

УДК 550.388.2

## ГЛОБАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ И НЕЙТРАЛЬНАЯ ПЛОТНОСТЬ ТЕРМОСФЕРЫ ПРИ ЗАПУСКАХ СПУТНИКОВ *STARLINK* В 2019–2023 гг.

© 2025 г. Т. Л. Гуляева<sup>1,\*</sup>, Р. Ю. Лукьянова<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*e-mail: gulyaeva@izmiran.ru

\*\*e-mail: lukianova@cosmos.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 06.12.2024 г.

Принята к публикации 10.12.2024 г.

Влияние возмущений в околоземном пространстве необходимо учитывать при запуске космических аппаратов во избежание внештатных ситуаций. В настоящей работе рассмотрены изменения нейтральной плотности термосферы ( $\rho$ ) по данным спутников *Swarm* и глобального электронного содержания (GEC) по картам JPL GIM-TEC при 130 запусках спутников *Starlink* в 2019–2023 гг. Выделены и проанализированы вариации  $\rho$  и GEC за 24-часовой период, центрированный на момент старта. Исследованы пространственное распределение и эволюция  $\rho$  и GEC в зависимости от изменения солнечной активности, сезона и уровня геомагнитной активности до и после каждого события запуска *Starlink*. Показано, что с увеличением фазы  $\Phi$  солнечного цикла от  $\Phi = 0.5$  (февраль 2022 г.) до максимума СЦ25  $\Phi = 1$  (апрель 2024 г.) значение GEC и  $\rho$  возрастают соответственно в 2.1–3.5 раза. В течение рассмотренного периода наблюдались 75 магнитных бурь категорий NOAA G1–G4 при  $Kp \geq 5.0$ , из них 19 бурь в интервале  $\pm 24$  ч от момента запуска *Starlink*. Только в одном случае наблюдалась аварийная ситуация 3.II.2022 при запуске *S-36*, когда 38 из 49 спутников сошли с орбиты во время малой двухфазной геомагнитной бури уровня G1 ( $Kp = 5.3$ ). Проведено сравнение с другим успешным запуском *S-77* 23.III.2023 во время интенсивной магнитной бури категории G3 ( $Kp = 7.3$ ). Показано, что при запуске *S-77* нейтральная плотность  $\rho$  преобладала в северных высоких широтах, а в случае *S-36* термосфера была плотнее вблизи экватора. После запуска *S-36* GEC показал смену положительного возмущения на отрицательное, а в случае *S-77* наблюдалась строго отрицательная аномалия GEC. Рассмотренные примеры показывают, что интенсивность геомагнитной бури не является единственным критерием внештатной ситуации. При запусках космических аппаратов должны учитываться и другие характеристики, в том числе увеличение электронного содержания в ионосфере и плотности нейтральной атмосферы, сопровождаемое усилением торможения спутников на низких орбитах.

DOI: 10.31857/S0023420625040018, EDN: QNHISM

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Во избежание внештатных ситуаций при запуске и эксплуатации космических аппаратов (КА) необходимо учитывать влияние возмущений в околоземном пространстве. Примером такой внештатной ситуации может служить аварийный запуск *Starlink* 3.II.2022, когда 38 из 49 спутников сошли с орбиты во время малой двухфазной геомагнитной бури. Это событие было детально исследовано многими авторами [1–12].

Все эти работы подтверждают, что катастрофа с запуском *S-36* была вызвана последствиями увеличения на 50 % плотности нейтральных частиц вследствие геомагнитной бури, сопровождавшимся усилением торможения спутников сразу после запуска на первом этапе полета. Проект *S-36* включал запуск 49 спутников на орбиту 350 км в апогее и 210 км в перигее, наклонение  $53.5^\circ$  с последующим поднятием на высоту 550 км [3]. Фактическое превышение плотности нейтралов 3–4.II.2022 оказалось намного больше,

чем увеличение во время бурь, прогнозируемое широко используемыми эмпирическими моделями. При дальнейшем росте солнечной активности в течение последующих запусков, часть из которых происходила во время геомагнитной бури, не было потерь спутников, за исключением аварий по техническим причинам (<https://spaceflightnow.com/2024/07/11/live-coverage-spacex-to-launch-20-starlink-satellites-on-falcon-9-rocket-from-vandenberg-space-force-base/>). В следующих после февральского инцидента запусках SpaceX выводил спутники на значительно более высокую начальную орбиту, чтобы уменьшить сопротивление. Перигей был увеличен с 210 до 325 км (<https://www.nasaspacesflight.com/2022/02/starlink-group-4-8/>). В 2023 г. команда *Starlink* видеоизменила конструкцию КА, введя две солнечные панели вместо одной, и несколько увеличила высоту промежуточной орбиты, начиная с которой спутники совершают маневр на постоянную орбиту. Космические аппараты второго поколения меньше, легче и имеют прямоугольную форму, что обеспечивает большую гибкость при установке и размещении в касете (*Starlink Wiki*). Детали решения о переходе на модификацию *Starlink V2 Mini* не раскрываются. Однако можно предположить, что симметрия и меньшая площадь делают конструкцию более устойчивой в условиях возмущений атмосферной плотности и более управляемой.

Свыше 210 событий запусков *Starlink* с 2019 г. по настоящее время можно рассматривать как обширную базу данных для исследования влияния геофизических условий на запуски спутников, что позволит лучше понимать эволюцию параметров термосферно-ионосферной (Т-И) системы. При геомагнитно-возмущенных условиях нагрев термосферы сопровождается ее расширением и подъемом ионосферной плазмы к области более слабой рекомбинации. Это обуславливает тенденцию к увеличению электронной плотности. Процесс рекомбинации также связан с соотношением нейтралов  $O$  и  $N_2$ . Когда воздух, обедненный кислородом и богатый азотом, поднимается из нижней термосферы в F-слой, уменьшение  $O / N_2$  вызывает там уменьшение электронной плотности. В зоне авроральных овалов два процесса происходят одновременно и вызывают противоположные отклики, зависящие от географической долготы и местного времени. Вариации плотности плазмы могут быть вызваны не только вертикальным перемещением, но и дрейфом в электрическом поле, нейтральным ветром и диффузией. На плотность нейтралов влияют адвекция, диффузия и

нагрев. Отклик ионосферы на магнитную бурю в каждом полушарии может быть также сезонно асимметричным, что приводит к перераспределению Т-И параметров [13, 14]. Тем не менее в глобальном масштабе обеспечивается определенная связь между плотностью нейтрального газа на фиксированной высоте (выше F-слоя) и заряженных компонентов в системе Т-И [15].

Целью настоящей работы является сравнение геофизических условий во время 130 последовательных запусков *Starlink* с 2019 по 2023 г., а также исследование изменения параметров Т-И в зависимости от сезона, солнечной и геомагнитной активности. Для анализа использованы измерения нейтральной плотности термосферы ( $\rho$ ) на спутниках *Swarm* и показатель глобального содержания электронов (GEC), рассчитанный по картам JPL GIM-TEC. Глобальное электронное содержание представляет собой показатель, отражающий полное количество электронов в околосреднем космическом пространстве, впервые предложенный в работе [16]. Исходя из сравнения связи нейтральной и ионизированной компонент Т-И, рассматривается возможность использования GEC для прогнозирования возмущений плотности термосферных нейтралов. Хотя орбита *Swarm* располагается выше уровня, на котором были потеряны спутники *Starlink*, изменения  $\rho$  вдоль орбиты позволяют определить соответствующие колебания в термосфере. В частности, необычная термосфера наблюдалась в январе–апреле 2022 г.

## 2. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ И ТЕРМОСФЕРЕ

Для изучения изменений заряженной компоненты используем параметр GEC, который вычисляется по глобальным ионосферным картам GIM-TEC полного электронного содержания (TEC), составляемых на регулярной основе американской Лабораторией реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory, JPL). Параметр GEC вычисляется за каждый час мирового времени из значения TEC, представляющего собой число электронов в столбе единичного сечения площадью  $1 \text{ м}^2$  в заданной географической точке в заданный момент времени с использованием уравнений, приведенных в публикации [11]. Значение GEC эквивалентно общему числу электронов в ионосфере от ее основания (65 км) до орбиты навигационных спутников ( $\sim 20000$  км), измеренному в единицах GECU ( $1 \text{ GECU} = 10^{32}$  электронов). Примеры вариаций GEC во время магнитной бури рассмотрены в

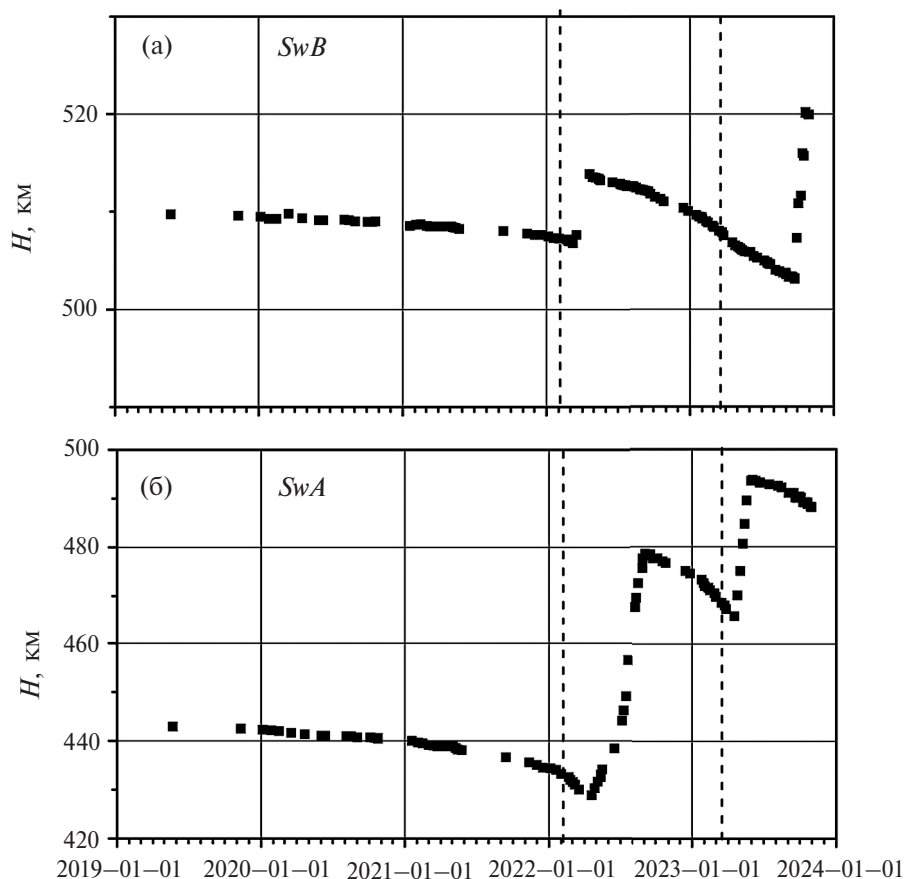
работе [17]. В настоящей работе используются часовые и среднесуточные данные GEC, относящиеся к последовательным запускам *Starlink* за период 2019–2023 гг.

Прямые измерения нейтральной плотности на орбите *Starlink* не проводятся, поэтому, чтобы проследить за эволюцией термосферы, используются измерения на спутниках *Swarm* на высотах, значительно превышающих высоты спутников *Starlink* на начальной стадии запуска (т.е. 210–350 км). Тем не менее измерения вдоль орбиты *Swarm* демонстрируют глобальный отклик термосферы на изменяющиеся условия космической погоды.

Группировка спутников *Swarm*, запущенная в конце 2013 г. и действующая поныне, включает три идентичных спутника: *Alpha* (*SwA*), *Bravo* (*SwB*) и *Charlie* (*SwC*); все размещены на низкой полярной орбите. Два нижних КА (*SwA* и *SwC*) летят рядом на расстоянии около 150 км ( $1.4^\circ$ ) на экваторе и временным лагом 4–10 с вдоль орбиты во избежание столкновения на полюсах;

наклонение орбиты  $87.4^\circ$ . Спутник *SwB* летает в другой меридиональной плоскости на несколько большей высоте с наклонением орбиты  $87.8^\circ$ . Постепенно сдвигаясь по долготе, орбиты покрывают все сектора местного времени (Local Time, LT) за несколько месяцев. В начале миссии орбиты нижней пары и орбита верхнего спутника лежали в одной плоскости. Затем орбитальные плоскости стали постепенно расходиться. В 2018 г. орбита *SwB* стала перпендикулярной к орбите нижней пары, а в 2021 г. все орбиты вновь стали параллельными, но вращающимися в противоположном направлении.

В начале 2014 г. орбитальные высоты составляли 480 (*SwA* / *SwC*) и 527 км (*SwB*). В течение 2015–2019 гг. спутники постепенно снижались от  $\sim 470$  до 450 км и от 524 до 516 км, соответственно. Позже высоты продолжали уменьшаться до момента выполнения маневра подъема. На рис. 1 показана эволюция высоты *Swarm* в 2019–2023 гг. Орбиту *SwB* поднимали дважды: от  $\sim 505$  до 515 км в 2022 г. и затем от  $\sim 502$  до



**Рис. 1.** Эволюция высоты спутников *Swarm* в 2019–2023 гг. (*SwB* — панель (а), *SwA* — панель (б)). Высоты орбит осреднены в области широт  $\pm 55^\circ$ . Каждая точка соответствует дню запуска *Starlink*. Штриховыми линиями указаны моменты запуска S-36 и S-77

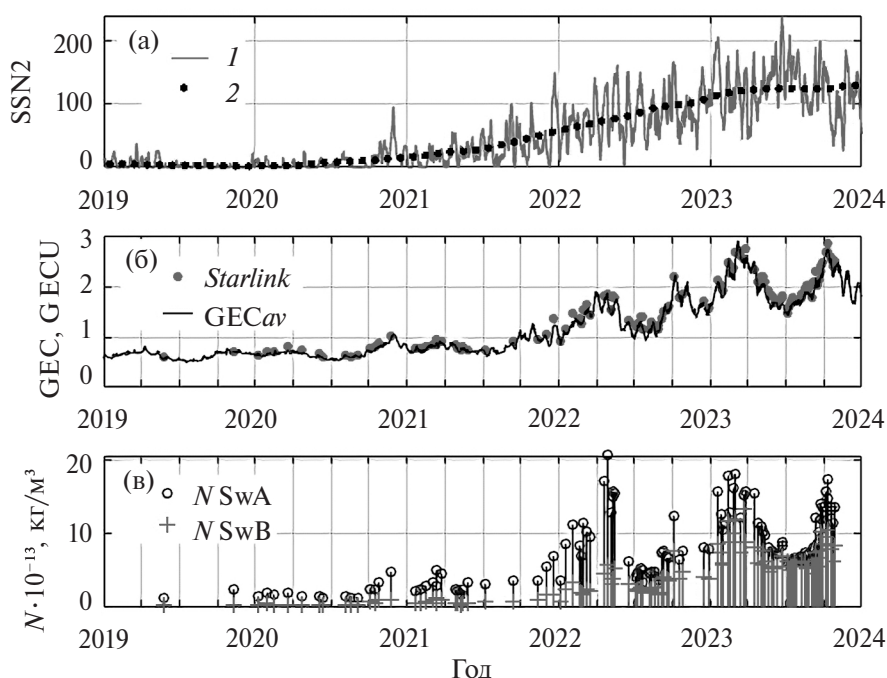
520 км для обеспечения необходимого разделения с нижней парой и отсутствия пересечения с орбитами *Starlink*. Спутники нижней пары *SwA* / *SwC* в 2022 г. стали довольно быстро опускаться и в апреле оказались на минимальной высоте <430 км. Сразу после этого начался постепенный подъем орбит до высоты ~480 км к августу 2022 г., после чего орбиты начали снижаться до высоты ~465 км. В апреле 2023 г. при втором маневре пара поднялась с 465 до ~495 км.

Основная миссия *Swarm* состоит в измерении магнитного поля Земли [18]. Каждый КА оснащен высокоточным скалярным векторным магнитометром. Спутники *Swarm* также измеряют параметры ионосферной плазмы с помощью зонда Лэнгмюра. Они оборудованы электростатическим акселерометром и приемниками глобальной позиционной системы (Global Positioning System, GPS). Подобные трехосные акселерометры ранее выполняли измерения на спутниках *CHAMP*, *GRACE* и *GOCE*. Однако оказалось, что данные акселерометров *Swarm* содержат большое число аномалий [19]. В связи с этим для измерения нейтральной плотности был применен альтернативный подход, в котором негравитационное ускорение вычисляется из прецизионного

определения орбиты (Precise Orbit Determination, POD) на основе сигналов GPS. Плотность термосферы вычисляется из аэродинамических ускорений по данным POD [20]. В отличие от метода использования данных акселерометра, метод POD не испытывает проблем калибровки, но имеет более низкое временное разрешение. 30-секундные плотности POD (пространственный масштаб ~250 км) вдоль каждой орбиты являются продуктом 2-го уровня (Level 2), представленным в виде ежедневных файлов на сайте Европейского космического агентства (ESA). Во время каждого запуска *Starlink* орбиты *Swarm* были в разных секторах местного времени LT. Разница по высоте между нижним и верхним КА составляла 50–80 км.

### 3. СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ИОНОСФЕРЫ И ТЕРМОСФЕРЫ

Эволюция солнечной активности, временные ряды GEC и  $\rho$  в дни запусков *Starlink* в 2019–2023 гг. представлены на рис. 2. Ежедневное число солнечных пятен (англ. Sunspot Number, SSN), а именно ре-калиброванные значения [21] версии SN\_V2.0 SILSO (1 — красная линия) и



**Рис. 2.** Панель (а) — ежедневное число солнечных пятен (1 — красная линия) и 12-месячное сглаженное число пятен (2 — точки); (б) — среднее за каждый день значение GECav в 2019–2023 гг. (сплошная линия) и максимальное значение GEC в интервале  $\pm 12$  ч относительно часа запуска *Starlink* (точки); (в) —  $\rho_{SwA}$  (кружки) и  $\rho_{SwB}$  (крестики) в это же время



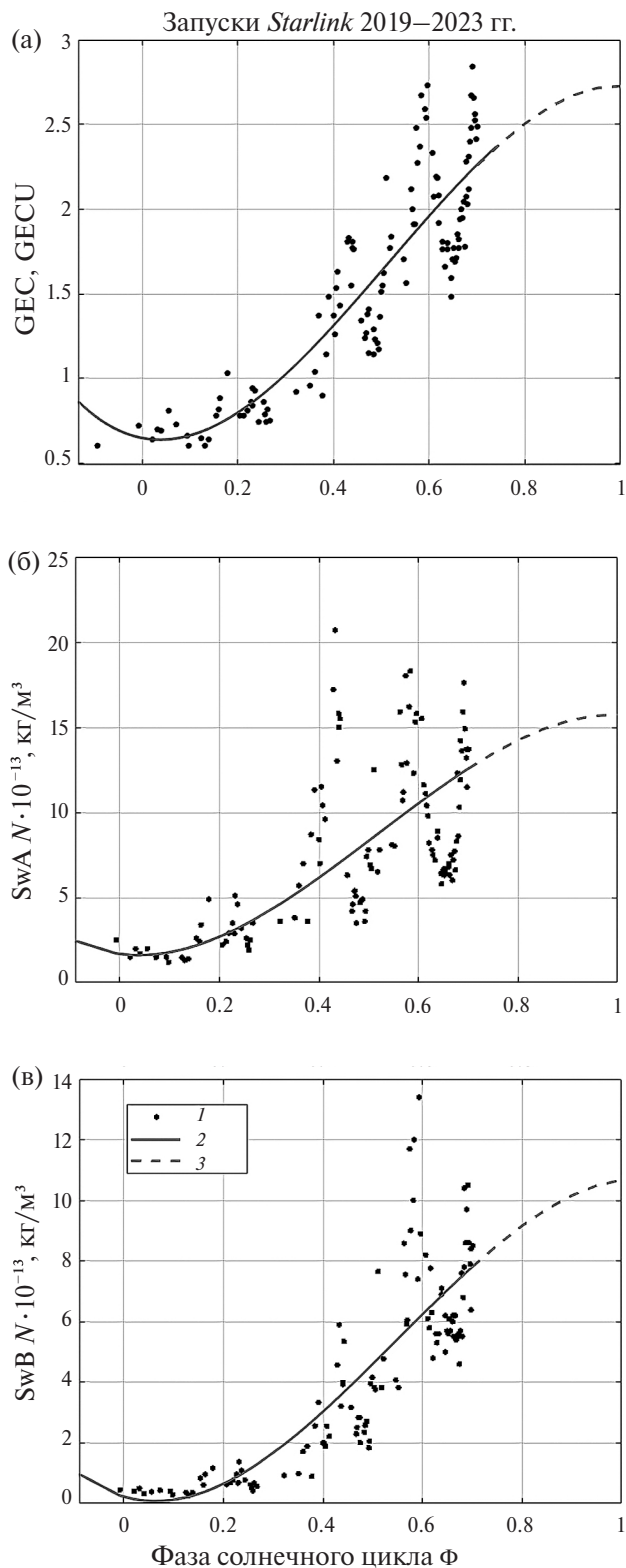
12-месячное сглаженное число пятен ( $2$  — точки), приведены на рис. 2а. На рис. 2б показан временной ряд ежедневных средних значений GEC (сплошная кривая) и пиковых значений GEC (точки), наблюдавшихся в  $\pm 12$ -часовом интервале до и после момента запуска *Starlink*. Значения  $\rho$  по данным *SwA* ( $\rho_{\text{SwA}}$ ) и *SwB* ( $\rho_{\text{SwB}}$ ) для такого же 24-часового окна даны на рис. 2в. Каждое значение  $\rho$  представляет собой среднее значение вдоль орбиты *Swarm* в пределах широт  $\pm 55^\circ$ , т.е. относится к области прохождения спутников *Starlink* ( $53.5^\circ$ ). Показаны только данные *SwA*, т.к. спутники в паре имеют почти совпадающие орбиты и их данные идентичны. Все временные ряды демонстрируют сезонные циклы, в частности, отражая годовую асимметрию GEC [17]. Параметр  $\rho$  имеет максимумы в равноденствие, основной минимум в июле и вторичный минимум в январе [22]. Из-за более высокой (примерно на 60 км) орбиты КА  $\rho_{\text{SwB}}$  несколько меньше, чем  $\rho_{\text{SwA}}$ . Плотности *SwA* изменяются в диапазоне  $(0.1-2.0) \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>, а верхний предел плотностей *SwB* равен  $1.4 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>. Заметной особенностью была разница между значениями  $\rho_{\text{SwA}}$  и  $\rho_{\text{SwB}}$ , которая в течение первых месяцев 2022 г. (когда орбита *SwA* была на высотах ниже 430 км) оказалась значительно больше, чем в остальное время.

Рисунок 2 демонстрирует общий рост параметров GEC и  $\rho$  в соответствии с развитием восходящей ветви 25-го солнечного цикла (СЦ25). На рис. 3 показана зависимость GEC и  $\rho$  от фазы цикла  $\Phi$ . Параметр  $\Phi$  соответствует модели прогноза солнечной активности для восходящей ветви СЦ25 [23]. Эта модель представляет аналитическое выражение связи числа солнечных пятен и солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см (F10.7) с фазой солнечного цикла  $\Phi$ .

Параметр определяется в виде:

$$\Phi = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}. \quad (1)$$

Здесь  $T$  представляет дробную часть года для каждого дня (номер дня в году, деленный на годовое число дней). Например,  $T = 2019.392$  для 24.V.2019 (дата первого запуска S-1 *Starlink*). Показатель  $T_{\min}$  есть дробная часть года в день минимума СЦ, а  $T_{\max}$  — ожидаемый день солнечного максимума. Параметр  $T_{\min} \leq T \leq T_{\max}$  при изменении  $\Phi$  от 0 до 1 на восходящей ветви СЦ, и  $T_{\max} \leq T \leq T_{\min}$  при изменении  $\Phi$  от  $-1$  до 0 на нисходящей ветви цикла. Для расчета  $\Phi$  в день запуска S-36 3.II.2022 введем в уравнение (1)



**Рис. 3.** Изменения GEC и нейтральной плотности в зависимости от фазы солнечного цикла  $\Phi$  — (а) GEC, (б)  $\rho_{\text{SwA}}$ , (в)  $\rho_{\text{SwB}}$ . Наблюдаемые значения (1 — точки), полиномиальная модель (2 — сплошная линия), модельный прогноз к максимуму СЦ25 (3 — штриховая линия)

значения  $T = 2022.09$ ,  $T_{\min} = 2019.9$ , и прогнозируемое значение  $T_{\max} = 2024.4$  для СЦ25. Тогда  $\Phi = 0.487$ , т.е. этот день приходится на середину фазы восходящей ветви СЦ25.

На рис. 3 представлены статистические зависимости GEC,  $\rho_{\text{SwA}}$  и  $\rho_{\text{SwB}}$  от  $\Phi$ . Коэффициент корреляции  $cc$  равен 0.87, 0.64 и 0.82, среднеквадратичное отклонение (Root Mean Square Error, RMSE) от аппроксимирующей кривой равно 0.29 GECU,  $3.65 \cdot 10^{-13}$  кг/м<sup>3</sup> и  $1.71 \cdot 10^{-13}$  кг/м<sup>3</sup> для GEC,  $\rho_{\text{SwA}}$  и  $\rho_{\text{SwB}}$ , соответственно. Полиномиальное приближение по методу наименьших квадратов имеет вид:

$$Y = \sum_1^4 p_i \cdot \Phi^{4-i}. \quad (2)$$

Параметр  $Y$  обозначает GEC,  $\rho_{\text{SwA}}$  или  $\rho_{\text{SwB}}$ , индекс  $i$  означает порядковый номер коэффициента полинома. Коэффициенты  $p_i$ , коэффициент определенности  $R^2$  и отклонение RMSE приведены в таблице. Модельные значения приведены для 3.11.2022, дня запуска  $S-36$  ( $\Phi = 0.487$ ). Модель (2) позволяет рассчитать прогнозируемые значения параметра  $Y$  вплоть до максимума СЦ25. При этом используется только прогноз ожидаемого дня максимума СЦ  $T_{\max}$ , и расчет не зависит ни от выбранного индекса солнечной активности, ни от абсолютной величины его максимального значения. Подставляя значение  $\Phi = 1$  в выражение (2), получаем соответствующие параметры максимума. Эти значения приведены в последней колонке таблицы. Фактически наблюдаемые значения  $Y$  могут существенно отличаться от прогноза (2). Большая дисперсия в основном связана с сезонными изменениями, амплитуда которых возрастает с солнечной активностью.

Во всех рассмотренных параметрах основной сезонный максимум наблюдается вблизи равноденствия [24], как показано на рис. 4. Форма глобальной полугодовой вариации  $\rho$  и GEC соответствует механизму перемешивания в солнцестояние и меньшего диффузионного разделения

термосферных газов, что повышает плотность  $N_2$  и снижает плотность атомарного кислорода по сравнению с равноденствием [25]. Летне-зимняя циркуляция приводит к уменьшению высотной шкалы и меньшей плотности массы термосферы, а изменение нейтрального состава — к уменьшению GEC.

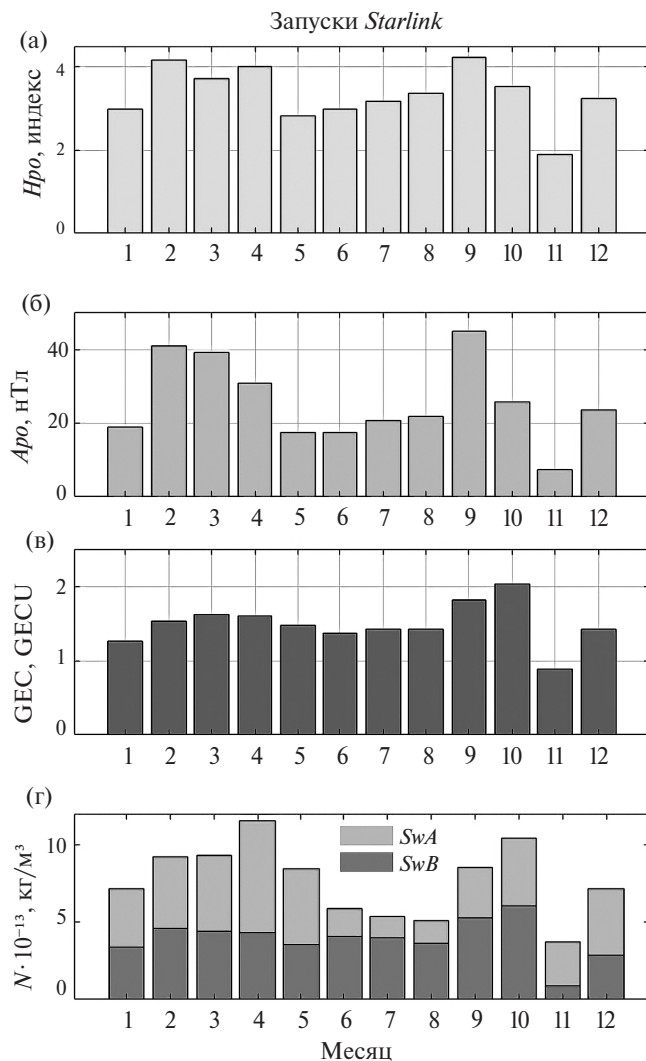
Наличие максимума подразумевает, что нейтральная плотность и GEC увеличиваются в равноденствие и соответственно возрастает торможение спутников, поэтому особое внимание к условиям запуска должно быть уделено в эти месяцы.

Подчеркнем, что прогнозируемые значения  $Y_{\max}$  для максимума СЦ25 (без учета сезонных изменений) превышают соответствующие значения при запуске  $S-36$  в 2.1, 2.6 и 3.5 раза соответственно для GEC,  $\rho_{\text{SwA}}$  и  $\rho_{\text{SwB}}$ . Это ожидаемое увеличение значительно превосходит фактический рост нейтральной плотности при запуске  $S-36$ , когда  $\rho$  возросло примерно на 50 % во время малой бури [1–10]. Именно нейтральная компонента (т.е.  $\rho$ ) создает проблему дополнительного торможения низкоорбитальных спутников в максимуме СЦ. В то же время GEC наблюдается на регулярной основе в виде глобальных карт GIM-TEC, что обеспечивает ежедневный мониторинг состояния ионосферы, поэтому было бы удобно рассматривать именно этот параметр в качестве прокси-индекса для прогноза вариаций плотности термосферного газа.

На рис. 5 показана корреляция GEC и  $\rho_{\text{SwB}}$  (рис. 5а) и  $\rho_{\text{SwA}}$  (рис. 5б). Их связь можно аппроксимировать линейной функцией. Физическое обоснование довольно тесной связи GEC и  $\rho$  (регрессионные коэффициенты приведены ниже) заключается в том, что возрастание GEC в первую очередь связано с уменьшением процесса рекомбинации плазмы. Когда ионосферная плазма, созданная путем фотоионизации на более низких высотах, поднимается на более высокие уровни, где рекомбинация происходит гораздо медленнее, это приводит на высотах более

**Таблица.** Параметр  $Y$ , коэффициенты уравнения (2), коэффициент определенности  $R^2$ , среднеквадратичное отклонение RMSE, параметры модели для дня запуска  $S-36$  и максимальные значения  $Y_{\max}$ , прогнозируемые для максимума СЦ25

| $Y$                 | $p_1$  | $p_2$ | $p_3$ | $p_4$ | $R^2$ | RMSE | $Y(S-36)$ | $Y_{\max}$ |
|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|------------|
| GEC                 | −4.81  | 7.43  | −0.54 | 0.65  | 0.78  | 0.29 | 1.28      | 2.73       |
| $\rho_{\text{SwA}}$ | −32.42 | 50.14 | −3.66 | 1.68  | 0.44  | 3.65 | 6.00      | 15.73      |
| $\rho_{\text{SwB}}$ | −23.77 | 38.28 | −4.56 | 0.22  | 0.71  | 1.71 | 2.90      | 10.17      |



**Рис. 4.** Сезонные вариации при запусках *Starlink*: (а) — геомагнитный индекс *H<sub>pro</sub>*; (б) — геомагнитный индекс *A<sub>ro</sub>*; (в) — GEC; (г) —  $\rho_{\text{SwA}}$  (светлый цвет) и  $\rho_{\text{SwB}}$  (темный цвет)

400 км к увеличению плотности плазмы [15], а также и к увеличению GEC. Подъем усиливается с увеличением термосферного нагрева и расширения во время геомагнитных бурь или / и повышения солнечной активности.

Хотя в измерениях *Swarm*  $\rho$  не является глобальным параметром, а только осредненным вдоль орбиты для определенного времени LT, корреляция между GEC и  $\rho$  оказывается высокой. Для *SwB* (рис. 5а) уравнение регрессии с соответствующим коэффициентом Пирсона  $cc$  имеет вид:

$$\rho_{\text{SwB}} = 3.3(\pm 0.3) + 4.8(\pm 0.2) \cdot \text{GEC}, \quad (3)$$

$$cc = 0.95.$$

В отличие от рис. 5а на рис. 5б линейная аппроксимация неоднозначна. Все точки за январь–апрель 2022 г. расположены выше основной линии регрессии с данными GEC. На рис. 5б эти отстоящие точки и соответствующая линия регрессии обозначены серым цветом. Фактически линейная регрессия распадается на две ветви:

Для всех событий, кроме января–апреля 2022 г.:

$$\rho_{\text{SwA}} = 3.0(\pm 0.4) + 6.6(\pm 0.2) \cdot \text{GEC}, \quad (4)$$

$$cc = 0.94.$$

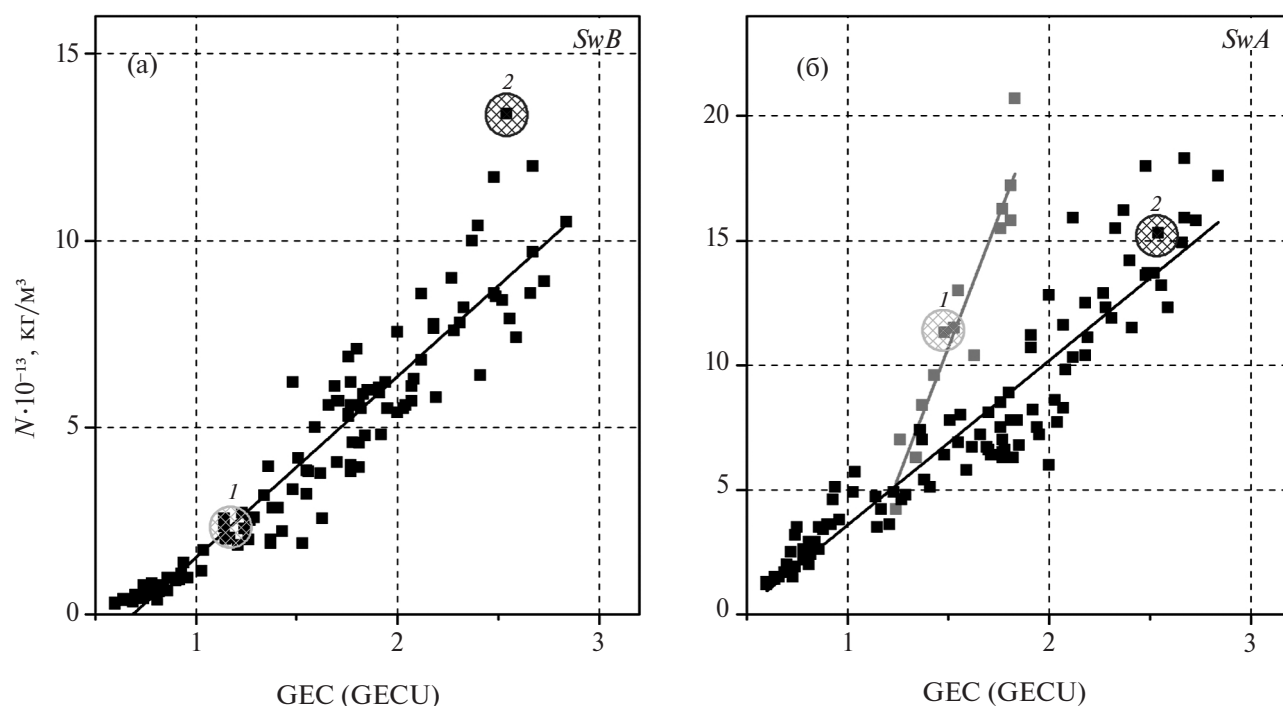
Для событий в январе–апреле 2022 г.:

$$\rho_{\text{SwA}} = 0.0(\pm 3.1) + 21.0(\pm 2.0) \cdot \text{GEC}, \quad (5)$$

$$cc = 0.95.$$

В уравнении (5) наклон в три раза больше, чем в уравнениях (3) и (4). В этот период наблюдается также наибольшая разница между  $\rho_{\text{SwA}}$  и  $\rho_{\text{SwB}}$ . Это предполагает существенный рост  $\rho$  на высоте 435 км, что, вероятно, отображается и на более низкие высоты. На рис. 5а и 5б отдельно выделены точки (кружки), соответствующие событиям *S-36* и *S-77*. В день запуска *S-36* наблюдались сравнительно низкие  $\rho$  по измерениям *SwB*, а по данным *SwA* — аномально высокие  $\rho$ . Самое большое значение  $\rho_{\text{SwA}}$  ( $> 20 \cdot 10^{-13}$  кг/м<sup>3</sup> на рис. 5б) соответствует запуску 29.IV.2022. Запуск *S-77* совпал с наибольшими  $\rho$  по измерениям *SwB* и слегка повышенными  $\rho_{\text{SwA}}$ . Эти соотношения типичны для геомагнитно-возмущенных периодов.

Аномальные изменения в соотношении GEC –  $\rho_{\text{SwA}}$  в начале 2022 г., см. уравнение (5), можно объяснить низкой орбитой  $\sim 430$  км, которую затем постепенно подняли до уровня  $\sim 480$  км, начиная с конца апреля 2022 г. (см. рис. 1). Эта особенность не упоминалась в прежних исследованиях (включая те из них, где использовались наблюдения *Swarm*), которые посвящены интерпретации аварии при запуске *S-36 Starlink*. Можно предположить, что рост  $\rho$  на фиксированной высоте  $< 430$  км вызван термическим расширением термосферы, но при этом скорость рекомбинации убывала недостаточно быстро. Изменения  $\rho$  после апреля 2022 г. относятся к постепенно повышающейся орбите, и, следовательно, уменьшенной плотности  $\rho_{\text{SwA}}$ , см. уравнение (4). В отличие от орбиты *SwA*, поднятой на  $\sim 50$  км, аналогичный маневр *SwB* после апреля 2022 г. составил не более



**Рис. 5.** Корреляция между GEC и (а)  $\rho_{SwB}$ , (б)  $\rho_{SwA}$ . На графике (б) события в январе – апреле 2022 г. и соответствующая линия регрессии показаны серым цветом. Кругами выделены точки, соответствующие событиям S-36 (серый цвет, цифра 1) и S-77 (черный цвет, цифра 2)

~10 км, поэтому характер изменений  $\rho_{SwB}$  оставался однотипным в течение всего периода наблюдений, см. уравнение (3).

#### 4. ИНТЕНСИВНОСТЬ МАГНИТНЫХ БУРЬ В ДНИ ЗАПУСКОВ

Во время геомагнитных бурь влияние космической погоды на работу спутников наиболее критично. Категории NOAA G1–G5 на основе планетарного геомагнитного  $Kp$ -индекса [26] обозначают степень влияния на работу спутников бурь разной интенсивности: малые ( $Kp = 5$ , G1), умеренные ( $Kp = 6$ , G2), сильные ( $Kp = 7$ , G3), интенсивные ( $Kp = 8$ , G4), и экстремальные бури ( $Kp = 9$ , G5) (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>). Используя критерии NOAA и аналог  $Kp$  с часовым разрешением — индексы  $Hpo$  и  $Apo$  [27], а также  $Dst$ -индекс [28], можно оценить геомагнитные условия во время всех запусков *Starlink*.

Согласно каталогу бурь (<https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/storm/>), в 2019–2023 гг. произошло 75 геомагнитных бурь интенсивности G1–G4. На рис. 6 показано, какими были величины геомагнитных индексов  $Kp$  и  $Hpo$  во время

75 бурь. Пиковые значения  $Kp$ - и  $Hpo$ -индексов во время бури обозначены, соответственно, звездочками и белыми кружками. Здесь же приведены максимальные значения индекса  $Hpo$  для 130 запусков *Starlink* в интервале времени  $UT \pm 12$  час относительно времени пуска (красные кружки). Из рисунка видно, что большинство запусков происходили в спокойных условиях при  $Hpo < 5.0$ . Но 19 запусков прошли при возмущенных условиях, соответствующих категориям G1–G4. В эти 19 бурь входит и слабая буря G1 ( $Kp = 5.3$ ,  $Hpo = 6.0$ ,  $Apo = 80$  нТл,  $Dst = -77$  нТл) в начале февраля 2022 г., во время которой произошел аварийный запуск S-36, а также интенсивная буря 23.III.2023 категории G3 ( $Kp = 7.7$ ,  $Hpo = 8.3$ ,  $Apo = 236$  нТл,  $Dst = -184$  нТл), во время которой запуск S-77 был успешным.

#### 5. СРАВНЕНИЕ УСЛОВИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ S-36 И S-77

Эволюция геомагнитных параметров для 19 бурь G1–G4, при которых производились запуски *Starlink*, показана на рис. 7а–в. Приведены вариации индексов  $Hpo$ ,  $Apo$  и  $Dst$  в интервале  $\Delta t = 48$  ч, центрированных на момент пуска. События S-36 и S-77 выделены черными кривыми.



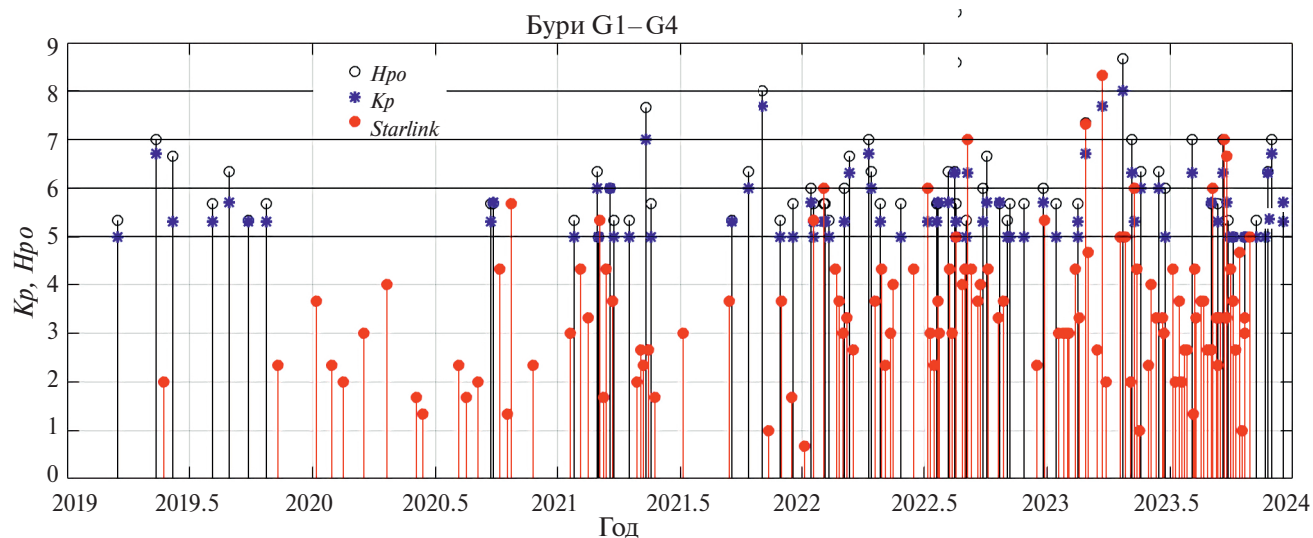


Рис. 6. Максимум  $Kp$ -индекса (звездочка) и  $H_{pro}$ -индекса (белый кружок) для 75 бурь категорий G1–G4, наблюдавшихся в 2019–2023 гг. Линии с красными (черными) кружками — максимум индекса  $H_{pro}$  для каждого из 130 запусков *Starlink*. Горизонтальные линии указывают уровень от G1 до G4 геомагнитной бури

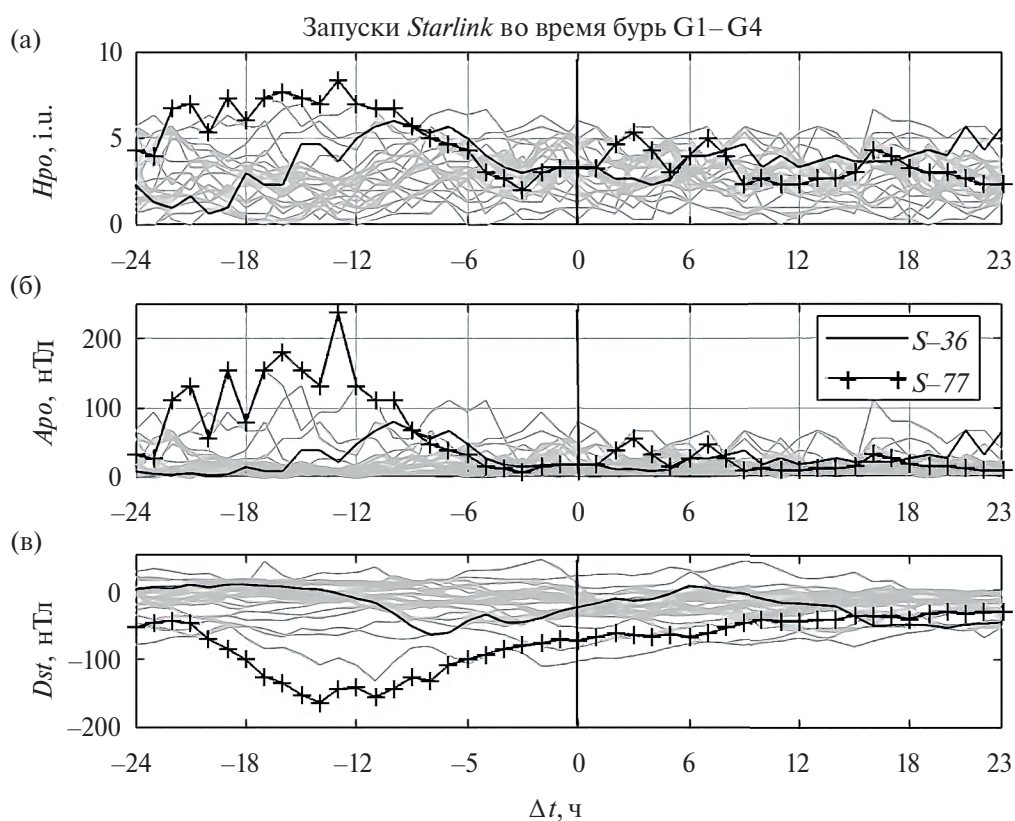


Рис. 7. Индексы  $H_{pro}$ ,  $A_{ro}$  и  $Dst$  (серые кривые) за период  $\Delta t = 48$  ч, центрированный на момент запуска *Starlink* ( $\Delta t = 0$  ч, вертикальная линия) для 19 бурь категорий G1–G4 в 2019–2023 гг. Черные линии — изменение индексов в период запусков S-36 (без символов) и S-77 (крестики)

Они ясно демонстрируют более мощную бурю для второго события по сравнению с первым. Запуск S-77 был произведен в фазу восстановления бури G3 (рис. 7в), а запуск S-36 — на спаде

между двумя пиками бури G1 или перед второй бурей, если рассматривать это явление как две отдельных бури категории G1 [7]. Отметим, что пока не существует надежных моделей для

прогноза второго максимума двухфазных бурь [6, 11].

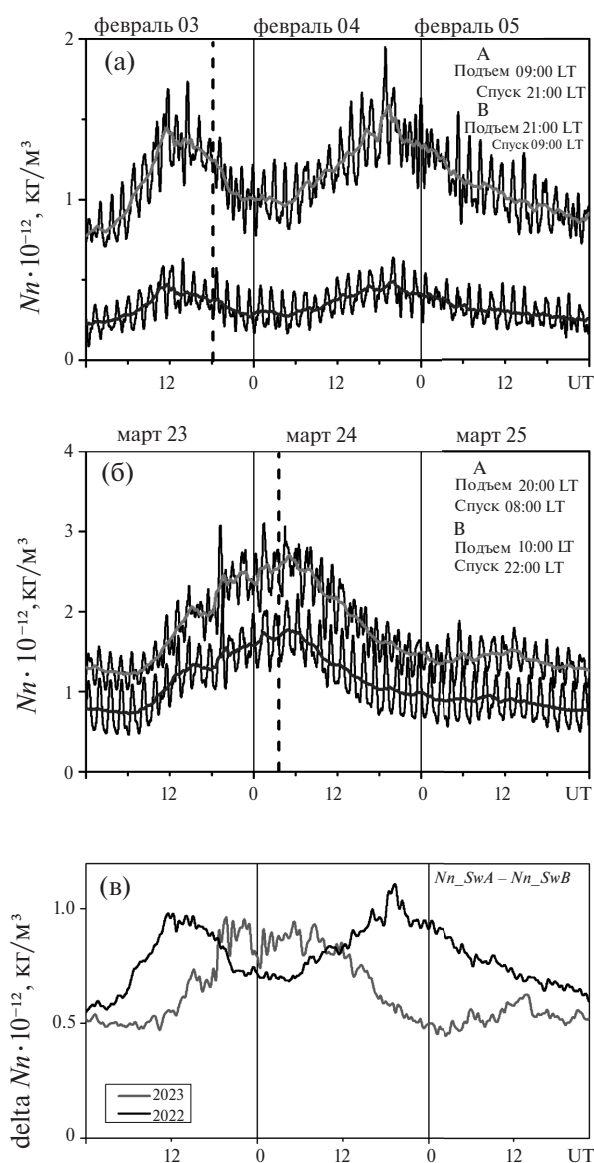
Параметры  $\rho_{SwA}$  и  $\rho_{SwB}$ , измеренные вдоль орбит *Swarm* в течение трех дней развития бурь приведены на рис. 8. В первом событии орбиты обоих спутников лежат почти в одной и той же плоскости приблизительно в 08:00 и 20:00 часов LT. Во втором случае орбитальная плоскость *SwA* сдвинута к 09:00 – 21:00 LT, а плоскость *SwB* к 10:00 – 22:00 LT. Черные линии показывают 30-секундные значения  $\rho$ . Они

включают суточные вариации с большими значениями в освещенной полусфере по сравнению с темным временем. В плотностях, осредненных вдоль орбиты (светлые кривые), суточные вариации сглажены.

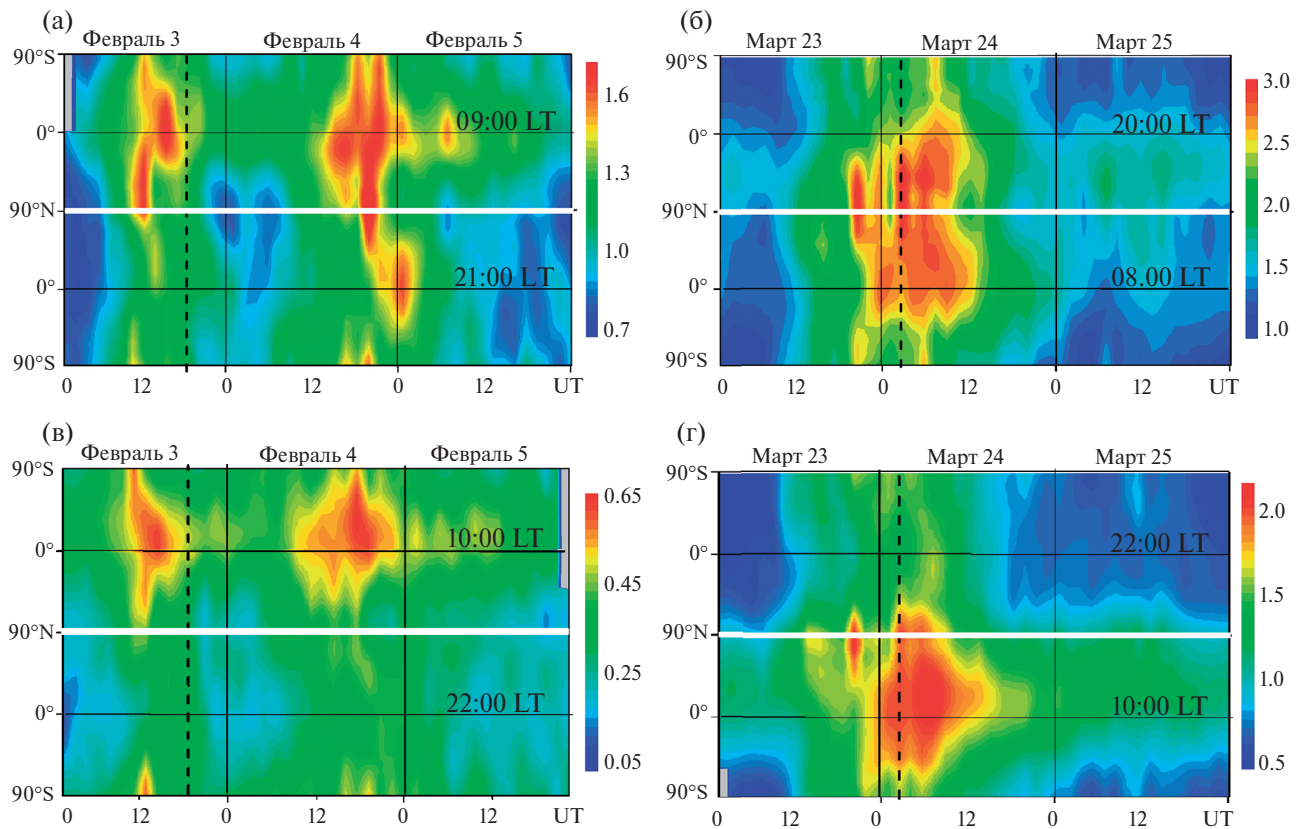
Рисунок 8а–б демонстрирует рост  $\rho$ , соответствующий падению *Dst*-индекса. Для *S-36* уровень  $\rho$  в спокойное время приблизительно равен  $1 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>, а для *S-77* он немного выше. На пике бури  $\rho$  принимает значение около  $1.5 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup> ( $2.7 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>) для *S-36* (*S-77*). Рисунок 8в показывает, что разница около 50 км между нижним и верхним спутниками приводит к разности в  $\rho$  порядка  $0.5$ – $1 \cdot 10^{-12}$  кг/м<sup>3</sup>. Эта разность возрастает с ростом геомагнитной активности.

Эволюция глобального распределения  $\rho$  показана на рис. 9:  $\rho_{SwA}$  для *S-36* (рис. 9а) и *S-77* (рис. 9б);  $\rho_{SwB}$  для тех же событий (рис. 9в и 9г). Каждая диаграмма построена в координатах широта – мировое время UT, как карта значений  $\rho$ , измеренных вдоль последовательных круговых орбит. Нижняя (верхняя) часть каждой карты относится к восходящей (нисходящей) ветви орбиты. Можно видеть, что распределения  $\rho$  при *S-36* и *S-77* существенно различаются, особенно по измерениям нижнего КА *SwA*. Заметные различия возникают и при изменении высоты. При этом верхний спутник *SwB* показывает более систематическое изменение с повышенными значениями  $\rho$  на низких и средних широтах.

При запуске *S-36*  $\rho_{SwA}$  сначала достигает максимума на утренней стороне (~09:00 LT, восходящая орбита) вблизи экватора. В главную фазу бури (после ~18:00 UT, 4 февраля) появляется увеличенная плотность и в высоких широтах. Это связано с Джоулевым нагревом и авроральным высыпанием частиц в высокоширотной Е-области [15]. Высокоширотные значения плотности сравнимы по величине с экваториальными. В событии *S-77* *SwA* наблюдает преобладание повышенной плотности на высоких широтах северного полушария. Асимметрия может быть вызвана большим, около 20 нТл, ростом положительной азимутальной компоненты *B<sub>y</sub>* межпланетного магнитного поля (ММП англ. Interplanetary Magnetic Field, IMF), наблюдавшейся 23 марта одновременно с длительным периодом отрицательной компоненты *B<sub>z</sub>* (не показано). Условия *B<sub>y</sub>* > 0 имеют по меньшей мере три следствия. Во-первых, ММП *B<sub>y</sub>* генерирует северо–южное электрическое поле и ток между магнитосферными долями. При *B<sub>y</sub>* > 0 продольный ток (ПТ) вытекает из ионосферы. Этот ПТ



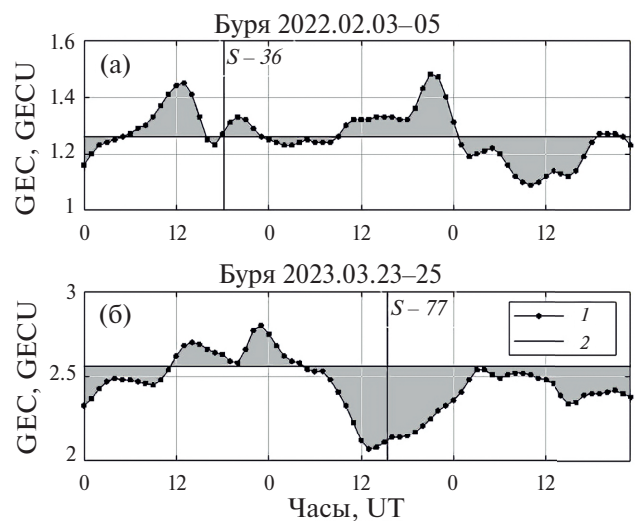
**Рис. 8.** Параметры  $\rho_{SwA}$  и  $\rho_{SwB}$ , измеренные вдоль орбиты, (а) – 3–5.ІІ.2022, (б) – 23–25.ІІІ.2023, (в) – разность между  $\rho_{SwA}$  и  $\rho_{SwB}$  для обоих событий. Время запуска *S-36* (*S-77*) обозначено вертикальной пунктирной линией на первом (втором) графике



**Рис. 9.** Эволюция значений  $\rho_{\text{SwA}}$ , измеренных вдоль орбит, для событий (а)  $S-36$ , (б)  $S-77$  и  $\rho_{\text{SwB}}$  для (в)  $S-36$ , (г)  $S-77$  (горизонтальная ось — время; вертикальная ось — географическая широта полной развертки круговой полярной орбиты, начиная с южного полюса). Восходящей (нисходящей) ветви орбиты соответствует нижняя (верхняя) половина каждой панели. Время запуска *Starlink* — пунктирная линия. Шкала  $\rho$  в единицах  $10^{-12} \text{ кг/м}^3$

соответствует нисходящему потоку нагрева электронов, который способствует увеличению электронной плотности [29]. Во-вторых, ММП  $B_u$  модулирует ПТ таким образом, что плотность тока западной электроструи при  $B_u > 0$  больше, чем при  $B_u < 0$  [30]. Из-за этого Джоулев нагрев усиливается в высоких широтах северного полушария, и термосферная масса смещается к северному полюсу. В результате появления межполушарной асимметрии нейтральные плотности имеют тенденцию к понижению в пределах широт орбиты *Starlink* ( $< 55^\circ$ ).

Влияние атмосферного торможения на траекторию спутника считается кумулятивным на орбите, так что любая нестационарная изменчивость имеет тенденцию к усреднению. В то же время, например, сообщалось, что приливные изменения могут значительно повлиять на неопределенность прогнозов для отслеживания положения орбиты [31]. Подобно атмосферным



**Рис. 10.** Аномалии GEC при отклонении фактических часовых значений (окрашенная область) от спокойного уровня (прямая линия): (а) 3–5.ІІ.2022; (б) 23–25.ІІІ.2023



приливам, глобальное перераспределение  $\rho$  во время магнитной бури образует крупномасштабные повышения, способные повлиять на локальное торможение КА, особенно вблизи перигея.

Различие в ионосферных условиях при пусках *S-36* и *S-77* далее демонстрируется на рис. 10, на котором представлены вариации GEC 3–5. II.2022 (рис. 10a) и 23–25. III.2023 (рис. 10б). Время запуска показано вертикальной линией. Горизонтальной линией отмечен уровень спокойного GEC ( $Q_{\text{ref}}$ ). Параметр  $Q_{\text{ref}}$  оценивался как среднесуточное значение GEC за 2. II.2022 и 22. III.2023, соответственно. Ветви положительного и отрицательного отклонения GEC, появляющиеся во время бури, подробно описаны в публикациях [17, 32]. Отклонения рассчитываются вычитанием нормализованного  $Q_{\text{ref}}$  из фактического значения GEC. На рис. 10 можно видеть, что для *S-36* наблюдается положительное отклонение GEC, показывающее рост ионизации в глобальном масштабе во второй интенсификации бури. В отличие от этого события запуск *S-77* совпал с длительным отрицательным отклонением GEC, происходящим одновременно с уменьшением плотности  $\rho$ .

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многие аспекты условий космической погоды во время аварийного запуска *S-36* в феврале 2022 г. были изучены, чтобы определить, почему 38 из 49 спутников неожиданно вернулись в атмосферу, причем в условиях относительно слабой геомагнитной бури. По общему мнению, увеличение нейтральной плотности термосферы во время второй фазы бури вскоре после запуска *S-36* было основным фактором дополнительного торможения. Такая ситуация была уникальной именно при этом событии, и она ни разу не повторилась во время остальных запусков *Starlink*. Отметим, что изменения плотности ионосферной плазмы также могли способствовать потере управляемости спутников, хотя об этом не сообщалось. Однако событие *S-36* в основном рассматривалось отдельно от других запусков, которые были успешными, несмотря на то что некоторые из них происходили в периоды более сильных магнитных бурь. По мере увеличения солнечной активности в фазе роста и максимуме текущего солнечного цикла риск нештатного торможения низкоорбитальных КА может стать больше. Поэтому предпринята попытка расширить анализ условий космической погоды, включив в анализ все запуски *Starlink* в период 2019–2023 гг., и предложить прогноз основных

параметров  $T-I$ , GEC и  $\rho$ , вплоть до солнечного максимума.

Статистическое соотношение GEC и  $\rho$  аппроксимируется линейной функцией. Модель прогноза изменения GEC и  $\rho$ , в зависимости от фазы солнечного цикла  $\Phi$ , приводит к ожидаемому увеличению их значений на 200–400 % в максимуме СЦ25 ( $\Phi = 1$ ) по сравнению с моментом запуска *S-36* ( $\Phi = 0.5$ ). Показано, что в январе–апреле 2022 г. произошло резкое изменение в соотношении GEC –  $\rho_{\text{SwA}}$ . Это изменение вызвано аномально высокими  $\rho$ , измеренными на высоте  $\sim 430$  км. Изменения  $\rho_{\text{SwA}}$  после апреля 2022 г. относятся к наблюдениям на постепенно повышающейся орбите.

Всего в условиях магнитных бурь по классификации NOAA было проведено 19 пусков. Во время аварийного запуска *S-36* 3. II.2022, который совпал с бурей G1, ионосферные и термосферные условия отличались от условий во время всех других, предыдущих и последующих, запусков *Starlink*. Для детального сравнения было выбрано конкретное событие, *S-77* 23. III.2023, совпавшее с сильной магнитной бурей категории G3. Для обоих событий интегральное значение  $\rho$  изменяется в соответствии с эволюцией индекса *Dst*, но пространственные распределения  $\rho$  существенно различаются. Для *S-36*,  $\rho$  достигает максимума вблизи экватора в освещенной термосфере и частично в северных высоких широтах. Для *S-77* имеется значительная полушарная асимметрия в  $\rho$  с доминированием северных высоких широт, а не экватора. При этом перигей промежуточной орбиты *Starlink* (210 и затем 325 км) находится в южном полушарии. Поэтому для торможения более критично повышение плотности именно в низких и южных широтах. Подъем начальной орбиты после аварии *S-36*, вероятно, способствовал предотвращению нештатных ситуаций.

Эти пространственные различия неявно отражены в глобальном электронном содержании GEC. А именно, распределение ионосферной плазмы в параметре GEC во времени до и после запусков *S-36* и *S-77* заметно отличаются. В событии *S-36* во время второй интенсификации бури развивается положительное возмущение GEC (приток плотности плазмы по сравнению с фоновым спокойным уровнем), а в случае *S-77* наблюдается устойчивая отрицательная аномалия GEC (понижение плотности плазмы).

Таким образом, важны как глобальные величины, так и пространственно-временные распределения нейтральной и ионизированной



компонент. Мощность геомагнитной бури не является единственным критерием для оценки риска возможной катастрофы при запуске, поэтому эволюция других характеристик космической среды должна учитываться в системе эксплуатации низкоорбитальных КА. При ожидаемом увеличении числа запусков по мере приближения к солнечному максимуму необходимо оценивать крупномасштабные возмущения в системе термосфера – ионосфера, которые могут привести к увеличению торможения из-за роста плотности нейтрального газа.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Лабораторию реактивных двигателей (Jet Propulsion Laboratory, JPL) за предоставление базы данных ионосферных карт GIM-TEC [https://sidshow.jpl.nasa.gov/pub/iono\\_daily/IONEX\\_rapid/](https://sidshow.jpl.nasa.gov/pub/iono_daily/IONEX_rapid/); список запусков *Starlink* имеется по адресу <https://www.rocketlaunch.live/?tag=series-spacex-starlink>; данные *Swarm* предоставлены ESA <https://swarm-diss.eo.esa.int/swarm>. Данные GEC предоставлены ИЗМИРАН <https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/>. Геомагнитные индексы *Kp*, *Apo* и *Hpo* предоставлены GFZ, Потсдам <https://kp.gfz-potsdam.de/en/hp30-hp60>; *Dst*-индекс предоставлен Мировым центром данных WDC-Kyoto <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>; значения солнечных пятен предоставлены Центром данных Solar Influences Data Analysis Center <https://www.sidc.be/SILSO/home>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hapgood M., Liu H., Lugaz N. SpaceX — Sailing close to the space weather? // *Space Weather*. 2022. V. 20(3). Art.ID. e2022SW003074. <https://doi.org/10.1029/2022SW003074>
2. Dang T., Li X., Luo B. et al. Unveiling the space weather during the Starlink satellites destruction event on 4 February 2022 // *Space Weather*. 2022. V. 20(8). Art. ID. e2022SW003152. <https://doi.org/10.1029/2022sw003152>
3. Fang T.-W., Kubaryk A., Goldstein D. et al. Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022 // *Space Weather*. 2022. V. 20(11). Art.ID. e2022SW003193. <https://doi.org/10.1029/2022sw003193>
4. Lin D., Wang W., Garcia-Sage K. et al. Thermospheric neutral density variation during the “SpaceX” storm: Implications from physics-based whole geospace modeling // *Space Weather*. 2022. V. 20(12). Art. ID. e2022SW003254. <https://doi.org/10.1029/2022sw003254>
5. Zhang Y., Paxton L.J., Schaefer R. et al. Thermospheric conditions associated with the loss of 40 Starlink satellites. *Space Weather*. 2022. V. 20. Art. ID. e2022SW003168. <https://doi.org/10.1029/2022SW003168>
6. Kataoka R., Shiota D., Fujiwara H. et al. Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022 // *J. Space Weather Space Climate*. 2022. V. 12. Art.ID. 41. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022034>
7. Berger T.E., Dominique M., Lucas G. et al. The thermosphere is a drag: The 2022 Starlink incident and the threat of geomagnetic storms to low Earth orbit space operations // *Space Weather*. 2023. V. 21(3). Art. ID. e2022SW003330. <https://doi.org/10.1029/2022sw003330>
8. Laskar F.I., Sutton E.K., Lin D. et al. Thermospheric temperature and density variability during 3–4 February 2022 minor geomagnetic storm // *Space Weather*. 2023. V. 21(4). Art.ID. e2022SW003349. <https://doi.org/10.1029/2022sw003349>
9. Gulyaeva T., Lukianova R., Haralambous H. Ionosphere heterogeneities at dawn–dusk terminator related to the Starlink satellites launch disaster on 3–8 February 2022 // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2023. V. 128. Art.ID. e2023JA031577. <https://doi.org/10.1029/2023JA031577>
10. Li S., Ren Z., Yu T., Chen G. et al. The daytime variations of thermospheric temperature and neutral density over Beijing during minor geomagnetic storm on 3–4 February 2022 // *Space Weather*. 2024. V. 22. Art. ID. e2023SW003677. <https://doi.org/10.1029/2023SW003677>
11. Gulyaeva T., Hernández-Pajares M., Stanislawska I. Ionospheric Weather at Two Starlink Launches during Two-Phase Geomagnetic Storms // *Sensors*. 2023. V. 23(15). Art.ID. 7005. <https://doi.org/10.3390/s23157005>
12. Billett D.D., Sartipzadeh K., Ivarsen M.F. et al. The 2022 Starlink geomagnetic storms: Global thermospheric response to a high-latitude ionospheric driver // *Space Weather*. 2024. V. 22. Art.ID. e2023SW003748. <https://doi.org/10.1029/2023SW003748>
13. Gulyaeva T.L., Arikan F., Hernandez-Pajares M. et al. North-south components of the annual asymmetry in the ionosphere // *Radio Science*. 2014. V. 49(7). P. 485–496. <https://doi.org/10.1002/2014RS005401>
14. Gulyaeva T., Stanislawska I., Lukianova R. Arctic–Antarctic asymmetry of the ionospheric weather // *Advances in Space Research*. 2023. V. 72(12). P. 5428–5442. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.008>
15. Mannucci A.J., Tsurutani B. Ionosphere and Thermosphere Responses to Extreme Geomagnetic Storms / Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability,

- and Consequences. Ed. Natalia Buzulukova. Chapter 20. Elsevier, 2017. P. 493–513.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00020-0>
16. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // Доклады Российской академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 399–402.
  17. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С. и др. О возможных причинах положительного возмущения глобального электронного содержания в период сложного гелио-геофизического события в сентябре 2017 года // Космические исследования. 2021. Т. 59. № 6. С. 483–488.  
<https://doi.org/10.31857/S0023420621060042>
  18. Friis-Christensen E., Lühr H., Knudsen D. et al. Swarm — an Earth observation mission investigating geospace // Advances in Space Research. 2008. V. 41(1). P. 210–216.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.10.008>
  19. Siemes C., Teixeira da Encarnacao J., Doornbos E. et al. Swarm accelerometer data processing from raw accelerometers to thermospheric densities // Earth, Planets, Space. 2016. V. 68(92). P. 1–16.  
<https://doi.org/10.1186/s40623-016-0474-5>
  20. den Ijssel J. van, Doornbos E., Iorfida E. et al. Thermosphere densities derived from Swarm GPS observations // Advances in Space Research. 2020. V. 65(7). P. 1758–1771.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.004>
  21. Clette F., Lefevre L., Chatzistergos T. et al. Recalibration of the Sunspot–N: Status Report // Solar Physics. 2023. V. 298. Art.ID. 3.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-023-02136-3>
  22. Emmert J.T., Picone J.M. Climatology of globally averaged thermospheric mass density // J. Geophysical Research: Space Physics. 2010. V. 115. Art.ID. A09326.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2010JA015298>
  23. Gulyaeva T.L. Predicting indices of the ionosphere response to solar activity for the ascending phase of the 25th solar cycle // Advances in Space Research. 2019. V. 63. Iss. 5. P. 1588–1595.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.002>
  24. de Souza Franco A.M., Hajra R., Echer E. et al. Seasonal features of geomagnetic activity: a study on the solar activity dependence // Ann. Geophys. 2021. V. 39. P. 929–943.  
<https://doi.org/10.5194/angeo-39-929-2021>
  25. Fuller-Rowell T.J. The “thermospheric spoon”: A mechanism for the semiannual density variation // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 3951–3956.  
<https://doi.org/10.1029/97ja03335>
  26. Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y. et al. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // Space Weather. 2021. V. 19. Art.ID. e2020SW002641.  
<https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
  27. Yamazaki Y., Matzka J., Stolle C. et al. Geomagnetic activity index H<sub>po</sub> // Geophys. Res. Lett. 2022. V. 49.  
<https://doi.org/10.1029/2022GL098860>
  28. Sugiura M. Hourly values of equatorial Dst for the IGY // Annals Int. Geophys. Year. V. 35. Oxford: Pergamon Press, 1964.
  29. Лукьянова Р.Ю. Влияние продольных токов на электронную концентрацию в ионосфере: сопряженные наблюдения спутников Swarm и радара ESR // Космические исследования. 2023. Т. 61(6). С. 466–475.  
<https://doi.org/10.31857/S0023420623600083>
  30. Holappa L., Robinson R.M., Pulkkinen A. et al. Explicit IMF By-dependence in geomagnetic activity: Quantifying ionospheric electrodynamics // J. Geophysical Research: Space Physics. 2021. V. 126. Art.ID. e2021JA029202.  
<https://doi.org/10.1029/2021JA029202>
  31. Leonard J.M., Forbes J.M., Born G.H. Impact of tidal density variability on orbital and reentry predictions // Space Weather. 2012. V. 10. Art.ID. S12003.  
<http://dx.doi.org/10.1029/2012SW000842>
  32. Gulyaeva T.L. Interaction of global electron content with the Sun and solar wind during intense geomagnetic storms // Planetary and Space Sci. 2024. V. 240. Art.ID. 105830.  
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105830>

## GLOBAL ELECTRON CONTENT AND NEUTRAL DENSITY OF THE THERMOSPHERE AT *STARLINK* LAUNCHES IN 2019–2023

© 2025 T. L. Gulyaeva<sup>1, \*</sup>, R. Yu. Lukianova<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Space Research Institute, Moscow, Russia*

\*e-mail: gulyaeva@izmiran.ru

\*\*e-mail: lukianova@cosmos.ru

In order to avoid emergency situation it is necessary to take into account impact of disturbances in space environment during launch of space vehicles. This paper examines changes in the neutral density of the thermosphere ( $\rho$ ) according to *Swarm* satellites and global electron content (GEC) from JPL GIM-TEC maps during 130 *Starlink* satellite launches in 2019–2023. The variations of  $\rho$  and GEC over the 24-hour period centered at the launch time were identified and analyzed. The spatial distribution and evolution of  $\rho$  and GEC in terms of solar activity, season and level of geomagnetic activity before and after each *Starlink* launch event were investigated. It is shown that with increasing the phase  $\Phi$  of the solar cycle (SC) from  $\Phi = 0.5$  (February 2022) to a maximum  $\Phi = 1$  (April 2024) of SC25, the value of GEC and  $\rho$  increase by 2.1 and 3.5 times, respectively. During this period, 75 magnetic storms of categories NOAA G1–G4 were observed at  $Kp \geq 5.0$ , of which 19 storms has occurred in the interval  $\pm 24$  hours from the moment of *Starlink* launch. Only in one case an emergency was observed on February 3, 2022, during the launch of *S-36*, when 38 out of 49 satellites left orbit during a minor two-phase geomagnetic storm of level G1 ( $Kp = 5.3$ ). Comparison is made with another successful launch *S-77* on March 23, 2023 during an intense magnetic storm of category G3 ( $Kp = 7.3$ ). It is shown that at the *S-77* launch the neutral density  $\rho$  prevailed in the northern high latitudes, while in the case of *S-36*, the thermosphere was denser near the equator. After *S-36* launch, the transition from the positive to negative perturbation of GEC has happened while a strictly negative GEC anomaly was observed in the case of *S-77*. The examples considered show that the intensity of a geomagnetic storm is not the only criterion for an emergency situation. Other characteristics should be taken into account when launching spacecraft, including an increase in electron content in the ionosphere and the density of the neutral atmosphere, accompanied by increased satellites drag at low orbits.