

*В. Л. Янчуковский¹✉, А. Ю. Белинская¹, А. А. Ковалев¹, М. А. Калюжная¹, В. С. Кузьменко¹,
Р. З. Хисамов¹*

Процессы на Солнце и возмущения в атмосфере Земли в ноябре 2025 года

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: kovalevaa@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования влияния космической погоды в период повышенной солнечной активности в ноябре 2025 года, основанного на данных непрерывных наблюдений космических лучей, геомагнитного поля и ионосферы, проведенных в Новосибирске, а также с привлечением данных мировой сети станций космических лучей и ионосферного мониторинга. В рассматриваемый период активная область Солнца AR4274 породила серию мощных вспышек классов М и X, что повлекло значительное усиление солнечного ветра со скоростью от 400 до 900 км/с и ростом плотности потока. В результате анализа выявлены существенные вариации космических лучей спорадического характера, включая два Форбуш-понижения и событие GLE77, зарегистрированное 11 ноября 2025 года. Исследование показало тесную взаимосвязь между солнечными событиями и геофизическими процессами в околоземном пространстве. Выявлены значительные изменения в параметрах геомагнитного поля, включая экстремальную магнитную бурю уровня G4, а также существенные возмущения в ионосфере. Обсуждаются вопросы влияния космических лучей на метеорологические процессы и опосредованно на вариации параметров ионосферы во время экстремальных событий космической погоды. Полученные результаты демонстрируют комплексный характер влияния солнечной активности на различные оболочки Земли и могут быть использованы для совершенствования методов прогнозирования космической погоды.

Ключевые слова: космическая погода, солнечные вспышки, космические лучи, геомагнитные возмущения, ионосфера

*V. L. Yanchukovsky¹✉, A. Yu. Belinskaya¹, A. A. Kovalev¹, M. A. Kalyuzhnaya¹, V. S. Kuzmenko¹,
R. Z. Khisamov¹*

Processes on the sun and disturbances in the Earth's atmosphere in november 2025

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation
e-mail: kovalevaa@ipgg.sbras.ru

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive study of the influence of space weather during the period of increased solar activity in November 2025. The research is based on continuous observations of cosmic rays, geomagnetic field, and ionosphere conducted in Novosibirsk, as well as data from the global network of cosmic ray and ionospheric monitoring stations. During this period, the active region of the Sun AR4274 generated a series of powerful flares of classes M and X, which caused a significant intensification of the solar wind with speeds ranging from 400 to 900 km/s and an increase in flow density. The analysis revealed significant sporadic variations in cosmic rays, including two Forbush decreases and the GLE77 event recorded on November 11, 2025. The study

demonstrated a close relationship between solar events and geophysical processes in near-Earth space. Significant changes were identified in geomagnetic field parameters, including an extreme magnetic storm of G4 level, as well as substantial disturbances in the ionosphere. The paper discusses the impact of cosmic rays on meteorological processes and their indirect influence on ionospheric parameter variations during extreme space weather events. The obtained results demonstrate the complex nature of solar activity's influence on various layers of the Earth and can be used to improve space weather forecasting methods.

Keywords: space weather, solar flares, cosmic rays, geomagnetic disturbances, ionosphere

Введение

Понятие «космическая погода» заключается в состоянии околоземного космического пространства за какой-либо временной интервал или в какой-то момент времени. При этом рассматриваются вопросы, связанные с воздействием космической погоды на окружающую среду (обитания), на системы жизнеобеспечения и здоровье человека. Основные факторы космической погоды: солнечные космические лучи, образовавшиеся в солнечных вспышках и при корональных выбросах массы (КВМ), магнитосферные бури и суббури (из-за корональных выбросов массы и солнечного ветра), ионизирующее электромагнитное излучение от солнечных вспышек, рост релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли. Ниже рассматривается состояние околоземного пространства (космической погоды) в период возрастания солнечной активности (СА) в ноябре 2025г. по данным непрерывных наблюдений космических лучей, геомагнитного поля и ионосферы в Новосибирске.

Процессы на Солнце, спорадические вариации интенсивности космических лучей и изменения атмосферных параметров

Источником мощных солнечных вспышек в ноябре 2025 года явилась активная область AR4274 [1], которая находилась в районе центрального меридиана Солнца, в зоне наибольшего влияния на Землю. В результате выбросов энергии этой областью в течение нескольких дней наблюдались крупные вспышки класса М и X (X – наивысший класс мощности). В табл. 1 представлены крупные вспышки, которые произошли в это время.

Таблица 1. Крупные солнечные вспышки первой половины ноября 2025 года

Дата	04.11.	04.11.	05.11.	06.11.	07.11.	09.11.	10.11.	11.11.
Время, UT	17:34	22:01	22:06	04:34	07:18	07:36	09:22	10:04
Вспышка	X1.8	X1.1	M8.6	M1.1	M1.7	X1.79	X.1.21	X5.16

Скорость солнечного ветра (СВ) за этот период возрастала от 400 до 900 км/с, а плотность СВ увеличивалась с 3 см^{-3} до 30 см^{-3} [2; 3]. Область AR4274 генерировала крупные вспышки, которые привели к росту потока (плотности) протонов СВ более высоких энергий (более 10 МэВ). Выброс высокоскоростной корональной массы (КВМ) был связан с вспышкой X5.16 (11.11.2025 г.).

Изменения космической погоды вызвали значительные вариации космических лучей (КЛ) спорадического характера. На рис. 1 представлены результаты наблюдений нейтронной, общей ионизирующей и жесткой мюонной компонент космических лучей за период с 5 по 20 ноября 2025 г. в Новосибирске (рис. 1а), а также результаты наблюдений КЛ с помощью нейтронных мониторов среднеширотных станций КЛ мировой сети с жесткостями геомагнитного обрезания от 0,7 ГВ до 8,5 ГВ (рис. 1б).

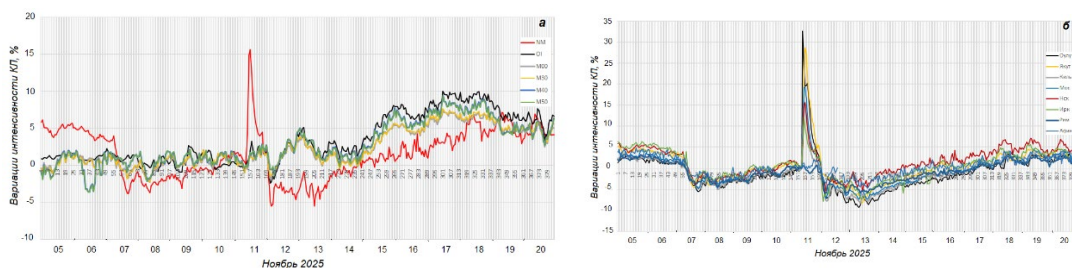


Рис. 1. Вариации интенсивности КЛ с 5 по 20 ноября 2025 г. в Новосибирске (рис. 1а) для нейтронной компоненты (кривая NM), общей ионизирующей компоненты под углом к зениту 0° (кривая OI) и жесткой мюонной компоненты под углами к зениту 0, 30, 40 и 50 градусов (кривые M00 – M50, соответственно); а также вариации интенсивности КЛ (рис. 1б), зарегистрированные нейтронными мониторами средних широт (коды станций см. табл. 2)

Нейтронным монитором 24NM-64 в Новосибирске зарегистрированы вспышка солнечных космических лучей (СКЛ) и два Форбуш-понижения галактических космических лучей (ГКЛ) (рис. 1а, красная линия) 7 и 12 ноября [4]. Солнечная вспышка X5.16 с выбросом высокоскоростной корональной массы привела к росту потока протонов с релятивистскими энергиями. Обычно энергия частиц в этих потоках не велика (порядка сотен МэВ) и они не регистрируются у земной поверхности. Это, так называемые солнечные протонные события (СПС). Реакция атмосферы на такие СПС наблюдается, в основном, на высоких широтах [5]. Часть СПС, содержащая частицы с энергией 1 ГэВ и более, будут наблюдаться у земной поверхности, так называемые, возрастания солнечных космических лучей (Ground Level Enhancement – GLE). За время наблюдений с 1940 г. зафиксировано 77 GLE; последнее (№ 77) – 11 ноября 2025 г. [6]. На широте Новосибирска это событие наблюдалось как вспышка солнечных космических лучей (СКЛ) на фоне галактических космических лучей (ГКЛ). Амплитуда события превышала 15%. Это свидетельствует о жесткости солнечных протонов в СКЛ, которая превышает 2,34 ГВ (порог геомагнитного обрезания новосибирского нейтронного монитора). После вспышки СКЛ 12 ноября происходит Форбуш-понижение галактических КЛ.

Все данные, представленные на рис. 1, нормированы к моменту начала вспышки СКЛ. Отклика на вспышку СКЛ в каналах мюонных телескопов (рис. 1а) не наблюдается. Максимумы энергетической чувствительности (коэффициентов

связи) к первичному потоку КЛ каналов телескопа находятся в области от десятков до сотен ГэВ [7]. Это свидетельствует о том, что энергия протонов солнечных космических лучей более 2,34 ГэВ, но не превышает 10 ГэВ. С помощью данных нейтронных мониторов мировой сети был уточнен верхний предел энергии солнечных протонов для этого события. Во время GLE увеличение интенсивности солнечных космических лучей на фоне ГКЛ у земной поверхности составило несколько десятков процентов (рис. 1б). Стоит отметить, что на высоте 10 км (коридор гражданской авиации) во время GLE возрастают потоки радиации, и соответственно эквивалентная доза облучения может превысить норму в несколько раз [8]. В табл. 2 приведены основные показатели представленных нейтронных мониторов. Информацию о станциях можно получить на сайте Базы данных нейтронных мониторов [9].

Таблица 2. Основные показатели среднеширотных нейтронных мониторов

Код станции КЛ	Расположение	Координаты, °	Высота, м	R_c (2025 г.), ГВ	Амплитуда GLE, %
ATHN	Афины, Греция	37,58N 23,47E	260	8,45	1,16
ROME	Рим, Италия	41,86N 12,47E	0	6,25	1,34
IRK1	Иркутск, Россия	52,1N 104,0E	475	3,29	12,13
NVBK	Новосибирск, Россия	54,84N 83,00E	163	2,34	15,63
KIEL	Киль, Германия	54,34N 10,12E	54	2,25	16,06
MOSC	Москва, Россия	55,47N 37,32E	200	2,07	19,31
YKTK	Якутск, Россия	62,01N 129,4E	105	1,35	28,67
OULU	Оулу, Финляндия	65,05N 25,47E	15	0,7	32,62

Станции КЛ расположены в табл. 2 в порядке уменьшения жесткости геомагнитного обрезания (R_c) с ростом широты. Жесткости геомагнитного обрезания для данной группы станций КЛ [10] вычислены для одной эпохи (2025 г.) без привлечения калькулятора [11]. Распределение амплитуд GLE в зависимости от R_c (от 32,62% до 1,34%), приведенных в табл. 2, указывает на то, что жесткостной спектр солнечных КЛ достаточно крутой, солнечные протоны наблюдались с жесткостью до 6 ГВ (статистически значимые возрастания). Вариации КЛ на средних широтах (усредненные по 8-ми пунктам наблюдений) и изменения атмосферного давления (также усредненные по 8-ми пунктам наблюдений) представлены на рис. 2а. На рис. 2б показаны вариации КЛ, изменения атмосферного давления и температуры в Новосибирске в этот период.

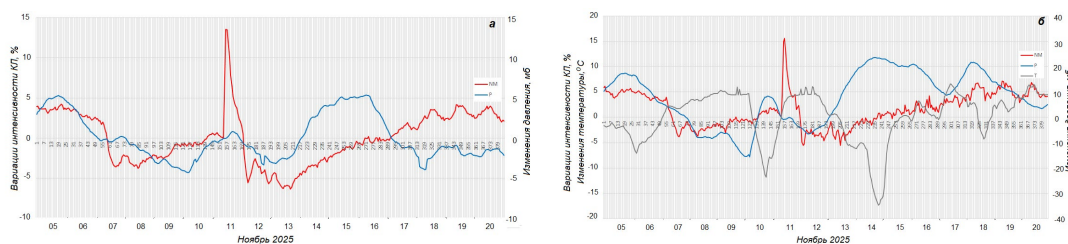


Рис. 2. Вариации интенсивности КЛ на средних широтах (кривая NM), усредненные по восьми пунктам наблюдений (рис. 2а), и в Новосибирске (рис. 2б); изменения атмосферного давления (кривая P), усредненные по восьми пунктам наблюдений (рис. 2а) и в Новосибирске (рис. 2б); изменения температуры (кривая T, рис. 2б)

Во время GLE и сразу после него 11-12 ноября происходит резкий спад атмосферного давления, а затем при Форбуш-понижении ГКЛ с 13 по 16 ноября наблюдается рост давления. Это характерно для всех среднеширотных станций с R_c от 0,7 GV (Oulu) до 8,45 GV (Athens). Для группы станций КЛ, включающих Якутск, Иркутск, Новосибирск и Москву, изменения атмосферного давления Δh составили, в среднем, около 30 мб. В этой связи в период с ноября 2025 г по январь 2026 года наблюдалось возрастание интенсивность образования и распространения циклонов и антициклонов [12].

Магнитосферные возмущения

В качестве характеристик возмущения магнитного поля Земли (МПЗ) были выбраны H-, D- и Z-компоненты, представляющие собой основные элементы геомагнитного поля, регистрируемые сетью наземных обсерваторий. Горизонтальная H-компонента является базовой для расчета индексов геомагнитной активности (K_p , Dst), вертикальная Z-компонента чувствительна к локальным ионосферным возмущениям, а вариации склонения D позволяют оценить асимметрию токовых систем в магнитосфере. Анализ выполнен по минутным данным.

В период с 5 по 20 ноября 2025 года (см. рис. 3) было зарегистрировано 6 магнитных бурь, из которых пять малых и одна очень большая. Внезапное начало (SSC) имела только экстремальная буря 12 ноября, остальные события характеризовались постепенным началом.

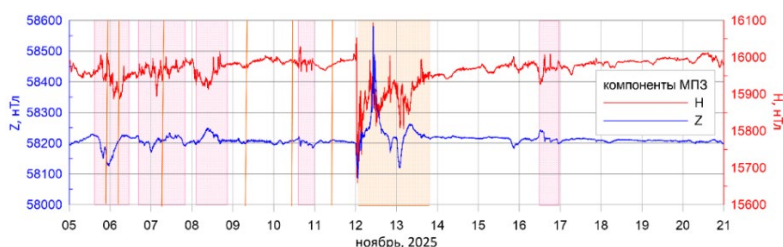


Рис. 3. Изменения в МПЗ за период 05.11.2025 – 20.11.2025 г. Моменты солнечных вспышек обозначены оранжевыми линиям; магнитные бури, зафиксированные в Новосибирске, отмечены прямоугольными областями: розовые - малые, оранжевым - очень большая

Анализ данных на магнитной обсерватории в Новосибирске за 12 ноября 2025 года показал внезапное начало очень большой магнитной бури в 00:10 UT. Продолжительность главной фазы составила 39 минут, а фазы восстановления - около 42 часов. Амплитуды вариаций геомагнитного поля достигли следующих значений: для горизонтальной компоненты H- ~ 405 нТл, для вертикальной компоненты Z- ~ 151 нТл, а для магнитного склонения D- $\sim 1.86^\circ$. Индекс Dst достиг -200 нТл [13]. Полученные значения соответствуют экстремальной магнитной буре уровня G4 по классификации NOAA [14].

Возмущения в ионосфере

Для среднеширотных станций из базы данных Lowell DIDBase [15] и ионосферной станции в Новосибирске [16], информация о которых приведена в табл. 3 (группировка для западного и восточного полушарий), были рассчитаны отклонения в процентном выражении параметров слоя F2 ионосферы от среднего за 5 магнитоспокойных дней этого месяца [17]. Затем вычислялись скользящие средние для момента времени t (час) за временной промежуток от $(t-12)$ до $(t+12)$. На рис. 4 приведены результаты расчетов. Станции сгруппированы по широтному признаку (слева на каждом графике указаны широтные диапазоны).

Таблица 3. Список ионосферных станций

Код станции	Расположение	Координаты	Код станции	Расположение	Координаты
EA653	Эарексон (США)	52,73N 174,08W	NV355	Новосибирск (Россия)	54,85N 83,23E
FF051	Фэрфорд (Англия)	51,7N 1,5W	JR055	Юлиусрух (Германия)	54,6N 13,4E
AL945	Алпена (США)	45,07N 83,56W	DB049	Дурбес (Бельгия)	50,1N 4,6E
IF843	Национальная Лаборатория Айдахо (США)	43,81N 112,68W	PQ052	Прухонице (Чехия)	50N 14,6E
MNJ45	Миллстоун-Хилл (США)	42,6N 71,5W	SO148	Шопрон (Венгрия)	47,63N 16,72E
EA036	Эль-Ареносильо (Испания)	37,1N 6,7W	RM041	Рим (Италия)	41,8N 12,5E

Окончание табл. 3

Код станции	Расположение	Координаты	Код станции	Расположение	Координаты
PA836	Пойнт Аргуэлло (США)	34,8N 120,5W	EB040	Рокетес (Испания)	40,8N 0,5E
EG931	Эглин AFB (США)	30,5N 86,5W	VT139	Сан-Вито (Италия)	40,6N 17,8E
AU930	Остин (США)	30,4N 97,7W	AT138	Афины (Греция)	38N 23,5E
			GM037	Джибилманна (Италия)	37,9N 14E
			IC437	Ичхон (Южная Корея)	37,14N 127,54E
			NI135	Никосия (Кипр)	35,03N 33,16E
			JJ433	Чеджу (Южная Корея)	33,43N 126,3E

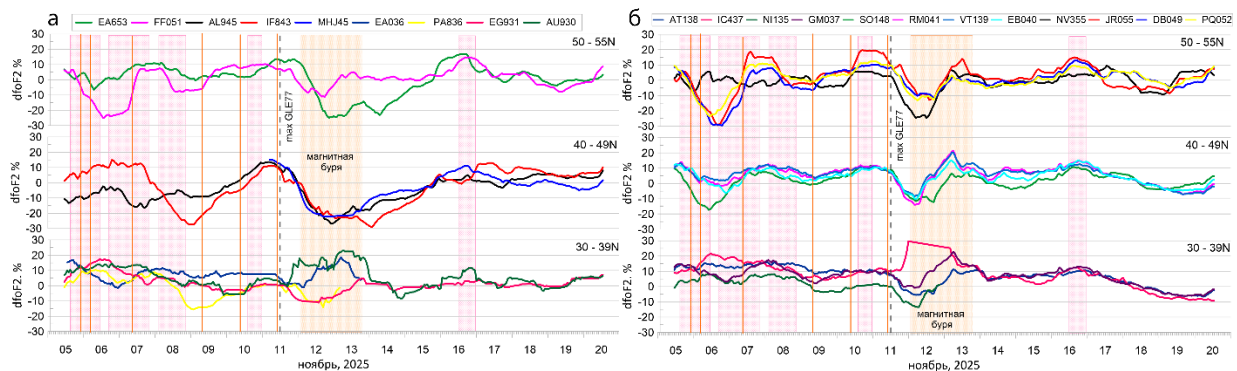


Рис. 4. Вариации критической частоты слоя F2 для среднеширотных станций а) западного и б) восточного полушарий в период 05.11.2025 – 20.11.2025 г. Обозначения соответствуют рис. 3; GLE77 отмечен пунктирной линией

На всех ионосферных станциях отмечаются пониженные значения критической частоты. На станциях севернее 55N в момент магнитной бури наблюдалось явление блэкаута, поэтому графики для них не приведены на рисунке. В главную и восстановительную фазы бури длительное отрицательное ионосферное возмущение наблюдалось практически на всех среднеширотных станциях. Отклонения достигали в отдельные часы до 60%. Отмечается повышение критической частоты на двух близко расположенных станциях Южной Кореи в восточном полушарии, и на двух станциях в западном полушарии Остин (США) и Эль-Ареносильо (Испания), которые достаточно удалены друг от друга. Скачки foF2 происходили 12.11.25 12:00UT, что соответствует максимуму магнитной бури. Ионограммы станций Остин и Эль-Ареносильо были просмотрены вручную, и высокие значения foF2 в эти часы подтверждаются.

Минимальная высота слоя F2 в период магнитной бури практически на всех станциях возросла. Исключение составляют вышеупомянутые станции, где наблюдались высоты, практически не отличающиеся от спокойных условий. Это вызывает интерес, так как получается, что возрастание критической частоты, в данном случае, не зависит от изменения высоты слоя F2.

Обсуждение

Процессы на Солнце в ноябре 2025 г. вызвали значительные вариации космических лучей спорадического характера: ФП ГКЛ (07 ноября и 11-12 ноября) и вспышка СКЛ (зарегистрированная как GLE77). Спектр солнечных КЛ был крутым, максимальная жесткость солнечных протонов, зарегистрированных НМ, найдена равной около 6 ГВ. Резкие перепады интенсивности КЛ достигали более 17%. КЛ являются основным, практически, единственным ионизирующим агентом в нижней атмосфере (тропосфере) [18]. Вариации интенсивности КЛ вызывают изменения скорости ионизации в атмосфере, что приводит к изменениям химического и аэрозольного состава атмосферы [19]. Химический состав атмосферы (концентрации малых составляющих атмосферы H_2O , O_3 , NO_2 и др.), а также концентрация и размеры аэрозольных частиц, определяют прозрачность атмосферы и состояние ее облачного покрова [20 - 22]. При вариациях интенсивности КЛ происходит изменения скорости ионизации атмосферы и, в результате, изменения прозрачности и облачности, которые определяют поток солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу и к земной поверхности. Возникающие при этом изменения температуры и давления [23] вызывают изменения атмосферной циркуляции, с помощью которой полученная тепловая энергия распределяется в атмосфере. Изменения давления на ряде рассмотренных в данном случае среднеширотных станций КЛ во время спорадических вариаций КЛ достигала 30 мб. Это один из возможных механизмов влияния солнечной активности на погоду и климат.

Магнитные бури характеризуются сильными (сотни нТл) изменениями горизонтальной составляющей геомагнитного поля, измеренного на поверхности Земли на средних и низких широтах.

Длительные отрицательные ионосферные возмущения, выражающиеся в значительном уменьшении критических частот слоя F2, наблюдались в период главной фазы и фазы восстановления магнитной бури практически на всех ионосферных станциях средних широт Северного полушария. Отрицательные ионосферные бури являются откликом на усиление геомагнитной активности, но в тоже время последние исследования показывают, что снижение концентрации электронов может быть обусловлено вариациями состава нейтрального газа термосферы [24 - 27]. Изменения атмосферной циркуляции вызывают значительные изменения атмосферных процессов. Изменчивые процессы в нижней атмосфере оказывают влияние на верхнюю атмосферу [29]. Метеорологическое воздействие на ионосферу снизу может зависеть от уровня солнечной активности, вариаций параметров геомагнитного поля, параметров волновых возмущений в нижней и средней атмосфере [30; 31]. Также ранее указывалось на существование связи вариаций интенсивности КЛ и параметров ионосферы [28]. В данном исследовании отчетливо видно, что рассматриваемые события в КЛ сопровождаются значительными изменениями атмосферного давления и температуры. Поэтому можно предположить, что формирование ионосферного отклика над среднеширотной областью в условиях развития экстремальной магнитной бури

12 ноября 2025 г. частично обусловлено распространением возмущений, вызванных спорадическими вариациями космических лучей в нижней нейтральной атмосфере, до ионосферных высот.

Заключение

Рассмотрены вариации интенсивности КЛ, изменения параметров геомагнитного поля, нижней (тропосфера) и верхней (ионосфера) атмосферы в их совокупности в ноябре 2025 г. Были использованы результаты комплексных наблюдений в Новосибирске с привлечением данных мировой сети станций (КЛ и ионосферы).

Установлено, что все возмущения (характерные для различных оболочек Земли), наблюдавшиеся в этот период, имеют общую причину, они обусловлены резким увеличением солнечной активности, вызванной появлением в этот период активной области AR4272 в районе центрального меридиана Солнца (в зоне наибольшего влияния на Землю).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2026-0051) и с использованием оборудования УНУ-85 «Российская национальная сеть станций космических лучей» [<http://www.ckprf.ru/usu/433536>].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dobrijevic D. Sun unleashes strongest solar flare of 2025, sparking radio blackouts across Africa and Europe [Электронный ресурс] // Space.com. – 11.11.2025. – URL: <https://www.space.com/astronomy/sun/sun-unleashes-strongest-solar-flare-of-2025-sparking-radio-blackouts-across-africa-and-europe> (дата обращения: 16.04.2026).
2. На Солнце произошла вспышка X5.16 — самая сильная с октября 2024 года [Электронный ресурс] // Лаборатория рентгеновской астрономии Солнца ФИАН. – 11.11.2025. – URL: https://xras.ru/project_diary.html?post_id=3160 (дата обращения: 16.04.2026).
3. Another X flare from Active Region 4274 [Электронный ресурс] // NOAA Space Weather Prediction Center. – 13.11.2025. – URL: <https://www.swpc.noaa.gov/news/another-x-flare-active-region-4274> (дата обращения: 16.04.2026).
4. Наблюдения и вспышки на Солнце. Баллы вспышечной активности [Электронный ресурс] // ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова». – URL: <http://193.232.24.200/nvbk/main.htm> (дата обращения: 16.04.2026).
5. Веретененко С.В., Тайл П. Солнечные протонные события и эволюция циклонов в Северной Атлантике // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48. – № 4. – С. 542–552.
6. International GLE Database (IGLED) [Электронный ресурс] // University of Oulu. – URL: <http://gle.oulu.fi> (дата обращения: 16.04.2026).
7. Янчуковский В.Л., Григорьев В.Г., Крымский Г.Ф. и др. Приёмные векторы мюонного телескопа станции космических лучей «Новосибирск» // Солнечно-земная физика. – 2016. – Т. 2, № 1. – С. 76–87. – DOI: 10.12737/16762.
8. Маурчев Е.А., Михалко Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. Оценка эквивалентной дозы излучения на разных высотах от протонов космических лучей // Солнечно-земная физика. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 29–34. – DOI: 10.12737/szf-83202204.
9. Neutron Monitor Database (NMDB) [Электронный ресурс] // NMDB. – URL: <http://www.nmdb.eu> (дата обращения: 16.04.2026).
10. Кручинин П.А., Сирук С.А., Майоров А.Г., Малахов В.В., Александрин С.Ю.

- Жесткость геомагнитного обрезания в местах расположения нейтронных мониторов // Солнечно-земная физика. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 132–138. – DOI: 10.12737/szf-112202512.
11. Расчет жесткости геомагнитного обрезания космических лучей [Электронный ресурс] // ИЗМИРАН. – URL: <https://tools.izmiran.ru/cutoff/> (дата обращения: 16.04.2026).
12. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.meteorf.gov.ru> (дата обращения: 16.04.2026).
13. Real-time (Quicklook) Dst Index Monthly Plot and Table for November, 2025 [Электронный ресурс] // WDC for Geomagnetism, Kyoto. – URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202511/index.html (дата обращения: 16.04.2026).
14. NOAA Space Weather Scales [Электронный ресурс] // NOAA Space Weather Prediction Center. – URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения: 16.04.2026).
15. Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO) [Электронный ресурс] // University of Massachusetts Lowell. – URL: <https://giro.uml.edu> (дата обращения: 16.04.2026).
16. Ionosphere and Magnetic Data - Klyuchi (IMD-K) [Электронный ресурс] // ИНГГ СО РАН. – URL: <http://im.ipgg.sbras.ru> (дата обращения: 16.04.2026).
17. Kp Index Data Download [Электронный ресурс] // GFZ German Research Centre for Geosciences. – URL: <https://kp.gfz.de/en/data> (дата обращения: 16.04.2026).
18. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications // J. Geophys. Res. – 2006. – Vol. 111. – D21206. – DOI: 10.1029/2006JD007150.
19. Пудовкин М.И., Распопов О.М. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат // Успехи физических наук. – 1993. – Т. 163, № 7. – С. 113–116.
20. Lee S.H., Reeves J.M., Wilson J.C., et al. Particle formation by ion nucleation in the upper troposphere and lower stratosphere // Science. – 2003. – Vol. 301. – P. 1886–1889. – DOI: 10.1126/science.1087236.
21. Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовцева Ю.С., Гвишиани А.Д. Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 175–184. – DOI: 10.7868/S0002351514020072.
22. Кудрявцев И.В., Юнгер Х. Вариации прозрачности атмосферы под действием галактических космических лучей как возможная причина их влияния на формирование облачности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2011. – Т. 51, № 5. – С. 668–676.
23. Янчуковский В.Л. Реакция среднеширотной атмосферы на спорадические вариации космических лучей в регионе Западной Сибири // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 65–71. – DOI: 10.12737/szf-104202407.
24. Laštovička J. Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2002. – Vol. 64. – P. 697–705. – DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00031-7.
25. Prölss G.W., Werner S. Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms // J. Geophys. Res. – 2002. – Vol. 107, No A2. – P. 1016. – DOI: 10.1029/2001JA900126.
26. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Ратовский К.Г., Захаренкова И.Е., Носиков И.А., Степанов А.Е., Котова Д.С., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние геомагнитных бурь 26–30 сентября 2011 года на ионосферу и распространение радиоволн КВ диапазона. I – Ионосферные эффекты // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 769.
27. Черниговская М.А., Ратовский К.Г., Сетов А.Г., Хабитуев Д.С., Калишин А.С., Степанов А.Е., Белинская А.Ю., Бычков В.В., Григорьева С.А., Панченко В.А. Отклик ионосферы над регионами высоких и средних широт Евразии по данным ионозондов во время экстремальной магнитной бури в марте 2015 г. // Солнечно-земная физика. – 2024. – Т. 10, № 4. – С. 51–64. – DOI: 10.12737/szf-104202406.

28. Янчуковский В.Л., Белинская А.Ю. Полугодовая вариация космических лучей и ионосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 5. – С. 286–290. – DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-286-290.

29. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 268 с.

30. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K.J.F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion // Ann. Geophysicae. – 2000. – Vol. 18. – P. 945–956.

31. Данилов А.А., Крымский Г.Ф., Макаров Г.А. Геомагнитная активность как отражение процессов в магнитосферном хвосте. 1. Источник суточной и полугодовой вариаций геомагнитной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 469–475.

© В. Л. Янчуковский, А. Ю. Белинская, А. А. Ковалев, М. А. Калюжная, В. С. Кузьменко,
Р. З. Хисамов, 2026