

МРНТИ 37.15.23; 37.15.21

<https://doi.org/10.26577/RCPh20259432>Б.Б. Сейфуллина^{1,2*}, О.Н. Крякунова^{1,2}, О. А. Каликулов²,Р.Е. Койчубаев^{1,3}¹Институт ионосферы, Алматы, Казахстан,²РГП Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан³Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Алматы, Казахстан*e-mail: botanaika.93@gmail.com

ФОРБУШ-ЭФФЕКТ 1-10 ИЮНЯ 2025 ГОДА: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПО ДАННЫМ НЕЙТРОННОГО МОНИТОРА И КОСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В работе представлен анализ события, зарегистрированного 1-10 июня 2025 г. нейтронным монитором ААТВ (Алматы, Казахстан, 3340 м над уровнем моря, жесткость геомагнитного обрезания $R = 5.9$ ГВ). Амплитуда понижения интенсивности космических лучей, зарегистрированной нейтронным монитором, составила около 12 %, что позволяет отнести событие к числу больших Форбуш-эффектов. Источником возмущений явилась активная область AR 14100, в которой произошла серия вспышек классов M3.4 и M8.1 (30–31 мая 2025 г.), сопровождавшихся быстрыми гало-СМЕ корональными выбросами масс (КВМ) типа гало со скоростями до 1700 км/с. Сопоставление данных нейтронного монитора с межпланетными параметрами показало классическую структуру межпланетного КВМ, включающую межпланетную ударную волну 1 июня, 05:45 UT, область возмущенной сжатой плазмы и область коронального выброса до 2 июня, 01:10 UT. Событие сопровождалось развитием сильной геомагнитной бури, пик которой пришёлся на 2 июня. Результаты демонстрируют тесную взаимосвязь между солнечной активностью, динамикой межпланетного КВМ и модуляцией потоков галактических космических лучей ГКЛ, подчёркивая значимость комплексного подхода к диагностике и прогнозированию космической погоды.

Ключевые слова: Форбуш-эффект, космические лучи, межпланетное возмущение.

Б.Б. Сейфуллина^{1,2*}, О.Н. Крякунова^{1,2}, О. А. Каликулов², Р.Е. Койчубаев^{1,3}¹Ионосфера институты, Алматы, Қазақстан,²РМК Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан,³Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан*e-mail: botanaika.93@gmail.com

2025 жылғы 1-10 маусымдағы Форбуш-эффект: нейтронды монитор мен ғарыштық бақылаулар деректері бойынша кешенді талдау

Жұмыста 2025 жылғы 1-10 маусым аралығында ААТВ нейтронды мониторда (Алматы, Қазақстан, теңіз деңгейінен 3340 м биіктікте, геомагниттік қатандығы $R = 5.9$ ГВ) тіркелген оқиғаны талдау ұсынылған. Нейтронды монитор тіркеген ғарыштық сәулелердің қарқындылығының төмендеу амплитудасы шамамен 12% құрады, бұл оқиғаны үлкен Форбуш-эффектісі қатарына жатқызуға мүмкіндік береді. Қарқындылықтың төмендеуінің себепшісі AR 14100 белсенді аймағы болды, онда (2025 ж. 30-31 мамыр) M3.4 және M8.1 Күн жарқылдары тіркелді, олар 1700 км/с дейінгі жылдамдықпен гало-СМЕ тәждік масса шығарындыларымен (ТМШ) жүрді. Нейтрондық монитор деректерін планетааралық параметрлерге сәйкестендіру 05:45 UT 1 маусымдағы планетааралық соққы толқынын, ұйытқыған тығыздалған плазма аймағын және 01:10 UT 2 маусымдағы тәждік масса шығарындылары аймағын қамтитын классикалық планетааралық ТМШ құрылымын көрсетті. Оқиға 2 маусымда шыңына жеткен күшті геомагниттік дауылдың дамуымен қатар

жүрді. Нәтижелер Күн белсенділігі, планетааралық ТМШ динамикасы және ГСГ галактикалық ғарыштық сәулелер ағындарының модуляциясы арасындағы тығыз байланысты көрсетеді, бұл ғарыштық ауа-райын диагностикалау мен болжаудың кешенді тәсілінің маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: Форбуш-эффект, ғарыштық сәулелер, планетааралық ауытқу.

B.B. Seifullina^{1,2*}, O.N. Kryakunova^{1,2}, O.A. Kalikulov², R.Ye. Koichubayev^{1,3}

¹Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan

²RSE Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

³Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: botanaika.93@gmail.com

Forbush decrease on June 1-10, 2025: A comprehensive analysis based on neutron monitor and space observations

The study presents an analysis of the event recorded on 1–10 June 2025 by the AATB neutron monitor (Almaty, Kazakhstan, 3340 m a. s. l., geomagnetic cutoff rigidity $R = 5.9$ GV). The amplitude of the cosmic ray intensity decrease registered by the neutron monitor was about 12%, which classifies the event as a major Forbush decrease. The source of the disturbances was active region AR 14100, where a series of M3.4 and M8.1 flares (30–31 May 2025) occurred, accompanied by fast halo-type coronal mass ejections (CMEs) with velocities reaching up to 1700 km/s. A comparison of neutron monitor data with interplanetary parameters revealed the classical structure of an interplanetary CME, including an interplanetary shock observed on 1 June at 05:45 UT, a disturbed sheath region, and the CME ejecta extending until 2 June at 01:10 UT. The event was accompanied by the development of a strong geomagnetic storm, peaking on 2 June. The results demonstrate a close relationship between solar activity, the dynamics of interplanetary CMEs, and the modulation of galactic cosmic ray (GCR) fluxes, which points out the importance of an integrated approach to space weather diagnostics and forecasting.

Key words: Forbush decrease, cosmic rays, interplanetary disturbance.

Введение

Форбуш-эффекты (ФЭ) представляют собой изменения интенсивности космических лучей в крупномасштабных возмущениях солнечного ветра. Корональные выбросы массы (СМЕ), инициированные солнечными вспышками, представляют собой одни из наиболее энергетически мощных проявлений солнечной активности. Эти явления связаны с выбросом плазмы из короны Солнца в межпланетное пространство. СМЕ играют ключевую роль в процессе формирования больших ФЭ, так как, чаще всего, сопровождаются межпланетными ударными волнами, ускорением энергичных частиц и изменением структуры межпланетного магнитного поля [1-2].

Для КВМ характерны повышенная плотность и напряжённость магнитного поля, а также широкий диапазон скоростей распространения от сотен до нескольких тысяч километров в секунду. Пространственные масштабы выбросов могут охватывать значительную часть солнечного диска, а их динамика обеспечивает сохранение

целостности структуры на протяжении нескольких суток в межпланетной среде [2-3].

Особый интерес представляют КВМ, сопровождающие мощные солнечные вспышки. Именно такие события наиболее часто становятся источниками сильных геомагнитных возмущений. Быстро распространяясь во внешние области гелиосферы, они достигают орбиты Земли и являются главной причиной магнитных бурь различной интенсивности [3].

Одним из наиболее наглядных проявлений взаимодействия КВМ и ударных волн с околоземным пространством являются ФЭ. Эти эффекты возникают в результате модуляции потоков космических лучей межпланетными возмущениями, связанными с КВМ и другими солнечными источниками возмущений, распространяющимися в межпланетном пространстве.

Изучение ФЭ имеет большое значение. Анализ динамики, амплитуды и временной структуры ФЭ позволяет уточнять модельные

представления о взаимодействии межпланетных магнитных структур с галактическими космическими лучами, а также выявлять связь между солнечными и геофизическими процессами.

Наибольший интерес представляют ФЭ, сопровождающие мощные вспышки и быстрые КВМ, так как именно они формируют целостную картину эволюции солнечно-земных связей от источников на Солнце до проявлений в околоземной среде [3-10]. Наиболее развернутое определение ФЭ дано в работе Белова [11], где под ними понимается изменение плотности и анизотропии космических лучей в условиях крупномасштабных возмущений солнечного ветра. При этом межпланетные возмущения могут носить как спорадический, так и рекуррентный характер [11-13].

Настоящая работа посвящена анализу ФЭ, зарегистрированного 1-10 июня 2025 г. по данным нейтронного монитора ААТВ (Алматы, Казахстан, 3340 м над уровнем моря, жесткость геомагнитного обрезания $R = 5.9$ ГВ). В исследовании рассматриваются резкое понижение интенсивности космических лучей, солнечные источники и межпланетные возмущения, которые привели к такому большому ФЭ, а также связь данного события с изменением геомагнитной активности. ФЭ, возникающие под влиянием возмущений от различных солнечных источников, отличаются по амплитуде и геоэффективности, что отражает разнообразие межпланетных возмущений и их роли в модуляции космических лучей [14].

Нейтронные мониторы являются основным инструментом для изучения вариаций галактических космических лучей (ГКЛ) и изучения ФЭ. Эти наземные детекторы регистрируют вторичные нейтроны, возникающие при взаимодействии космических лучей с атмосферой, и на протяжении нескольких десятилетий обеспечивают непрерывные наблюдения, являясь ключевым элементом глобальной сети мониторинга космических лучей (www.nmdb.eu) [15–17].

Интенсивность ГКЛ в околоземном пространстве изменяется под воздействием солнечной активности и межпланетных

возмущений. Модуляция потоков космических лучей в гелиосфере определяется совокупностью процессов, происходящих на Солнце, в межпланетной и околоземной среде. Турбулентность и неоднородности межпланетного магнитного поля ограничивают проникновение частиц, особенно в области возмущенной сжатой плазмы (sheath-области) КВМ, где коэффициент диффузии понижается, и наблюдается уменьшение интенсивности ГКЛ. Существенную роль играют конвективные процессы в солнечном ветре: при возрастании скорости солнечного ветра, во время КВМ или появления высокоскоростных потоков солнечного ветра, возрастает эффективность отклонения траекторий космических лучей наружу межпланетного возмущения. В расширяющемся солнечном ветре частицы испытывают адиабатические потери энергии, что дополнительно снижает их наблюдаемую интенсивность. Важное значение имеют и дрейфовые эффекты, зависящие от конфигурации межпланетного магнитного поля и полярности солнечного цикла [18–20].

Для исследования использовались данные о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, предоставленные в базе OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Рентгеновские данные солнечного излучения использованы из базы GOES X-ray flux, предоставляемой NOAA Space Weather Prediction Center (<https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>). Информация о геомагнитной активности (индексы Kp и Ap) получена из архива GFZ Potsdam (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/kp-ap/wdc>).

Анализ солнечных источников проводился на основе комплекса ресурсов: SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, <https://soho.nascom.nasa.gov/>) и <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard>).

Начало ФЭ определялось по внезапным возмущениям геомагнитного поля: Sudden Storm Commencement (SSC). При отсутствии таких индикаторов началом FE считались резкие изменения параметров солнечного ветра (V_{sw}), межпланетного магнитного поля (B_t), а также интенсивности ГКЛ.

Форбуш-эффект 1-10 июня 2025 г.

ФЭ, зарегистрированный 1-10 июня 2025 г. нейтронным монитором ААТВ, проявился как резкое падение интенсивности ГКЛ примерно на 12 %, с последующим восстановлением в течение

нескольких суток. Основным источником возмущений, приведших к ФЭ, были корональные выбросы массы из активной области AO14100 на Солнце.

Солнечные источники события

Солнечным источником данного события являлась активная область AO14100 (N12E12). Данная область отличалась большой площадью 440 msh (millionths of the solar hemisphere) и сложной магнитной конфигурацией β - γ - δ , что указывает на запутанность разных полярностей. На рисунке 1 приведено изображение видимого солнечного диска с обозначением активных областей.

Также на рисунке 2 представлено более детальное изображение активной области AO14100. В оптическом диапазоне (HMI 6173 Å)

наблюдается группа солнечных пятен, центральная часть которой содержит несколько крупных пятен. Магнитограмма (HMI) показывает сложную β - γ - δ -конфигурацию магнитного поля, что указывает о высоком потенциале для вспышек классов M и X. В мягком рентгеновском диапазоне (Hinode/XRT) регистрируется область яркого излучения над AO14100 связанная с нагревом плазмы до высоких температур. Изображение в крайнем ультрафиолете (SWAP 174 Å) демонстрирует сложную систему магнитных петель, что говорит о высокой динамической активности данной области.

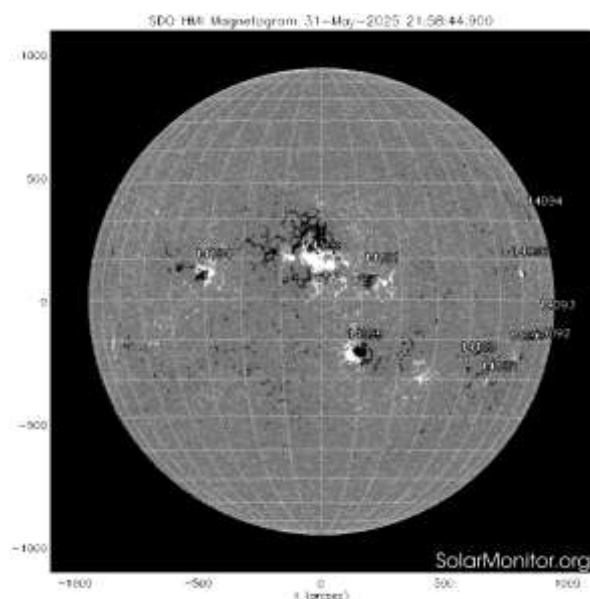


Рисунок 1 – Изображение солнечного диска и AO14100 по данным SDO/ Solarmonitor.org

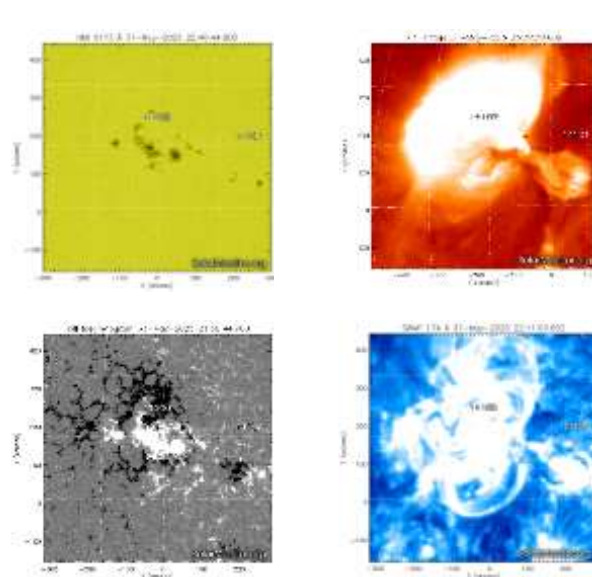


Рисунок 2 – Изображение AO14100 по данным solarmonitor.org

Эволюция крупной активной области с сильными магнитными полями сопровождалась серией вспышек класса M, произошедших за короткий промежуток времени. Такое количество вспышек отражает высокую магнитную активность на Солнце и указывает на нестабильное состояние магнитного поля в данной области.

В период с 30 по 31 мая 2025 г. в активной области AR 14100 было зарегистрировано несколько вспышек класса M, две из которых сопровождалась значительными КВМ.

На графике (см. рисунок 3) приведены данные рентгеновского излучения Солнца по данным спутника GOES-16 за период 30 мая - 1 июня 2025 г.

В период с 30 мая по 1 июня 2025 г. была зафиксирована серия солнечных вспышек, среди которых наиболее значимыми являются кратковременная вспышка класса M3.4 (30 мая,

06:13 UT) и наиболее мощная и продолжительная вспышка класса M8.1 (31 мая, 00:05 UT).

Первое событие – это вспышка класса M3.4, произошедшая 30 мая 2025 г. в 06:13 UT, которая сопровождалась КВМ со скоростью около 700 км/с, зафиксированным коронографом SOHO/LASCO C2 в 07:12 UT (рисунок 4).

Второе событие – более мощная вспышка класса M8.1, произошедшая 31 мая 2025 г. в 00:05 UT, сопровождалась быстрым КВМ, зарегистрированным SOHO/LASCO C2 в 01:36 UT со скоростью около 1700 км/с (рисунок 5).

Для определения основных фаз межпланетного КВМ, то есть фронта ударной волны (shock), области возмущенной сжатой плазмы (sheath) и магнитного облака (ejecta) был проведен анализ параметров солнечного ветра по данным OMNI. На рисунке 6 представлены: верхняя панель – полное магнитное поле Bt, средняя панель – компонент Bz, нижняя панель – скорость солнечного ветра Vsw.

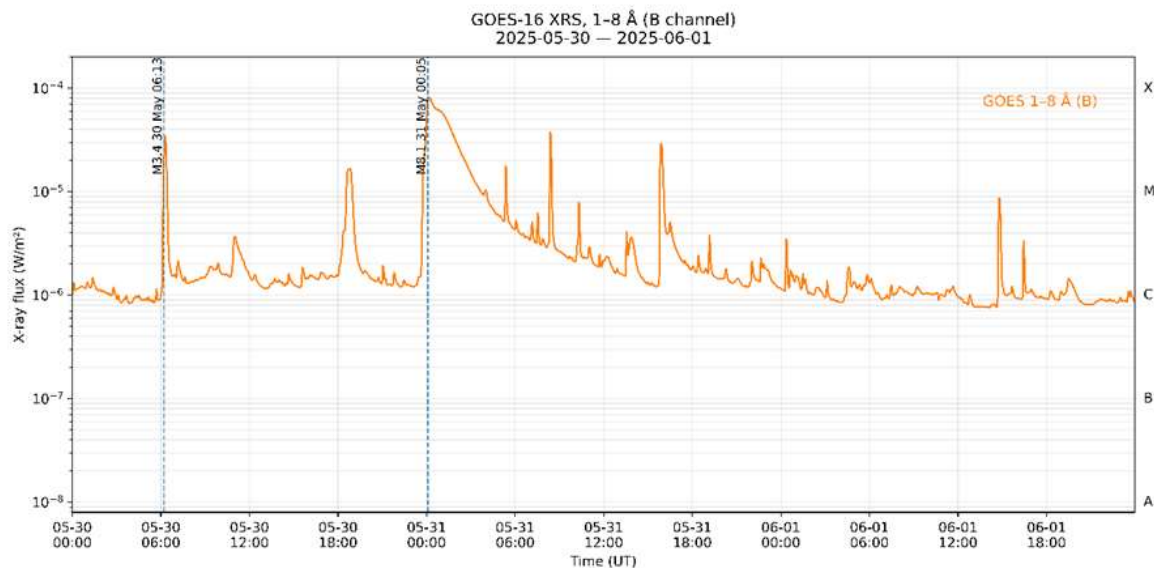


Рисунок 3 – Рентгеновское излучения Солнца по данным спутника GOES-16

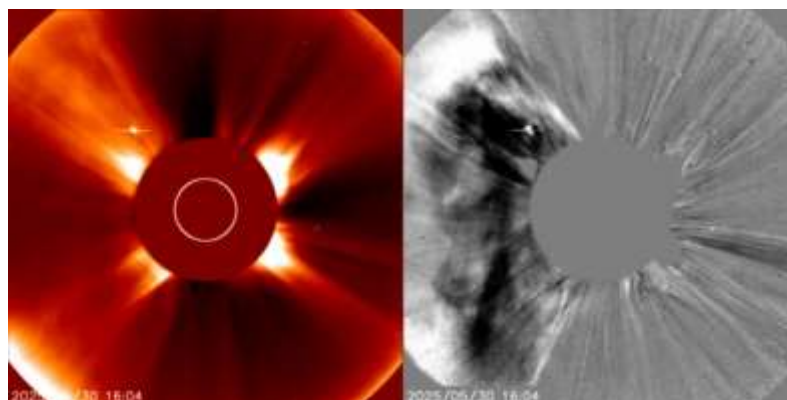


Рисунок 4 – Корональный выброс массы от вспышки M3.4 по данным SOHO/LASCO C2

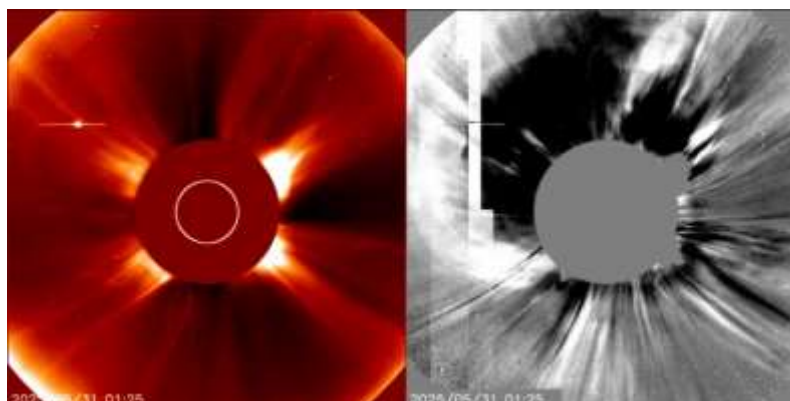


Рисунок 5 – Корональный выброс массы от вспышки M8.1 по данным SOHO/LASCO C2

Ключевые границы ICME определены по совокупности признаков. Межпланетный удар (Shock). Ударная волна фиксируется как резкий положительный скачок магнитного поля B_t и

скорости солнечного ветра V_{sw} . Для выделения момента используется 5-минутный ряд, для данного случая момент удара определён на 2025-06-01 в 05:45 UT. Переход от sheath к ejecta. После удара формируется область sheath,

характеризующаяся сильной турбулентностью магнитного поля и повышенным уровнем B_t . Переход к e_j определяется по резкому снижению турбулентности при сохранении высокой величины B_t , что образует характерный «спокойный» участок магнитного поля. Начало

e_j зафиксировано на 2025-06-01 в 23:10 UT. Окончание e_j . Завершение e_j отмечается при возвращении B_t к фоновым уровням, наблюдавшимся до события. Для этого случая конец e_j определён на 2025-06-02 в 01:10 UT (рисунок 6).

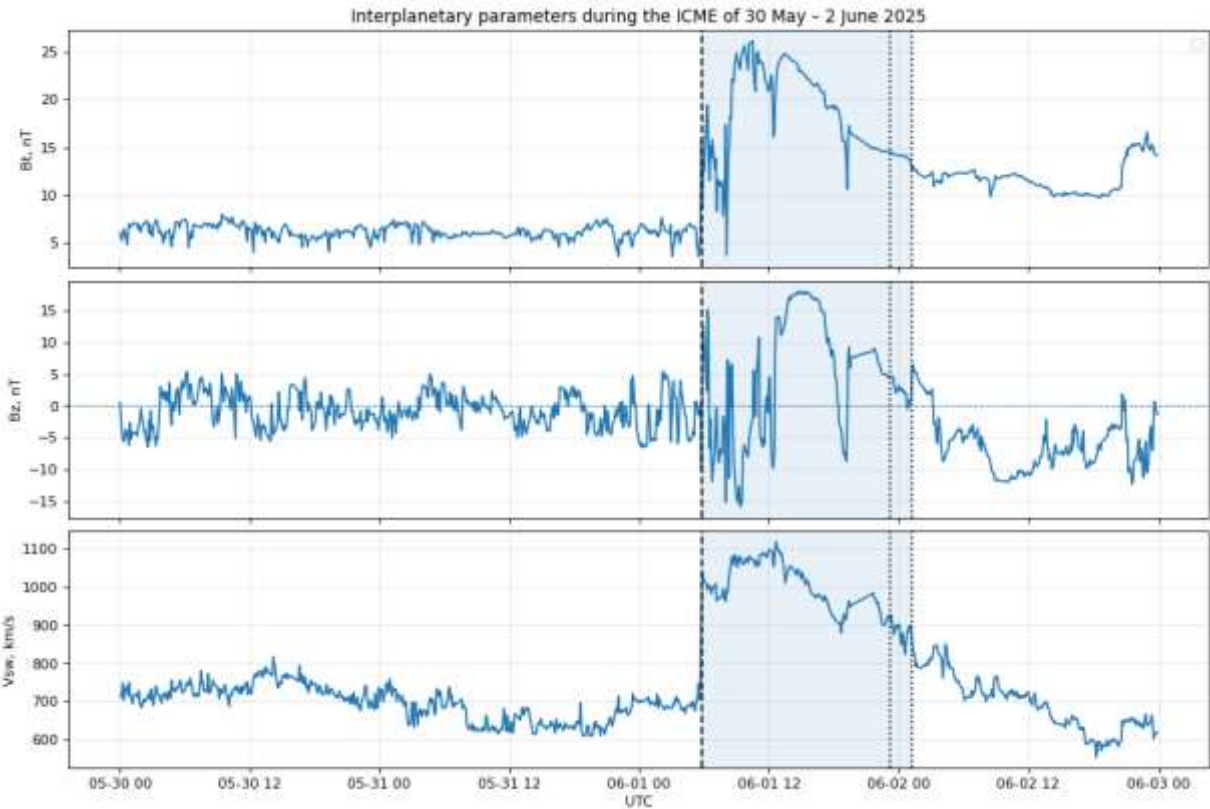


Рисунок 6 – Изменение магнитного поля и скорости солнечного ветра во время геомагнитной бури

На рисунке заливкой показаны интервалы $sheath$ и e_j . Область $sheath$ характеризуется высоким уровнем турбулентности и усиленным магнитным полем, а e_j проявляет более стабильную структуру – пониженную вариацию и

постепенное снижение. Эти признаки соответствуют классическим критериям выделения фаз межпланетного КВМ.

Полученные значения параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Максимальные, минимальные и средние значения параметров ММП и солнечного ветра

Полный вектор напряжённости межпланетного магнитного поля	$B_{t_{max}} = 26.11$ нТл	$B_{t_{min}} = 3.58$ нТл	$B_{t_{mean}} = 9.82$ нТл
Z-компонента межпланетного магнитного поля	$B_{z_{max}} = 18.02$ нТл	$B_{z_{min}} = -15.93$ нТл	$B_{z_{mean}} = -1.27$ нТл
Скорость солнечного ветра	$V_{sw_{max}} = 1117.35$ км/с	$V_{sw_{min}} = 554.90$ км/с	$V_{sw_{mean}} = 746.38$ км/с

В период с 31 мая по 3 июня 2025 г. была зарегистрирована большая геомагнитная буря. 1 июня наблюдался резкий рост индекса K_p до значения 7, что соответствует сильной магнитной

буре уровня G3 (Рисунок 7). В течение 2 и 3 июня сохранялась возмущённая обстановка с отдельными периодами магнитной бури, что указывает на продолжительное воздействие

межпланетного возмущения, вызванного приходом КВМ с ударной волной. К 4 июня магнитная активность снизилась до спокойного уровня. Таким образом, событие представляет

собой продолжительную магнитную бурю, вызванную мощным КВМ из активной области AO14100, которая сопровождалась типичными проявлениями большого возмущения и ФЭ в ГКЛ.

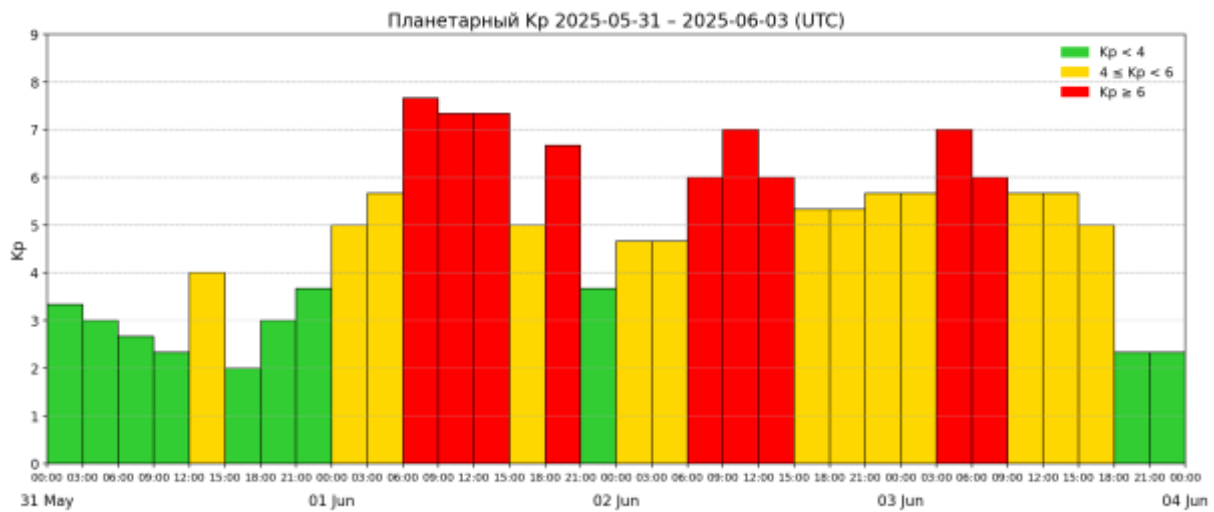


Рисунок 7 – Изменения Kp в период геомагнитной бури 31 мая - 3 июня 2025 г.

Форбуш-эффект

Интенсивность галактических космических лучей по данным нейтронного монитора ААТВ за период с 31 мая по 10 июня 2025 г. приведена на рисунке 8. В начале интервала интенсивность на фоновом уровне около +5 %. 1 июня 2025 года зафиксирован ФЭ с резким понижением –12 % относительно фона. После минимума наблюдается

постепенное восстановление интенсивности ГКЛ. Таким образом, зарегистрированное событие демонстрирует типичный ФЭ с довольно быстрой фазой понижения и последующим медленным восстановлением интенсивности ГКЛ из-за воздействия межпланетных возмущений на поток частиц космических лучей.

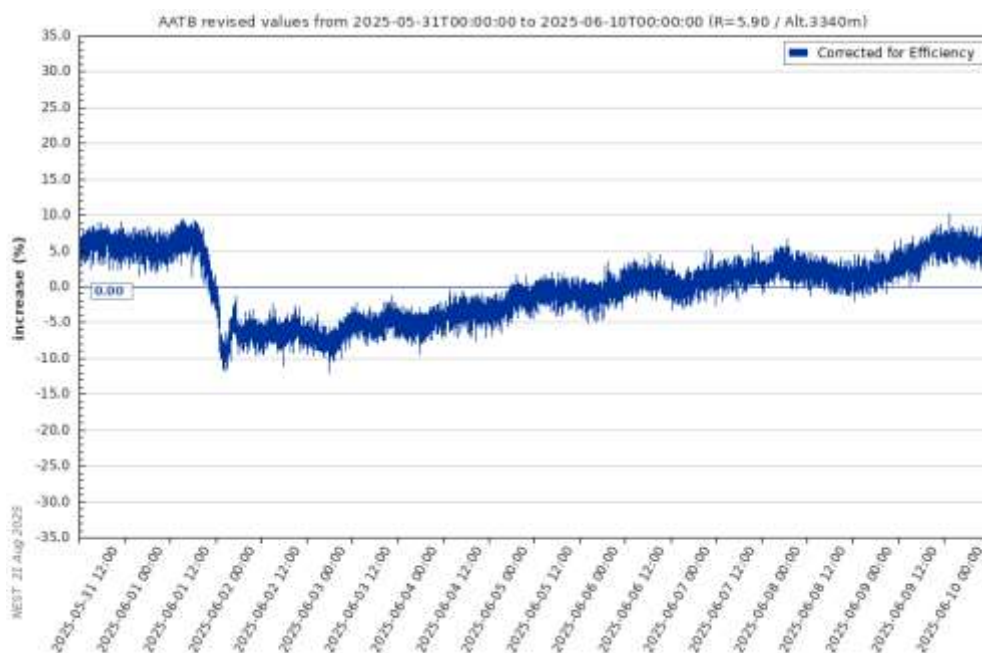


Рисунок 8 – Интенсивность космических лучей, зарегистрированная нейтронным монитором ААТВ. (Алматы, 3340 м, R = 5.9 ГВ) в период с 31 мая по 10 июня 2025 г.

Минимум ФЭ приходится на вторую половину дня 1 июня. У события классическая структура: резкое начальное понижение интенсивности и длительное восстановление. По амплитуде уменьшения интенсивности ($\sim 12\%$) данное событие можно отнести к числу больших Форбуш-эффектов. Сопоставляя по времени изменение интенсивности ГКЛ с данными OMNI, выявлена прямая связь между поведением интенсивности ГКЛ и параметрами межпланетного поля. Прибытие КВМ 31 мая 2025 г. сопровождалось скачком межпланетного магнитного поля B_t до 26 нТл и скорости солнечного ветра $V_{sw} > 1000$ км/с в 05:45 UT, что соответствует фронту ударной волны. Этот момент совпадает с началом резкого понижения ГКЛ.

В дальнейшем в интервале 1 июня 23:10 UT – 2 июня 01:10 UT, фиксировались устойчиво повышенные значения B_t , что указывает на прохождение Землёй магнитного облака (ejecta). В этот период поток ГКЛ оставался на минимальном уровне, отражая эффективность

магнитной структуры ejecta в модуляции космических лучей.

Для события ФЭ 1-10 июня 2025 г. можем наблюдать резкое падение интенсивности ГКЛ, связанное с турбулентностью sheath-области и фронтом ударной волны; глубокий минимум, обусловленный прохождением магнитного облака и медленное восстановление, которое отражает постепенную релаксацию межпланетного магнитного поля и снижение турбулентности.

Таким образом, событие 1-10 июня 2025 г. иллюстрирует классическую последовательность: солнечная вспышка + КВМ \rightarrow межпланетный КВМ \rightarrow ударная волна и ejecta \rightarrow Форбуш-эффект в интенсивности ГКЛ. Большая амплитуда понижения $\sim 12\%$ и длительная фаза восстановления подтверждают значительную энергетику источника и важную роль КВМ в формировании больших ФЭ. Временная корреляция и межпланетные характеристики подтверждают связь КВМ с наблюдаемым ФЭ.

Заключение

ФЭ, зарегистрированный 1-10 июня 2025 г., показывает влияние КВМ на интенсивность ГКЛ, которое привело к значительной модуляции потоков частиц. Активная область AO14100 была основным солнечным источником возмущений, в которой происходила серия вспышек с последующими КВМ, что и отразилось на форме ФЭ.

Зарегистрированный ФЭ является экстремальным событием космической погоды. Ударная волна межпланетного КВМ выступает в роли экрана, ограничивающего проникновение заряженных частиц во внутрь области КВМ. Магнитное облако КВМ создаёт барьер для проникновения космических лучей внутрь области ejecta, что формирует глубокие минимумы интенсивности. Временная корреляция между межпланетными параметрами и наблюдаемыми изменениями космических лучей подтверждает связь данного выброса с зарегистрированным ФЭ.

Определение границ межпланетного КВМ играет ключевую роль в интерпретации ФЭ. Оно позволяет установить, какое именно возмущение вызвало событие, зафиксировать момент его начала, продолжительность и условия модуляции космических лучей.

Таким образом, временная корреляция и межпланетные характеристики подтверждают связь данного КВМ с зарегистрированным ФЭ 1-10 июня 2025 г.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21881941 «Экспериментальные и теоретические исследования в области высоких и сверхвысоких энергий для решения актуальных задач астрофизики и физики космических лучей»).

Мы благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu), созданную в рамках программы FP7 Европейского союза (контракт № 213007), за предоставление данных. Авторы выражают признательность поставщикам данных о космических лучах из базы данных Neutron Monitor Database (NMDB) высокого разрешения, а также всем организациям, предоставляющим данные о Солнце, межпланетном пространстве и геомагнитном поле.

References

- 1 D.F. Webb, T.A. Howard, Coronal mass ejections: observations, *Living Reviews in Solar Physics* **9**(3) (2012). <https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>
- 2 R.A. Howard, A. Vourlidas, Stenborg G. The evolution of our understanding of coronal mass ejections, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **10**, 1264226 (2023) <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1264226>
- 3 T. Howard, Coronal mass ejections, *Astrophysics and Space Science Library* **376**. Springer, New York, NY (2011). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8789-1>
- 4 J.A. Lockwood, Forbush decreases in the cosmic radiation, *Space Science Reviews* **12**(5), 658–715 (1971). <https://doi.org/10.1007/BF00173346>
- 5 N. Iucci, M. Parisi, M. Storini, G. Villaresi, High speed solar wind streams and galactic cosmic ray modulation, *Nuovo Cimento C* **2**(4), 421–438 (1979). <https://doi.org/10.1007/BF02558283>
- 6 N. Iucci, S. Pinter, M. Parisi, M. Storini, G. Villaresi, The longitudinal asymmetry of the interplanetary perturbation producing Forbush decreases, *Nuovo Cimento C* **9**(1), 39–50 (1986). <https://doi.org/10.1007/BF02508051>
- 7 H.V. Cane, Cosmic ray decreases and magnetic clouds, *Journal of Geophysical Research* **98** (A3), 3509–3512 (1993). <https://doi.org/10.1029/92JA02479>
- 8 H.V. Cane, Coronal mass ejections and Forbush decreases, *Space Science Reviews* **93**, 55–77 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1026532125747>
- 9 I.G. Richardson, H.V. Cane, Forbush decreases and related solar wind structures, In: *Solar Wind 11/SOHO 16. Proceedings* (Ed. B. Fleck et al.), ESA SP-592, Noordwijk: ESA, p. 154.1. (2005).
- 10 A.V. Belov, Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena, *Universal Heliospherical Processes, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium* **257**, 439–450 (2009).
- 11 A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.A. Oleneva, A.B. Struminsky, V.G. Yanke, What determines the magnitude of Forbush decreases? *Advances in Space Research* **27**, 625–630 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3)
- 12 I.G. Richardson, V.M. Dvornikov, V.E. Sdobnov, H.V. Cane, Bidirectional particle flows at cosmic ray and lower (~1 MeV) energies and their association with interplanetary coronal mass ejections/ejecta, *Journal of Geophysical Research* **105**, 12579–12592 (2000).
- 13 A.A. Abunin, M.A. Abunina, A.V. Belov, E.A. Eroshenko, V.A. Oleneva, V.G. Yanke, Forbush effects with a sudden and gradual onset. *Geomagnetism and Aeronomy* **52**, 292–299 (2012). <https://doi.org/10.1134/S0016793212030024>
- 14 O. Kryakunova, B. Seifullina, M. Abunina, N. Shlyk, A. Abunin, N. Nikolayevskiy, I. Tsepakina, Forbush effects associated with disappeared solar filaments. *Atmosphere* **16**, 735 (2025). <https://doi.org/10.3390/atmos16060735>
- 15 N.O. Saduyev, O.A. Kalikulov, A.N. Sedov, Y.S. Mukhamejanov, V.V. Oskomov, S.K. Shinbulatov, N.O. Yerezhep, A.I. Zhumabayev, Sh.B. Utey, A.Y. Baktorz, Development of an automated system for the determination of the snow water equivalent and soil moisture by the neutron component of cosmic rays. *Acta Physica Polonica B* **51**(3), 887–892 (2020). <https://doi.org/10.5506/APhysPolB.51.887>
- 16 Ye.S. Mukhamejanov, O.A. Kalikulov, S.K. Shinbulatov, A.I. Zhumabayev, Sh.B. Utey, N.O. Yerezhep, A.N. Sedov, U.S. Sarsenbay, A.Y. Baktorz, N.O. Saduyev, Development of method and equipment for measuring the density of neutron flux from the reactor WWR-K, *Recent Contributions to Physics* **4**(75), 96–101 (2020). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2020.v75.i4.10>
- 17 S.K. Shinbulatov, N.O. Saduyev, O.A. Kalikulov, A.N. Sedov, V.V. Oskomov, E.S. Mukhamejanov, A.E. Baktorz, N.O. Yerezhep, Sh.B. Utey, et al., Development of a method and equipment for measuring the neutron flux from a research reactor. *Recent Contributions to Physics* **2**(85), 23–28 (2023). <https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v85.i2.04>
- 18 M.S. Potgieter, The modulation of galactic cosmic rays in the heliosphere: theory and models. *Space Science Reviews* **83**, 147–158 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1005014722123>
- 19 M.S. Potgieter, U.W. Langner, Modulation of cosmic rays: perpendicular diffusion and drifts in a heliosphere with a solar wind termination shock. *Advances in Space Research* **35**(4), 554–561 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.01.008>
- 20 N.E. Engelbrecht, F. Effenberger, V. Florinski, et al., Theory of cosmic ray transport in the heliosphere. *Space Science Reviews* **218**, 33 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00896-1>

Мақала тарихы:

Түсті – 09.09.2025

Қабылданды – 17.09.2025

Article history:

Received 9 September 2025

Accepted 17 September 2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Ботакөз Булатқызы Сейфуллина** (автор-корреспондент) – докторант, Ионосфера институтының Ғарыштық ауа райын диагностикалау және болжау зертханасының аға ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан; e-mail: botanaika.93@gmail.com.

2. **Ольга Николаевна Крякунова** – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Ионосфера институтының ғарыштық ауа райын диагностикалау және болжау зертханасының бас ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан; e-mail: krolganik@yandex.ru.

3. **Оразалы Абилхасимович Каликулов** – PhD, ҚР Энергетика министрлігі «Ядролық физика институты» РМК ғарыштық сәулелер физикасы зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан; e-mail: o.kalikulov@inp.kz.

4. **Рустам Еркенович Койчубаев** – докторант, Ионосфера институтының ғарыштық ауа райының диагностикасы және болжау зертханасының инженері, Алматы, Қазақстан; e-mail: r.koichubayev02@gmail.com.

Information about authors:

1. **Botakoz Seifullina** (corresponding author) – doctoral student, Laboratory of Diagnostics and Forecasting of Space Weather, Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan, e-mail: botanaika.93@gmail.com.

2. **Olga Kryakunova** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Space Weather Diagnostics and Forecasting of the Ionosphere Institute, Almaty, Kazakhstan, e-mail: krolganik@yandex.ru.

3. **Orazaly Kalikulov** – Head of the Laboratory of Cosmic Ray Physics, RSE "Institute of Nuclear Physics" of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, e-mail: o.kalikulov@inp.kz.

4. **Rustam Koichubayev** – Engineer, Laboratory of Diagnostics and Forecasting of Space Weather, Institute of Ionosphere, Almaty, Kazakhstan, e-mail: r.koichubayev02@gmail.com.