

УДК 551.594

МАГНИТНЫЙ И ИОНОСФЕРНЫЙ ЭФФЕКТЫ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ 10.04.2023 г.

© 2023 г. В. В. Адушкин^a, С. А. Рябова^a *, А. А. Спивак^a **, А. В. Тихонова^a

^aИнститут динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН,
Ленинский просп., 38, корп. 1, Москва, 119334 Россия

*e-mail: riabovasa@mail.ru

**e-mail: aaspivak100@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.2023 г.

После доработки 17.08.2023 г.

Принята к публикации 04.09.2023 г.

С привлечением результатов инструментальных наблюдений, выполненных в обсерваториях сети INTERMAGNET и на станции ионосферного зондирования “Вакканай” показано, что сильное извержение вулкана Шивелуч эффузионно-эксплозивного характера, произошедшее 10.04.2023 г., сопровождалось вариациями магнитного поля Земли, а также изменениями критической частоты слоя F2 ионосферы.

Ключевые слова: вулкан, извержение, продувка, атмосферная волна, ионосфера, геомагнитное поле, вариация, критическая частота

DOI: 10.31857/S0203030623700360, **EDN:** SNQOQJ

ВВЕДЕНИЕ

Конец 2022 г. и начало 2023 г. характеризуются повышенной вулканической активностью на Земле. В частности, в этот период произошли мощные извержения таких вулканов как Семеру (04.12.2022 г., Индонезия), Мерапи (11.03.2023 г., Индонезия), а также вулканов, расположенных на территории Камчатки (Россия): Безымянный (07.04.2023 г.) и Шивелуч (31.01.2023 и 10.04.2023 г.). Рассмотрение извержений вулкана Шивелуч (ГЕО: 54.65° N; 161.36° E) — одного из крупнейших Камчатских вулканов представляет особый интерес, обусловленный сильными последствиями в виде газо-пепловых облаков, поднявшихся на большую высоту и вызвавших сбои в авиасообщении, а также значительных объемов пепловой массы, выпавшей на значительной по площади территории.

Самое сильное с 1964 г. извержение вулкана Шивелуч произошло 10.04.2023 г. Согласно данным ИВиС ДВО РАН¹ вулкан активизировался в ~13:00 UTC. Первая (основная) стадия извержения началась в ~17:40 UTC с кратковременной эксплозии, в результате которой была разрушена большая часть активного купола вулкана и образовался кратер диаметром ~1 км. Дальнейшие фазы извержения были связаны с периодически

повторяющимися стадиями интенсивной продувки вулкана, первая продолжительная, каждая последующая длительностью несколько десятков минут. Сформировавшееся в результате извержения вулкана пепловое облако достигло высоты ~20 км и распространилось до расстояний ~500 км. Фумарольная деятельность вулкана отмечалась в течение нескольких суток. Извержение сопровождалось на первой стадии выбросом большого количества пепловой массы, которая, оседая, привела к образованию достаточно мощного слоя пепла толщиной до ~20 см на расстояниях не менее 47 км.

Наряду с весьма значительными объемами выброшенной в земную атмосферу газо-пепловой массы, что вызывает не только локальное, но в ряде случаев и региональное загрязнение атмосферы и почвы, в качестве негативных факторов вулканических извержений следует рассматривать сопутствующие им геофизические эффекты, связанные, например, с формированием волновых движений в атмосфере, аномальными вариациями магнитного и электрического поля и т.д. [Адушкин и др., 1984; Фирстов и др., 2019; Руленко, 1979, 1985; Johnston, 1997; Lane, Gilbert, 1992]. Исследование геофизических эффектов позволяет получить новые данные о явлении и сопровождающих его процессах, более полно оценивать их экологические последствия.

В настоящей работе рассматриваются геофизические эффекты, сопутствующие извержению

¹ <https://tass.ru/obschestvo/17531795>; <https://earth-chronicles.ru/news/2023-04-16-170285>

Таблица 1. Характеристики магнитных обсерваторий

Код	Страна	ГЕО		R , км	b^* , нТл	B_0 , нТл
		широта	долгота			
PET	Россия	52.971° N	158.248° E	~460	~1.3	~3.7
KHB	Россия	47.61° N	134.69° E	~2060	~1.4	~4.1
КАК	Япония	36.232° N	140.186° E	~2770	~1.3	~4.2
CYG	Республика Корея	36.37° N	126.854° E	~3410	~1.4	~3.7
MMB	Япония	43.91° N	144.19° E	~3550	~1.6	~4.6
KNY	Япония	31.42° N	130.88° E	~3660	~1.4	~2.8
BMT	Китай	40.3° N	116.2° E	~3700	~1.3	~4
RHU	Вьетнам	21.03° N	105.95° E	~5980	~1.2	~3.6
DLT	Вьетнам	11.95° N	108.48° E	~6690	~1.2	~2.7

вулкана Шивелуч 10.04.2023 г., в виде вызванных вариаций магнитного поля Земли в приповерхностном слое атмосферы и вариаций критической частоты слоя F_2 ионосферы.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

При анализе последствий рассматриваемых вулканических событий привлекались данные, полученные в результате инструментальных наблюдений, выполненных в ряде “активных” на период извержения вулкана обсерваторий международной сети INTERMAGNET² (табл. 1, рис. 1). Анализировалась наиболее чувствительная к внешним возмущениям компонента магнитной индукции B_x , ориентированная в направлении север–юг. Использовались цифровые ряды данных с одномоментной дискретизацией.

При анализе влияния вулканических извержений на ионосферу в настоящей работе привлекались в виде ионограмм результаты высотно-частотного зондирования на японской станции мониторинга ионосферы “Вакканай” (ГЕО: 45.16° N; 141.75° E), размещенные в свободном доступе на сайте Японского национального института информационных и коммуникационных технологий³. Выполнялась оценка критической частоты f_0F_2 путем ручной обработки ионограмм с интерпретацией по методике URSI [Руководство ..., 1977]. В результате формировался цифровой ряд данных временной вариации критической частоты F_2 -слоя f_0F_2 с дискретизацией 15 мин.

² <https://www.intermagnet.org/index-eng.php>

³ <http://www.wdc.nict.go.jp>

Следует отметить, что периоды рассматриваемых вулканических событий характеризовались спокойной геомагнитной обстановкой (значения K_p индекса магнитной активности согласно данным ISGI⁴ не превышало 2), что упростило выделение возмущений магнитного поля и ионосферы, вызванных вулканическими извержениями.

ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ

Одним из эффектов вулканических извержений являются вариации магнитного поля Земли [Johnston, 1997; Spivak et al., 2020]. Данные настоящей работы также свидетельствуют о том, что извержение вулкана Шивелуч 10.04.2023 г. сопровождалось аномальными геомагнитными вариациями, причем на значительных расстояниях от вулкана. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведены результаты наблюдений за горизонтальной — наиболее чувствительной к внешним возмущениям компонентой магнитного поля B_x , полученные в обсерваториях сети INTERMAGNET, расположенных на разных расстояниях от вулкана (см. рис. 1). Данные рис. 1 приведены в виде вариации B^* компоненты B_x и свидетельствуют о сложном характере вызванных геомагнитных вариаций. Первоначально примерно в 18:00 UTC во всех обсерваториях зарегистрированы резкие изменения в суточном ходе магнитного поля, вылившиеся в практически знакопеременные вариации B^* амплитудой $b^* \sim 1.5$ нТл, что допустимо связывать с кратковременной эксплозией. Практически сразу после этого отмечается аномальный на фоне

⁴ https://isgi.unistra.fr/data_plot.php

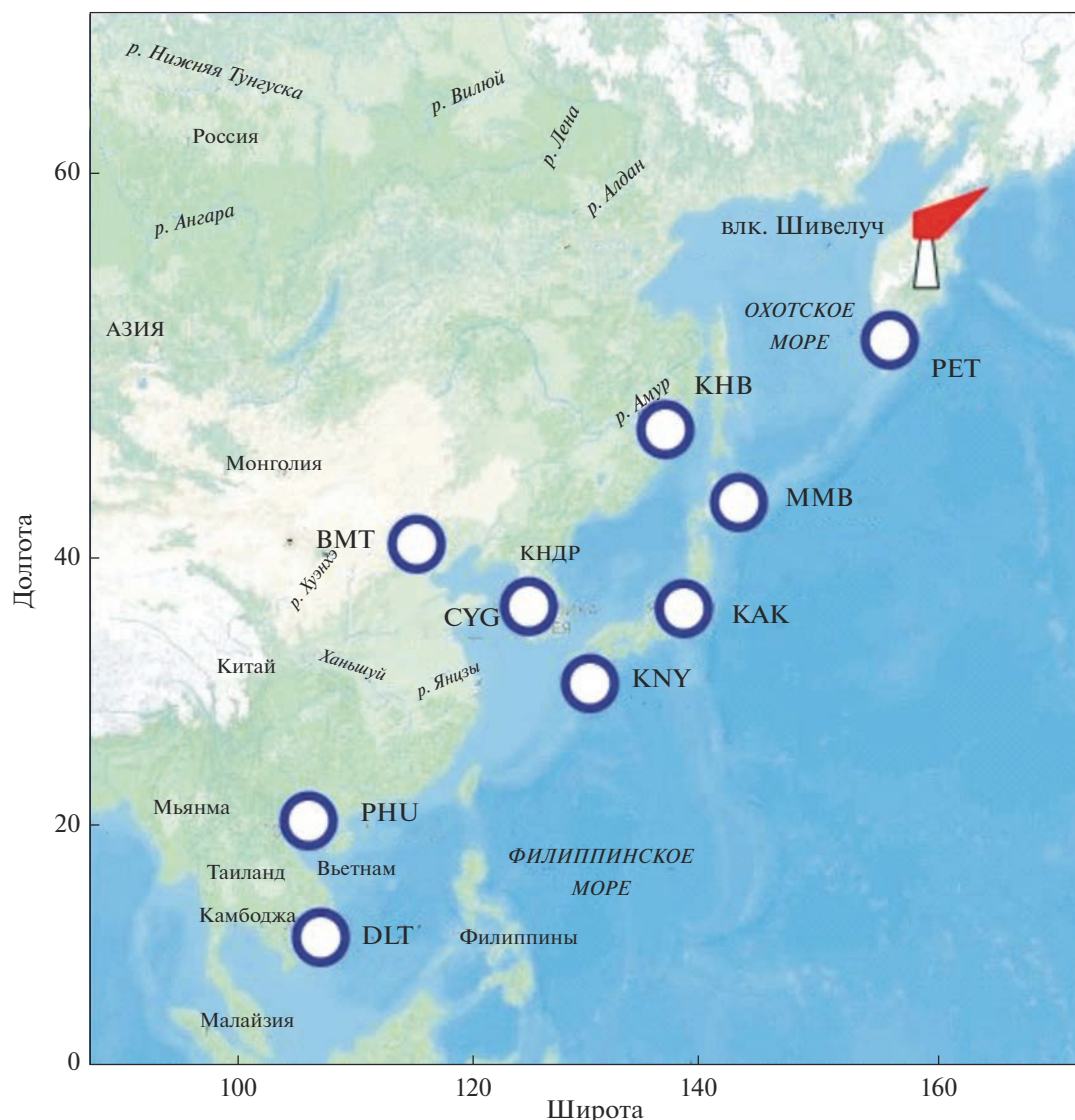


Рис. 1. Схема расположения вулкана Шивелуч и ближайших к вулкану активных магнитных обсерваторий сети INTERMAGNET (коды обсерваторий указаны в поле рисунка).

суточного тренда рост B^* , связанный, вероятнее всего, с формированием воздушной волны и ее воздействием на проводящие слои атмосферы. Эти вариации наблюдались в течение продолжительного времени вплоть до ~20:30 UTC с максимальной амплитудой $B_0 \sim 3.5$ нТл примерно в ~20:00 UTC⁵. Не исключается, что начиная с 19:30 UTC свой вклад вносят возмущения, вызванные пирокластическим потоком.

Данные рис. 2 показывают, что начала вызванных вулканической деятельностью возмущений магнитного поля зарегистрированы в близкие

⁵ Значения амплитуды b^* и максимальной амплитуды B_0 для разных обсерваторий приведены в табл. 1.

времена на значительно отличающихся расстояниях от вулкана R (см. табл. 1), что свидетельствует о значительной скорости распространения возмущений по ионосфере. По нашим оценкам скорость распространения возмущений превышает 20 км/с⁶. Одновременно с этим, амплитуды b^* и B_0 заключены в весьма узком интервале значений (см. табл. 1), что в свою очередь свидетельствует о слабом затухании распространяющегося сигнала.

⁶ В данном случае скорость распространения возмущений близка к скорости распространения “медленных” МГД-волн (скорость перемещающихся ионосферных возмущений значительно меньше: от 650 до ~2000 м/с).

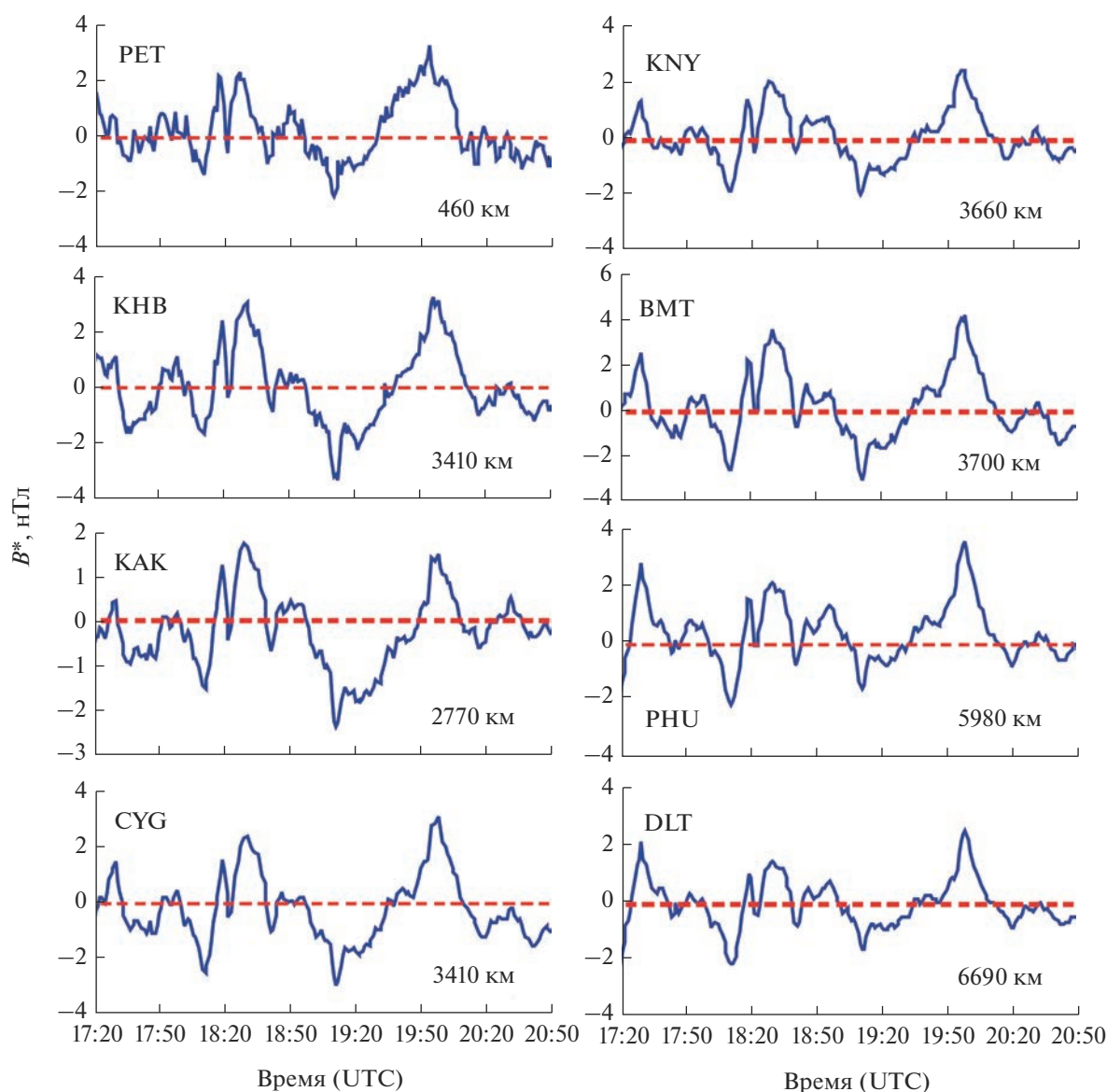


Рис. 2. Вариации компонент магнитного поля в период извержения вулкана Шивелуч 10.04.2023 г. (красная вертикальная стрелка — начало вулканической активности).

ВАРИАЦИИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F_2 ИОНОСФЕРЫ

Извержение вулкана Шивелуч 10.04.2023 г. оказало влияние на ионосферу Земли. Отметим, что наиболее ионизированной областью верхней атмосферы Земли является слой ионосферы F_2 , который существует в любое время суток и имеет высокую чувствительность к внешним воздействиям любого происхождения. Наряду с электронной концентрацией одним из основных важных параметров, характеризующих состояние этого слоя ионосферы, является, так называемая критическая частота f_0F_2 — наибольшая частота радиоволн, при которых наблюдается их отражение от слоя F_2 [Шалимов, 2018]. Амплитуда изме-

нения f_0F_2 напрямую зависит от реакции слоя F_2 на внешнее возмущение. В настоящей работе выполнен анализ поведения ионосферы в области максимума слоя F_2 в период рассматриваемой вулканической активности. С этой целью по ионограммам высотно-частотного зондирования, выполненных на ионосферной станции “Вакканай”, определялась критическая частота F_2 -слоя ионосферы f_0F_2 (станция “Вакканай” расположена на расстоянии ~1865 км от вулкана Шивелуч).

Ионосферный эффект мощного извержения в виде вариаций критической частоты f_0F_2 представлен на рис. 3. Из рис. 3 следует, что извержение вулкана вызвало ярко выраженные продол-

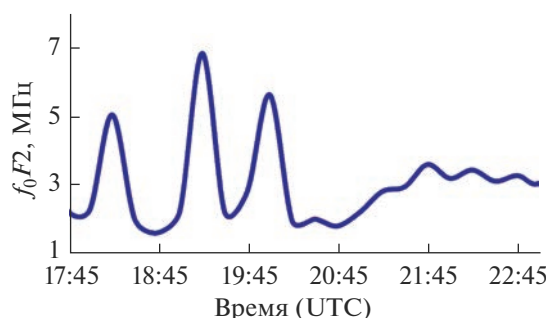


Рис. 3. Вариации критической частоты f_0F_2 , вызванные извержением вулкана Шивелуч 10.04.2023 г.

жительные знакопеременные вариации критической частоты f_0F_2 в период с ~18:00 UTC до ~20:15 UTC. Период вариаций составил ~30–40 мин при максимальной амплитуде ~4 МГц. Наблюдаемые вариации критической частоты можно объяснить ионосферным откликом на волны Релея [Matsuyama et al., 2012].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы дополняют имеющиеся представления о возможных возмущениях магнитного поля и ионосферы Земли в периоды сильных вулканических извержений. Связанные с динамикой очага геомагнитные вариации амплитудой 1.2–4.6 нТл отмечаются на значительных расстояниях от источника возмущений. Здесь следует отметить, что максимальные амплитуды геомагнитного возмущения при извержении вулкана Шивелуч, основной характер которого связан в первую очередь с формированием вертикальной струи разогретого материала, сравнимы с амплитудами возмущений магнитного поля, зарегистрированными при хорошо выраженном взрывном характере извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15.01.2022 г. [Адушкин и др., 2022].

Показано, что рассматриваемое вулканическое извержение заметно проявилось в вариациях критической частоты F_2 -слоя ионосферы в период наиболее интенсивной продувки вулкана.

По мнению авторов, полученные данные могут быть полезны при доработке известных и создании новых моделей развития и влияния вулканических извержений на окружающую геофизическую среду и их верификации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию № 1021052706233-4-1.5.4 “Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях” (FMWN-2022-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фирстов П.П. О природе воздушных волн при сильных взрывных извержениях // Вулканология и сейсмология. 1984. № 5. С. 3–11.
- Адушкин В.В., Спивак А.А. Воздействие экстремальных природных событий на геофизические поля в среде обитания // Физика Земли. 2021. № 5. С. 6–16.
- 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.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под ред. П.В. Медниковой. М.: Наука, 1977. 342 с.
- Руленко О.П. Электрические процессы в парогазовых облаках вулкана Карымского // Доклады АН СССР. 1979. Т. 245. № 5. С. 1083–1086.
- Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Жаринов Н.А., Максимов А.П., Маневич Т.М., Мельников Д.В. Электризация эруптивных облаков вулкана Шивелуч в зависимости от характера эксплозии // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 49–62.
- Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы (с геофизическими примерами). М., 2018. 390 с.
- Johnston M.J.S. Review of electric and magnetic fields accompanying seismic and volcanic activity // Surveys in Geophysics. 1997. V. 18. P. 441–475.
- Maruyama T., Tsugawa T., Kato H., Ishii M., Nishioka M. Rayleigh wave signature in ionograms induced by strong earthquakes // Journal of Geophys. Res.: Space Physics. 2012. V. 117. A08306. <https://doi.org/10.1029/2012JA017952>
- 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.
- Rees D. The ongoing development of the COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA) and related ISO Standards for the Earth's Atmosphere / 42nd COSPAR Scientific Assembly. Held 14–22 July 2018, Pasadena, California, USA, C4.2-1-18.
- Shuvalov V.V. Multi-dimensional hydrodynamic code SOVA for interfacial flows: Application to the thermal layer effect // Shock Waves. 1999. V. 9. P. 381–390.
- Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Riabova S.A., Soloviev S.P., Kharlamov V.A. Acoustic, magnetic and electric effects of Stromboli volcano eruption, Italy, in July–August 2019 // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2020. V. 56. № 5. P. 708–720.

Magnetic and Ionospheric Effects of the Shiveluch Volcano Eruption on April 10, 2023

V. V. Adushkin¹, S. A. Riabova^{1, *}, A. A. Spivak^{1, **}, and A. V. Tikhonova¹

¹*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences,
Leninsky prosp., 38, bld. 1, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: riabovasa@mail.ru*

***e-mail: aaspivak100@gmail.com*

Using the results of instrumental observations made at the INTERMAGNET network and at the ionospheric sounding station “Wakkanai”, it is shown that a strong eruption of the volcano Shiveluch of an effusive-explosive nature, which occurred on April 10, 2023, was accompanied by variations in the Earth’s magnetic field, as well as changes in the critical frequency of the ionosphere *F2*-layer.

Keywords: volcano, eruption, purge, atmospheric wave, ionosphere, geomagnetic field, variation, critical frequency