УДК 622:504(622.271.3: 622.012.3: 622.235)

ВАРИАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАЙ 15 ЯНВАРЯ 2022 г.

© 2023 г. Ю. С. Рыбнов[1, *], С. П. Соловьев[1, **], А. В. Крашенинников[1], С. Ю. Рыбнов[1]

[1]Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

**E-mail: rybnov.y@mail.ru*

***E-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru*

Приводятся данные инструментальных наблюдений, выполненных в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН в период взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Показано, что эксплозия вулкана вызвала серию волновых возмущений в атмосфере – акустико-гравитационные волны (АГВ) зарегистрированы в виде волн Лэмба с источником в эпицентре эксплозии; периоды прохождения АГВ сопровождались синхронными возмущениями не только напряженности электрического поля, но и концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы. Характерные частоты этих возмущений приходятся на диапазон, включающий частоту Брента–Вяйсяля.

Ключевые слова: вулкан, извержение, эксплозия, акустико-гравитационная волна, концентрация микрочастиц, вариации электрического поля.

Для цитирования: *Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Крашенинников В.А., 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_2023_15_1_63

Введение

Климатическая изменчивость и связанный с ней значительный рост опасных атмосферных явлений в последние десятилетия вызывают повышенный интерес к изучению подобных явлений природного и техногенного характера [Climate …, 2021; Обзор …, 2021; Adushkin, Spivak, 2021]. Изучение вулканической деятельности всегда представляло интерес как с точки зрения возникновения аномальных погодных явлений, так и прогнозирования климатических изменений. Особо следует выделить сильные извержения вулканов, которые сопровождаются значительными объемами выброшенной в земную атмосферу газо-пепловой массы, что вызывает не только локальное загрязнение атмосферы, но и приводит к изменению температурного режима планеты в течение продолжительного времени [Robock, 2000]. В этих случаях максимальная высота эруптивной колонны достигает стратосферы и даже может превышать высоту ее верхней границы (≈50 км). Например, извержения вулканов Кракатау (27.08.1883 г.) и Безымянный (30.03.1956 г.), формировали эруптивные колонны, достигающие высоты 55 и 40 км соответственно. Еще большей высоты достигла верхняя часть эруптивного облака при извержении вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (15.01.2022 г.). По данным исследовательского центра NASA в Лэнгли, где анализировались снимки с геостационарного оперативного экологического спутника NOAA 17 (GOES-17) и Himawari-8 Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA), было установлено, что шлейф от извержения вулкана 15 января поднялся до 58 км (https://earthobservatory.nasa.gov/images/149474/tonga-volcano-plume-reached-the-mesosphere).

Действительно, извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. было одним из самых мощных эксплозивных извержений за последнее время и вызвало возмущения во всех слоях

атмосферы, включая ионосферу, а также глобальное цунами [Matoza et al., 2022; Адушкин и др., 2022; Themens et al., 2022]. По оценкам, приведенным в [Адушкин и др., 2022], энергия эксплозии вулкана лежит в пределах $2.6 \cdot 10^{17}$–10^{18} Дж, что в пересчете на взрывной источник соответствует диапазону от 60 до 200 Мт тротилового взрыва. Следствием мощных извержений является ряд геофизических эффектов, связанных с формированием волновых движений воздушных масс в атмосфере [James et al., 2000; Johnston, 1997; Lane, Gilbert, 1992; Mather, Harrison, 2006; Адушкин и др., 2022]. Это, в первую очередь, интенсивные АГВ, которые могут распространяться на многие тысячи километров и огибать земной шар. Так было и в случае извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай – мощная и короткая по времени[1] эксплозия вулкана привела к генерации сильных атмосферных волн, которые были зарегистрированы большим количеством метеостанций по всему миру [Matoza et al., 2022; Адушкин и др., 2022]. Даже на Аляске были отмечены звуковые эффекты извержения, что само по себе является уникальным явлением.

Наряду с волновыми возмущениями в нижней атмосфере при извержениях вулканов регистрируются и возмущения в ионосфере. Так, в [Themens et al., 2022] представлены экспериментальные данные с более чем 4735 глобально распределенных приемников глобальной навигационной спутниковой системы для отслеживания развития перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), связанных с извержением подводного вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. Известно, что подобные ПИВ вызывают возмущения интегральной электронной плотности ионосферы [Dautermann et al., 2009; Komjathy et al., 2016], а в некоторых случаях могут вызывать и значительный наклон ионосферы, который имеет существенные последствия для распространения радиоволн на высоких частотах.

Распространение АГВ в нижней атмосфере сопровождается образованием неоднородностей, которые приводят к возмущениям локальных геофизических полей. В настоящей работе рассматриваются вариации атмосферного давления, концентрации микрочастиц и напряженности электрического поля, которые были обусловлены воздействием на атмосферу извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай и зарегистрированы в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН. Цель исследований – демонстрация, на конкретном примере, сильного вулканического извержения и вызванных им возмущений геофизических полей в приземном слое атмосфере, что представляется весьма важным с точки зрения влияния вулканической деятельности на среду обитания и на возможные изменения климатических параметров.

Измерительная аппаратура

В качестве исходных данных были использованы результаты регистрации вариаций атмосферного давления, концентрации микрочастиц в атмосфере, напряженности электрического поля и метеорологических параметров в Центре геофизического мониторинга г. Москвы (ЦГМ) ИДГ РАН (GEO: 55.71°N; 37.57°E) [Спивак и др., 2016]. Акустико-гравитационные волны регистрировались с помощью микробарометра МБ-03, обеспечивающего устойчивую регистрацию вариаций атмосферного давления с амплитудой до ± 200 Па в диапазоне частот 0.0003–10 Гц (по уровню – 3 дБ) [Адушкин и др., 2020].

Вариации напряженности атмосферного электрического поля регистрировались электростатическими флюксметрами [Адушкин и др., 2018]: измерителем напряженности электрического поля – ИНЭП и EFM-100 – electric field monitor, фирмы Boltek. Диапазон измерения напряженности поля ± 5000 В/м в полосе частот 0–10 Гц.

Для регистрации концентрации микрочастиц была разработана оригинальная система на основе аппаратной платформы Arduino Uno и лазерного датчика твердых частиц Sensirion SPS30 [Крашенинников и др., 2021]. В процессе наблюдений измерение концентрации частиц проводилось с частотой 1 Гц, что позволило получить детальную информацию о характере изменений во времени концентрации частиц. Диапазон размеров измеряемых частиц составляет от 0.3 до 10 мкм. Датчик

[1] Длительность эксплозивной стадии извержения не превышала 8 мин.

микрочастиц способен работать в температурных условиях от –10 до 60° С, что важно для проведения измерений вне помещений. Датчик Sensirion SPS30 сертифицирован MCERTS Performance Standards for Indicative Ambient Particulate Monitors (№ SiraMC200350/01) для измерений PM2.5 в диапазоне 0–75 мкг/м^3 (в исследовании акцент был сделан на этот диапазон частиц). SPS30 хорошо себя показывает при длительной работе (согласно заявлениям производителя, возможна непрерывная работа более 10 лет), благодаря встроенной технологии самоочищения, что особенно необходимо при стационарных измерениях концентрации частиц.

Регистрация временного хода метеопараметров (абсолютное давление, температура, влажность, скорость ветра и т.д.), характеризующих состояние приземной атмосферы, выполнялась с помощью автоматизированной цифровой метеостанции Davis Vantage Pro 2.

Экспериментальные данные

Колебания атмосферного давления. Эксплозивный характер извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай привел к генерации сильных атмосферных волн, которые регистрировались метеостанциями по всему миру [Matoza et al., 2022; Адушкин и др., 2022]. На рис. 1 приведены фрагменты записи атмосферного давления в период с 15 по 19 января 2022 г. в ЦГМ ИДГ РАН.

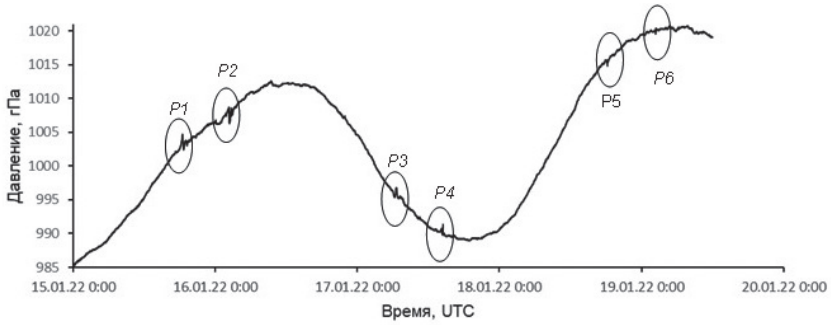

Рис. 1. Ход атмосферного давления с 15 по 19 января 2022 г., зарегистрированный метеостанцией Davis Vantage Pro 2 в ЦГМ ИДГ РАН

На суточном ходе абсолютного давления отчетливо проявляются 6 сигналов (*P1*…*P6*), пришедшие в пункт наблюдений в *P1* – ~18:30 UTC 15.01.2022 г., *P2* – ~02:25 UTC 16.01.2022 г., *P3* – ~06:40 UTC 17.01.2022 г., *P4* – ~14:13 UTC 17.01.2022 г., *P5* – ~17:55 UTC 18.01.2022 г. и *P6* ~02:20 UTC 19.01.2022 г.

Первый сигнал *P1* – это пришедший в ЦГМ первичный сигнал с азимутом на эпицентр вулкана. Второй сигнал *P2* – сигнал от виртуального источника, сформировавшегося в результате схождения первичного сигнала, огибающего земную сферу, в точке антипода [Адушкин и др., 2022]. Этот первый антиподальный сигнал зарегистрирован с азимута противоположного азимуту первичного сигнала. Третий и четвертый сигналы *P3* и *P4* – соответственно второй прямой и второй антиподальный сигналы, сформировавшиеся при повторном огибании земного шара основным (первичным) сигналом. Пятый и шестой сигналы *P5* и *P6* – соответствуют третьему разу огибания земного шара.

Для анализа использовались только сигналы *P1* и *P2*, когда было зарегистрировано синхронное увеличение концентрации микрочастиц и вариаций напряженности электрического поля в атмосфере. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Сигналы были зарегистрированы в ночное время суток, когда приземный слой атмосферы устойчиво стратифицирован. Кроме того, в это время суток значительно снижается уровень техногенного пылевого фона, обусловленного строительством и движением транспорта. Волновые формы сигналов, зарегистрированных с помощью микробарометра МБ-03, приведены на рис. 2.

Размах амплитуды сигналов составил: *P1* ≈ 260, а *P2* ≈ 230 Па. С учетом скорости распространения (≈312 м/с) и слабым затуханием с расстоянием, эти сигналы представляют собой акустико-гравитационные волны в виде волн Лэмба, распространяющихся в стратосферном волноводе [Gossard, Hook, 1975; Куличков, 1987; Адушкин и др., 2022].

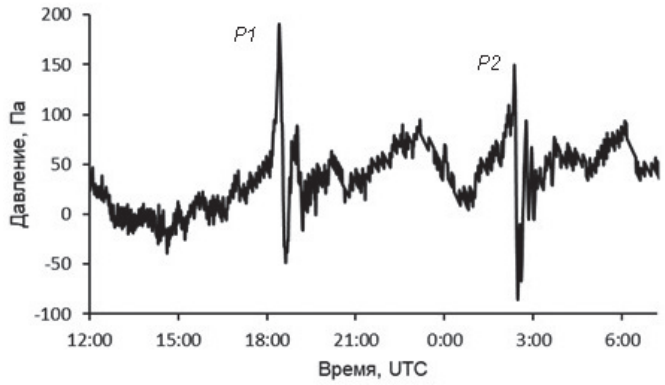

Рис. 2. Волновые формы сигналов, зарегистрированных в ЦГМ ИДГ РАН 15 января 2022 г. в 18:30 UTC – *P1*; 16 января 2022 г.в 02:25 UTC – *P2*

Эффект увеличения концентрации микрочастиц. 15 и 16 января 2022 г. при прохождении сигналов *P1* и *P2* было зарегистрировано увеличение концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы. Это хорошо видно из рис. 3, на котором приведены записи вариаций концентрации микрочастиц. В [Kulichkov, et al., 2022] отмечается, что при измерениях на Останкинской телебашне на высоте 130 м так же было зарегистрировано увеличение концентрации аэрозольных микрочастиц от волны Лэмба.

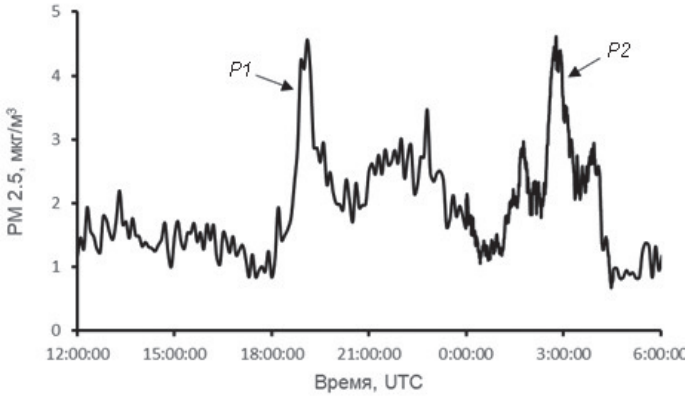

Рис. 3. Вариации концентрации микрочастиц в воздухе, зарегистрированных в ЦГМ ИДГ РАН в периоды прохождения сигналов *P1* и *P2*

Вариации напряженности электрического поля. Анализ записей вариаций напряженности электрического поля в первые сутки после извержения вулкана показал, что приход первого сигнала *P1* вызвал ярко выраженные знакопеременные вариации (рис. 4в) с характерными частотами и средним размахом амплитуды ~40 В/м. Максимальная величина амплитуды сигнала составила ~80 В/м. Для удаления низкочастотных трендов исходные записи фильтровались в полосе частот от 0.0003 до 0.03 Гц (данный диапазон включает характерные частоты прямой волны *P1* и антипода *P2*).

На рис. 4 приведены записи первой группы

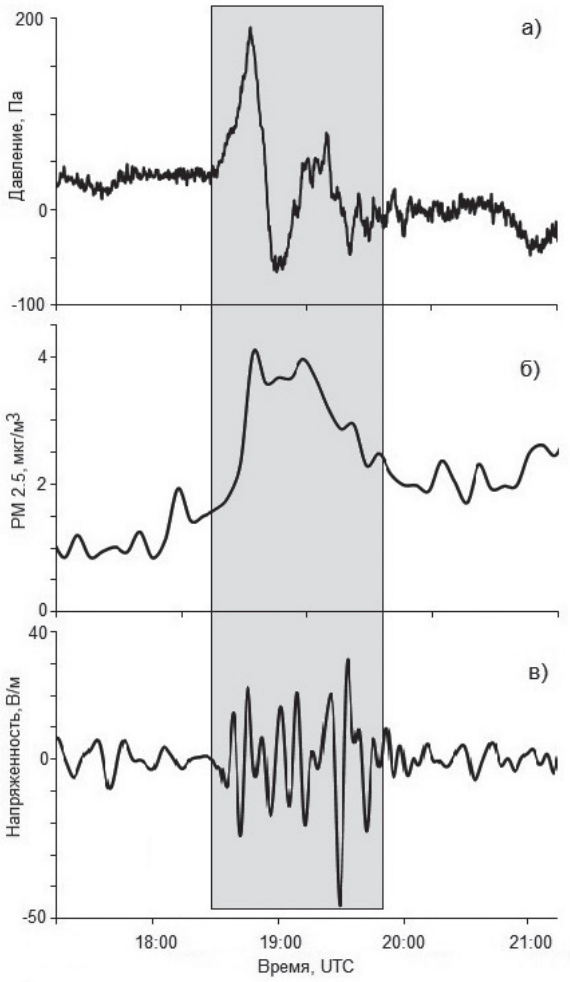

Рис. 4. Синхронные записи АГВ (а), концентрации микрочастиц в воздухе (б), вариаций напряженности электрического поля (в) в период прохождения сигнала *P1*

сигналов, включающей вариации атмосферного давления, концентрации микрочастиц в атмосфере и напряженности атмосферного электрического поля. По временным параметрам АГВ первая группа сигналов на рис. 4 соответствует приходу первого сигнала *P1* (~18:30 UTC 15.01.2022 г. на рис. 1) с азимута на эпицентр вулкана. Наблюдается достаточно хорошая их временная синхронизация. Можно так же отметить, что прохождение первого

сигнала *P1* вызвало повышение относительной влажности воздуха.

На рис. 5 приведены синхронные записи двух групп сигналов, включающих вариации атмосферного давления, концентрации микрочастиц в атмосфере и напряженности атмосферного электрического поля, которые соответствуют приходам прямой волны *P1* и антипода *P2*.

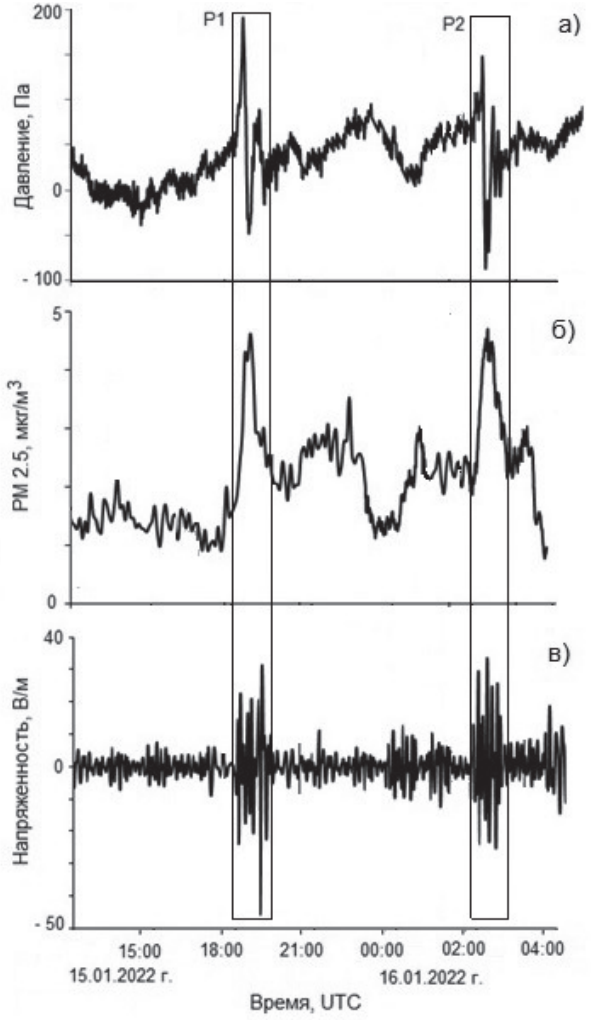

Рис. 5. Синхронные записи вариаций давления (а), концентрации микрочастиц в воздухе (б), вариаций напряженности электрического поля (в)

Обсуждение результатов наблюдений

Одним из существенных факторов, воздействующих на атмосферу Земли при извержении вулканов, является генерация мощных АГВ – эксплозия вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай вызвала три прямых и три антиподальных волны, обогнувших Землю. Как было отмечено выше, анализировались две группы волн прямого *P1* и антиподального *P2* сигналов, зарегистрированных в ЦГМ ИДГ РАН 15 и 16 января 2022 г. Для выяснения основных частот этих сигналов получены оценки спектральной плотности вариаций давления $S_p(f)$ для фрагментов записей, включающих сигналы *P1* и *P2*. На рис. 6 приведено изменение спектральной плотности вариаций давления S_p, в зависимости от частоты *f*.

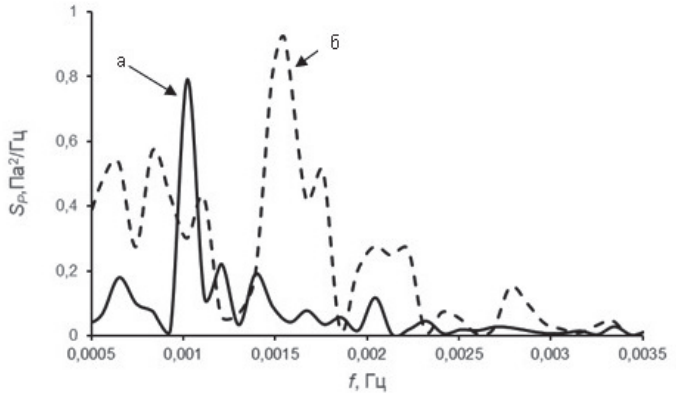

Рис. 6. Изменение спектральной плотности вариаций давления S_p в зависимости от частоты *f* для сигналов *P1* (а) и *P2* (б)

Характерными частотами для АГВ в атмосфере являются следующие: предельная акустическая частота или резонансная частота атмосферы для акустической моды и частота Брента–Вяйсяля (Б–В), или частота резонанса смещенного объема воздуха. Эти частоты являются границей раздела между акустическими и внутренними гравитационными волнами. Для стандартной атмосферы предельная акустическая частота ω_a и частота Б–В ω_N принимают значения: ω_a = 0.02 рад/с или 0.0032 Гц и ω_N = 0.018 рад/с или 0.0029 Гц [Хргиан, 1978]. Однако частота Б-В не является постоянной величиной и зависит от термодинамических параметров атмосферы, что видно из выражения

$$\omega_N^2 = \frac{g}{\theta}\frac{d\theta}{dz} = g\frac{\gamma_a - \gamma_b}{T_1},$$

где γ_a – сухоадиабатический градиент температуры; γ_b – влажноадиабатический градиент температуры; T_1 – характерная (средняя) температура рассматриваемого слоя атмосферы. При изменении температуры и влажности атмосферного воздуха частота Б–В может заметно

сдвинуться в сторону более низких частот. В устойчиво стратифицированной атмосфере частота Б–В может находиться в диапазоне ~0.0005–0.0029 Гц.

Из рис. 6 видно, что характерные частоты сигналов *P1* и *P2* составляют ≈ 0.0011 и ≈ 0.0016 Гц соответственно. Эти частоты приходятся на полосу частоты Б–В, указанную выше. В связи с этим необходимо отметить, что, когда характерные частоты АГВ близки к частоте Б–В или резонансной частоте атмосферы, влияние таких АГВ на другие процессы в приземном слое атмосферы особенно велико [Gossard, Hook, 1975; Романова, Якушкин, 1995]. В частности, такие волны играют значительную роль в развитии мелкомасштабных атмосферных аномалий, внося вклад в энергетику других геофизических процессов [Einaudi, Finnigan, 1993; Романова, Якушкин, 1995]. Это особенно ярко проявляется в условиях устойчивой стратификации, характерной для ночного времени суток [Einaudi, Finnigan, 1993; Романова, Якушкин, 1995].

На рис. 7 приведено изменение спектральной плотности вариаций концентрации микрочастиц S_{pm} в зависимости от частоты *f*.

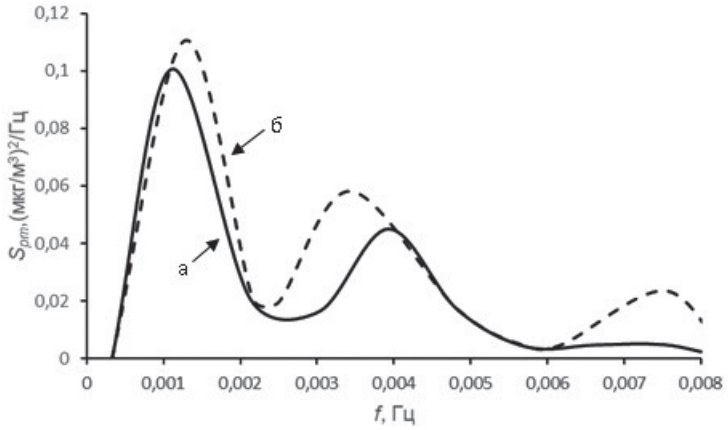

Рис. 7. Изменение спектральной плотности вариаций концентрации микрочастиц S_{pm} в зависимости от частоты *f* для фрагментов записи сигналов, соответствующих периодам прохождения сигналов *P1* (а) и *P2* (б)

Из рис. 7 видно, что характерные частоты возмущений концентрации микрочастиц составляют ≈ 0.0012 и ≈ 0.0014 Гц соответственно. Эти частоты близки к характерным частотам сигналов *P1* и *P2*.

Сравнивая характер вариаций сигналов, приведенных на рисунках 4 и 5, можно отметить, что вариации напряженности электрического поля содержат более широкий набор характерных частот. На рис. 8 приведено изменение спектральной плотности вариаций напряженности электрического поля S_E в зависимости от частоты *f* для фрагментов записи сигналов, соответствующих периодам прохождения сигналов *P1* и *P2*. Из рис. 8 видно, что зависимость $S_E(f)$ содержит целый ряд спектральных пиков, тем не менее, главные спектральные максимумы приходятся на частоты ≈ 0.0012 и ≈ 0.0016 Гц. Эти значения близки к частотам главных максимумов спектральной плотности, приведенных на рисунках 6 и 7.

Эффекты, связанные с возникновением возмущений электрического поля при распространении

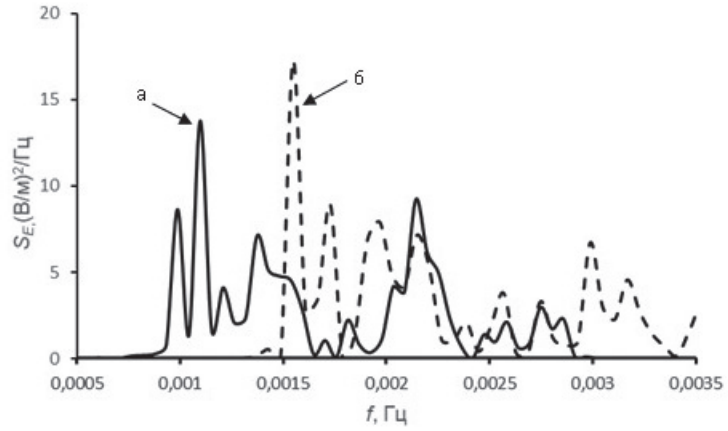

Рис. 8. Изменение спектральной плотности вариаций напряженности электрического поля S_E в зависимости от частоты *f* для фрагментов записи сигналов, соответствующих периодам прохождения сигналов *P1*(а) и *P2*(б)

АГВ в атмосфере, регистрировались и ранее [Соловьев, Сурков, 1994; Рыбнов, Соловьев, 2007; 2019; Соловьев и др., 2017]. В этих работах для ряда источников было показано, что при распространении АГВ в приземном слое атмосферы наблюдаются синхронные возмущения поля давления и электрического поля для довольно широкого диапазона периодов колебаний: от колебаний на частоте Б–В и до колебаний в акустической области.

Таким образом, наблюдения за вариациями геофизических полей в ЦГМ ИДГ РАН с 15 по 19 января 2022 г., когда наблюдались возмущения, обусловленные мощным воздействием на атмосферу эксплозивного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, показали, что периоды прохождения АГВ сопровождались синхронными возмущениями не только напряженности электрического поля, но и концентрации микрочастиц в приземном слое атмосферы. Подобный характер вариаций давления, концентрации микрочастиц и напряженности электрического поля указывает на взаимосвязь протекающих процессов. Важно отметить, что характерные частоты этих возмущений приходятся на диапазон, включающий частоту Б–В. По-видимому, воздействие на атмосферные процессы со стороны АГВ на этих частотах оказывается наиболее заметным.

Если говорить о механизме воздействия поля давления на атмосферное электрическое поле, то для случая акустических колебаний такой механизм был рассмотрен в работах [Соловьев, Сурков, 1994; Соловьев и др., 2017]. В основе модели лежало предположение, что источником возмущений атмосферного электрического поля являлась локальная область изменения давления в акустической волне. Увеличение плотности воздуха за фронтом волны и последующее ее уменьшение в фазе разряжения приводит к локальному изменению плотности объемного электрического заряда, которое проявляется в возмущениях электрического поля. В результате были получены теоретические оценки возмущений напряженности атмосферного электрического поля, обусловленные распространяющейся акустической волной. Результаты оценок соответствуют величинам, зафиксированным при проведении наблюдений, что подтверждает физическое представление, лежащее в основе этих оценок. В отличие от возмущений в области акустических колебаний, для анализа связи вариаций давления и напряженности атмосферного электрического поля на частотах Б–В необходимо дополнительно учитывать действие гравитационных сил, поскольку волна становится двухкомпонентной. Но, возможно, и в данном случае подобный механизм вносит свой вклад – вариации давления приводят к изменениям плотности объемного электрического заряда в нижних слоях атмосферы, и, как следствие, к изменению напряженности атмосферного электрического поля, вариации которого наблюдаются синхронно с вариациями давления. Полученные экспериментальные данные будут служить основой для разработки моделей, описывающих взаимосвязь не только вариаций давления и напряженности атмосферного электрического поля, но также и концентрации микрочастиц, поскольку микрочастицы наряду с атмосферными ионами являются носителями электрических зарядов в атмосфере.

Заключение

Представлены результаты экспериментальных наблюдений в ЦГМ ИДГ РАН, которые были получены в период взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. Эксплозия вулкана вызвала серию мощных волновых возмущений в атмосфере. В период с 15 по 19 января 2022 г. было зарегистрировано 6 сигналов. С учетом скорости распространения (≈ 312 м/с) и слабым затуханием с расстоянием, эти сигналы представляют собой АГВ в виде волн Лэмба, распространяющихся в стратосферном волноводе. Максимальные амплитуды волновых возмущений зарегистрированы во время прихода первого и второго сигналов 15 и 16 января, размах амплитуды этих сигналов составил 260 и 230 Па соответственно.

Анализ данных наблюдений за вариациями давления, электрического поля и концентрации микрочастиц в атмосфере показал, что периоды прохождения АГВ 15 и 16 января сопровождались синхронными возмущениями как напряженности электрического поля, так и концентрации микрочастиц. Наличие синхронных квазипериодических колебаний давления, напряженности электрического

поля и концентрации микрочастиц позволяет предположить, что такие вариации могут иметь один источник возбуждения, обусловленный изменениями плотности воздуха при прохождении АГВ и плотности электрических зарядов, связанных с этими объемами воздуха. Причем, характерные частоты синхронных возмущений приходятся на диапазон близкий к частоте Б-В. По-видимому, воздействие на атмосферные процессы со стороны АГВ на этих частотах оказывается наиболее эффективным.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования (*тема № 122032900185-5*).

Список литературы

Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Волновые, электрические и магнитные эффекты катастрофического извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. // Вулканология и сейсмология, 2022, № 4, С. 17–30.

Адушкин В.В., Соловьев С.П., Спивак А.А. Электрические поля техногенных и природных процессов. М. : ГЕОС, 2018. –464 с.

Адушкин В.В., Рыбнов Ю.С., Спивак А.А. Инфразвук в атмосфере. М. : ГЕОС. 2020.

Крашенинников А.В., Локтев Д.Н., Соловьев С.П., Спивак А.А. Компактные лазерные датчики концентрации микрочастиц в воздухе и их применение в центре геофизического мониторинга ИДГ РАН // Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100, № 3, с. 5–18. https://doi.org/10.21455/std2021.3-2

Куличков С.Н. О распространении волн Лэмба в атмосфере вдоль земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика земли и океана. 1987. Т. 23. № 12. С. 1251–1261.

Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 г. М. : Росгидромет, 2021. –205 с.

Романова Н.Н., Якушкин И.Г. Внутренние гравитационные волны в нижней атмосфере и источники их генерации // Известия АН. Физика атмосферы и океана, 1995, т. 11, № 2, С. 163–186.

Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П. Исследование возмущений электрического и акустико-гравитационного полей при прохождении атмосферного фронта. В сборнике трудов. VI Российская конференция по атмосферному электричеству. Нижний Новгород. 2007. С. 233–234.

Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П. Синхронные вариации атмосферного давления и электрического поля при прохождении солнечного терминатора // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 2. С. 249–257. DOI: 10.1134/S0016794019020123.

Соловьев С.П., Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Крашенинников А.В. Акустико-гравитационные волны и сопутствующие им возмущения атмосферного электрического поля // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 3. С. 363–375.

Соловьев С.П., Сурков В.В. Электрические возмущения в приземном слое атмосферы, обусловленные воздушной ударной волной // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30. № 1. С. 117–121.

Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Рыбнов Ю.С., Соловьев С.П., Харламов В.А. Аппаратура и методики для мониторинга геофизических полей мегаполиса и их применение в Центре геофизического мониторинга г. Москвы ИДГ РАН // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 65–78.

Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т. 1. Л. : Гидрометеоиздат. 1978. –247 с.

Adushkin V.V., Spivak A.A. Impact of Natural Extreme Events on Geophysical Fields in the Environment // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. № 5. P. 583– 592.

Climate change 2021. The Physical Science Basis. IPCC Sixth Assessment Report. Geneve, 2021. –3949 p.

Dautermann T., Calais, E. & Mattioli G.S. Global Positioning System detection and energy estimation of theionospheric wave caused by the 13 July 2003 explosion of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat // Journal of Geophysical Research. 2009. 114. B02202. https://doi.org/10.1029/2008JB005722

Einaudi F., Finnigan J.J. Wave-turbulence dynamics in the stably stratified boundary layer // J. Atmos. Sci. 1993. V. 50. № 13. P. 1841–1864.

Gossard E.A., Hook W.H. Waves in the Atmosphere. Amsterdam; Oxford. N.Y.: Elsivier Sci. Publ. Comp., 1975. –456 p.

James M.R., Lane S.J., Jennie S.G. Volcanic plume electrification: experimental investigation of a fracture-charging mechanism // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2000. V. 105. B7. P. 16641–16649.

Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity // Surveys in Geophysics. 1997. V. 18. P. 441–475.

Komjathy A., Yang Y.-M., Meng X., Verkhoglyadova O., Mannucci A.J. & Langley R.B. Review and perspectives: Understanding natural-hazards-generated ionospheric perturbations using GPS measurements and coupled modeling. Radio Science. 2016. 51. P. 951–961. https://doi.org/10.1002/2015RS005910

Kulichkov S.N. et al. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami // Pure and Applied Geophysics. 2022. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4. https://www.researchgate.net/publication/360452468

Lane S.J., Gilbert J.S. Electric potential gradient changes during explosive activity at Sakurajima volcano, Japan // Bull. of Volcanology. 1992. V. 54. № 7. P. 590–594.

Mather T.A., Harison R.G. Electrification of volcanic plumes // Surveys in Geophysics. 2006. V. 27. № 4. P. 387–432.

Matoza R.S., Fee D., Assink J.D. et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. 2022. Vol. 377, Issue 6601. p. 95–100. DOI: 10.1126/science.abo7063.

Robock A. Volcanic eruptions and climate // Rev. Geophys. 2000. V. 38. P. 191–219.

Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylkevych S., Elvidge S., McCaffrey A. et al. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption // Geophysical Research Letters. 2022. 49. e2022GL098158. https://doi. org/10.1029/2022GL098158

GEOPHYSICAL FIELDS VARIATIONS DURING THE ERUPTION OF THE HUNGA-TONGA- HUNGA-HAAPAI VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

© 2023 Yu. S. Rybnov[1, *], S. P. Soloviev[1, *], A. V. Krasheninnikov[1], S. Yu. Rybnov[1]

[1]Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: rybnov.y@mail.ru*

*** E-mail: soloviev@idg.chph.ras.ru*

The data of instrumental observations performed at the Center for Geophysical Monitoring of Moscow, IDG RAS during the explosive eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Haapai volcano on January 15, 2022, are presented. It is shown that the volcanic explosion caused a series of wave disturbances in the atmosphere. Acoustic-gravity waves were recorded as Lamb waves with a source at the epicenter of the explosion. It is shown that the periods of acoustic-gravity waves passage were accompanied by synchronous disturbances not only of the electric field strength, but also of the concentration of microparticles. The characteristic frequencies of these perturbations closely match to the frequency range including the Brunt–Väisälä frequency.

Keywords: volcano, eruption, explosion, acoustic-gravity wave, concentration of microparticles, electric field variations.