheric response to earthquakes of different magnitudes: Larger quakes perturb the ionosphere stronger and longer // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40 (9). P. 1675–1681. <https://doi.org/10.1002/grl.50398>
- Azeem I., Vadas S.L., Crowley G., Makela J.J. Traveling ionospheric disturbances over the United States induced by gravity waves from the 2011 Tohoku tsunami and comparison with gravity wave dissipative theory // J. Geophys. Res. Space Physics. 2017. Vol. 122. P. 3430–3447. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JA023659>
- Bretherton F.P. Lamb waves in a nearly isothermal atmosphere // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1969. Vol. 95 (406). P. 754–757. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49709540608>
- Calais E., Bernard Minster J., Hofton M. and Hedlin M. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements // Geophysical Journal International. 1998. Vol. 132 (1). P. 191–202 <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-246x.1998.00438.x>
- Cimarelli C. and Genareau K. A review of volcanic electrification of the atmosphere and volcanic lightning // J. of Volcanology and Geotherm. Res. 2022. Vol. 422. P. 107449. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107449>
- Curto J.J. Geomagnetic solar flare effects: a review // J. Space Weather Space Clim. 2020. Vol. 10. Article No 27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2020027>

Dautermann T., Calais E., Mattioli G.S. Global Positioning System Detection and Energy Estimation of the Ionospheric Wave Caused by the 13 July 2003 Explosion of the Soufrière hills Volcano, Montserrat // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2009. Vol. 114 (B2). <http://dx.doi.org/10.1029/2008JB005722>

Duncombe J. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves // EOS. 2022. Vol. 103. <http://dx.doi.org/10.1029/2022EO220050>

Fujiwara M., Martineau P., Wright J.S. Surface temperature response to the major volcanic eruptions in multiple reanalysis data sets // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. Vol. 20 (1). <https://doi.org/10.5194/acp-20-345-2020>

Gavrilov B.G., Poklad Yu.V., Ryakhovsky I.A., Ermak V.M., Achkasov N.S., Kozakova E.N. Global electromagnetic disturbances caused by the eruption of the Tonga volcano on 15 January 2022 // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2022. Vol. 127. <http://dx.doi.org/10.1029/2022JD037411>

Harding B.J., Wu Y.-J.J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C.C., Immel T.J. et al. Impacts of the January 2022 Tonga volcanic eruption on the ionospheric dynamo: ICON-MIGHTI and Swarm observations of extreme neutral winds and currents // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49 (9). P. e2022GL098577. <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL098577>

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

Heki K. Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga Hunga Ha'apai eruption detected by QZSS TEC observations in Japan // Earth, Planets and Space. 2022. Vol. 74. Article No 112. <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-022-01674-7>

Huba J., Joyce G., Fedder J.A. Ion sound waves in the topside low latitude ionosphere // Geophysical Research Letters. 2000. Vol. 27 (19). P. 3181–3184. <http://dx.doi.org/10.1029/2000GL003808>

Iyemori T., Nishioka M., Otsuka Y., Shinbori A. A confirmation of vertical acoustic resonance and field aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcanic eruption // Earth, Planets and Space. 2022. Vol. 74. Article No 103. <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-022-01653-y>

Kozakova E.N., Achkasov N.S. Investigation of the reaction of Schumann resonances to short transient geophysical events under the influence of atmospheric electromagnetic noise // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2022. 127 (16). P. e2022JD036820. <http://dx.doi.org/10.1029/2022JD036820>

Lin J.-T., Rajesh P.K., Charles C.H. et al. Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave in the northern hemisphere after Hunga-Tonga volcano eruptions // Geophys. Res. Lett. 2022. Vol. 49 (8). <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL098222>

Liu H.-L., Wang W., Hub J.D., Lauritzen P.H., Vitt F. Atmospheric and ionospheric responses to Hunga-Tonga volcano eruption simulated by WACCM-X // Geophysical Research Letters. 2023. Vol. 50 (10). P. e2023GL103682. <http://dx.doi.org/10.1029/2023GL103682>

Matoza R.S., Fee D., Assink J.D., Iezzi A.M., Green D.N., Kim K., Wilson D.C. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations on the January 2022 Hunga eruption, Tonga // Science. 2022. Vol. 377 (6601). P. 95–100. <http://dx.doi.org/10.1126/science.abo7063>

Millán L., Santee M.L., Lambert A., Livesey N.J., Werner F., Schwartz M.J. et al. The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai hydration of the stratosphere // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49 (13). P. e2002GL099381. <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL099381>

NASA, 2022. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/149474/tonga-volcano-plume-reached-the-mesosphere>

Nickolaenko A., Schekotov A., Hayakawa M., Romero R., Izutsu J. Electromagnetic manifestations of Tonga eruption in Schumann resonance band // SSRN Electronic J. 2022. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4051361>

Poklad Yu.V., Ryakhovsky I.A., Gavrilov B.G., Ermak V.M., Kozakova E.N., Achkasov N.S. Investigation of the reaction of Schumann resonances to short transient geophysical events under the influence of atmospheric electromagnetic noise // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2022. Vol. 27 (16). <http://dx.doi.org/10.1029/2022JD036820>

Poli P., Shapiro N. Rapid characterization of large volcanic eruptions: measuring the impulse of the Hunga Tonga explosion from teleseismic waves // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49 (8). P. e2022GL098123. <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL098123>

Price C. ELF Electromagnetic Waves from Lightning: The Schumann Resonances // Atmosphere. 2016. Vol. 7 (9). P. 116. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos7090116>

Proud S., Prata A., Schmauss S. The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano reached the mesosphere // Science. 2022. Vol. 378. P. 554–557. <http://dx.doi.org/10.1126/science.abo4076>

Ryakhovskii I.A., Gavrilov B.G., Poklad Yu.V., Bekker S.Z., Ermak V.M. The state and dynamics of the ionosphere

from synchronous records of ULF/VLF and HF/VHF radio signals at geophysical observatory «MIKhnevo» // *Izvestiya Physics of the Solid Earth*. 2021. Vol. 57 (5). P. 718–730. <http://dx.doi.org/10.1134/S1069351321050177>

Schoeberl M.R., Wang Y., Ueyama R., Dessler A., Taha G., Yu W. The estimated climate impact of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption plume // *Geophysical Research Letters*. 2023. Vol. 50 (18). P. e2023GL104634. <http://dx.doi.org/10.1029/2023GL104634>

Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., Maruyama T. A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004 // *Earth, Planets and Space*. 2007. Vol. 59. P. 1015–1026. <http://dx.doi.org/10.1186/BF03352042>.

Shinbori A., Otsuka Y., Sori T. et al. Electromagnetic conjugacy of ionospheric disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption as seen in GNSS-TEC and SuperDARN Hokkaido pair of radars observations // *Earth, Planets and Space*. Vol. 74. Article No 106. <http://dx.doi.org/10.1186/s40623-022-01665-8>

Terry J.P., Goff J., Winspear N., Bongolan V.P., Fisher S. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: Globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau // *Geoscience Let.* 2022. Vol. 9. Article No 24. <http://dx.doi.org/10.1186/s40562-022-00232-z>

Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A. et al. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption // *Geophys. Res. Let.* 2022. Vol. 49 (7). P. e2022GL098158. <http://dx.doi.org/10.1029/2022GL098158>

Vergoz J., Hupe P., Listowski C., Le Pichon A., Garcés M.A., Marchetti E., Labazuy P., Ceranna L., Pilger C., Gaebler P., Näsholm S.P., Brissau Q., Poli P., Shapiro N., De Negri R., Mialle P. IMS observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the January 2022 volcanic eruption of Hunga, Tonga: A global analysis // *Earth and Planetary Sciences Letters*. 2022. Vol. 591 (4). <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639>

Wright C.J., Hindley N., Alexander M.J., Barlow M., Hoffmann L., Mitchel C., Prata F., Bouillon M., Carstens J., Clerbaux C., Osprey S., Powell N., Randall C., Yue J. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption // *Nature*. 2022. Vol. 609. P. 741–746. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>

Yuen D.A., Scruggs M.A., Spera F.J., Zheng Y., Hu H., McNutt S.R., Tanioka Y. Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano // *Earthquake Research Advances*. 2022. Vol. 2 (3). P. 100134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>

Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L.P., Erickson P.J., Rideout W., Coster A.J., Spicher A. Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves // *Front. Astron. Space Sci.* 2022. Vol. 9. P. 871275. <http://dx.doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>

GLOBAL GEOPHYSICAL EFFECTS CAUSED BY THE HUNGA-TONGA-HUNGA-HAAPAI VULCAN ERUPTION 15 JANUARY 2022 (REVIEW)

© 2023 B. G. Gavrilov*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: boris.gavrilov34@gmail.com*

The eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai volcano on January 15, 2022, and associated explosive events recorded by seismic and acoustic instruments across the planet caused significant and prolonged effects in the atmosphere and ionosphere. Measurement data obtained using a record number of ground observation sites and space-based systems provided an unprecedented amount of geophysical information. Analysis of seismic and atmospheric-ionospheric disturbances allowed to determine the value of the volcanic activity index for the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai eruption $VEI = 6$, which places it among the largest volcanic eruptions ever recorded. Unique or rarely observed events are the height of volcanic cloud rise to the mesosphere boundaries, record thunderstorm activity, the scale, amplitude and duration of atmospheric, stratospheric and ionospheric disturbances registered over the entire planet, the strongest infrasound signals observed in the world for the last 30 years. The synchronous registration of low-frequency variations of the geomagnetic field and the amplitude of the Shuman resonance signals made it possible to determine the propagation velocities of Lamb waves, acoustic-gravity and infrasound waves, to determine the phases of eruptions responsible for the generation of various types of atmospheric and ionospheric perturbations and the propagation velocity of the corresponding perturbing agents. At the same time, a comprehensive analysis of the dynamics and mechanisms of global geophysical perturbations caused by the eruption is impeded by the absence of a complete model of a multiphase high-energy underwater eruption, the difficulty of joint analysis of the entire set of revealed geophysical effects of the eruption with the use of existing models of the atmosphere and ionosphere. It is obvious that understanding of the whole complex of global geophysical disturbances on the planet caused by the eruption provides unique material for studying the processes of geospheres interaction, which is a combination of interdependent and actively interacting physical phenomena.

Keywords: volcanic eruption, seismic, atmospheric and ionospheric disturbances.