



IONOSPHERIC DISTURBANCES OVER PRIMORSKY KRAI CAUSED BY THE ERUPTION OF THE HUNGA TONGA-HUNGA HA'APAI VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

M.A. Bolsunovskii ^{1✉}, N.V. Shestakov ^{2,3}, G.I. Dolgikh ¹, N.P. Perevalova ⁴, A.S. Ten ⁵

¹ Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 43 Baltiyskaya St, Vladivostok 690041, Russia

² Far Eastern Federal University, Russky Island, 10 Ajax Bay, Vladivostok, 690922, Russia

³ Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 7 Radio St, Vladivostok, 690041, Russia

⁴ Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 126a Lermontov St, Irkutsk, 664033, Russia

⁵ Computing Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 65 Kim Yu Chen St, Khabarovsk, 680000, Russia

ABSTRACT. The explosive eruption of the Hunga Tonga-Hunga Haapai volcano occurred on January 15, 2022 at 04:02 UTC led to generation of covolcanic ionospheric disturbances that spread over long distances. Using GNSS data obtained at permanent stations of the IGS network and sites located on the territory of Primorsky Krai, the search and analysis of ionospheric disturbances over the territory of Primorsky Krai and adjacent areas was performed. The velocity of the covolcanic ionospheric disturbances recorded over the Primorsky Krai reached about 340 m/s, and the average amplitude was equal to 1.0 TECU. The results obtained from GNSS-data were also compared with the results of observation data obtained by a laser strainmeters (oriented in the directions "north – south" and "east – west") and a laser nanobarograph located at the Schultz Cape (the south of Primorsky Krai). As a comparison result, time delays between the moments of fixation of disturbances in the troposphere and ionosphere were found. The delay between the first peaks of disturbances was equal to ~50 min.

KEYWORDS: ionosphere; ionospheric disturbances; total electron content; GNSS; laser nanobarograph; laser strainmeters

FUNDING: The work was carried out with partial financial support from the of the FEFU Endowment Fund (grant № 22-07-01-007), as part of the state assignment of the IAM FEB RAS (№ 075-01290-23-00), as well as within the framework of the state budget proposal: "Development of a climate monitoring system for the Far Eastern seas of Russia and the Northwestern Pacific Ocean based on multiplatform observations and operational hydrodynamic modeling" (№ 123072000039-5). The work of N.P. Perevalova was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (subsidy № 075-GZ/C3569/278). The work used the resources of the Shared Research Facilities "Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences", funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement № 075-15-2021-663.



EDN: LMNPBH

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Mikhail A. Bolsunovskii, bolsunovsky.ma@poi.dvo.ru

Received: May 10, 2023

Revised: September 22, 2023

Accepted: October 13, 2023

FOR CITATION: Bolsunovskii M.A., Shestakov N.V., Dolgikh G.I., Perevalova N.P., Ten A.S., 2024. Ionospheric Disturbances over Primorsky Krai Caused by the Eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano on January 15, 2022. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0738. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0738

ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НАД ПРИМОРСКИМ КРАЕМ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗВЕРЖЕНИЕМ ВУЛКАНА ХУНГА-ТОНГА-ХУНГА-ХААПАН 15 ЯНВАРЯ 2022 г.

М.А. Болсуновский¹, Н.В. Шестаков^{2,3}, Г.И. Долгих¹, Н.П. Перевалова⁴, А.С. Тен⁵

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия

²Дальневосточный федеральный университет, 690922, Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10, Россия

³Институт прикладной математики ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, Россия

⁵Вычислительный центр ДВО РАН, 680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия

АННОТАЦИЯ. Взрывное извержение вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г. в 04:02 UTC привело к генерации ковулканических ионосферных возмущений, распространившихся на большие расстояния. С использованием ГНСС-данных, полученных на постоянно действующих станциях сети IGS и станциях, расположенных на территории Приморского края, выполнен поиск и анализ ионосферных возмущений над территорией Приморского края и смежных районов. Скорость зафиксированных над Приморским краем ковулканических ионосферных возмущений достигла ~340 м/с, а средняя амплитуда составляла ~1.0 TECU. Также выполнено сравнение результатов, полученных по ГНСС-данным, с результатами экспериментальных данных, полученных лазерными деформографами (ориентированными по направлениям «север – юг» и «восток – запад») и лазерным нанобарографом, установленными на мысе Шульца (Приморский край РФ). В результате выполненного сравнения были обнаружены временные задержки между моментами фиксации возмущений в тропосфере и ионосфере. Величина задержки между первыми пиками возмущений составила ~50 мин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ионосфера; ионосферные возмущения; полное электронное содержание; ГНСС; лазерный нанобарограф; лазерный деформограф

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Фонда целевого капитала ДВФУ (грант № 22-07-01-007), в рамках государственного задания ИПМ ДВО РАН (проект № 075-01290-23-00), а также в рамках госбюджетной темы: «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования» (№ 123072000039-5). Работа Н.П. Переваловой поддержана Минобрнауки РФ (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). В работе использовались ресурсы ЦКП «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Минобрнауки РФ по соглашению №075-15-2021-663.

1. ВВЕДЕНИЕ

Цунами, землетрясения и извержения вулканов способны инициировать возмущения в различных средах: атмосфере, литосфере и гидросфере [Astafyeva, 2019]. В ионосфере такие возмущения могут распространяться на большие расстояния [Astafyeva, Afraimovich, 2006; Chum et al., 2012; Muafiry et al., 2022; Verhulst et al., 2022; Wright et al., 2022].

Одним из наиболее эффективных методов исследования состояния ионосферы является применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Calais, Minster, 1995; Afrajmovich, Perevalova, 2006]. Использование ГНСС-данных позволяет исследовать ионосферные возмущения природного (солнечные затмения, магнитные бури, землетрясения, тропические циклоны) и антропогенного (запуск ракет, промышленные и другие взрывы, подземные ядерные испытания) происхождения [Afraimovich et al., 2013].

Мощное взрывное извержение подводного вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (находится между двумя

необитаемыми островами Хунга-Тонга и Хунга-Хаапай, являющимися частью архипелага Тонга, расположенного в южной части Тихого океана в Океании, к югу от Самоа), произошедшее 15 января 2022 г., вызвало ряд возмущений в атмосфере [Duncombe, 2022], включая интенсивные ионосферные аномалии, зафиксированные в различных регионах Земли [Themens et al., 2022] и обогнувшие земной шар три раза [Zhang et al., 2022]. Извержение также спровоцировало значительное уменьшение электронной концентрации вблизи вулкана [Astafyeva et al., 2022]. Возникшие крупномасштабные ионосферные возмущения распространялись со скоростью ~300 м/с. Многие исследователи связывают это явление с волнами Лэмба [Chen et al., 2022; Heki, 2022; Hong et al., 2022; Themens et al., 2022; Zhang et al., 2022]. До этого события волны Лэмба в атмосфере были обнаружены во время извержения вулкана Кракатау в 1883 г. [Symons, 1888; Taylor, 1932].

Целью настоящего исследования являются поиск и получение характеристик ионосферных возмущений,

инициированных произошедшим 15 января 2022 г. приблизительно в 04:02 по всемирному координированному времени (UTC) наиболее сильным эксплозивным эпизодом извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай (далее Хунга-Тонга) над территорией Приморского края и смежными регионами по данным ГНСС-наблюдений, а также сравнение их с данными измерений лазерного деформографа и лазерного нанобарографа, установленных на морской экспериментальной станции Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения РАН, мыс Шульца, полуостров Гамова, Приморский край.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для поиска ионосферных возмущений, вызванных извержением вулкана Хунга-Тонга, над территорией Приморского края и смежными регионами были использованы наблюдения нескольких сетей двухчастотных ГНСС-приемников. Для обработки и дальнейшего анализа использовались сигналы спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС, собранные за период с 11 по 20 янва-

ря 2022 г. на 26 станциях глобальной ГНСС-сети IGS (7 станций находятся вблизи вулкана и 19 станций рассредоточены по направлению от вулкана до Приморского края) и 13 станциях, расположенных на территории Приморья. Наблюдения в формате RINEX с шагом дискретизации данных 30 с на станциях сети IGS были загружены из информационной системы данных о динамике земной коры CDDIS (<https://cddis.nasa.gov/index.html>), координаты вулкана получены с сайта Глобальной программы вулканизма Смитсоновского института (<https://volcano.si.edu/>). Расположение всех используемых в настоящей работе ГНСС-станций относительно вулкана Хунга-Тонга показано на рис. 1.

Геомагнитная обстановка в момент исследуемого вулканического события характеризовалась как возмущенная. На рис. 2 представлен график изменения геомагнитного индекса Кр, определяемого по станциям в средних широтах и характеризующего геомагнитную обстановку на планете с трехчасовым временным разрешением. Из рис. 2 видно, что 14.01.2022 г. (незадолго до начала исследуемого эруптивного эпизода)



Рис. 1. Расположение ГНСС-станций относительно вулкана Хунга-Тонга. Треугольник с квадратом – вулкан. Красные кружки – ГНСС-станции. Звездочкой обозначено местоположение комплекса инструментов: ГНСС-станции SHUL, лазерного нанобарографа и двухкомпонентного деформографа. Цифры 1, 2, 3 соответствуют врезкам – Республика Корея, Япония, Приморский край РФ.

Fig. 1. Distribution of GNSS-stations with respect to the Hunga-Tonga volcano. The triangle with a square - volcano. The red circles – GNSS stations. The asterisk indicates the location of the instrument complex: SHUL GNSS-station, laser nanobarograph and two-component laser strainmeters. Figures 1, 2, 3 correspond to the insets – the Republic of Korea, Japan, Primorsky Krai of the Russian Federation.

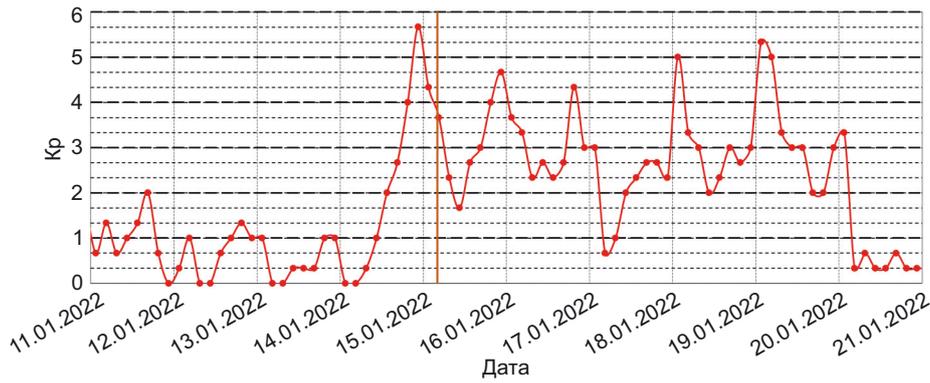


Рис. 2. Состояние геомагнитной обстановки в исследуемый временной интервал по индексу Kp (данные GFZ Helmholtz Centre Potsdam, <https://www.gfz-potsdam.de/en/>).

Fig. 2. The geomagnetic conditions in the considered time interval according to the Kp index (data from GFZ Helmholtz Centre Potsdam, <https://www.gfz-potsdam.de/en/>).

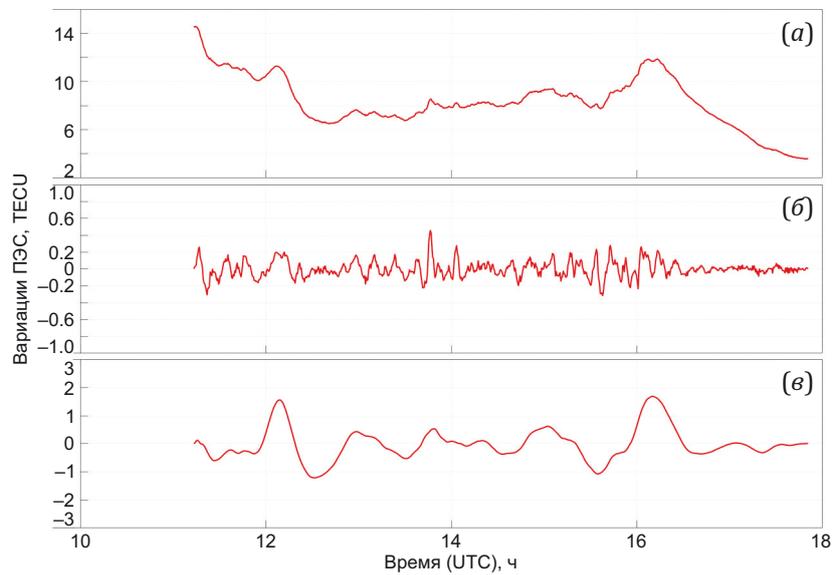


Рис. 3. Пример ряда вертикального ПЭС (а) и результатов его частотно-временной фильтрации для пары станция «IMAN» – спутник G17 (GPS) (б, в).

Fig. 3. An example of vertical TEC series (a) and the results of its time-frequency filtering for the pair station "IMAN" – satellite G17 (GPS) (б, в).

началась умеренная геомагнитная буря, вызвавшая возмущения в ионосфере Земли, не связанные с извержением вулкана и продолжавшиеся с постепенным затуханием до 21.01.2022 г.

Высота слоя максимальной ионизации на момент извержения, необходимая для расчетов, была получена с использованием модели ионосферы IRI 2016 (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/iri>) и принята равной 306 км. Это значение использовалось для анализа всех ГНСС-данных.

Значения «наклонного» полного электронного содержания (ПЭС) вдоль всех лучей станция – спутник были рассчитаны при помощи программного обеспечения «tec-suite» (<http://www.gnss-lab.org/>). Величины ПЭС определялись по известной формуле [Jorgenson, 1978; Afrajmovich, Perevalova, 2006]:

$$\text{ПЭС} = \frac{1}{40.308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 f_2^2} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + \text{const} + nL,$$

где f_1 и f_2 – несущие частоты ГНСС-сигнала, $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – фазовые пути сигнала в метрах на соответствующих частотах, вызванные задержкой фазы в ионосфере (набег фазы), const – фазовая неоднозначность, nL – ошибки фазовых измерений.

Ряды «наклонного» ПЭС были преобразованы в вариации «вертикальных» значений и профильтрованы в программном обеспечении Viewtecs методом скользящего среднего в двух временных диапазонах: 1–10 и 10–60 мин с целью выделения коротко- и длиннопериодных вариаций ПЭС (рис. 3, б, в). Более подробное описание использованной процедуры удаления тренда и фильтрации данных ПЭС можно найти в работах [Shestakov et al., 2021; Afrajmovich, Perevalova, 2006].

Пересчет в вертикальный ПЭС (ВПЭС) производился с использованием выражения [Afrajmovich, Perevalova, 2006]:

$$\text{ВПЭС} = \text{ПЭС} \cdot \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_z}{R_z + H_{\text{ion}}} \cos \theta_s \right) \right],$$

где R_z – радиус Земли, H_{ion} – высота слоя максимальной ионизации, θ_s – угол возвышения спутника. Далее в работе обсуждаются результаты, полученные только с использованием ВПЭС.

За каждые сутки (по UTC) в период с 11 по 20 января 2022 г. были сформированы профильтрованные в соответствующем частотно-временном диапазоне ряды изменений ВПЭС по каждой паре «станция – спутник». За этот же временной интервал построены диаграммы дальность – время, показывающие временные изменения ВПЭС на расстояниях до 11 тыс. км от вулкана в направлении Приморского края (рис. 4 и 5).

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С целью поиска и выделения ионосферных возмущений, связанных с активностью вулкана Хунга-Тонга (ковулканические возмущения), а также для получения картины фоновых вариаций ПЭС и ее изменений до и после исследуемого эруптивного эпизода авторами были построены и проанализированы диаграммы дальность – время за временной интервал с 11 по 20 января 2022 г. На диаграммах, построенных в диапазоне периодов 1–10 мин на расстояниях свыше 9 тыс. км от вулкана, какие-либо возмущения не выделяются. Для периодов 10–60 мин на диаграммах за 15 января 2022 г. были обнаружены интенсивные ковулканические вариации ПЭС (КИВ), прослеживающиеся непосредствен-

но от вулкана до расстояний свыше 10 тыс. км от него (см. рис. 4). На рис. 5 также представлены аналогичные диаграммы, построенные для двух последовательных дней до извержения и за аналогичный промежуток после изучаемого эпизода извержения. В Прил. 1 представлены диаграммы дальность – время для периодов 10–60 мин, построенные за полные сутки с 11 по 20 января 2022 г.

Из рис. 4 видно, что интенсивные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИБ), начало регистрации которых относится примерно к 04:10 и далее наблюдаемых между четырьмя и шестью часами по всемирному времени, являются следствием извержения вулкана Хунга-Тонга. Такие вариации отсутствуют в дни до и после него (рис. 5). Эти возмущения, распространяясь от вулкана, разделились на расстояниях около 3 тыс. км на две моды: первая (быстрая) прослеживается примерно до 8 тыс. км, а вторая (медленная) распространялась значительно дальше – до 10–11 тыс. км.

В табл. 1 приведены оценки значений скоростей распространения выделенных на рис. 4 ковулканических возмущений ВПЭС. ПИБ 1–4, характеризующиеся средними скоростями от ~720 до ~950 м/с, распространялись до расстояний 2.5–3.0 тыс. км в течение примерно трех часов после извержения. Аналогичные результаты приводятся в работах [Themens et al., 2022; Zhang et al., 2022]. Полученные скорости соответствуют акустической моде, которая порождается ударными волнами в нижней атмосфере Земли, часто возникающими при сильных эксплозиях (взрывах). На расстояниях около 3 тыс. км от вулкана эти возмущения разделяются на две моды: первая распространяется

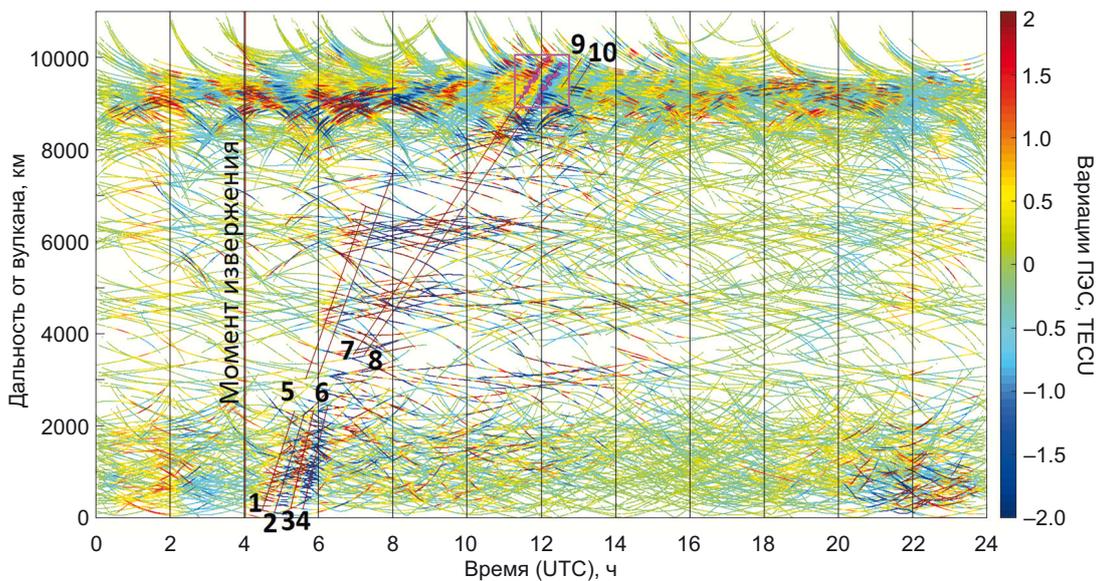


Рис. 4. Диаграмма дальность – время за 15.01.2022 г., построенная для периода фильтрации 10–60 мин. Прямыми линиями и цифрами обозначены фронты возмущений ПЭС, ассоциируемые с извержением вулкана. Область, выделенная пурпурным квадратом, в крупном масштабе показана на рис. 7 (остальные пояснения см. в тексте).

Fig. 4. The distance – time diagram plotted for January 15, 2022 using the filtration period of 10–60 minutes. Straight lines and numbers indicate the TEC disturbance fronts associated with the volcanic eruption. The area highlighted by the purple square is shown on a large scale in Fig. 7 (see text for other explanations).

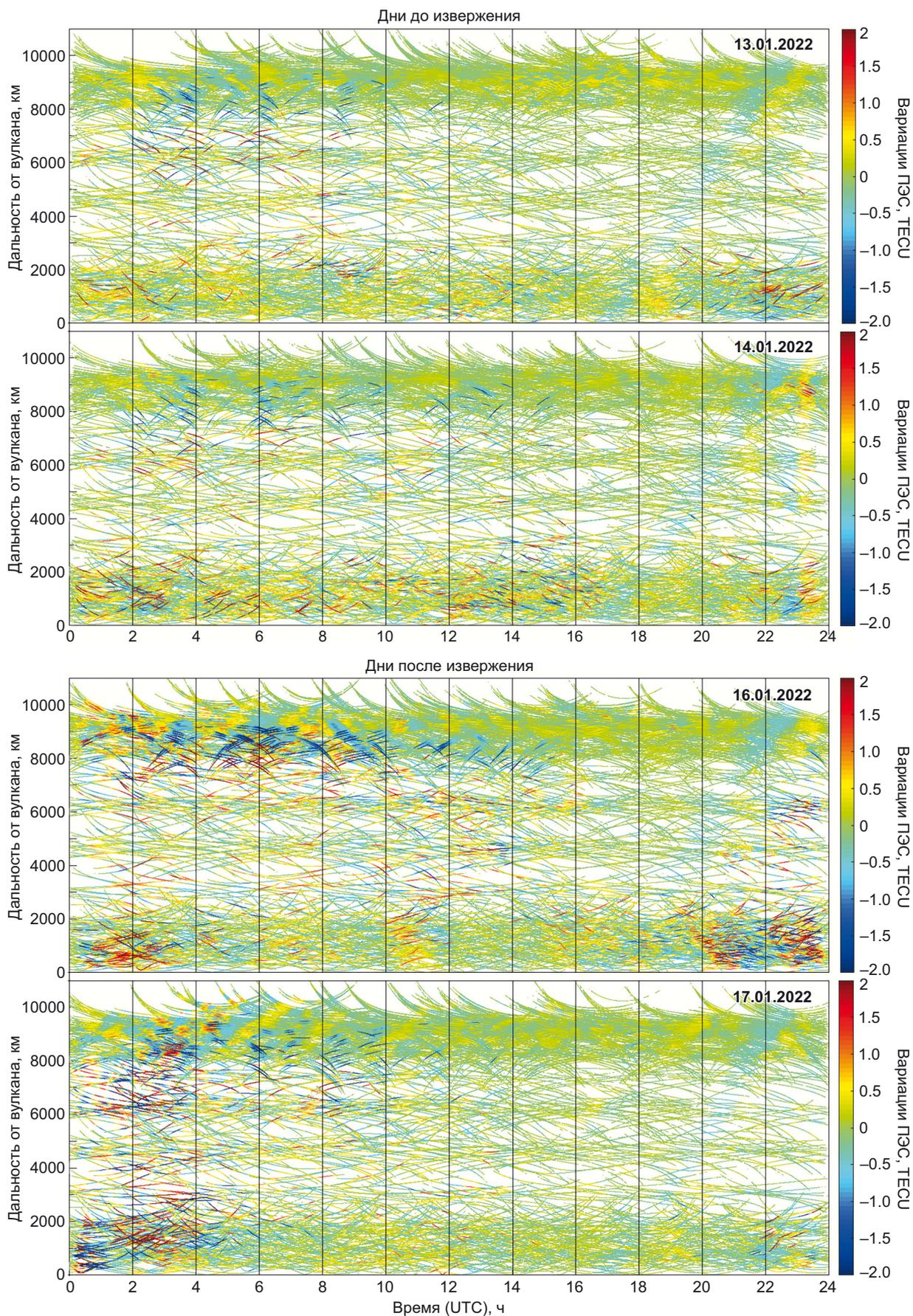


Рис. 5. Диаграммы дальность – время за 13–14 и 16–17 января 2022 г. Период фильтрации данных 10–60 мин.
Fig. 5. Distance – time diagrams of January 13–14 and 16–17, 2022. The data filtering period is 10–60 minutes.

Таблица 1. Оценки скоростей распространения ковулканических возмущений ПЭС по диаграмме дальность – время
Table 1. Estimates of the propagation velocities of covolcanic TEC disturbances obtained by the distance – time diagram

| Номер возмущения | Скорость (средняя скорость) |
|------------------|-----------------------------|
| 1–2 | 690–750 (~720) м/с |
| 3–4 | 940–950 (~950) м/с |
| 5–6 | 610–640 (~630) м/с |
| 7–8 | 320–360 (~340) м/с |
| 9–10 | 320–340 (~330) м/с |

Примечание. Фронты возмущений ПЭС обозначены цифрами 1–10 на рис. 4.

Note. The TEC disturbance fronts indicated by numbers 1–10 in Fig. 4.

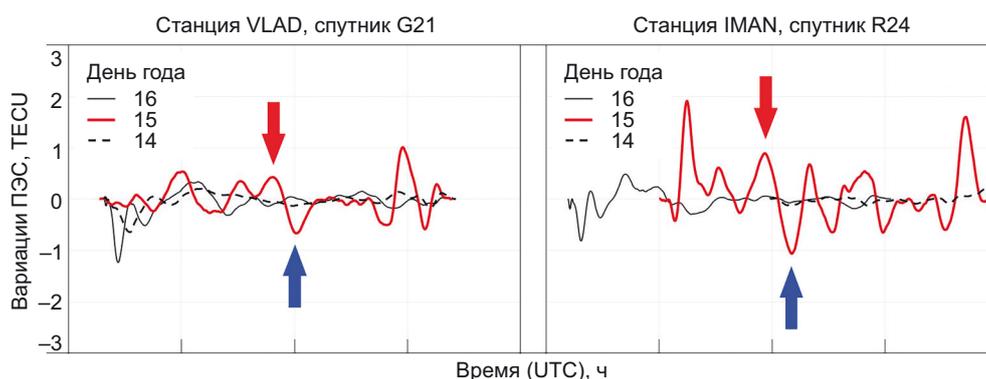


Рис. 6. Примеры вариаций ПЭС за период 14–16 января 2022 г. Диапазон фильтрации 10–60 мин.

Fig. 6. Examples of TEC variations for the period of January 14–16, 2022. Filtering period is 10–60 minutes.

до расстояний 7–8 тыс. км от вулкана с несколько меньшей средней скоростью ~ 630 м/с (ПИБ 5–6); вторая мода, регистрируемая на значительно больших расстояниях, в том числе и над Приморьем, имеет скорость порядка 340 м/с (ПИБ 7–8) и отождествляется рядом авторов с волнами Лэмба [Chen et al., 2022; Heki, 2022; Hong et al., 2022; Themens et al., 2022; Zhang et al., 2022]. Явление разделения возмущений ВПЭС на удалении от породившего их источника уже ранее наблюдалось для сильных землетрясений и описано в работах [Artru et al., 2001; Astafyeva et al., 2009]. Выделяющиеся в дальней зоне ПИБ 9–10, распространяющиеся со средней скоростью ~ 330 м/с, также могут быть ассоциированы с ковулканическими аномалиями ПЭС, так как не наблюдаются в предшествующие извержению и последующие дни.

На рис. 6 приведены примеры вариаций ПЭС, зарегистрированные в день извержения на двух станциях, расположенных в Приморском крае (дальняя зона относительно вулкана). Также даны изменения ПЭС за день до и после него. Из рисунка видно, что в день извержения наблюдаются интенсивные колебания ВПЭС с амплитудами 0.5–1.4 TECU, которые отсутствуют в другие дни. Чтобы убедиться в том, что эти колебания действительно обусловлены извержением, а также отождествить их с соответствующими фронтами ПИБ, визуально выделяющимся на диаграмме дальность – время на расстояниях 9–10 тыс. км от вулкана (см. рис. 4),

среди этих вариаций были выделены первые четко читающиеся максимумы и минимумы (обозначены, соответственно, красными и синими стрелками на рис. 6). Координаты соответствующих им ионосферных точек (точки, в которых лучи приемник – спутник пересекают слой максимальной ионизации) показаны на рис. 4 пурпурными кружками и в крупном масштабе даны на рис. 7. Средняя амплитуда обнаруженных над территорией Приморского края ковулканических возмущений ПЭС составила ~ 1.0 TECU.

Средний период и длина волны этих возмущений были определены по расстоянию между положением максимумов и минимумов, расположенных на одинаковом удалении от вулкана и показанных на соответствующей диаграмме дальность – время (рис. 7). Период обнаруженных возмущений составил ~ 28 мин, а половина длины волны достигла ~ 580 км (соответственно, период и длина волны составили ~ 57 мин и ~ 1160 км). Полученные авторами величины отличаются от значений аналогичных параметров, полученных для дальней зоны в работе [Themens et al., 2022], где период составил ~ 10 –25 мин, а длина волны ~ 250 –500 км, и статье [Zhang et al., 2022], где период составил ~ 10 –30 мин, а длина волны – 500–1000 км. В работе [Saito, 2022], исследующей распространение возмущений над территорией Японии, оценка длины волны (относящаяся к первому приходу возмущений) составила ~ 400 км.

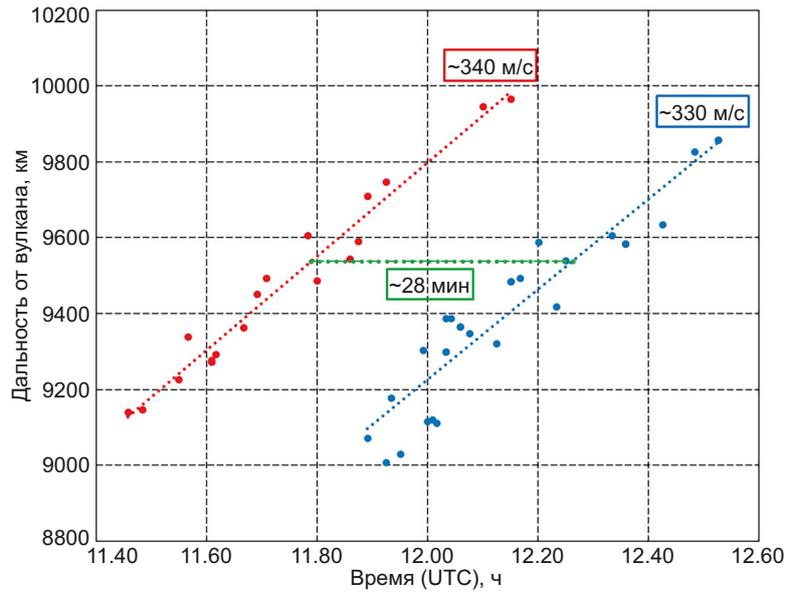


Рис. 7. Определение полупериода и длины волны ковулканических возмущений ПЭС в дальней относительно вулкана зоне. На рис. 4 данный фрагмент выделен пурпурным квадратом. Красными и синими точками обозначены максимумы и минимумы вариаций ВПЭС, зарегистрированные в районе Приморского края. Пунктирными линиями показаны соответствующие им аппроксимационные прямые. В красной и синей рамках даны соответствующие средние скорости распространения ПИВ. В зеленой рамке приведено определенное по диаграмме значение полупериода ковулканических ионосферных возмущений.

Fig. 7. Determination of the half-period and wavelength of the covolcanic TEC disturbances in the far-field zone of the volcano. In Fig. 4, this fragment is highlighted by the purple square. The red and blue dots denote the maxima and minima of the vertical TEC variations registered in the area of the Primorsky Krai. The dotted lines show the corresponding approximation lines. In the red and blue frames the corresponding average velocities of traveling ionospheric disturbances propagation are given. The half-period of the covolcanic ionospheric disturbance is shown in the green frame.

Полученные по данным ГНСС-наблюдений характеристики ковулканических ионосферных возмущений над Приморским краем были сопоставлены с данными других высокоточных инструментов: лазерного нанобарографа (НБ) и двух лазерных деформографов (ДФ), ориентированных по направлениям север – юг и восток – запад. Оба инструмента расположены на юге Приморья, на мысе Шульца, являющегося частью полуострова Гамова, в точке с координатами 42.581° с.ш. 131.157° в.д. в пределах 100 м от ГНСС-станции [Dolgikh et al., 2022a] (на рис. 1 расположение оборудования соответствует обозначению ГНСС-станции SHUL). Для сопоставления с рядами вариаций ВПЭС данные НБ и ДФ были разрежены до 30 с и профильтрованы в том же диапазоне периодов, что и данные ПЭС, полосовым фильтром Хемминга. Используемая процедура дает результаты, аналогичные использованному для анализа данных ПЭС методу скользящего среднего. На рис. 8 представлены полученные после увеличения шага дискретизации данных и фильтрации вариации атмосферного давления по записям нанобарографа и смещений земной поверхности по данным деформографов. Описание используемой аппаратуры приведено в статье [Dolgikh et al., 2022b].

Из рис. 8 видно, что наиболее интенсивные возмущения, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга, наблюдались в период с 12:10:00 до 14:00:00 UTC [Dolgikh et al., 2022a]. Записи всех трех инструментов

фиксируют практически синхронные изменения приземного давления и колебаний земной поверхности, что говорит о том, что последние были инициированы распространением возмущения в нижнем слое атмосферы (тропосфере). Максимум возмущений наблюдался в ~12:29:00 UTC, а минимум в ~12:39:00 UTC. Максимумы и минимумы изменений ВПЭС, зафиксированные по ГНСС-данным в ближайших к мысу Шульца ионосферных точках (рис. 9), наблюдались в ~11:40:00 и ~12:07:30 UTC, т.е. значительно ранее возмущений, зафиксированных НБ и ДФ. Разность моментов фиксации возмущений в тропосфере и ионосфере для максимума составила ~50 мин, для минимума ~30 мин. Эффект опережающего прихода ионосферных возмущений отмечают и другие исследователи. В работе [Heki, 2022] разность моментов фиксации возмущений ПЭС и приземного давления воздуха на территории Японии составила ~40 мин, в статье [Saito, 2022], рассматривающей тот же регион, ~30 мин, а в работе [Hong et al., 2022] первые ионосферные возмущения фиксируются до фиксации возмущений в тропосфере. В статье [Chen et al., 2022] авторы получили разность моментов фиксации возмущений ~40 мин.

Обнаруженный эффект, на первый взгляд, противоречит предположению о том, что распространяющиеся в нижней тропосфере Земли возмущения (волны Лэмба) служат источником выявленных в дальней зоне ПИВ, так как они регистрируются значительно

позже интенсивных возмущений в ионосфере. Однако в работах [Chen et al., 2022; Heki, 2022; Hong et al., 2022; Saito, 2022] обнаружен второй приход ПИВ, время регистрации которых вполне соотносится с зафиксированными также и авторами данной работы достаточно слабыми возмущениями 9–10 (см. рис. 4), наблюдаемыми уже после регистрации аномалий нанобарографом и деформографами и, возможно, инициированными именно тропосферными возмущениями.

Явление ранней регистрации в дальней зоне интенсивных ПИВ 7–8 по отношению к возмущениям приземного давления воздуха и колебаний земной поверхности (см. рис. 4) вулканического происхождения может быть связано с тем, что в атмосфере распространялись два независимых друг от друга возмущения, источниками которых стало извержение вулкана Хунга-Тонга. Первое возмущение распространялось в

тропосфере Земли со скоростью, близкой к скорости распространения звука порядка 320 м/с (зарегистрировано НБ и ДФ), второе, поднявшись вертикально вверх над вулканом, распространялось в ионосфере с большей скоростью порядка 340 м/с (зарегистрировано по ГНСС-данным и на ~6 % больше скорости возмущений, зафиксированных в тропосфере).

Другое объяснение может быть связано с эффектом «опережающих ионосферных возмущений», ранее зафиксированных во время цунами, порожденного Суматра-Андаманским землетрясением 26.12.2004 г. с магнитудой Mw 9.1, при котором ионосферные возмущения распространялись со скоростью ~650 м/с, опередив приход цунами на ~90 мин [Bagiya et al., 2017]. Возникновение таких возмущений объясняется на основе диссипации поперечной моды акустико-гравитационных волн, так как фронт тропосферных возмущений

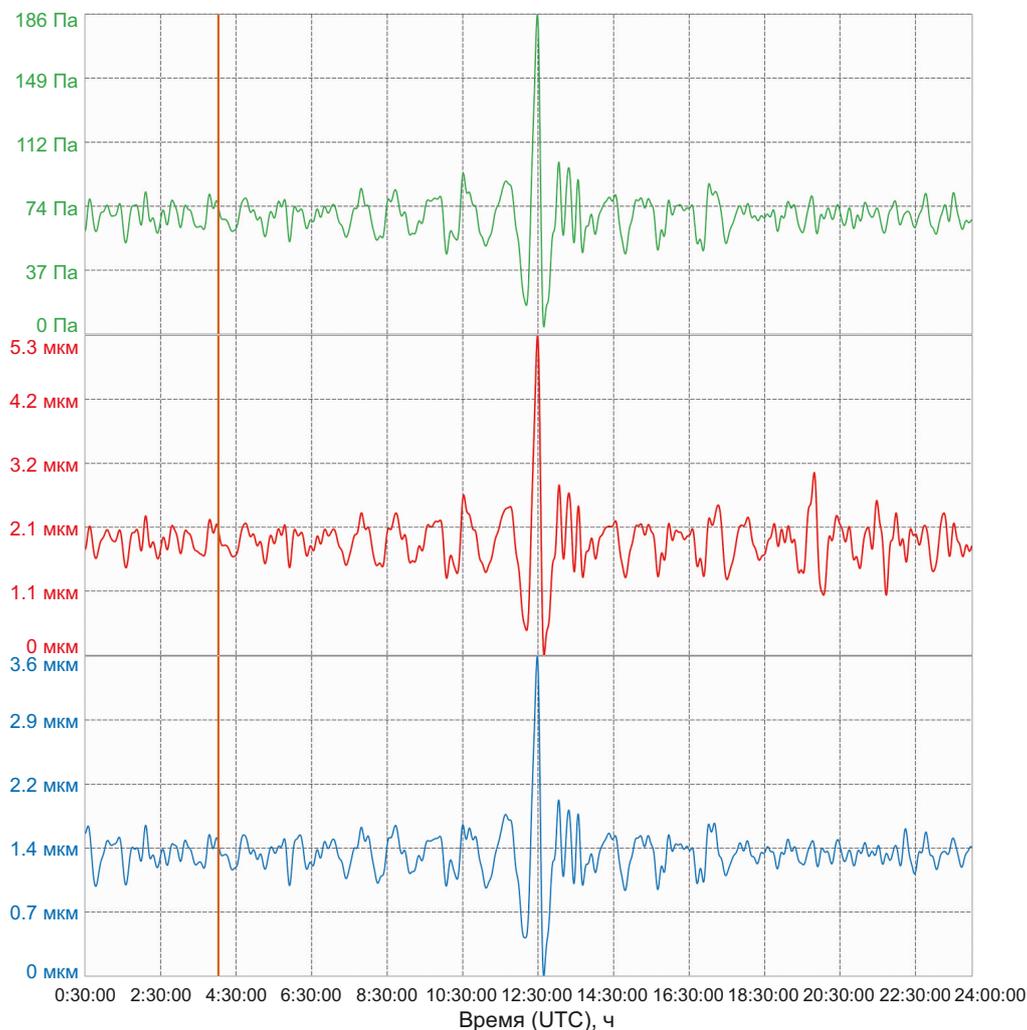


Рис. 8. Фрагменты записи НБ и ДФ за 15 января 2022 г. Диапазон фильтрации 10–60 мин. Зеленым цветом показаны данные НБ; красным цветом – данные ДФ, ориентированного по компоненте «север – юг»; синим – ДФ, ориентированного по компоненте «восток – запад». Вертикальной линией показан момент начала исследуемого эруптивного эпизода.

Fig. 8. Fragments of the laser nanobarograph (NB) and laser strainmeter records for January 15, 2022. The filtering period is 10–60 minutes. The green shows the NB data; the red shows the data of the laser strainmeter oriented along the North-South component; the blue shows the laser strainmeter oriented along the East-West component. The vertical line shows the beginning of the studied eruptive episode.

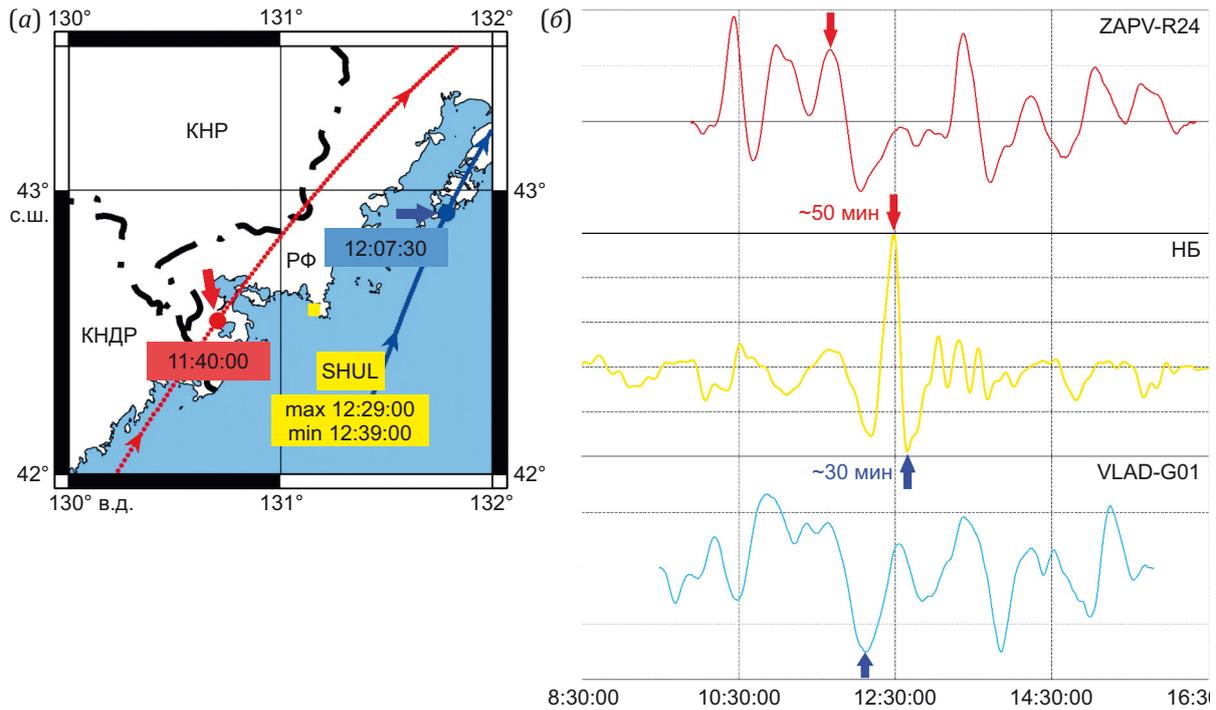


Рис. 9. Положение моментов фиксации пиков возмущений (а) и сравнение моментов фиксации по ГНСС-данным и данным НБ (б).

(а) – красная линия – траектория движения спутника для пары станция «ZAPV» – спутник R24 (ГЛОНАСС); синяя линия – траектория движения спутника для пары станция «VLAD» – спутник G01 (GPS); красным цветом показана точка и время фиксации максимума по ГНСС-данным, синим – минимума по ГНСС-данным, желтым – положение НБ (SHUL), а также время фиксации максимума и минимума по данным НБ. (б) – красными стрелками показаны максимумы возмущений по ГНСС-данным и данным НБ, синими стрелками – минимумы возмущений по ГНСС-данным и данным НБ; красным и синим цветом даны разности моментов фиксации максимумов и минимумов соответственно.

Fig. 9. The position of the first covolcanic TEC disturbance peaks (a) and the comparison of their detection time by the GNSS-data and NB data (b).

(a) – the red line – satellite trajectory for the pair of the station "ZAPV" – satellite R24 (GLONASS); the blue line – satellite trajectory for the pair of the station "VLAD" – satellite G01 (GPS); the red colour shows the point and time of maximum fixation from GNSS data, the blue – the minimum from GNSS data, the yellow - the position of the NB (SHUL), as well as the time fixation of the maximum and minimum from NB data. (b) – the red arrows show the maximums of disturbances from GNSS data and NB data, the blue arrows show the minimums of disturbances from GNSS data and NB data; the red and blue colours give the differences of the moments of the maximums and minimums fixation, respectively.

генерирует распространяющуюся вверх и вперед волну возмущений, достигающую высот ионосферы. Возможно, именно данный механизм объясняет обнаруженный авторами данной статьи и другими исследователями эффект опережающего распространения вариаций ПЭС в дальней относительно источника зоне. Для разрешения этого вопроса требуется выполнение отдельных исследований и математического моделирования полученных данных.

Также следует отметить, что на рис. 4, 5 выделяется ряд достаточно интенсивных аномалий ВПЭС сложной структуры, природа которых на данный момент не ясна. Речь идет об ионосферных возмущениях, наблюдавшихся на расстояниях 8–10 тыс. км от вулкана 15.02.2022 г. в промежутках времени 00–12 и 15–22 часа UTC (см. рис. 4), а также подобные им возмущения, затухающие к 15 часам следующего после извержения дня. Изменяющее свою интенсивность «пятно» вариаций ПЭС также выявляется в промежутках между 00–04 и

20–24 часами в ближней к вулкану зоне (до 2000 км) в течение 13–17 января (см. рис. 4, 5). Наиболее вероятно, эти явления связаны с какими-то долгоживущими образованиями в ионосфере Земли. Однако на диаграммах дальность – время видно, что интенсивность этих аномалий в день извержения и спустя сутки после него заметно усилилась, что также может быть связано с извержением вулкана.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На графиках вариаций ВПЭС, построенных по данным ГНСС-наблюдений, на пунктах, расположенных на территории Приморского края, в день извержения 15 января 2022 г. были обнаружены интенсивные колебания ПЭС, средняя амплитуда которых составила ~1.0 ТЕСУ.

По диаграммам дальность – время были получены значения скоростей распространения возмущений от вулкана Хунга-Тонга в направлении Приморского края

в ближней и дальней зонах, а также до и после разделения возмущений на две моды. Скорости возмущений до разделения на моды, на расстояниях до 2.5–3.0 тыс. км от вулкана, варьировались от ~720 до ~950 м/с. Затем ионосферные возмущения разделились на две моды. Первая распространялась до расстояний 7–8 тыс. км от вулкана со скоростью ~630 м/с. Вторая мода распространялась значительно медленнее и дальше и была зафиксирована на расстояниях 10–11 тыс. км, в том числе над территорией Приморского края. Ее скорость составила ~340 м/с. Также в дальней зоне были обнаружены ионосферные возмущения, которые могли быть порождены ковулканическими возмущениями в тропосфере Земли, их скорость составила ~330 м/с. Эти возмущения отсутствовали в дни до и после извержения.

После сопоставления результатов, полученных по ГНСС-данным, с результатами, полученными по данным нанобарографа и деформографов, был обнаружен эффект «опережающих ионосферных возмущений», также обнаруженный и другими исследователями. Разность моментов фиксации возмущений в тропосфере и ионосфере для максимумов возмущений составила ~50 мин, а для минимумов ~30 мин. Можно предполагать два возможных объяснения возникновения обнаруженного эффекта. Первое объяснение заключается в том, что в верхней и нижней атмосфере Земли распространялись два независимых друг от друга возмущения, источником которых являлось извержение вулкана Хунга-Тонга. Возмущение в тропосфере, отождествляемое с волнами Лэмба, двигалось со скоростью 320 м/с, близкой к скорости распространения звука; второе перемещалось в ионосфере с большей скоростью, ~340 м/с. Другой механизм предполагает, что фронт тропосферных возмущений мог генерировать распространяющуюся вверх и вперед волну возмущений, достигающую высот ионосферы и регистрируемую ГНСС-методами.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность АО «ПРИН», ООО «АЭРОФОТОПРОМ», ООО «Меридиан», ИПМ ДВО РАН и ДВФУ за ГНСС-данные по используемым в анализе ГНСС-станциям на территории Приморского края и признательны научному сотруднику ИСЗФ СО РАН, кандидату физ.-мат. наук С.В. Воейкову за предоставление программного обеспечения Viewtecs.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

М.А. Болсуновский – обработка и анализ ГНСС-данных, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка рукописи статьи. Н.В. Шестаков – формулировка проблемы исследования, анализ данных, обсуждение и анализ полученных результатов, подготовка и редактирование рукописи статьи. Г.И. Долгих, Н.П. Первалова, А.С. Тен – обсуждение и анализ полученных результатов, редактирование рукописи статьи.

М.А. Bolsunovskii – processing and analysis of GNSS data, discussion and analysis of the results obtained, preparation of the manuscript of the article. N.V. Shestakov – formulation of the research problem, data analysis, discussion and analysis of the results obtained, preparation and editing of the manuscript of the article. G.I. Dolgikh, N.P. Perevalova, A.S. Ten – discussion and analysis of the results obtained, editing of the manuscript of the article.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

The authors declare that they have no conflicts of interest to declare. The authors read and approved the final manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Edemskiy I.K., Gavriluk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., 2013. A Review of GPS/GLONASS Studies of the Ionospheric Response to Natural and Anthropogenic Processes and Phenomena. *Journal of Space Weather and Space Climate* 3, A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013049>.
- Afraimovich E.L., Perevalova N.P., 2006. GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere. Irkutsk, 479 p. (in Russian) [Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006. 479 с.].
- Artru J., Lognonne P., Blanc E., 2001. Normal Modes Modelling of Post-Seismic Ionospheric Oscillations. *Geophysical Research Letters* 28 (4), 697–700. <https://doi.org/10.1029/2000GL000085>.
- Astafyeva E., 2019. Ionospheric Detection of Natural Hazards. *Reviews of Geophysics* 57, 1265–1288. <https://doi.org/10.1029/2019RG000668>.
- Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., 2006. Long-Distance Traveling Ionospheric Disturbances Caused by the Great Sumatra-Andaman Earthquake on 26 December 2004. *Earth, Planets and Space* 58, 1025–1031. <https://doi.org/10.1186/BF03352607>.
- Astafyeva E., Heki K., Kiryushkin V., Afraimovich E., Shalimov S., 2009. Two-Mode Long-Distance Propagation of Co-seismic Ionosphere Disturbances. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 114, A10. <https://doi.org/10.1029/2008JA013853>.
- Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T.D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L., 2022. The 15 January 2022 Hunga Tonga Eruption History as Inferred from Ionospheric Observations. *Geophysical Research Letters* 49 (10), e2022GL098827. <https://doi.org/10.1029/2022GL098827>.
- Bagiya M.S., Kherani E.A., Sunil P.S., Sunil A.S., Sunda S., Ramesh D.S., 2017. Origin of the Ahead of Tsunami Traveling Ionospheric Disturbances during Sumatra Tsunami and Offshore Forecasting. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 122 (7), 7742–7749. <https://doi.org/10.1002/2017JA023971>.

Calais E., Minster J.B., 1995. GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following the January 17, 1994, Northridge Earthquake. *Geophysical Research Letters* 22 (9), 1045–1048. <https://doi.org/10.1029/95GL00168>.

Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J. et al., 2022. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing* 14 (9), 2179. <https://doi.org/10.3390/rs14092179>.

Chum J., Hruska F., Zednik J., Lastovicka J., 2012. Ionospheric Disturbances (Infrasound Waves) over the Czech Republic Excited by the 2011 Tohoku Earthquake. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 117, A8. <https://doi.org/10.1029/2012JA017767>.

Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Ovcharenko V.V., 2022a. Atmospheric and Deformation Disturbances Caused by the Hunga-Tonga-Hunga-Ha'apai Volcano. *Doklady Earth Sciences* 505, 575–577. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22080074>.

Dolgikh G., Dolgikh S., Ovcharenko V., 2022b. Initiation of Infrasonic Geosphere Waves Caused by Explosive Eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Volcano. *Journal of Marine Science and Engineering* 10 (8), 1061. <https://doi.org/10.3390/jmse10081061>.

Duncombe J., 2022. The Surprising Reach of Tonga's Giant Atmospheric Waves. *Eos* 103, B02202. <https://doi.org/10.1029/2022eo220050>.

Heki K., 2022. Ionospheric Signatures of Repeated Passages of Atmospheric Waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption Detected by QZSS-TEC Observations in Japan. *Earth, Planets and Space* 74, 112. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01674-7>.

Hong J., Kil H., Lee W.K., Kwak Y.-S., Choi B.-K., Paxton L.J., 2022. Detection of Different Properties of Ionospheric Perturbations in the Vicinity of the Korean Peninsula after the Hunga-Tonga Volcanic Eruption on 15 January 2022. *Geophysical Research Letters* 49 (14), e2022GL099163. <https://doi.org/10.1029/2022GL099163>.

Jorgenson P.S., 1978. Ionospheric Measurements from NAVSTAR Satellites: Final Report. The Aerospace Corporation, El Segundo, USA, 48 p. https://archive.org/details/DTIC_ADA068809.

Muafiry I.N., Meilano I., Heki K., Wijaya D.D., Nugraha K.A., 2022. Ionospheric Disturbances after the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption above Indonesia from GNSS-TEC Observations. *Atmosphere* 13 (10), 1615. <https://doi.org/10.3390/atmos13101615>.

Saito S., 2022. Ionospheric Disturbances Observed over Japan Following the Eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space* 74, 57. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01619-0>.

Shestakov N., Orlyakovskiy A., Perevalova N., Titkov N., Chebrov D., Ohzono M., Takahashi H., 2021. Investigation of Ionospheric Response to June 2009 Sarychev Peak Volcano Eruption. *Remote Sensing* 13 (4), 638. <https://doi.org/10.3390/rs13040638>.

Symons G.J. (Ed.), 1888. *The Eruption of Krakatoa, and Subsequent Phenomena: Report of the Krakatoa Committee of the Royal Society*. Trübner & Co., London, 494 p.

Taylor G.I., 1932. *The Resonance Theory of Semidiurnal Atmospheric Oscillations*. *Memoirs of the Royal Meteorological Society* 4, 41–52.

Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P.T., 2022. Global Propagation of Ionospheric Disturbances Associated with the 2022 Tonga Volcanic Eruption. *Geophysical Research Letters* 49 (7), e2022GL098158. <https://doi.org/10.1029/2022GL098158>.

Verhulst T.G.W., Altadill D., Barta B., Belehaki A., Burešová D., Cesaroni C., Galkin I., Guerra M. et al., 2022. Multi-Instrument Detection in Europe of Ionospheric Disturbances Caused by the 15 January 2022 Eruption of the Hunga Volcano. *Journal of Space Weather and Space Climate* 12, 35. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022032>.

Wright C.J., Hindley N.P., Alexander M.J., Barlow M., Hoffmann L., Mitchell C.N., Prata F., Bouillon M. et al., 2022. Surface-to-Space Atmospheric Waves from Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption. *Nature* 609, 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., 2022. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9, 871275. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

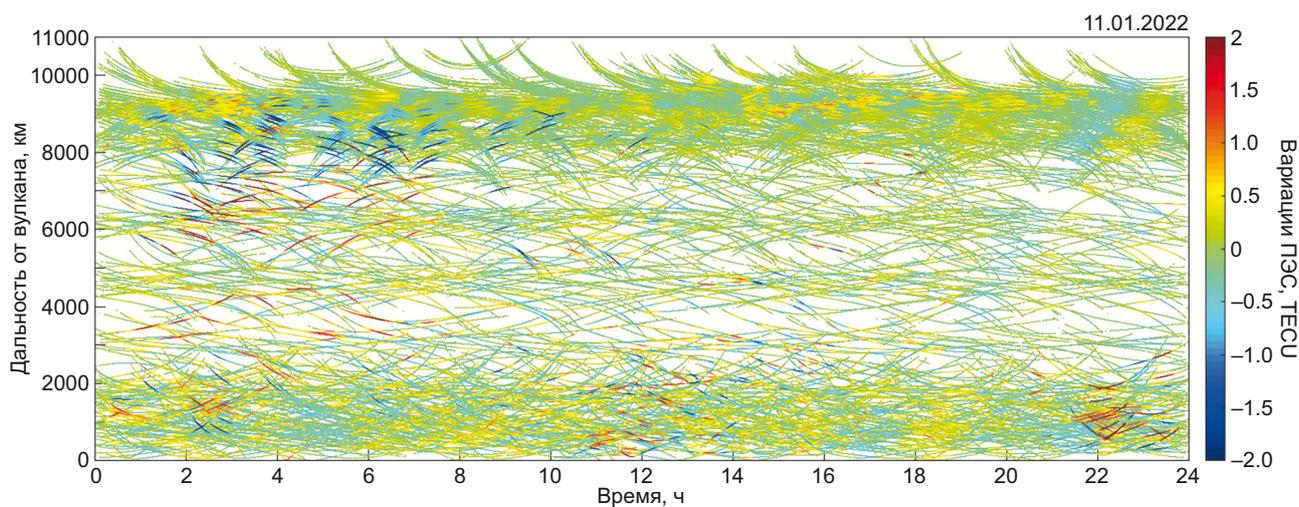


Рис. 1.1. Диаграмма дальность – время за 11.01.2022.

Fig. 1.1. Distance – time diagram on January 11, 2022.

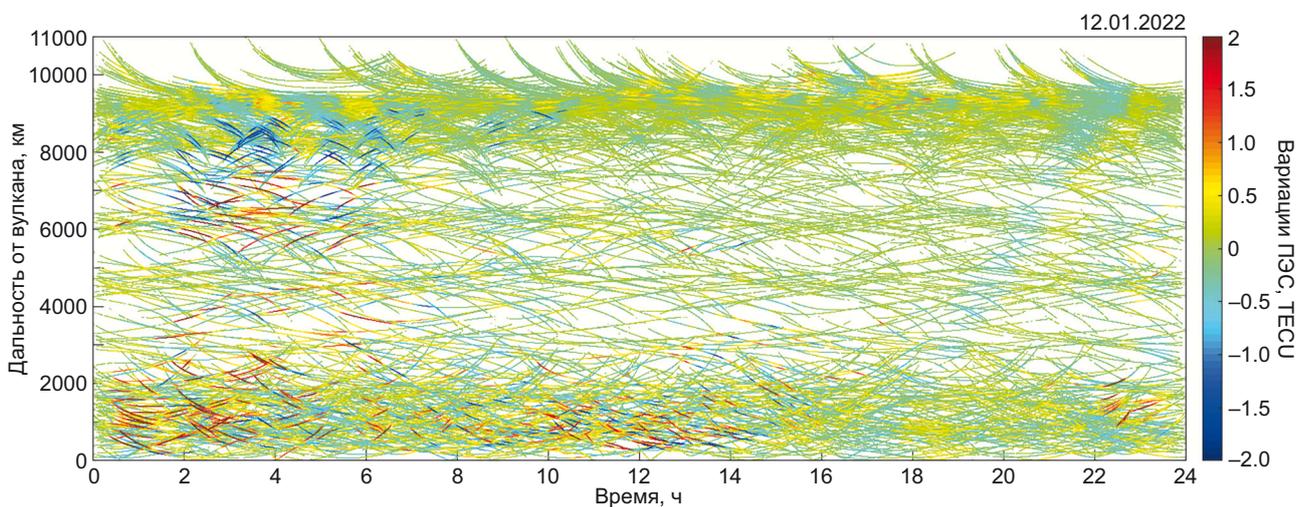


Рис. 1.2. Диаграмма дальность – время за 12.01.2022.

Fig. 1.2. Distance – time diagram on January 12, 2022.

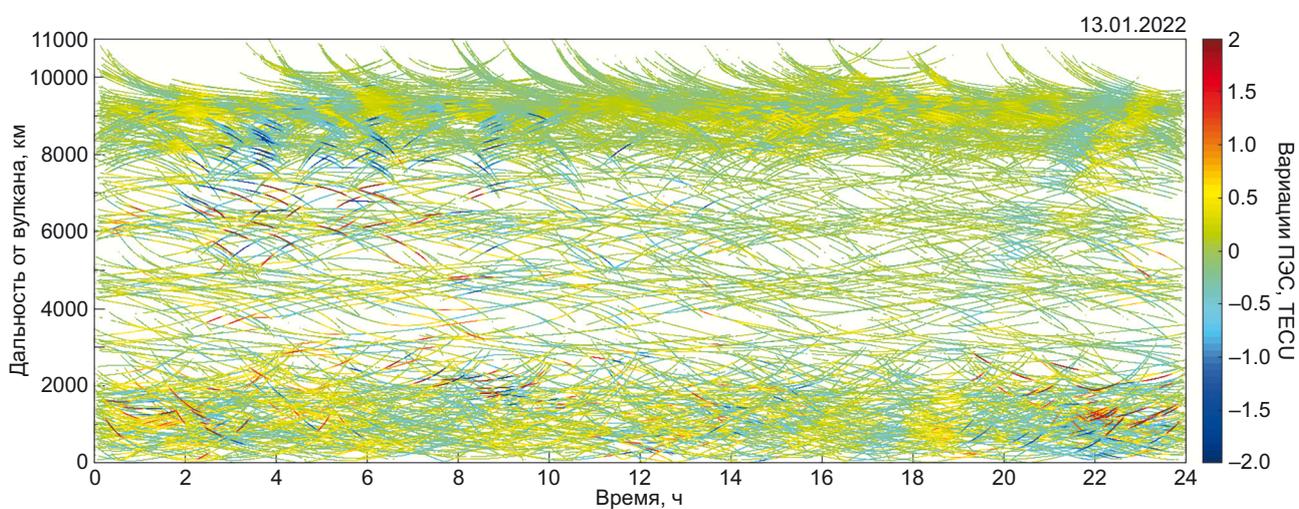


Рис. 1.3. Диаграмма дальность – время за 13.01.2022.

Fig. 1.3. Distance – time diagram on January 13, 2022.

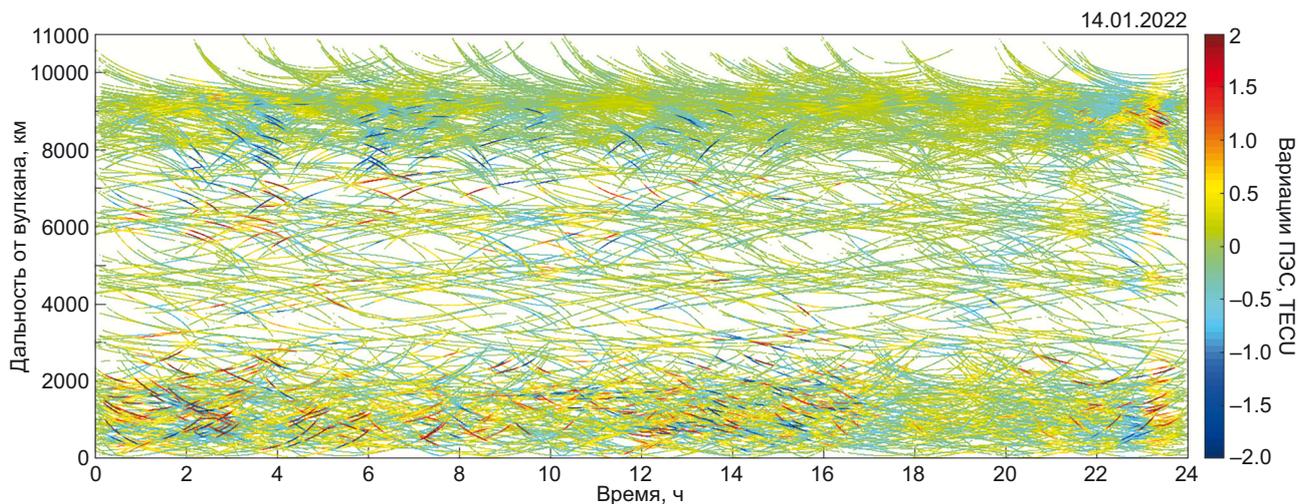


Рис. 1.4. Диаграмма дальность – время за 14.01.2022.

Fig. 1.4. Distance – time diagram on January 14, 2022.

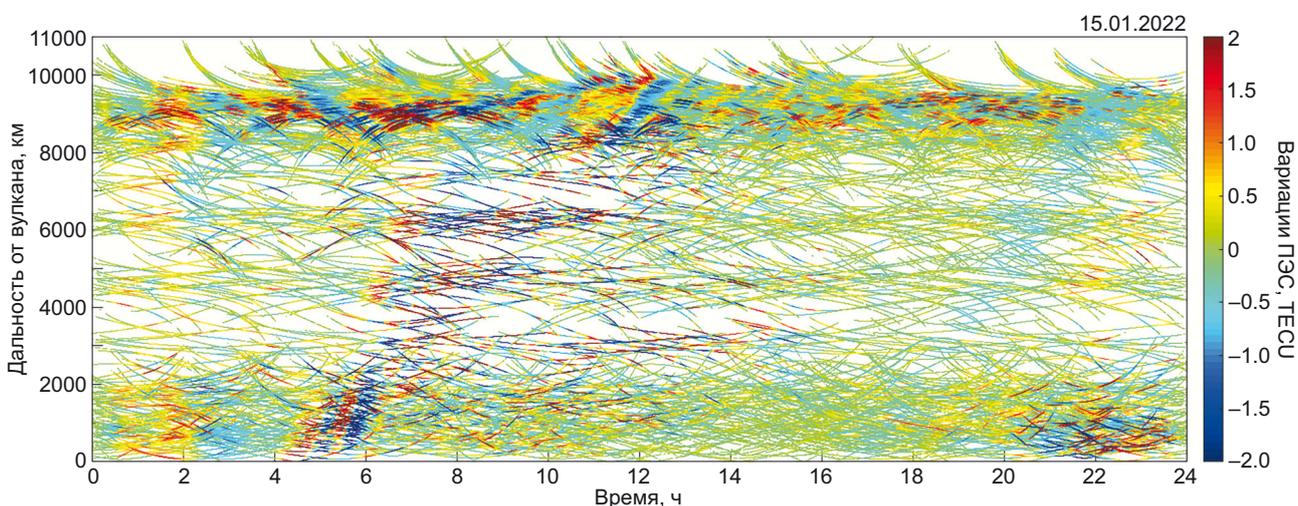


Рис. 1.5. Диаграмма дальность – время за 15.01.2022.

Fig. 1.5. Distance – time diagram on January 15, 2022.

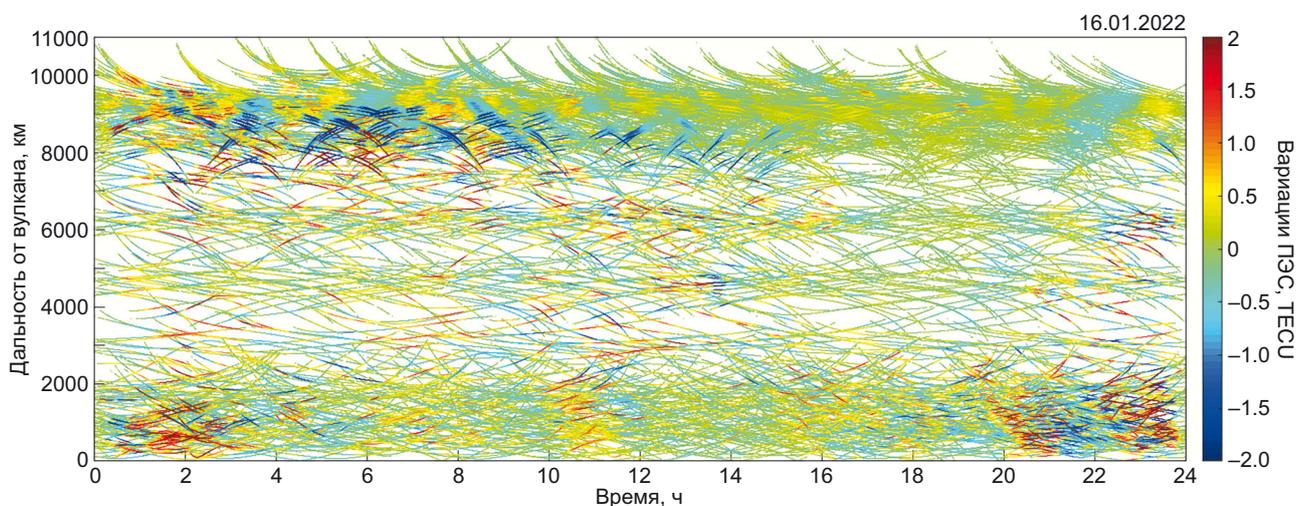


Рис. 1.6. Диаграмма дальность – время за 16.01.2022.

Fig. 1.6. Distance – time diagram on January 16, 2022.

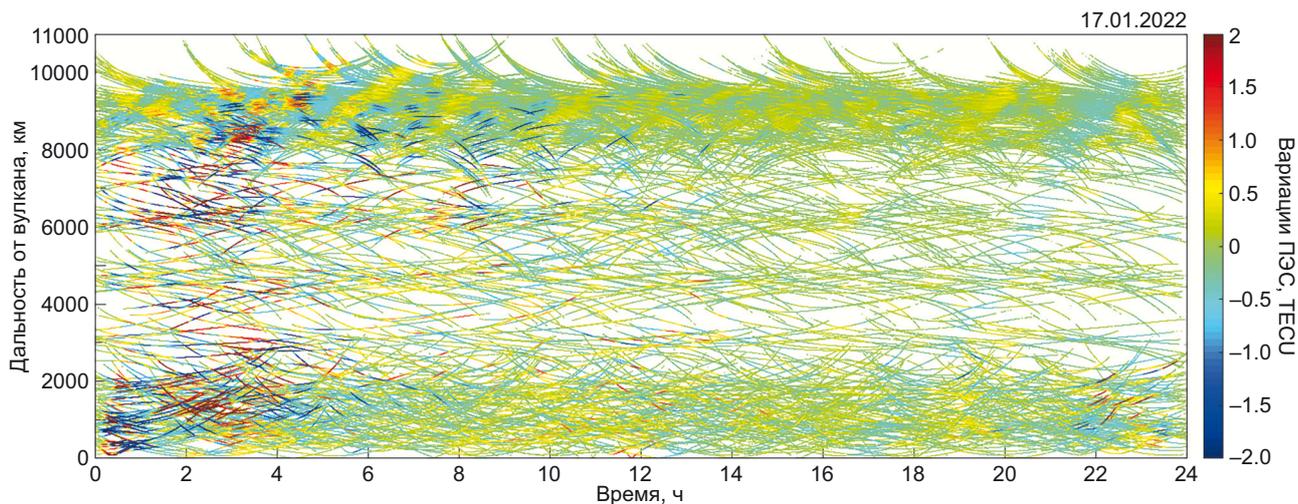


Рис. 1.7. Диаграмма дальность – время за 17.01.2022.

Fig. 1.7. Distance – time diagram on January 17, 2022.

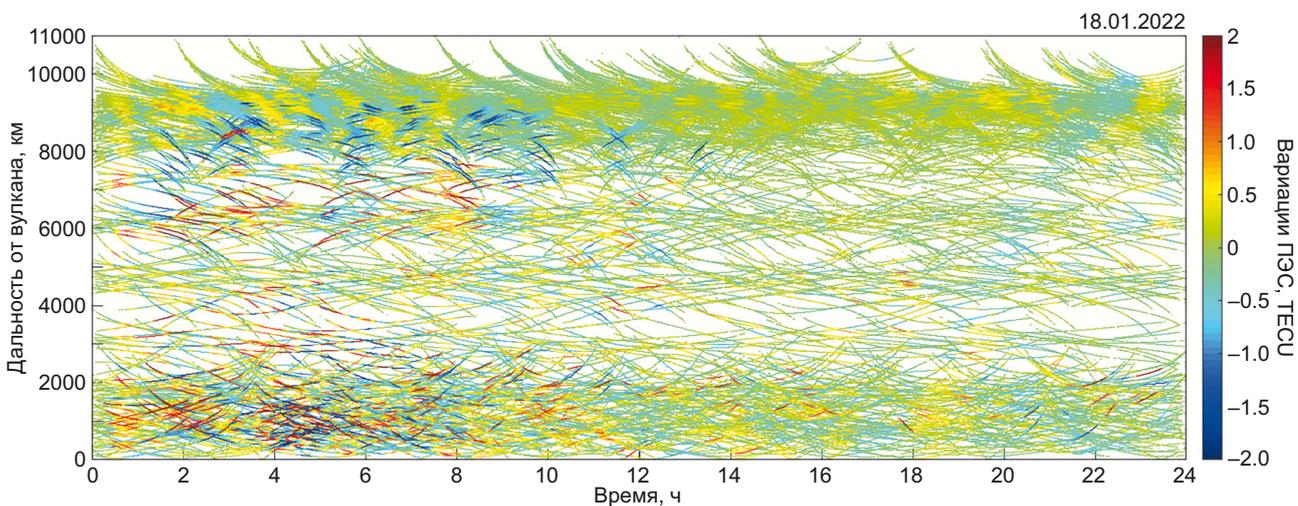


Рис. 1.8. Диаграмма дальность – время за 18.01.2022.

Fig. 1.8. Distance – time diagram on January 18, 2022.

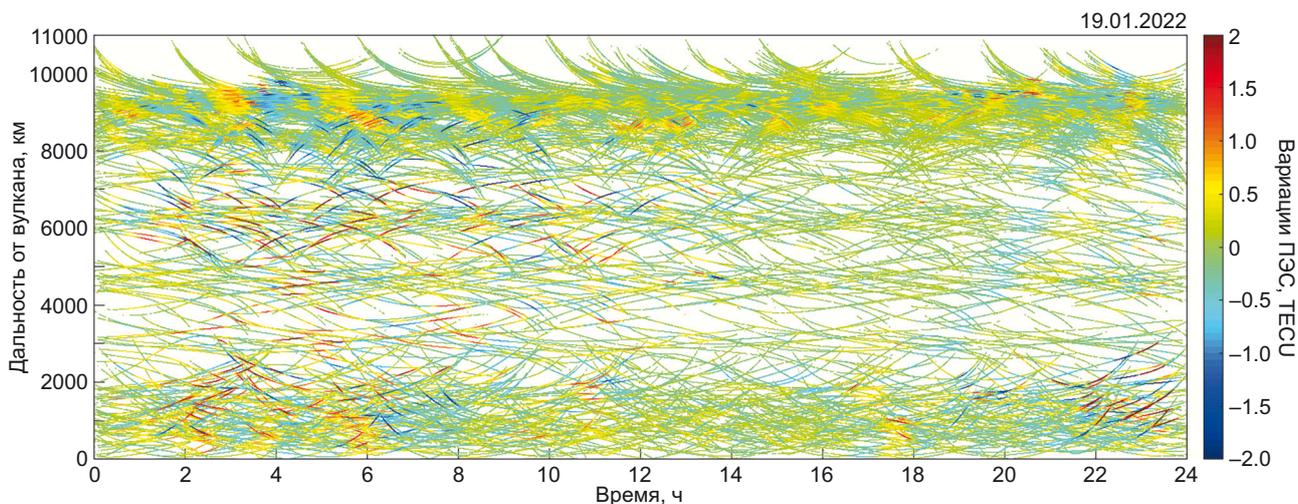


Рис. 1.9. Диаграмма дальность – время за 19.01.2022.

Fig. 1.9. Distance – time diagram on January 19, 2022.

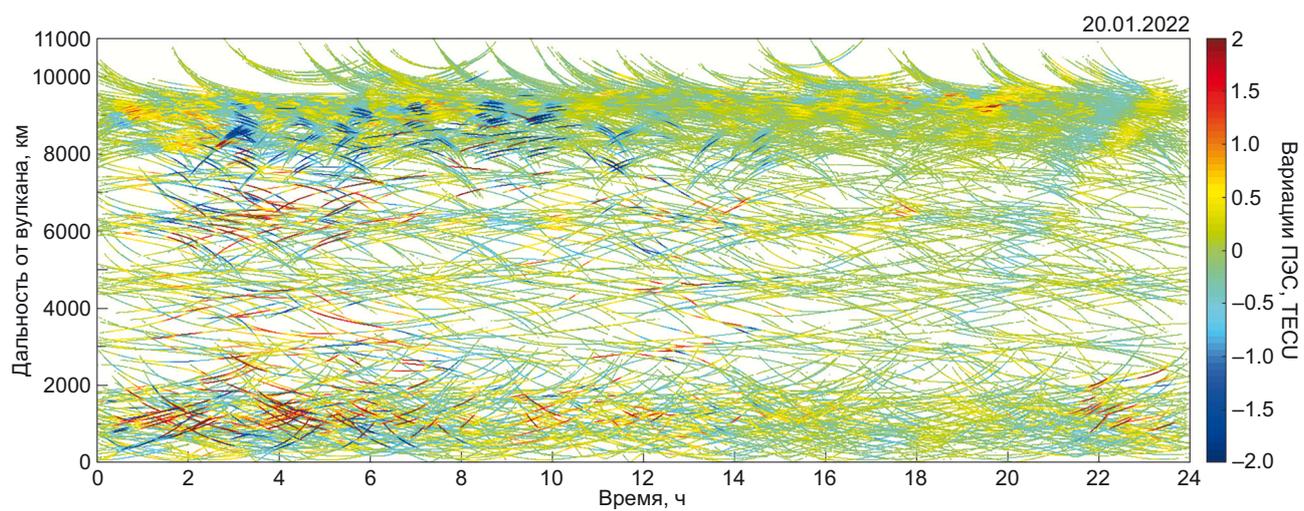


Рис. 1.10. Диаграмма дальность – время за 20.01.2022.

Fig. 1.10. Distance – time diagram on January 20, 2022.