

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УНЧ/КНЧ-КОЛЕБАНИЯ,
ВЫЗВАННЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ТОНГА****ELECTROMAGNETIC ULF/ELF OSCILLATIONS CAUSED BY THE ERUPTION
OF THE TONGA VOLCANO****В.А. Мартинес-Беденко** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, lera_m0@mail.ru***В.А. Пилипенко** *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru***К. Шиокава** *Университет Нагойя,
Нагойя, Япония, shiokawa@isee.nagoya-u.ac.jp***Р.Р. Акбашев** *Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский, Россия, arr@emsd.ru***V.A. Martines-Bedenko***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, lera_m0@mail.ru***V.A. Pilipenko***Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru***K. Shiokawa***Nagoya University,
Nagoya, Japan, shiokawa@isee.nagoya-u.ac.jp***R.R. Akbashev***Kamchatka Branch of the Unified Geophysical Survey RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, arr@emsd.ru*

Аннотация. Извержение вулкана Тонга 13 и 15 января 2022 г. и сопровождавшая его интенсивная молниевая активность привели к возбуждению специфических электромагнитных колебаний разных частотных диапазонов. Свойства этих колебаний анализируются по данным магнитометров разных типов, расположенных на Камчатке и в Тихоокеанском регионе. Подтверждена возможность геомагнитного отклика на образование акустического резонанса между земной поверхностью и ионосферой: через ~15 мин после начала извержения на удалении ~800 км зарегистрированы локализованные гармонические колебания частотой 3.5–4.0 мГц, длившиеся ~1.5 ч. Отмечено усиление интенсивности шумановского резонанса (частота ~7.8 Гц) на станциях на Дальнем Востоке. Там же обнаружено появление широкополосного излучения в диапазоне Pc1 (2–5 Гц), стимулированного интенсивными вулканическими молниями. Это излучение, предположительно, является результатом возбуждения молниевой активностью магнитозвукового волновода в верхней ионосфере.

Ключевые слова: извержение вулкана, атмосферные волны, акустический резонанс, шумановский резонанс, Pc1, ионосферный волновод.

Abstract. The eruption of the Tonga volcano on January 13 and 15, 2022 and related intense lightning activity led to the excitation of a number of specific electromagnetic oscillations in different frequency ranges. We examine properties of these oscillations, using data from magnetometers of various types located in Kamchatka and in the Pacific region. We confirmed that there might have been a geomagnetic response to the formation of an acoustic resonance between the Earth surface and the ionosphere: localized harmonic oscillations with a frequency 3.5–4.0 mHz, which lasted for ~1.5 hr, were detected ~15 min after the beginning of the eruption at distance of ~800 km. An increase was observed in the intensity of the Schumann resonance at stations in the Far East. Broadband emission stimulated by intense volcanic lightning was detected to occur in the Pc1 range (2–5 Hz). The emission presumably results from the excitation of the magnetosonic waveguide in the upper ionosphere by lightning activity.

Keywords: volcanic eruption, atmospheric waves, acoustic resonance, Schumann resonance, Pc1, ionospheric waveguide.

ВВЕДЕНИЕ

Извержения вулканов и землетрясения приводят к возбуждению атмосферных акустико-гравитационных волн (АГВ) с периодами от нескольких минут до нескольких часов. Модуляция ионосферы АГВ дает возможность планетарной регистрации ионосферного отклика на катастрофические геофизические явления с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Ясюкевич и др., 2013]. Если волновые возмущения охватывают проводящий слой ионосферы (высоты ~120 км), то они вызывают отклик и в геомагнитном поле [Куницын, Шалимов, 2011]. Наряду с этими повсеместно наблю-

даемыми и хорошо известными эффектами, геофизические явления с большим выделением энергии возбуждают довольно редкие специфические электромагнитные колебания.

К таким колебаниям относятся и специфические Pc5-пульсации, которые, в отличие от магнитосферных Pc5-пульсаций, пространственно локализованы в окрестности эпицентра землетрясения или извержения. Эти гармонические колебания могут длиться несколько часов, при этом их период существенно превышает максимально возможный период магнитосферного альфвеновского резонатора в области наблюдения. Например, спустя 12 мин после Суматр-

ского землетрясения 2004 г. наблюдались пространственно-локализованные магнитные Pc5-пульсации с центральной частотой 3.6 мГц на расстояниях до 1500 км от эпицентра [Yumori et al., 2005]. Аналогичные периодические пульсации полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы наблюдались также после других сильных землетрясений [Choosakul et al., 2009; Saito et al., 2011].

Эти явления были объяснены как результат акустического резонанса между поверхностью Земли и ионосферой, возбуждаемого резкими вертикальными движениями земной поверхности. Основные наблюдаемые спектральные пики соответствуют периодам 260–270, 220–230 и 190–200 с и, по-видимому, связаны с гармониками акустического резонатора [Tahira, 1995; Nishida et al., 2000], хотя период может в некоторой степени варьировать в зависимости от состояния атмосферы. По результатам численного моделирования, проведенного Shinagawa et al. [2007], область барометрических вариаций, связанных с вертикальным акустическим резонансом, 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. Стоячая мода акустического резонатора в атмосфере может образовывать волновое возмущение, связанное с распространяющейся сейсмической рэлеевской волной [Kanamori, Mori, 1992; Kanamori et al., 1994].

Особенность извержений вулканов по сравнению с землетрясениями заключается в том, что, помимо акустического воздействия на атмосферу и ионосферу, происходит и электромагнитное воздействие вулканических молний. Носителями электростатического заряда в эруптивном облаке являются продукты извержения: вулканический пепел, аэрозоли и газы, при этом до 98 % массы всех газов составляет водяной пар [James et al., 2008; Lane et al., 2011]. Зарядка продуктов извержения обусловлена такими физическими процессами, как фрактоэмиссия [Behnke et al., 2018; Harper et al., 2021], трибоэлектризация [Руленко и др., 1986; Arlin et al., 2016] и заряджение при взаимодействии эруптивного облака с гидрометеорами [Arason et al., 2011; Van Eaton et al., 2020]. Во время извержений вулканов Аляски были выделены три типа молниевых разрядов, происходящих на разных стадиях эксплозивных извержений [Thomas et al., 2007]:

I. Кратерные разряды, которые регистрируются на участке газового напора (инъекции пепло-газовой струи) в начальный момент формирования эруптивной колонны, их длительность $\sim 10^{-4}$ с, что соответствует молниевому каналу длиной 10–100 м.

II. Околократерные молнии, для которых характерен разряд длительностью 0.01–0.1 с (длина молниевых каналов 1–7 км). Околократерные молнии возникают в результате дальнейшего развития и подъема эруптивной колонны, сопровождаемых увеличением униполярных объемных зарядов и масштаба разделения зарядов.

III. Классические молниевые разряды, аналогичные регистрируемым в метеорологических облаках, появляются, когда эруптивная колонна достигает максимальной высоты подъема. Здесь накопление электростатических зарядов обусловлено формированием градин, при этом частички пепла становятся ядрами конденсации. Молниевый разряд в этом случае имеет длительность > 0.1 с, что соответствует молниевому каналу длиной > 10 км.

Электромагнитное воздействие вулканических молний может вызвать отклик в резонансных ионосферных системах — шумановском резонаторе (ШР) и ионосферном волноводе для МГД-волн. ШР представляет собой сферический резонатор для электромагнитных волн с фундаментальной частотой 7.8 Гц, образуемый поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы. ШР в основном подпитывается глобальной грозовой активностью в тропических регионах. Ионосферный МГД-волновод (с частотой отсечки порядка 1 Гц) образуется плотной плазмой F-слоя ионосферы. Насколько нам известно, экспериментальных свидетельств возбуждения ионосферного МГД-волновода молниевым разрядом до сих пор не было получено. Единственный эффект такого рода — возбуждение электромагнитным импульсом высотного ядерного взрыва геомагнитных пульсаций с периодами 2–5 с, наблюдавшихся на значительном удалении от места взрыва [Fraser, 1962].

ИЗВЕРЖЕНИЕ ТОНГА: АТМОСФЕРНЫЕ, ИОНОСФЕРНЫЕ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Серия взрывных извержений подводного вулкана Тонга (полное название — Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай) в южной части Тихого океана началась 13 января 2022 г. в 15:20 UT, а основное извержение произошло 15 января 2022 г. в 04:15 UT [Yuen et al., 2022]. По сейсмическим данным это извержение было зарегистрировано как землетрясение магнитудой $M=5.8$ с глубиной гипоцентра 0 км. Извержение 15 января 2022 г. вызвало возмущение во всех геофизических средах, причем не только в окрестности извержения, но и в планетарном масштабе. Подводное извержение вулкана вызвало цунами, обрушившееся на побережье Тихого океана от Японии до США. Возбужденная извержением атмосферная волна обошла несколько раз весь земной шар. Astafyeva et al. [2022] по данным ГНСС обнаружили отклик верхней ионосферы на это событие — большое увеличение ПЭС, за которым последовало сильное длительное уменьшение. На основе этих данных энергия, выделившаяся во время взрывного извержения, была оценена в 9–37 мегатонн в тротиловом эквиваленте.

Ионосферное возмущение, предположительно, было вызвано приземной волной Лэмба, распространявшейся со скоростью звука ~ 300 – 350 м/с. Наибольшее возмущение (до 3 ТЕС), наблюдавшееся на расстояниях менее 5000 км, имело скорость 700 м/с, которая постепенно уменьшилась до 450 м/с. Ионо-

сферное возмущение пришло к западному побережью США на 4 ч раньше, чем цунами с характерной скоростью 210 м/с. Интенсивная атмосферная волна Лэмба вызвала предвестник цунами, который опередил основную волну на несколько часов.

Вулканические молнии во время извержения

Уникальной особенностью извержения подводного вулкана Тонга была сильнейшая активность вулканических молний. Динамика молниевой активности была прослежена по данным наземной глобальной сети обнаружения молний GLD360, принадлежащей компании Vaisala. По данным GLD360, за три дня извержения произошло почти 590 000 молниевых разрядов. Когда 13 января в 15:20 UT началось первое извержение, окружающие острова архипелага Тонга были полностью охвачены молниями. Молниевая активность продолжалась с разной интенсивностью несколько дней. Еще более мощное подводное извержение 15 января вызвало наиболее интенсивный всплеск молниевой активности, когда за 6 ч было зарегистрировано почти 400 000 разрядов. В максимуме активности было зарегистрировано 200 000 разрядов в час, что составило 80 % среднечасовой грозовой активности во всем мире. При извержении на Тонге наблюдались молнии как на фазе сухой зарядки 13 января, когда шлейф извержения был ниже 55 км, так и на фазе зарядки льдом 15 января, когда эруптивное облако достигло высоты 55 км.

Магнитные эффекты

Извержение 15 января произошло на фазе восстановления умеренной магнитной бури с $|Dst| \sim 94$ нТл, начавшейся 14 января в 23 UT, когда геомагнитное поле еще оставалось слабозвозмущенным. Спутники ICON и Swarm наблюдали воздействие атмосферного возмущения над Центральной Америкой на динамо-область ионосферы [Harding et al., 2022]. После того как волна Лэмба вышла на дневную сторону, Swarm A зарегистрировал интенсивный экваториальный электроджет на двух последовательных орбитах, а ICON — экстремальные скорости нейтрального ветра на высотах 90–300 км. Harding et al. [2022] выдвинули предположение, что возмущение электроджета было вызвано сильным ветром в динамо-слое ионосферы (~120–150 км). Возбуждение акустического резонанса при извержениях и землетрясениях было обнаружено по геомагнитным данным в работах [Iyemori et al., 2022; Yamazaki et al., 2022].

Можно было ожидать также следующих геомагнитных эффектов сильных возмущений, порожденных мощным извержением 15 января:

- вариации геомагнитного поля, индуцированные движением цунами. Эти эффекты можно выделить в островных обсерваториях, через которые проходит цунами [Сорокин и др., 2019].
- атмосферная волна, распространяющаяся вдоль ионосферы и захватывающая проводящий E-слой ионосферы, может возбуждать геомагнитные возмущения на наземных станциях [Погорельцев, 1989]. Временная задержка между станциями должна со-

ответствовать скорости распространения атмосферной волны.

В данной статье мы продемонстрируем эффекты возбуждения акустического Pc5-резонанса, ШР и МГД-волновода при извержении вулкана Тонга по данным магнитометров в Тихоокеанском и Дальневосточном регионах.

НАБЛЮДЕНИЯ УНЧ-ПУЛЬСАЦИЙ, СТИМУЛИРОВАННЫХ ИЗВЕРЖЕНИЕМ

Мы проанализировали данные магнитометров сети INTERMAGNET с периодом опроса 1 мин (см. положение выбранных станций в Тихоокеанском регионе на рис. 1). Эти трехкомпонентные феррозондовые магнитометры имеют плоскую частотную характеристику.

На ближайшей к архипелагу Тонга магнитной станции API (на удалении $R \sim 800$ км) через ~15 мин после извержения регистрировались квазимонохроматические колебания, два всплеска которых произошли с 04:30 до 05:50 UT (рис. 2). Колебания наиболее отчетливо выражены в Y-компоненте геомагнитного поля (с максимальным размахом ~6 нТл) и значительно слабее проявляются в Z (~4 нТл) и X (~2 нТл) компонентах. На более удаленных от места извержения станциях ($R > 2500$ км) и на более высоких широтах эти колебания уже не проявляются.

Частоты колебаний были оценены с помощью спектрального анализа (рис. 3). В спектре отчетливо видны гармоники с частотами 3.5 мГц (период 4.8 мин) и 4.0 мГц (период 4.2 мин). По всем морфологическим признакам эти Pc5-пульсации не являются обычными магнитосферными колебаниями, а обусловлены акустическим резонансом.

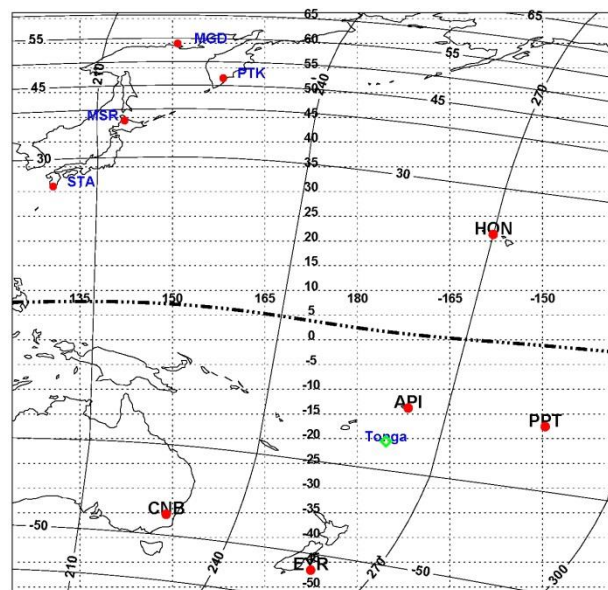


Рис. 1. Карта магнитных станций, оснащенных феррозондовыми (красные точки) и индукционными (синий шрифт названий) магнитометрами. Зеленым ромбом показан эпицентр извержения вулкана, сплошными линиями — геомагнитная сетка координат, штрихпунктирной линией — геомагнитный экватор

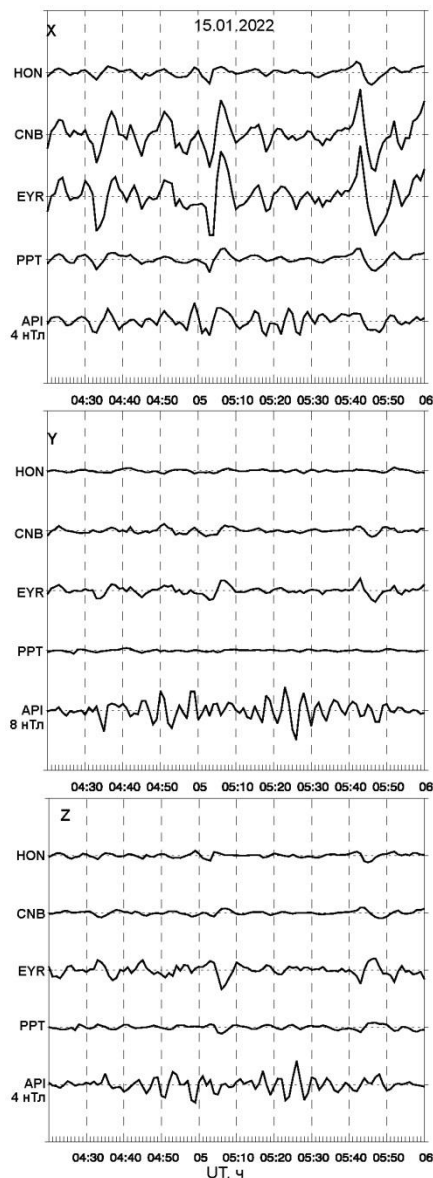


Рис. 2. Магнитограммы компонент X, Y, Z на ст. HON, CNB, EYR, PPT, API в 04:20–06:00 UT 15.01.2022

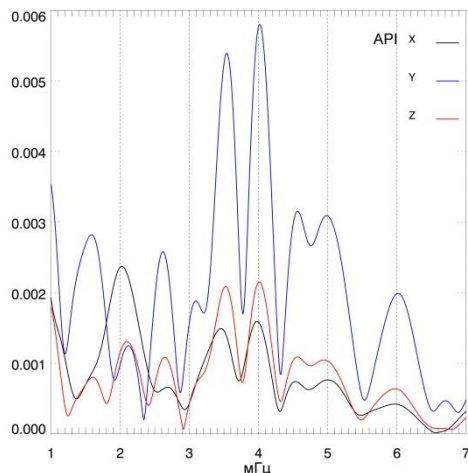


Рис. 3. Спектр магнитных вариаций X-, Y-, Z-компонент на ст. API в 04:30–05:50 UT 15.01.2022

Фазовые соотношения между компонентами поля пульсаций можно качественно оценить из отфильтрованных 1-минутных магнитограмм (частота отсечки

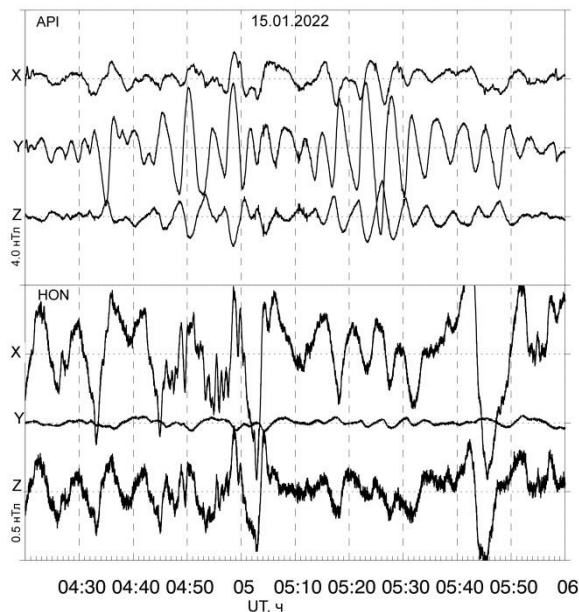


Рис. 4. Геомагнитный отклик на акустический резонанс (X-, Y-, Z-компоненты) на ст. API и HON в 04:20–06:00 UT 15.01.2022 (проведена предварительная фильтрация с частотой отсечки 2 мГц). На оси ординат показан вертикальный масштаб магнитограмм — расстояние между делениями в нТл

2 мГц) ст. API и HON (рис. 4). Наиболее отчетливо виден второй всплеск колебаний, который наблюдается не только в Южном полушарии на ст. API, но и в Северном полушарии на ст. HON. В то же время на других станциях в Южном полушарии анализируемые Pc5-пульсации не выделяются даже после фильтрации. На ближайшей к эпицентру извержения ст. API пульсации Y- и Z-компоненты оказываются в противофазе. Пульсации X-компоненты оказываются синфазными в Южном (API) и Северном (HON) полушариях. Появление отклика в другом полушарии может свидетельствовать, что часть энергии геомагнитного возмущения переносится продольными токами вдоль силовых линий в сопряженную область ионосферы.

НАБЛЮДЕНИЯ ШР И Pc1-ПУЛЬСАЦИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИМИ ГРОЗАМИ

Исходным материалом для анализа являлись записи УНЧ/КНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли на сети станций проекта PWING (Study of Dynamical Variation of Particles and Waves in the Inner Magnetosphere Using Ground-Based Network Observations) [Shiokawa et al., 2010], оборудованных индукционными магнитометрами с частотой регистрации 64 Гц. Эта сеть станций развернута в качестве наземной поддержки спутникового проекта ERG (Arase). Положение станций показано на рис. 1, а их географические координаты и расстояния до эпицентра извержения даны в таблице. Вертикальная компонента (Z) в данных магнитометров зашумлена и поэтому не анализируется. Рассматриваются только горизонтальные компоненты север–юг (X)

Координаты магнитных станций и расстояние до места извержения

Код	Название	Широта	Долгота	R, км
	Tonga	-20.55	-175.39	
Феррозондовые магнитометры				
API	Apia	-13.80	-171.78	813
PPT	Pamatai	-17.57	-149.58	2710
EYR	Eyrewell	-46.60	172.40	2552
CNB	Canberra	-35.30	149.00	3797
HON	Honolulu	21.32	-158.00	5094
IPM	Easter Island	-27.20	-109.42	6656
Индукционные магнитометры				
MSR	Moshiri	44.37	142.27	8437
MGD	Magadan	59.97	150.86	9508
STA	Sata	46.09	144.19	8476
PTK	Paratunka	52.94	158.25	8548

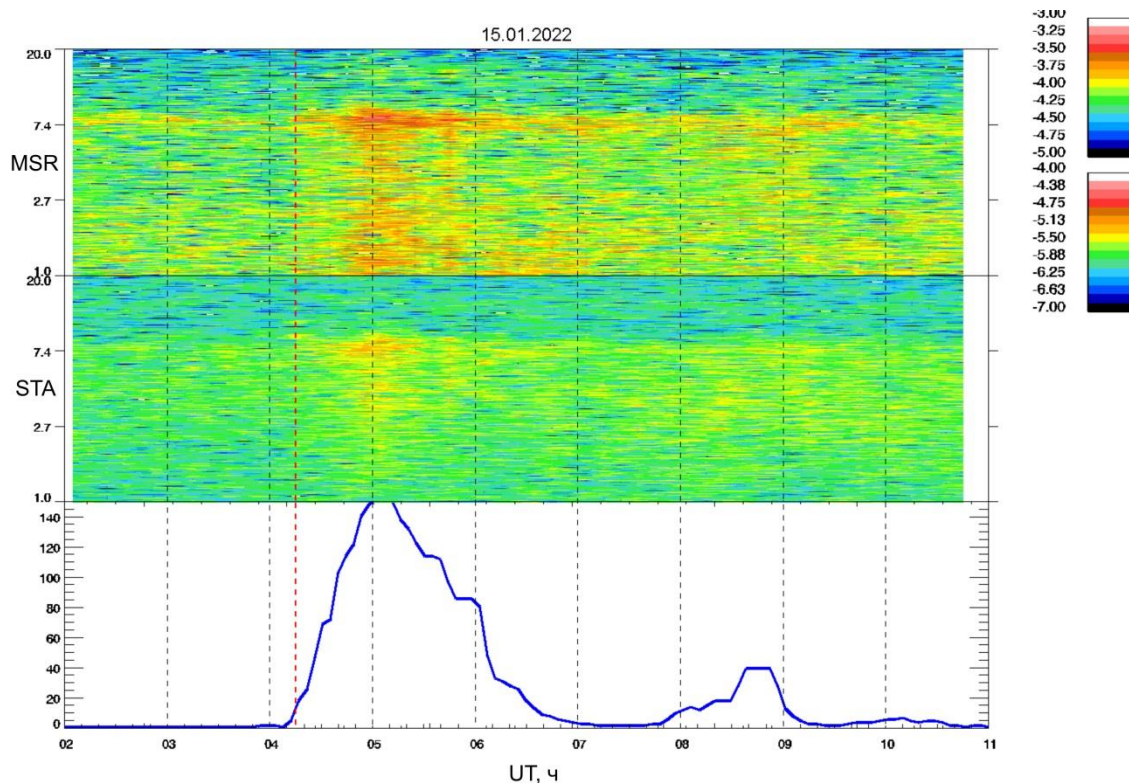


Рис. 5. Верхняя панель — сонограммы (1–20 Гц, логарифмическая шкала по частоте) шумановского резонанса (Y-компонента) для временного интервала 02–11 UT 15.01.2022 на ст. MSR и STA. Нижняя панель — интенсивность вулканических молний (число разрядов в минуту)

и восток–запад (Y). Амплитудно-частотная характеристика индукционных магнитометров линейно растет с частотой, имея широкий максимум на частотах 1.5–5.0 Гц, и спадает на частотах >5 Гц. Эта аппаратура позволяет регистрировать излучение диапазона Pc1 (от 0.1 Гц до нескольких Гц) и излучение ШПР, хотя и в ослабленном виде из-за особенностей частотной характеристики.

В данных индукционных магнитометров сети PWING ШПР проявляется только на ст. MSR и STA, поскольку частоты выше нескольких герц «задавлены» частотной характеристикой. На этих станциях спектральная амплитуда на частоте ШПР испытывает максимальное увеличение в ~05 UT, совпадающее по времени с наибольшей активностью вулканических молний (рис. 5). Это увеличение обусловлено

возрастанием плотности потока атмосфериков и их интенсивности [Nickolaenko et al., 2022].

В периоды наибольшей молниевой активности в диапазоне Pc1 на сонограммах появляется также широкополосный всплеск излучения в полосе частот 2–5 Гц на ст. MSR, PTK, MGD. На более далекой от места извержения ст. ZGN данный всплеск излучения уже не проявляется, хотя эта станция расположена на более высоких широтах, и Pc1-пульсации, если бы они были магнитосферного происхождения, должны на ней проявиться более отчетливо. Излучение в полосе частот Pc1 видно на ст. STA, MSR во время первого всплеска вулканической молниевой активности 13 января с 16 до 17 UT (рис. 6). Еще более наглядно излучение в диапазоне Pc1 проявилось во время самого мощного всплеска вулканических мол-

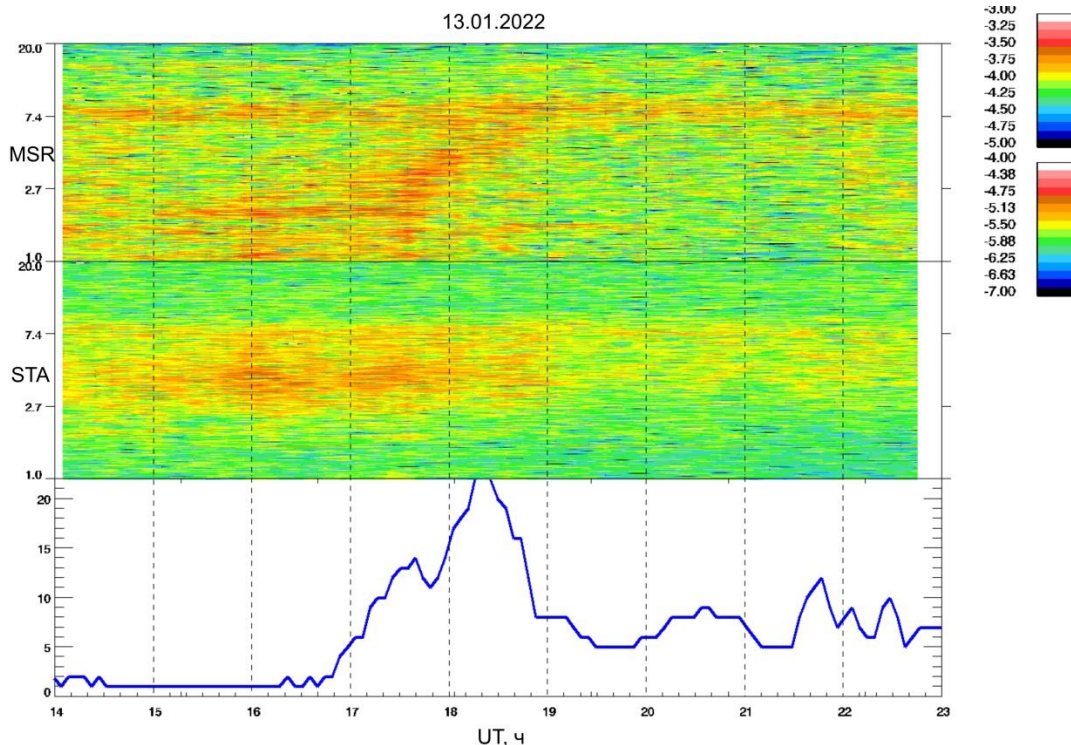


Рис. 6. Верхняя панель — сонограммы (1–20 Гц, логарифмическая шкала по частоте) Pc1-колебаний (Y-компонента) для временного интервала 14–23 UT 13.01.2022 на ст. MSR и STA. Нижняя панель — интенсивность вулканических молний (число разрядов в минуту)

ний 15 января (рис. 7). Pc1-колебания начались после извержения и закончились, когда активность вулканических молний начала спадать.

Характерной особенностью верхней ионосферы является наличие ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) и волновода для быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн, которые могут накапливать энергию электромагнитных волн в диапазоне от долей герца до нескольких герц. Численное моделирование возбуждения электромагнитных мод ИАР и БМЗ-волновода проводилось в работах [Fedorov et al., 2016; Mazur et al., 2018]. Модель основана на численном решении связанных волновых уравнений для МГД-мод в ионосферной плазме. Вертикальный профиль ионосферных параметров восстанавливается по эмпирической модели ионосферы IRI. Моделирование показывает, что во время грозового разряда (вертикальный диполь) возбуждается связанная волновая система, состоящая из мод ИАР и МГД-волновода. Мы воспользовались моделью [Fedorov et al., 2016; Mazur et al., 2018], чтобы рассчитать спектральный состав электромагнитного излучения УНЧ-диапазона на разных расстояниях от приземного источника (рис. 8). Вблизи молнии (на расстояниях до нескольких сотен километров) только низшие гармоники ИАР проявляются в спектрах магнитной компоненты. На больших же расстояниях (более 800 км) спектральная структура формируется преимущественно гармониками ионосферного волновода. Повидимому, именно волноводные моды обуславливают широкополосный всплеск излучения в полосе частот Pc1 на станциях Японии и Камчатки во время вулканической молниевой активности.

ОБСУЖДЕНИЕ

По всем морфологическим признакам Pc5-пульсации, которые начались на ст. API 15 января через ~15 мин после начала взрывного извержения, обусловлены акустическим резонансом. Качественно резонанс можно представить как акустические колебания в трубе, закрытой с одной стороны и открытой с другой. В неоднородной среде акустические колебания могут распространяться только в области, где их частота f выше критической частоты $f_a = \gamma g / 2\pi V_s$, где $V_s = \gamma P / \rho$ — скорость звука. В реальной атмосфере вертикальный профиль $f_a(z)$ имеет основной максимум на высоте $z \sim 100$ км и дополнительный на $z \sim 30$ км [Matsumura et al., 2009]. На высоте z^* , где $f = f_a(z^*)$, происходит отражение распространяющейся вверх ($\sim \exp(ik_z z)$) акустической волны. В результате образуется стоячая волна, частота которой определяется условием квантования $\int_0^{z^*} k_z dz = \pi n / 2$. Акустические волны с $f > 5$ мГц свободно проникают в верхнюю ионосферу, а волны с $f < 3$ мГц отражаются на высотах 20–30 км, и только на промежуточных частотах 3–5 мГц устанавливается акустический резонанс между землей и ионосферой с точкой отражения на высоте около 100 км. Конкретная частота в каждом событии определяется вертикальным профилем температуры и плотности атмосферы. Стоячая акустическая волна охватывает проводящие слои ионосферы, и в результате динамо-эффекта в этих слоях могут возбуждаться осцилляции токов и магнитного поля [Zettergren, Snively, 2015]. Однако, насколько нам известно, моделирования геомагнитного отклика и про-

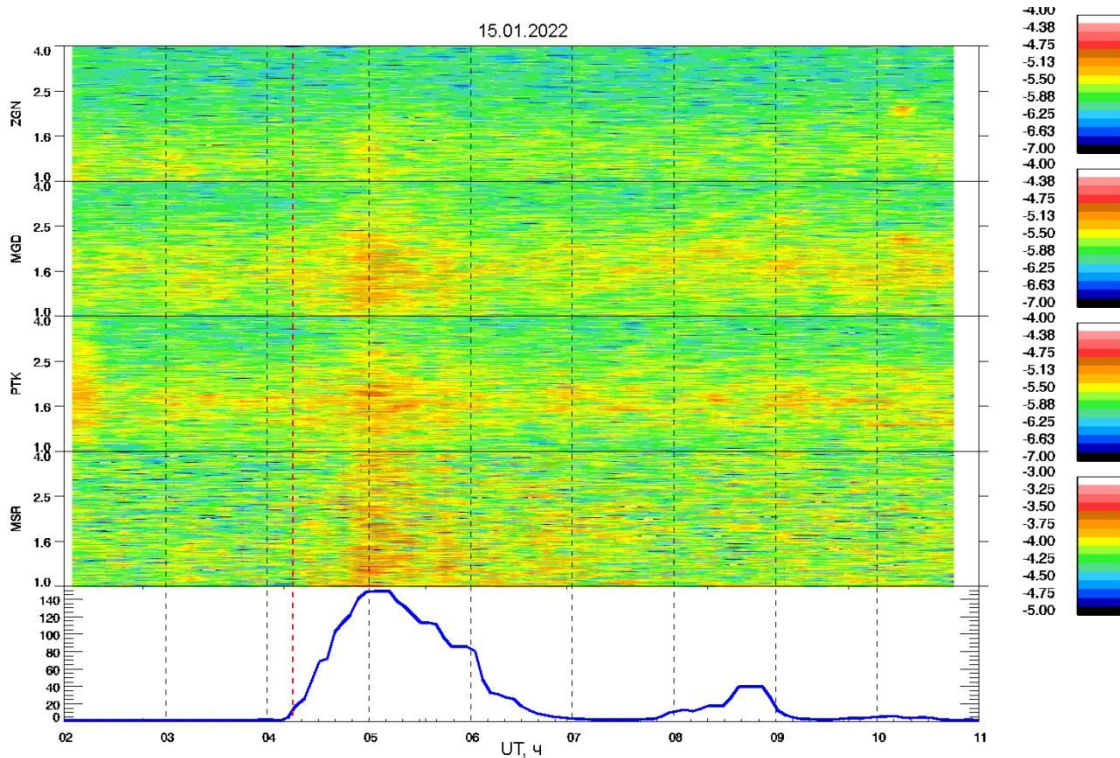


Рис. 7. Сонограммы Pc1-колебаний (0.1–4.0 Гц, Y-компонента) для временного интервала 02–11 UT 15.01.2022 на ст. ZGN, MGD, PTK, MSR. Нижняя панель — интенсивность вулканических молний (число разрядов в минуту)

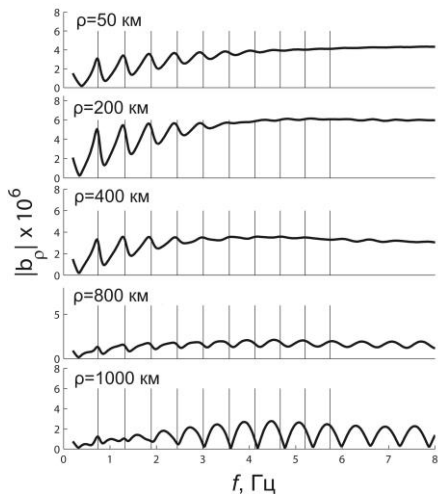


Рис. 8. Численное моделирование возбуждения электромагнитных мод ионосферы грозвым разрядом по модели [Fedorov et al., 2016; Mazur et al., 2018]: спектральная амплитуда магнитной компоненты на различных удалениях ρ от источника — вертикального диполя. Вертикальными линиями обозначены локальные резонансные частоты ИАР

дольных токов, возбуждаемых акустическим резонансом, не проводилось.

Первый ионосферный отклик на извержение вулкана Тонга был зарегистрирован в его ближней окрестности (~200 км), где кажущаяся скорость распространения возмущения ~1050 м/с почти в три раза превышала скорость звука [Zhang et al., 2022]. По мнению Themens et al. [2022], такие сверхзвуковые скорости могут быть следствием образования сильной ударной волны. Мы полагаем, что эти возмущения, перемещающиеся со сверхзвуковой ско-

ростью, обусловлены замедленной МГД-волной, распространяющейся в столкновительной ионосферной плазме. Низкочастотное возмущение с частотой много меньше частоты столкновений нейтралов с ионами, $\omega \ll \nu_{ni}$, будет вовлекать в волновое движение нейтральные частицы ионосферы [Сорокин, Федорович, 1982; Некрасов, Пилипенко, 2020]. В результате МГД-волны будут «нагружены» не только ионами плазмы, но и нейтральными частицами, что приведет к резкому уменьшению скорости распространения. Так, медленная БМЗ-волна будет распространяться не с обычной альфвеновской скоростью V_A , а с модифицированной альфвеновской скоростью

$$\tilde{V}_A = V_A \sqrt{N_i / (N_n + N_i)},$$

которая, по оценкам, в ионосфере составляет порядка единиц километров в секунду.

Геомагнитных возмущений, вызванных атмосферными волнами или цунами, из имеющихся данных нам выделить не удалось. Мы безуспешно пытались обнаружить возмущения, соответствующие либо звуковой скорости ~320 м/с, либо скорости волны цунами ~200 м/с, для которых наблюдается разность времен прихода на расположенные на разном удалении от источника магнитные станции. Для уверенного выделения таких эффектов надо анализировать данные магнитометров совместно с данными расположенных вблизи барометров или буйковых мареографов (типа DART). В настоящее время мы такими данными не располагаем.

Чрезвычайно высокая электрическая активность в момент извержения вулкана Тонга, сконцентрированная в эруптивном облаке, привела к повсеместному увеличению интенсивности электромагнитных

шумов во всем диапазоне частот ШР по записям индукционных магнитометров в Италии, Франции и России, которое продолжалось до окончания извержения [Nicolaienko et al., 2022]. Наши наблюдения на станциях Японии и Камчатки подтверждают этот результат.

Численное моделирование возбуждения электромагнитных мод ИАР и БМЗ-волновода показывает, что во время грозового разряда (вертикальный диполь) вблизи молнии (несколько сотен километров) только низшие гармоники ИАР проявляются в спектрах электромагнитного отклика, а на больших расстояниях (более 800 км) спектральная структура формируется преимущественно гармониками волноводных мод БМЗ. Таким образом, проведенное моделирование предсказывает, что на большом удалении от вертикальных грозовых разрядов будут наблюдаться волноводные моды ионосферы в диапазоне от ~1 Гц почти до частот ШР. Предсказанная картина качественно согласуется с наблюдениями Pc1-пульсаций на Камчатке и в Японии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения на магнитных станциях Тихоокеанского и Дальневосточного регионов подтвердили возможность возбуждения специфических электромагнитных колебаний, стимулированных взрывным извержением вулкана и вулканической молниевой активностью. На удалении ~800 км от эпицентра извержения зарегистрированы локальные геомагнитные пульсации диапазона Pc5, которые, судя по морфологическим признакам, обусловлены акустическим резонансом между земной поверхностью и ионосферой. Подтверждено усиление интенсивности фундаментальной гармоники шумановского резонанса в период развития молний в эруптивном облаке. Обнаружено возбуждение широкополосного (2–5 Гц) излучения в диапазоне Pc1 вулканическими молниями на значительном расстоянии от эпицентра извержения. Численное моделирование показало, что это излучение может являться результатом возбуждения молниевой активностью магнитозвукового волновода в верхней ионосфере.

Работа поддержана грантом РФФ 22-17-00125. Выражаем благодарность национальным обсерваториям и проекту INTERMAGNET за предоставленные данные магнитных наблюдений [www.intermagnet.org]. Информация о вулканической молниевой активности собрана на сайте [<https://graphics.reuters.com/TONGA-VOLCANO/LIGHTNING/zgpomjdbypd/>]. Мы признательны рецензенту за полезные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Куницын В.Е., Шалимов С.Л. Ультранизкочастотные вариации магнитного поля при распространении в ионосфере акустико-гравитационных волн. *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2011. № 5. С. 75.

Некрасов А.К., Пилипенко В.А. МГД-волны в столкновительной плазме солнечной короны и земной ионосферы. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 4. С. 18–25. DOI: [10.12737/szf-64202003](https://doi.org/10.12737/szf-64202003).

Погорельцев А.И. Возмущения электрического и магнитного полей, вызываемые взаимодействием атмосфер-

ных волн с ионосферной плазмой. *Геомагнетизм и аэронаука.* 1989. Т. 29, № 2. С. 286–292.

Руленко О.П., Климин Н.Н., Дьяконова И.И., Киринов В.Ю. Исследования электризации облаков, создаваемых распылением вулканического пепла. *Вулканология и сейсмология.* 1986. № 5. С. 17–29.

Сорокин В.М., Федорович Г.В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме.* М.: Энергоиздат, 1982. 135 с.

Сорокин В.М., Ященко А.К., Сурков В.В. Генерация геомагнитных возмущений в ионосфере волной цунами. *Геомагнетизм и аэронаука.* 2019. Т. 59, № 2. С. 236–248. DOI: [10.1134/S0016794019020135](https://doi.org/10.1134/S0016794019020135).

Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Первалова Н.П., Полякова А.С. *Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS.* Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 259 с.

Aplin K.L., Bennett A.J., Harrison R.G., Houghton I.M.P. Chapter 6 – Electrostatics and in situ sampling of volcanic plumes. *Volcanic Ash: Hazard Observation and Monitoring.* Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 99–113. DOI: [10.1016/B978-0-08-100405-0.00010-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100405-0.00010-0).

Arason P., Bennett A.J., Burgin L.E. Charge mechanism of volcanic lightning revealed during the 2010 eruption of Eyjafjallajökull. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, B00C03. DOI: [10.1029/2011JB008651](https://doi.org/10.1029/2011JB008651).

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

Behnke S., Edens H., Thomas R., et al. Investigating the origin of continual radio frequency impulses during explosive volcanic eruptions. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. Vol. 123, iss. 8. P. 4157–4174. DOI: [10.1002/2017JD027990](https://doi.org/10.1002/2017JD027990).

Choosakul N., Saito A., Iyemori T., Hashizume M. Excitation of 4-min periodic ionospheric variations following the great Sumatra–Andaman earthquake in 2004. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A10313. DOI: [10.1029/2008JA013915](https://doi.org/10.1029/2008JA013915).

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Baddeley L. Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge. *J. Geophys. Res.* 2016. Vol. 121. P. 11282–11301. DOI: [10.1002/2016JA023354](https://doi.org/10.1002/2016JA023354).

Fraser B.J. Geomagnetic micropulsations from the high altitude nuclear explosion above Johnston Island. *J. Geophys. Res.* 1962. Vol. 67. P. 4926.

Harding B.J., Wu Y.-J.J., Alken P., 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. *Geophys. Res. Lett.* 2022. Vol. 49, e2022GL098577. DOI: [10.1029/2022GL098577](https://doi.org/10.1029/2022GL098577).

Harper M.J., Cimarelli C., Cigala V., et al. Charge injection into the atmosphere by explosive volcanic eruptions through triboelectricity and fragmentation charging. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2021. Vol. 574, 117162. DOI: [10.1016/j.epsl.2021.117162](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117162).

Iyemori T., Nose M., Han D.-S., et al. Geomagnetic pulsations caused by the Sumatra earthquake on December 26, 2004. *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, L20807. DOI: [10.1029/2005GL024083](https://doi.org/10.1029/2005GL024083).

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, 103. DOI: [10.1186/s40623-022-01653-y](https://doi.org/10.1186/s40623-022-01653-y).

James M.R., Wilson L., Lane S.J., et al. Electrical charging of volcanic plumes. *Planetary Atmospheric Electricity.* NY: Springer, 2008. P. 399–418.

Kanamori H., Mori J. Harmonic excitation of mantle Rayleigh waves by the 1991 eruption of Mount Pinatubo, Philippines. *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 19. P. 721–724. DOI: [10.1029/92GL00258](https://doi.org/10.1029/92GL00258).

- Kanamori H., Mori J., Harkrider D.G. Excitation of atmospheric oscillations by volcanic eruptions. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 21947–21961.
- Lane S.J., James M.R., Gilbert J.S. Electrostatic phenomena in volcanic eruptions. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2011. Vol. 301, 012004. P. 1–4. DOI: [10.1088/1742-6596/301/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/301/1/012004).
- Matsumura M., Iyemori T., Tanaka Y., et al. Acoustic resonance between ground and thermosphere. *Data Sci. J.* 2009. Vol. 8. P. 68–77.
- Mazur N.G., Fedorov E.N., Pilipenko V.A., Vakhnina V.V. ULF electromagnetic field in the upper ionosphere excited by lightning. *J. Geophys. Res.* 2018. Vol. 123. P. 6692–6702. DOI: [10.1029/2018JA025622](https://doi.org/10.1029/2018JA025622).
- Nickolaenko A.P., Schekotov A.Y., Hayakawa M., et al. Electromagnetic manifestations of Tonga eruption in Schumann resonance band. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2022. Vol. 237, 105897. DOI: [10.1016/j.jastp.2022.105897](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105897).
- Nishida K., Kobayashi N., Fukao Y. Resonant oscillations between the solid Earth and the atmosphere. *Science*. 2000. Vol. 287. P. 2244–2246.
- Saito A., Tsugawa T., Otsuka Y., et al. Acoustic resonance and plasma depletion detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*. 2011. Vol. 63. P. 863–867.
- Shinagawa H., Iyemori T., Saito S., Maruyama T. A numerical simulation of ionospheric and atmospheric variations associated with the Sumatora earthquake on December 26, 2004. *Earth Planets Space*. 2007. Vol. 59. P. 1015–1026.
- Shiokawa K., Nomura R., Sakaguchi K., et al. The STEL induction magnetometer network for observation of high-frequency geomagnetic pulsations. *Earth Planets Space*. 2010. Vol. 62. P. 517–524.
- Tahira M. Acoustic resonance of the atmosphere at 3.7 mHz. *J. Atmos. Sci.* 1995. Vol. 52. P. 2670–2674.
- Themens D.R., Watson C., Žagar N., et al. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth and Space Sci. Open Archive*. 2022. DOI: [10.1002/essoar.10510350.1](https://doi.org/10.1002/essoar.10510350.1).
- Thomas R.J., Krehbiel P., Rison W., et al. Lightning and electrical activity during the 2006 eruption of Augustine volcano. *The 2006 eruption of Augustine volcano, Alaska*. Professional Paper 1769. U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey, 2007. P. 579–608.
- Van Eaton A.R., Schneider D.J., Smith C.M., et al. Did ice-charging generate volcanic lightning during the 2016–2017 eruption of Bogoslof volcano, Alaska? *Bulletin of Volcanology*. 2020. Vol. 82, 24. DOI: [10.1007/s00445-019-1350-5](https://doi.org/10.1007/s00445-019-1350-5).
- Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga eruption event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.* 2022. Vol. 127, e2022JA030540. DOI: [10.1029/2022JA030540](https://doi.org/10.1029/2022JA030540).
- Yuen D.A., Scruggs M.A., Spera F.J., et al. Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *Earthquake Res. Adv.* 2022. Vol. 2, iss.3. 100134. DOI: [10.1016/j.eqrea.2022.100134](https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134).
- Zettergren M.D., Snively J.B. Ionospheric response to infrasonic-acoustic waves generated by natural hazard events. *J. Geophys. Res.* 2015. Vol. 120. P. 8002–8024. DOI: [10.1002/2015JA0211-16](https://doi.org/10.1002/2015JA0211-16).
- Zhang S-R., Vierinen J., Aa E., et al. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Front. Astron. Space Sci.* 2022. Vol. 9, 871275. DOI: [10.3389/fspas.2022.871275](https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275).
- URL: www.intermagnet.org (дата обращения 29 сентября 2022 г.).
- URL: <https://graphics.reuters.com/TONGA-VOLCANO/LIGHTNING/zgpomjdbypd/> (дата обращения 29 сентября 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Мартинес-Беденко В.А., Пилипенко В.А., Шиокава К., Акбашев Р.Р. Электромагнитные УНЧ/КНЧ-колебания, вызванные извержением вулкана Тонга. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 1. С. 51–59. DOI: [10.12737/szf-91202306](https://doi.org/10.12737/szf-91202306).