

УДК: 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.233-236

ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫМ КОСМИЧЕСКИМ КОРАБЛЕМ STARSHIP

Ю. В. Ясюкевич¹, А.М. Веснин¹, Э.И. Астафьева², Б.М. Малецкий², В.П. Лебедев¹,
А.М. Падохин^{1,3}, Н.П. Первалова¹

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

²Russia, 2Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), CNRS UMR, Paris, France

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Россия

E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

Аннотация. 18 ноября 2023 года компания SpaceX запустила сверхтяжелый космический корабль Starship. В докладе представлены результаты анализа ионосферного отклика на пролет и взрыв Starship по данным глобальных навигационных спутниковых систем. Мы впервые зарегистрировали распространение на большие расстояния на север интенсивных ионосферных возмущений V-образной формы длиной 2000 км от траектории ракеты. Наблюдаемые возмущения, скорее всего, представляют собой ударные волны, распространяющиеся с углом конуса $\sim 14^\circ$ на севере и $\sim 7^\circ$ на юге против траектории полета, что соответствует углу Маха ударных волн в нижних слоях атмосферы. Впервые обнаружено формирование ионосферной дыры нехимического происхождения.

Ключевые слова: Starship; ионосферные возмущения; ударные волны; полное электронное содержание; ионосферная дыра

IONOSPHERIC DISTURBANCES GENERATED BY THE SUPER-HEAVY SPACESHIP STARSHIP

Yu.V. Yasyukevich, A.M. Vesnin, E.I. Astafyeva, B.M. Maletckii, V.P. Lebedev, A.M. Padokhin,
N.P. Perevalova

Abstract. On 18 November 2023, SpaceX launched the Starship. We present an analysis of the data from ground-based GNSS receivers to the Starship flight and the explosion. For the first time, we observed large-distance northward propagation of intensive 2,000 km V-shaped ionospheric disturbances from the rocket trajectory. The observed perturbations, most likely, represent shock waves propagating with the cone angle of $\sim 14^\circ$ on the North and $\sim 7^\circ$ on the South against the flight track that corresponds to the Mach angle of the shock waves in the lower atmosphere. For the first time, we find out a non-chemical ionospheric hole.

Keywords: Starship; ionospheric disturbances; shock waves; total electron content; ionospheric hole

Введение

Ионосфера чувствительна к многочисленным солнечным и геофизическим явлениям, таким как солнечные вспышки и геомагнитные бури, а также к приповерхностным событиям, таким как стихийные бедствия, взрывы и запуски ракет [1]. Из-за выброса вещества и сверхзвукового движения запуски ракет могут генерироваться акустические и ударно-акустические волны, что часто наблюдаются в ионосфере как N-волны [2].

До сих пор во время запусков наблюдались ионосферные возмущения, вызванные запусками ракет, имеющие V-образную и круговую форму. V-образная форма была объяснена превышением скорости ракеты над скоростью звука, когда вдоль траектории ракеты появляется головная ударная волна, образованная акустическими волнами. Круговые волны являются перпендикулярным срезом и проекцией ударных волн [3]. Помимо ударно-акустических волн, запуски ракет могут оказывать химическое воздействие на локальную ионосферу и вызывать ионосферные дыры [3].

Космический корабль Starship компании SpaceX в настоящее время является самой большой и мощной ракетой. Starship — это двухступенчатая сверхтяжелая ракета-носитель, состоящая из ускорителя Super Heavy (или первой ступени) и космического корабля Starship (второй ступени). 18 ноября 2023 г. компания SpaceX провела второе комплексное летное испытание Starship. Ракета была запущена в 13:02:53 UT с космодрома Starbase (26.0° с. ш., –97.2° в. д.). В 13:05:31 UT, находясь на высоте 70 км, Starship успешно выполнил отделение горячей ступени. После отделения ускоритель Super Heavy инициировал включение бустерного

двигателя, но взорвался в 13:06:11 UT на высоте ~90 км. В то время как Starship продолжал лететь до высоты 149 км, где взорвался в 13:11:23 UT. Обломки продолжали распространяться на большое расстояние вдоль траектории полета.

В настоящем докладе представлены результаты пространственно-временных ионосферных возмущений, вызванных запуском Starship 18 ноября 2023 г. в сравнении с двумя последующими успешными запусками [4].

Ионосферные возмущения во время пролета Starship

Для анализа использовались вариации полного электронного содержания (ПЭС) в диапазоне 2–10 мин. Для сбора данных и вычислений использовалась открытая система обработки данных SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru>) [5]. ПЭС на основе двухчастотных фазовых измерений [1]:

$$I\varphi = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2) \quad (1)$$

где f_1, f_2 – рабочие частоты, $\lambda_1 L_1$ и $\lambda_2 L_2$ – фазовый путь на первой и второй частоте. Из ПЭС удаляется тренд, связанный с движением спутника, а вариации фильтровались в нужном диапазоне методом скользящего среднего [5].

Примерно через 8 мин после запуска Starship 18 ноября 2023 г. были зарегистрированы ионосферные возмущения. Наблюдалось запаздывание в отклике для станций, удаленных от региона запуска (и траектории) на большее расстояние. На юге некоторые станции демонстрировали классическую N-образную форму отклика с амплитудой ~1,1 TECU и периодом ~10 мин. За этими волнами следуют возмущения с более коротким периодом (2–3 мин) и меньшими амплитудами (~0,2–0,3 TECU). На севере мы наблюдаем множественные колебания с периодом ~5–7 мин и амплитудами 0,6–1,2 TECU. Пространственные карты вариаций ПЭС (рис. 1) демонстрируют асимметрию распространения возмущений: на север волны распространяются на большее расстояние и имеют более выраженный и протяженный фронт. Полную картину можно увидеть в анимации в приложении к [4].

С 13:17–13:19 UT мы регистрировали конусообразный волновой фронт на север и северо-восток от траектории на ~80°–85°W долготы. Одновременно мы также наблюдали волны, исходящие из места первого взрыва. Эти фронты далее распространяются на северо-восток и, по-видимому, сливаются в один волновой фронт длиной ~2000 км. Мы наблюдали генерацию и распространение по крайней мере 3 интенсивных возмущений ПЭС и еще 7 меньшей амплитуды.

Что касается конусообразного возмущения, основываясь на снимках ПЭС в 13:35:00 UT (рис. 1а), мы оценили угол между траекторией полета и V-образной волной как ~14° для северной части и ~7° для южной части. Следовательно, угол Маха составил ~11°. Наша оценка угла Маха для высоты 100–150 км этому соответствует.

Рис. 1г демонстрирует значительное падение ПЭС по измерениям спутника G32. После небольшого положительного пика 1–4 TECU ПЭС значительно снижается до –10–15 TECU. В данных отдельных спутников падение амплитуды сохраняется до 30–40 мин, в то время как другие (например, G15) характеризовались восстановлением ПЭС через ~6–8 минут. Такие формы волн аналогичны реакции ионосферного ПЭС на крупные землетрясения [6]. В данном случае ионосферная дыра больше по амплитуде, но короче по продолжительности по сравнению с землетрясением Тохоку. В случае крупных землетрясений возникновение ионосферной дыры объясняется воздействием нелинейных ударно-акустических волн, распространяющимися от земли в атмосферу/ионосферу и вызывающими значительный нисходящий ионосферный транспорт, который приводит к усилению обмена зарядом O⁺ и его превращению в молекулярные ионы и, соответственно, к более высокой рекомбинации [7].

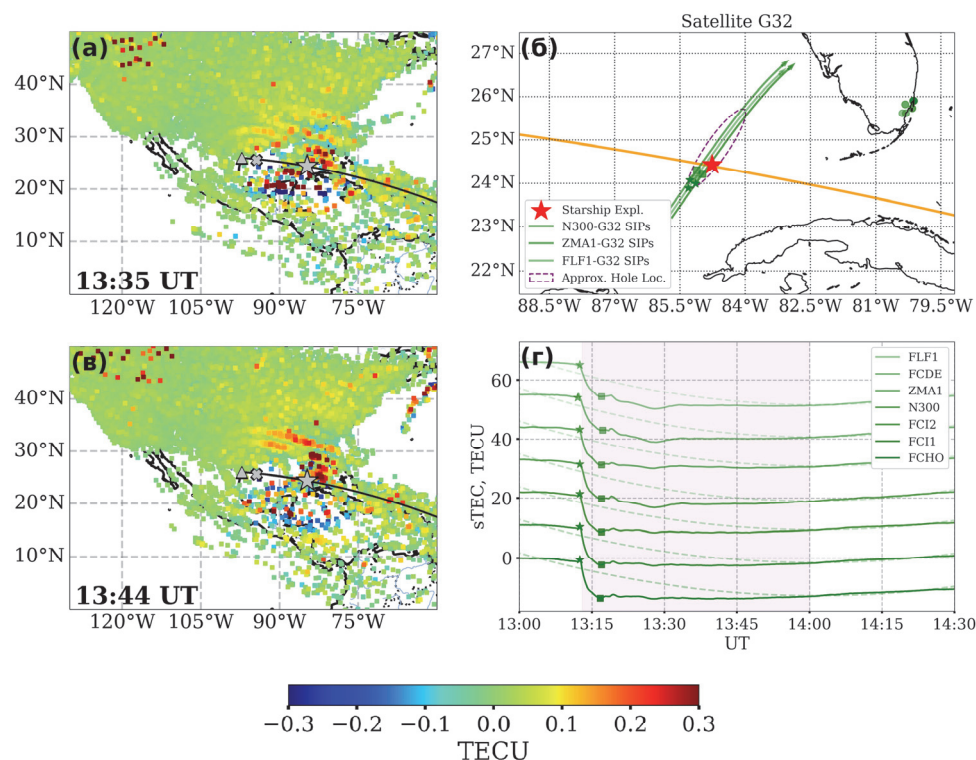


Рис. 1. Ионосферные возмущения во время пролета и взрыва космического корабля Starship 18 ноября 2023 г. (а, в) – пространственная структура вариаций ПЭС 2-10 мин (шкала снизу); (б, г) – геометрия пролета и динамика наклонного ПЭС. На панели (г) маленькая зеленая звездочка отмечает увеличение ПЭС. Звездочки на панелях (а-в) означают место взрыва Starship

Регистрация ионосферных дыр после запуска ракет не является новым, но обычно их причина – это химические реакции между выхлопом ракетного топлива и окружающей ионосферой [8]. При этом обычно не наблюдается предшествующий положительным пик, как в случае события Starship в ноябре 2023 года. Более того, Starship взорвался на высоте 149 км и не достиг высоты, на которой могли бы произойти реакции обмена зарядами, превращающие атомарные ионы в нейтралы и вызывающие снижение ионизации [8].

Мы проанализировали реакцию ионосферного ПЭС на два более поздних запуска Starship (14 марта 2024 г. и 6 июня 2024 г.), при которых взрыв в рассматриваемом регионе не происходил, но параметры этих запусков аналогичны запускам в ноябре 2023 года. В обоих случаях мы регистрировали N-волны с большой амплитудой и колебания меньшей амплитуды. N-волна с большой амплитудой располагалась близко к траекториям полета (см. рис. 2) во время всех трех запусков, но ионосферная дыра наблюдалась только во время запуска в ноябре 2023 г. Таким образом наблюдаемая ионосферная дыра была вызвана ударной волной, созданной взрывом Starship в нижних слоях атмосферы.

Заключение

Впервые зарегистрирован ионосферный отклик на пролет и взрыв космического корабля Starship в событии 18 ноября 2023 г. Обнаружена ионосферная дыра не химического происхождения, вызванная сгенерированными во время взрыва ударными волнами. Обнаружены V-образные волновые возмущения, преимущественно распространяющиеся на север. Угол конуса V-образных ионосферных возмущений соответствует углу Маха ударных волн, распространяющихся на высоте 100–150 км.

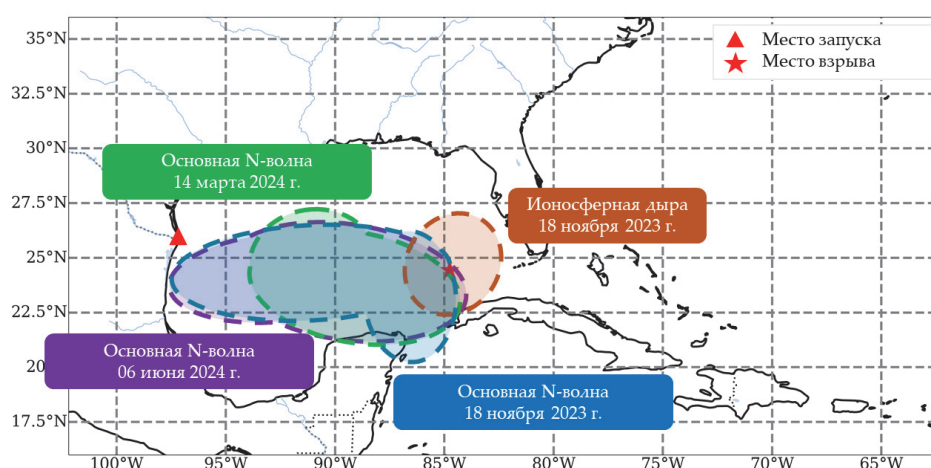


Рис. 2. Область наблюдения ионосферной дыры и максимальных амплитуд N-волны для пролетов Starship 18 ноября 2023 г., 14 марта 2024 г., 06 июня 2024 г.

Благодарности

В работе использована данные и обработка системы SIMuRG [5]. Мы благодарны следующим научным центрам за данные ГНСС: the International GNSS service (IGS), Pacific Northwest Geodetic Array (PANGA), INGV - Rete Integrata Nazionale GPS, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, The Western Canada Deformation Array, Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL), Scripps Orbit and Permanent Array Center, UCSD. Обработка данных ГНСС и разработка специализированного ПО выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант N 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>). ЭИА и БММ (геофизический анализ) выражают признательность за поддержку the French National Research Agency (ANR), project IONO-DIET (Grant ANR-22-CE49-0011), и the French Space Agency (CNES), project "RealDetect". Авторы глубоко признательны Prof. Kosuke Heki за его ценные советы и замечания по работе.

Список литературы

1. Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather Space Clim. – 2013. – V. 3. – A27. – DOI: 10.1051/swsc/2013049
2. Lin C.H., Lin J.T., Chen C.H., Liu J.Y., Sun Y.Y., et al. Ionospheric shock waves triggered by rockets. Ann. Geophys. – 2014. – V. 32. – P. 1145–1152. DOI: 10.5194/angeo-32-1145-2014.
3. Chou M., Shen M., Lin C.C.H., Yue J., Chen C., Liu J., Lin J. Gigantic Circular Shock Acoustic Waves in the Ionosphere Triggered by the Launch of FORMOSAT-5 Satellite // Space Weather. – 2018. – V. 16. – P. 172–184. – DOI: 10.1002/2017SW001738.
4. Yasyukevich Y.V., Vesnin A.M., Astafyeva E., Maletckii B.M., Lebedev V. P., Padokhin A. M. Supersonic waves generated by the 18 November 2023 Starship flight and explosions: Unexpected northward propagation and a man-made non-chemical depletion // Geophysical Research Letters. – 2024. – V. 51. – e2024GL109284. DOI: 10.1029/2024GL109284
5. Yasyukevich Y.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V., Edemskiy I.K., Syrovatskii S.V., Maletckii B.M., Vesnin A.M. SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS // GPS Solutions – 2020. – V. 24. – 69. DOI: 10.1007/s10291-020-00983-2
6. Astafyeva E., Lognonné P., Rolland L. First ionosphere images for the seismic slip on the example of the Tohoku-oki earthquake // Geophys. Res. Lett. – 2011. – V. 38. – L22104. – DOI: 10.1029/2011GL049623.
7. Zettergren M. D., Snively J. B., Komjathy A., Verkhoglyadova O. P. Nonlinear ionospheric responses to large-amplitude infrasonic-acoustic waves generated by undersea earthquakes // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2017. – V. 122. – P. 2272–2291. – DOI: 10.1002/2016JA023159.
8. Bernhardt P.A. A critical comparison of ionospheric depletion chemicals // J. Geophys. Res. – 1987. – V. 92. – 4617. – DOI: 10.1029/JA092iA05p04617