

МРНТИ 37.15.33

<https://doi.org/10.26577/JPEOS20261284>

С.Н. Мукашева^{1*}, Л.Ф. Черногор²,
В.И. Капытин³, Г.Б. Тілеу^{1,3}

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина

³Институт ионосферы, Алматы, Казахстан

*e-mail: snmukasheva@gmail.com

ГЕОКОСМИЧЕСКАЯ БУРЯ 09-15 НОЯБРЯ 2025 ГОДА

В настоящем исследовании рассмотрено уникальное гелио-геофизическое событие, вспышки класса X и M на Солнце с 9 по 11 ноября 2025 сопровождалась направленным к Земле корональным выбросом масс. За временной интервал с 11 по 15 ноября 2025 года изучено возмущенное состояние околоземного космического пространства на основе анализа параметров солнечного ветра. Концентрация протонов солнечного ветра n_{sw} в рассматриваемый период показала несколько всплесков, скорость солнечного ветра увеличилась до 1000 км/с, отмечается резкий рост температуры протонов T_{sw} . Геомагнитное поле было сильно возмущенным индекс $K_p = 9$. Для описания события использовались также минутные значения индексов AL, AU, SYM-D, SYM-H и двухчасовые значения глобального электронного содержания. В данной работе рассмотрены физические процессы на Солнце, в межпланетном магнитном поле, магнитосфере и верхних слоях земной атмосферы во время уникальной геокосмической бури, поэтому работа носит междисциплинарный характер. Установлено, что мощная солнечная буря в ноябре 2025 года вызвала экстремальные геомагнитную и отрицательную ионосферную бури.

Ключевые слова: выброс корональной массы, солнечный ветер, магнитосферная буря, ионосферная буря.

S.N. Mukasheva^{1*}, L.F. Chernogor², V.I. Kaputin³, G.B. Tileu^{1,3}

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

³Ionosphere Institute, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: snmukasheva@gmail.com

Geocosmic storm November 9-15, 2025

This study examines a unique heliogeophysical event: X- and M-class solar flares from November 9–11, 2025, accompanied by a coronal mass ejections directed toward Earth. The disturbed state of near-Earth space during the period from November 11–15, 2025, was studied using solar wind parameters. The solar wind proton density n_{sw} during this period showed several spikes, the solar wind velocity increased to 1000 km/s, and a sharp increase in proton temperature T_{sw} was observed. The geomagnetic field was strongly disturbed, with a Kp-index of 9. Minute values of the AL, AU, SYM-D, and SYM-H indexes, as well as two-hourly values of the global electron content, were also used to describe the event. This paper examines physical processes on the Sun, in the interplanetary magnetic field, magnetosphere, and upper layers of the Earth's atmosphere during a unique geocosmic storm, making it interdisciplinary in nature. It has been established that a powerful solar storm in November 2025 caused extreme geomagnetic and negative ionospheric storms.

Keywords: coronal mass ejection, solar wind, magnetospheric storm, ionospheric storm.

С.Н. Мукашева^{1*}, Л.Ф. Черногор², В.И. Капытин³, Г.Б. Тілеу^{1,3}

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²В.Н. Каразин атындағы Харьков ұлттық университеті, Харьков, Украина

³Ионосфера институты, Алматы, Қазақстан

*e-mail: snmukasheva@gmail.com

Геокосмикалық дауыл: 2025 жылғы 9-15 қараша

Бұл зерттеу бірегей гелиогеофизикалық оқиғаны қарастырады: 2025 жылдың 9-11 қарашасындағы X және M класты Күн жарқылдары, Жерге бағытталған тәждік массаның лақтырылуымен қатар жүрді. 2025 жылдың 11-15 қарашасы аралығындағы Жерге жақын

ған күйі күн желінің параметрлерін пайдаланып зерттелді. Осы кезеңдегі күн желінің протон тығыздығы n_{sw} бірнеше рет күрт көтерілді, күн желінің жылдамдығы 1000 км/с дейін өсті және протон температурасының T_{sw} күрт жоғарылауы байқалды. Геомагниттік өріс қатты бұзылды, Кр-индексі 9 болды. AL-индексінің, AU-индексінің, SYM-D және SYM-H минуттық мәндері, сондай-ақ жаһандық электрон мөлшерінің екі сағаттық мәндері де оқиғаны сипаттау үшін пайдаланылды. Бұл мақалада бірегей геокосмикалық дауыл кезінде Күндегі, планетааралық магнит өрісіндегі, магнитосферадағы және Жер атмосферасының жоғарғы қабаттарындағы физикалық процестер қарастырылады, бұл оны пәнаралық сипатқа айналдырады. 2025 жылдың қарашасында болған қуатты күн дауылы экстремалды геомагниттік және теріс ионосфералық дауылдарды тудырғаны анықталды.

Түйін сөздер: тәждік массаның лақтырылуы, күн желі, магнитосфералық дауыл, ионосфералық дауыл.

Введение

Не ослабляемый интерес к экстремальным процессам в околоземной космической среде, подтверждается комплексными исследованиями, направленными на понимание физических процессов, которые, как предполагается, ответственны за изменения концентрации плазмы в ионосфере. Пристальное научное внимание к данным событиям определяется тем, что изменчивость ионосферы и плазмосферы в магнитовозмущенные периоды усложняет на низких и средних орбитах функционирование космических аппаратов, предназначенных для позиционирования и навигации, интернет-связи, дистанционного зондирования Земли.

Цель данного исследования – оценить энергетические характеристики основных физических процессов в системе Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера, начавшихся с момента солнечных вспышек и коронального выброса масс 09-10 ноября 2025 года.

На основе исходных данных о параметрах солнечной бури и солнечного ветра были рассчитаны мощность и энергия солнечных вспышек, динамического, магнитного и теплового давлений солнечного ветра, а также энергетические характеристики ионосферных возмущений в рассматриваемый период с 11-15 ноября 2025 года.

Проанализированы вариации геомагнитных индексов и глобального электронного содержания ионосферы, измеренную с помощью GPS-наблюдений, вариации критических частот слоя F2, f_oF2 , по измерениям на станциях вертикального зондирования ионосферы.

Обзор литературы

Геоэффективные экстремальные солнечные события, такие как вспышки, корональные

выбросы масс (КВМ) (coronal mass ejections, CMEs), в частности, вызывают возмущение магнитного поля Земли и образуют флуктуирующие токи в ионосфере и магнитосфере (Sibeck et al., 1991; Kane, 2005; Miroshnichenko, 2011). Важно, что последствия геоэффективных солнечных событий проявляются во всех звеньях системы Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–внутренние оболочки Земли (Chernogor & Rozumenko, 2008; Chernogor, 2011; Chernogor, 2025a; Chernogor, 2025b). Мощное солнечное событие, направленное на Землю, может серьезно нарушить работу как космических, так и наземных технологических систем (Afraimovich et al., 2003; Ebihara et al., 2021; Bailey et al., 2022; Andreyev et al., 2023).

На основе детального анализа ситуации в системе «магнитосфера–ионосфера» в периоды экстремальных гелио-геофизических событий рассматриваются факторы и возможные механизмы сложных динамических процессов в верхних слоях земной атмосферы (см., например (Shpynev et al., 2018; Blagoveshchensky et al., 2019 Paul et al., 2020). В ряде работ показано, что на низких широтах решающую роль играет наложение эффектов проникновения электрического поля (prompt penetration electric field – PPEF) и возмущенного динамо-электрического поля (disturbed dynamo electric field – DDEF) (Polekh et al., 2017). Авторы (Singh & Sripathi, 2017) предполагают, что короткопериодные флуктуации, наблюдаемые в f_oF2 , в основном вызваны колебаниями проникающего электрического поля (PPEF)), тогда как длиннопериодные вариации обусловлены в первую очередь возмущенными ветрами и ионосферными возмущениями типа перемещающихся ионосферных возмущений (traveling ionospheric disturbances TIDs) или DDEFs. В исследованиях (Tulasi Ram et al., 2024) рассматриваются

факторы и возможные механизмы, приведшие к сверхинтенсивной буре 10-11 мая 2024, в сравнении с другими сильными бурями прошлых лет. Подробно описана радикальная перестройка системы «магнитосфера–ионосфера» и её последствия, в частности, для геомагнитного поля и содержания электронов в ионосфере. Исследован глобальный ионосферный отклик на геомагнитную бурю в октябре 2024 г. (Paul et al., 2025), отмечаются направленные к экватору крупномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (LSTIDs) на всех фазах геомагнитной бури, под совместным влиянием буревых PPEFs и DDEFs. В работе (Gordiyenko et al., 2025) полученные результаты рассматривают в контексте возможных долготных вариаций состава термосферы и меридиональной циркуляции во время геомагнитной бури. При этом авторы отмечают, что каждое гелио-геофизическое событие уникально по своему проявлению. Реакция ионосферы зависит от глобальных изменений в ближнем космосе, от динамических процессов в верхней атмосфере, от сезона, времени суток и региональных особенностей (Chernogor et al., 2021).

Методология

Для описания гелио-геофизической обстановки в возмущенный период 11-15 ноября 2025 года были использованы спутниковые наблюдательные данные различных параметров солнечного ветра, а также данные межпланетных и геомагнитных индексов, предоставленные сервисом OMNIWeb, NASA (omniweb.gsfc.nasa.gov). Для описания ионосферного отклика на данное событие использовались данные, представленные на сайте Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Института прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова (<http://ipg.geospace.ru/ionosphere-data-graph/>).

Параметр глобальное электронное содержание (*Global Electron Content – GEC*) представляет собой интегральную меру общего числа электронов в ионосфере Земли и выводится из глобальной сети наблюдений полного электронного содержания (TEC)

<https://simurg.iszf.irk.ru/gec>. Временное разрешение временного ряда составляет 15 мин (Afraimovich et al., 2008a; Afraimovich et al., 2008b; Hofmann-Wellenhof et al., 1992). Глобальное содержание электронов определяется суммированием значений TEC_i в каждой треугольной ячейке между тремя ближайшими GNSS-приемниками без пересечений по множеству всех возможных ячеек, созданных с помощью приемников, принадлежащих службе IGS, умноженным на площадь ячейки, S_i :

$$GEC = \sum_{i=1}^N TEC_i S_i.$$

Результаты и обсуждение

1.1 Солнечная активность согласно данным SWPC

Ниже приведем описание солнечной активности по данным SWPC (Space Weather Prediction Center) центра прогнозирования космической погоды при National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, США) <https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/2025/11/09/xray.html>.

9 ноября 2025 г. в 07:35 UTC на Солнце произошла крупная вспышка класса X1.7, которая достигла пика 9 ноября в 07:35 UTC, и была вызвана группой солнечных пятен в активной области AR 4274. Это самая большая область на диске Солнца, наиболее сложная по магнитному положению (бета-гамма-дельта), и именно она произвела большую часть вспышечной активности в эти сутки.

11 ноября 2025 г. в этой же области произошла класса X5.1, которая достигла пика в 10:04 UTC 11 ноября. Около 10:40 UTC наблюдалось радиоизлучение типа II, связанное со вспышкой X5.1. В активной области AR 4274 также были произведены две вспышки класса M: M1.5 в 19:57 UTC 10 ноября и M1.4 в 08:09 UTC 11 ноября. В таблице 1 приведены вспышки класса $M \geq 1.4$, произошедшие на Солнце в активной области AR 4274, с 9 по 11 ноября 2025 г. Вспышки сопровождалась корональным выбросом масс.

Таблица 1

Вспышки класса $M \geq 1.4$, произошедшие на Солнце в активной области AR 4274, с 9 по 11 ноября 2025 г. (<https://www.spaceweatherlive.com/ru/arhiv/2025/11/09/xray.html>)

Дата	AR	Класс	Начало	Максимум	Конец
09/11/2025	4274	X1.7	07:01	07:35	07:55
10/11/2025	4274	X1.2	08:55	09:19	10:19
	4274	M1.5	19:45	19:57	20:03
11/11/2025	4274	M1.47	08:02	08:09	08:13
	4274	X5.1	09:49	10:04	10:17

Корональный выброс массы достиг Земли, вызвав геокосмическую бурю, основные параметры которой показаны на рисунке 1 за временной интервал 11-15 ноября 2025 г.

Концентрация протонов солнечного ветра, n_{sw} , в рассматриваемый период показывают несколько всплесков. Значения $n_{sw} \sim (3.81 \pm 0.56) \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ наблюдались во временном интервале с 00:00 UT – 22:43 UT 11/11/2025. Затем наблюдается рост и максимальное значение $n_{sw} = 57.98 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ имело место в 02:15 UT 12/11/2025. Следующие пики наблюдались $n_{sw} = 48.37 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ в 11:11 UT 12/11/2025; $n_{sw} = 27.15 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ в 20:08 UT 12/11/2025 и $n_{sw} = 36.78 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ в 14:02 UT 13/11/2025. С 15:27 UT 13/11/2025 по 00:00 UT 16/11/2025 отмечается невозмущенные условия $n_{sw} \sim (1.9 \pm 1.1) \times 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Скорость солнечного ветра, V_{sw} , 11 ноября 2025 держалось на среднем уровне $V_{sw} \sim 431 \text{ км/с}$. Затем отмечается резкий рост до значения $V_{sw} = 878.6 \text{ км/с}$ в 04:02 UT 12/11/2025, повышенный уровень держится более 15 часов. Отмечается небольшое понижение $V_{sw} = 511.9 \text{ км/с}$ в 15:36 UT 12/11/2025, после чего скорость солнечного ветра растет и достигает максимального значения $V_{sw} = 1001.0 \text{ км/с}$ в 01:15 UT 13/11/2025. Далее следует плавное понижение до среднего уровня $V_{sw} = 564 \text{ км/с}$ во временном интервале с 18:25 UT 14/11/2025 до 00:00 UT 16/11/2025.

Температуры протонов, T_{sw} , 11 ноября 2025 держалось на среднем уровне $T_{sw} \sim 0.15 \times 10^5 \text{ К}$. Затем наблюдаются всплески T_{sw} пики которых приблизительно совпадают с пиками n_{sw} , так $T_{sw} \sim 9.73 \times 10^5 \text{ К}$ в 02:15 UT 12/11/2025; $T_{sw} \sim 8.09 \times 10^5 \text{ К}$ в 11:11 UT 12/11/2025. Максимальное значение $T_{sw} = 28,33 \times 10^5 \text{ К}$

имеет место в 23:24 UT 12/11/2025, после чего отмечается понижение до уровня $T_{sw} \sim 0.67 \times 10^5 \text{ К}$, который сохраняется во временном интервале с 06:00 UT 13/11/2025 до 00:00 UT 16/11/2025.

Компоненты межпланетного магнитного поля B_y и B_z 11/11/2025 варьируются на среднем уровне $B_y \sim (-1.9 \pm 1.9) \text{ нТл}$ и $B_z \sim (-1.8 \pm 1.5) \text{ нТл}$. Вариации компонент межпланетного магнитного поля B_y и B_z нестабильны 12-13 ноября 2025, наиболее выраженные изменения наблюдались $B_{ymin} = -25.37 \text{ нТл}$ в 00:22 UT 12/11/2025 и $B_{ymax} = 54.00 \text{ нТл}$ имело место в 01:09 UT 12/11/2025; $B_{zmin} = -53.67 \text{ нТл}$ в 00:28 UT 12/11/2025 и $B_{zmax} = 32.42 \text{ нТл}$ имело место в 02:06 UT 12/11/2025. B_y и B_z 14/11/2025-15/11/2025 варьируют на среднем уровне $B_y \sim (-0.07 \pm 5.3) \text{ нТл}$ и $B_z \sim (1.5 \pm 3.6) \text{ нТл}$.

Параметр ε_A (эпсилон) Акасофу. Энергетика магнитосферы описывается с использованием эпсилон-параметра Акасуфу ε_A , который характеризует мощность всплеска межпланетного магнитного поля и магнитного давления p_m :

$$\varepsilon_A = \frac{4\pi}{\mu_0} R_{ef}^2 B^2 V_{sw} (\sin(\theta/2))^4, \quad p_m = \frac{B^2}{2\mu_0},$$

где $R_{ef} \approx 7R_E \approx 7 \times 6378 \text{ км}$ – эффективный радиус магнитосферы, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, B – модуль межпланетного магнитного поля, B_y и B_z – компоненты межпланетного магнитного поля, а $\theta = \arctan(B_y/B_z)$, $B^2 = B_y^2 + B_z^2$. Параметр ε_A (эпсилон) Акасофу до 23:00 UT 11/11/2025 оставался на низком уровне $\varepsilon_A \sim (1.40 \pm 0.25) \text{ ПДж/с}$. Как и другие характеристики, ε_A показывает нестабильность 12/11/2025-

13/11/2025, его максимальное значение $\varepsilon_A = 65.26$ ПДж/с имеет место в 02:15 UT 12/11/2025 и минимальное значение $\varepsilon_A = 0.34$ ПДж/с имеет место в 21:09 UT 13/11/2025. Во временном интервале с 14/11/2025-15/11/2025 параметр Акасофу возвращается на низкий уровень $\varepsilon_A \sim (1.88 \pm 3.10)$ ПДж/с.

Индекс Kp 11/11/2025 оставался ниже 2+. С 00:00 UT по 05:00 UT 12/11/2025 $Kp = 9$ -. Высокий уровень индекса Kp от значений 8- до значений 4- сохранялся до 17:00 UT 13/11/2025. Затем он оставался ниже 2+.

Индекс Dst , характеризующий интенсивность магнитосферного кольцевого тока (Makarov G.A., 2022.; Makarov G.A., 2024), колебался на уровне -9.5 нТл до 13:00 UT 11/11/2025. Далее после небольшого повышения до 51 нТл в 00:00 UT 12/11/2025 наблюдалось резкое падение индекса Dst до значений -217 нТл в 04:00 UT 12/11/2025, затем непродолжительное повышения до уровня $Dst = -59$ нТл в 20:00 UT 12/11/2025. После этого индекс Dst опять уменьшается до -143 нТл в 07:00 UT 13/11/2025. С 17:00 UT 14/11/2025 по 00:00 UT 16/11/2025 он флуктуирует на уровне (16 ± 5) нТл.

По методологии, предложенной Л.Ф. Черногором в работе (Chernogor, 2025a), оценим кинетическую энергию и мощность КВМ по формулам:

$$E_{sw} = \frac{1}{2} m_p n_{sw} V_{sw}^2 V,$$

$$P_{sw} = \frac{E_{sw}}{\Delta t_{CME}}$$

где $m_p = 1.673 \times 10^{-27}$ кг – масса протона, V_{sw} – скорость солнечного ветра, а V – объем выброса, Δt_{CME} – характерное время, за которое КВМ проходит мимо Земли.

Объем КВМ приближённо вычислялся как

$$V = \pi R_m^2 V_{sw} \Delta t_{CME},$$

где $R_m \approx 10 R_E$ – эффективный радиус магнитосферы Земли. Здесь площадь поверхности поперечного сечения магнитосферы полагалась $S_{m0} = \pi R_m^2 = 1,28 \times 10^{16} \text{ м}^2$.

Отсюда:

$$E_{sw} = \frac{1}{2} (\pi R_m^2) m_p n_{sw} V_{sw}^3 \Delta t_{CME}.$$

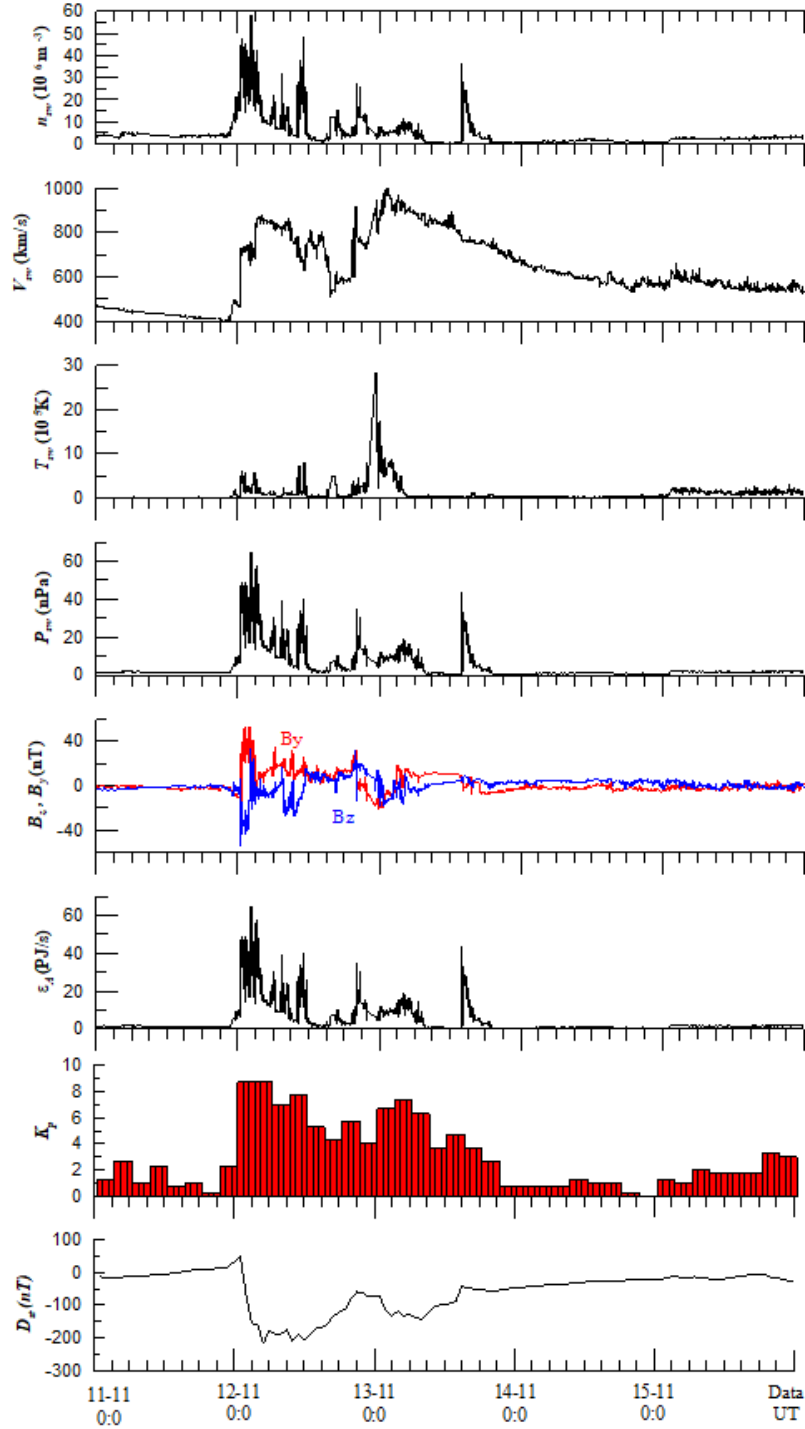
Тепловая энергия КВМ при прохождении через площадь поверхности поперечного сечения магнитосферы равной $S_{m0} = \pi R_m^2 = 1,28 \times 10^{16} \text{ м}^2$ вычисляется по формуле:

$E_T = \frac{3}{2} k T_{sw} n_{sw} V$, k – постоянная Больцмана, а средняя мощность тепловых процессов $P_T = E_T / \Delta t_{CME}$ [6].

Оценку кинетической и тепловой энергии проведём, когда максимальное значение $n_{sw} = 57.98 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$, которое имело место в 02:15 UT 12/11/2025, $V_{sw} = 750 \text{ км/с}$, $T_{sw} = 0.97 \times 10^5 \text{ К}$, $\Delta t_{CME} = 16020 \text{ с}$, получаем кинетическую энергию и мощность $E_{sw} = 4.19 \text{ ЭДж}$, а $P_{sw} = 261.9 \text{ ТВт}$. Тепловая энергия и мощность КВМ при вхождении в магнитосферу $E_T = 17,97 \text{ ПДж}$, $P_T = 1.12 \text{ ТВт}$.

Рисунок 1

UT вариации параметров солнечного ветра: концентрации протонов, n_{sw} , температуры, T_{sw} , радиальной скорости, V_{sw} , давления, p_{sw} , компонент B_z и B_y , межпланетного магнитного поля; параметра Акасофу, ε_A , K_p - и Dst -индексов (retrieved from <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) за 11-15 ноября 2025



1.2 Вариации геомагнитных индексов

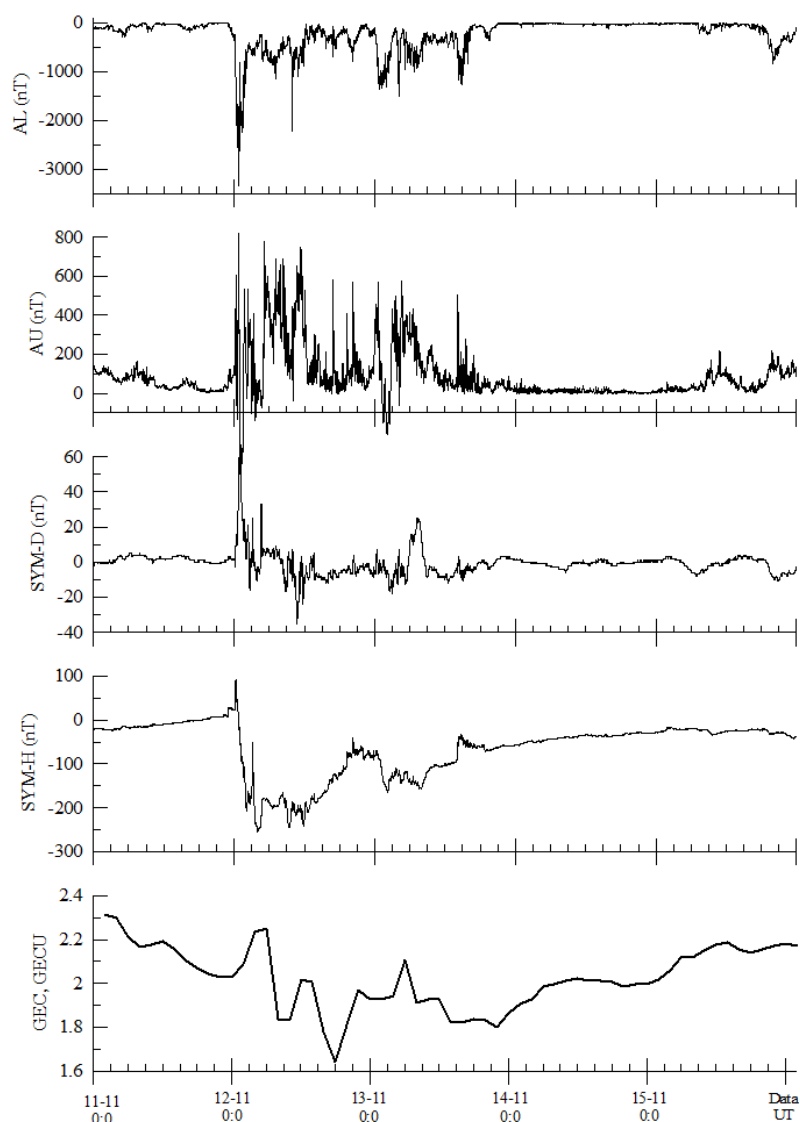
Рассмотрим вариации магнитных индексов и глобального содержания электронов (ГЭС), на рисунке 2 показаны вариации минутных значений индексов *AL*, *AU*, *SYM-D*, *SYM-H* и двухчасовых значений ГЭС за временной интервал с 11 по 15 ноября 2025 года.

Индекс *AL* (*Auroral Lower Index*), характеризует интенсивность западного аврорального электроджета, отражает наиболее сильное отрицательное возмущение магнитного поля в авроральной зоне. Индекс *AL* варьирует

на среднем уровне $\sim (-86.12 \pm 57.39)$ нТл до примерно 17:00 UT 11/11/2025. Затем непродолжительное время он увеличивается и в 22:41 UT принимает положительное значение, равное 1 нТл. После чего отмечается сначала резкое уменьшение индекса *AL* до минимального значения, равного -3333 нТл, а затем в 00:45 UT 12/11/2025 и его до -470 нТл в 02:20 UT. Нестабильное состояние индекса *AL* сохраняется до 14/11/2025, временами отмечаются отрицательные пики, достигающие -1000 нТл.

Рисунок 2

Вариации минутных значений *AL-index*, *AU-index*, *SYM-D*, *SYM-H* (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/nx1.cgi>) и двухчасовых значений ГЭС (<https://simurg.iszf.irk.ru/gec>) за временной интервал с 11 по 15 ноября 2025 года



Индекс *AU* (*Auroral Upper Index*), характеризует интенсивность восточного аврорального электроджета. Он отражает наибольшее положительное возмущение магнитного поля в авроральной зоне. Индекс *AU* варьирует на среднем уровне $\sim (250 \pm 200)$ нТл до примерно 17:00 UT 11/11/2025. Во временном интервале с 17:00 UT 11/11/2025 до 00:00 UT 14/11/2025 индекс *AU* ведет себя нестабильно, показывая максимальное значение, равное 821 нТл в 00:43 UT 12/11/2025, и отрицательные значения с 00:57 UT до 01:33 UT 12/11/2025, с минимумом около -467 нТл в 01:05 UT 12/11/2025.

SYM-H и *SYM-D* – это индексы, которые описывают симметричную часть магнитного возмущения Земли (*SYM* – Symmetric), в первую очередь, связанную с кольцевым током (ring current). Эти индексы показывают, насколько глобально ослаблено магнитное поле Земли из-за кольцевого тока. Во время магнитной бури усиливается кольцевой ток вокруг Земли, который создаёт магнитное поле, направленное против земного, в результате наблюдается отрицательное отклонение уровня магнитного поля.

SYM-D показывает возмущение по долготной симметричной компоненте (реже используется). *SYM-D* также во временном интервале с 17:00 UT 11/11/2025 до 00:00 UT 14/11/2025 показывает нестабильное состояние, при этом максимальное значение *SYM-D* = 62 нТл в 00:53 UT 12/11/2025, а минимальное значение *SYM-D* = -35 нТл в 10:39 UT 12/11/2025.

SYM-H (*Symmetric Horizontal Index*) – это один из главных индексов геомагнитной активности, который показывает симметричное (глобальное) возмущение горизонтальной компоненты магнитного поля Земли. *SYM-H* аналог *Dst*-индекса, но с 1-мин временным разрешением. С 00:00 UT до 18:32 UT 11/11/2025 *SYM-H* держится на уровне (-12.6 ± 6.7) нТл, затем показывает увеличение продолжительностью более двух часов с максимальным значением *SYM-H* = 92 нТл в 00:18 UT 12/11/2025. После непродолжительного повышения следует резкое снижение и минимальное значение *SYM-H* = -254 нТл имеет место в 04:00 UT 12/11/2025. Фаза восстановления *SYM-H* не стабильная и длится до 00:00 UT 14/11/2025, после чего *SYM-H* держится на уровне (-32.1 ± 9.3) нТл до конца рассматриваемого периода.

Как видно из поведения индексов *Dst* и *SYM-H*, имела место двухшаговая магнитная буря.

1.3 Вариации ионосферных параметров

Прежде чем анализировать реакцию ионосферы на отдельные возмущения, целесообразно рассмотреть ее реакцию на изменения параметров космической погоды в целом. Для этой цели было рассмотрено поведение глобального содержания электронов (ГЭС) как интегрального параметра, характеризующего общее поведение ионосферы (<https://simurg.iszf.irk.ru/gec>). ГЭС в рассматриваемый период изменяется в пределах от максимального ~ 2.31 GECU в 00:00 UT 11/11/2025 и минимального ~ 1.64 GECU в 16:00 UT 12/11/2025, см. рисунок 2, нижняя панель.

Для описания ионосферного отклика на данное событие использовались данные по критическим частотам слоя F2, f_oF2 , представленные на сайте Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Института прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова (<http://ipg.geospace.ru/ionosphere-data-graph/>).

На рисунке 3 представлены вариации электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы и их относительные отклонения от медианных значений в % для станций Moscow [55.47°N; 37.30°E] и Rostov [47.24°N; 39.63°E] за временной интервал с 9 по 17 ноября 2025 г.

Концентрация электронов в максимуме слоя F2, N_m , рассчитана по формуле:

$$N_m = 1.24 \times 10^{10} (f_oF2)^2, \text{эл/м}^3.$$

Хорошо известно, что ионосферные бури были впервые обнаружены по данным вертикального зондирования ионосферы. Большая часть представлений о морфологии ионосферных бурь, исследования по выяснению физических процессов, ответственных за протекание ионосферных бурь также базируются на этих данных. При этом ионосферу считают возмущенной, если

$$|\delta N_m| = \left| \left(\frac{N_{mcur} - N_{mmed}}{N_{mmed}} \right) \times 100 \right| > 20\%,$$

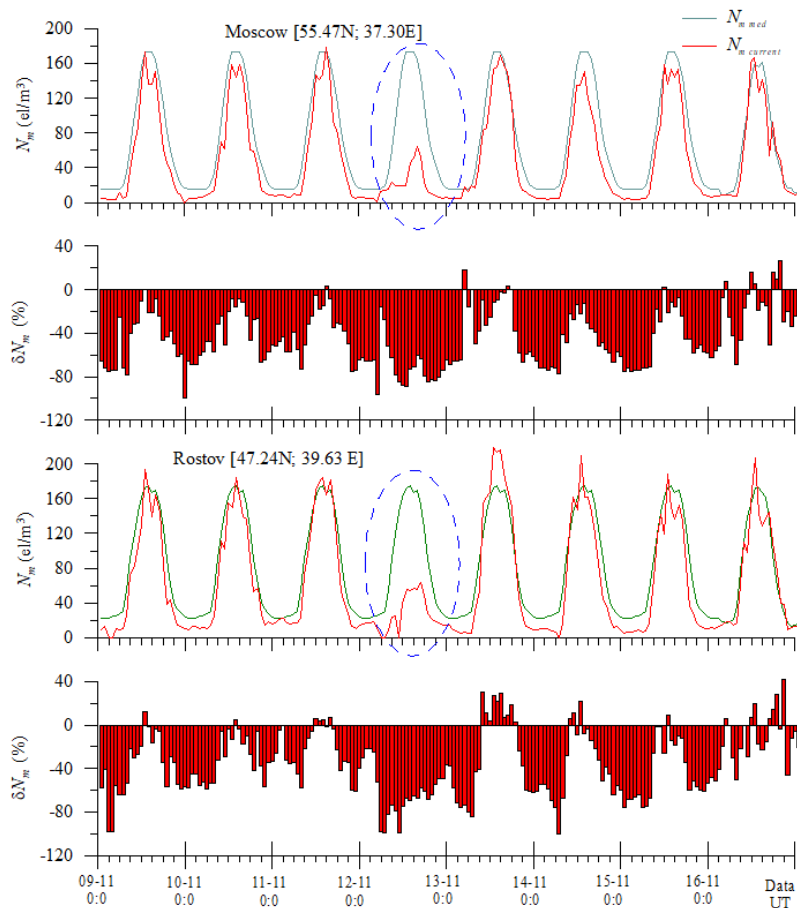
где N_{mcur} – текущее значение, а N_{mmed} – медианное значение N_m . При этом говорят, что имеется отрицательное ионосферное возмущение, если $\delta N_m < 0$, и положительное, если $\delta N_m > 0$.

В рассматриваемый период в вариациях N_m в ночные часы отмечаются отрицательные возмущения примерно около $-40\% \leq \delta N_m \leq -20\%$. В данной работе мы не будем рассматривать механизмы такого понижения электронной концентрации в максимуме слоя F2 в ночные часы. Обратим внимание на существенное уменьшение электронной концентрации с 06 LT 12/11/2025 до 04 LT 13/11/2025 с минимальным относительным значением –

89.08% в местный полдень 12 LT 12/11/2025 для станции Moscow. Для станции Rostov существенное уменьшение электронной концентрации отмечается с 17 LT 11/11/2025 до 10 LT 13/11/2025 с минимальным значением – 81.06% 10 LT 12/11/2025 (рисунок 3). Как мы видим, указанные периоды уменьшения электронной концентрации совпадают с главной фазой геомагнитной бури (смотри рисунок 1 и 2).

Рисунок 3

Вариации электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы и их относительные отклонения от медианных значений (в %) для станций Moscow [55.47°N; 37.30°E] и Rostov [47.24°N; 39.63°E] за временной интервал с 9 по 17 ноября 2025 года (<http://ipg.geospace.ru/ionosphere-data-tables.html#44>)



Для качественных и количественных оценок, характеризующих ионосферные бури, в ряде работ, например в [6], введены автор специальные индексы:

Для случая отрицательной бури $I_{NIS} = 10 \log \frac{N_{m0}}{N_{mmin}}$ (дБ), в нашем случае $N_{m0} = N_{mmed}$.

Для станции Moscow индекс $I_{NIS} = 9.6$ дБ в местный полдень 12 LT 12/11/2025.

Для станции Rostov индекс $I_{NIS} = 7.2$ дБ в местный полдень 10 LT 12/11/2025. Согласно классификации предложенной Л. Ф. Черногором в работе [6, см. Таблицу А7] отрицательные ионосферные бури по данным вертикального зондирования на станциях Moscow и Rostov относятся к экстремальным класса NIS15.

Оценим энергию отрицательной ионосферной бури на высотах слоя F2, используя формулу:

$$\Delta E_T = \frac{3}{2} k [(T_e + T_i) N_{m \min} - (T_{e0} + T_{i0}) N_{m0}] V_i,$$

где $k \approx 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана. Далее используем подходы, изложенные в работах (Spogli, L., et al., 2024), полагая $T_{e0} \approx 2300$ К – температура электронов в невозмущенных условиях; $T_e \approx 3200$ К – температура электронов во время бури. T_{i0} и T_i это температуры ионов при невозмущенных и возмущенных условиях, соответственно, $T_i \approx T_{i0} \approx 1000$ К; $V_i \approx 3 \times 10^{19}$ м³ – объем ионосферной плазмы.

Для станции Moscow на высотах слоя F2 энергия отрицательной ионосферной бури $\Delta E_T \approx -3.05$ ГДж, а для станции Rostov $\Delta E_T \approx -2.25$ ГДж. Продолжительность ионосферной бури по данным станциям была около 20 часов, тогда мощность этой бури $\Delta P_T \approx -42.30$ МВт для станции Moscow, $\Delta P_T \approx -31.26$ МВт для станции Rostov.

Обсуждение

С самого начала изучения ионосферных бурь отрицательные ионосферные возмущения, стали связывать с изменением на высотах области F2 нейтрального состава атмосферы, точнее – с уменьшением отношения $[O]/[N_2]$, которое в условиях фотохимического равновесия пропорционально концентрации электронов (Danilov and Morozova, 1985). Что является причиной указанного изменения состава и где находится источник этих изменений? Во время магнитосферных возмущений (суббурь) имеется источник разогрева на высотах E-области в авроральном овале (джоулев нагрев) за счет диссипации энергии крупномасштабных токовых систем, причем по экспериментальным

данным 60 % этой энергии идет на нагрев нейтрального газа (Billett et al., 2018; Baloukidis et al., 2023). Разогрев атмосферного газа на высотах 100–120 км приводит к вертикальному (вверх) выносу газа с соответствующим увеличением температуры и изменением его состава. В результате $[O]/[N_2]$ на высотах области F2 уменьшается ($[O]$ – падает или остается постоянным, а $[N_2]$ растет по сравнению с невозмущенными условиями), приводя к уменьшению равновесной концентрации электронов. Указанный разогрев приводит к градиенту давлений, что вызывает буревую циркуляцию. Наиболее важная для нашего рассмотрения меридиональная циркуляция при этом будет направлена к экватору (непосредственно или через полюс) и в общем случае не совпадает с атмосферной циркуляцией в спокойных условиях.

Как мы отметили имела место двухшаговая магнитная буря в рассматриваемом временном интервале. В работе (Chernogor, 2025c) на основе анализа широтной зависимости вариаций геомагнитного поля на поверхности Земли в глобальном масштабе во время сильной двухступенчатой геомагнитной бури 23–24 апреля 2023 года, одной из крупнейших бурь 25-го солнечного цикла, было показано, что что двухступенчатая геомагнитная буря является наилучшим естественным событием солнечно-земной связи для реализации метода оценки порогового значения компоненты B_z межпланетного магнитного поля, при котором формируется токовый клин суббури.

Заключение

Солнечные вспышки классов X и M с 09 по 11 ноября 2025 года сопровождалась направленным к Земле корональным выбросом масс. Концентрация протонов солнечного ветра увеличилась до значений $n_{sw} \approx 57.98 \times 10^6$ м⁻³, скорость солнечного ветра достигла максимального значения $V_{sw} \approx 1001.0$ км/с. Спутниковые наблюдательные данные в рассматриваемый период показали, что наиболее возмущенными были 12–13 ноября 2025 г., когда максимальные значения $Kp = 9$; $Dst = -217$ нТл. Параметр Акасофу ε_A , характеризующий энергетику возмущенной магнитосферы, показал максимальное значение $\varepsilon_A = 65.26$ ПДж/с. Кинетическая энергия и мощность KBM $E_{sw} \approx 4.19$ ЭДж, а $P_{sw} \approx 261.9$ ТВт. Тепловая энергия и мощность

КВМ при вхождении в магнитосферу $E_T = 17,97$ ПДж, $P_T = 1.12$ ТВт. Вариации минутных значений магнитных индексов AL , AU , $SUM-D$, $SUM-H$ и двухчасовых значений ГЭС также показали очень нестабильное состояние.

В максимуме слоя F2 ионосферы по данным станций вертикального зондирования Moscow [55.47°N; 37.30°E] и Rostov [47.24°N; 39.63°E] показали экстремальную отрицательную ионосферную бурю. Энергетика отрицательной ионосферной для станции Moscow бури $\Delta E_T \approx -3.05$ ГДж, мощность этой бури $\Delta P_T \approx -42.30$ МВт, а для станции Rostov $\Delta E_T \approx -2.25$ ГДж, мощность $\Delta P_T \approx -31.26$ МВт для станции Rostov.

Ввиду уникальности отдельной геокосмической бури изучение эффектов этих событий необходимо продолжать для решения задач по совершенствованию моделирования и прогнозирования состояния «космической погоды». Технологическое развитие нашей цивилизации становится все более уязвимым к воздействиям мощных солнечных гелиогеоэффективных событий.

Финансирование

Исследование (междисциплинарное) выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант ИРН AP26103851).

Конфликт интересов

Раскрытие любых финансовых, личных или профессиональных связей, которые могут быть восприняты как оказывающие влияние на проведение исследования. При отсутствии конфликтов следует указать: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Концептуализация, исследование, написание первоначальной версии статьи – Мукашева С.Н.; Концептуализация, редактирование – Черногор Л.Ф.; Обработка и управление данными, визуализация – Капытин В.И., Tileu Г.Б.

References

1. Afraimovich, E. L.; Demyanov, V. V.; Kondakova, T. N. (2003). Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions. *GPS Solutions*, 7, 109–119.
2. Afraimovich, E.L., Astafyeva, E.I., Oinats, A.V., Yasukevich, Y.V. and Zhivetiev, I.V. (2008a). ‘Global Electron Content: A new conception to track solar activity’, *Ann. Geophys.*, 26, pp. 335–344. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008>.
3. Afraimovich, E.L., Astafyeva, E.I., Zhivetiev, I.V., Oinats, A.V. and Yasyukevich, Y.V. (2008b). ‘Global Electron Content during Solar Cycle 23’, *Geomagn. Aeron.*, 48, pp. 187–200. <https://doi.org/10.1134/S0016793208020084>.
4. Andreyev, A. B., Mukasheva, S. N., Kaputin, V. I., & Sokolova, O. I. (2023). Estimating geomagnetically induced currents in high-voltage power lines for the territory of Kazakhstan. *Space Weather*, 21, e2023SW003639. <https://doi.org/10.1029/2023SW003639>
5. Bailey, R. L., Leonhardt, R., Möstl, C., Beggan, C., Reiss, M. A., Bhaskar, A., & Weiss, A. J. (2022). Forecasting GICs and geoelectric fields from solar wind data using LSTM: Application in Austria. *Space Weather*, 20, e2021SW002907. <https://doi.org/10.1029/2021SW002907>
6. Baloukdis, D., Sarris, T., Tourgaidis, S., Pirnaris, P., Aikio, A., Virtanen, I., et al. (2023). A comparative assessment of the distribution of Joule heating in altitude as estimated in TIE-GCM and EISCAT over one solar cycle. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 128, e2023JA031526. <https://doi.org/10.1029/2023JA031526>.
7. Billett, D., Grocott, A., Wild, J., Walach, M.-T., & Kosch, M. (2018). Diurnal variations in global joule heating morphology and magnitude due to neutral winds. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123(3), 2398–2411. <https://doi.org/10.1002/2017ja025141>.
8. Blagoveshchensky, D. V., Sergeeva, M. A., & Shmelev, Y. A. (2019). TEC Dynamics During the Intense Magnetic Storm. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, Russia, pp. 64–67. <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792746>
9. Chernogor L. F. (2025c) A two-step geospace storm as a new tool of opportunity for experimentally estimating the threshold condition for the formation of a substorm current wedge. *Ann. Geophys.*, 43, 15–35. <https://doi.org/10.5194/angeo-43-15-2025>.
10. Chernogor, L. F. & Rozumenko, V. T. (2008). Earth–Atmosphere–Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 13, 120–137. <http://rpra-journal.org.ua/index.php/ra/article/view/563>
11. Chernogor, L. F. (2011). The Earth–atmosphere–geospace system: main properties and processes. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 3199–3218. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.541510>
12. Chernogor, L. F. (2025a). Energetics of physical processes operated on May 8–12, 2024: From the solar storm to lithospheric disturbances. *Advances in Space Research*, 75, 4825–4849. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.12.069>

13. Chernogor, L. F. (2025b). What are a geospace storm and a pan-planetary storm? *Advances in Space Research*, 76, 5640–5657. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.08.016>
14. Chernogor, L. F., Garmash, K. P., Guo, Q. et al. (2021). Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018. *Geomagnetism and Aeronomy*, 61, 73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>
15. Danilov, A.D., Morozova, L.D. (1985). Ionospheric storms in the F2 region. Morphology and physics, *Geomagn. Aeron.*, 25(5), P. 705–721.
16. Ebihara, Y., Watari, S., & Kumar, S. (2021). Prediction of geomagnetically induced currents (GICs) flowing in Japanese power grid for Carrington-class magnetic storms. *Earth, Planets and Space*, 73, 163. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01493-2>
17. Gordiyenko, G., Arian, F., Litvinov, Y., & Zhiganbaev, M. (2025). Ionospheric Response to the Extreme Geomagnetic Storm of 10–11 May 2024. *Atmosphere*, 16, 854. <https://doi.org/10.3390/atmos16070854>
18. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J. (1992) *Global Positioning System: Theory and Practice*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-5126-6>.
19. Kane, R. P. (2005). Sun–Earth relation: Historical development and present status – A brief review. *Advances in Space Research*, 35, 866–881. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.142>
20. Makarov G.A. (2024). Large-scale relationships of the geomagnetic indices SYM-H and ASY-H with the north-south IMF component and the solar wind beta parameter // *Solnechno-zemnaya fizika*. Vol. 10. Iss. 3. P. 97–103.
21. Makarov G.A. Geomagnetic indices ASY-H and SYM-H and their relation to interplanetary parameters // *Solnechno-zemnaya fizika*. 2022. Vol. 8. Iss. 4. P. 38–45.
22. Miroshnichenko, L. I. (2011). *Fizika Solntsa i solnechno-zemnykh svyazey: uchebnoe posobie*. Ed. M. I. Panasyuk. Moscow: Universitetskaya kniga, 174 p. (in Russian).
23. Paul, B., Gordiyenko, G., & Galav, P. (2020). Study of the low and mid-latitude ionospheric response to the geomagnetic storm of 20 December 2015. *Astrophysics and Space Science*, 365, 174. <https://doi.org/10.1007/s10509-020-03884-5>
24. Paul, K. S., Haralambous, H., Moses, M., & Tripathi, S. C. (2025). Effects of the October 2024 Storm over the Global Ionosphere. *Remote Sensing*, 17, 2329. <https://doi.org/10.3390/rs17132329>
25. Polekh, N., Zolotukhina, N., Kurkin, V., Zherebtsov, G., Shi, J., Wang, G., & Wang, Z. (2017). Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia. *Advances in Space Research*, 60(11), 2464–2476. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>
26. Shpynev, B. G., Zolotukhina, N. A., Polekh, N. M., Ratovsky, K. G., Chernigovskaya, M. A., Belinskaya, A. Y., Stepanov, A. E., Bychkov, V. V., Grigorieva, S. A., Panchenko, V. A., Korenkova, N. A., & Mielich, J. (2018). The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 180, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014>
27. Sibeck, D. G., Lopez, R. E., & Roleof, E. C. (1991). Solar wind control of the magnetopause shape, location, and motion. *Journal of Geophysical Research*, 96(A4), 5489–5495. <https://doi.org/10.1029/90JA02464>
28. Singh, R., & Sripathi, S. (2017). Ionospheric response to 22–23 June 2015 storm as investigated using ground-based ionosondes and GPS receivers over India. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 11645–11664. <https://doi.org/10.1002/2017JA024460>
29. Spogli, L., Alberti, T., Bagiacchi, P., Cafarella, L., Cesaroni, C., Cianchini, G., Coco, I., Di Mauro, D., Ghidoni, R., Giannattasio, F., Ippolito, A., Marcocci, C., Pezzopane, M., Pica, E., Pignalberi, A., Perrone, L., Romano, V., Sabbagh, D., Scotto, C., Spadoni, S., Tozzi, R., Viola, M. (2024). The effects of the May 2024 Mother’s Day superstorm over the Mediterranean sector: from data to public communication. *Ann. Geophys.* 67 (2), PA218. <https://doi.org/10.4401/ag-9117>.
30. Tulasi Ram, S., Veenadhari, B., Dimri, A. P., Bulusu, J., Bagiya, M., Gurubaran, S., et al. (2024). Super-intense geomagnetic storm on 10–11 May 2024: Possible mechanisms and impacts. *Space Weather*, 22, e2024SW004126. <https://doi.org/10.1029/2024SW004126>

Сведения об авторах:

Мукашева Сауле Нурмуханбетовна (автор для корреспонденции) – кандидат физико-математических наук, доцент-исследователь кафедры теоретической и ядерной физики Физико-технического факультета Казахского национального университета имени аль-Фараби (Алматы, Казахстан, e-mail: snmukasheva@gmail.com).

Черногор Леонид Феоктистович – доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Национальной академии наук Украины, академик Национальной академии наук Высшего образования Украины, заведующий кафедры космической радиофизики Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (Харьков, Украина, e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com).

Капытин Виталий Иосифович – магистр наук, научный сотрудник Института ионосферы (Алматы, Казахстан, e-mail: kapytin@ionos.kz).

Тілеу Гүлбану Бақытжанқызы – PhD докторант, кафедра теоретической и ядерной физики Физико-технического факультета Казахского национального университета имени аль-Фараби и МНС Института ионосферы (Алматы, Казахстан, e-mail: tileugulbanu061199@gmail.com).

Information about the authors:

Mukasheva Saule Nurmukhanbetovna (corresponding author) – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor and Researcher at the Department of Theoretical and Nuclear Physics of the Physics and Technology Faculty of the Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: snmukasheva@gmail.com).

Chernogor Leonid Feoktystovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Academician of the National Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine, Head of the Department of Space Radiophysics of the V.N. Karazin Kharkiv National University (Kharkiv, Ukraine, e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com).

Kapytin Vitaly – Master of Science, research fellow at the Institute of the Ionosphere (Almaty, Kazakhstan, e-mail: kapytin@ionos.kz).

Tileu Gulbanu – PhD-student, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Faculty of Physics and Technology, Al-Farabi Kazakh National University and MNS Institute of Ionosphere (Almaty, Kazakhstan, e-mail: tileugulbanu061199@gmail.com).

Авторлар туралы мәлімет:

Мұқашева Сәуле Нұрмұханбетқызы (құжатқа жауапты автор) – физика-математика ғылымдар кандидаты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің физика-техникалық факультетінің теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті-зерттеушісі (Алматы, Қазақстан, e-mail: smtikasheva@gmail.com).

Черногор Леонид Феоктистович, физика-математика ғылымдар докторы, профессор, Украина Ұлттық ғылым академиясының корреспондент мүшесі, Украина Жоғары білім беру Ұлттық ғылым академиясының академигі, В.Н.Каразин атындағы Харьков ұлттық университетінің ғарыштық радиофизика кафедрасының меңгерушісі (Харьков, Украина, e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com).

Капытин Виталий Иосифович – ғылым магистрі, Ионосфера институтының ғылыми қызметкері (Алматы, Қазақстан, e-mail: kapytin@ionos.kz).

Тілеу Гүлбану Бақытжанқызы – PhD докторанты, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің физика және технология факультетінің теориялық және ядролық физика кафедрасы және Ионосфера институтының кіші ғылыми қызметкері Ионосфера институты (Алматы, Қазақстан, e-mail: tileugulbanu061199@gmail.com).

Отправлено: 21.04.2026

Принято: 13.05.2026