

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ТОНГА 15 ЯНВАРЯ 2022 Г.

© 2023 г. Б. Г. Гаврилов<sup>1</sup>, \*, Ю. В. Поклад<sup>1</sup>, И. А. Ряховский<sup>1</sup>, В. М. Ермак<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

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

Поступила в редакцию 04.10.2022 г.

После доработки 02.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Показана возможность дистанционного исследования электромагнитных и ионосферных эффектов, вызванных извержением вулкана Тонга 15.01.2022 г. На расстояниях до 15000 км от источника зарегистрированы вариации геомагнитного поля, связанные с возмущением Шумановского резонанса (ШР), распространением волны Лэмба и акустико-гравитационных волн. Показано, что появление мощного источника грозовой активности, вызванного извержением, вызвало значимый рост (более, чем в три раза) амплитуды геомагнитных возмущений на частотах ШР, коррелирующий с числом молниевых разрядов. Влияния извержения на частотные характеристики ШР не обнаружено.

*Ключевые слова:* извержение вулкана, грозовая активность, волна Лэмба, акустико-гравитационные волны, геомагнитные возмущения, Шумановский резонанс.

**DOI:** 10.31857/S000233372303002X, **EDN:** JZNHQD

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Извержение подводного вулкана Хунга Тонга–Хунга Хаапай ( $20^{\circ}34'12.00''$  Ю,  $175^{\circ}22'48.00''$  З) началось 20.12.2021 г. По данным USGS 15.01.2022 г. в 04:14:45 UT произошло землетрясение магнитудой 5.8, которое сопровождалось сильнейшим выбросом в атмосферу продуктов вулканической деятельности. Через час после начала извержения 15.01.2022 г. диаметр облака составлял около 650 км, а высота подъема облака достигала 55 км.

Извержение вызвало цунами, гигантскую локальную молниевую активность и генерацию мощных атмосферных волн различного типа (инфразвук, волны Лэмба и внутренние гравитационные волны), распространяющиеся на глобальные расстояния [Vergoz et al., 2022]. Были обнаружены перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), генерацию которых связывают с воздействием волн Лэмба. Несмотря на то, что основной средой распространения волн Лэмба является тропосфера, их энергия просачивается в термосферу на частотах акустических и гравитационных волн [Zhang et al., 2022].

Количество, частота следования и энергия молниевых разрядов во время взрыва Хунга Тонга-Хаапай были рекордными для извержений

вулканов. 15 января в течение шести часов было зафиксировано почти 400000 молниевых разрядов. Появление такого гигантского локального источника молниевых разрядов должно было привести к генерации мощного электромагнитного излучения в широком диапазоне частот и возбуждению Шумановского резонатора [Nikolaenko et al., 2022].

Настоящая статья посвящена исследованию различного типа электромагнитных возмущений, вызванных извержением вулкана Тонга, анализу их пространственно-временного распределения и взаимосвязи на основе данных измерений рядом станций сети Intermagnet и обсерватории ИДГ РАН “Михнево” (МПК), аппаратурный комплекс которой дает возможность регистрации вариаций магнитного поля в широком диапазоне частот и амплитуд [Ryakhovskii et al., 2021].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 2.1. Геомагнитные и ионосферные эффекты

Генерация в процессе извержения волн Лэмба и акустико-гравитационных волн (АГВ) должна была вызвать изменения электронной концентрации в нижней ионосфере, проводимости в об-

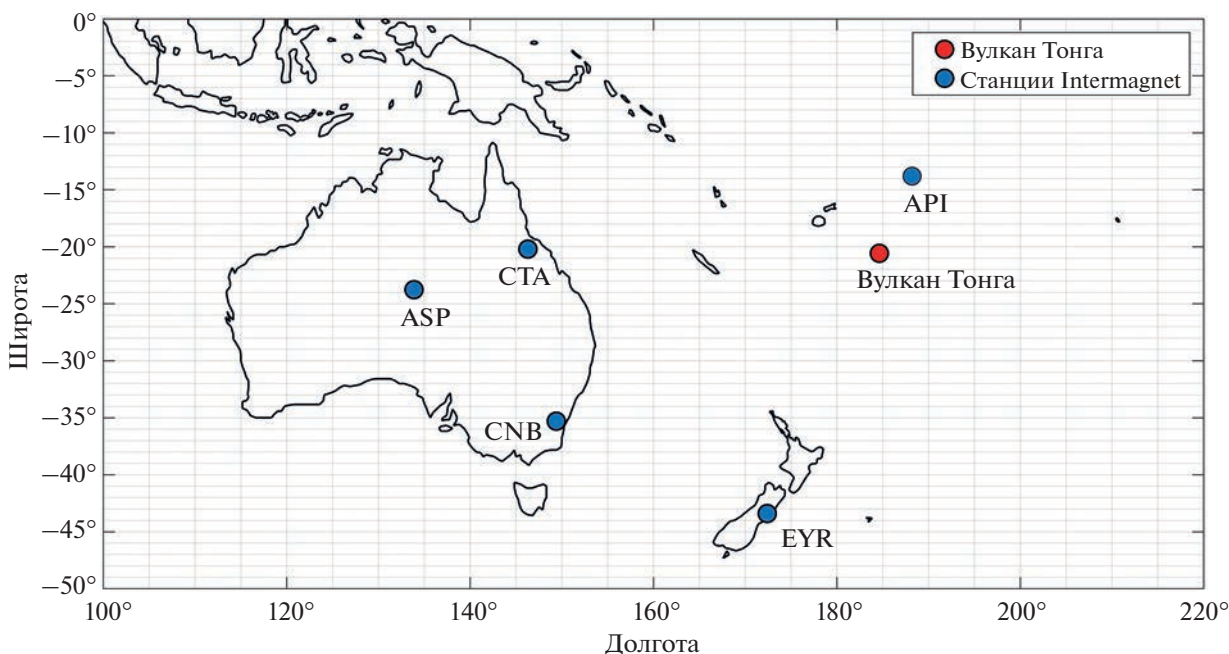


Рис. 1. Расположение вулкана Тонга и станций Intermagnet.

ласти протекания ионосферных токов, изменение их величины и ориентации и соответствующие вариации геомагнитного поля на поверхности Земли.

Для анализа геомагнитных возмущений, вызванных извержением вулкана Тонга, использовались данные сети Intermagnet<sup>1</sup> и геофизической обсерватории “Михнево”. Комплексный анализ этих данных позволил выявить геомагнитные вариации, связанные с распространением разного типа атмосферно-ионосферных волн, вызванных извержением на расстояниях свыше десяти тысяч километров от источника. Из сети Intermagnet выбраны данные ряда станций, расположенных в диапазоне расстояний до 5200 км от вулкана, где велась непрерывная трехкомпонентная запись геомагнитного поля Земли. На рис. 1 приведена схема расположения вулкана и станций Intermagnet, данные которых использованы в работе. В таблице указаны координаты и расстояние от вулкана до этих станций.

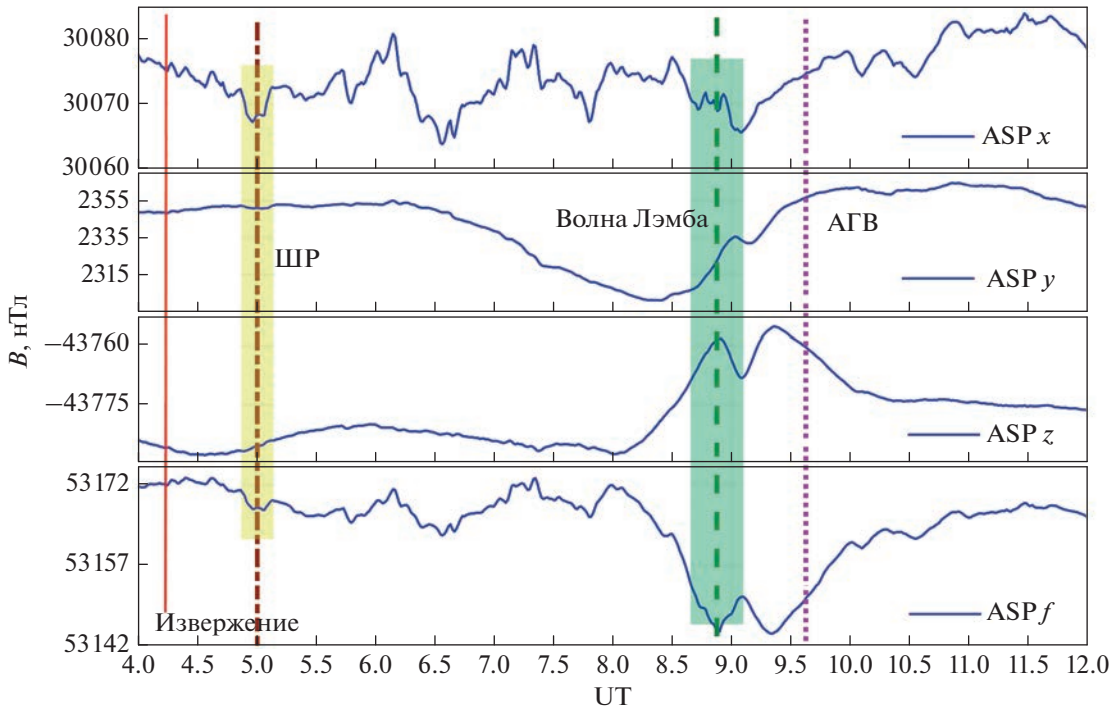
На рис. 2 показан результат трехкомпонентной регистрации вариаций геомагнитного поля в обсерватории Alice Springs (ASP) в Австралии и вариации вектора полного поля (нижняя панель). Вертикальными линиями отмечены момент извержения, момент возмущения Шумановского резонатора (ШР), время прихода волны Лэмба и

<sup>1</sup> <https://www.intermagnet.org/data-donnee/download-eng.php>

АГВ. Время извержения приведено по данным USGS, а возмущение ШР определено по данным регистрации в обсерватории МСК как время наблюдения максимальной амплитуды сигнала на частоте ШР по Y-компоненте геомагнитного поля (рис. 4). Время прихода волн Лэмба и акустико-гравитационной волны рассчитывалось из расстояния по дуге большого круга от вулкана до станции API и скоростей распространения этих волн. Желтым и зеленым прямоугольниками показано примерное время возмущения геомагнитного поля под воздействием ШР и волны Лэмба. По данным инфразвуковых наблюдений [Matoza et al., 2022] длительность интенсивной фазы волны Лэмбы составляла ~25–30 мин.

В работе [Wright et al., 2022] приводятся данные о скорости распространения волн Лэмба ( $308 \pm 5$  до  $319 \pm 4$  м/с) и АГВ ( $238 \pm 3$  до  $269 \pm 3$  м/с) в стратосфере. Для анализа связи вариаций геомагнитного поля с приходом в точку измерения возмущений различного вида атмосферных и ионосферных возмущений были приняты наиболее характерные скорости для волны Лэмба 310 м/с и АГВ 270 м/с.

Можно видеть возмущение горизонтальных компонент магнитного поля, вызванных возмущением ШР. По-видимому, именно с этим явлением связаны отмеченные в работе [Adushkin et al., 2022] аномальные вариации геомагнитного поля, регистрируемые практически одновременно



**Рис. 2.** Вариации трех компонент геомагнитного поля в обсерватории API и вариации вектора полного поля (нижняя панель). Вертикальными линиями отмечены момент извержения, момент возмущения Шумановского резонатора (ШР), время прихода волны Лэмба и АГВ. Желтым прямоугольником показан интервал времени воздействия ШР на вариации геомагнитного поля. Зеленый прямоугольник показывает примерную длительность воздействия волны Лэмба.

но на существенно отличающихся эпицентральных расстояниях от вулкана. Приход волн Лэмба и АГВ наиболее четко проявляется в вертикальной компоненте и вариациях полного поля.

С использованием того же подхода обработаны регистрограммы вариаций магнитного поля по станциям Intermagnet (табл. 1). На рис. 3 показаны вариации полного поля для станций API, EYR, CNB, СТА и ASP с отмеченным временем извержения и расчетными временами прихода волн Лэмба и АГВ. Очевидна связь возмущений геомагнитного поля с приходом соответствующих возмущений

## 2.2. Возбуждение ШР

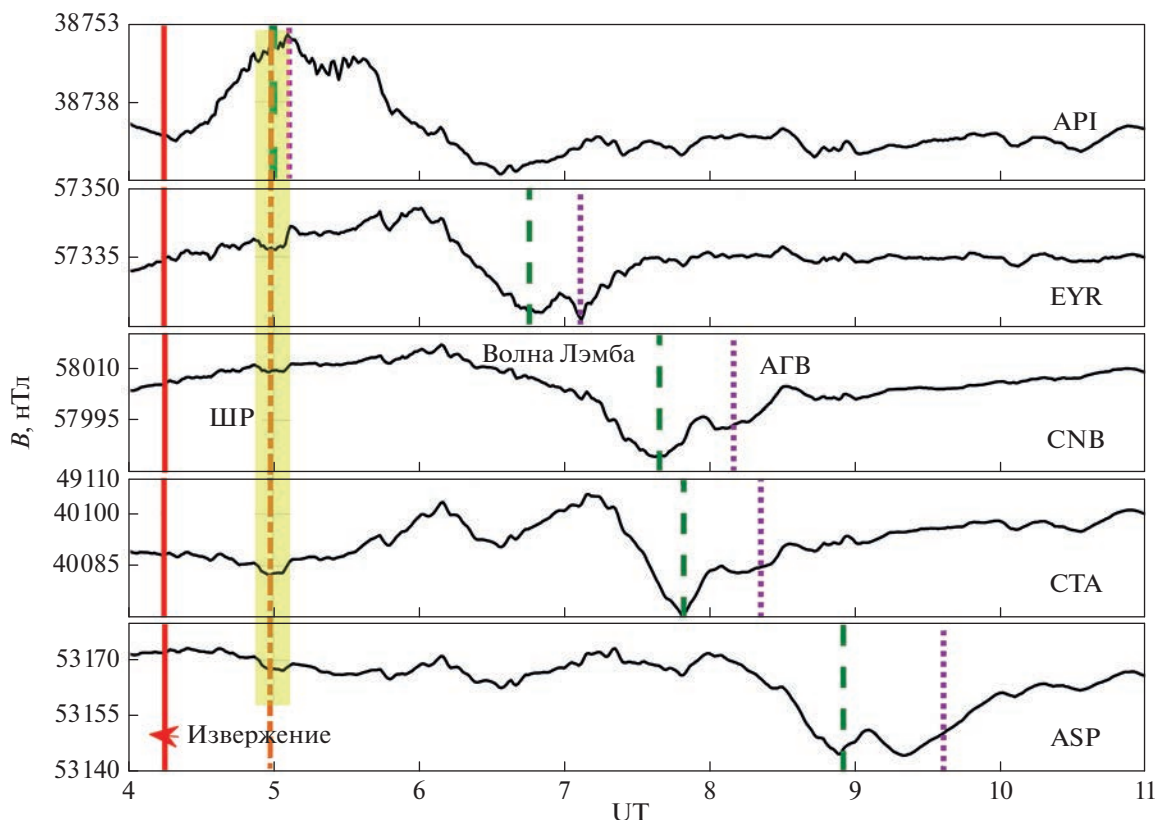
Основным природным источником электромагнитного излучения, вызывающим накачку ШР являются молниевые разряды. По данным сети GLD360 [Yuen et al., 2022] в районе извержения вулкана Тонга 15.01.2022 г. было зарегистрировано порядка 400000 молниевых разрядов. Появление столь мощного источника грозовой активности должно было привести к существенным

изменениям параметров ШР. Рассмотрим реакцию параметров Шумановского резонатора по данным измерений в обсерватории в ГФО “Михнево” (МИК) 15.01.2022 г.

На рис. 4 показаны частота молниевых разрядов, амплитудно-частотный спектр вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот до 45 Гц

**Таблица 1.** Координаты и расстояние от вулкана Тонга до станций INTERMAGNET

|     | Широта, ° | Долгота, ° | Расстояние, км |
|-----|-----------|------------|----------------|
| API | -13.8     | 188.2      | 839            |
| EYR | -43.4     | 172.4      | 2776           |
| CNB | -35.3     | 149.4      | 3806           |
| СТА | -20.2     | 146.3      | 3992           |
| ASP | -23.76    | 133.88     | 5220           |



**Рис. 3.** Вариации полного поля для станций API, EYR, CNB, STA и ASP с отмеченным временем извержения, возмущения ШПР и расчетными временами прихода волн Лэмба и АГВ. Желтым прямоугольником показан интервал времени воздействия ШПР на вариации геомагнитного поля.

по каналу  $H_u$  и суточный ход амплитуды третьей моды ШПР по данным регистрации в МИК [Poklad et al., 2022]. После извержения вулкана наблюдается рост амплитуды первых трех мод ШПР. Очевидно, что динамика роста амплитуды ШПР коррелирует с числом молниевых разрядов, зафиксированных в районе извержения вулкана. В максимуме грозовой активности наблюдался рост амплитуды ШПР более чем в 3 раза.

В то же время извержение не оказало влияния на частотные характеристики ШПР. По-видимому, даже столь сильное геофизическое возмущение, как грозовая активность, вызванная извержением вулкана Тонга, не может вызвать глобальных изменений в волноводе Земля–ионосфера.

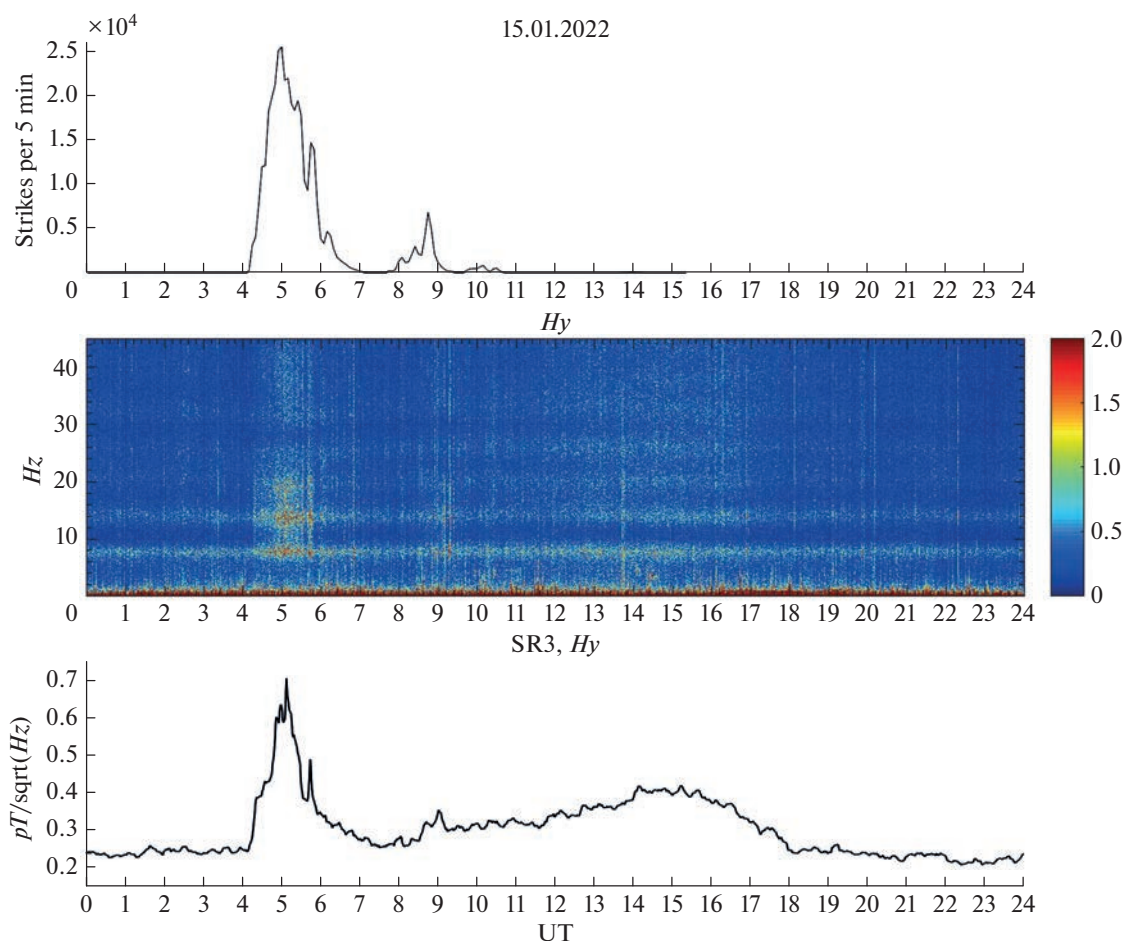
Как показано в работе [Price, 2016] электромагнитные волны частот ШПР распространяются в волноводе Земля–ионосфера в ТЕМ моде. Поэтому основной вклад в вариации магнитного поля на частотах ШПР, зарегистрированных в ГФО “Михнево” по каналу  $H_x$ , вносят параметры вол-

новода на дуге большого круга “Север–Юг” (рис. 4). На параметры ШПР зарегистрированных по каналу  $H_u$  – состояние волновода на дуге большого круга “Запад–Восток”. Таким образом, процессы, оказывающие влияние на параметры этих волноводов, будут приводить к изменениям АЧХ ШПР регистрируемых в ГФО “Михнево”.

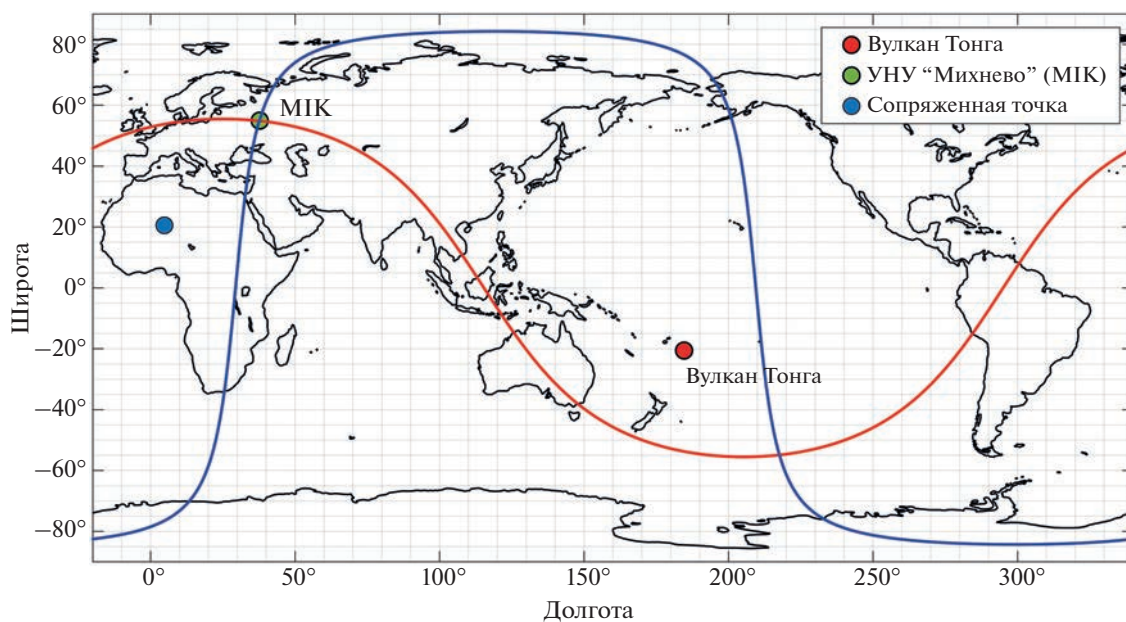
На рис. 5 показаны дуги большого круга, проходящие через оси магнитометров каналов  $H_x$  и  $H_u$ , расположенных в МИК. Расстояние от вулкана до дуги большого круга  $H_x$  составляет 2793 км, а для дуги  $H_u$  – 3520 км.

На рис. 6 показаны значения амплитуд первых трех мод ШПР по каналам  $H_x$  и  $H_u$ , зарегистрированных 15.01.2022 г. Начиная примерно с 7:15 по всем 3-м модам ШПР наблюдается уменьшение амплитуды ШПР в канале  $H_x$ . Этот эффект совпадает с расчетным временем прихода на трассу волны Лэмба. По компоненте  $H_u$  этот эффект выражен слабее. Возможно, это связано с тем, что волна Лэмба пришла на эту трассу позже (в  $\sim 7:30$ ), а на-

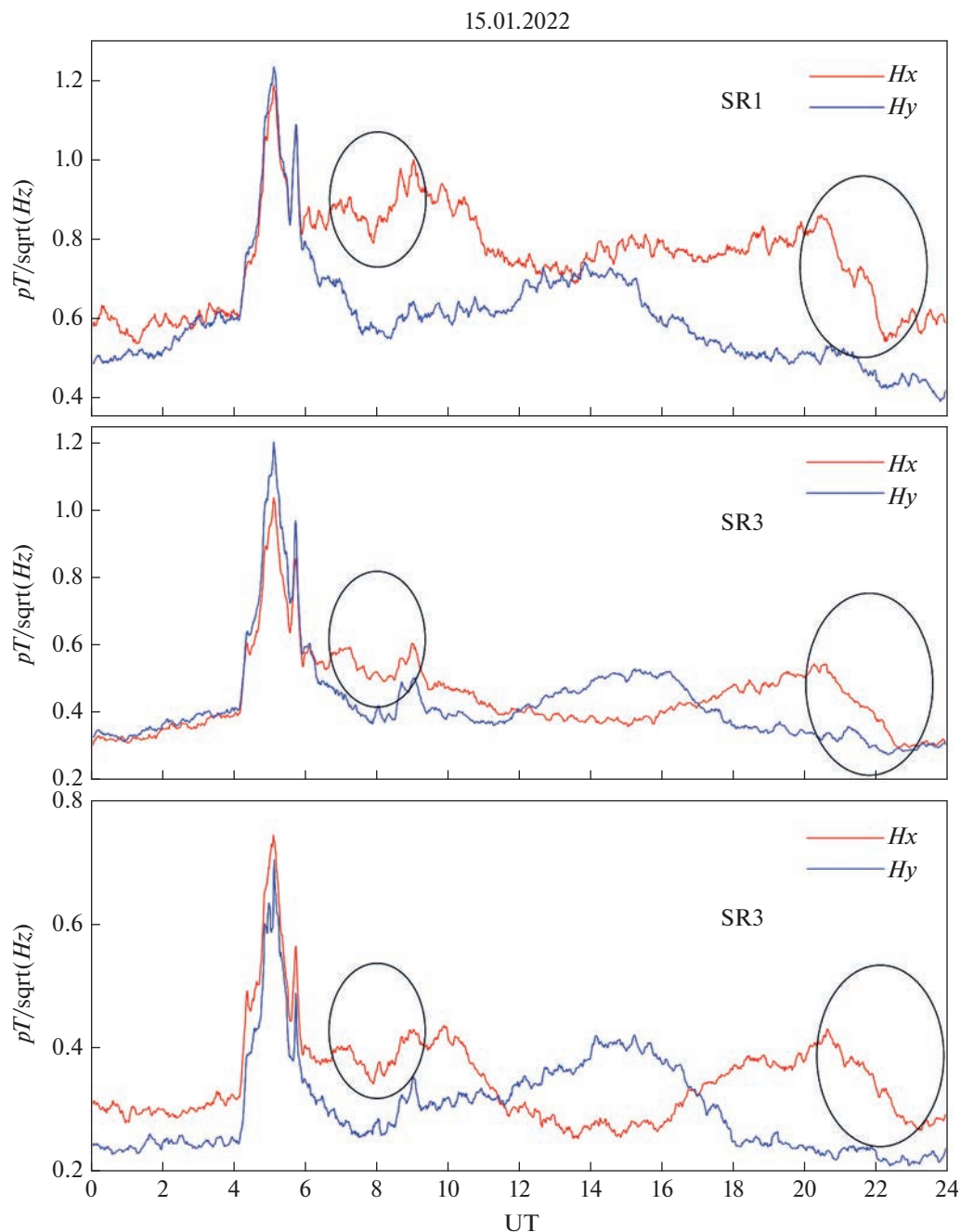




**Рис. 4.** Влияние извержения вулкана Тонга 15.01.2022 г. на параметры Шумановского резонанса. Количество молний, зарегистрированных в районе извержения вулкана по данным сети GLD360 (верхняя панель). Амплитудно-частотный спектр вариаций геомагнитного поля по каналу  $H_y$  в диапазоне частот до 45 Гц, зарегистрированного в ГФО "Михнево" (средняя панель). Суточный ход амплитуды третьей моды ШР (нижняя панель).



**Рис. 5.** Дуги большого круга, проходящие через оси магнитометров каналов  $H_x$  и  $H_y$  обсерватории МИК.



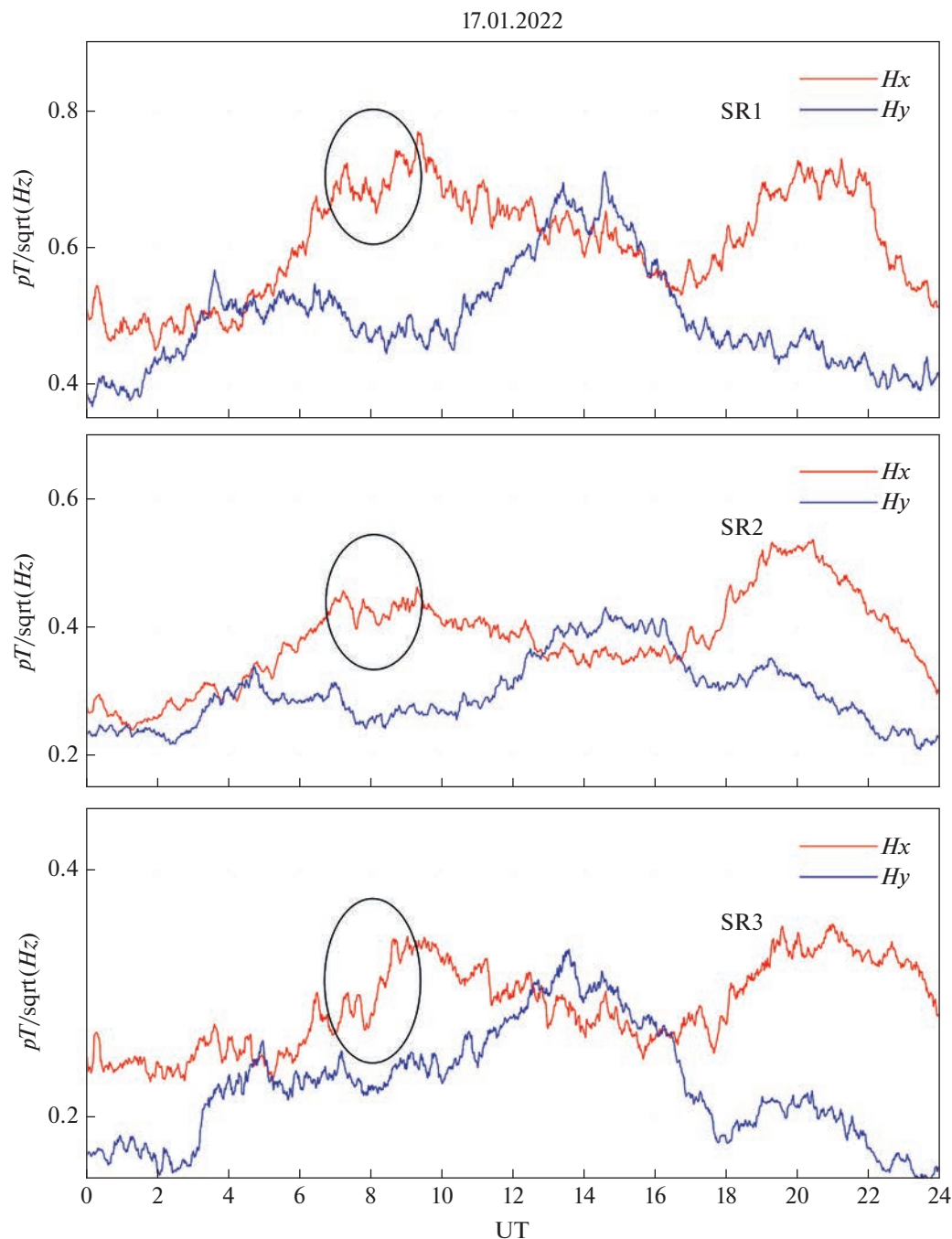
**Рис. 6.** Амплитуды первых трех мод ШР, зарегистрированные в МІК 15.01.2022 г. по каналам  $H_x$  (красные кривые) и  $H_y$  (синие кривые).

чаяя с 8 ч по данным глобальной сети регистрации молний GLD360 (рис. 4) наблюдался еще один пик грозовой активности в очаге извержения.

Еще одно уменьшение амплитуды первых трех мод ШР на канале  $H_x$  наблюдается с 21:00 UT до 22:30 UT. В этот момент происходит схождение волны Лэмба в сопряженной точке над северной

Африкой (рис. 5), а трасса распространения сигнала находится на расстоянии 3530 км от сопряженной точки.

Спустя двое суток волна Лэмба, обогнув Земной шар, повторно сходится над северной Африкой. На рис. 7 показаны амплитуды первых трех мод ШР 17.01.2022 г. Через 52 часа после начала



**Рис. 7.** Амплитуды первых трех мод ШР, зарегистрированные в ГФО “Михнево” 17.01.2022 г. по каналам  $H_x$  (красные кривые) и  $H_y$  (синие кривые).

извержения, в 08:00 UT 17.01.2022 мы наблюдаем картину, аналогичную 15 января. С 7:30 до 9 UT видно заметное падение амплитуды 1-й и 3-й мод ШР), связанное, вероятно, с воздействием на трассу волны Лэмба. Падение амплитуды второй моды ШР менее заметно.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены данные по реакции геомагнитного поля в различных точках Земли, вызванных извержением вулкана Тонга 15 января 2022 г. Показано влияние этого извержения на параметры Шумановского резонатора и вариации

ции геомагнитного поля по данным ряда станций сети Intermagnet на расстояниях до 5200 км от вулкана. Отмечено падение амплитуд ШР, вызванное вероятно воздействием волны Лэмба на параметры Шумановского резонатора.

Анализ геомагнитных возмущений, вызванных извержением вулкана Тонга по данным сети Intermagnet также позволил выявить геомагнитные вариации, связанные с распространением атмосферно-ионосферных волн, вызванных извержением. По данным трехкомпонентной регистрации вариаций геомагнитного поля, зарегистрированных станциями, расположенными на расстояниях от 800 до 5200 км от вулкана, обнаружены вариации вектора полного поля, совпадающие по времени с моментом возмущения Шумановского резонатора, зарегистрированного в обсерватории МІК, и расчетными временами прихода в точки регистрации волн Лэмба и акустико-гравитационной волны.

Амплитуда вариаций геомагнитного поля на частотах ШР в целом коррелирует с количеством грозных разрядов. Наблюдаемый в 05:42 УТ локальный максимум амплитуды, который не связан с ростом количества молний в облаке, может быть обусловлен возникновением разрядов, уходящих вверх, в нижнюю ионосферу. Стратосферные разряды типа эльфов и спрайтов, обладающих повышенной энергетикой [Wang et al., 2019], могут быть причиной наблюдаемых явлений.

Записи вариаций магнитного поля на частоте ШР позволили зарегистрировать следующий приход волны Лэмба через 52 часа после извержения, когда волна, обогнув земной шар повторно сходится над северной Африкой.

Использование данных широкополосных многоточечных наблюдений вариаций геомагнитного поля позволило выявить взаимосвязанные возмущения на различных высотах и эпицентральных расстояниях и подтвердить воздействие волн Лэмба и АГВ на параметры ШР и вариации ГМП.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания 122032900175-6.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Adushkin V.V., Rybnov Y.S., Spivak A.A.* Wave-Related, Electrical, and Magnetic Effects Due to the January 15, 2022 Catastrophic Eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha’apai // *J. Volcanolog. Seismol.* 2022. № 16. P. 251–263.

*Matoza R.S., Fee D., Assink J.D. et al.* Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January //

*Science.* 2022.

<https://doi.org/10.1126/science.abo7063>

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

*Poklad Y.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. V. 127(16). <https://doi.org/10.1029/2022JD036820>

*Price C.* ELF Electromagnetic Waves from Lightning: The Schumann Resonances // *Atmosphere.* 2016. V. 7(9). 116. <https://doi.org/10.3390/atmos7090116>

*Ryakhovskii I.A., Gavrilov B.G., Poklad Y.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. V. 57(5). P. 718–730. <https://doi.org/10.1134/S1069351321050177>

*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.* V. 591(4). <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639>

*Wang Y.P., Lu G.P., Ma M., Zhang H.B., Fan Y.F., Liu G.J., Wan Z.R., Wang Y., Peng K.M., Zhou R. X.* Triangulation of red sprites observed above a mesoscale convective system in North China // *Earth Planet. Phys.* 2019. V. 3(2). P. 111–125.

*Wright C.J., Hindley N.P., Alexander M.J. et al.* Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga–Hunga Ha’apai eruption // *Nature.* 2022. V. 609(7928). P. 741–746. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05012-5>

*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. V. 9. P. 871275. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>

*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. V. 2(3). <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2022.100134>



## Remote Sensing of the Electromagnetic Effects of the Tonga Volcano Eruption on January 15, 2022

**B. G. Gavrilov<sup>a, \*</sup>, Yu. V. Poklad<sup>a</sup>, I. A. Ryakhovsky<sup>a</sup>, and V. M. Ermak<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

*\*e-mail: boris.gavrilov34@gmail.com*

The possibility of remote studies of electromagnetic and ionospheric effects caused by the eruption of the Tonga volcano on January 15, 2022 is shown. At distances up to 15000 km from the source, geomagnetic field variations associated with disturbances of the Schuman resonance (SR), Lamb wave propagation and acoustic-gravitational waves are registered. It is shown that the appearance of a powerful source of thunderstorm activity caused by the eruption produced a significant increase (more than three times) in the amplitude of geomagnetic disturbances at SR frequencies, which correlates with the number of lightning discharges. The effect of the eruption on the frequency characteristics of the SR was not detected.

*Keywords:* volcanic eruption, thunderstorm activity, Lamb wave, acoustic-gravity waves, geomagnetic disturbances, Schuman resonance