

Российская академия наук
Russian Academy of Sciences

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА

Том 11, № 3, 2025

SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS

Volume 11, Issue 3, 2025

ISSN 2712-9640 (online)



DOI 10.12737/issn.2712-9640

Электронная версия издания доступна
в Интернете на www.znanium.com

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА

СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Регистрационный номер ЭЛ № ФС 77 — 79288 от 2 октября 2020 г.

Издается с 1963 года

ISSN 2712-9640
DOI: 10.12737/issn.2712-9640
Том 11. № 3. 2025. 160 с.
Выходит 4 раза в год

Учредители: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики

Сибирского отделения Российской академии наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук»

SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS

Registered by Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roscomnadzor). Registration Number EL No. FS 77 — 79288 of October 02, 2020

The edition has been published since 1963

ISSN 2712-9640
DOI: 10.12737/issn.2412-4737
Vol. 11. Iss. 3. 2025. 160 p.
Quarterly

Founders: Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Состав редколлегии журнала

Жеребцов Г.А., академик РАН —
главный редактор, ИСЗФ СО РАН

Степанов А.В., чл.-к. РАН —
заместитель главного редактора, ГАО РАН

Потапов А.С., д-р физ.-мат. наук —
заместитель главного редактора, ИСЗФ СО РАН

Члены редколлегии

Абраменко В.И., д-р физ.-мат. наук, КРАО

Алтынцев А.Т., д-р физ.-мат. наук, ИСЗФ СО РАН

Афанасьев Н.Т., д-р физ.-мат. наук, ИГУ

Благовещенская Н.Ф., д-р физ.-мат. наук, ААНИИ

Богачев С.А., д-р физ.-мат. наук, ИКИ РАН

Валягин Г.Г., канд. физ.-мат. наук, САО РАН

Григорьев В.М., чл.-к. РАН, ИСЗФ СО РАН

Гульельми А.В., д-р физ.-мат. наук, ИФЗ РАН

Демидов М.Л., д-р физ.-мат. наук, ИСЗФ СО РАН

Деминов М.Г., д-р физ.-мат. наук, ИЗМИРАН

Ермоляев Ю.И., д-р физ.-мат. наук, ИКИ РАН

Зеленый Л.М., академик РАН, ИКИ РАН

Куличков С.Н., д-р физ.-мат. наук, ИФА РАН

Мареев Е.А., академик РАН, ИПФ РАН

Медведев А.В., чл.-к. РАН, ИСЗФ СО РАН

Мингалев И.В., д-р физ.-мат. наук, ПГИ

Обридко В.Н., д-р физ.-мат. наук, ИЗМИРАН

Перевалова Н.П., д-р физ.-мат. наук, ИСЗФ СО РАН

Пташник И.В., чл.-к. РАН, ИОА СО РАН

Салахутдинова И.И., канд. физ.-мат. наук,
ученый секретарь, ИСЗФ СО РАН

Сафаргалеев В.В., д-р физ.-мат. наук, ПГИ

Стародубцев С.А., д-р физ.-мат. наук, ИКФИА СО РАН

Стожков Ю.И., д-р физ.-мат. наук, ФИАН

Editorial Board

Zherebtsov G.A., Academician of RAS, Editor-in-Chief,
ISTP SB RAS

Stepanov A.V., Corr. Member of RAS,
Deputy Editor-in-Chief, GAO RAS

Potapov A.S., D.Sc. (Phys.&Math.),
Deputy Editor-in-Chief, ISTP SB RAS

Members of the Editorial Board

Abramenko V. I., D.Sc. (Phys.&Math.), CRAO

Altyntsev A.T., D.Sc. (Phys.&Math.), ISTP SB RAS

Afanasiev N.T., D.Sc. (Phys.&Math.), ISU

Blagoveshchenskaya N.F., D.Sc. (Phys.&Math.), AARI

Bogachev S.A., D.Sc. (Phys.&Math.), IKI RAS

Valyavin G.G., C.Sc. (Phys.&Math.), SAO RAS

Grigoryev V.M., Corr. Member of RAS, ISTP SB RAS

Guglielmi A.V., D.Sc. (Phys.&Math.), IPE RAS

Demidov M.L., D.Sc. (Phys.&Math.), ISTP SB RAS

Deminov M.G., D.Sc. (Phys.&Math.), IZMIRAN

Yermolaev Yu.I., D.Sc. (Phys.&Math.), IKI RAS

Zelenyi L.M., Academician of RAS, IKI RAS

Kulichkov S.N., D.Sc. (Phys.&Math.), IAP RAS

Mareev E.A., Academician of RAS, IAP RAS

Medvedev A.V., Corr. Member of RAS, ISTP SB RAS

Mingalev I.V., D.Sc. (Phys.&Math.), PGI

Obridko V.N., D.Sc. (Phys.&Math.), IZMIRAN

Perevalova N.P., D.Sc. (Phys.&Math.), ISTP SB RAS

Ptaшник I.V., Corr. Member of RAS, IAO SB RAS

Salakhutdinova I.I., C.Sc. (Phys.&Math.),
Scientific Secretary, ISTP SB RAS

Safargaleev V.V., D.Sc. (Phys.&Math.), PGI

Starodubtsev S.A., D.Sc. (Phys.&Math.), IKFIA SB RAS

Stozhkov Yu.I., D.Sc. (Phys.&Math.), LPI RAS

Тацкин А.В., д-р физ.-мат. наук, ИСЗФ СО РАН
Тестоедов Н.А., академик РАН, ИКТ КНЦ СО РАН
Уралов А.М., д-р физ.-мат. наук, ИСЗФ СО РАН
Лестер М., проф., Университет Лестера, Великобритания
Логинов В.Ф., академик НАН Беларуси,
Институт природопользования Беларуси
Йихуа Йан, проф., Национальные астрономические
обсерватории Китая, КАН, Китай
Панчева Дора, проф., Национальный институт геодезии,
геофизики и географии БАН, Болгария

Ответственный секретарь редакции
Полюшкина Н.А., ИСЗФ СО РАН

Tashchilin A.V., D.Sc. (Phys.&Math.), ISTP SB RAS
Testoedov N.A., Academician of RAS, ICT KSC RAS
Uralov A.M., D.Sc. (Phys.&Math.), ISTP SB RAS
Lester M., Prof., University of Leicester, UK
Loginov V.F., Academician of the NAS of Belarus,
Institute of Nature Management
Yan Yihua, Prof., National Astronomical Observatories,
China
Pancheva D., Prof., Geophysical Institute, Bulgarian
Academy of Sciences, Bulgaria

Executive Secretary of Editorial Board
Polyushkina N.A., ISTP SB RAS

СОДЕРЖАНИЕ

Двадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН

<i>Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Анфиногентов С.А., Жданов Д.А., Мышияков И.И., Иванов Е.Ф., Чэнмин Тань, Чжасо У.</i> Процессы ускорения и переноса электронов в импульсной круговой ленточной вспышке	5–15
<i>Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Застенкер Г.Н.</i> Особенности формирования турбулентного каскада в магнитослое в периоды ICME	16–25
<i>Котова Г.А., Чугунин Д.В., Безруких В.В.</i> Влияние солнечной активности и параметров солнечного ветра на температуру и плотность плазмы в плазмосфере Земли	26–35
<i>Макаров Г.А.</i> Влияние межпланетных параметров на показатель степени симметрии кольцевого тока	36–41
<i>Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е.</i> Геомагнитное обрезание космических лучей во время магнитной бури 23–24 марта 2023 г.: связь с параметрами солнечного ветра и геомагнитной активностью с учетом широтных эффектов	42–49
<i>Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Герасимова С.К.</i> Исследование динамики энергетического спектра солнечно-суточных вариаций космических лучей в 20–25 циклах солнечной активности методом скрещенных мюонных телескопов	50–55
<i>Стародубцев С.А.</i> МГД-волны в области предфронта межпланетной ударной волны 10 мая 2024 г.	56–64
<i>Моисеев А.В., Попов В.И., Мишин В.В., Пенских Ю.В.</i> Особенности распространения в системе магнитосфера—ионосфера компрессионных длиннопериодных колебаний, проникающих из межпланетной среды	65–76
<i>Белова А.О., Мягкова И.Н.</i> Прогнозирование потоков электронов на круговой полярной орбите: отбор предикторов.	77–87
<i>Бахметьевая Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А.</i> Отклик ионосферы на воздействие на нее необыкновенной радиоволновой при зондировании возмущенной области на частоте, близкой к нагревной	88–99
<i>Караханян А.А., Молодых С.И.</i> Метеорологический отклик на изменение электрического потенциала ионосферы, обусловленного возмущенным солнечным ветром	100–107
15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН	
<i>Medvedev A.V., Zherebtsov G.A., Perevalova N.P.</i> Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather: Results and prospects	108–124
<i>Степанов А.В., Зайцев В.В.</i> Неустойчивость Рэлея—Тейлора как триггер солнечных вспышек ..	125–131
<i>Demidov M.L., Wang X.F., Sun Y.Z., Deng Y.Y.</i> Observations of large-scale solar magnetic fields with a new Chinese telescope constructed for the International Meridian Circle Program (IMCP)	132–136
<i>Богомолов А.В., Богомолов В.В., Июдин А.Ф., Калегаев В.В., Мягкова И.Н., Оседло В.И., Свертилов С.И., Яшин И.В.</i> Мониторинг явлений космической погоды с использованием группировки наноспутников «Созвездие-270» Московского университета	137–148
<i>Moiseev A.V., Gololobov A.Yu., Ievenko I.B., Korsakov A.A., Petukhov I.S., Starodubtsev S.A.</i> Space weather research in Yakutia	149–159

CONTENTS

20th Annual Conference “Plasma Physics in the Solar System” February 10–14, 2025, Space Research Institute RAS

<i>Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Анфиногентов С.А., Жданов Д.А., Мышияков И.И., Иванов Е.Ф., Чэнмин Тань, Чжасо У.</i> Процессы ускорения и переноса электронов в импульсной круговой ленточной вспышке	5–15
--	------

<i>Rakhmanova L.S., Riazantseva M.O., Khokhlachev A.A., Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N.</i> Features of turbulent cascade development in the magnetosheath during ICME	16–25
<i>Kotova G.A., Chugunin D.V., Bezrukikh V.V.</i> Effect of solar activity and solar wind parameters on plasma temperature and density in Earth's plasmasphere	26–35
<i>Makarov G.A.</i> Influence of interplanetary parameters on the degree of symmetry of the ring current	36–41
<i>Danilova O.A., Ptitsyna N.G., Sdobnov V.E.</i> Geomagnetic cutoff of cosmic rays during the March 23–24, 2023 magnetic storm: Relationship with solar wind parameters and geomagnetic activity taking into account latitudinal effects	42–49
<i>Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G., Gerasimova S.K.</i> Studying dynamics of energy spectrum of solar diurnal variations in cosmic rays during solar activity cycles 20–25, using method of crossed muon telescopes	50–55
<i>Starodubtsev S.A.</i> MHD waves in the pre-front region of the interplanetary shock on May 10, 2024	56–64
<i>Moiseev A.V., Popov V.I., Mishin V.V., Penskikh Yu.V.</i> Features of propagation of compressional long-period oscillations penetrating from the interplanetary medium in the magnetosphere—ionosphere system	65–76
<i>Belova A.O., Myagkova I.N.</i> Prediction of electron fluxes in a circular polar orbit: Selection of predictors	77–87
<i>Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Zhemyakov I.N., Kalinina E.E., Lisov A.A.</i> Ionosphere response to the impact of an extraordinary radio wave when located at a frequency close to the heating frequency	88–99
<i>Karakhanyan A.A., Molodykh S.I.</i> Meteorological response to changes in ionospheric electric potential caused by disturbed solar wind	100–107

**15th Russian-Chinese Workshop on Space Weather,
September 9–13, 2024, Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS**

<i>Medvedev A.V., Zherebtsov G.A., Perevalova N.P.</i> Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather: Results and prospects	108–124
<i>Stepanov A.V., Zaitsev V.V.</i> The Rayleigh—Taylor instability as a trigger of solar flares	125–131
<i>Demidov M.L., Wang X.F., Sun Y.Z., Deng Y.Y.</i> Observations of large-scale solar magnetic fields with a new Chinese telescope constructed for the International Meridian Circle Program (IMCP)	132–136
<i>Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Iyudin A.F., Kalegaev V.V., Myagkova I.N., Osedlo V.I., Svertilov S.I., Yashin I.V.</i> Monitoring of space weather effects with Sozvezdie-270 nanosatellite constellation of Moscow University	137–148
<i>Moiseev A.V., Gololobov A.Yu., Ievenko I.B., Korsakov A.A., Petukhov I.S., Starodubtsev S.A.</i> Space weather research in Yakutia	149–159

ПРОЦЕССЫ УСКОРЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ИМПУЛЬСНОЙ КРУГОВОЙ ЛЕНТОЧНОЙ ВСПЫШКЕ

PROCESSES OF ACCELERATION AND TRANSFER OF ELECTRONS IN A PULSE CIRCULAR RIBBON FLARE

А.Т. Алтынцев 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru

Н.С. Мешалкина 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, nata@iszf.irk.ru
Государственная ключевая лаборатория солнечной
активности и космической погоды,
Национальный научный космический центр КАН,
Пекин, Китай

С.А. Анфиногентов

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru

Д.А. Жданов

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zhdanov@iszf.irk.ru

И.И. Мышияков 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ivan_m@iszf.irk.ru

Е.Ф. Иванов 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, eugenessrt@gmail.com

Чэнмин Тань

Государственная ключевая лаборатория солнечной
активности и космической погоды,
Национальный научный космический центр КАН,
Пекин, Китай, tanchengming@nssc.ac.cn

Чжао У

Школа космических наук и физики,
Шаньдунский университет,
Вейхай, Китай, wuzhao@sdu.edu.cn
Лаборатория электромагнитного детектирования,
Институт космических наук,
Шаньдунский университет,
Вейхай, Китай

A.T. Altyntsev

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, altyntsev@iszf.irk.ru

N.S. Meshalkina

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, nata@iszf.irk.ru
State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center CAS,
Beijing, China

S.A. Anfinogentov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, anfinogentov@iszf.irk.ru

D.A. Zhdanov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zhdanov@iszf.irk.ru

I.I. Myshyakov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ivan_m@iszf.irk.ru

E.F. Ivanov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, eugenessrt@gmail.com

Chengming Tan

State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center CAS,
Beijing, China, tanchengming@nssc.ac.cn

Zhao Wu

School of Space Science and Physics,
Shandong University,
Weihai, China, wuzhao@sdu.edu.cn
Laboratory for Electromagnetic Detection,
Institute of Space Sciences,
Shandong University,
Weihai, China

Аннотация. Обсуждаются ускорение и перенос электронов в круговой вспышке SOL2024-03-25T06:37:00 рентгеновского класса M4.4, отличающейся рекордно короткой длительностью импульса жестких излучений. Использованы радиоданные в диапазоне 0.1–40 ГГц, включая изображения вспышечной области в диапазоне частот Сибирского радиогелиографа. Микроволновое и жесткое рентгеновское излучения генерируются в окрестности магнитного донора при взаимодействии жгутов, видимых в области 1600 Å. Импульсная стадия заканчивалась коротким пиком длительностью менее 5 с, регистрируемым синхронно на 35 ГГц и в диапазоне 100–300 кэВ. После пика над жгутами поднимается длинная петля в ультрафиолетовом (УФ) излучении и появляется широкий выброс плазмы, направленный вдоль наблю-

Abstract. We discuss acceleration and transport of electrons in the circular flare SOL2024-03-25T06:37:00 of the M4.4 X-ray class, characterized by a record-short duration of hard X-ray emission pulse. We have used radio data in the 0.1–40 GHz range, including images of the flare region in the Siberian Radio Heliograph frequency range. Microwave and hard X-ray emissions are generated in the vicinity of the magnetic domain by the interaction of ropes visible at 1600 Å. The impulsive stage ended with a short peak <5 s long, recorded simultaneously at 35 GHz and in the 100–300 keV range. After the peak, a long loop in the ultraviolet (UV) rises and a broad plasma ejection appears which is directed along the outer spine observed before the flare. Large loops connect the spine and the remote source. There is a broadband microwave source at the remote footpoint

давшегося перед вспышкой внешнего шипа. Большие петли соединяют шип и удаленный источник. В удаленном на 215 угл. сек основании наблюдался широкополосный микроволновый источник, задержка которого от пика в ядре вспышки составляет ~ 5 с, а оценка скорости распространения электронов достигает трети скорости света. Отличительной особенностью излучения удаленного источника являлась высокая степень его круговой поляризации. Метровое излучение вспышки свидетельствует о заполнении вершин больших петель нетепловыми электронами с большими питч-углами. Впервые полученная совокупность пространственных, спектральных и поляризационных характеристик микроволновых источников обсуждается в контексте известных к настоящему времени результатов о природе круговых ленточных вспышек.

Ключевые слова: Солнце, механизмы ускорения, микроволновые всплески, метровые всплески, круговая ленточная вспышка.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения последних лет обнаружили, что одними из основных являются круговые ленточные вспышки, которые происходят в особой магнитной конфигурации с доменом фотосферного магнитного поля, вкрапленным в область с полями противоположной магнитной полярности. Над таким доменом находится куполообразная сепаратрисная поверхность, в вершине которой находится точка с нулевым магнитным полем [Priest, Titov, 1996, Masson et al., 2009, Sun et al., 2013]. От этой точки внутрь купола и от него вверх выходят так называемые шипы (spines). Векторы магнитного поля в окрестности шипов направлены вдоль них и противоположны по знаку. Поля рядом с внутренним шипом направлены от фотосферы из центра домена, а поля в окрестности внешнего шипа проявляются в КУФ-наблюдениях (крайний ультрафиолет) как крупномасштабные петли, далекие основания которых замыкаются на области фотосферы с вертикальными полями того же знака, что и поле домена. Удаленные основания этих петель могут быть расположены в сотнях угловых секунд от домена, т. е. ядра вспышки. Круговые ленточные вспышки часто сопровождаются корональными струями, радиовсплесками III типа, корональными выбросами массы, ударными волнами, корональными затмениями и изгибными колебаниями корональных петель и волокон (см., например, последний обзор [Zhang, 2024]).

Предполагается, что энерговыделение круговых вспышек происходит в процессах магнитного пересоединения не только при взаимодействии структур внутри домена, но и в токовых слоях, формирующихся на сепаратрисных поверхностях вблизи нулевой точки [Pontin et al., 2013]. Другой особенностью круговых вспышек является отклик в удаленных источниках на энерговыделение в ядре вспышки. Энергия для их активизации в КУФ- и радиоизлучениях

at 215 arc. sec., with the delay of its maximum from the peak in the flare core being ~ 5 s, and the electron propagation velocity along the large loops estimated at one-third of the velocity of light. A distinctive feature of the radiation of the remote source was high degree of its circular polarization. The meter flare emission indicates that tops of large loops are filled with non-thermal electrons with large pitch angles. The set of spatial, spectral, and polarization characteristics of microwave sources obtained for the first time is discussed in the context of the known results on the nature of circular ribbon flares.

Keywords: Sun, acceleration mechanisms, microwave bursts, meter bursts, circle ribbon flare.

переносится частицами и волнами. В случае выбросов плазмы особенности круговых вспышек связаны с их замкнутой купольной магнитной структурой. Выбросы плазмы должны сопровождаться существенным изменением топологии магнитного поля над доменом.

Одним из недостаточно изученных вопросов физики круговых вспышек является ускорение и перенос частиц в принципиально трехмерной топологии областей энерговыделения. Для исследования процессов ускорения электронов естественно привлечение радиоданных, которые позволяют регистрировать потоки нетепловых электронов в корональных магнитных структурах с плотностью плазмы, недостаточной для регистрации тормозного рентгеновского излучения нетепловых электронов. К настоящему времени публикаций о результатах радионаблюдений круговых вспышек относительно немного. В статье [Meshalkina et al., 2009] обсуждались конфигурация и сценарий двух таких вспышек, картографирование которых выполнялось Радиогелиографом Нобеяма (NoRH — Nobeyama Radio Heliograph [Torii et al., 1979]) на 17 и 34 ГГц. Драйверами исследованных вспышек было взаимодействие жгутов, расположенных внутри куполообразной сепаратрисной поверхности. Откликом на ускорение электронов во время вспышки был импульс жесткого рентгеновского излучения в канале 50–100 кэВ спутника RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) и микроволнового излучения на 17 ГГц длительностью ~ 1 мин. В микроволновом излучении в это время наблюдался также удаленный источник с высокой степенью круговой поляризации (до 50 %), расположенный в 120 угл. сек от ядра вспышки. Знак поляризации излучения удаленного источника соответствовал необыкновенной волне. Во вспышке, исследованной в [Altyntsev et al., 2022], наблюдалась колебания микроволнового излучения на ча-

стоте 5.7 ГГц с периодом ~ 8 с как в удаленном источнике, так и в ядре вспышки. Колебания излучения в ядре вспышки объяснялись модуляцией процесса ускорения при взаимодействии токовых жгутов внутри домена, а отклик в удаленном на 60 угл. сек источнике был вызван нетепловыми электронами, приходящими из ядра со скоростью $(1.5 \div 2) \cdot 10^{10}$ см/с.

Вспышка с другим драйвером — магнитным пересоединением в окрестности нулевой точки — обсуждалась в [Kumar et al., 2016]. Во время вспышки наблюдались квазипериодические пульсации жесткого рентгеновского и микроволновых излучений с периодом ~ 3 мин. Авторы полагают, что колебания были вызваны вариациями процесса ускорения электронов в окрестности нулевой точки. В этом событии удаленный источник не был обнаружен.

Более детально были исследованы микроволновые источники во вспышке с круговыми лентами SOL2014-12-17T04:51 рентгеновского класса M8.7 [Chen et al., 2019; Lee et al., 2020]. Помимо данных AIA/SDO, при изучении динамики структуры вспышки использовались последовательности радиокарт радиогелиографов MUSER (MingantU SpEctral Radio-heliograph) [Yan et al., 2009], доступные в диапазоне 1–2 ГГц, и NoRH [Nakajima et al., 1994]. Сравнение потоков на частотах 17 и 34 ГГц показало, что в начале вспышки рост радиоизлучения можно объяснить тепловым нагревом плазмы внутри магнитного домена благодаря пересоединению в магнитной нулевой точке. Признаки нетеплового энерговыделения проявляются во время ступенчатого роста микроволнового потока за несколько минут до импульсной фазы. Во время импульсной фазы длительностью ~ 10 мин доминирует излучение из жгута внутри купола, причем вблизи оснований жгута появляются микроволновые источники с противоположными знаками круговой поляризации. Удаленный источник наблюдался на картах на частоте 17 ГГц, однако в профиле интенсивности излучения удаленного источника импульсная фаза не проявляется. Поток излучения удаленного источника увеличивался постепенно в течение вспышки, подобно росту КУФ-излучения. Это позволило авторам предположить, что микроволновое излучение удаленного источника генерируется тормозным механизмом. Из карт MUSER следует, что источники, излучающие на 1.2–2.0 ГГц, находились над нулевой точкой магнитного домена.

В нашей работе обсуждаются сценарий и динамика процессов ускорения и переноса электронов во время круговой вспышки SOL2024-03-25T06:37 рентгеновского класса M4.4, отличающейся рекордно короткой длительностью жесткого излучения (~ 5 с на полувысоте в канале 100–300 кэВ).

ИНСТРУМЕНТЫ

Для анализа динамики пространственной структуры вспышки использовались УФ- и КУФ-изображения AIA/SDO, и магнитограммы HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) космической миссии SDO [Lemen et al., 2012]. Следует отметить, что периодичность наблюдений AIA/SDO ~ 12 с недостаточна для наблюдения динамики развития этой вспышки. Кроме того,

непосредственно во время импульса вспышечного энерговыделения практически все изображения на всех каналах AIA были пересвеченены.

Микроволновые источники наблюдались с помощью трех антенных решеток Сибирского радиогелиографа (СРГ) [Lesovoi et al., 2014; Лесовой, Кобец, 2017; Алтынцев и др., 2020]. Картографирование проводилось сканированием по частоте независимо в каждом диапазоне (3–6, 6–12, 12–24 ГГц) с периодичностью во времени 3.5 с. Пространственное разрешение картографирования зависит от частоты и локального времени наблюдений. В работе использовались частоты от 2.8 до 12.2 ГГц с размерами диаграмм направленности, меняющимися от 23×83 до 10×18 угл. сек. Для построения изображений использовался пакет программного обеспечения Анфиногентова [<https://radiomag.iszf.irk.ru/books/sibirskii-radiogeliograf/page/sintez-radioizobrazenii-s-pomoshchiu-paketa-srh-synth>]. Для анализа временных профилей радиоизлучения использовались измерения полного потока СРГ [<https://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php>].

Спектры интегрального радиоизлучения Солнца измерялись с временным разрешением 1 с с помощью NoRP (Nobeyama Radio Polarimeters) [Torii et al., 1979] на пяти частотах в диапазоне 1.0–17.0 ГГц, Бадарского широкополосного микроволнового спектрополяриметра (БШМС), [Zhdanov, Zandanov, 2011] на 26 частотах в диапазоне 4–8 ГГц.

В нашем исследовании мы использовали спектры от спектрополяриметра комплекса СРГ СОЛАРСПЕЛ 50–3000 МГц с временным разрешением 0.5 с и частотным 1 МГц.

Потоки на высоких частотах 35.25–39.75 ГГц были доступны во время импульсной стадии в наблюдениях CBS (Chashan Broadband Solar millimeter spectrometer) [Shang et al., 2022, 2023], записывающего динамический спектр в диапазоне 35–40 ГГц. Были использованы данные с частотным разрешением 0.5 ГГц и временным 0.537 с.

Интегральные спектры в диапазоне 1.6–2.0 ГГц были получены с помощью радиоинтерферометра MUSER-I (Китай). Диапазон частот MUSER-I охватывает 0.4–2.0 ГГц [Yan et al., 2016]. Событие 25.03.2024 наблюдалось в левой круговой поляризации со спектральным разрешением 16 МГц и временным 3.125 мс.

Мы использовали также данные радиотелескопа в Learmonth (Австралия), перекрывающиеся по времени с другими радиоданными. Телескоп входит в RSTN (United States Air Force Radio Solar Telescope Network) [Guidice et al., 1981], инструменты которой измеряют интенсивность на восьми частотах (245, 410, 610, 1415, 2695, 4995, 8800 и 15400 МГц) с разрешением 1 с.

Потоки жесткого рентгеновского излучения измерялись с помощью Fermi/GBM (Fermi Gamma-Ray Burst Monitor) [Meegan et al., 2009] с временным разрешением 1 с.

НАБЛЮДЕНИЯ

Магнитная структура с доменом, изолированной компактной областью положительного вертикального

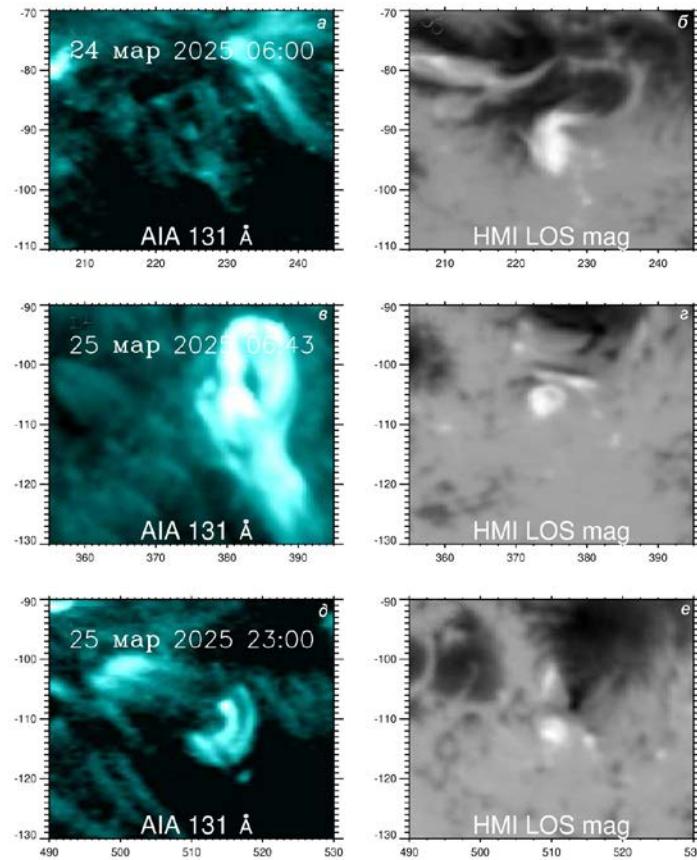


Рис. 1. показывает изображения AIA/SDO в канале 131 Å в разные моменты времени (слева); справа — магнитограммы SDO/HMI в моменты времени, ближайшие к указанным в левом столбце. По осям — угловые секунды относительно центра диска Солнца

поля, окруженней полями обратной полярности, сформировалась 24 марта в южной части активной области (АО) 13615. На изображениях в КУФ-линиях AIA/SDO с 10:00 UT 24 марта 2024 г. появилась кольцевая структура вокруг домена и временами видна струя (шип), уходящая от этой структуры в южном направлении. Эта конфигурация прослеживается непрерывно до 00:00 UT 26 марта, когда домен положительного поля значительно уменьшается в размерах, а кольцевая структура в КУФ-линиях исчезает. Значимых вспышек, кроме исследуемого события, в эти дни не наблюдалось.

На рис. 1 показаны три момента времени развития АО в окрестности магнитного домена. Время здесь и далее приведено в UT. Видно, что магнитная структура со временем развивается: 24 марта начинает выделяться фрагмент на севере домена, и в день вспышки он отделился. К 26 марта этот фрагмент удалился к северу, а на запад отделился еще один фрагмент.

Вспышка рентгеновского класса M4.4 произошла в этой структуре 25 марта 2024 г. Начало роста мягкого рентгеновского излучения отмечается в 06:37, а конец спада — в 06:48. Пик импульсной фазы, когда наблюдался короткий импульс жесткого рентгеновского излучения с энергией фотонов выше 100 кэВ, был зарегистрирован в 06:43:24. Во время вспышки

АО находилась в центральной части солнечного диска. Вспышка отличается высокой яркостью во всех УФ- и КУФ-диапазонах регистрации AIA/SDO.

Последовательности не засвеченных КУФ-изображений в линиях 304 и 131 Å показаны на рис. 2 во время импульсной фазы. В первые два момента времени вспышечные структуры имеют петлеобразную форму. Отметим, что узкая струя, распространяющаяся на юг в картинной плоскости, наблюдалась впервые в линии 171 Å на кадре 06:40:57. Яркость и длина струи, которую можно рассматривать как проявление внешнего шипа магнитной структуры, начинают расти после 06:42. Между 06:43:17 и 06:43:30 поперечный размер струи значительно увеличивается, что указывает на модификацию магнитной структуры вблизи нулевой точки и внешнего шипа. В дальнейшем яркая область выброса плазмы расширяется, и в ней выделяются фрагменты, вытянутые вдоль магнитного поля.

Плазма выброса заполняла крупномасштабные петли, которые становятся видны в КУФ-излучении через 4 мин после начала выброса (рис. 3). На панели *a* в основаниях больших петель контурами показаны микроволновые источники, излучающие в максимуме микроволнового потока (06:43:24) на частоте 8 ГГц. В ядре вспышки наблюдается структура, характерная для магнитного жгута: источник в интенсивности,

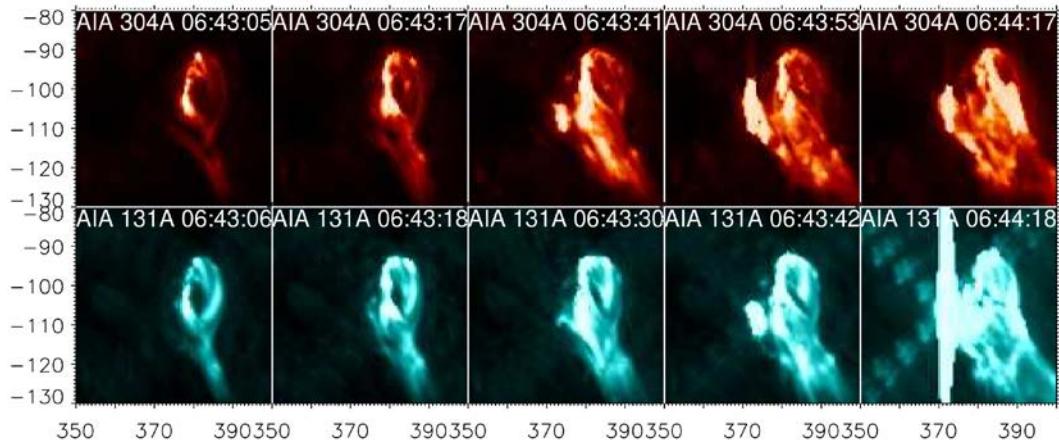


Рис. 2. Последовательности изображений ядра вспышки в линиях 304 Å и 131 Å. Время приведено в УТ. Размер кадра 50×50 угл. сек. Центры кадров 378/-104 угл. сек от центра солнечного диска

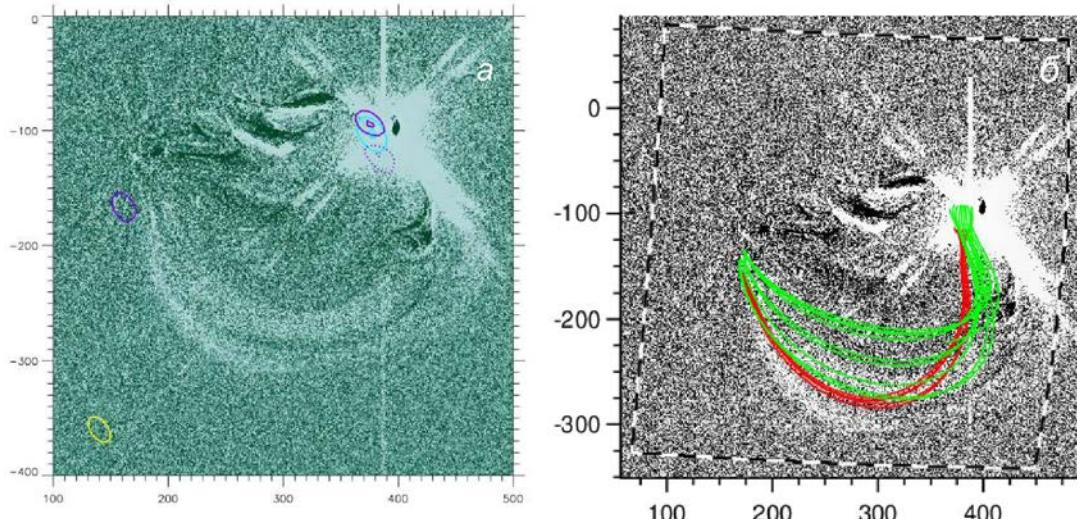


Рис. 3. Область вспышки с удаленным источником: *а* — разностное изображение в 06:46 в линии 94 Å. Вычтено изображение в 06:41. Контурами на уровнях (0,5, 0,95) от максимума/минимума показаны микроволновые источники. Голубые контуры — интенсивность на частоте 8 ГГц (СРГ); фиолетовые — круговая поляризация: сплошной — правая круговая поляризация Right Circular Polarization (RCP); пунктирный — левая круговая поляризация Left Circular Polarization (LCP). Желтый овал в левом нижнем углу — ширина диаграммы направленности на 8 ГГц, ее размер 15×25 угл. сек. *б* — зелеными и красными линиями показаны силовые линии магнитного поля, рассчитанного в потенциальном приближении. Чёрно-белый контур — граница расчётной области. Фоном представлено разностное изображение из рисунка слева.

по краям которого находятся источники с разной круговой поляризацией. Удаленные основания петель находились на расстоянии ~ 215 угл. сек к востоку от ядра вспышки в области с северным направлением магнитного поля. На панели *б* показаны силовые линии магнитного поля, рассчитанного в потенциальном приближении по методу функции Грина по векторной магнитограмме HMI/SDO на время 06:48 UT. Видно хорошее согласие между наблюдаемыми и рассчитанными структурами, что позволяет использовать результаты расчетов для оценки параметров плазмы и магнитного поля в больших петлях.

Рассмотрим подробнее структуру ядра вспышки. На рис. 4 показаны изображение в линии 131 Å в 06:43:18 за несколько секунд до пика жесткого рентгеновского излучения (*а*); магнитограмма продольного магнитного поля и изображение ядра вспышки в линии 1600 Å в 06:43:26 (*б*). Поле домена

было положительным, его величина достигала 800 Гс. Вспышка была инициирована, по-видимому, отделением небольшого фрагмента от северной части домена (см. рис. 1, *г*). В КУФ-излучении наблюдается кольцевая структура, депрессии яркости в которой соответствуют положение магнитного домена. Размеры и формы кольца близки в разных диапазонах КУФ-излучения. На юге к кольцу примыкает яркая область истечения плазмы вдоль силовых линий магнитного поля в окрестности внешнего шипа.

Контурами показаны микроволновые источники в интенсивности и поляризованном микроволновом излучении на частоте 12.2 ГГц. В левом нижнем углу желтым контуром показан овал, который соответствует полувысоте диаграммы направленности. Размеры диаграммы сравнимы с размерами источников. Результат деконволюции в предположении, что формы диаграммы и источника представляют собой

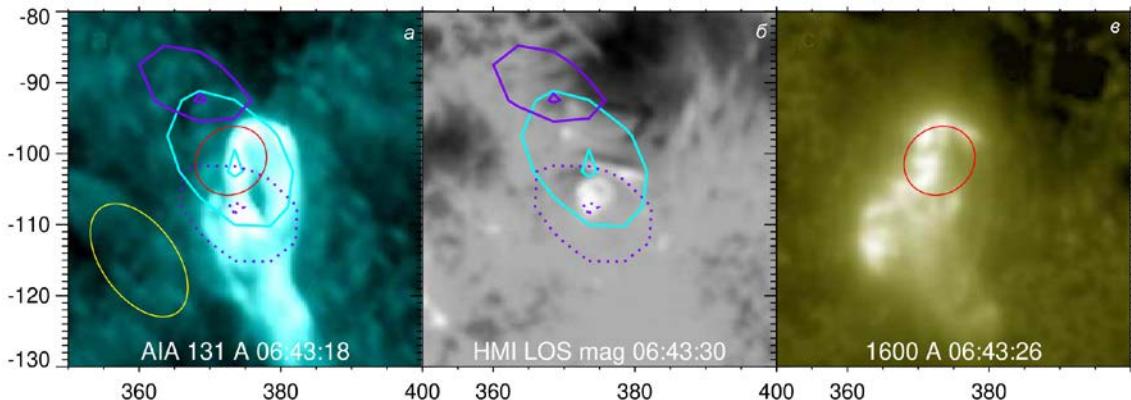


Рис. 4. Структура вспышечной области в линии 131 Å в 06:43:18 (а); магнитограмма продольного магнитного поля в 06:43:30 (б); изображение в линии 1600 Å (в). Красный овал на панелях а, в отмечает реальный источник с размерами 9.3×10.4 угл. сек после деконволюции с диаграммой на 12 ГГц. Желтый овал в левом нижнем углу показывает диаграмму направленности на 12 ГГц 10.5×18.3 угл. сек. Контурами на а, б показаны микроволновые источники в 06:43:24 на частоте 12 ГГц в интенсивности (R+L, голубой контур), и поляризации — фиолетовый контур (сплошной — RCP (0.5, 0.95 от максимума); пунктирный — LCP (0.5, 0.95 от минимума)).

двумерные гауссовые функции, показан красным овалом на панелях а, в. Следует отметить, что положение центра яркости микроволнового источника сохраняется во времени. По краям от центра яркости в интенсивности (голубой контур) находятся источники с противоположными направлениями круговой поляризации (фиолетовые контуры), т. е. структура микроволнового излучения указывает на существование петель или жгутов.

На панели в показано изображение в диапазоне AIA 1600 Å практически в максимуме жесткого рентгеновского излучения. Видно, что основной радиоисточник находится над частью длинного жгута, расположенного рядом с доменом магнитного поля, и вытянутого в северо-западном направлении. В УФ-излучении, как и в КУФ-излучении, видно течение плазмы в южном направлении, но поперечный размер течения стал гораздо шире.

Временные профили электромагнитного излучения нетепловых электронов, ускоренных во время вспышки, показаны на рис. 5. На высокие энергии ускоренных электронов указывает регистрация микроволнового излучения с помощью CBS на 35–40 ГГц, и в жестком рентгеновском излучении в канале 100–300 кэВ на спектрометре FERMI/GBM. Измерения интегрального потока Солнца антеннами СРГ с разрешением 3.5 с приведены на частотах 2.8, 8 и 23.4 ГГц. Треугольниками показаны моменты регистрации на этих частотах. С разрешением 1 с измерялись потоки на 17 (NoRP), 8.1 ГГц (БШМС) и интенсивность жесткого рентгеновского излучения (FERMI/GBM). Наилучшее разрешение 0.5 с было у китайского спектрометра CBS.

Заметный рост вспышечного излучения начинается около 06:42:48 (штрих-пунктирная линия) на частотах ниже 8 ГГц при энергиях фотонов ниже 20 ГГц. Через 16 с при энергиях фотонов до 50 кэВ начинает расти излучение в диапазоне 8–17 ГГц, интенсивность которого достигает локального максимума через 9 с

в 06:43:13. В каналах, регистрирующих более жесткие излучения, сигнал начинает расти через несколько секунд в 06:43:19 (штрих-пунктирная линия) и достигает максимума через 5.5 с. В каналах 35 ГГц и >50 кэВ сигнал падает наиболее быстро, за 2–3 с, а затем скорость спада уменьшается. В то же время на верхних панелях рис. 5, на которых показано излучение электронов более низких энергий, сигналы после импульса жесткого излучения не падают, а растут. Отметим, что импульсы микроволнового и жесткого рентгеновского излучений наблюдаются на фронте роста мягкого рентгеновского излучения, максимум которого отмечался в 06:44:35, т. е. более чем через 1 мин. Подобная зависимость характерна для эффекта Ньюпорта, когда мягкое рентгеновское излучение генерируется плазмой, нагретой потоками ускоренных электронов.

Как было показано выше (см. рис. 4, в), микроволновый источник проецируется на длинный жгут, наблюдаемый в диапазоне 1600 Å. Динамику формирования жгута можно проследить на изображениях рис. 6. Видно (верхний ряд), что перед импульсной фазой имеются два жгута, вытянутых друг за другом в северо-западном направлении. В области сближения их оснований наблюдается яркая область, которая в импульсной фазе немного поднимается вверх. В этой фазе (средний ряд) яркость распределяется вдоль появляющегося общего жгута и уширяется область истечения плазмы. После импульсной фазы (нижний ряд) область течения плазмы расширяется до длины жгута. Скорость переднего фронта течения можно оценить по изображениям нижнего ряда как 330 км/с в картинной плоскости.

Наблюдения СРГ позволили выделить микроволновые потоки ядра вспышки и удаленного источника. При расстоянии между источниками 215 угл. сек задержка между максимумами временных профилей этих источников составляет ~5 с. Спектры источников в максимуме импульсной фазы показаны на рис. 7, а.

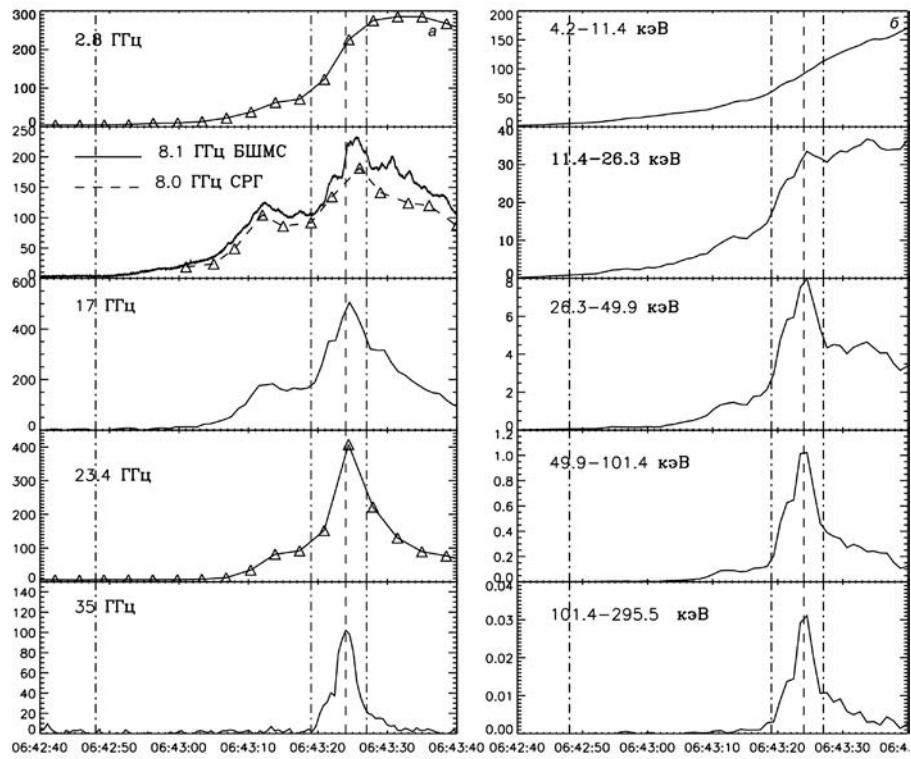


Рис. 5. Временные профили микроволнового (а) и жесткого рентгеновского (б) излучений. Показаны частоты приема и границы каналов в энергиях. Используемые инструменты и временное разрешение измерений описаны в тексте. На кривых 2.8, 8 и 23.4 ГГц треугольниками отмечены моменты времени измерений на этих частотах. Показаны моменты времени, отмеченные вертикальными штрих-пунктирными линиями 06:42:48, 06:43:19, 06:43:28. Штриховая линия — пик жесткого рентгеновского излучения в 06:43:24

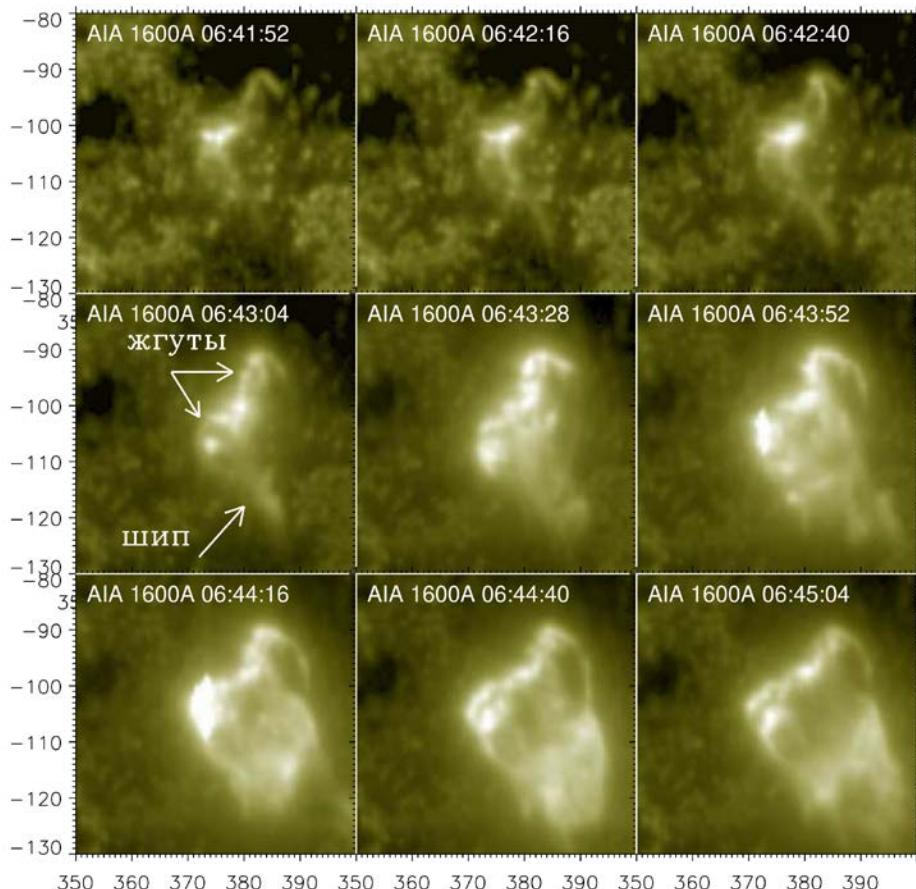


Рис. 6. Развитие жгута в области вспышки, изображения в канале 1600 Å AIA/SDO в разные моменты времени

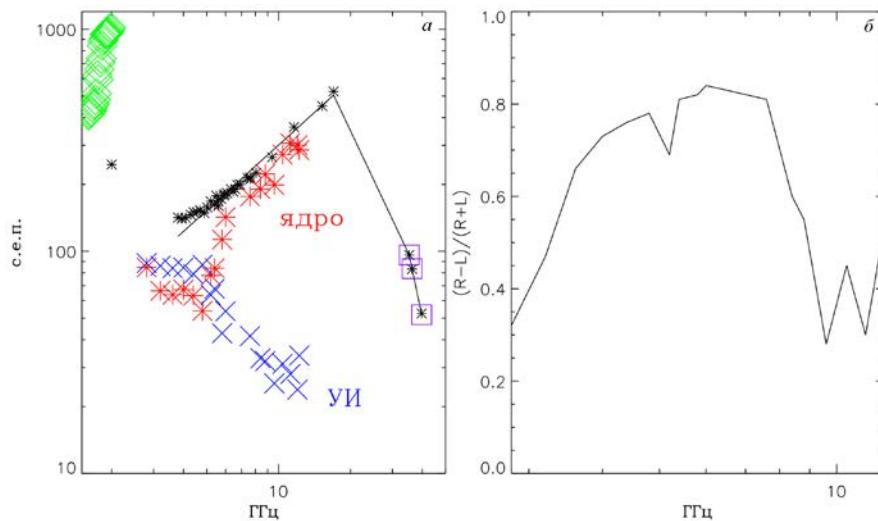


Рис. 7. Композитный спектр в пике вспышки 06:43:25 (а). Красные звездочки — данные СРГ, потоки собраны по изображениям в ядре вспышки; синие кресты — в удаленном источнике; черные звездочки — интегральный спектр из данных СРГ, БШМС, NoRP; черные звездочки в фиолетовых квадратах — данные CBS; зеленые ромбы — данные MUSER-I. Спектр степени поляризации для удаленного источника (б)

Черные звездочки — спектр интегрального потока по данным БШМС (диапазон 4–8 ГГц), СРГ (11.6 и 15.24 ГГц), NoRP (9.4 и 17 ГГц) и CBS (35.25, 36.25, 39.75 ГГц) для момента максимума всплеска в 06:43:24. Поскольку длительность рассматриваемого пика меньше, чем временное разрешение кривых интегрального потока СРГ (3.5 с), не все частоты СРГ можно было использовать для анализа. При построении спектра по данным СРГ мы выбирали только те частоты наблюдения, которые по времени находились внутри 0.5-секундного интервала относительно выбранного момента времени, что соответствовало временному разрешению данных CBS.

Форма спектра на частотах выше 2 ГГц типична для гироинхротронного спектра. Излучение ядра становится доминирующим в интегральном спектре на частотах выше 6 ГГц, а индекс роста спектра составляет $f^{1.4}$. Степенной индекс спада можно описать как $f^{-2.5}$. Напротив, в спектре удаленного источника диапазон частот СРГ захватывает спадающую часть спектра. После плоской части спектра, на которой поток удаленного источника сравним с потоком из ядра вспышки, спад начинается после 4 ГГц с индексом $f^{-1.1}$. Следующей особенностью удаленного источника является высокая степень правой круговой поляризации. В диапазоне частот от 4.5 до 7.5 ГГц она достигает 80 % (см. рис. 7, б).

Измерения динамического спектра на более низких частотах получены с помощью спектрополяриметра СОЛАРСПЕЛ с диапазоном принимаемых частот 50–3000 МГц (рис. 8, а). В его динамическом спектре (а) наблюдался отклик на вспышку в диапазоне частот 80–350 МГц. Излучение начинается в узкой полосе ~350 МГц в 06:43:00 и продолжалось в этой полосе около 40 с. В широкой полосе излучение начинается в 06:43:10 с максимальной интенсивностью во время пика жесткого излучения. Излучение постепенно затухает, вначале на более высоких частотах.

На рис. 8, б показан динамический спектр MUSER-I. Данные и рисунок получены с использованием разработанных китайскими коллегами программ, включая калибровку и улучшение качества изображения [Wang et al., 2013; Tan et al., 2015]. Данные MUSER-I 1600–2000 МГц показывают отклик на вспышку в излучении от 1750–2000 МГц. Отметим, что на динамическом спектре (а) это излучение не наблюдалось из-за более низкой чувствительности антенны СОЛАРСПЕЛ 50–3000 МГц в верхней части рабочего диапазона (выше 1000 МГц). Амплитуда сигналов MUSER-I резко возрастала в момент пика. Поток интегрального спектра быстро спадает с уменьшением частоты и прекращается на частотах ниже 1850 МГц (см. рис. 8, б). Наблюдается небольшой дрейф к низким частотам. К сожалению, для данного события есть запись только в левой поляризации спектрометра, поэтому для представления на спектре и сопоставления с микроволновыми данными калиброванные данные LCP умножались на два (см. рис. 7, а, зеленые ромбы).

ОБСУЖДЕНИЕ

Совокупность данных о динамике и пространственной структуре вспышки позволяет определить исследуемое событие как круговую ленточную вспышку с компактным доменом положительного поля в ядре и удаленным источником на расстоянии 215 угл. сек. Магнитная структура была образована за день до вспышки, о чем свидетельствует появление квазистационарной круговой структуры в КУФ-излучении вокруг магнитного домена [Masson et al., 2009]. Инициация импульсной фазы вспышки видна на изображениях ядра вспышки в каналах 1600 Å: вначале появляется компактный яркий источник, находящийся севернее домена положительного поля (см. рис. 6). Он находится в месте сближения оснований двух жгутов, вытянутых последовательно в северо-западном направлении.

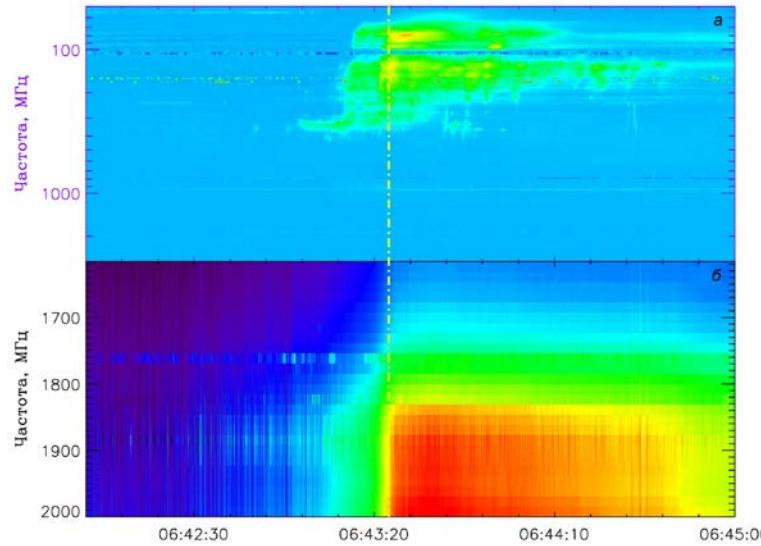


Рис. 8. Динамический спектр: *а* — данные спектрополяриметра СОЛАРСПЕЛ 50-3000 МГц; *б* — данные MUSER-I. Вертикальная линия — момент пика жесткого рентгеновского излучения в 06:43:24

лении. С развитием вспышки жгуты уярчаются, а после импульсной фазы появляется длинный охватывающий жгут, поднимающийся со временем вверх. Одновременно с подъемом этого жгута видно течение плазмы вдоль внешнего шипа. Подобная схема инициации коронального выброса массы была предложена в статье [Uralov et al., 2002]. Для объяснения инициации вспышек с круговыми лентами она использовалась в [Meshalkina et al., 2009].

В нашем событии размеры диаграммы направленности СРГ были сравнимы с размерами ядра вспышки, что не позволяет исследовать процесс взаимодействия жгутов в микроволновом излучении подробнее. Регистрация источников поляризованного излучения разных знаков в импульсной фазе согласуется с предположением о формировании общего жгута (см. рис. 4). Положение и яркость наблюдаемых источников поляризованного излучения являются результатом свертки реальных источников с диаграммой СРГ. Как следствие, на радиокартах расстояние между видимыми центрами яркости поляризованных источников уменьшается с ростом частоты приема, т. е. зависит от размеров диаграммы направленности. На наибольшей частоте картографирования данной работы 12.2 ГГц пространственное разрешение СРГ (10.4×18.2 угл. сек) было недостаточно для определения реального положения поляризованных источников.

После импульсной фазы наблюдалось течение плазмы по большим петлям, ориентированным вдоль внешнего шипа. Петли можно было наблюдать на разностных изображениях КУФ-излучения через несколько минут после импульсной фазы. На рис. 3 видно, что их наблюдаемая форма и положение удаленного основания близки к силовым линиям поля, рассчитанного в потенциальном приближении. Из расчетов следует, что высота петель находится в пределах 50–130 Мм при длине 300–400 Мм. Для заполнения петель плазмой за 4 мин скорость ее течения должна быть в несколько раз выше скорости в кар-

тинной плоскости 330 км/с. Оценки показывают, что необходимая величина скорости течения может достигаться, если она составляет порядка скорости ионного звука при температуре плазмы в ядре вспышки 20–30 МК. Подобный механизм распространения с формированием тепловой волны замещения обсуждался в работах [Brown et al., 1979; Vlahos, Papadopoulos, 1979; Levin, Melnikov, 1993; Мешалкина, Алтынцев, 2024].

Пик излучения удаленного источника в микроволнах отстает от пика в ядре вспышки на ~ 5 с. Спектр излучения удаленного источника является широкополосным с максимумом спектра на частоте ниже 4 ГГц. Точность определения задержки по данным СРГ ~ 1 с, поскольку измерения СРГ в удаленном источнике проводились с периодичностью 3.5 с. В ядре вспышки точность определения пика по профилю 35 ГГц составляла доли секунды. При средней длине петли 350 Мм получаем скорость пролета излучающих электронов $\sim 7 \cdot 10^9$ см/с. Кинетическая энергия электронов с такой скоростью ~ 17 кэВ недостаточна для генерации микроволнового спектра удаленного источника. Если учесть (как часто делают [Aschwanden, 2004]), спиральность магнитных силовых линий и питч-угол распространяющихся электронов, оценку скорости можно умножить на 2, тогда энергия электронов становится более разумной — ~ 70 кэВ. Отметим, что единственный раз подобная оценка была получена для удаленного источника круговой вспышки во время наблюдений квазипериодических колебаний, наблюдавшихся на ССРТ с высоким временным разрешением [Altyntsev et al., 2022]. В этой работе была получена оценка энергии излучающих электронов выше 100 кэВ.

При достаточно больших питч-углах электронов, распространяющихся вдоль больших петель естественно ожидать их захват в вершинах петель. Их излучением можно объяснить отклик на вспышку на динамических спектрах в диапазоне 80–350 МГц. Если принять, что излучение является плазменным,

плотность плазмы в вершинах петель изменяется в широком диапазоне от $8 \cdot 10^7$ до $1.5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Расчеты дают магнитные поля 10–20 Гс, т. е. наблюдаемые частоты находятся в пределах 3–6 гармоник циклотронной частоты электронов. В этом случае естественно ожидать генерацию излучения на двойном плазменном резонансе [Ledenev, 1998; Zheleznyakov et al., 2016].

В ядре вспышки и удаленном источнике спектры имеют форму гироинхротронного с разными индексами степенного спада f^β . Более жесткий спектр с показателем $\beta = -1.1$ наблюдался в удаленном источнике. Оценка степенного показателя распределения электронов по энергиям δ по формуле $\beta = 1.22 - 0.9\delta$ [Dulk, Marsh, 1982] дает $\delta \approx 2.5$. Особенностью микроволнового излучения удаленного источника является высокая степень круговой поляризации до 80 %. Согласно расчетам гироинхротронного спектра в работе [Fleishman, Melnikov, 2003], такая высокая степень поляризации указывает на большие питч-углы излучающих электронов. С другой стороны, при больших питч-углах полученная выше оценка для изотропного распределения электронов $\delta \approx 2.5$ может рассматриваться только в качестве первого приближения и требует уточнения.

Для ядра вспышки наблюдения спектрополяриметрами дали оценку показателя наклона спектра $\beta \approx -2.5$, откуда получаем $\delta \approx 4.1$. К сожалению, наблюдения СРГ были доступны до частоты 12.2 ГГц, т. е. только на восходящей части спектра. Индекс степенного роста $\beta \approx 1.4$ в два раза меньше расчетного значения гироинхротронного спектра, излучаемого однородным источником.

Короткие фронты роста и спада жесткого пика микроволнового и жесткого рентгеновского излучения показывают, что ускорение до энергий выше 100 кэВ происходило в открытой конфигурации магнитного поля. Потоки излучения электронов меньших энергий растут после пика, что указывает на удержание и накопление в жгутах магнитного поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения в микроволновом излучении дали важные знания о морфологических свойствах круговой вспышки 25 марта 2024 г. Показано, что жесткое излучение вспышки связано с процессом взаимодействия магнитных жгутов. Впервые получен микроволновый спектр излучения электронов в удаленном источнике и установлена связь метрового излучения с ускорением электронов в ядре вспышки. Таким образом, продемонстрирован высокий диагностический потенциал многоволновых наблюдений СРГ для исследования событий с относительно малыми временными и пространственными масштабами. Подробное исследование динамики микроволновых источников и их поляризационных и спектральных свойств в данной вспышке будет являться предметом нашей будущей работы.

Авторы благодарны А.А. Кузнецовой за полезные обсуждения. Мешалкина Н.С., Чэнмин Тань благодарят PIFI Group grant (2025PG0008). Благодарим

также команды SDO, GOES, обсерватории Нобеяма, RHESSI, Fermi, RSTN, CBS, MUSER, Радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН за предоставленные данные. Результаты получены с использованием Уникальной научной установки «Радиогелиограф» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190>] и оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В. и др. Многоволновый Сибирский радиогелиограф. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 2, с. 37–50. DOI: [10.12737/szf-62202003](https://doi.org/10.12737/szf-62202003) / Altyntsev A., Lesovoi S., Globa M., Gubin A., Kochanov A., Grechnev V., Ivanov E., Kobets V., Meshalkina N., et al. Multiwave Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, p. 30. DOI: [10.12737/stp-62202003](https://doi.org/10.12737/stp-62202003).
- Лесовой С.В., Кобец В.С. Корреляционные кривые Сибирского радиогелиографа. *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 1, с. 17–21. DOI: [10.12737/23588](https://doi.org/10.12737/23588) / Lesovoi S.V., Kobets V. Correlation plots of the Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 1, pp. 19–25. DOI: [10.12737/article_58f96eeb8fa318.06122835](https://doi.org/10.12737/article_58f96eeb8fa318.06122835).
- Мешалкина Н.С., Алтынцев А.Т. Проявления нагрева в начале вспышки 29 июня 2012 г. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 13–20. DOI: [10.12737/szf-103202402](https://doi.org/10.12737/szf-103202402) / Meshalkina N.S., Altyntsev A.T. Heating manifestations at the onset of the 29 June 2012 flare. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 11–17. DOI: [10.12737/stp-103202402](https://doi.org/10.12737/stp-103202402).
- Altyntsev A.T., Meshalkina N.S., Sych R.A., Kolotkov D.Y. Double peak quasi-periodic pulsations in a circular-ribbon flare. *Astron. Astrophys.* 2022, vol. 663, id. A149, 8 p. DOI: [10.1051/0004-6361/202243144](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243144).
- Aschwanden M.J. *Physics of the Solar Corona: An Introduction*. Springer-Verlag: Praxis, 2004, 842 p.
- Brown J.C., Melrose D.B., Spicer, D.S. Production of a collisionless conduction front by rapid coronal heating and its role in solar hard X-ray bursts. *Astrophys. J.* 1979, part 1, vol. 228, pp. 592–597. DOI: [10.1086/156883](https://doi.org/10.1086/156883).
- Chen X., Yan Y., Tan B., et al. Quasi-periodic pulsations before and during a solar flare in AR 12242. *Astrophys. J.* 2019, vol. 878, no. 2, p. 78. DOI: [10.3847/1538-4357/ab1d64](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1d64).
- Dulk G.A., Marsh K.A. Simplified expressions for the gyro-synchrotron radiation from mildly relativistic, nonthermal and thermal electrons. *Astrophys. J.* 1982, vol. 259, p. 350. DOI: [10.1086/160171](https://doi.org/10.1086/160171).
- Fleishman G.D., Melnikov V.F. Gyrosynchrotron emission from anisotropic electron distributions. *Astrophys. J.* 2003, vol. 587, iss. 2, pp. 823–835. DOI: [10.1086/368252](https://doi.org/10.1086/368252).
- Guidice D.A., Cliver E.W., Barron W.R., Kahler S. The Air Force RSTN System. *Bull. of the American Astronomical Society*. 1981, vol. 13, p. 553.
- Kumar P., Nakariakov V.M., Cho K.S. Observation of a quasi-periodic pulsation in hard X-ray, radio, and extreme-ultraviolet wavelengths. *Astrophys. J.* 2016, vol. 822, no. 1, p. 7. DOI: [10.3847/0004-637X/822/1/7](https://doi.org/10.3847/0004-637X/822/1/7).
- Ledenev V.G. Generation of electromagnetic radiation by an electron beam with a bump on the tail distribution function. *Solar Phys.* 1998, vol. 179, iss. 2, pp. 405–420. DOI: [10.1023/A:1005007026541](https://doi.org/10.1023/A:1005007026541).
- Lee J., White S.M., Chen X., et al. Microwave study of a solar circular ribbon flare. *Astrophys. J. Lett.* 2020, vol. 901, p. L10. DOI: [10.3847/2041-8213/abb4dd](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abb4dd).

- Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.* 2012, vol. 275, no. 1-2, pp. 17–40. DOI: [10.1007/s11207-011-9776-8](https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8).
- Lesovoi S.V., Altynsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. A 96-antenna radioheliograph. *Res. Astron. Astrophys.* 2014, vol. 14, iss. 7, article id. 864–868. DOI: [10.48550/arXiv.1403.4748](https://doi.org/10.48550/arXiv.1403.4748).
- Levin B.N., Melnikov V.F. Quasi-linear model for the plasma mechanism of narrow-band microwave burst generation. *Solar Phys.* 1993, vol. 148, iss. 2, pp. 325–340. DOI: [10.1007/BF00645093](https://doi.org/10.1007/BF00645093).
- Masson S., Pariat E., Aulanier G., Schrijver C.J. The nature of flare ribbons in coronal null-point topology. *Astrophys. J.* 2009, vol. 700, iss. 1, pp. 559–578. DOI: [10.1088/0004-637X/700/1/559](https://doi.org/10.1088/0004-637X/700/1/559).
- Meegan C., Lichti G., Bhat P.N., et al. The Fermi gamma-ray burst monitor. *Astrophys. J.* 2009, vol. 702, p. 791. DOI: [10.1088/0004-637X/702/1/791](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/791).
- Meshalkina N.S., Uralov A.M., Grechnev V.V., et al. Eruptions of magnetic ropes in two homologous solar events of 2002 June 1 and 2: a key to understanding an enigmatic flare. *PASJ*. 2009, vol. 61, p. 791. DOI: [10.1093/pasj/61.4.791](https://doi.org/10.1093/pasj/61.4.791).
- Nakajima H., Nishio M., Enome S., et al. The Nobeyama Radioheliograph. *Proc. IEEE.* 1994, vol. 82, p. 705.
- Pontin D.I., Priest E.R., Galsgaard K. On the nature of reconnection at a solar coronal null point above a separatrix dome. *Astrophys. J.* 2013, vol. 774, iss. 2, article id. 154, 10 p. DOI: [10.1088/0004-637X/774/2/154](https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/2/154).
- Priest E.R., Titov V.S. Magnetic reconnection at three-dimensional null points. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series.* 1996, vol. A354(1721), pp. 2951–2992. DOI: [10.1098/rsta.1996.0136](https://doi.org/10.1098/rsta.1996.0136).
- Shang Z., Xu K., Liu Y., et al. A broadband solar radio dynamic spectrometer working in the millimeter-wave band. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2022, vol. 258, p. 25. DOI: [10.3847/1538-4365/ac4257](https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac4257).
- Shang Z., Wu Z., Liu Y., et al. The calibration of the 35–40 GHz solar radio spectrometer with the new moon and a noise source. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2023, vol. 268, p. 45. DOI: [10.3847/1538-4365/acee00](https://doi.org/10.3847/1538-4365/acee00).
- Sun X., Hoeksema JT., Liu Y., et al. Hot Spine Loops and the Nature of a Late-phase Solar Flare. *Astrophys. J.* 2013, vol. 778, iss. 2, p. 139. DOI: [10.1088/0004-637X/778/2/139](https://doi.org/10.1088/0004-637X/778/2/139).
- Tan C.M., Yan Y.H., Tan B.L., et al. Study of calibration of solar radio spectrometers and the quiet-Sun radio emission. *Astrophys. J.* 2015, vol. 808, p. 61. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/61](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/61).
- Torii C., Tsukiji Y., Kobayashi S., et al. Full-automatic radio-polarimeters for solar patrol at microwave frequencies. *Proc. of the Research Institute of Atmospheric Sciences.* Nagoya University, 1979, vol. 26, pp. 129–132.
- Uralov A.M., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Grechnev V.V. Dual-filament initiation of a coronal mass ejection: observations and model. *Solar Phys.* 2002, vol. 208, iss. 1, pp. 69–90. DOI: [10.1023/A:1019610614255](https://doi.org/10.1023/A:1019610614255).
- Vlahos L., Papadopoulos K. On the upconversion of ion-sound to Langmuir turbulence. *Astrophys. J.* 1979, Part 2. Letters to the Editor, vol. 234, Dec. 15, 1979, pp. L217, L218. Navy-supported research. DOI: [10.1086/183143](https://doi.org/10.1086/183143).
- Yan Y., Zhang J., Wang W., et al. The Chinese Spectral Radioheliograph — CSRH. *Earth, Moon, and Planets.* 2009, vol. 104, iss. 1–4, pp. 97–100. DOI: [10.1007/s11038-008-9254-y](https://doi.org/10.1007/s11038-008-9254-y).
- Yan Yihua, Chen Linjie, Yu Sijie. First radio burst imaging observation from Mingantu Ultrawide Spectral Radioheliograph. *IAUS.* 2016, vol. 320, pp. 427–435. DOI: [10.1017/S174392131600051X](https://doi.org/10.1017/S174392131600051X).
- Wang Wei, Yan Yihua, Liu D., et al. Calibration and data processing for a Chinese Spectral Radioheliograph in the decimeter wave range. *Publications Astronomical Society Japan.* 2013, vol. 65, iss. SP1, id. S18. DOI: [10.1093/pasj/65.sp1.S18](https://doi.org/10.1093/pasj/65.sp1.S18).
- Zhang Q. Circular-ribbon flares and the related activities. *Rev. Modern Plasma Physics.* 2024, vol. 8, iss. 1, article id. 7. DOI: [10.1007/s41614-024-00144-9](https://doi.org/10.1007/s41614-024-00144-9).
- Zhdanov D.A., Zandanov V.G. Broadband microwave spectropolarimeter. *Central European Astrophysical Bull.* 2011, vol. 35, p. 223.
- Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E. Double plasma resonance and its manifestations in radio astronomy. *Physics-Uspekhi.* 2016, vol. 59, no. 10. DOI: [10.3367/UFNe.2016.05.037813](https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.05.037813).
- URL: <https://radiomag.iszf.irk.ru/books/sibirskii-radiogeliograf/page/sintez-radioizobrazenii-s-pomoshchiu-paketa-srh-synth> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- URL: <https://badary.iszf.irk.ru/srhCorrPlot.php> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/4138190/> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- URL: <http://ckp-angara.iszf.irk.ru/> (дата обращения 25 июня 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.*
- Как цитировать эту статью:*
- Алтынцев А.Т., Мешалкина Н.С., Анфиногентов С.А., Жданов Д.А., Мышляков И.И., Иванов Е.Ф., Чэнмин Тань, Чжао У. Процессы ускорения и переноса электронов в импульсной круговой ленточной вспышке. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 3, с. 5–15. DOI: [10.12737/szf-113202501](https://doi.org/10.12737/szf-113202501).

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА В МАГНИТОСЛОЕ В ПЕРИОДЫ ICME

FEATURES OF TURBULENT CASCADE DEVELOPMENT IN THE MAGNETOSHEATH DURING ICME

Л.С. Рахманова

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, rakhlad@gmail.com

М.О. Рязанцева

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, orearm@gmail.com

А.А. Хохлачев

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, aleks.xaa@yandex.ru

Ю.И. Ермолаев

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, yermol@cosmos.ru

Г.Н. Застенкер

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, gzastenk@iki.rssi.ru

L.S. Rakhmanova

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, rakhlad@gmail.com

M.O. Riazantseva

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, orearm@gmail.com

A.A. Khokhlachev

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, aleks.xaa@yandex.ru

Yu.I. Yermolaev

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, yermol@cosmos.ru

G.N. Zastenker

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, gzastenk@iki.rssi.ru

Аннотация. Крупномасштабные возмущения в межпланетном пространстве являются главной причиной глобальных возмущений внутри магнитосферы Земли. Как известно, перед магнитосферой располагается магнитослой — переходная область, в которой характеристики плазмы и магнитного поля, а также их вариации существенно отличаются от таких в солнечном ветре. В частности, ранее было показано, что прохождение плазмы через магнитослой может существенно изменять характеристики каскада турбулентных флюктуаций солнечного ветра, причем характер изменений отличается для спокойных и возмущенных условий в межпланетной среде. В настоящей работе на основе анализа нескольких случаев взаимодействия межпланетных корональных выбросов массы (ICME) с магнитосферой проанализированы особенности формирования турбулентного каскада в магнитослое в эти периоды. Анализ проводился на основе сопоставления одновременных измерений вариаций магнитного поля в солнечном ветре и в дневном магнитослое спутниками Wind, Cluster, THEMIS и MMS в 2016–2017 гг. Показано, что взаимодействие ICME с магнитосферой сопровождается наименьшим изменением мощности флюктуаций в случае наличия области сжатия перед ним и, напротив, при отсутствии области сжатия мощность флюктуаций значительно возрастает. Определено, что ICME, вызывающие значительные изменения индекса Dst , сопровождаются слабой модификацией турбулентного каскада в магнитослое, тогда как наиболее значимые изменения свойств турбулентности наблюдаются для ICME, которые не приводят к сильным геомагнитным возмущениям.

Ключевые слова: солнечный ветер, магнитослой, турбулентность, космическая плазма.

Abstract. Large-scale disturbances in the interplanetary medium are the main cause of the global perturbations inside Earth's magnetosphere. Transition region called magnetosheath is known to be located in front of the magnetosphere in which plasma and magnetic field properties, as well as their variations differ significantly from those in the solar wind. Particularly, plasma passage through the magnetosheath has been demonstrated to modify substantially features of the cascade of turbulent fluctuations of the solar wind, with the pattern of the modification being different for quiet and disturbed conditions in the interplanetary medium. In this study, we examine features of turbulent cascade formation in the magnetosheath during interplanetary manifestation of coronal mass ejection (ICME), by analyzing several cases of ICME interactions with the magnetosphere. The analysis is conducted by comparing magnetic field variations measured simultaneously in the solar wind and in the dayside magnetosheath by Wind, Cluster, THEMIS, and MMS spacecraft in 2016–2017. Interaction of ICME with the magnetosphere is shown to cause the least change in the fluctuation power if there is a compression region in front of it; on the opposite, when there is no compression region, the fluctuation power increases considerably. ICMEs that caused significant changes in the Dst index were determined to be accompanied by the least changes in the turbulent cascade in the magnetosheath, whereas the most significant modification of the turbulence features were observed during ICMEs which did not trigger substantial geomagnetic disturbances.

Keywords: solar wind, magnetosheath, turbulence, space plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основными источниками глобальных магнитосферных возмущений являются крупномасштабные межпланетные возмущения [Yermolaev et al., 2015; Borovsky, Denton, 2006]. При этом исследования геоэффективности солнечного ветра (СВ) и связи геомагнитных возмущений с параметрами межпланетной среды, как правило, проводятся на основе измерений в окрестности точки L1, находящейся в 1.5 млн км от орбиты Земли [Pallocchia et al., 2006; Boynton et al., 2012; Podladchikova, Petrukovich, 2012], и не учитывают процессы в пограничных слоях магнитосферы. Перед внешней границей магнитосферы — магнитопаузой — постоянно существуют отошедшая ударная волна (околоземная ударная волна, ОЗУВ) и переходная область, формирующаяся из-за обтекания магнитосферы сверхзвуковым и сверхальфвеновским потоком СВ. В переходной области, или магнитослое (МСЛ), характеристики плазмы и магнитного поля существенно изменяются — происходит поджатие магнитных силовых линий, изменение направления магнитного поля, сжатие, замедление и нагрев плазмы, а также существенное увеличение мощности флюктуаций всех параметров. Процессы в МСЛ зависят от взаимного расположения ОЗУВ и межпланетного магнитного поля: из-за присутствия за квазипараллельной ОЗУВ ионов, отраженных от ОЗУВ и затем сносимых плазмой СВ в МСЛ, амплитуда вариаций параметров плазмы и магнитного поля за квазипараллельной ОЗУВ на порядок выше, чем за квазиперпендикулярной, и может достигать порядка величины самого параметра [Greenstadt, 1972; Shevlyev, Zastenker, 2005]. Кроме того, анизотропия температуры, возникающая на квазиперпендикулярной ОЗУВ, приводит к развитию большого числа неустойчивостей и волновых процессов за ней [Schwartz et al., 1996; Lacombe, Belmont, 1995].

Несмотря на то, что существуют общие представления о глобальном изменении характеристик плазмы и поля за ОЗУВ и оно может быть в среднем описано в рамках газодинамических и магнитогидродинамических (МГД) моделей [Spreiter et al., 1966; Tóth et al., 2005] на масштабах, сопоставимых с размерами магнитосферы ($\sim 10^5$ км), процессы на меньших масштабах ($\sim 10^2$ – 10^3 км) могут быть воспроизведены только трудоемкими в реализации гибридными и кинетическими моделями (например, [Karimabadi et al., 2014; Palmroth et al., 2018]), которые невозможно использовать в рамках прогноза космической погоды. Как показывают исследования, проведенные на основе одновременных измерений перед и за ОЗУВ, направление магнитного поля непосредственно перед магнитопаузой может не соответствовать зарегистрированному в СВ [Šafránková et al., 2009; Pulinets et al., 2014]. Кроме того, последние исследования показывают, что в периоды таких геоэффективных крупномасштабных явлений, как межпланетные корональные выбросы массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME), также могут

наблюдаться несоответствия направления поля в МСЛ и СВ [Turc et al., 2017] на временных масштабах порядка часа. Поскольку B_z -компоненты межпланетного магнитного поля рассматривается как наиболее важный параметр межпланетной среды, определяющий динамику магнитосферы, процессы в МСЛ важно учитывать для более корректных представлений о солнечно-земных связях.

На масштабах, сопоставимых с гирорадиусом протона, важную роль в космической плазме приобретают кинетические эффекты, начинается диссипация энергии, и МГД-описание становится неприменимым. Совокупность процессов, происходящих на масштабах менее 10^3 км, можно анализировать на основе характеристик турбулентного каскада. В последние годы большой объем экспериментальных данных с высоким времененным разрешением позволил существенно расширить представление о свойствах турбулентности в МСЛ (например, [Zimbardo et al., 2010; Sahraoui et al., 2020; Rakhamanova et al., 2021]). Для невозмущенной плазмы СВ спектр турбулентных флюктуаций магнитного поля имеет универсальный вид, описываемый степенной функцией с показателем $-5/3$ (колмогоровский скейлинг) на масштабах более ионного гирорадиуса (МГД-масштабы). На масштабах порядка инерционной длины протона происходит излом спектра и переход к кинетическим масштабам, на которых спектр также описывается степенной функцией с показателем α . Согласно статистическим данным, в среднем $\alpha = -(2.8 \div 3)$, тогда как, согласно теоретическим предсказаниям, α составляет от $-7/3$ [Schekochihin et al., 2009] до $-8/3$ [Boldyrev, Perez, 2012]. Большинство исследований показывает, что на ОЗУВ происходит изменение характеристик спектров турбулентных флюктуаций: нарушается колмогоровский скейлинг на МГД-масштабах [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017; Рахманова и др., 2018; Rakhamanova et al., 2024a] и спектры могут быть описаны степенными функциями с показателем -1 , характерными для совокупности некогерентных волн или для масштабов накачки энергии. На кинетических масштабах ряд исследований показал существенное укручение спектров флюктуаций за ОЗУВ [Rakhamanova et al., 2018, 2024a], предположительно вызванное усилением диссипации энергии в результате большого количества волновых процессов и неустойчивостей, характерных для МСЛ.

Следует также отметить, что характеристики турбулентности зависят от типа плазмы СВ, определяемого в основном его источником на Солнце [Bruno et al., 2014; Рязанцева и др., 2019, 2020; Ervin et al., 2024]. Кроме того, в работах [Рахманова и др., 2024; Rakhamanova et al., 2024b] показано, что для СВ разных типов характерна различная динамика свойств турбулентности за ОЗУВ, в том числе различная степень модификации турбулентного каскада в дневном МСЛ и специфический характер его восстановления при распространении плазмы к флангам МСЛ.

Таким образом, исследование особенностей формирования турбулентного каскада в МСЛ во время возмущений в СВ может дать представление о про-

цессах, происходящих в переходной области в периоды наблюдения потенциально геоэффективных явлений в межпланетной среде, и дополнить существующие представления о солнечно-земных связях. В настоящей работе были рассмотрены 15 случаев регистрации ICME на орбите Земли и проанализированы изменения характеристик турбулентности плазмы при пересечении ОЗУВ в эти периоды. ICME являются межпланетными проявлениями солнечных эруптивных событий (выбросов корональной массы), которые приводят к формированию крупномасштабных магнитоплазменных структур, распространяющихся в межпланетной среде. Если скорость распространения магнитоплазменной структуры от Солнца превышает скорость окружающей плазмы СВ, перед ним, как перед поршнем, может формироваться область сжатия — Sheath, характеризующаяся повышенным плазменным давлением (плотностью и температурой) и мощностью флуктуаций. Если скорость распространения возмущения превышает локальную скорость быстрой МГД-волны, то перед поршнем формируется также межпланетная ударная волна. На орбите Земли ICME идентифицируется по набору параметров плазмы и магнитного поля [Ермолов и др., 2009], а также по ионному составу и потокам энергичных частиц [Richardson, Cane, 2010]. Для ICME характерно увеличение магнитного поля по сравнению с окружающим СВ, значительное уменьшение температуры, увеличение скорости в начале события и ее снижение к концу. Кроме того, часто наблюдается увеличение относительного содержания альфа-частиц, а также ионов с большими зарядами, таких как железо и кислород. Как правило, на орбите Земли ICME наблюдается в двух формах — Ejecta или магнитное облако (Magnetic Cloud, MC). К MC относят ICME, которые характеризуются спокойным магнитным полем большой амплитуды без существенных вариаций, при этом наблюдается плавный поворот вектора магнитного поля на большой угол, существенное уменьшение температуры и плотности протонов и, как следствие, плазменного параметра β — отношения теплового давления к магнитному [Burlaga, 1991]. Различие ICME этих двух типов, вероятно, обусловливается различными траекториями пересечения их регистрирующими космическими аппаратами (КА) [Ермолов и др., 2009; Kilpua et al., 2017]. Подробное описание формирования, распространения и внутренней структуры ICME можно найти, например, в обзоре [Kilpua et al., 2017]. В настоящей работе события отбирались из каталога [Ермолов и др., 2009], при этом события типа Ejecta и MC рассматривались отдельно. События типа Ejecta, для которых не наблюдалось области сжатия Sheath перед ICME, рассматривались отдельно от событий с областью сжатия, тогда как в случае MC всегда присутствовала область сжатия. Периоды, соответствующие непосредственно областям сжатия Sheath, также рассматривались независимо. Кроме того, на основе анализа значений Dst-индекса были выделены события типа Ejecta, которые наблюдались и в СВ, и в МСЛ, но не сопровождались существенными геомагнитными возмущениями, и были определены характерные изменения свойств турбулентного каскада в указанные

периоды. Анализировались одновременные измерения характеристик турбулентности в СВ по данным спутника Wind и в МСЛ по данным какого-либо спутника миссий THEMIS, Cluster, MMS. Анализ проводился для 2016–2017 гг., поскольку этот период соответствовал спаду цикла солнечной активности и наблюдению достаточного количества геоэффективных событий в межпланетной среде и для него имеется большой объем доступных спутниковых данных, зарегистрированных в МСЛ.

1. ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Временные интервалы, соответствующие ICME, отбирались по каталогу [Ермолов и др., 2009; <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>]. Для всех случаев наблюдения ICME в 2016–2017 гг. было определено положение спутников THEMIS, Cluster, MMS, а также установлено наличие измерений с этих космических аппаратов в отобранные временные интервалы, для чего использовался интернет-ресурс [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp_phys/]. Положение спутника внутри МСЛ определялось путем анализа энергетического распределения ионов, плотности и скорости протонов. Отбирались только события, во время которых спутники находились в дневной части МСЛ ($X_{GSE} > 5R_E$) и имелись быстрые измерения магнитного поля в МСЛ со спутника. Использовались данные приборов FGM: на спутниках THEMIS [Auster et al., 2008] с частотой опроса 4 вектора в секунду, на спутниках Cluster [Balogh et al., 2001] с частотой опроса 5 векторов в секунду, на спутниках MMS с частотой опроса 16 векторов в секунду (в быстрой моде) [Russell et al., 2016]. При наличии измерений магнитного поля для выбранного события сопоставлялись измерения со спутниками в МСЛ и в СВ. Использовались измерения параметров плазмы в СВ прибором SWE [Ogilvie et al., 1995] с временным разрешением 92 с и магнитного поля прибором MFI [Lepping et al., 1995] с частотой опроса 11 векторов в секунду на спутнике Wind в окрестности точки либрации L1. Анализ параметров плазмы в МСЛ проводился по данным приборов ESA/THEMIS [McFadden et al., 2008], CIS/Cluster [Rème et al., 2001] и FPI/MMS [Pollock et al., 2016]. Всего было выбрано 15 событий регистрации ICME на орбите Земли.

Для сопоставления данных, полученных в СВ и МСЛ, необходимо корректно определить время распространения плазмы между космическими аппаратами. Время распространения определялось корреляционным анализом временных рядов плотности протонов со спутника Wind и одного из спутников в МСЛ. Для этого измерения плотности приводились к общей временной сетке с разрешением 92 с, затем вычислялся предварительный временной сдвиг $T_0 = dX / |V_x|$, где dX — расстояние между спутниками вдоль оси X_{GSE} ; V_x — среднее значение компоненты скорости плазмы СВ вдоль оси X_{GSE} , измеренное спутником Wind в течение события. Далее проводилось вычисление коэффициента корреляции плотностей для диапазона временных сдвигов [$T_0 - 3600$ с; $T_0 + 3600$ с]. Коэффициент корреля-

ции вычислялся на интервале длительностью от 2 до 8 ч, в зависимости от доступного интервала данных. Определялся сдвиг dT , соответствующий максимуму коэффициента корреляции, и полученное значение выбиралось в качестве временного сдвига для рассматриваемого интервала. Каждое значение dT проверялось вручную по визуальному совпадению фронтов плотности или компонент магнитного поля на двух спутниках и при необходимости корректировалось. На рис. 1 сопоставляются данные измерений КА Wind в СВ и КА MMS-1 в МСЛ для события 2–3 февраля 2016 г. На панелях a , b приведены измерения плотности и скорости протонов, левая ось ординат относится к спутнику в СВ, правая — к спутнику в МСЛ. На панелях c , d приведены модуль и компоненты магнитного поля в СВ и МСЛ. Горизонтальными стрелками над верхней панелью рисунка обозначены типы СВ — до 22:00 наблюдалась область сжатия перед ICME, с 22:00 наблюдался сам ICME, относящийся к типу Еjecta. Данные Wind сдвинуты на 4380 с. Хорошо видно совпадение временного хода плотности протонов на двух спутниках на всем интервале, а также локальные несоответствия плазменных структур, возникающие, как правило, из-за различия в скоростях их распространения.

Для определения геомагнитного отклика на рассматриваемое событие были проанализированы значения Dst -индекса из базы данных обсерватории Киото [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>]. На рис. 1, g приведены значения Dst с временным разрешением 1 ч. Видно, что приход ICME сопровождался геомагнитной бурей с минимальным значением $Dst = -57$ нТл. В настоящей работе события были разделены на вызвавшие значительный отклик магнитосферы, если они сопровождались изменением Dst до значений менее -30 нТл, и не вызвавшие значительного геомагнитного отклика, если Dst после прихода ICME не опускался ниже -30 нТл.

Для дальнейшего анализа характеристик турбулентности в данном событии были выбраны два интервала, отмеченные на рис. 1 серой заливкой: интервал 1 относится к области Sheath, а интервал 2 — к области Еjecta. Интервалы отбирались исходя из их длительности (~ 1 ч), а также исходя из соображений квазистационарности параметров, т. е. без существенных скачков плотности или поворотов вектора магнитного поля, соответствующих, как правило, пересечению разрывов различных типов. Для каждого интервала временной сдвиг уточнялся дополнительно вручную.

Для выбранных интервалов с помощью фурье-анализа определялись характеристики турбулентности в СВ и МСЛ. Поскольку временное разрешение магнитометров на используемых спутниках различается, интервалы для вычисления спектров флуктуаций имеют разную длительность в СВ и в МСЛ. Такое различие связано с использованием фурье-анализа, накладывающего ограничение на число точек в спектре. В данном случае для спутников MMS-1 и Wind длительность интервалов составляет 68 мин и 50 мин соответственно. Интервалы выбирались таким образом, чтобы их центры совпадали.

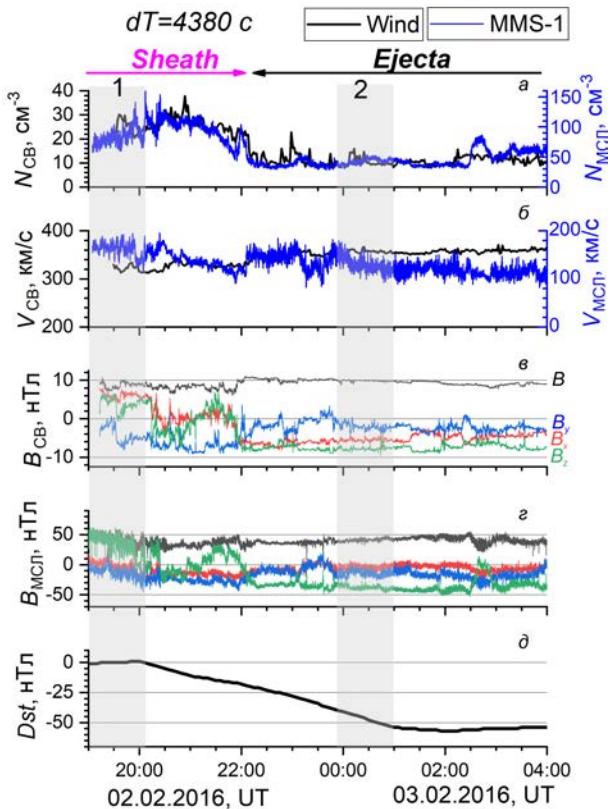


Рис. 1. Событие 2–3 февраля 2016 г.: плотность (a) и скорость (b) протонов и по измерениям на КА Wind в СВ и на КА MMS-1 в МСЛ; модуль и компоненты магнитного поля по измерениям на Wind в СВ (c) и на MMS-1 в МСЛ (d); индекс Dst (d)

Фурье-спектры вычислялись для флуктуаций как вектора магнитного поля (сумма спектров флуктуаций компонент поля), так и модуля магнитного поля. Флуктуации вектора магнитного поля являются суммой несжимаемой (альфвеновской) компоненты флуктуаций, тогда как флуктуации модуля магнитного поля отображают сжимаемую (компрессионную) компоненту. Как правило, в СВ вклад компрессионной компоненты флуктуаций в каскад пренебрежимо мал, и турбулентность рассматривается как чисто альфвеновская [Schekochihin et al., 2009]. В МСЛ доля флуктуаций сжатия становится существенной [Huang et al., 2017], что является важной отличительной чертой турбулентности в этой области.

На рис. 2 приведены вычисленные спектры для интервалов, отмеченных серым на рис. 1: панели a , b относятся к интервалу 1 (Sheath), панели c , d — к интервалу 2 (Еjecta). На панелях a , b показаны спектры в СВ, на панелях c , d — в МСЛ. Необходимо отметить, что на рассматриваемых масштабах в СВ шумы прибора MFI могут внести значимый вклад в спектры флуктуаций на частотах более 0.7 Гц [Woodham et al., 2018]. Чтобы избежать влияния шума на результаты анализа, предварительно определялось отношение спектров измеренных флуктуаций к спектру шума, вычисленному по методике [Woodham et al., 2018], и определялась частота, на которой соотношение сигнал/шум превышало 5. На частотах, превышающих указанную, аппроксимация спектров не проводилась. Шумовые спектры прибора

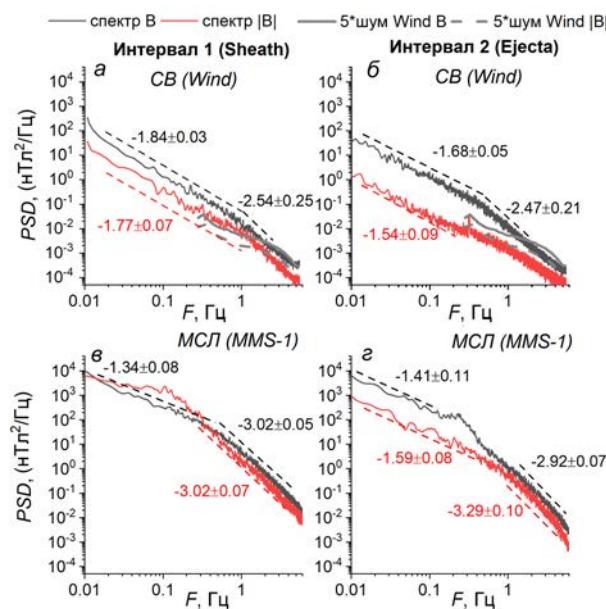


Рис. 2. Спектры (сплошные линии) флюктуаций компонент (черные кривые) и модуля (красные кривые) магнитного поля в СВ (а, б) и в МСЛ (в, г) для интервалов 1 (а, в) и 2 (б, г) на рис. 1, а также результаты аппроксимации спектров (штриховые линии). Серые линии на панелях а, б — шумовые спектры прибора MFI, умноженные на коэффициент 5: сплошные — спектры флюктуаций компонент магнитного поля, штриховые — спектры флюктуаций модуля магнитного поля

MFI, умноженные на коэффициент 5, показаны на рис. 2 а, б серым цветом.

Для полученных спектров хорошо выделяются два масштаба, разделенные изломом: МГД и кинетический. На указанных масштабах проводилась линейная аппроксимация спектров в логарифмическом масштабе для каждого диапазона и определялся показатель степенной функции (наклон) спектра. В ряде случаев такая аппроксимация невозможна из-за присутствия в спектре пика (спектр флюктуаций модуля магнитного поля на рис. 2, в) или из-за достижения уровня шума (спектр флюктуаций модуля магнитного поля на рис. 2, б).

Для подавляющего большинства событий в СВ, проанализированных как в данной работе, так и в более ранних статистических исследованиях [Woodham et al., 2018], излом спектра наблюдается на частотах более 0.1 Гц. В настоящей работе для оценки мощности флюктуаций на МГД-масштабах был выбран диапазон частот 0.095–0.105 Гц. Для каждого полученного спектра была определена мощность флюктуаций вектора и модуля магнитного поля в СВ и в МСЛ.

Как видно на рис. 2, в СВ в период Sheath спектры на МГД-масштабах несколько более крутые (~ -1.8), чем колмогоровский спектр с показателем наклона $-5/3$. Такой наклон характерен для областей Sheath [Riazantseva et al., 2024]. В период Ejecta спектры имеют наклон, близкий к колмогоровскому на МГД-масштабах. Для интервала 1 внутри Sheath спектр флюктуаций модуля магнитного поля имеет скейлинг, близкий к скейлингу спектра флюктуаций вектора поля, при этом мощность флюктуаций вектора и модуля магнитного поля различается

в три раза. Как правило, для СВ характерна большая разница в мощности (в 10 и более раз), обусловленная доминирующим вкладом альфеновских несжимаемых флюктуаций, что наблюдается, например, для периода Ejecta (см. рис. 2, б), для которого мощность компрессионной компоненты меньше в ~ 40 раз. Однако область Sheath характеризуется высокими значениями плотности, что и вызывает увеличение доли сжимаемой компоненты флюктуаций. На кинетических масштабах спектры флюктуаций имеют показатели наклонов, близкие к $-8/3$, приведенному в ряде теоретических описаний турбулентности.

В МСЛ спектры характеризуются уплощением на МГД-масштабах и отклонением скейлинга от колмогоровского для флюктуаций вектора магнитного поля. При этом в период Sheath пик наблюдается в спектре флюктуаций модуля поля, а в период Ejecta — в спектре вектора поля. Диапазон частот, на котором наблюдался пик, исключался из рассмотрения. Обсуждение природы указанных пиков выходит за рамки настоящей работы. Как правило, такие пики обусловлены волновыми процессами в МСЛ вследствие анизотропии температуры, причем тип процесса зависит от внешних условий [Schwartz et al., 1996; Lacombe, Belmont, 1995]. Для обоих интервалов характерно укручение спектров на кинетических масштабах. Для интервала Sheath мощность флюктуаций вектора и модуля магнитного поля близка как на МГД, так и на кинетических масштабах, что свидетельствует о существенном вкладе компрессионных флюктуаций в каскад. Для интервала Ejecta в МСЛ на МГД-масштабах, так же как и в СВ, доля флюктуаций сжатия существенно меньше, чем доля альфеновских флюктуаций, тогда как на кинетических масштабах их вклад возрастает.

Важной характеристикой турбулентности является также частота излома спектров, поскольку считается, что масштаб, на котором проявляется излом, связан с механизмом диссипации энергии и нагрева плазмы. Однако выделение этого масштаба требует значительной статистики, и даже при наличии такой он до сих пор не определен однозначно (см., например, [Woodham et al., 2018]). В настоящей работе статистика не позволяет достоверно утверждать, каким масштабом определяется излом спектра, поэтому данный вопрос оставлен за рамками исследования.

В общей сложности для 15 событий ICME было выделено 47 интервалов, разделенных по типу ICME и интенсивности спровоцированных ими геомагнитных возмущений на следующие группы: 1) ICME типа Ejecta, перед которым наблюдалась область сжатия и после прихода которого было зарегистрировано $Dst < -30$ нТл, т. е. наблюдалось геомагнитное возмущение (GS) — Ejecta/Sh/GS; 2) ICME типа Ejecta, перед которым наблюдалась область сжатия и после прихода которого было зарегистрировано $Dst > -30$ нТл, т. е. не наблюдалось существенного геомагнитного возмущения — Ejecta/Sh/noGS; 3) ICME типа Ejecta, перед которым не наблюдалась область сжатия и $Dst > -30$ нТл — Ejecta/noSh; 4) область сжатия Sheath, после прихода которой было

Типы рассмотренных интервалов и их характеристики

Тип	Количество интервалов	Отклик магнитосфера	Количество интервалов с пиком в МСЛ	Среднее значение B_z в СВ, нТл	Среднее значение V в СВ, км/с
Ejecta/Sh/GS	8	+	5	-5.3 ± 3.3	355 ± 4
Ejecta/Sh/noGS	13	-	10	3.7 ± 4.1	420 ± 64
Ejecta/noSh	13	-	10	1.2 ± 2.1	382 ± 42
Sh	8	+	2	0.7 ± 3.2	422 ± 109
MC	5	+	1	-6.3 ± 5.7	473 ± 100

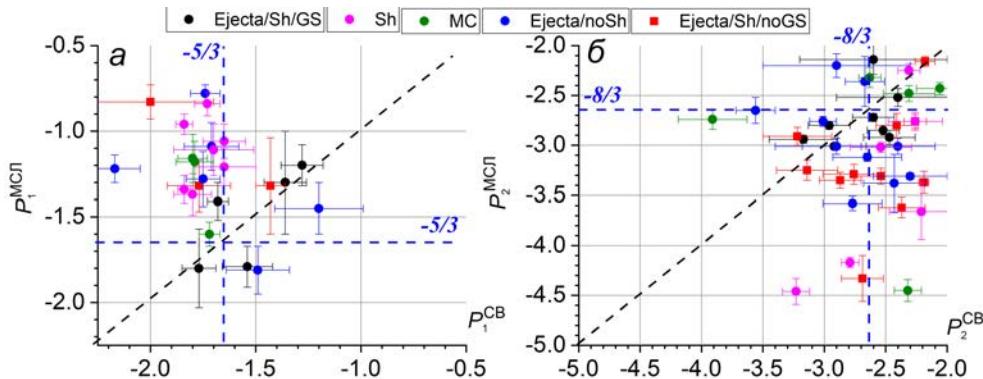


Рис. 3. Зависимость наклона спектра флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ от наклона в СВ на МГД-масштабах (а) и на кинетических масштабах (б)

зарегистрировано $Dst < -30$ нТл — Sh; 5) ICME типа MC, после прихода которого было зарегистрировано $Dst < -30$ нТл — MC. Количество интервалов каждого типа и наличие/отсутствие отклика магнитосфера на событие, а также средние значения B_z -компоненты межпланетного магнитного поля и скорости плазмы СВ для выделенной группы событий приведены в таблице. Как показывают результаты статистических исследований [Рахманова и др., 2024; Rakhmanova et al., 2024b], для возмущенных периодов в СВ, и в частности для периода прохождения ICME, характерна существенная модификация турбулентного каскада во всей дневной части МСЛ, вне зависимости от расположения спутника относительно магнитопаузы и ОЗУВ. Поэтому в данной работе не проводилось разделения интервалов вблизи границ и в середине МСЛ. Разделения по типу ОЗУВ, за которой велись измерения, также не проводилось.

На основе полученной статистики было рассмотрено изменение при пересечении ОЗУВ: 1) мощности флуктуаций PSD на МГД-масштабах; 2) степени сжатия (коэффициента компрессии) на МГД-масштабах $CC = PSD_{|B|}/PSD_B$, где $PSD_{|B|}$ — мощность флуктуаций спектра модуля магнитного поля, PSD_B — мощность флуктуаций вектора магнитного поля; 3) наклоны P_1 и P_2 на МГД и кинетических масштабах соответственно для каждого типа интервалов. Результаты анализа приведены в следующем разделе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 приведено сравнение наклонов спектров флуктуаций вектора магнитного поля в СВ и МСЛ на МГД (а) и на кинетических (б) масштабах для событий разных типов. На флуктуации модуля магнитного поля в СВ сильно влияет шум прибора MFI,

что затрудняет определение наклонов спектров этих флуктуаций для кинетических масштабов. В связи с этим сравнение скейлинга флуктуаций проводилось только для вектора магнитного поля. Черные штриховые линии обозначают равенство наклонов спектров перед и за ОЗУВ, т. е. сохранение скейлинга при входе в МСЛ. Синие штриховые линии показывают модельные наклоны, характерные для каждого диапазона масштабов. Для интервалов, относящихся к Sheath и MC, в СВ спектры на МГД-масштабах близки к колмогоровским. Для остальных типов СВ наблюдается существенный разброс значений наклонов. В МСЛ большая часть спектров имеет наклоны, меньшие по модулю, чем в СВ и чем описывается в теориях. Заметим, что количество точек на рис. 3 может быть меньше, чем количество интервалов, указанное в таблице, поскольку в большом количестве случаев в МСЛ наблюдаются волновые явления и аппроксимация спектров на МГД-масштабах невозможна. В четвертом столбце таблицы указано количество случаев наблюдения четко выраженных пиков в спектрах флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ. Наиболее часто волновые явления наблюдаются для событий типа Ejecta/Sh/noGS — в 10 из 13 случаев, а также для событий типа Ejecta/noSh — в 10 из 13 случаев. Таким образом, для ICME, не вызвавших существенного отклика магнитосферы, в 76 % случаев в дневном МСЛ наблюдается значительная волновая активность. Для событий, в результате которых наблюдался значительный отклик магнитосферы, волновые процессы в МСЛ наблюдались в 38 % случаев.

Видно, что для событий типа Ejecta/Sh/GS наклоны спектров на МГД-масштабах в МСЛ соответствуют измеряемым в СВ, причем как для случаев колмогоровского скейлинга, так и для случаев отклонения

от него в СВ. Для прочих событий связи между наклонами спектров в двух областях не наблюдается.

На кинетических масштабах в среднем спектры флуктуаций в МСЛ имеют больший по модулю наклон, чем в СВ, что характерно для плазмы МСЛ. Наименьшее изменение наклона при входе плазмы в МСЛ наблюдается для событий типа Ejecta/Sh/GS. Наибольшее изменение наклона наблюдается для событий типа Ejecta/Sh/noGS, Ejecta/noSh и Sh. Интересно, что для четырех из пяти событий, относящихся к МС, наблюдается разброс значений наклона в СВ, в то время как в МСЛ показатели наклона близки к $-8/3$. Подобное изменение может говорить о том, что каскад турбулентных флуктуаций может разрушаться и формироваться заново за ОЗУВ не только для МГД, как предполагалось в [Huang et al., 2017], но и для кинетических масштабов. Однако однозначно ответить на этот вопрос в рамках данной работы не представляется возможным из-за ограниченной статистики для МС. Для одного из пяти событий наклон на кинетических масштабах близок к -4.5 , что характерно для наблюдения волновых процессов или локальных когерентных структур, например альфеновских вихрей [Alexandrova et al., 2008].

На рис. 4 представлено сравнение средних значений и стандартных отклонений изменений наклонов спектров флуктуаций в области ОЗУВ на МГД (а) и кинетических (б) масштабах для рассмотренных типов ICME. Изменение наклона определяется как $P_{1,2} = (P_{1,2}^{\text{МСЛ}} - P_{1,2}^{\text{СВ}}) / P_{1,2}^{\text{СВ}}$, где индексы 1 и 2 относятся к МГД и кинетическим масштабам соответственно. В случае более плоских спектров флуктуаций, характерных для МСЛ, $\Delta P < 0$, в случае укручивания спектра флуктуаций в области ОЗУВ $\Delta P > 0$. Несмотря на большие стандартные отклонения значений видно, что разные типы ICME имеют свои особенности в изменении скейлинга за ОЗУВ. Наиболее значимое различие наблюдается для событий Ejecta, приводящих и не приводящих к магнитосферным возмущениям. В первом случае наблюдается наименьшее изменение скейлинга спектров флуктуаций как на МГД, так и на кинетических масштабах. Во втором случае для большинства событий наблюдается усиление волновой активности и темпов диссипации энергии в МСЛ.

Зависимость мощности флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ от соответствующей мощности в СВ, измеренной на МГД-масштабах, представлена на рис. 5, а. Средние значения и стандартные отклонения изменения мощности спектров $\log(PSD_{\text{МСЛ}} / PSD_{\text{СВ}})$ приведены на рис. 4, в. Видно, что для МС и Ejecta/Sh/GS пересечение ОЗУВ сопровождается увеличением мощности флуктуаций на два порядка. Для Sheath и Ejecta/Sh/noGS характерно менее выраженное усиление флуктуаций — на 1–2 порядка. Наиболее значительное усиление флуктуаций, в ряде случаев более трех порядков, наблюдается в периоды Ejecta/noSh.

Одним из основных отличий плазмы МСЛ от плазмы невозмущенного СВ является усиление доли компрессионной компоненты флуктуаций за ОЗУВ.

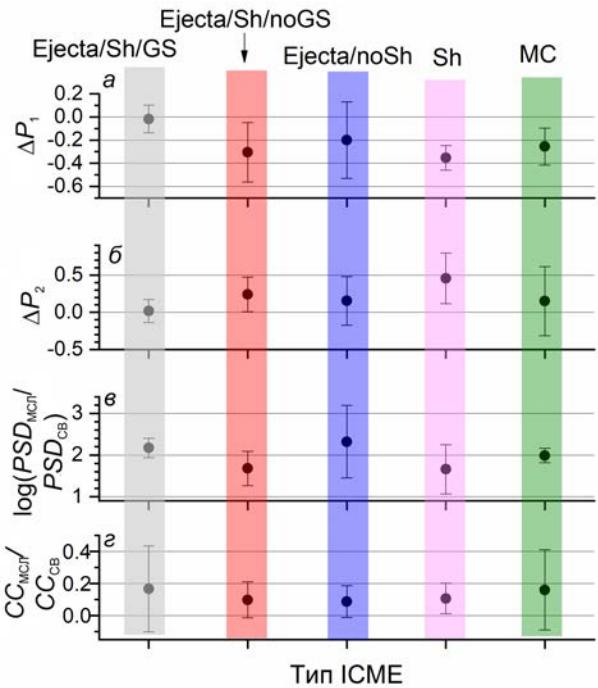


Рис. 4. Среднее значение и стандартное отклонение изменения наклонов P_1 (а) и P_2 (б), а также изменения мощности спектров флуктуаций на МГД-масштабах (в) и коэффициента компрессии (г) для ICME разных типов

На рис. 5, б приведено сравнение коэффициентов компрессии в СВ и МСЛ для всех рассматриваемых типов интервалов. Средние значения и стандартные отклонения для разных типов ICME приведены на рис. 4, г. Хорошо видно, что в СВ мощность компрессионной компоненты флуктуаций магнитного поля для подавляющего большинства событий в десять раз меньше мощности альфеновской компоненты ($CC_{\text{СВ}} < 0.1$), что характерно для СВ. При этом в среднем доля флуктуаций сжатия выше для областей Sheath, что закономерно для областей сжатой плазмы. Существенной разницы в коэффициенте сжатия для интервалов Ejecta различных типов не наблюдается. В МСЛ в среднем коэффициент $CC_{\text{МСЛ}}$ выше, чем в СВ, доля сжимаемой компоненты, как правило, сопоставима с долей альфеновской. Четкой связи между сжимаемостью флуктуаций в СВ и МСЛ не наблюдается: в среднем сжимаемость увеличивается на один порядок для всех рассмотренных типов ICME. Таким образом, усиление сжимаемости, по-видимому, не играет роли в различии динамики турбулентного каскада за ОЗУВ для разных типов ICME и в различии геомагнитного отклика на них.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В настоящей работе на основе анализа одновременных измерений характеристик турбулентности в солнечном ветре и в дневном магнитосфере проанализировано различие в формировании турбулентного каскада за околоземной ударной волной для 15 событий ICME различных типов и разной степени геоэффективности. Показано следующее:

1. Наиболее выраженное изменение скейлинга турбулентного каскада на ОЗУВ как на МГД, так и на кинетическом масштабах наблюдается в периоды

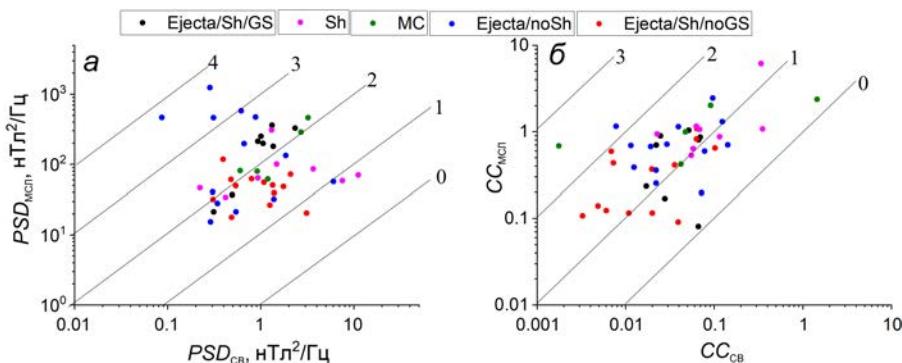


Рис. 5. Зависимость мощности флуктуаций вектора магнитного поля в МСЛ от соответствующей мощности в СВ для МГД-масштабов (а); зависимость коэффициента компрессии в МСЛ от коэффициента компрессии в СВ для ICME разных типов (б); линиями обозначено увеличение мощности (а) и степени компрессии (б) в 10^n раз, показатель n приведен рядом с соответствующей линией

ICME типа Ejecta, которые не сопровождаются существенным откликом магнитосферы ($Dst > -30$ нТл); при этом несущественно, наблюдается или не наблюдается перед ICME область сжатия Sheath; в указанных событиях за ОЗУВ наблюдается значительное усиление волновой активности на инерционных масштабах, а также увеличение темпа диссипации энергии.

2. Наименее выраженное изменение скейлинга турбулентного каскада на ОЗУВ как на МГД, так и на кинетическом масштабах характерно для областей Ejecta с Sheath перед ними, вызывающих значительные возмущения магнитосферы ($Dst < -30$ нТл).

3. События типа Ejecta без области сжатия Sheath сопровождаются наибольшим усилением флуктуаций МГД-масштаба на ОЗУВ, которое может достигать четырех порядков.

4. Степень сжимаемости флуктуаций изменяется в среднем на один порядок за ОЗУВ вне зависимости от типа ICME и для различных откликов магнитосферы на ICME.

Полученные данные об изменении скейлинга флуктуаций при входе плазмы в МСЛ в среднем соответствуют полученным ранее в статистических исследованиях [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017; Rakhmanova et al., 2024a, b]: наблюдается отклонение скейлинга от колмогоровского на МГД-масштабах и укручение спектров на кинетических масштабах. Однако в настоящей работе показано важное различие между событиями, имевшими одинаковый тип, т. е. источник на Солнце, но сопровождавшимися различным откликом магнитосферы.

Следует отметить, что геоэффективность ICME типа Ejecta имеет хорошо объяснимую связь с B_z -компонентой магнитного поля (см. таблицу): для событий, вызывающих существенный магнитосферный отклик, характерна выраженная южная ориентация межпланетного магнитного поля. Однако, согласно статистическому анализу [Rakhmanova et al., 2024a], среднее значение B_z -компоненты явно не влияет на изменение характеристик турбулентности на ОЗУВ. В настоящей работе были проверены также связи между изменениями параметров турбулентности

на ОЗУВ и параметрами плазмы и магнитного поля СВ, в частности скоростью плазмы, и не было обнаружено никаких зависимостей в рамках событий типа ICME.

Значительное усиление мощности флуктуаций на МГД-масштабах в периоды событий Ejecta, не имевших перед собой области сжатия и не сопровождавшихся значительным откликом магнитосферы, а также частое наблюдение выраженных волновых процессов в эти периоды свидетельствуют о том, что энергия флуктуаций, пришедших из СВ, была преобразована в МГД-волны. Усиление диссипации (укручение спектров флуктуаций на кинетических масштабах), характерное для этих периодов, также свидетельствует о появлении в каскаде избыточной энергии, которая перераспределяется от больших масштабов к меньшим посредством каскада. Усиление волновых процессов наблюдается и в периоды Ejecta с Sheath, не приведших к существенным магнитосферным возмущениям, несмотря на указания о большей геоэффективности таких событий [Yermolaev et al., 2015]. Подобные особенности в формировании турбулентного каскада за ОЗУВ свидетельствуют о том, что в геоэффективность различных явлений в межпланетной среде вклад вносят не только глобальные процессы пересоединения на магнитопаузе, которые определяются направлением межпланетного магнитного поля и динамическим давлением СВ и часто указываются в качестве доминирующего процесса в солнечно-земных связях, но и процессы перекачки энергии по каскаду (например, [D'Amicis et al., 2020]) и их изменения в области ОЗУВ, которые могут носить специфический характер для потоков СВ разных типов. Этот вклад требует более детального исследования для построения более точных моделей солнечно-земных связей.

Работа была выполнена в рамках госзадания ИКИ РАН по теме «ПЛАЗМА».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ермоляев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермоляев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. *Космические исследования*. 2009, т. 47, № 2, с. 99–113.

- Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Веригин М.И. Влияние магнитопаузы и головной ударной волны на характеристики турбулентности плазмы в магнитослое Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2018, т. 58, № 6, с. 749–758.
- Рахманова Л.С., Хохлачев А.А., Рязанцева М.О. и др. Развитие турбулентности за околосемной ударной волной в периоды спокойного и возмущенного солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 2, с. 15–28. DOI: [10.12737/szf-102202402](https://doi.org/10.12737/szf-102202402) / Rakhmanova L., Khokhlachev A., Riazantseva M., et al. Turbulence development behind the bow shock during disturbed and undisturbed solar wind. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, no. 2, pp. 13–25. DOI: [10.12737/stp-102202402](https://doi.org/10.12737/stp-102202402).
- Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н. и др. Мелкомасштабные флуктуации плазмы солнечного ветра в быстрых и медленных потоках. *Космические исследования*. 2019, т. 57, № 6, с. 451–460.
- Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н. и др. Характеристики турбулентного потока солнечного ветра в областях компрессии плазмы. *Космические исследования*. 2020, т. 58, № 6, с. 503–512.
- Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A. Spectra and anisotropy of magnetic fluctuations in the Earth's magnetosheath: Cluster observations. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, iss. 11, pp. 3585–3596. DOI: [10.5194/angeo-26-3585-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-3585-2008).
- Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W., et al. The THEMIS fluxgate magnetometer. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 141, pp. 235–264. DOI: [10.1007/s11214-008-9365-9](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9365-9).
- Balogh A., Carr C.M., Acuna M.H., et al. The Cluster Magnetic Field Investigation: Overview of inflight performance and initial results. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 1207–1217. DOI: [10.5194/angeo-19-1207-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1207-2001).
- Boldyrev S., Perez J.C. Spectrum of kinetic Alfvén turbulence. *Astrophys. J. Lett.* 2012, vol. 758, no. 2, 5 p. DOI: [10.1088/2041-8448/758/2/L44](https://doi.org/10.1088/2041-8448/758/2/L44).
- Borovsky J.E., Denton M.H. The differences between CME-driven storms and CIR-driven storms. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A07S08.
- Boynton R.J., Balikhin M.A., Billings S.A., et al. Data derived NARMAX Dst model. *Ann. Geophys.* 2012, vol. 29, iss. 6, pp. 965–971. DOI: [10.5194/angeo-29-965-2011](https://doi.org/10.5194/angeo-29-965-2011).
- Bruno R., Trenchi L., Telloni D. Spectral slope variation at proton scales from fast to slow solar wind. *Astrophys. J. Lett.* 2014, vol. 793, L15.
- Burlaga L.F. Magnetic clouds. *Physics of the Inner Heliosphere*: vol. 2. Eds R. Schwenn and E. Marsch. Springer-Verlag, 1991, p. 1. DOI: [10.1007/978-3-642-75364-0_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-75364-0_1).
- Czaykowska A., Bauer T.M., Treumann R.A., Baumjohann W. Magnetic field fluctuations across the Earth's bow shock. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, iss. 3, pp. 275–287. DOI: [10.5194/angeo-19-275-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-275-2001).
- D'Amicis R., Telloni D., Bruno R. The effect of solar-wind turbulence on magnetospheric activity. *Front. Phys.* 2020, vol. 8, 604857. DOI: [10.3389/fphy.2020.604857](https://doi.org/10.3389/fphy.2020.604857).
- Ervin T., Jaffarove K., Badman S.T., et al. Characteristics and source regions of slow Alfvénic solar wind observed by Parker Solar Probe. *Astrophys. J.* 2024, vol. 975, no. 2, 156. DOI: [10.3847/1538-4357/ad7d00](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad7d00).
- Greenstadt E.W. Binary index for assessing local bow shock obliquity. *J. Geophys. Res.* 1972, vol. 77, pp. 5467–5479. DOI: [10.1029/JA077i028p05467](https://doi.org/10.1029/JA077i028p05467).
- Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F., et al. On the existence of the Kolmogorov inertial range in the terrestrial magnetosheath turbulence. *Astrophys. J. Lett.* 2017, vol. 836, no. 1, L10. DOI: [10.3847/2041-8213/836/1/L10](https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L10).
- Karimabadi H., Roytershteyn V., Vu H.X., et al. The link between shocks, turbulence, and magnetic reconnection in collisionless plasmas. *Phys. Plasmas*. 2014, vol. 21, 062308. DOI: [10.1063/1.4882875](https://doi.org/10.1063/1.4882875).
- Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Rev. Solar Phys.* 2017, vol. 14, article number 5. DOI: [10.1007/s41116-017-0009-6](https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6).
- Lacombe C., Belmont G. Waves in the Earth's magnetosheath: observations and interpretations. *Adv. Space Res.* 1995, vol. 15, pp. 329–340. DOI: [10.1016/0273-1177\(94\)00113-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)00113-F).
- Lepping R.P., Acuña M.H., Burlaga L.F., et al. The WIND Magnetic Field Investigation. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, pp. 207–229. DOI: [10.1007/BF00751330](https://doi.org/10.1007/BF00751330).
- McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., et al. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration. *Space Sci. Rev.* 2008, vol. 141, pp. 277–302. DOI: [10.1007/s11214-008-9440-2](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9440-2).
- Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J., et al. SWE, a comprehensive plasma instrument for the WIND spacecraft. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, pp. 55–77. DOI: [10.1007/BF00751326](https://doi.org/10.1007/BF00751326).
- Pallocchia G., Amata E., Consolini G., et al. Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 24, pp. 989–999. DOI: [10.5194/angeo-24-989-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-989-2006).
- Palmroth M., Ganse U., Pfau-Kempf Y., et al. Vlasov methods in space physics and astrophysics. *Living Reviews in Computational Astrophysics*. 2018, vol. 4, article number 1. DOI: [10.1007/s41115-018-0003-2](https://doi.org/10.1007/s41115-018-0003-2).
- Podladchikova T.V., Petrukhovich A.A. Extended geomagnetic storm forecast ahead of available solar wind measurements. *Space Weather*. 2012, vol. 10, S07001. DOI: [10.1029/2012SW000786](https://doi.org/10.1029/2012SW000786).
- Pollock C., Moore T., Jacques A., et al. Fast Plasma Investigation for Magnetospheric Multiscale. *Space Sci. Rev.* 2016, vol. 199, pp. 331–406. DOI: [10.1007/s11214-016-0245-4](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4).
- Pulinets M.S., Antonova E.E., Riazantseva M.O., et al. Comparison of the magnetic field before the subsolar magnetopause with the magnetic field in the solar wind before the bow shock. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, pp. 604–616. DOI: [10.1016/j.asr.2014.04.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.023).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Verigin M. Kinetic scale ion flux fluctuations behind the quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018, vol. 123, pp. 5300–5314. DOI: [10.1029/2018JA025179](https://doi.org/10.1029/2018JA025179).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G. Plasma and magnetic field turbulence in the Earth's magnetosheath at ion scales. *Front. Astron. Space Sci.* 2021, vol. 7, 616635. DOI: [10.3389/fspas.2020.616635](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.616635).
- Rakhmanova L., Khokhlachev A., Riazantseva M., et al. Modification of the turbulence properties at the bow shock: Statistical results. *Front. Astron. Space Sci.* 2024a, vol. 11, 1379664. DOI: [10.3389/fspas.2024.1379664](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1379664).
- Rakhmanova L., Khokhlachev A., Riazantseva M., et al. Changes in and recovery of the turbulence properties in the magnetosheath for different solar wind streams. *Universe*. 2024b, vol. 10, no. 5, 194. DOI: [10.3390/universe10050194](https://doi.org/10.3390/universe10050194).
- Rème H., Aoustin C., Bosqued J.M., et al. First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster Ion Spectrometry (CIS) experiment. *Ann. Geophys.* 2001, vol. 19, pp. 1303–1354. DOI: [10.5194/angeo-19-1303-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1303-2001).
- Riazantseva M.O., Treves T.V., Khabarova O., et al. Linking turbulent interplanetary magnetic field fluctuations and current sheets. *Universe*. 2024, vol. 10, no. 11, 417. DOI: [10.3390/universe10110417](https://doi.org/10.3390/universe10110417).
- Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties. *Solar Phys.* 2010, vol. 264, pp. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).
- Russell C.T., Anderson B.J., Baumjohann W., et al. The Magnetospheric Multiscale Magnetometers. *Space Sci. Rev.*

- 2016, vol. 199, pp. 189–256. DOI: [10.1007/s11214-014-0057-3](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0057-3).
- Schekochihin A.A., Cowley S.C., Dorland W., et al. Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas. *Astrophys. J. Suppl.* 2009, vol. 182, pp. 310–377. DOI: [10.1088/0067-0049/182/1/310](https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310).
- Šafránková J., Hayosh M., Gutinska O., et al. Reliability of prediction of the magnetosheath B_z component from the interplanetary magnetic field observations. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A12213. DOI: [10.1029/2009JA014552](https://doi.org/10.1029/2009JA014552).
- Sahraoui F., Hadid L., Huang S. Magnetohydrodynamic and kinetic scale turbulence in the near-Earth space plasmas: a (short) biased review. *Rev. Mod. Phys.* 2020, vol. 4, article number 4. DOI: [10.1007/s41614-020-0040-2](https://doi.org/10.1103/10.1007/s41614-020-0040-2).
- Schwartz S.J., Burgess D., Moses J.J. Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath: Present status. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, pp. 1134–1150. DOI: [10.1007/s00585-996-1134-z](https://doi.org/10.1007/s00585-996-1134-z).
- Shevrev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks. *Planet. Space Sci.* 2005, vol. 53, pp. 95–102. DOI: [10.1016/j.pss.2004.09.033](https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033).
- Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1966, vol. 14, pp. 223–253.
- Turc L., Fontaine D., Escoubet C.P., et al. Statistical study of the alteration of the magnetic structure of magnetic clouds in the Earth's magnetosheath. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 2956–2972. DOI: [10.1002/2016JA023654](https://doi.org/10.1002/2016JA023654).
- Tóth G., Sokolov I., Gombosi T., et al. Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A12226. DOI: [10.1029/2005JA011126](https://doi.org/10.1029/2005JA011126).
- Woodham L.D., Wicks R.T., Verscharen D., Owen C.J. The role of proton cyclotron resonance as a dissipation mechanism in solar wind turbulence: A statistical study at ion-kinetic scales. *Astrophys. J.* 2018, vol. 856, no. 1, 49. DOI: [10.3847/1538-4357/aab03d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aab03d).
- Yermolaev Y.I., Lolkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 7094–7106. DOI: [10.1002/2015JA021274](https://doi.org/10.1002/2015JA021274).
- Zimbardo G., Greco A., Sorriso-Valvo L., et al. Magnetic turbulence in the geospace environment. *Space Sci. Rev.* 2010, vol. 156, pp. 89–134. DOI: [10.1007/s11214-010-9692-5](https://doi.org/10.1007/s11214-010-9692-5).
- URL: <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> (дата обращения 8 апреля 2025 г.).
- URL: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/sp_phys/ (дата обращения 8 апреля 2025 г.).
- URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/> (дата обращения 8 апреля 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.
- Как цитировать эту статью:
Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Хохлачев А.А., Ермоляев Ю.И., Застенкер Г.Н. Особенности формирования турбулентного каскада в магнитослое в периоды ICME. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 16–25. DOI: [10.12737/szf-113202502](https://doi.org/10.12737/szf-113202502).

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ТЕМПЕРАТУРУ И ПЛОТНОСТЬ ПЛАЗМЫ В ПЛАЗМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

EFFECT OF SOLAR ACTIVITY AND SOLAR WIND PARAMETERS ON PLASMA TEMPERATURE AND DENSITY IN EARTH'S PLASMAPAUSE

Г.А. Котова 

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, kotova@cosmos.ru

Д.В. Чугунин 

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, dimokch@cosmos.ru

В.В. Безруких

Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия, bezrukikh31@mail.ru

Г.А. Kotova

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, kotova@cosmos.ru

Д.В. Chugunin

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, dimokch@cosmos.ru

V.V. Bezrukikh

Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia, bezrukikh31@mail.ru

Аннотация. По данным измерений на спутниках «Интербол-1» и «Магион-5» проекта «Интербол» в 1995–2001 гг. проанализирована зависимость характеристик экваториальной плазмосферы от местного магнитного времени, а также от солнечной активности, динамического давления и плотности солнечного ветра. Плотность протонов в годы минимума солнечного цикла в среднем выше, чем в годы максимума, что, вероятно, является следствием понижения доли протонов в массовом составе ионов плазмосферы на фазе максимума. Дневные и ночные температуры протонов возрастают с увеличением потока ультрафиолетового излучения Солнца, по крайней мере, в годы максимума солнечного цикла. Плотность и тепловое давление плазмосферной плазмы увеличиваются с ростом динамического давления и/или плотности невозмущенного солнечного ветра, что, возможно, связано с перестройкой электрического поля конвекции в магнитосфере.

Ключевые слова: холодная плазма, плотность, температура, местное магнитное время, солнечная активность, геомагнитная активность, давление солнечного ветра.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследований, анализирующих влияние солнечного ветра (СВ) на внутреннюю магнитосферу, ограничиваются рассмотрением внешней границы области холодной плазмы — плазмопаузы.

Изменения плотности плазмы в плазмосфере на разных L -оболочках (L — параметр Мак-Илвайна, расстояние в плоскости магнитного экватора до силовой линии магнитного поля Земли в радиусах Земли R_E) в течение дня, года и солнечного цикла впервые были представлены в работе [Park et al., 1978] на основе данных вистлеров. Плотность плазмы, определенная по частоте и времени распространения вистлеров, относится к экваториальной плоскости плазмосферы. На большом статистическом материале, полученным с наземной станции в Калифорнии ($\sim 110^\circ$ W)

Abstract. Measurements from the Interball-1 and Magion-5 satellites of the Interball mission in 1995–2001 have been used to analyze the dependence of the equatorial plasmasphere characteristics on magnetic local time, as well as on solar activity, dynamic pressure, and solar wind density. The proton density at solar minimum is on average higher than at solar maximum, which is probably due to changes in plasma mass composition in the plasmasphere at solar maximum. The daytime and nighttime proton temperatures increase with increasing solar extreme ultraviolet flux, at least in the years of solar maximum. The plasmaspheric plasma density and thermal pressure rise with increasing dynamic pressure and/or density of the undisturbed solar wind, which might be associated with restructuring of the convective electric field in the magnetosphere.

Keywords: cold plasma, density, temperature, magnetic local time, solar activity, geomagnetic activity, solar wind pressure.

показаны годовые вариации плотности. Плотность плазмы на магнитной оболочке $L \approx 2.5$ в декабре была в ~ 1.5 раза больше, чем в июне. С уменьшением солнечной активности от 1957 к 1964 г. плотность плазмы также уменьшается. Кроме того, Park et al. [1978] на основании предыдущих исследований подчеркивали, что динамика плазмы во внутренней плазмосфере при $L < \sim 3$ отличается от динамики плазмы внешней плазмосферы. Распределение плазмы во внутренней плазмосфере мало подвержено влиянию геомагнитной активности и близко к равновесному уровню насыщения, когда потоки плазмы вниз из плазмосферы ночью компенсируются потоками из ионосферы днем.

В работе [Carpenter, Andersen, 1992] было рассмотрено не только изменение положения плазмопаузы, но и динамика плотности холодной плазмы

в плазмосфере вблизи экваториальной плоскости при $2 < L < 8$ в различных условиях. По данным волновых экспериментов на спутнике ISEE и наземным данным по исследованию вистлеров была выведена эмпирическая формула расчета максимальной плотности электронов N_{eq} , регистрируемой при длительных спокойных геомагнитных условиях,

$$\begin{aligned} \lg(N_{eq}(L, d, R)) = & -0.3145L + 3.9043 + \\ & + 0.15 \cos[2\pi(d+9)/365] \times \exp[-(L-2)/1.5] - \\ & - 0.5 \cos[4\pi(d+9)/365] \times \exp[-(L-2)/1.5] + \\ & + (0.00127R - 0.0635) \times \exp[-(L-2)/1.5], \end{aligned} \quad (1)$$

где d — порядковый номер дня в году; R — среднее за 13 месяцев число солнечных пятен. В (1) главными являются первые два члена, описывающие падение плотности плазмы с удалением от Земли, но авторы учитывают также возрастание плотности холодной плазмы с ростом солнечной активности, годовые (или сезонные) вариации с максимумом плотности в декабре и полугодовые вариации с максимумами плотности в равноденствие [Carpenter, 1962]. Однако приведенная формула (1) не содержит зависимости от местного магнитного времени (MLT). Для выявления такой зависимости было недостаточно данных, полученных во внутренней плазмосфере в длительные спокойные периоды.

Позднее было установлено, что годовые вариации плотности плазмосферной плазмы не всегда сопровождаются наблюдением декабрьского максимума. Плотность плазмы в плазмосфере в июне может быть больше, чем зимой. Это зависит от географической долготы области наблюдения [Menk et al., 2012; Чугунин и др., 2017; Kim et al., 2018]. В работе [Yasyukevich et al., 2019] проанализировано изменение полного электронного содержания в плазмосфере (PEC) над Иркутском ($52^{\circ}17' N$, $104^{\circ}18' E$) в дневное и ночное время в течение нескольких лет (2010–2013 гг.). Авторы показали, что в этом регионе значения PEC летом больше, чем зимой; повышенные значения PEC наблюдались также в периоды равноденствия. Корреляция с индексами геомагнитной и солнечной активности отмечалась только для дневных значений PEC .

Не была подтверждена также и прямая зависимость плотности плазмосферной плазмы от солнечной активности. Шим с соавторами [Shim et al., 2017] действительно указывают на небольшое возрастание PEC на 10–30 % на высотах 1336–20200 км с ростом солнечной активности, но при этом отмечают падение электронного содержания вблизи экваториальной плоскости с ростом геомагнитной активности в годы максимума солнечного цикла. Richards et al. [2000] анализируют сезонные вариации плотности плазмы в плазмосфере и указывают на антикорреляцию плотности электронов и с геомагнитной, и с солнечной активностью вследствие изменений плотности нейтрального водорода ионосферы.

Вариации параметров внутренней плазмосферы, должны быть тесно связаны с вариациями параметров верхней ионосферы. Вариации плотности и температуры плазмы с периодом 27 дней (синодиче-

ский период вращения солнечных пятен составляет 27.2753 суток) в верхней ионосфере по данным спутников серии DMSP рассмотрены Ричем с соавторами [Rich et al., 2003]. В максимуме солнечного цикла в вечернем временном секторе плотность периодически изменяется на 40–50 %, а температура — на 5–10 %. 27-дневные колебания параметров верхней ионосферы были выявлены на всех широтах ниже полярного овала. Эти широты соответствуют магнитным оболочкам плазмосферы. Наличие таких вариаций параметров верхней ионосферы авторы естественно связывают с изменениями потока ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца. При этом в более низких областях ионосферы в слоях E или F такие вариации параметров плазмы слабо выражены в экваториальной плоскости [Lee et al., 2012]. По мнению авторов [Rich et al., 2003; Lee et al., 2012], на низких высотах распределение ионосферной плазмы подвержено другим сильным динамическим процессам, которые скрывают 27-дневные вариации. Рич с соавторами предположили, что подобные вариации параметров должны существовать в плазмосфере.

О существовании в плазмосфере вариаций плотности плазмы с периодом около 27 дней сообщалось только при анализе данных, полученных при $L > 4.5$ на спутниках Van Allen Probes [Thaller et al., 2019]. Авторы не обнаружили корреляции плотности плазмы во внешней плазмосфере с потоком краиного УФ-излучения Солнца (EUV, Extreme Ultra Violet) и связали наблюдаемые вариации с влиянием электрического поля конвекции в магнитосфере, т. е. с процессами опустошения и заполнения плазмосферы. Для внешней плазмосферы такое объяснение кажется вполне обоснованным.

Прямое влияние СВ на плотность плазмы в плазмосфере, по-видимому, впервые рассматривалось Котовой и др. [Kotova et al., 2002a, b]. Данные, полученные на космическом аппарате (КА) «Интербол-1» в июле–октябре 1999 г. в вечернем (15–22 MLT) и утреннем (02–10 MLT) секторах на внешних L -оболочках плазмосферы ($L \sim 3.5$), свидетельствовали о том, что плотность плазмы в плазмосфере возрастает с увеличением динамического давления СВ. Задержка между измерениями СВ и плазмы в плазмосфере составляла не более 6 ч.

Яковски и Хок [Jakowski, Hoque, 2018] отмечают, что в эмпирической модели плотности плазмосферы, построенной для области $L < 3$, заметно, что плотность холодной плазмы во внутренней плазмосфере на дневной стороне выше, чем на ночной, при заданных одинаковых начальных значениях плотности на высоте 1000 км. Авторы связывают этот факт с поджатием магнитосферы на дневной стороне из-за ее обтекания потоком СВ.

По измерениям параметров СВ — плотности, динамического давления, электрического поля, и индекса геомагнитной активности K_p — удалось построить численную модель плазмосферы с машинным обучением, позволяющую предсказывать характеристики этой области магнитосферы на 1–2 дня вперед [Bianco et al., 2023]. Это свидетельствует о том, что прямое влияние СВ на внутреннюю область

магнитосфера существенно и требует внимательного анализа.

Почти все исследования в плазмосфере Земли базируются на измерениях плотности плазмы, чаще всего плотности электронов, которую можно получить из различных волновых экспериментов по исследованию низкочастотных излучений в магнитосфере. Прямые измерения параметров плазмосферы осуществляются очень редко, но только в таких экспериментах можно определить температуру и энергию тепловой плазмы.

В настоящей работе по данным измерений КА «Интербол-1» и чешского субспутника «Магион-5» проекта «Интербол» в 1995–2001 гг. мы вначале проанализируем зависимость характеристик экваториальной плазмосферы от расстояния до Земли (величины L) и местного магнитного времени, что позволит уменьшить влияние этих факторов на поиск других причин вариаций плотности и температуры плазмосферной плазмы. Затем будет рассмотрено влияние солнечной активности и параметров СВ на плотность и температуру холодных протонов в плазмосфере Земли.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Настоящая работа основана на данных, полученных с помощью широкугольного анализатора холодной плазмы с тормозящим потенциалом ПЛ-48 (цилиндр Фарадея), установленного на спутниках проекта «Интербол».

«Интербол-1» был запущен в августе 1995 г. на орбиту с апогеем $\sim 200\,000$ км, перигеем ~ 500 км, наклонением 63.8° и периодом обращения вокруг Земли ~ 90 ч. Пересечения плазмосферы происходили ~ 1 раз в 4 дня на фазе минимума 23-го солнечного цикла в 1995–1997 гг. и на фазе максимума цикла — в 1999–2000 гг. В начальный период после запуска спутник достигал ближайшей к Земле L -оболочки $L_{\min} \sim 1.4$. Позднее в результате эволюции орбиты ее перигей поднялся и в 1997–1998 гг. на фазе роста солнечного цикла спутник только изредка попадал в плазмосферу и регистрировал холодную плазму, а с 1999 г. и до конца активной работы спутника перигей орбиты понижался. На каждой орбите КА «Интербол-1» минимальные значения L наблюдались вблизи магнитного экватора, и это позволило проанализировать динамику параметров холодной плазмы в плоскости магнитного экватора в зависимости от L , исключив зависимость от широты [Котова, Безруких, 2022]. Энергетические спектры ионов (0–25 эВ) изменились в течение 2 с с различной периодичностью от 30 с до 5 мин в зависимости от телеметрической моды.

«Магион-5», данные которого также использованы для анализа, был запущен в августе 1996 г. вместе с основным КА «Интербол-2» на орбиту с наклонением $\sim 65^\circ$, перигеем $\sim 1.2 R_E$ и апогеем $\sim 4 R_E$. Из-за различных технических проблем данные прибора ПЛ-48 были получены только с августа 1999 г. до июля 2001 г., когда закончилось активное функционирование аппарата. Измерения на этом КА проводились с достаточно высоким временным разрешением, энергетический спектр тепловых протонов

измерялся за 0.4 с со скважностью ~ 8 с. Время обращения вокруг Земли КА «Магион-5» составляло ~ 6 ч, т. е. плазмосфера пересекалась четыре раза в сутки. Однако по разным причинам большинство данных было получено в сутки только на одной нисходящей ветви орбиты, изредка имеются данные с двух последовательных орбит спутника, но также только при входе КА в плазмосферу.

Оба КА стабилизировались вращением с двухминутным периодом вокруг оси, направленной на Солнце. При расчете плазменных параметров по измеренным спектрам предполагалось, что в тепловой области частицы распределены по энергиям по максвелловскому закону с учетом частичного экранирования потенциалом спутника, при этом учитывались скорость совместного вращения плазмы с Землей и скорость КА [Котова et al., 2014].

Для анализа зависимостей параметров плазмосферной плазмы от солнечной активности и характеристик СВ были созданы базы данных, полученных в периоды слабой и умеренной геомагнитной активности вблизи плоскости магнитного экватора Земли. Это исключает влияние на эти данные зависимости от магнитной широты [Artemyev et al., 2014]. Данные КА «Интербол-1» были получены в диапазоне $1.2 < L < 5$, КА «Магион-5» — $2.5 < L < 3.5$. На рис. 1 показаны радиальные распределения плотности (a) и температуры (b) протонов в плазмосфере в экваториальной плоскости по данным КА «Интербол-1» [Котова, Безруких, 2022]. Данные разделены по местному времени, при этом для КА «Интербол-1» оказалось, что дневные пересечения происходили с сентября по январь, а ночные — с марта по июль. Видно, что при $L > 3.5$ зависимости, аппроксимирующие распределение плотности, и поля точек совпадают, однако во внутренней плазмосфере плотность днем выше плотности ночью примерно в 1.5 раза. Общее, независимо от местного времени и сезона, экваториальное распределение плотности N было аппроксимировано зависимостью

$$N = 6500 L^{-2.7}. \quad (2)$$

В работе [Котова, Безруких, 2022] показано, что (2) удовлетворительно согласуется с другими эмпирическими соотношениями, полученными в меньшем диапазоне расстояний от Земли. С помощью масштабирования $N \sim L^{-2.7}$ данные двух спутников были приведены к $L=3$. Такая процедура уменьшает влияние зависимости плотности плазмосферы от удаленности от Земли. Зависимость от местного времени более подробно будет рассмотрена в следующем параграфе. Аналогично температура протонов T , измеренная на разных L -оболочках на КА «Интербол-1» и «Магион-5», приводилась к $L=3$ с помощью выражения $T \sim L^{0.4}$, хотя из рис. 1, б видно, что распределения T имеют гораздо больший разброс значений и на 15–20 % различаются днем и ночью.

2. ЗАВИСИМОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМОСФЕРЫ ОТ МЕСТНОГО МАГНИТНОГО ВРЕМЕНИ

На рис. 2 представлена зависимость от местного магнитного времени плотности (a) и температуры (b)

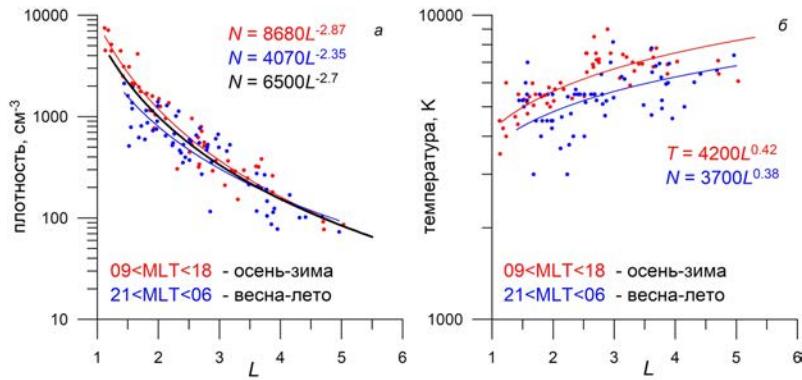


Рис. 1. Зависимости от расстояния до центра Земли плотности (а) и температуры (б) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмофера, для двух интервалов MLT: дневные часы 09.00–18.00 (красные точки) и ночные часы 21.00–06.00 (синие точки). Соответствующие степенные аппроксимации показаны теми же цветами. Черная кривая на панели а соответствует общей аппроксимации (2)

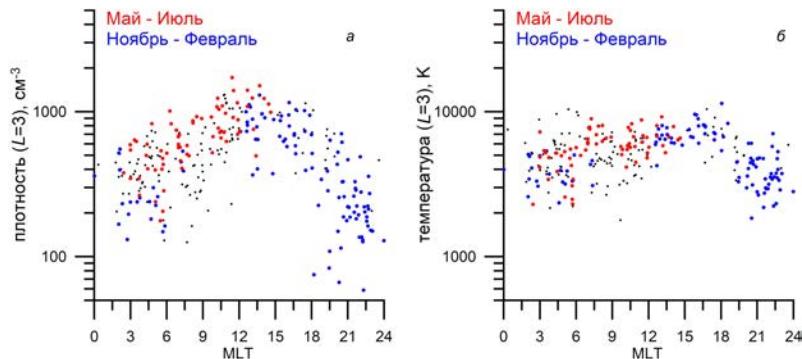


Рис. 2. Зависимости плотности (а) и температуры (б) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмофера, от местного магнитного времени. Черные точки — все измерения, красные — измерения, выполненные в мае–июле вблизи летнего солнцестояния, синие — параметры, измеренные зимой вблизи зимнего солнцестояния

протонов, рассчитанных по данным КА «Магион-5». Все измерения на КА «Магион-5» проводились в годы максимума 23-го цикла солнечной активности над областью 50° W – 60° E. Видны значительные изменения параметров плазмосферной плазмы в течение суток.

По этим данным максимальная плотность наблюдается в окрестности полудня. В 12 ч плотность протонов превосходит ночную плотность приблизительно в 2–5 раз (рис. 2, а). Максимум температуры регистрировался около 16 ч (рис. 2, б), что соответствует максимуму в суточном ходе температур ионов и электронов ионосферы на уровне F-слоя и выше [Ляшенко, 2005]. Видно, что суточный ход плотности и температуры ионов не зависит от сезона измерений: видимое изменение параметров, измеренных в мае–июле (красные точки) вблизи летнего солнцестояния, плавно переходит в изменение параметров, измеренных зимой (синие точки) вблизи зимнего солнцестояния. Можно также заметить некоторый подъем температуры в ранние утренние часы, совпадающий с суточными вариациями температуры в ионосфере.

Данные, полученные КА «Интербол-1», относятся к годам как низкой солнечной активности (1995–1997 гг.), так и максимума солнечного цикла (1999–2000 гг.). При представлении всех данных в зависимости от MLT никакого суточного изменения параметров не наблюдается. На рис. 3 показаны изме-

нения плотности и температуры протонов в течение суток, но измеренные только в годы максимума солнечного цикла в интервале 60° W — 60° E. Несмотря на малое количество точек, суточный ход температуры и плотности аналогичен показанному на рис. 2 по данным КА «Магион-5».

3. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Как уже упоминалось, измерения на КА «Магион-5» проводились в годы максимума 23-го цикла, когда параметры, характеризующие солнечную активность, меняются в широких пределах и это дает возможность посмотреть зависимость плотности и температуры протонов в плазмосфере от солнечной активности. Измерения на КА «Интербол-1» проходили и в годы минимума (1995–1997 гг.), и годы максимума цикла, что позволяет сопоставить плотность и температуру плазмы в плазмосфере в разные периоды.

На рис. 4 показаны зависимости плотности (а, б) и температуры (в) протонов в плазмосфере, измеренные вблизи плоскости магнитного экватора и нормированные на $L=3$, от числа солнечных пятен R_s (а) и потока солнечного радиоизлучения $F10.7$ (б, в).

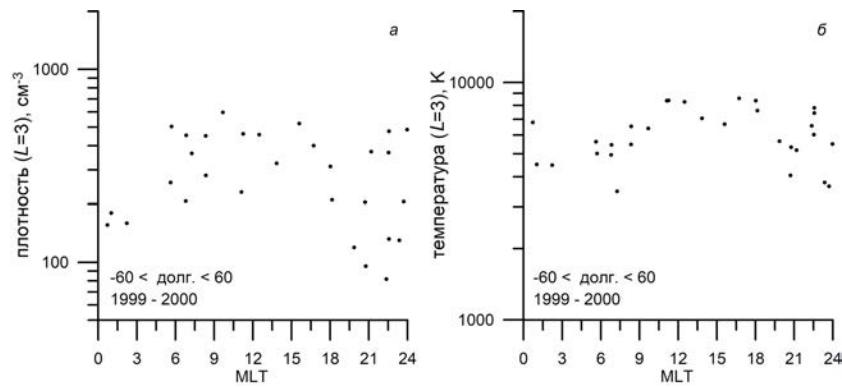


Рис. 3. Зависимости плотности (а) и температуры (б) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмофера, от местного магнитного времени. Представленные измерения сделаны в 1999–2000 гг. в диапазоне географических долгот от -60° до 60°

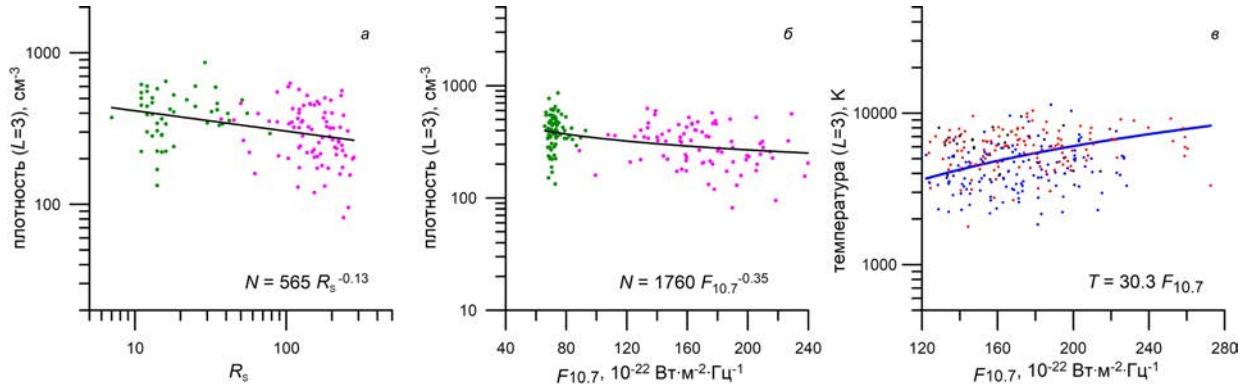


Рис. 4. Зависимости плотности (а, б) и температуры (в) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» (а, б) и «Магион-5» (в) в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от индексов солнечной активности R_s (а) и $F10.7$ (б, в). Зеленым цветом на левых панелях (а, б) отмечены измерения при минимуме солнечной активности (1995–1997 гг.), фиолетовым цветом — измерения в максимуме солнечной активности (1999–2000 гг.). На правой панели (в) красным цветом показаны дневные измерения (06–18 MLT), синим цветом — ночные (18–06 MLT)

Индекс $F10.7$ неплохо коррелирует с потоком солнечного излучения в EUV-диапазоне. Этот поток является основным фактором ионизации ионосферы от слоя Е и выше [Chen et al., 2011]. Хотя $F10.7$ не всегда корректно описывает поток EUV-излучения, именно он обычно используется для оценок его вариаций.

Данные КА «Интербол-1» (рис. 4, а, б) показывают, что плотность протонов в минимуме цикла (зеленые точки) в среднем выше, чем в максимуме (фиолетовые точки). По данным КА «Магион-5» в максимуме солнечной активности при изменении R_s от 40 до 350 и $F10.7$ от 120 до 325 выявить какую-либо зависимость плотности протонов в плазмосфере от этих индексов не удалось. Однако видно возрастание и дневных, и ночных температур протонов с ростом солнечной активности (рис. 4, в).

4. 27-ДНЕВНЫЕ И ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОСФЕРЫ

На рис. 5 предпринята попытка обнаружения вариаций температуры и плотности протонов в плазмосфере с периодом около 27 сут. Вертикальные линии отмечают официальные данные начала циклов Кэррингтона (~ 27.3 сут.) [<https://www.astroleague.org/files/obsclubs/Carrington%20Rotation%20Start%20Dates.pdf>].

На нижней панели показаны изменения $F10.7$. Пик этого индекса в конце марта – начале апреля 2001 г. связан с сильными солнечными вспышками класса X в этот период.

Можно выделить синусоидальные вариации температуры с января по июнь 2001 г с периодом ~ 28 сут, но заметной корреляции с $F10.7$ не наблюдается. Это неудивительно, так как корреляция температуры и плотности плазмы в плазмосфере с $F10.7$ плохо выражена (рис. 4, б, в).

На рис. 6 показаны вариации температуры (красные точки) и плотности (синие), измеренные на КА «Магион-5» и нормированные на $L=3$ за весь период работы прибора ПЛ-48. По графику изменения температуры протонов видны полугодовые вариации с максимумами в окрестности периодов равноденствия весной (21 марта) и осенью (23 сентября), но выделяется и годовой период изменений температуры и плотности (вертикальные штриховые линии). На графике изменения плотности преобладает максимум в мае–июне 2000 г. Этот максимум, так же как и в феврале–марте 2001, очевидно, является следствием полуденного максимума плотности (см. рис. 2), так как измерения в этот период проходили в дневном секторе плазмосферы. Рисунок 2 показывает, что во внутренней плазмосфере зависимость плотности плазмы от местного времени более существенна, чем

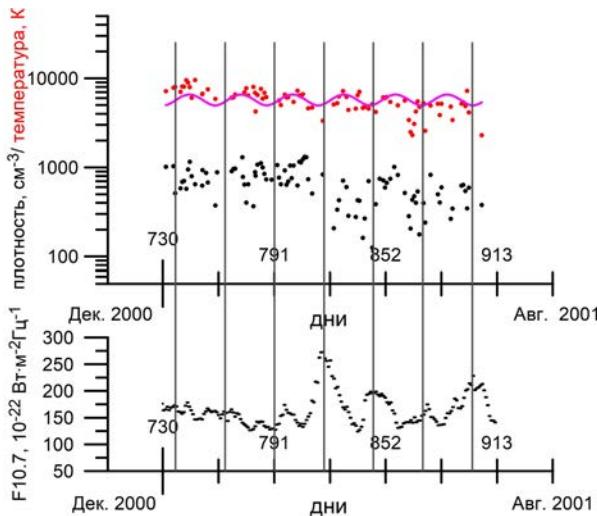


Рис. 5. Изменение с января по июнь 2001 г. температуры (верхняя панель) и плотности (средняя панель) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосферы. Ось абсцисс — дни с начала 1999 г. Розовая кривая на верхней панели — аппроксимация данных по температуре синусоидальной зависимости. Нижняя панель — вариации $F10.7$ [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Вертикальные линии — начала солнечных оборотов Кэррингтона, по наблюдениям на Земле [<https://www.astroleague.org/files/obsclubs/Carrington%20Rotation%20Start%20Dates.pdf>]

зависимость от сезона измерений, по крайней мере, в секторе долгот, в котором проводились измерения на КА «Магион-5» (50° W – 60° E). Динамика температуры, по-видимому, свидетельствует о том же. Локальный максимум температуры протонов, наблюдаемый вблизи весеннего равноденствия в начале апреля 2000 г. (~460 день) регистрировался около 16–17 ч MLT. Затем температура достигает локального максимума в середине августа 2000 г. около 6 ч MLT. В те же часы максимумы температур видны на рис. 2, б, хотя периоды этих наблюдений близки к весеннему и осеннему равноденствию.

Измерения на КА «Интербол-1» проходили не столь часто, как на КА «Магион-5», и потому объема данных недостаточно для рассмотрения сезонных вариаций параметров плазмосферной плазмы.

5. СВЯЗЬ ПЛОТНОСТИ И ТЕПЛОВОГО ДАВЛЕНИЯ ИОНОВ В ПЛАЗМОСФЕРЕ С ПЛОТНОСТЬЮ И ДИНАМИЧЕСКИМ ДАВЛЕНИЕМ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Несмотря на то, что КА «Интербол-1» пересекал плазмосферу Земли только раз в четверо суток и только при достаточно низком перигее орбиты, длительный период работы КА позволяет проанализировать зависимость характеристик холодной плазмосферной плазмы от параметров набегающего на магнитосферу Земли потока СВ.

На рис. 7 показаны зависимости плотности (а, б) и теплового давления протонов (в), измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, от плотности N_{SW} (а) и динами-

ческого давления (б, в) СВ ρV_{SW}^2 (ρ — массовая плотность, V_{SW} — скорость СВ). Прямые линии отображают аппроксимирующие зависимости, при этом черным цветом (а, в) показаны зависимости, полученные по всем точкам (соотношения, написанные черным цветом). Коэффициенты детерминации D указаны также для аппроксимаций по всем измерениям. На панели б для примера соответствующими цветами показаны аппроксимации отдельно для измерений, выполненных в годы минимума и максимума. Видно, что зависимости близки. При этом еще раз продемонстрировано, что плотность тепловых протонов в плазмосфере в годы низкой солнечной активности в среднем выше, чем в годы высокой.

Зависимости, показанные на панелях а, б, взаимосвязаны, поскольку динамическое давление СВ главным образом определяется его плотностью (рис. 8). Красная линия и соответствующее соотношение на панели а получены из уравнений $N = 142.3\rho V_{SW}^2$ и $\rho V_{SW}^2 = 0.28N_{SW}$. Рассчитанная зависимость практически совпадает с полученной аппроксимацией. Таким образом, невозможно сказать, какая зависимость основная.

Зависимость на панели в, возможно, является следствием зависимости плотности протонов в плазмосфере от динамического давления СВ (б).

Данные КА «Магион-5» указывают на наличие тех же связей между характеристиками плазмосферной плазмы и параметрами СВ, но только для дневной области плазмосферы (рис. 9).

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мы постарались по данным спутников проекта «Интербол» максимально подробно проанализировать различные факторы, влияющие на изменения плотности и температуры холодной плазмы в экваториальной плоскости внутренней части плазмосферы Земли. Основным фактором, определяющим распределение плотности и температуры холодной плазмосферной плазмы около Земли, является расстояние магнитных плазменных оболочек от Земли. Для исключения влияния удаленности от Земли места измерения плазмы данные масштабировались на магнитную оболочку $L=3$. Анализировались данные, полученные только внутри плазмосферы, но не в области ее пограничного слоя или в плазмосферных пломажах.

Вторым фактором, который может существенно влиять на распределение плазмы в плазмосфере, является местное время. Измерения, выполненные на КА «Магион-5» в годы высокой солнечной активности, свидетельствуют о сильной зависимости плотности протонов от местного времени измерений. Максимум плотности наблюдается около 12 ч MLT, плотность в ночные часы в среднем в 2–5 раз ниже.

Изменения температуры протонов во внутренней плазмосфере в зависимости от MLT аналогичны суточным вариациям температуры ионосферы, что подтверждает и анализ, выполненный ранее [Kotova et al., 2002a, 2008]. По данным КА «Магион-5» было пока-

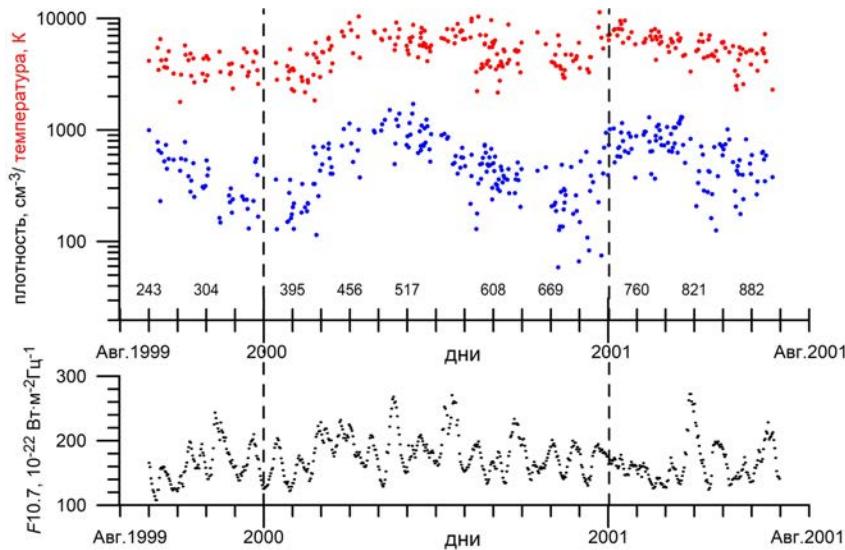


Рис. 6. Вариации температуры (красные точки) и плотности (синие) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосфера, с сентября 1999 г. по июнь 2001 г. Ось абсцисс — дни с начала 1999 г. Нижняя панель — вариации $F_{10.7}$ [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>]. Вертикальные линии — смена года

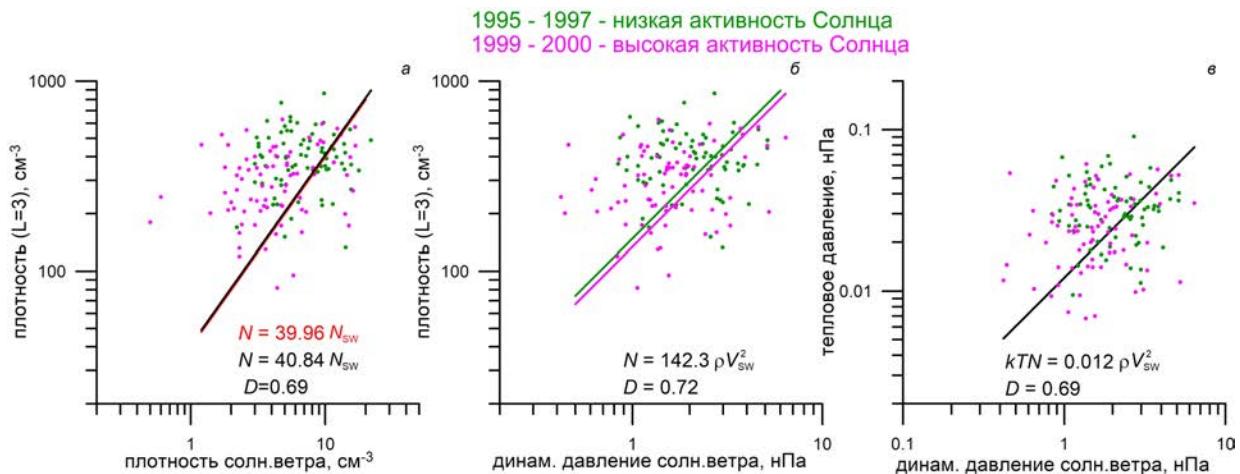


Рис. 7. Зависимости плотности (a, б) и теплового давления (c) протонов, измеренных на КА «Интербол-1» в плоскости магнитного экватора плазмосфера, от плотности N_{SW} (a) и динамического давления (б, в) СВ. Зеленый цвет — измерения в минимуме солнечной активности (1995–1997 гг.), фиолетовый — в максимуме (1999–2000 гг.). Прямые линии — аппроксимирующие зависимости

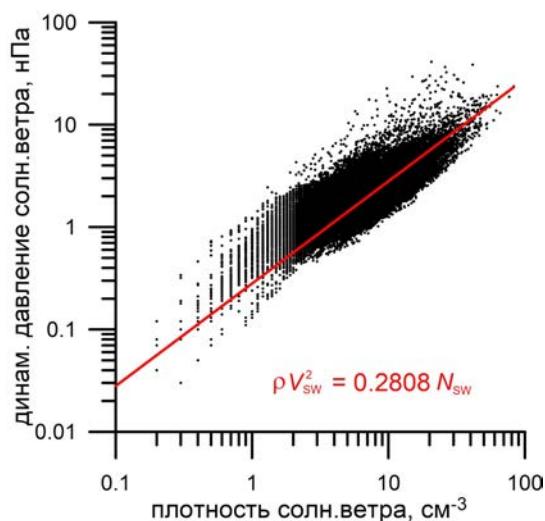


Рис. 8. Зависимость динамического давления СВ от плотности протонов 01.08.1995–30.09.2000

зано, что температура ионов в плазмосфере при $L < \sim 2.5$ –2.8 близка к температуре электронов в верхней ионосфере при всех значениях MLT, кроме полуденно-вечерней области (12–20 MLT), где температура в плазмосфере выше, чем в ионосфере [Kotova et al., 2008]. Отношение температуры ионов в плазмосфере к температуре электронов верхней ионосфере возрастает с L . В годы высокой солнечной активности рост указанного отношения температур происходит быстрее, чем в годы низкой [Котова, Безруких, 2022].

Данные КА «Интербол-1», относящиеся к периоду высокой солнечной активности, подтверждают суточные вариации плотности и температуры протонов, выявленные по измерениям КА «Магион-5». Однако возможно, что из-за заметной разницы между магнитной и географической осями Земли повышение плотности ионов в дневные часы и суточные вариации температуры также зависят

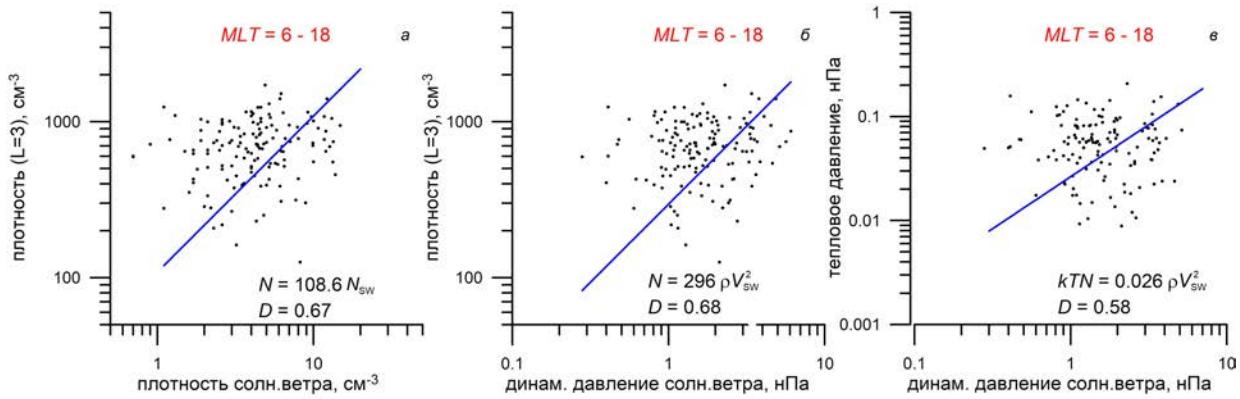


Рис. 9. Зависимости плотности (*a*, *б*) и теплового давления (*в*) протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора дневной плазмосферы, от плотности N_{SW} (*а*) и динамического давления ρV_{SW}^2 (*б*, *в*) солнечного ветра. Прямые линии — аппроксимирующие зависимости

от географической долготы места, над которым производятся измерения. Для проверки этого имеющихся данных недостаточно.

Помимо рассмотренных двух очевидных факторов, определяющих плотность и температуру плазмосферной плазмы, солнечная, геомагнитная активность и поток СВ, набегающий на Землю и формирующий распределение плазмы и магнитного поля в магнитосфере, оказывают существенное влияние на характеристики холодной плазмы.

По данным КА «Интербол-1», полученным в годы минимума и максимума 23-го цикла, плотность протонов внутренней плазмосферы в годы низкой солнечной активности была в среднем больше, чем в годы высокой. Измерения на КА «Интербол-1» в периоды минимума и максимума солнечного цикла равномерно распределены по местному времени. Разброс значений плотности при этом достаточно большой (см. рис. 4). Полученный результат не совпадает с полученным ранее [Park et al., 1978] по наземным данным измерений вистлеров в 1957–1964 гг. Результаты же, полученные по данным полного электронного содержания в плазмосфере [Shim et al., 2017], зависят, прежде всего, от определения *PEC* которое может включать или не включать область верхней ионосферы с преобладанием ионов кислорода. Высота перехода от кислорода к водороду также зависит от многих факторов.

Более вероятной причиной расхождения данных, полученных на КА «Интербол-1» в минимуме и максимуме солнечной активности, и волновых измерений плотности электронов является различие массового состава плазмосферной плазмы в эти периоды. По измерениям на КА «Интербол-1» мы определяем только плотность протонов, рассчитывая ее на основе аппроксимации максвелловским распределением главного пика в энергетическом спектре ионов [Kotova et al., 2014]. Между тем, по различным данным было показано, что с ростом солнечной активности и величины $F10.7$ в плазмосфере увеличивается относительное содержание ионов гелия и кислорода [Craven et al., 1997; Denton et al., 2025]. В силу квантической природы плазмы плотность электронов равна сумме плотностей всех положительных ионов, по-

этому при значительном увеличении количества более тяжелых ионов плотность протонов может и уменьшаться.

Никакого тренда в изменении температуры протонов при сравнении измерений в минимуме и максимуме солнечного цикла по данным КА «Интербол-1» не выявлено. Более подробные данные КА «Магион-5», полученные в период максимума цикла, не указывают на какую-либо зависимость плотности ионов от солнечной активности, но свидетельствуют об увеличении и дневных, и ночных температур протонов с ростом индексов солнечной активности.

При анализе вариаций плотности и температуры протонов, измеренных на КА «Магион-5» в плоскости магнитного экватора плазмосферы, в годы максимума цикла (сентябрь 1999 г. – июнь 2001 г.) определить сезонные вариации не удается, поскольку явно более существенными оказываются суточные вариации, которые скрывают, по-видимому, менее значимые сезонные изменения параметров.

Иногда можно выделить 27-дневные вариации температуры в плазмосфере, но для подробного анализа таких вариаций и их связи с потоком солнечного УФ-излучения нужно больше данных.

Рассмотренные данные в основном относятся к периодам слабой и умеренной геомагнитной активности. Никак не выделяются из остальных плазмосферных данных измерения, выполненные на главной фазе магнитных бурь: 22.10.1999 и 13.01.1996 на КА «Интербол-1», 15.10.1999, 26.06.2000, 29.08.2000, 20.03.2001, 28.03.2001 — на КА «Магион-5» (один пролет через плазмосферу 13.08.2000 во время восстановления после значительной бури (минимальный $Dst = -234$ нТл, 12.08), а также измерения на этом спутнике во время SSC 26.11.2000). Никакой зависимости плотности или температуры протонов внутренней плазмосферы от индексов геомагнитной активности K_p , Dst , AE не выявлено. Однако это относится к средним характеристикам плазмосферы. Для того чтобы посмотреть изменения характеристик плазмы в одном событии, например в течение одной магнитной бури, надо измерять плотность и температуру плазмы в одной области в течение длительного времени. Один раз за 6 ч такие измере-

ния удалось провести на КА «Интербол-2» [Веригин и др., 2011]. Было показано, что во время главной фазы магнитных бурь температура ионов плазмосферы, как правило, понижается, плотность плазмы при этом повышается или сохраняется на уровне, характерном для невозмущенных условий. Такое поведение температуры ионов удалось объяснить с помощью модели перемещения дрейфовой оболочки от Земли, вызванного уменьшением магнитного поля во внутренней плазмосфере при развитии магнитной бури.

И, наконец, обратимся к зависимости характеристик плазмосферы от параметров СВ. Данные КА «Интербол-1» свидетельствуют о возрастании плотности плазмосферной плазмы с увеличением внешнего напорного (динамического) давления СВ. На такую же зависимость в дневной области плазмосферы указывают данные КА «Магион-5». Давление СВ играет основную роль во взаимодействии геомагнитного поля и потока СВ. Это взаимодействие определяет форму магнитосферы, ее поджатие с дневной стороны и вытянутый в антисолнечном направлении магнитный хвост. Однако внутри магнитосферы давление холодной магнитосферной плазмы чрезвычайно мало по сравнению с давлением магнитного поля и не может непосредственно зависеть от давления СВ. Однако формирование плазмосферы и плазмопаузы существенно определяется электрическим полем конвекции в магнитосфере. Величина и распределение в магнитосфере этого поля конвекции, вероятно, зависят от давления СВ [Лукьянова, 2004]. По-видимому, именно таким опосредованным образом давление и плотность СВ влияют на плотность холодных протонов. Этот вопрос требует серьезного теоретического анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным КА «Интербол-1» и «Магион-5», полученным в плазмосфере Земли вблизи экваториальной плоскости, проанализированы возможные причины вариаций плотности и температуры тепловых (холодных) протонов. Получены следующие результаты.

Основными факторами, определяющими изменения плотности и температуры холодной плазмы в экваториальной плоскости плазмосферы, являются удаленность магнитной оболочки от Земли и местное время. В среднем изменения температуры протонов во внутренней плазмосфере в зависимости от MLT аналогичны суточным вариациям температуры ионосферы — максимальные температуры наблюдаются после рассвета и после полудня. По данным спутника «Магион-5» в годы высокой солнечной активности максимум плотности протонов наблюдался в ~ 12 ч MLT.

Дополнительно плотность и температура плазмы во внутренней плазмосфере зависят от фазы 11-летнего солнечного цикла. Плотность протонов в годы минимума в среднем выше, чем в годы максимума, что, вероятно, является следствием изменения массового состава плазмы в плазмосфере и понижения доли протонов в плотности ионов в фазе максимума.

Дневные и ночные температуры протонов возрастают с увеличением потока УФ-излучения Солнца, по крайней мере, в годы максимума.

Плотность и тепловое давление плазмосферной плазмы увеличиваются с ростом динамического давления и/или плотности невозмущенного СВ, что, видимо, связано с перестройкой электрического поля конвекции в магнитосфере.

Для более полного исследования причин вариаций характеристик тепловой плазмосферной плазмы, с одной стороны, необходимо проанализировать данные волновых наземных и спутниковых измерений, которые позволяют определять плотность фоновой плазмы, чтобы определить суточный ход плотности в различных долготных секторах в течение всего солнечного цикла. Дополнительный анализ поведения температуры плазмосферной плазмы при отсутствии новых локальных плазменных измерений, по-видимому, следует провести по данным предыдущих экспериментов, выполненных, например, на спутниках Dynamics Explorer-1, 2 (DE-1 и DE-2). С другой стороны, для понимания причин изменения характеристик плазмосферы необходимо теоретическое рассмотрение физических взаимосвязей процессов в магнитосфере и межпланетной среде.

Авторы благодарны создателям сайта за возможность использования базы данных по параметрам солнечного ветра и индексам солнечной активности [<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веригин М.И., Котова Г.А., Безруких В.В. и др. Дрейф ионов во внутренней плазмосфере Земли во время магнитосферных возмущений и динамика температуры протонов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011, т. 51, № 1, с. 41–50.
- Котова Г.А., Безруких В.В. Распределения плотности и температуры тепловых протонов в плоскости магнитного экватора плазмосферы Земли по данным космического аппарата «Интербол-1». *Геомагнетизм и аэрономия*. 2022, т. 62, № 5, с. 590–598. DOI: [10.31857/S0016794022050066](https://doi.org/10.31857/S0016794022050066).
- Лукьянова Р.Ю. Влияние резких изменений динамического давления солнечного ветра на конвекцию в полярной шапке. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004, т. 44, № 6, с. 750–761.
- Ляшенко М.В. Вариации параметров ионосферной плазмы в период спада 23 цикла солнечной активности. *Труды VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околосолнечного космического пространства», БШФФ-2005*. 2005, с. 108–112. URL: <http://bsfp.izsf.irk.ru/sites/default/files/school/2005/Lyashenko-108-112.pdf> (дата обращения 30 мая 2025 г.).
- Чугунин Д.В., Котова Г.А., Клименко М.В., Клименко В.В. Долготная зависимость распределения концентрации H^+ в плазмосфере по данным спутника «Интербол-1». *Космические исследования*. 2017, т. 55(6), с. 471–478. DOI: [10.7868/S0023420617060097](https://doi.org/10.7868/S0023420617060097).
- Artemyev A.V., Kotova G.A., Verigin M.I. Role of the field-aligned density distribution for efficiency of electron scattering by hiss waves. “*Physics of Auroral Phenomena*”. *Proc. XXXVII Annual Seminar. Apatity*. 2014, pp. 55–58.
- Bianco S., Haas B., Shprits Y. PINE-RT: An operational real-time plasmasphere model. *Front. Astron. Space Sci.* 2023, vol. 10, 1116396. DOI: [10.3389/fspas.2023.1116396](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1116396).
- Carpenter D.L. Electron-density variations in the magnetosphere deduced from whistler data. *J. Geophys. Res.* 1962, vol. 67, no. 9, pp. 3345–3360. DOI: [10.1029/JZ067i009p03345](https://doi.org/10.1029/JZ067i009p03345).

- Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, pp. 1097–1108. DOI: [10.1029/91JA01548](https://doi.org/10.1029/91JA01548).
- Chen Y., Liu L., Wan W. Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A04304. DOI: [10.1029/2010JA016301](https://doi.org/10.1029/2010JA016301).
- Craven P.D., Gallagher D.L., Comfort R.H. Relative concentration of He⁺ in the inner magnetosphere as observed by the DE 1 retarding ion mass spectrometer. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, no. A2, pp. 2279–2289. DOI: [10.1029/96JA02176](https://doi.org/10.1029/96JA02176).
- Denton R.E., Takahashi K., Hartley D.P. Models for plasmasphere and plasmatrough density and average ion mass including dependence on L, MLT, geomagnetic activity, and phase of the solar cycle. *Front. Astron. Space Sci.* 2025, vol. 11, 1459281. DOI: [10.3389/fspas.2024.1459281](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1459281).
- Jakowski N., Hoque M.M. A new electron density model of the plasmasphere for operational applications and services. *J. Space Weather Space Clim.* 2018, vol. 8, no. A16. DOI: [10.1051/swsc/2018002](https://doi.org/10.1051/swsc/2018002).
- Kim E., Kim Y.H., Jee G., Sscessanga N. Reconstruction of plasmaspheric density distributions by applying a tomography technique to Jason-1 plasmaspheric TEC measurements. *Radio Sci.* 2018, vol. 53, pp. 866–873. DOI: [10.1029/2017RS006527](https://doi.org/10.1029/2017RS006527).
- Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M., Smilauer J. New aspects in plasmaspheric ion temperature variations from Interball 2 and Magion 5 measurements. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 2–4, pp. 399–406. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.08.054](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.054).
- Kotova G., Bezrukikh V., Verigin M. The effect of the Earth's optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 120, pp. 9–14. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.08.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.08.013).
- Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Lezhen L.A. Temperature and density variations in the dusk and dawn plasmasphere as observed by INTERBALL TAIL in 1999–2000. *Adv. Space Res.* 2020a, vol. 30, no. 7, pp. 1831–1834. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00458-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00458-1).
- Kotova G.A., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., et al. Interball 1/Alpha 3 cold plasma measurements in the evening plasmasphere: quiet and disturbed magnetic conditions. *J. Adv. Space Res.* 2002b, vol. 30, iss. 10, pp. 2313–2318. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)80256-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)80256-3).
- Lee C.-K., Han S.-C., Bilitza D., Seo K-W. Global characteristics of the correlation and time lag between solar and ionospheric parameters in the 27-day period. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 77, pp. 219–224. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.01.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.010).
- Menk F.W., Ables S.T., Grew R.S., et al. The annual and longitudinal variations in plasmaspheric ion density. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A03215. DOI: [10.1029/2011JA017071](https://doi.org/10.1029/2011JA017071).
- Park C.G., Carpenter D.L., Wiggin D.B. Electron density in the plasmasphere: Whistler data on solar cycle, annual, and diurnal variations. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, no. A7, pp. 3137–3144. DOI: [10.1029/JA083iA07p03137](https://doi.org/10.1029/JA083iA07p03137).
- Rich F.J., Sultan P.J., Burke W.J. The 27-day variations of plasma densities and temperatures in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A7, 1297. DOI: [10.1029/2002JA009731](https://doi.org/10.1029/2002JA009731).
- Richards P.G., Chang T., Comfort R.H. On the causes of the annual variation in the plasmaspheric electron density. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2000, vol. 62, pp. 935–946.
- Shim J.S., Jee G., Scherliess L. Climatology of plasmaspheric total electron content obtained from Jason 1 satellite. *J. Geophys. Res.* 2017, vol. 122, pp. 1611–1623. DOI: [10.1002/2016JA023444](https://doi.org/10.1002/2016JA023444).
- Thaller S.A., Wygant J.R., Cattell C.A., et al. Solar rotation period driven modulations of plasmaspheric density and convective electric field in the inner magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2019, vol. 124, pp. 1726–1737. DOI: [10.1029/2018JA026365](https://doi.org/10.1029/2018JA026365).
- Yasyukevich A.S., Vesnin A.M., Yasyukevich Yu.V., Padokhin F.M. Correlation between total and plasmasphere electron content and indexes of solar and geomagnetic activity. *Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP)*. Kazan. Russia. 2019, pp. 87–90. DOI: [10.1109/RWP.2019.8810364](https://doi.org/10.1109/RWP.2019.8810364).
URL: <https://www.astroleague.org/files/obsclubs/Carrington%20Rotation%20Start%20Dates.pdf> (дата обращения 30 мая 2025 г.).
- URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi> (дата обращения 30 мая 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
- Как цитировать эту статью:*
Котова Г.А., Чугунин Д.В., Безруких В.В. Влияние солнечной активности и параметров солнечного ветра на температуру и плотность плазмы в плазмосфере Земли. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 26–35. DOI: [10.12737/szf-113202503](https://doi.org/10.12737/szf-113202503).

ВЛИЯНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОКАЗАТЕЛЬ СТЕПЕНИ СИММЕТРИИ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

INFLUENCE OF INTERPLANETARY PARAMETERS ON THE DEGREE OF SYMMETRY OF THE RING CURRENT

Г.А. Макаров 

Институт космомагнитических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru

Г.А. Makarov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.ysn.ru

Аннотация. В работе исследуется влияние межпланетных факторов на степень симметрии магнитосферного кольцевого тока. Рассматриваются геомагнитные индексы $SYM-H$, $ASY-H$ и межпланетные параметры за период 1981–2015 гг. Показателем степени симметрии кольцевого тока является отношение $SYM-H/ASY-H$. Анализ проводится по среднегодовым значениям геомагнитных и межпланетных параметров. Такой подход позволяет выделить крупномасштабные закономерности. Была рассмотрена связь показателя степени симметрии кольцевого тока и индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ с величиной B межпланетного магнитного поля (ММП), северо-южной компонентой B_n ММП и скоростью V солнечного ветра. Был сделан вывод, что свойства магнитосферных кольцевых токов отражаются этими индексами более адекватно при учете смещений их значений, чем без учета смещений. Получено, что при учете смещения значений $ASY-H$ симметричный кольцевой ток примерно в два раза превалирует над асимметричным для средних условий в солнечном ветре: $V < 550$ км/с, $B < 10$ нТл, $|B_n| < 2$ нТл. При спокойном состоянии солнечного ветра ($V < 450$ км/с, $B < 5.5$ нТл, $|B_n| < 0.7$ нТл) показатель степени симметрии кольцевого тока увеличивается. Установлено, что при увеличении абсолютных значений межпланетных параметров V , B , B_n индекс симметричного кольцевого тока $SYM-H$ растет сильнее, чем индекс асимметричного кольцевого тока $ASY-H$.

Ключевые слова: геомагнитные индексы $SYM-H$ и $ASY-H$, магнитосферный кольцевой ток, межпланетные параметры.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитосферный кольцевой ток состоит из двух основных частей: симметричной и асимметричной. Для оценки симметричной и асимметричной частей кольцевого тока были разработаны геомагнитные индексы SYM и ASY соответственно [Iyemori et al., 1992].

Исследованию влияния межпланетных параметров на индексы SYM и ASY посвящено достаточно много работ. В [Shi et al., 2006] обнаружено, что при отрицательной северо-южной компоненте B_n межпланетного магнитного поля (ММП) повышение динамического давления солнечного ветра (СВ) до-

Abstract. The paper studies the influence of interplanetary factors on the degree of symmetry of the magnetospheric ring current. The geomagnetic indices $SYM-H$, $ASY-H$, and interplanetary parameters for the period 1981–2015 are considered. The indicator of the degree of symmetry of the ring current is the ratio $SYM-H/ASY-H$. Analysis is based on annual averages of geomagnetic and interplanetary parameters. This approach allows us to identify large-scale patterns. The relationships are examined of the degree of symmetry of the ring current and the indices $SYM-H$ and $ASY-H$ with the value B of the interplanetary magnetic field (IMF), the IMF north-south component B_n , and the solar wind velocity V . It is concluded that properties of magnetospheric ring currents are described by these indices more adequately when offsets in their values are taken into account than without regard for them. It is found that when offsets in $ASY-H$ are considered the symmetric ring current prevails approximately twice over the asymmetric one for average conditions in the solar wind: $V < 550$ km/s, $B < 10$ nT, $|B_n| < 2$ nT. Under quiet solar wind conditions ($V < 450$ km/s, $B < 5.5$ nT, $|B_n| < 0.7$ nT), the degree of symmetry of the ring current increases. It is established that with intensification of interplanetary parameters (V , B , $|B_n|$) the symmetric ring current index $SYM-H$ grows more strongly than the asymmetric ring current index $ASY-H$.

Keywords: geomagnetic indices $SYM-H$ and $ASY-H$, magnetospheric ring current, interplanetary parameters.

полнительно увеличивает асимметрию кольцевого тока. В [Singh et al., 2013] исследовано влияние на $ASY-H$ и $ASY-D$ плавных и резких изменений B_n ММП во время магнитных суббурь. В [Hajducek et al., 2017] на основе системы SWMF смоделирован прогноз геомагнитных индексов K_p , $SYM-H$, AL и обнаружено, что модель отлично справляется с предсказанием $SYM-H$. В [Bhaskar, Vichare, 2019] с использованием искусственной нейронной сети реализован успешный прогноз $SYM-H$ и $ASY-H$ во время девяти геомагнитных бурь 24-го солнечного цикла; в качестве входных данных использовались скорость и плотность СВ, а также B , B_y , B_z ММП. На главной

фазе сильных бурь отмечаются заметные отклонения спрогнозированных значений индексов от наблюдавшихся, что указывает на влияние внутренних факторов, таких как магнитосферные процессы. В статье [Макаров, 2022] на большом статистическом материале рассмотрены связи *SYM-H* и *ASY-H* с ключевыми межпланетными параметрами и получено, что зависимость *ASY-H* и *SYM-H* от северо-южной компоненты ММП определяется величиной ММП. Кроме того, установлена зависимость *SYM-H* и *ASY-H* от плазменного параметра β СВ: их абсолютные величины уменьшаются с ростом β независимо от знака B_n ММП [Макаров, 2024]. Предполагается, что это обусловлено переходом магнитосферы в спокойное состояние вследствие возрастающего преобладания в СВ теплового давления над магнитным и уменьшения уровня турбулентности.

Корреляционные связи *ASY-H*-индекса с параметрами межпланетной среды для 107 магнитных бурь с $Dst \leq -50$ нТл, индуцированных разными типами течений СВ (CIR — коротирующими высокоскоростными потоками и ICME — межпланетными выбросами корональной массы), исследованы в работе [Бороев, Васильев, 2020] и получено, что среднее значение *ASY-H* на главной фазе магнитной бури зависит от электрического поля и южной компоненты ММП независимо от типа течения, при этом связь между *ASY-H* и скоростью СВ не обнаружена. В [Namuun et al., 2023] рассмотрены корреляционные связи между индексом *SYM-H* и различными межпланетными параметрами для 131 магнитной бури, обусловленной СМЕ, и 161 магнитной бури, вызванной CIR. В этой работе сделаны выводы, что индекс *SYM-H* в случае СМЕ-бурь имеет более сильную зависимость от скорости СВ и конвективного электрического поля, а в случае CIR-бурь сильнее зависит от электрического поля СВ, скорости открытого магнитного потока $d\phi/dt$ и электрического поля пересоединения E_{KL} .

Симметричный и асимметричный кольцевые токи обладают разными свойствами [Бахмина, Калегаев, 2008]. Симметричный кольцевой ток образуется из-за раздельного движения захваченных геомагнитным полем протонов и электронов магнитосферной плазмы вдоль замкнутых траекторий вокруг Земли и существует постоянно. Частичный кольцевой ток формируется в ночном и вечернем секторах вблизи геомагнитного экватора вследствие усиления магнитосферной конвекции во время возмущений. Считается, что частичный кольцевой ток развивается на главной фазе магнитной бури и распадается сразу после ее максимума [Бархатов и др., 2008]. Хотя слабая долготная асимметрия магнитосферного магнитного поля, измеряемого на поверхности Земли, присутствует и в геомагнитно-спокойные периоды, достоверно не известно, связана ли она с существованием частичного кольцевого тока в спокойной магнитосфере [Калегаев и др., 2008].

В работе [Weygand, McPherron, 2006] рассмотрена такая характеристика кольцевых токов, как степень симметрии, определенная как отношение *SYM-H/ASY-H*. Они получили, что кольцевой ток всегда асимметричен. Изучая вариации индексов

SYM и *ASY*, авторы работ [Weygand, McPherron, 2006; Iyemori et al., 2010] выявили, что в их значениях наблюдаются смещения. Согласно определению, данному в этих работах, смещение — это ненулевое значение индекса при магнитно-спокойных условиях. В [Weygand, McPherron, 2006] было предположено, что смещения могут вызываться совместным влиянием различных магнитосферных токовых систем. Ранее в работах [Alexeev et al., 1996; Maltsev et al., 1996; Tsyganenko, Sitnov, 2005] было показано, что вклад в геомагнитные характеристики кольцевого тока дают не только сам кольцевой ток, но и токи магнитопаузы, хвоста магнитосферы и продольные токи.

Большинство работ, посвященных исследованию связи индексов кольцевого тока *SYM* и *ASY* с межпланетными параметрами, выполнено для буревых и суббуревых условий. Изучение солнечно-земных связей и проявлений космической погоды будет неполным без учета крупномасштабных свойств кольцевого тока и его долговременной динамики. Такие свойства можно исследовать, анализируя данные с временным разрешением сутки и более. Подобного рода исследования часто ведутся статистическими методами с использованием среднесуточных и среднегодовых значений земных, межпланетных и солнечных параметров. При суточном усреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, поэтому особенности бурь (фазы, интенсивность, длительность и др.) будут в значительной мере нивелироваться. В этой связи представляется важным исследовать изменения среднегодовых значений геомагнитных индексов *SYM* и *ASY*, полученных по среднесуточным данным. Целью работы является рассмотрение влияния межпланетных параметров на показатель степени симметрии магнитосферного кольцевого тока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Индексы *SYM* и *ASY* рассчитываются по *H*- и *D*-составляющим геомагнитного поля на шести среднеширотных станциях (сеть состоит из более чем десяти станций). Эти индексы имеют одноминутное временное разрешение и подразделяются на *SYM-H*, *SYM-D*, *ASY-H* и *ASY-D*. *SYM-H* и *SYM-D* представляют собой, по сути, усредненные отклонения *H*- и *D*-составляющих геомагнитного поля от спокойного уровня на станциях наблюдения с поправкой на геомагнитную широту, в то время как *ASY-H* и *ASY-D* определяются как разности между максимальными и минимальными значениями *H*- и *D*-составляющих после вычета из поля возмущения соответствующих симметричных частей. Индекс *SYM-H*, как правило, имеет отрицательные значения (подобно индексу *Dst*), *SYM-D* принимает значения обоих знаков, а *ASY-H* и *ASY-D* всегда положительны. Подробно методика определения индексов *SYM* и *ASY* приведена в работе [Iyemori et al., 2010].

Анализ данных проводится по среднегодовым значениям индексов *SYM-H* и *ASY-H* и межпланетных параметров за 1981–2015 гг. Геомагнитные индексы

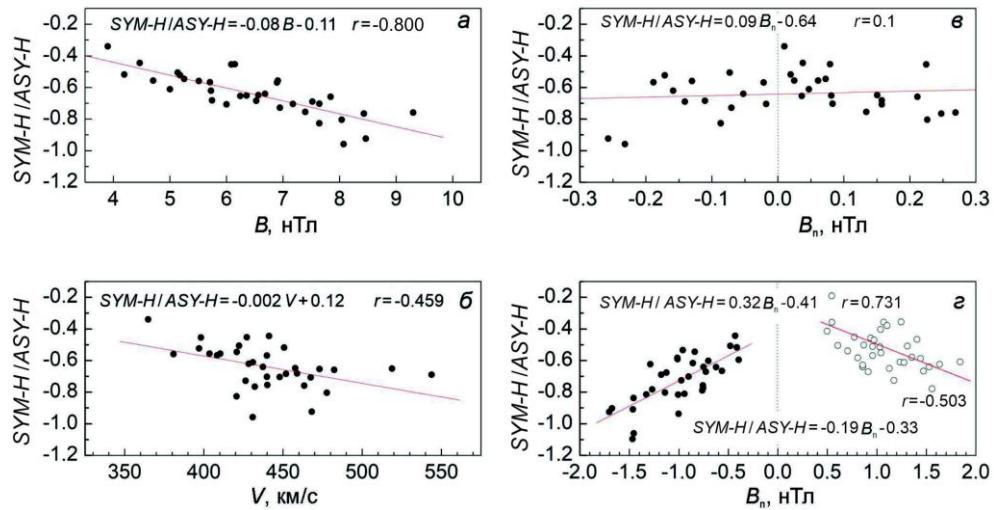


Рис. 1. Зависимости показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ от величины B ММП (а), скорости солнечного ветра V (б) и северо-южной компоненты B_n ММП без разбивки (в) и с разбивкой (г) данных по знаку B_n ; на панелях приведены уравнения линейной регрессии и коэффициенты корреляции r

взяты с сайта Мирового центра данных по геомагнетизму [<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>], межпланетные данные — с сайта Центра данных космической физики НАСА [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>]. Компоненты ММП в этой базе данных представлены в системе координат RTN: ось R направлена радиально от Солнца, ось T имеет направление в сторону вращения Солнца, а ось N представляет собой векторное произведение осей R и T. На нулевой гелиографической широте оси N и солнечного вращения параллельны. Системы координат RTN и GSE на околоземных расстояниях различаются противоположными направлениями осей R и X, а также T и Y соответственно.

После исключения дней с отсутствием сведений о межпланетных и геомагнитных параметрах в массиве данных осталось 10759 дней. При рассмотрении связи индексов $SYM-H$ и $ASY-H$ с северо-южной компонентой B_n ММП данные разбивались по знаку B_n : дней с $B_n \leq 0$ было 5670 (в том числе 118 дней, когда среднесуточные значения B_n были равны нулю), дней с $B_n > 0$ — 5089.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены зависимости показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ от величины B ММП, скорости V СВ и северо-южной компоненты B_n ММП (в). По графикам получены соответствующие уравнения линейной регрессии и определены коэффициенты корреляции r . Видно, что показатель степени симметрии зависит от B и V , при этом коэффициент корреляции между $SYM-H/ASY-H$ и B ММП равен 0.8, а между $SYM-H/ASY-H$ и V не превышает 0.5. Что касается связи $SYM-H/ASY-H$ с B_n ММП, то при рассмотрении данных без учета знака северо-южной компоненты ММП (панель (в)) она отсутствует: $r=0.1$. Поскольку северо-южная компонента ММП является одним из основных факторов, влияющих на магнитосферные процессы, то данные об индексах были разбиты на два подмассива в соответствии со знаком B_n . На панели

(г) приведены связи показателя степени симметрии $SYM-H/ASY-H$ и B_n отдельно при южном и северном направлениях ММП. Видно, что связь выраженная: при $B_n \leq 0$ $r=0.73$, при $B_n > 0$ $r=0.50$. Можно сказать, что с ростом абсолютных значений межпланетных параметров значение $SYM-H/ASY-H$ увеличивается по абсолютной величине и приближается к 1.

$SYM-H/ASY-H=-1$ означает, что симметричная и асимметрическая части кольцевого тока сравниваются при максимальных величинах межпланетных параметров. Получается, что асимметрический ток большую часть времени преобладает над симметрическим, однако так быть не может. При крупномасштабных усреднениях логично предполагать, что симметрическая часть кольцевого тока должна доминировать над асимметрической вследствие того, что в отсутствие геомагнитных возмущений симметрический кольцевой ток присутствует в магнитосфере постоянно [Калегаев и др., 2008]. Такой ток медленно распадается на восстановительной фазе геомагнитной бури, которая может длиться достаточно долго [Weygand, McPherron, 2006], тогда как асимметрический кольцевой ток развивается на главной фазе геомагнитной бури и время его распада значительно короче [Weygand, McPherron, 2006; Бахмина, Калегаев, 2008].

Во Введении говорилось о смещениях значений SYM и ASY . В работе [Weygand, McPherron, 2006] было предположено, что смещение значений $SYM-H$, вероятно, возникает вследствие комбинации трех эффектов: токов Чепмена — Ферраро в спокойное время; кольцевого тока в спокойное время и разницы между эффектом хвоста в спокойные и буревые дни, тогда как смещение значений $ASY-H$ обусловливается комбинацией двух эффектов: асимметрического кольцевого тока, который всегда присутствует во внутренней магнитосфере, и шума на графиках местного времени, вызванного неполным вычитанием вариации спокойного дня на каждой станции.

Наличие смещения в значениях Dst было установлено в работах [Takalo, Mursula, 2001; Hakkinen

et al., 2003]. Takalo, Mursula [2001] исследовали изменяющиеся в зависимости от сезона суточные вариации *Dst*-индекса по спокойным и всем дням и обнаружили, что эти изменения связаны с неравномерным распределением станций сети *Dst*. Анализ суточных и сезонных изменений *Dst* позволил Hakkinen et al. [2003] сделать вывод, что станции сети *Dst* имели разные базовые уровни, так что средние значения *Dst* различались на 10 нТл. В работе [Макаров, 2020] показано, что вследствие неравномерности сети станций, участвующих в определении *Dst*-индекса, образуется годовая вариация *Dst*.

В работе [Weygand, McPherron, 2006] в индекс *SYM-H* была введена поправка на вклад в него динамического давления СВ и было оценено при статистическом исследовании по времени бурь, что смещение в индексах *SYM-H* и *ASY* составляет около 18 ± 2 нТл в зависимости от используемого метода. Zhao et al. [2022], исследовав связи очень больших геомагнитных бурь ($\Delta \text{SYM-H} < -200$ нТл) с параметрами СВ, пришли к выводу, что эмпирические формулы, используемые в такого рода работах, оценивают интенсивности бурь с большими статистическими ошибками. В статье [Макаров, 2021] по данным о сезонных вариациях индексов, а также по результатам регрессионного анализа среднегодовых значений индексов и уровня магнитной активности за 1981–2016 гг. были установлены величины смещений для *SYM-H* –0.1 нТл и для *ASY-H* 13.6 нТл. В настоящей работе сложность представляет учет смещения при статистическом исследовании вклада разных источников в индексы *SYM-H* и *ASY-H*.

Учитывая важность смещений рассматриваемых индексов, повторим оценки связи показателя степени симметрии кольцевого тока с межпланетными параметрами, используя величины смещений, полученные в [Макаров, 2021] по результатам статистического исследования. Смещение в значениях *SYM-H* мизерно, поэтому им можно пренебречь, а в значениях *ASY-H* оно значимо. После введения поправки 13.6 нТл в значения *ASY-H* были рассчитаны показатели симметрии *SYM-H/ASY-H*, результаты представлены на рис. 2.

При сравнении рис. 2 с рис. 1 видно, что, во-первых, связь между *SYM-H/ASY-H* и межпланетными параметрами практически отсутствует, за исключением слабой связи между показателем симметрии и северо-южной компонентой ММП, когда данные были разбиты по знаку B_n (γ); и, во-вторых, средние значения *SYM-H/ASY-H* варьируют около –2. Такое поведение показателя симметрии может свидетельствовать о преобладании симметричного кольцевого тока над асимметричным при оперировании среднегодовыми данными. Действительно, симметричный кольцевой ток существует постоянно, в то время как частичный кольцевой ток развивается на главной фазе магнитной бури и распадается сразу после ее максимума. Кольцевой ток становится симметричным на фазе восстановления [Калегаев и др., 2008]. Поскольку фаза восстановления бури значительно продолжительнее (примерно в три и более раза), чем главная фаза, симметричный кольцевой ток сохраняется большее время и при суточном

усреднении дает вклад в геомагнитные изменения, превышающий вклад асимметричного кольцевого тока на главной фазе, когда интенсивность этого тока значительно выше. Известно [Weygand, McPherron, 2006], например, что постоянные времена для *SYM-H* (5.25 и 64.3 ч) почти вдвое больше, чем для *ASY-H* (2.2 и 20.9 ч).

На рис. 2, *a*, *b*, *c* можно заметить три точки, когда $|\text{SYM-H/ASY-H}| > 4$, они соответствуют малым значениям B , V и $B_n > 0$, т. е. случаям, когда частичный кольцевой ток минимален. Выпадающая точка с положительным значением показателя симметрии соответствует положительному значению *SYM-H*. Панель (γ) достаточно наглядно демонстрирует нелинейную связь *SYM-H/ASY-H* с B_n , в соответствии с которой симметричный кольцевой ток заметно превалирует над асимметричным при малых значениях B_n . Можно заметить, что показатель степени симметрии кольцевого тока увеличивается, когда $V < 450$ км/с, $B < 5.5$ нТл, $|B_n| < 0.7$ нТл. Такие закономерности ожидаются из-за разных свойств симметричного и асимметричного токов. Таким образом, при учете смещения индекс *ASY-H* более адекватно отражает свойства магнитосферных кольцевых токов, чем без учета смещения. Смещения индексов обусловливаются вкладами всех основных магнитосферных токовых систем.

На рис. 3 показаны корреляционные связи индексов *ASY-H* и *SYM-H* с межпланетными параметрами. При рассмотрении связи с B_n данные были разбиты на два подмассива: $B_n \leq 0$ и $B_n > 0$, в остальных случаях знак B_n не учитывался. Представленные на рисунке зависимости согласуются с известными — геомагнитные индексы возрастают по абсолютной величине с увеличением B , V и $|B_n|$. Следует обратить внимание на коэффициенты линейной регрессии: во всех уравнениях связи с межпланетными параметрами коэффициенты для индекса *SYM-H* больше, чем для индекса *ASY-H*, причем значения обоих индексов сопоставимы. Это означает, что *SYM-H* увеличивается по мере роста абсолютных значений параметров СВ сильнее, чем *ASY-H*: в 1.37 в случае B , в 1.33 в случае V , в 1.5 в случае при $B_n \leq 0$ и в 1.08 при $B_n > 0$. В настоящей работе рассматриваются среднегодовые данные. При таком усреднении данных буровые и суббуровые процессы сглаживаются, кроме того, надо учесть временные масштабы частей кольцевого тока — они больше у симметричной составляющей [Weygand, McPherron, 2006]. Отмеченное свойство *SYM-H*, вероятно, также вносит дополнительный вклад в связи показателя симметрии *SYM-H/ASY-H* с межпланетными параметрами.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Показано, что геомагнитный индекс *ASY-H* более правильно отражает свойства магнитосферных кольцевых токов при учете смещения его значений, чем при игнорировании этого смещения. При учете смещения значений *ASY-H* симметричная составляющая кольцевого тока примерно в два раза превалирует над асимметричной для средних условий в солнечном ветре: скорость $V < 550$ км/с, величина межпланетного магнитного поля $B < 10$ нТл, северо-южная

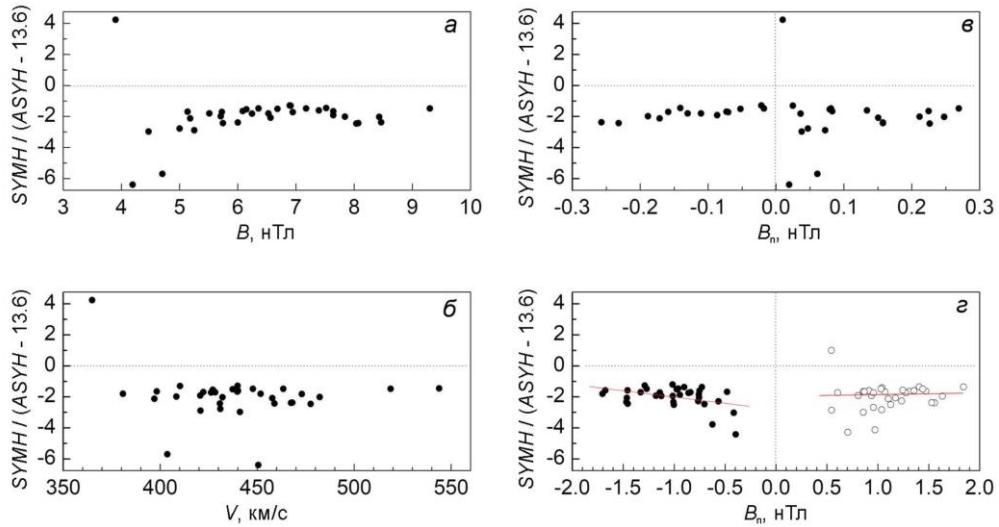


Рис. 2. Зависимости показателя степени симметрии кольцевого тока $SYM-H/ASY-H$ от величины B ММП (а), скорости солнечного ветра V (б) и северо-южной компоненты B_n ММП (без разбивки (в) и с разбивкой (г) данных по знаку B_n) после учета смещения значений $ASY-H$

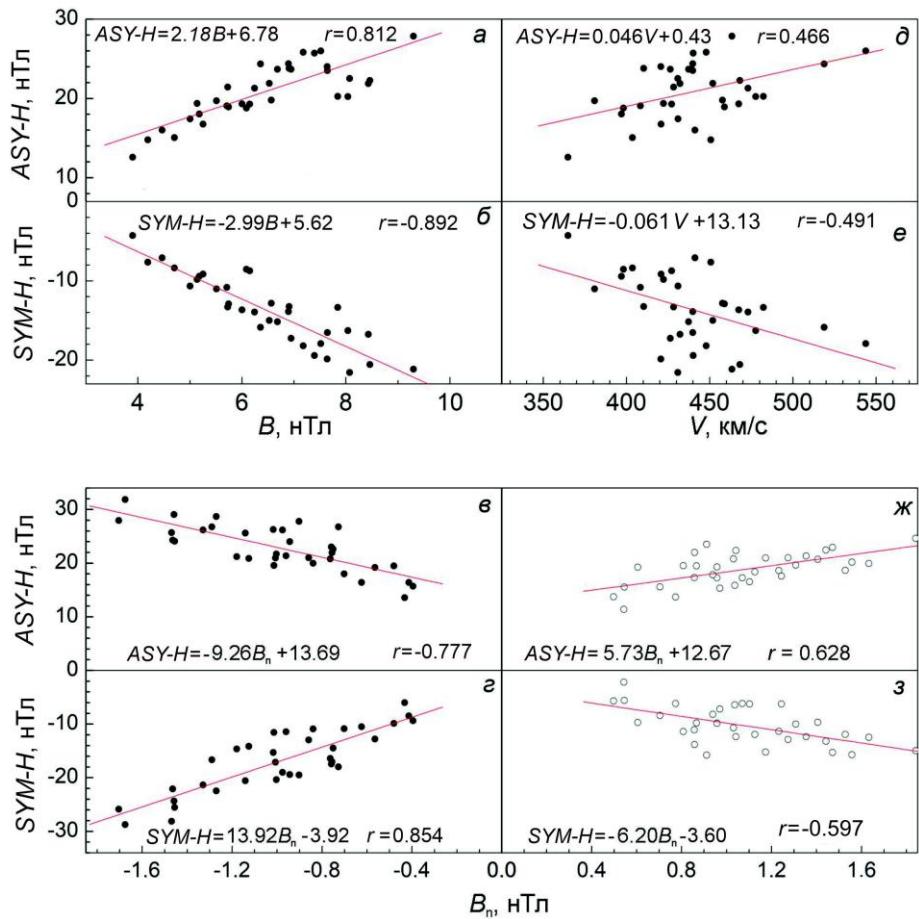


Рис. 3. Зависимости индексов $ASY-H$ и $SYM-H$ от B ММП (а и б соответственно), скорости солнечного ветра V (д и е), северо-южной компоненты B_n ММП (в, г, ж, з; данные разбиты по знаку B_n); на панелях приведены уравнения линейной регрессии и коэффициенты корреляции r

компоненты межпланетного магнитного поля $|B_n| < 2$ нТл. При спокойном состоянии солнечного ветра ($V < 450$ км/с, $B < 5.5$ нТл, $|B_n| < 0.7$ нТл) показатель степени симметрии кольцевого тока увеличивается.

По среднегодовым значениям $SYM-H$ и $ASY-H$ установлено, что при увеличении абсолютных зна-

чений межпланетных параметров (скорости солнечного ветра, величины межпланетного магнитного поля, северо-южной компоненты межпланетного магнитного поля) индекс симметричного кольцевого тока $SYM-H$ растет сильнее, чем индекс асимметричного кольцевого тока $ASY-H$.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (номер госрегистрации № 122011700182-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Церковников О.М. Анализ связи индексов, характеризующих симметричный *SYM* и асимметричный *ASY* кольцевой ток, с индексами активности авроральных электроструй *AE* (*AU*, *AL*). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 4, с. 520–525.
- Бахмина К.Ю., Калегаев В.В. Моделирование эффекта частичного кольцевого тока в возмущенной магнитосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 6, с. 770–779.
- Бороев Р.Н., Васильев М.С. Связь *ASY-H* с параметрами межпланетной среды и авроральной активностью на главных фазах магнитных бурь во время CIR и ICME событий. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 1, с. 43–50. DOI: [10.12737/szf-61202004](https://doi.org/10.12737/szf-61202004) / Boroev R.N., Vasiliev M.S. Relationship of the *ASY-H* index with interplanetary medium parameters and auroral activity in magnetic storm main phases during CIR and ICME events. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 35–40. DOI: [10.12737/stp-61202004](https://doi.org/10.12737/stp-61202004).
- Калегаев В.В., Бахмина К.Ю., Алексеев И.И. и др. Асимметрия кольцевого тока во время магнитной бури. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 6, с. 780–792.
- Макаров Г.А. Геометрический фактор в сезонных вариациях среднесуточных значений геомагнитного индекса *Dst*. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 4, с. 59–66. DOI: [10.12737/szf-64202008](https://doi.org/10.12737/szf-64202008) / Makarov G.A. Geometric factor in seasonal variations of daily average values of the geomagnetic index *Dst*. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 4, pp. 50–56. DOI: [10.12737/stp-64202008](https://doi.org/10.12737/stp-64202008).
- Макаров Г.А. Смещения значений геомагнитных индексов магнитосферного кольцевого тока. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 3, с. 31–38. DOI: [10.12737/szf-73202103](https://doi.org/10.12737/szf-73202103) / Makarov G.A. Offset in the geomagnetic indices of the magnetospheric ring current. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 29–35. DOI: [10.12737/stp-73202103](https://doi.org/10.12737/stp-73202103).
- Макаров Г.А. Геомагнитные индексы *ASY-H* и *SYM-H* и их связь с межпланетными параметрами. *Солнечно-земная физика*. 2022, т. 8, № 4, с. 38–45. DOI: [10.12737/szf-84202203](https://doi.org/10.12737/szf-84202203) / Makarov G.A. Geomagnetic indices *ASY-H* and *SYM-H* and their relation to interplanetary parameters. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 8, iss. 4, pp. 36–43. DOI: [10.12737/stp-84202203](https://doi.org/10.12737/stp-84202203).
- Макаров Г.А. Крупномасштабные связи геомагнитных индексов *SYM-H* и *ASY-H* с северо-южной компонентой ММП и бета-параметром солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 97–103. DOI: [10.12737/szf-103202411](https://doi.org/10.12737/szf-103202411) / Makarov G.A. Large-scale relationships of the geomagnetic indices *SYM-H* and *ASY-H* with the north-south IMF component and the solar wind beta parameter. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 91–96. DOI: [10.12737/stp-103202411](https://doi.org/10.12737/stp-103202411).
- Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kaledaev V.V., et al. Magnetic storms and magnetotail currents. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, no. A4, pp. 7737–7747. DOI: [10.1029/95JA03509](https://doi.org/10.1029/95JA03509).
- Bhaskar A., Vichare G. Forecasting of *SYM-H* and *ASY-H* indices for geomagnetic storms of solar cycle 24 including St. Patricks day, 2015 storm using NARX neural network. *Journal of Space Weather and Space Climate*. 2019, vol. 9, no. A12. DOI: [10.1051/swsc/2019007](https://doi.org/10.1051/swsc/2019007).
- Hajducek J.D., Welling D.T., Ganushkina N.Y., et al. SWMF Global Magnetosphere Simulations of January 2005: Geomagnetic indices and cross-polar cap potential. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 1567–1587.
- Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., et al. Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised *Dst* versus external drivers. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A2, p. 1060. DOI: [10.1029/2002JA009428](https://doi.org/10.1029/2002JA009428).
- Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M. *Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM (Provisional) No. 1: 1989–1990*. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism; Kyoto University, Japan, 1992, 240 p.
- Iyemori T., Takeda M., Nose M., et al. *Mid-latitude geomagnetic indices ASY and SYM for 2009 (Provisional)*. Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism; Kyoto University, Japan, 2010. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/asy.pdf> (дата обращения 5 октября 2021 г.).
- Maltsev Y.P., Arykov A.A., Belova E.G., et al. Magnetic flux redistribution in the storm time magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1996, vol. 101, no. A4, pp. 7697–7704.
- Namuun B., Tsegmed B., Li L.Y., Leghari G.M. Differences in the response to CME and CIR drivers of geomagnetic disturbances. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, no. 2, pp. 35–40. DOI: [10.12737/szf92202304](https://doi.org/10.12737/szf92202304) / Namuun B., Tsegmed B., Li L.Y., Leghari G.M. Differences in the response to CME and CIR drivers of geomagnetic disturbances. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 31–36. DOI: [10.12737/stp-92202304](https://doi.org/10.12737/stp-92202304).
- Shi Y., Zesta E., Lyons L.R., et al. Statistical study of effect of solar wind dynamic pressure enhancements on dawn-to-dusk ring current asymmetry. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A10216. DOI: [10.1029/2005JA011532](https://doi.org/10.1029/2005JA011532).
- Singh A.K., Sinha A.K., Pathan B.M., et al. Effect of prompt penetration on the low latitude *ASY* indices. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 94, pp. 34–40.
- Takalo J., Mursula K. A model for the diurnal universal time variation of the *Dst* index. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, no. A6, pp. 10905–10914.
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A03208. DOI: [10.1029/2004JA010798](https://doi.org/10.1029/2004JA010798).
- Weygand J.M., McPherron R.L. Dependence of ring current asymmetry on storm phase. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A11221. DOI: [10.1029/2006JA011808](https://doi.org/10.1029/2006JA011808).
- Zhao M.X., Le G.M., Lu J.Y. Can we estimate the intensities of great geomagnetic storms ($\Delta SYM-H \leq -200$ nT) with the Burton equation or the O'Brien and McPherron equation? *Astrophys. J.* 2022, vol. 928, p. 18. DOI: [10.3847/1538-4357/ac50a8](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac50a8).
- URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html> (дата обращения 29 марта 2025 г.).
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 29 марта 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
- Как цитировать эту статью:
- Макаров Г.А. Влияние межпланетных параметров на показатель степени симметрии кольцевого тока. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 36–41. DOI: [10.12737/szf-113202504](https://doi.org/10.12737/szf-113202504).

**ГЕОМАГНИТНОЕ ОБРЕЗАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ
ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 23–24 МАРТА 2023 Г.:
СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ С УЧЕТОМ ШИРОТНЫХ ЭФФЕКТОВ**

**GEOMAGNETIC CUTOFF OF COSMIC RAYS DURING
THE MARCH 23–24, 2023 MAGNETIC STORM:
RELATIONSHIP WITH SOLAR WIND PARAMETERS
AND GEOMAGNETIC ACTIVITY TAKING INTO ACCOUNT LATITUDINAL EFFECTS**

О.А. Данилова

Санкт-Петербургский филиал Института земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru

Н.Г. Птицына[†]

Санкт-Петербургский филиал Института земного
магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН,
Санкт-Петербург, Россия

В.Е. Сдобнов

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sdobnov@mail.ru

О.А. Danilova

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS,
St. Petersburg, Russia, md1555@mail.ru

N.G. Ptitsyna[†]

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation, St. Petersburg Branch RAS,
St. Petersburg, Russia

V.E. Sdobnov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sdobnov@mail.ru

Аннотация. В данной работе жесткости геомагнитного обрезания (геомагнитные пороги) во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. были рассчитаны 1) методом спектрографической глобальной съемки по наблюдательным данным регистрации космических лучей мировой сетью станций (R_{crc}); 2) численно траекторными расчетами в модельном магнитном поле магнитосферы ($R_{\text{эфф}}$). Жесткость геомагнитного обрезания определялась для девяти разноширотных станций космических лучей. Были рассчитаны корреляции вариаций геомагнитных порогов ΔR_{crc} и $\Delta R_{\text{эфф}}$ с электромагнитными и динамическими параметрами солнечного ветра и индексами геомагнитной активности Dst и K_p . Выявлено, что геомагнитные пороги, вычисленные двумя методами, наиболее сильно коррелируют с Dst и электромагнитными параметрами солнечного ветра. Сколько-нибудь существенной корреляции с динамическими параметрами не наблюдается. Анализ показал, что реакция ΔR_{crc} на контролирующие магнитные параметры и Dst меняется с широтой станции наблюдения: корреляция достигает наибольших значений на средних широтах и значительно падает к экватору. Корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}$, вычисленные с помощью модели, не показывают широтной зависимости.

Ключевые слова: космические лучи, геомагнитные пороги, жесткость геомагнитного обрезания, межпланетное магнитное поле, индексы геомагнитной активности.

Abstract. In this paper, we calculate geomagnetic cutoff rigidities during the strong magnetic storm of March 23–24, 2023, using 1) the spectrographic global survey method based on observational data from cosmic ray recording by the global network of stations (R_{sgs}); 2) numerical trajectory calculations in a model magnetic field of the magnetosphere (R_{eff}). The geomagnetic cutoff rigidity has been determined for nine cosmic ray stations at different latitudes. We calculated the correlations of the variations in the geomagnetic cutoff rigidity ΔR_{sgs} and ΔR_{eff} with magnetic and dynamic solar wind parameters and the geomagnetic activity indices Dst and K_p . It has been found that the geomagnetic cutoff rigidity calculated by both methods correlate most strongly with Dst and the electromagnetic parameters of the solar wind. No significant correlation with the dynamic parameters was observed. The analysis has shown that the response of ΔR_{sgs} to the controlling magnetic parameters and Dst changes with latitude of the observation station: the correlation reaches its highest values at midlatitudes and drops significantly toward the equator. The correlations of ΔR_{eff} calculated by the model do not reveal a latitudinal dependence.

Keywords: cosmic rays, geomagnetic threshold, cosmic ray cutoff rigidity, interplanetary magnetic field, geomagnetic activity.

ВВЕДЕНИЕ

Под действием геомагнитного поля заряженные частицы галактических космических лучей (КЛ) меняют свою траекторию. Часть из них с жесткостью ниже характерного для пункта их измерения порогового значения (жесткость геомагнитного обрезания, R_c) не доходит до земной поверхности. Из-за экранирующего характера магнитного поля Земли на экватор проникает существенно меньше частиц, чем на высокие широты. Вариации потоков КЛ в магнитосфере во время магнитных бурь обусловлены изменениями жесткости ΔR геомагнитного обрезания / геомагнитных порогов КЛ. Пороги зависят от экранирующих свойств магнитного поля Земли.

Во время магнитной бури энергию солнечного ветра (СВ) в магнитосферу Земли передают выбросы корональной солнечной массы (СМЕ, Coronal Mass Ejection) или высокоскоростные коротирующие области взаимодействия (CIR, Corotating Interaction Region) из корональных дыр. Поступление энергии, генерированной во время повышенной активности Солнца, и ее последующее затухание в магнитосфере определяет эволюцию геомагнитной бури, которая описывается различными геомагнитными индексами. Индекс K_p — планетарный индекс, характеризующий глобальную возмущенность магнитного поля Земли в трехчасовом интервале времени, — определяется как среднее значение уровней возмущения двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых в 13 отобранных магнитных обсерваториях, расположенных в субавроральной зоне между 48° и 63° северной и южной геомагнитных широт. Другим широко используемым является так называемый буревой индекс Dst , который вычисляется как среднечасовое возмущение горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля в четырех низкоширотных магнитных обсерваториях. Он представляет собой меру изменения магнитного поля системы токов, текущих вдоль поверхности магнитосферы Земли (DCF, Magnetopause Current System) и колышевым током (DR, Ring Current) западного направления. В результате развития системы токов во время геомагнитного возмущения магнитное поле магнитосферы уменьшается, в соответствии с этим уменьшается геомагнитное экранирование, что облегчает проникновение КЛ в более низкие широты. В свою очередь, динамика токовых систем зависит от динамики магнитных и динамических параметров околосолнечного пространства.

Знание зависимостей ΔR от параметров СВ и магнитосферы может прояснить важные черты взаимодействия СВ с магнитосферой и сопутствующие этому взаимодействию геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений. Изучение широтных эффектов этого взаимодействия важно с точки зрения обеспечения безопасности экипажа и пассажиров космических полетов, а также высокосиротной и высотной авиации [Буров и др., 2005; Iucci et al., 2005].

Отклик геомагнитного экранирования на изменения геомагнитной обстановки в СВ и межпланет-

ном магнитном поле (ММП) во время магнитных бурь изучался в [Kanekal et al., 1998; Leske et al., 2001; Shimazu, 2009; Tyssøy, Stadsnes, 2014; Adriani et al., 2016] теоретически и экспериментально. Однако однозначного ответа на вопрос о том, какие параметры ближнего космоса контролируют транспортировку КЛ во время возмущений, не было найдено. Для ответа необходимо как минимум наличие достаточно обширной базы соответствующих данных для геомагнитных бурь различного типа и интенсивности, вызванных разными источниками на Солнце и в межпланетном пространстве, произошедших на разных фазах солнечного цикла. На основе этих данных можно было бы получить обобщенные выводы об изменении геомагнитного экранирования во время межпланетных и геомагнитных возмущений различного характера. Ранее в [Птицына и др., 2019; Данилова и др., 2023 и ссылки там] для одной умеренной и семи сильных геомагнитных бурь 23-го и 24-го циклов солнечной активности мы вычислили жесткости геомагнитного обрезания и их корреляции с параметрами гелио- и геосферы. Большинство рассмотренных бурь было зафиксировано на фазах спада и в минимуме циклов. В данной работе для дальнейшего расширения нашего архива данных рассмотрена сильная буря в марте 2023 г. вблизи максимума 25-го цикла, вызванная специфическим скрытым СМЕ. Кроме того, мы добавили в наше исследование расчет и анализ данных для трех дополнительных низкоширотных станций КЛ, имея в виду поиск широтных эффектов. Цель данной работы — определение геомагнитных порогов двумя независимыми методами $R_{\text{эфф}}$ и $R_{\text{срг}}$ в период сильной бури 23–24 марта 2023 г., анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы с фокусом на широтные эффекты, а также сравнение результатов, полученных разными методами. Для решения поставленных задач были рассчитаны корреляции вариаций жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{срг}}$ и $\Delta R_{\text{эфф}}$ с электромагнитными и динамическими параметрами СВ, Dst и K_p .

1. МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Для расчетов жесткости геомагнитного обрезания во время сильной магнитной бури 23–24 марта 2023 г. были использованы метод спектрографической глобальной съемки (СГС) и метод прослеживания траекторий частиц КЛ в модельном магнитном поле.

В основе метода СГС лежит предположение, что вариации потока КЛ на земной поверхности определяются спектром жесткости, питч-угловым распределением частиц в межпланетном пространстве и градиентом плотности частиц на ларморовском радиусе [Kovalev et al., 2022]. Этот метод позволяет по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и питч-углам в межпланетном пространстве, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый момент наблюдений ($R_{\text{срг}}$).

Таблица 1

Стандартные ошибки определяемых методом СГС параметров ММП, КЛ, земной магнитосферы и атмосферы в зависимости от точности данных нейтронного монитора и мюонного телескопа [Kovalev et al., 2022]

I_{HM} , %	I_{MT} , %	λ , град	Ψ , град	A_0 , %	A_1 , %	A_2 , %	ΔR_c , ГВ	T_{PC} , °C	T_{CM} , °C
± 0.1	± 0.1	± 16.9	± 21.5	± 1.0	± 8.8	± 1.7	± 0.03	± 1.3	± 0.3
	± 0.2	± 16.9	± 21.5	± 1.0	± 8.8	± 1.7	± 0.03	± 2.5	± 1.2
± 0.15	± 0.1	± 17.0	± 21.8	± 1.3	± 8.8	± 1.7	± 0.04	± 1.3	± 0.3
	± 0.2	± 17.0	± 21.8	± 1.3	± 8.8	± 1.7	± 0.04	± 2.5	± 1.0
± 0.2	± 0.1	± 17.5	± 22.1	± 1.6	± 8.9	± 1.8	± 0.05	± 1.3	± 0.3

В табл. 1 показаны стандартные ошибки определения методом СГС долготного λ и широтного Ψ углов ММП, дифференциального жесткостного спектра A_0 , амплитуд питч-угловой анизотропии A_1 и A_2 КЛ, изменения жесткости геомагнитного обрезания ΔR_c , приземной ΔT_{PC} и среднемассовой ΔT_{CM} температуры атмосферы в зависимости от точности измерений нейтронной I_{HM} и заряженной I_{MT} компонент КЛ.

Видно, что статистическая ошибка в определении ΔR_{crc} с учетом точности измерений на станциях КЛ не превышает по абсолютной величине 0.05 ГВ. Вариации жесткостей геомагнитного обрезания, полученные этим методом, далее называются наблюдательными.

Второй метод — способ, при котором R_c вычисляется траекторными расчетами [Shea et al., 1965] в модельном магнитном поле магнитосферы ($R_{\text{эфф}}$). В данной работе для расчетов эффективных геомагнитных порогов $R_{\text{эфф}}$ была использована модель Цыганенко *Ts01* ([Tsyganenko et al., 2003] и ссылки там). При этом точность определения геомагнитных порогов зависит от точности магнитосферной модели, используемой при расчетах. Согласно модели *Ts01*, магнитное поле внутри магнитосферы (без главного магнитного поля) представляет собой сумму вкладов от основных магнитосферных токовых систем. При параметризации токовых систем использовались спутниковые данные, измеренные во время 37 геомагнитных бурь с $Dst \leq -65$ нТл [Tsyganenko et al., 2003]. Модель *Ts01* включает в себя токи Чепмена—Ферраро, симметричный и частичный объемные круговые токи, поперечные токи хвоста и крупномасштабные продольные токи. В [Tuasto et al., 2012] показано, что во время сильных магнитных бурь модель магнитосферы *Ts01* лучше описывает ситуацию в магнитосфере, чем модель *Ts04*. Для расчетов магнитного поля от внутренних источников используется представление главного магнитного поля Земли (ГМПЗ) в виде разложения в ряд по сферическим гармоническим функциям до $n=10$. Вариации жесткостей геомагнитного обрезания, полученные этим методом, далее называются модельными.

Жесткости геомагнитного обрезания определялись для девяти разноширотных станций КЛ, представленных в табл. 2. Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали ос-

новную область пороговых R_c , подверженных влиянию геомагнитного поля.

Далее вычислялись коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки s между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и ΔR_{crc} со следующими параметрами: полное значение ММП B и его компоненты B_z и B_y , азимутальная компонента E_y электрического поля, параметр плазмы β , скорость V , плотность N и давление P СВ, а также Dst и K_p . Эти параметры доступны в базе OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html].

Плазменное β — это отношение давления плазмы к магнитному давлению; в базе OMNI этот параметр рассчитывается по формуле

$$\beta = (4.16T/10^5 + 5.34)N_p/B^2,$$

где T — температура (К); N_p — плотность протонов (см^{-3}); B — полное магнитное поле (нТл).

Электрическое поле вычислялось по формуле

$$E = -VB_z 10^{-3},$$

где E — электрическое поле (мВ/м); V — скорость протонов (км/с); B_z — компонента магнитного поля (нТл).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Параметры гелио-, геосферы и жесткость обрезания КЛ во время бури 23–24 марта 2023 г.

На рис. 1 сверху вниз показаны электромагнитные и динамические параметры СВ и геомагнитной активности во время геомагнитной бури 23–24 марта 2023 г.: B , B_z , E_y , β , V , N , P СВ, а также K_p и Dst .

Особенностью исследуемой бури было то, что она вызвана скрытым (stealth) СМЕ. Такие СМЕ не связаны с какими-либо видимыми проявлениями на Солнце, поэтому их сложно идентифицировать и соответственно предсказать их геоэффективность. В частности, СМЕ, который инициировал изучаемую геомагнитную бурю, не был замечен никем из наблюдателей и не был внесен в каталоги. Но поскольку пиковое значение буревого индекса неожиданно достигло $Dst = -163$ нТл, буря была квалифицирована как сильная [Tahir et al., 2024; Teng et al., 2024].

Видно, что 23 марта в ~8:00–14:00 UT B , N , P , а также B_z постепенно растут, что можно интерпретировать как прохождение около Земли оболочки меж-

Таблица 2

Станции космических лучей

Название станции	Международный код	Географическая широта	Географическая долгота	R_c
Кингстон	KGSN	42.99° S	147.29° E	1.9
Москва	MOSC	55.47° N	37.32° E	2.08
Новосибирск	NVVK	54.80° N	83.00° E	2.32
Иркутск	IRKT	52.47° N	104.03° E	3.13
Юнгфрау	JUNG	46.55° N	7.98° E	4.51
Алматы	AATB	43.25° N	76.92° E	5.21
Рим	ROME	41.90° N	12.52° E	6.11
Афины	ATHN	37.97° N	23.72° E	8.48
Emilio Segre Obs.	ESOI	33.30° N	35.80° E	10.73

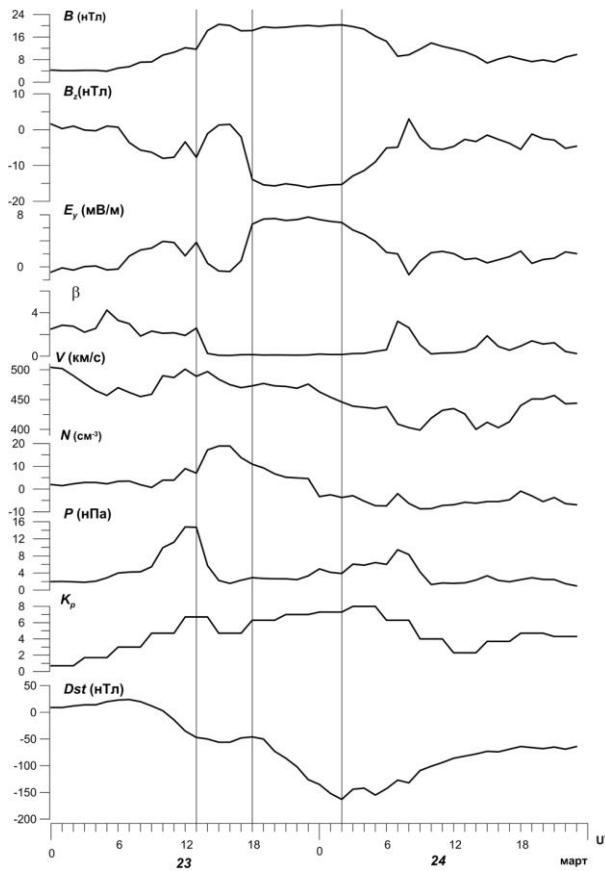


Рис. 1. Параметры СВ, ММП и геомагнитной активности во время бури 23–24 марта 2023 г. Вертикальные линии указывают главную фазу бури, а также начало активной стадии главной фазы в ~18:00 UT 23 марта

планетного СМЕ (ICME sheath) или области сжатия перед ICME.

Можно считать, что главная фаза бури началась в ~13:00 UT с резкого сжатия магнитосферы после скачка P до 14.8 нПа. С началом главной фазы β уменьшилось скачком от фонового $\beta \approx 2$ перед бурей до $\beta \approx 0.2$ и оставалось таким на всей главной фазе бури. Такое низкое значение β может быть связано

с повышенной турбулентностью плазмы и служить триггером магнитной бури [Куражковская и др., 2021]. Компонента B_z колебалась между ориентацией на юг и на север, прежде чем окончательно повернуть на юг в ~18:00 UT. В это время началась активная стадия бури, когда Dst начинает резко понижаться и достигает минимума $Dst = -163$ нТл в 02:00 UT 24 марта 2023 г. После этого Dst стал увеличиваться, B_z тоже начала расти и магнитная буря перешла в фазу релаксации.

На рис. 2, *a–e* показаны рассчитанные вариации геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{сре}}$ и $\Delta R_{\text{эфф}}$ для всех исследуемых станций. На панели *ж* показан также ход Dst для иллюстрации связи динамики геомагнитных порогов и эволюции бури. Видно, что ход кривых $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сре}}$ в целом обнаруживает удовлетворительное согласие с Dst .

Видна четкая зависимость понижения порогов $\Delta R_{\text{эфф}}$ от широты. Значение $\Delta R_{\text{эфф}}$ достигло максимального падения (≈ -0.8 ГВ) на главной фазе в момент максимума бури ($Dst = -163$ нТл) на станции с самой низкой пороговой жесткостью R_c (KGSN).

На главной фазе бури $\Delta R_{\text{сре}}$ понижается более медленно и на меньшую величину, чем $\Delta R_{\text{эфф}}$. Кроме того, на общий ход $\Delta R_{\text{сре}}$, который в целом следует за Dst , наложены колебания с периодом порядка нескольких часов. Амплитуда этих колебаний на фазе восстановления примерно того же порядка, что и понижения $\Delta R_{\text{сре}}$ в районе максимума бури: (например, через 2 ч после максимума бури на ст. IRKT $\Delta R_{\text{сре}} = -0.45$ ГВ). Такие скачки $\Delta R_{\text{сре}}$ особенно характерны на восстановительной фазе бури на низкоширотных станциях. Поэтому нельзя определить с достаточной точностью максимальное падение жесткостей геомагнитного обрезания во время бури. Можно лишь отметить, что, кроме эволюции колецевого тока (~30 ч для данной бури), который определяет $\Delta R_{\text{эфф}}$, существенный вклад, по-видимому, вносят и другие более короткопериодные (~2–3 ч) процессы. Рисунок 2 демонстрирует также тот факт, что разница между кривыми $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сре}}$ зависит от ши-

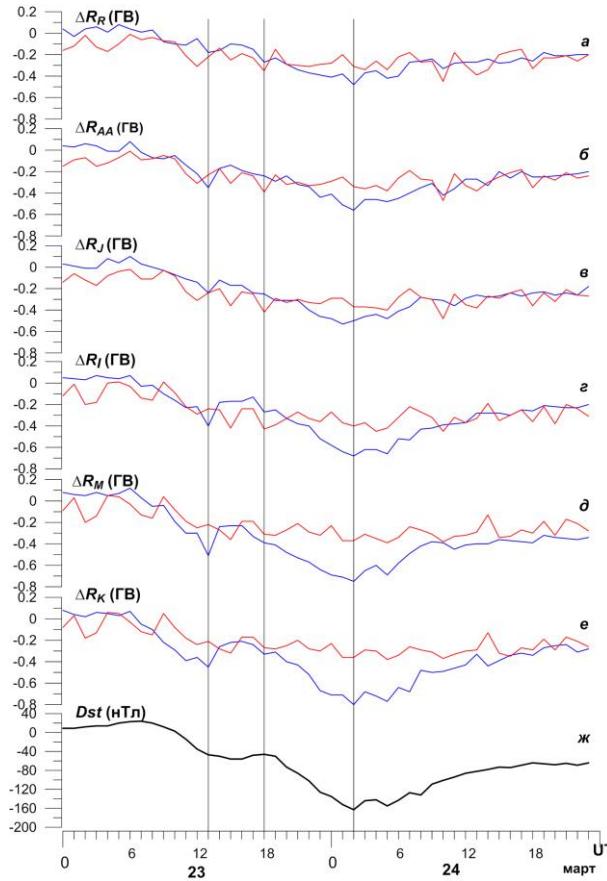


Рис. 2. Вариации геомагнитных порогов ΔR_{crc} (красные линии) и $\Delta R_{\text{эфф}}$ (синие линии) во время бури 23–24 сентября 2023 г. Сверху вниз для ст. ROME (а), AATB (б), JUNG (в), IRKT (г), MOSC (д) и KGSN (е). На панели (ж) приведены значения буревого индекса Dst . Вертикальные линии указывают главную фазу бури и начало активной фазы (18:00 UT 23 марта)

роты. Эта разница достигает максимального значения 0.44 ГВ в момент минимума Dst для ст. KGSN с минимальной $R_c=1.90$ ГВ.

2.2. Корреляционный анализ

На временных кривых рис. 2 видно, что $\Delta R_{\text{эфф}}$ и ΔR_{crc} изменяются в соответствии с эволюцией бури и тем самым с изменениями параметров СВ и геомагнитной активности. Для того чтобы количественно оценить связь исследуемых параметров и вариаций геомагнитных порогов, мы провели анализ корреляций ΔR с параметрами СВ, ММП и индексами геомагнитной активности. Были вычислены коэффициенты корреляции k и стандартные ошибки s . На рис. 3 корреляция k между ΔR и исследуемыми параметрами СВ, ММП и геомагнитосферы во время бури 23–24 марта 2023 г. представлена в виде диаграмм. На панели а показана корреляция вариаций модельных порогов $\Delta R_{\text{эфф}}$ с межпланетными и магнитными параметрами, на панели б — корреляция наблюдательных ΔR_{crc} . Столбцы диаграмм разных цветов соответствуют результатам корреляционного анализа для разных станций. При этом столбцы (станции) расположены в порядке возрастания широты (убывания порога станции в спокойное время).

Видно на панели а, что наибольшая корреляция наблюдается между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и Dst . Для $\Delta R_{\text{эфф}}$

$k=0.96\pm0.05$ на ст. YUNG. На других станциях k практически тот же. Также высокая, но несколько меньшая отрицательная корреляция видна для K_p . Например, на ст. MOSC $k=-0.8\pm0.14$. Корреляция, близкая к $k=-0.8$, получена для связи модельных геомагнитных порогов с общим магнитным полем B . На ст. MOSC $k=-0.74\pm0.16$, на ст. ESOI $k=-0.7\pm0.08$. При этом $k<0$. Высокая антикорреляция получена также для связи с E_y : $k=-0.68\pm0.18$ на ст. MOSC. Близкие значения k найдены и для остальных станций. Достаточно высокая корреляция примерно одного порядка $\sim 0.65-0.7$ получена для β и B_z . Отметим, что связь $\Delta R_{\text{эфф}}$ с B_z меньше, чем с полным полем B . Значение k значительно меньше для корреляции между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и B_y . Например, $k=0.39\pm0.14$ на ст. ROME. Такого же порядка k , вычисленные для корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}-V$ и еще меньше для антикорреляции $\Delta R_{\text{эфф}}-N$ и $\Delta R_{\text{эфф}}-P$. Можно утверждать, что изменения жесткостей геомагнитного обрезания наиболее тесно связаны с изменениями индексов геомагнитной активности. Кроме того, в изменения порогов вносят существенный вклад все электромагнитные параметры, кроме B_y . Что касается динамических параметров СВ, связь с ними прослеживается слабо. Следует отметить тот факт, что коэффициенты корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}$ со всеми параметрами, рассчитанные для разных станций, крайне незначительно отличаются между собой.

Несколько другая картина наблюдается для изменения пороговых жесткостей, полученных методом СГС (панель б). В целом коэффициенты связи для наблюдательных ΔR_{crc} ниже, чем для модельных $\Delta R_{\text{эфф}}$. Наибольшая корреляция для среднеширотных станций наблюдается между ΔR_{crc} и Dst , а также β , доходя почти до 0.8. Наибольшего значения k достигает для ст. KGSN (0.79 ± 0.07). На низкоширотных станциях ESOI и ATHN корреляция с Dst практически отсутствует. То же самое можно сказать и про связь ΔR_{crc} с общим магнитным полем B и β . Наиболь-

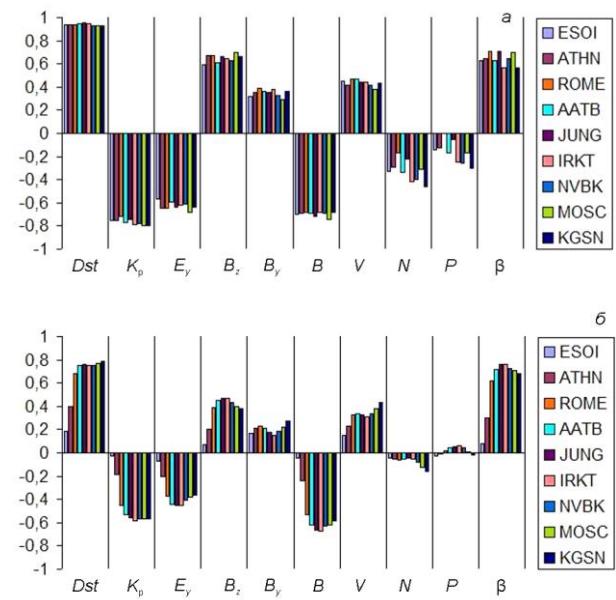


Рис. 3. Коэффициенты корреляции k между жесткостями обрезания и параметрами гео- и гелиосферы во время бури 23–24 марта 2023 г.: а — $\Delta R_{\text{эфф}}$; б — ΔR_{crc}

шего значения корреляция $\Delta R_{\text{crc}} - \beta$ достигает на среднеширотных станциях JUNG и IRKT ($k=0.76 \pm 0.08$), а для $\Delta R_{\text{crc}} - B$ $k=-0.67 \pm 0.09$. Для остальных параметров корреляция значительно ниже, а для динамических параметров СВ N и P она отсутствует.

2.3. Корреляции геомагнитных порогов с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности

На рис. 4 показана связь изменений геомагнитных порогов ΔR и исследуемых параметров СВ, ММП и геомагнитной активности в зависимости от жесткостей R_c геомагнитного обрезания станций в спокойное время. Показаны k для $\Delta R_{\text{эфф}}$ (a) и ΔR_{crc} (b), а также цвета и символы, которые различают кривые, относящиеся к параметрам Dst , K_p , B_z , E_y , B_y , P , B , β , V , и N . Кривые на панелях a, b подтверждают выводы, полученные из диаграмм (см. рис. 3, a, b), о том, что наибольшая корреляция наблюдается между ΔR_{crc} и Dst , β и несколько меньшая с B_z , а наибольшая антикорреляция — с B , K_p и E_y . Кроме того, на панели b показана зависимость k от широты и соответственно от R_c . Видно, что наибольшая корреляция наблюдается на средних широтах, для которых $R_c \approx 2 \div 6$ ГВ, а максимальная — на ст. IRKT и JUNG, для которых $R_c = 3.13$ и 4.51 соответственно. При увеличении $R_c > 6$ ГВ наблюдается существенное падение k . Для остальных исследуемых параметров k мало, поэтому оно не является геоэффективным и не представляет интереса.

Для $\Delta R_{\text{эфф}}$ (a) наибольшие корреляции и антикорреляции в соответствии с рис. 3, a фиксируются для тех же параметров, что и для ΔR_{crc} — с Dst , β , B_z , K_p , B и E_y . Однако k для всех параметров корреляции $\Delta R_{\text{эфф}}$ выше, чем для корреляции ΔR_{crc} . Что касается зависимости от широты, слабая тенденция, аналогичная широтному эффекту в ΔR_{crc} , может быть отмечена лишь для B_z и E_y . Для остальных исследуемых параметров зависимости от широты практически не наблюдается. Здесь мы тоже обсуждаем только геоэффективные параметры, для которых k достаточно велико.

2.4. Корреляция $\Delta R_{\text{эфф}}$ с ΔR_{crc}

Сравним результаты, полученные методом СГС и траекторными расчетами с использованием модели Ts01. Для этого мы рассчитали корреляцию k между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и ΔR_{crc} (табл. 3).

Из анализа рис. 3, 4 видно, что $\Delta R_{\text{эфф}}$ и ΔR_{crc} в целом аналогично описывают изменение порогов в процессе эволюции бури и вклад в эти вариации параметров гелио- и геосферы. И это несмотря на то, что падение значений модельных порогов $\Delta R_{\text{эфф}}$ систематически превышает падение наблюдательных ΔR_{crc} . Из табл. 2 видно, что корреляция k во время исследуемой бури между наблюдательными и модельными порогами для всех станций, кроме ст. ESOI и ATHN, достаточно высокая: начиная от $k=0.71 \pm 0.07$ для ст. ROME до максимума корреляции $k=0.78 \pm 0.07$ для среднеширотной станции JUNG. Такое поведение k указывает на аналогичную чувствительность к межпланетным и геомагнит-

ным параметрам наблюдательных и модельных вариаций геомагнитных порогов для станций с $R_c < 6.11$ ГВ (ROME). Низкая корреляция $\Delta R_{\text{эфф}}$ и ΔR_{crc} на ст. ESOI и ATHN отражает разницу в широтном эффекте, заметном на низкоширотных станциях (см. 2.3).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе мы рассмотрели вариации жесткостей геомагнитного обрезания $\Delta R_{\text{эфф}}$ и ΔR_{crc} во время бури 23–24 марта 2023 г., вычисленные двумя различными методами, наблюдательным и модельным. Кроме того, мы исследовали связь этих вариаций с электромагнитными и динамическими параметрами солнечного ветра и геомагнитной активности, а также зависимость такой связи от широты.

Выявлено, что геомагнитные пороги, вычисленные обоими методами, наиболее сильно коррелируют с геомагнитной активностью, особенно с Dst , что указывает на наибольший вклад в вариации жесткостей кольцевого тока. Кроме того, высокая корреляция достигается и с электромагнитными параметрами ММП B , β , B_z , E_y . Существенной корреляции с динамическими параметрами СВ V , N , P не наблюдается. Считается, что развитие магнитной бури в основном зависит от двух параметров: от южной компоненты ММП, рост которой приводит к пересоединению магнитного поля СВ и магнитосферы Земли, и от давления СВ P , рост которого приводит к сжатию магнитосферы [Dungey, 1961; Burton et al., 1975; Akasofu, 1984]. Однако развитие исследуемой бури и соответственно уменьшение геомагнитного экранирования и вариации жесткостей геомагнитного обрезания действительно определялись B_z и еще в большей степени общим магнитным полем B и плазменным параметром β , в то время как P и остальные динамические параметры СВ практически не играли никакой роли. Отметим, что такие результаты получены для сильной бури в марте 2023 г., т. е. на восходящей ветви 25-го солнечного цикла за полтора года до максимума. Эти результаты в целом согласуются с выводами, полученными для сильной бури 8–11 марта 2012 г. также на растущей ветви 24-го цикла за два года до максимума, о преимущественном влиянии Dst и некоторых электромагнитных параметров на ΔR [Данилова и др., 2023]. В то же время для большинства бурь, в основном зафиксированных вне максимума цикла [Птицына и др., 2019], кроме неизменной наиболее сильной корреляции с Dst и с электромагнитными параметрами, можно отметить также существенную связь геомагнитных порогов со скоростью СВ V . При этом наборы других контролирующих параметров для индивидуальных бурь отличаются между собой. Тем не менее, по-видимому, можно сделать вывод о том, что свойства геомагнитного экрана во время сильных возмущений зависят от фазы солнечного цикла, в котором произошло событие. Однако эти выводы нуждаются в дальнейшей более детальной проверке.

Анализ показал, что реакция ΔR_{crc} на контролирующие электромагнитные параметры, а также Dst и K_p меняется с широтой станции наблюдения: корреляция достигает наибольших значений на средних

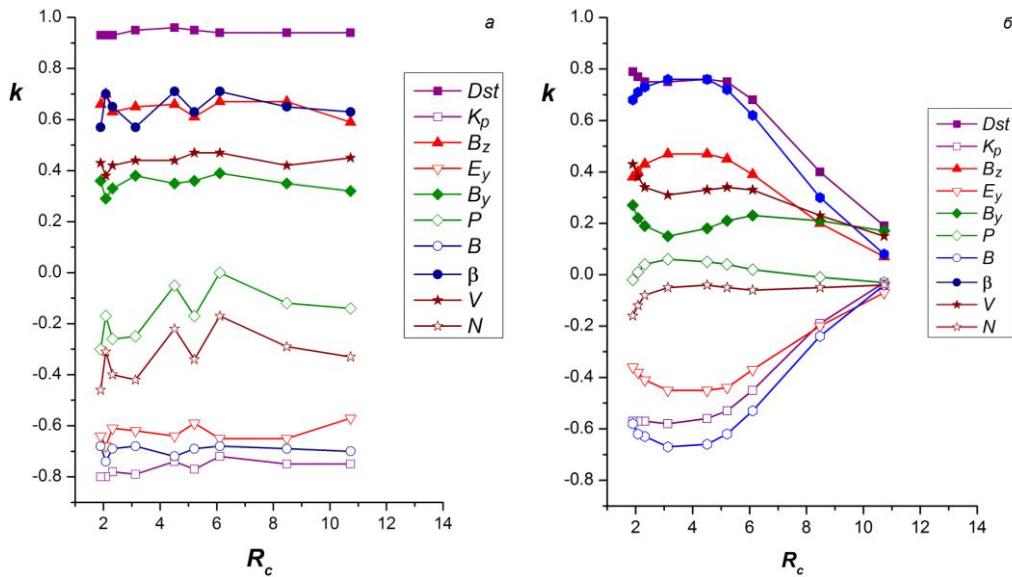


Рис. 4. Коэффициенты корреляции k между жесткостями геомагнитного обрезания и параметрами гео- и гелиосферы в зависимости от широты: a — $\Delta R_{\text{эфф}}$; b — $\Delta R_{\text{сrc}}$

Таблица 2

Коэффициенты корреляции k между значениями $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сrc}}$

	ESOI	ATHN	ROME	AATB	JUNG	IRKT	NVBK	MOSC	KGSN
k	0.14 ± 0.13	0.42 ± 0.1	0.71 ± 0.07	0.76 ± 0.07	0.78 ± 0.07	0.71 ± 0.09	0.76 ± 0.08	0.77 ± 0.08	0.73 ± 0.08

широтах ($R_c \approx 2 \div 6$ ГВ) и значительно падает к экватору. Для корреляций $\Delta R_{\text{эфф}}$ с межпланетными и геомагнитными параметрами практически не найдено широтной зависимости, только корреляция $\Delta R_{\text{эфф}}$ с B_z и E_y показывает аналогичный, но более слабый широтный эффект.

Несмотря на некоторую разницу в величине и поведении k , на низкоширотных станциях в целом корреляция между $\Delta R_{\text{эфф}}$ и $\Delta R_{\text{сrc}}$ достаточно высокая (0.7). Это свидетельствует о том, что оба используемых метода достаточно адекватно описывают ΔR в зависимости от изменения геомагнитных и межпланетных параметров на средних широтах. Разница в полученных этими методами эффектах на низкоширотных станциях требует дополнительного исследования.

Авторы благодарны за возможность использования базы данных OMNI [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>]. Работа выполнена частично при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-Г3/Ц3569/278). Результаты для $\Delta R_{\text{сrc}}$ получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>] и научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей» (сеть СКЛ) [<https://ckp-rf.ru/usu/433536>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Буров В.А., Мелешков Ю.С., Очелков Ю.П. Методика оперативной оценки уровня радиационной опасности, обусловленной возмущениями космической погоды, при авиаперевозках. Гелиогеофизические исследования. 2005, вып. 7, с. 1–41.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Изменения жесткостей обрезания космических лучей во время бурь 8–11 марта 2012 г. в период CAWSES-II. Солнечно-земная физика. 2023, т. 9, № 2, с. 86–93. DOI: [10.12737/szf-92202310](https://doi.org/10.12737/szf-92202310) / Daniilova O.A., Ptitsyna N.G., Tyasto M.I., Sdobnov V.E. Variations in cosmic ray cutoff rigidities during the March 8–11, 2012 magnetic storm (CAWSES II period). Sol.-Terr. Phys. 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 81–87. DOI: [10.12737/stp-92202310](https://doi.org/10.12737/stp-92202310).

Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром β солнечного ветра. Солнечно-земная физика. 2021, т. 7, № 4, с. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104) / Kurazhkovskaya N.A., Zотов O.D., Klain B.I. Relationship between geomagnetic storm development and the solar wind parameter β . Sol.-Terr. Phys. 2021, vol. 7, no. 4, pp. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104).

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь. Геомагнетизм и аэрономия. 2019, т. 59, № 5, с. 569–577. DOI: [10.1134/S0016793219050098](https://doi.org/10.1134/S0016793219050098).

Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N., et al. PAMELA's measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 storm. Space Weather. 2016, vol. 14, no. 3. DOI: [10.1002/2016SW001364](https://doi.org/10.1002/2016SW001364).

Akasofu S.-I. The magnetospheric currents: An introduction. In T.A. Potemra (Ed.), Magnetospheric currents. Geophysical Monograph Series. 1984, vol. 28, pp. 29–48. DOI: [10.1029/GM028p0029](https://doi.org/10.1029/GM028p0029).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst . J. Geophys. Res. 1975, vol. 80, iss. 31, pp. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).

Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. Phys Rev Lett. 1961, vol. 6, pp. 47–48. DOI: [10.1103/PhysRevLett.6.47](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47).

- Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005, vol. 3, S01001. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).
- Kanekal S., Baker D., Blake J., et al. High-latitude energetic particle boundaries and the polar cap: A statistical study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1998, vol. 103, pp. 9367–9372.
- Kovalev I.I., Olemskoy S.V., Sdobnov V.E. A proposal to extend the spectrographic global survey method. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2022, vol. 235, p. 105887. DOI: [10.1016/j.jastp.2022.105887](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105887).
- Leske R.A., Mewaldt R.A., Stone E.C., von Rosenvinge T.T. Observations of geomagnetic cutoff variations during solar energetic particle events and implications for the radiation environment at the space station. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 30011–30022. DOI: [10.1029/2000JA000212](https://doi.org/10.1029/2000JA000212).
- Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, pp. 4117–4130.
- Shimazu H. Solar proton event and proton propagation in the Earth's magnetosphere. *J. National Institute of Information and Communications Technology*. 2009, vol. 1, pp. 191–199.
- Tahir A., Wu F., Shah M., et al. Multi-instrument observation of the ionospheric irregularities and disturbances during the 23–24 March 2023 geomagnetic storm. *Remote Sensing*. 2024, vol. 16, no. 9, p. 1594. DOI: [10.3390/rs16091594](https://doi.org/10.3390/rs16091594).
- Teng W., Su Y., Ji H., Zhan Q. Unexpected major geomagnetic storm caused by faint eruption of a solar transequatorial flux rope. *Nature Communications*. 2024, vol. 15, pp. 9198–9214. DOI: [10.1038/s41467-024-53538-1](https://doi.org/10.1038/s41467-024-53538-1).
- Tsyganenko N.A., Singer H.J., Kasper J.C. Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A5, p. 1209. DOI: [10.1029/2002JA009808](https://doi.org/10.1029/2002JA009808).
- Tyasto M.I., Danilova O.A., Sdobnov V.E. Cosmic ray geomagnetic cutoff rigidities in the magnetic field of two empirical models during a strong disturbance in November 2003: A comparison of models. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2012, vol. 52, pp. 1087–1096. DOI: [10.1134/S0016793212080208](https://doi.org/10.1134/S0016793212080208).
- Tyssøy H.N., Stadsnes J. Cutoff latitude variation during solar proton events: Causes and consequences. *J. Geophys. Res. Space*. 2014, vol. 120, pp. 553–563. DOI: [10.1002/2014JA020050](https://doi.org/10.1002/2014JA020050).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 16 января 2024 г.).
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 16 января 2024 г.).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 16 января 2024 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 16 января 2024 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
- Как цитировать эту статью:*
Данилова О.А., Птицына Н.Г., Сдобнов В.Е. Геомагнитное обрезание космических лучей во время магнитной бури 23–24 марта 2023 г: связи с параметрами солнечного ветра и геомагнитной активностью с учетом широтных эффектов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 42–49. DOI: [10.12737/szf-113202505](https://doi.org/10.12737/szf-113202505).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА СОЛНЕЧНО-СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 20–25 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ МЕТОДОМ СКРЕЩЕННЫХ МЮОННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ

STUDYING DYNAMICS OF ENERGY SPECTRUM OF SOLAR DIURNAL VARIATIONS IN COSMIC RAYS DURING SOLAR ACTIVITY CYCLES 20–25, USING METHOD OF CROSSED MUON TELESCOPES

П.Ю. Гололобов 

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru

В.Г. Григорьев 

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, grig@ikfia.ysn.ru

С.К. Герасимова 

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru

Р.Ю. Gololobov

*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gpeter@ikfia.ysn.ru*

В.Г. Grigoryev

*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, grig@ikfia.ysn.ru*

С.К. Gerasimova

*Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Регистрируемая наземными детекторами интенсивность космических лучей (КЛ) испытывает солнечно-суточные вариации (ССВ), связанные с существованием в околоземном космическом пространстве анизотропного углового распределения КЛ. Долговременные наблюдения показывают, что ССВ обнаруживают зависимость от цикла солнечной активности, испытывая периодические 11- и 22-летние вариации. Такое поведение ССВ связано с изменением характера распространения галактических КЛ в гелиосфере при изменениях ее состояния в цикле солнечной активности. С другой стороны, указанное явление может быть частично обусловлено изменением величины сноса КЛ геомагнитным полем, связанное с изменениями энергетического спектра ССВ.

Данная работа посвящена изучению динамики энергетического спектра ССВ в циклах солнечной активности. Решение этой задачи представляет определенные сложности, связанные с особенностями наземной регистрации КЛ и чувствительностью детекторов к изменениям состояния окружающей среды. Для этого используется подход, основанный на применении скрещенных мюонных телескопов, позволяющий обойти эти сложности. С этой целью проводится анализ данных измерений мюонных телескопов «Якутск», «Нагоя», «Сао-Мартинью» и «Хобарт» за 1972–2022 гг. Показано, что в минимумах солнечной активности в периоды положительной полярности общего магнитного поля Солнца наблюдается значительное смягчение спектра ССВ КЛ. Полученные результаты обсуждаются.

Ключевые слова: космические лучи, солнечно-суточные вариации, энергетический спектр, мюонный телескоп.

Abstract. The cosmic ray (CR) intensity recorded by ground-based detectors experiences solar diurnal variations (SDVs) associated with the existence of anisotropic angular distribution of CRs in near-Earth space. Long-term observations show that SDVs exhibit a dependence on the solar activity cycle, experiencing periodic 11- and 22-year variations. Such behavior of SDVs is linked to a change in the nature of galactic CR propagation in the heliosphere when it changes during a solar activity cycle. On the other hand, this phenomenon can be partially due to a change in the magnitude of CR drift by the geomagnetic field associated with changes in the SDV energy spectrum.

In this work, we determine the dynamics of the SDV energy spectrum in solar activity cycles. The solution to this problem presents certain difficulties associated with peculiarities of ground-based CR recording and with the sensitivity of CR detectors to changes in the state of environment. Therefore, we employ an approach using crossed muon telescopes to estimate it, which allows us to bypass the above difficulties. We analyze data from Yakutsk, Nagoya, Sao Martinho, and Hobart muon telescopes for 1972–2022. It is shown that at solar minima during periods of positive polarity of the Sun's general magnetic field, a significant softening of the spectrum is observed. The results are discussed.

Keywords: cosmic rays, solar diurnal variation, energy spectrum, muon telescope.

ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (ГКЛ), которые распространяются в гелиосфере, непрерывно подвергаются воздействию межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра. Результатом такого взаимодействия является анизотропия углового распределения ГКЛ, наблюдаемая в околоземном космическом пространстве. Такое распределение проявляется в данных измерений наземных детекторов космических лучей (КЛ) в виде периодических 24-часовых колебаний регистрируемой интенсивности, называемых солнечно-суточными вариациями (ССВ). Известно, что в среднем амплитуды этих колебаний составляют десятые доли общей интенсивности, а максимум суточной волны приходится на 18 ч LT. Тем не менее, в солнечном цикле параметры ССВ испытывают существенные изменения, обусловленные изменениями состояния Солнца и, как следствие, всей области гелиосферы.

С начала исследований ССВ наземными детекторами основной задачей являлось определение анизотропии первичных КЛ в межпланетном пространстве. Такая задача осложнялась тем, что подход к определению анизотропии КЛ основан на необходимости охвата достаточно большой области небесной сферы за счет использования большого количества детекторов, расположенных в различных частях планеты, нередко разнотипных. Кроме того, чувствительность вторичных КЛ к изменению атмосферных параметров также представляла достаточно серьезную преграду. Помимо этого, наземные детекторы КЛ, являясь интегральными приборами, фиксирующими все частицы независимо от их энергии, имеют ограничения в исследовании энергетического спектра анизотропии. Поскольку ГКЛ — это заряженные частицы, магнитное поле Земли оказывает на них существенное влияние: изменяет траектории движения частиц, а также для некоторых из них становится непреодолимым препятствием и приводит к формированию направлений, запрещенных для распространения. Поэтому использование данных наблюдений наземными приборами требует понимания процессов взаимодействия КЛ с геомагнитным полем и атмосферой Земли.

Одним из наиболее развитых методов определения пространственно-углового распределения КЛ в межпланетной среде по данным наземных измерений является так называемый метод приемных векторов (в англоязычной литературе *coupling coefficients*) [Крымский и др., 1966, 1967; Fujimoto et al., 1984], основанный на общих представлениях о взаимодействии КЛ с атмосферой и геомагнитным полем. Метод позволяет учитывать индивидуальные приемные характеристики детектора и оценивать всевозможные искажающие факторы для определения распределения КЛ. Единственным свободным параметром при использовании этого метода является энергетический спектр вариаций, который определяется на основе анализа большого количества данных за длительное время.

Отдельной важной задачей при использовании наземных детекторов является учет так называемого

температурного эффекта — влияния температурного режима атмосферы на процесс генерации и распространения вторичных КЛ к точке наблюдения. Это сильнее всего проявляется в мюонной компоненте КЛ. Учет данного явления требует знания плотностей температурных коэффициентов [Дорман, 1957] и температурного разреза атмосферы. Плотности температурных коэффициентов рассчитываются теоретически, а высотный ход температуры требует постоянных измерений с помощью шаров-зондов над пунктом наблюдения. Такие измерения в настоящее время проводятся всего два раза в сутки, что не позволяет с достаточной точностью учитывать температурный эффект. Несмотря на развитие современных методов дистанционного зондирования [Беркова и др., 2018] и наземных косвенных измерений параметров атмосферы [Nikolashkin et al., 2020], решение этой задачи все еще актуально. Оригинальным и надежным способом обхода этой проблемы является использование предложенного в ИКФИА СО РАН шестьдесят лет назад метода скрещенных телескопов [Скрипин и др., 1965; Скрипин, 1965].

Традиционно для определения энергетического спектра ССВ используются данные измерений высоко-, средне- и низкоширотных нейтронных мониторов, а также наземных и подземных мюонных телескопов [Rao et al., 1963; Riker et al., 1989; Ahluwalia, Sabbah, 1993; Pomerantz, Duggal, 1971]. Реализация такого подхода позволила определить как вид спектра, так и его динамику в цикле солнечной активности. Было показано, что ССВ слабо зависят от энергии КЛ и остаются постоянными до некоторой энергии — верхнего порога обрезания, которая в среднем составляет ~ 100 ГэВ и варьирует в цикле. Величина этих вариаций по разным оценкам различается: например, в работе [Hall et al., 1997] показано, что верхний порог обрезания составляет 100 ± 25 ГэВ, а согласно [Ahluwalia, 1992], он меняется в пределах 50–200 ГэВ в зависимости от напряженности ММП. По-видимому, разница в оценках заключается в исследовании разных временных интервалов с наборами разбросанных по планете станций, оснащенных разнотипными детекторами КЛ. Такой подход имеет недостатки: недостаточно точный учет атмосферных факторов и индивидуальных характеристик разнотипных детекторов неизбежно приводит к большим неопределенностям. В данной работе используется метод скрещенных мюонных телескопов, позволяющий учесть этот недостаток и наиболее достоверно оценить энергетический спектр ССВ.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Были использованы данные регистрации мюонных телескопов «Нагоя», «Хобарт» и «Сао-Мартиньо» глобальной сети GMDN [Okazaki et al., 2008; <https://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>], а также мюонный телескоп Якутского спектрографа КЛ, расположенный на поверхности Земли [Chuprava et al., 2009; <https://ysn.ru/imp/>]. Основные характеристики детекторов представлены в таблице.

В данной работе для определения энергетического спектра ССВ использован оригинальный метод

Основные характеристики мюонных телескопов, использованных в данной работе

Станция	Направление	Географическое положение	Период регистрации	Скорость счета, имп/ч (на 01.01.2018)	Статистическая точность 1-часовой регистрации, %
Якутск	N30	62° N, 129° E	1972–2023	321000	0.17
	S30			322000	0.17
Нагоя	N2	35° N, 137° E	1971–2023	1356000	0.09
	S2			1340000	0.09
Хобарт	N2	43° S, 147° E	2006–2023	620000	0.12
	S2			583000	0.12
Сао-Мартинью	N2	29° S, 306° E	2006–2023	891000	0.11
	S2			916000	0.10

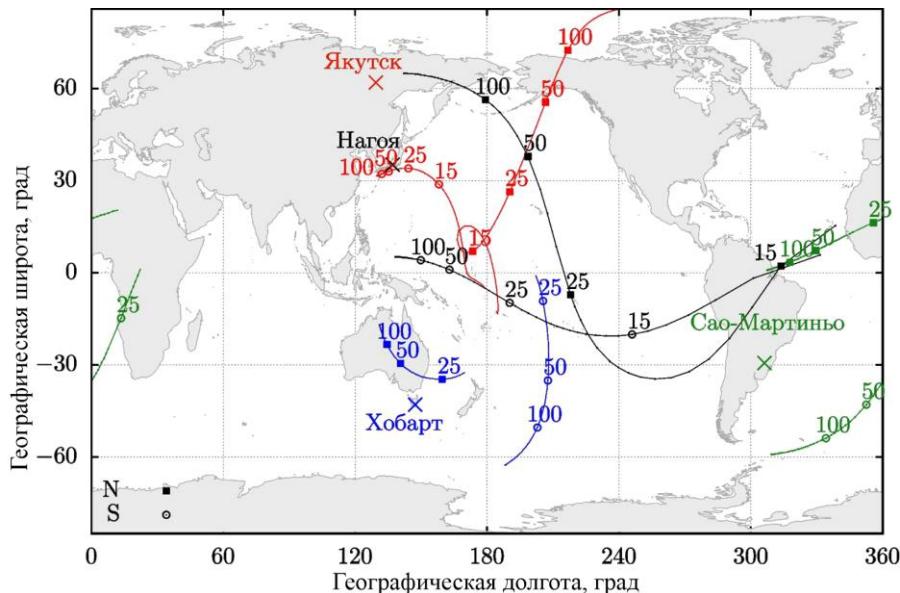


Рис. 1. Асимптотические углы прихода частиц в направлениях север и юг под зенитными углами 30° мюонных телескопов «Якутск», «Сао-Мартинью», «Нагоя» и «Хобарт». Цифрами около точек — энергии (ГВ). Положения станций отмечены крестами

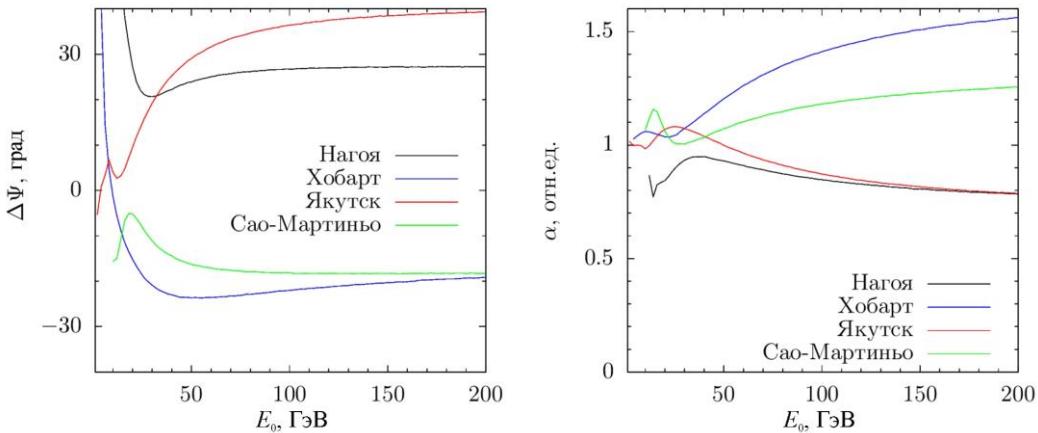
скрещенных телескопов [Скрипин и др., 1965]. Он основан на том факте, что вклад атмосферных факторов в данные регистрации пары направлений телескопа, обладающих идентичными диаграммами направленности, но разнесенных по азимуту, оказывается одинаковым. Поэтому разница интенсивностей, регистрируемых парой скрещенных направлений телескопа, заключает в себе вариации исключительно внеатмосферного происхождения, обусловленные различием чувствительности к первичной анизотропии КЛ.

В данной работе предлагается подход, несколько отличающийся от оригинального метода скрещенных телескопов, но позволяющий косвенно оценивать энергетические спектры вариаций КЛ. В качестве примера на рис. 1 показаны асимптотические углы прихода частиц с направлений север и юг, рассчитанные с помощью метода обратных траекторийных расчетов [Дорман и др., 1971]. Видно, что в целом КЛ испытывают снос к экватору геомагнитным полем,

величина которого определяется как энергией, так и географическим положением детектора. При этом связь между асимптотическими углами прихода частиц и наблюдаемыми ССВ будет следующей: широта угла прихода частицы Φ будет определять амплитуду вариаций как $\cos\Phi$, а долгота Ψ — фазу ССВ. Соответственно разность фаз $\Delta\Psi(E) = \Psi_N(E) - \Psi_S(E)$ между северным и южным направлениями регистрации будет зависеть от энергии КЛ, так же как и отношение их амплитуд $\alpha(E) = \cos\Phi_N / \cos\Phi_S$. Таким образом, использование скрещенных телескопов позволяет оценить энергетические спектры вариаций КЛ, не прибегая к использованию большого количества разных детекторов.

Для точной оценки энергетического спектра будем учитывать индивидуальные характеристики детекторов при помощи метода приемных векторов [Крымский и др., 1966, 1967], используя выражение

$$Z_n^m = x_n^m + iy_n^m = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} W(E, \theta) f_n(E) N(\theta, \varphi) e^{im\Psi(E, \theta, \varphi)} P_n^m(\sin\Phi(E, \theta, \varphi)) dE d\varphi d\theta}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} W(E, \theta) f_n(E) N(\theta, \varphi) dE d\varphi d\theta},$$

Рис. 2. Результаты расчета $\Delta\Psi$ и α при различных значениях E_0

где θ, ϕ — зенитные и азимутальные углы; E — энергия частицы; $N(\theta, \phi)$ — диаграммы направленности детектора; $W(E, \theta)$ — коэффициенты связи; $f_n(E)$ — энергетический спектр n -х гармоник вариаций КЛ.

Таким образом, сопоставляя пары скрещенных (северных и южных) направлений мюонных телескопов, можно рассчитать ожидаемые значения различия фаз $\Delta\Psi$ и отношений фаз α :

$$\alpha = \left| z_1^1 \right|_S / \left| z_1^1 \right|_N,$$

$$\Delta\Psi = \Psi_N - \Psi_S,$$

где $\Psi = \arctan(y_1^1 / x_1^1)$.

При расчете $\Delta\Psi$ и α будем предполагать, что энергетический спектр имеет вид $f_1(E \leq E_0) = \text{const}$ и $f_1(E > E_0) = 0$, где E_0 — задаваемый нами верхний порог обрезания. Полученные результаты показаны на рис. 2.

Видно, что в области энергий $E_0 \lesssim 50$ ГэВ параметры $\Delta\Psi$ и α для всех станций неоднозначны. Северо-южная асимметрия $\Delta\Psi$ и α для $E_0 \gtrsim 50$ ГэВ является ожидаемой и обусловленной структурой геомагнитного поля. При энергиях выше 150 ГэВ зависимость параметров от E_0 исчезает вследствие увеличения прозрачности геомагнитного поля для КЛ таких энергий. Ниже проведем оценку E_0 посредством сопоставления рассчитанных нами значений $\Delta\Psi$ и α с наблюдаемыми при помощи метода наименьших квадратов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление результатов расчетов $\Delta\Psi$ и α с наблюдениями скрещенными мюонными телескопами показано на рис. 3. Видно, что E_0 испытывает 22-летние колебания, составляя в среднем 80 ГэВ и испытывая кратковременное падение до 20 ГэВ в периоды минимумов солнечной активности в эпохи положительной полярности общего магнитного поля Солнца. Указанное поведение E_0 согласуется с данными измерений мюонных телескопов, удовлетворительно описывая вариации $\Delta\Psi$ и α . Высокие значения E_0 в 1980–1991 гг. по сравнению с остальным периодом, очевидно, вызваны следующими причи-

нами: при оценке E_0 до 2005 г. в анализе участвовали лишь две станции «Якутск» и «Нагоя»; до 1990 г. Якутский мюонный телескоп обладал относительно низкой статистической точностью; при энергиях > 100 ГэВ зависимости $\Delta\Psi$ и α от E_0 начинают ослабевать, поэтому возрастает неоднозначность при оценке E_0 . Поэтому справедливо считать, что такие высокие значения E_0 в эти годы обусловлены именно этими факторами. Тем не менее, на основе этих же данных можно утверждать, что указанный период характеризовался относительно высокими значениями E_0 .

Столь сильное падение E_0 до 20 ГэВ является неожиданно низким, хотя и согласуется с результатами работы [Ahluwalia, Sabbah, 1993]. При таком мягком спектре ССВ не должны наблюдаться детекторами КЛ, нечувствительными к таким энергиям. Действительно, низкоширотные нейтронные мониторы с большими порогами геомагнитного обрезания обнаруживают относительно большее падение амплитуды и смещение фазы в эти периоды, чем высокоширотные [Sabbah, 2013]. Кроме того, подземные мюонные телескопы не должны обнаруживать ССВ в эти периоды. Однако, как было показано в [Munakata et al., 2010], мюонным телескопом на станции «Матсуширо» с медианной энергией 0.6 ТэВ были зарегистрированы статистически значимые ССВ с амплитудами $\sim 0.04\%$, которые, впрочем, связывают с генерацией анизотропии за счет взаимодействия ГКЛ с нейтральной поверхностью гелиосферы, формирующей ССВ в области энергий > 100 ГэВ [Kóta et al., 2008].

Отдельного внимания заслуживает форма энергетического спектра ССВ. Рассмотренный в данной работе спектр с верхним порогом обрезания не имеет теоретического обоснования, однако, как было показано в [Rao et al., 1963; Riker et al., 1989; Ahluwalia, Sabbah, 1993; Pomerantz, Duggal, 1971; Hall et al., 1997; Ahluwalia, 1992], наилучшим образом согласуется с измерительными данными. Действительно, проведенные нами вне рамок данной работы расчеты с использованием спектра ССВ, описываемого степенной функцией, показывают меньшую степень совпадения с наблюдательными данными. Тем не менее, нельзя исключать возможность того, что спектр может иметь иную форму и изменяться в цикле солнечной активности.

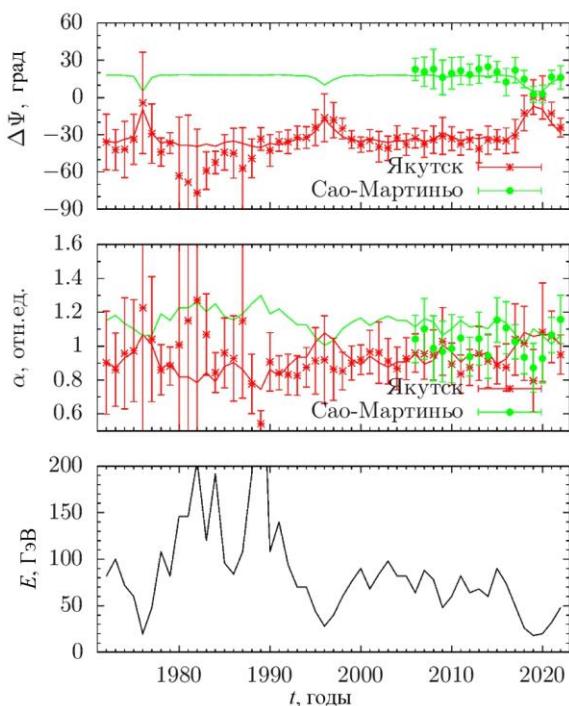


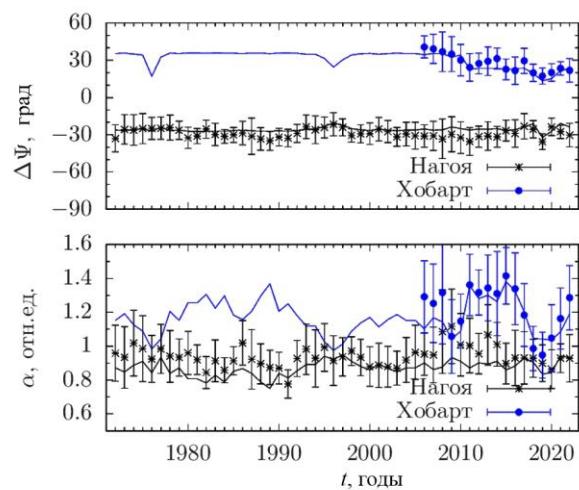
Рис. 3. Сопоставление результатов расчетов $\Delta\Psi$ и α и наблюдаемых скрещенными мюонными телескопами «Якутск», «Сао-Мартино», «Нагоя» и «Хобарт», а также результаты оценки за 1972–2022 гг. верхнего порога обрезания E_0

Как известно, зависимость гелиосферной модуляции ГКЛ от знака общего магнитного поля Солнца обусловлена их дрейфом. В эпохи положительной полярности дрейф направлен от высоких гелиоширот к низким [Герасимова и др., 2017], а в эпохи отрицательной полярности — наоборот. Такое поведение достаточно хорошо проявляется в данных 11-летних вариаций интенсивности КЛ [Гололобов и др., 2020]. Обнаруженное смягчение энергетического спектра ССВ в эти периоды может быть связано именно с этим явлением.

ВЫВОДЫ

На основе метода скрещенных телескопов проведена оценка динамики энергетического спектра ССВ в 20–25 циклах солнечной активности. Установлено, что в периоды минимумов при положительной полярности общего магнитного поля Солнца наблюдается существенное смягчение энергетического спектра ССВ. Учитывая знаковую зависимость спектра, можно заключить, что природа ее смягчения связана с дрейфом ГКЛ в гелиосфере. Полученные результаты могут служить дополнительным источником информации при разработке теории гелиосферной модуляции ГКЛ.

Авторы благодарят коллег из Global Muon Detector Network, (GMDN) [<http://hdl.handle.net/10091/0002001448>] за предоставленные данные. В работе использовались данные измерений станции космических лучей «Якутск», входящей в состав уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей». Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема номер FWRS-2021-0012).



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беркова М.Д., Григорьев В.Г., Преображенский М.С. и др. Температурный эффект мюонной компоненты, наблюдаемый на Якутском спектрографе космических лучей. *Ядерная физика*. 2018, т. 81, № 6, с. 673–682. DOI: [10.1134/S0044002718050045](https://doi.org/10.1134/S0044002718050045).
- Герасимова С.К., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г. и др. Гелиосферная модуляция космических лучей: модель и наблюдения. *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 1, с. 63–78. DOI: [10.12737/23548](https://doi.org/10.12737/23548) // Gerasimova S.K., Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G., Krivoshapkin P., Krymsky G., Starodubtsev S. Heliospheric modulation of cosmic rays: model and observation. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 1, pp. 78–102. DOI: [10.12737/article_58f970f245545.93154609](https://doi.org/10.12737/article_58f970f245545.93154609).
- Гололобов П.Ю., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф., Герасимова С.К. Исследование методом главных компонент влияния геометрии нейтрального токового слоя гелиосферы и солнечной активности на модуляцию галактических космических лучей // *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 1, с. 30–35. DOI: [10.12737/szf-61202002](https://doi.org/10.12737/szf-61202002) // Gololobov P.Yu., Krivoshapkin P.A., Krymsky G.F., Gerasimova S.K. Investigating the influence of geometry of the heliospheric neutral current sheet and solar activity on modulation of galactic cosmic rays with a method of main components. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 1, pp. 24–28. DOI: [10.12737/stp-61202002](https://doi.org/10.12737/stp-61202002).
- Дорман Л.И. *Вариации космических лучей*. М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит. 1957, 492 с.
- Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. *Космические лучи в магнитном поле Земли*. М.: Наука, 1971, 400 с.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1966, т. 6, № 6, с. 991–996.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. II. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1967, т. 7, № 1, с. 11–15.

- Скрипин Г.В. Исследование анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Якутск, 1965, 184 с.
- Скрипин Г.В., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф. и др. Изучение анизотропии космических лучей методом скрещенных телескопов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1965, т. 5, № 5, с. 817–822.
- Ahluwalia H.S. A correlation between IMF and the limiting primary rigidity for cosmic ray diurnal anisotropy. *Geophys. Res. Lett.* 1992, vol. 19, iss. 6, pp. 633–636. DOI: [10.1029/92GL00525](https://doi.org/10.1029/92GL00525).
- Ahluwalia H.S., Sabbah I.S. The limiting primary rigidity of cosmic ray diurnal anisotropy. *Planet. Space Sci.* 1993, vol. 41, iss. 2, pp. 105–112. DOI: [10.1016/0032-0633\(93\)90038-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90038-4).
- Chuprova V.P., Gerasimova S.K., Grigoryev V.G., et al. The brief history of experimental research of cosmic ray variations in Yakutia, *Adv. Space Res.* 2009, vol. 44, iss. 10, pp. 1200–1206. DOI: [10.1016/j.asr.2008.12.024](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.12.024).
- Fujimoto K., Inoue A., Murakami K., Nagashima K. Coupling coefficients of cosmic ray daily variation for meson telescopes. *Report of Cosmic-Ray Research Lab. Nagoya University*. 1984, no. 9.
- Hall D.L., Duldig M.L., Humble J.E. Cosmic-ray modulation parameters derived from the solar diurnal variation. *Astrophys. J.* 1997, vol. 482, pp. 1038–1049. DOI: [10.1086/304158](https://doi.org/10.1086/304158).
- Kóta J., Munakata K., Yasue S., et al. The origin of solar diurnal variation of galactic cosmic rays above 100 GV. *Proc. 30th ICRC*. 2008, vol. 1, pp. 589–592.
- Munakata K., Mizoguchi Y., Kato C., et al. Solar cycle dependence of the diurnal anisotropy of 0.6 TeV cosmic-ray intensity observed with the Matsushiro underground muon detector. *Astrophys. J.* 2010, vol. 712, pp. 1100–1106. DOI: [10.1088/0004-637X/712/2/1100](https://doi.org/10.1088/0004-637X/712/2/1100).
- Nikolashkin S.V., Titov S.V., Gololobov P.Yu. The effect of winter stratospheric warmings on the intensity of the muon component of secondary cosmic rays. *Proc. 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics*. 2020, vol. 11560. DOI: [10.11117/12.2575697](https://doi.org/10.11117/12.2575697).
- Okazaki Y., Fushishita A., Narumi T., et al. Drift effects and the cosmic ray density gradient in a solar rotation period: first observation with the global muon detector network (GMDN). *Astrophys. J.* 2008, vol. 681, pp. 693–707. DOI: [10.1086/588277](https://doi.org/10.1086/588277).
- Pomerantz M.A., Duggal S.P. The cosmic ray solar diurnal anisotropy. *Space Sci. Rev.* 1971, vol. 12, pp. 75–130. DOI: [10.1007/BF00172130](https://doi.org/10.1007/BF00172130).
- Rao U.R., McCracken K.G., Venkatesan D. Asymptotic cones of acceptance and their use in the study of the daily variation of cosmic ray radiation. *J. Geophys. Res.* 1963, vol. 68, iss. 2, pp. 345–369. DOI: [10.1029/JZ068i002p00345](https://doi.org/10.1029/JZ068i002p00345).
- Riker J.F., Ahluwalia H.S., Sabbah I.S. The limiting primary rigidities for the cosmic ray diurnal anisotropy during a solar magnetic cycle. *EOS: Trans. Am. Geophys. Union*. 1989, vol. 70, 1256.
- Sabbah I. Solar magnetic polarity dependency of the cosmic ray diurnal variation. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 4739–4747. DOI: [10.1002/jgra.50431](https://doi.org/10.1002/jgra.50431).
- URL: <https://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php> (дата обращения 7 марта 2025 г.).
- URL: <https://ysn.ru/ipm/> (дата обращения 7 марта 2025 г.).
- URL: <http://hdl.handle.net/10091/0002001448> (дата обращения 7 марта 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.*
- Как цитировать эту статью:*
Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г., Герасимова С.К. Исследование динамики энергетического спектра солнечно-суточных вариаций космических лучей в 20–25 циклах солнечной активности методом скрещенных мюонных телескопов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 50–55. DOI: [10.12737/szf-113202506](https://doi.org/10.12737/szf-113202506).

МГД-ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ ПРЕДФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ 10 МАЯ 2024 Г.

MHD WAVES IN THE PRE-FRONT REGION OF THE INTERPLANETARY SHOCK ON MAY 10, 2024

С.А. Стародубцев 

Институт космофизических исследований и аэрономии,
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

S.A. Starodubtsev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Сообщается об изучении динамических изменений турбулентной составляющей ММП от спокойного периода 7 мая 2024 г. до момента прихода межпланетной ударной волны (МУВ) во второй половине 10 мая 2024 г. Для достижения поставленной цели к анализу привлечены одноминутные данные прямых измерений параметров межпланетной среды на космических аппаратах (КА) ACE, DSCOVR и WIND. Методами спектрального анализа изучается эволюция спектров мощности флюктуаций модуля ММП и МГД-волн на инерционном участке спектра турбулентных флюктуаций СВ на частотах $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ – $8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц. Определен вклад альфеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн в наблюдаемый спектр мощности флюктуаций модуля ММП, измеряемого на каждом из трех КА, и установлены спектры мощности МГД-волн этих типов. Показано, что мощность спектров флюктуаций модуля ММП и МГД-волн более чем на порядок величины возрастает по мере приближения МУВ в точке ее регистрации на КА. Сделан вывод, что это является следствием генерации МГД-волн потоками штормовых частиц — космических лучей (КЛ) с энергиями ~ 1 МэВ, наблюдающихся в области перед фронтом МУВ. На основе анализа совокупности всех данных измерений сделано предположение, что значительный рост потоков КЛ низких энергий (~ 1 МэВ) и уровня турбулентности солнечного ветра может привести в изменению направления ММП в области, примыкающей к фронту МУВ.

Ключевые слова: МГД-волны, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, межпланетная ударная волна.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований в области физики космоса является прогноз космической погоды. Для этого привлекаются данные наблюдений различных приборов, которые установлены как на Земле, так и на космических аппаратах (КА), а также разрабатываются различные прогностические модели. При построении прогноза необходимо учитывать текущее состояние межпланетной среды и иметь представление о физических процессах, которые протекают в плазме солнечного ветра (СВ) при тех или иных условиях.

Abstract. The article reports on the study of the dynamics of the IMF turbulent component from the quiet period on May 7, 2024 to the arrival of an interplanetary shock wave in the second half of May 10, 2024. To achieve the stated goal, 1-minute direct measurements of interplanetary medium parameters on the ACE, DSCOVR, and WIND spacecraft are involved in the analysis. Spectral analysis methods are used to study the evolution of power spectra of fluctuations in IMF modulus and MHD waves in the inertial portion of the SW turbulence spectrum at frequencies $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ – $8.3 \cdot 10^{-3}$ Hz. The contribution of Alfvén, fast, and slow magnetosonic waves to the observed power spectrum of the IMF modulus measured by each of the three spacecraft is determined, and power spectra of MHD waves of these types are identified. It is shown that the power of the spectra of fluctuations in the IMF modulus and MHD waves increases by more than an order of magnitude as the shock wave approaches the point of its recording on the spacecraft. It is concluded that this is due to the generation of MHD waves by fluxes of energetic storm particles (ESP) — cosmic rays with energies ~ 1 MeV, observed in the region ahead of the interplanetary shock wave front. Analysis of all measurement data allows for the assumption that a significant increase in low-energy CR fluxes (~ 1 MeV) and SW turbulence levels may lead to a change in the IMF direction in the region adjacent to the IPS front.

Keywords: MHD waves, solar wind, interplanetary magnetic field, interplanetary shock.

При этом межпланетное магнитное поле (ММП) является важным компонентом космической плазмы. Оно играет значительную роль в генерации и распространении космических лучей (КЛ) в гелиосфере, а также в возникновении геомагнитных бурь и формировании различного типа пульсаций в магнитосфере Земли. Во многих случаях, немаловажное значение имеет и его турбулентная составляющая.

В научной литературе широко обсуждаются свойства турбулентности в СВ, в том числе и в окрестности фронтов межпланетных ударных волн (МУВ). В них изучаются различные характеристики флюктуаций модуля и компонент ММП, плотности и скорости

на разных участках наблюдаемого спектра турбулентности СВ (см. например, [Li et al., 2005; Hu et al., 2013; Borovsky, 2020; Pitna et al., 2021; Сапунова и др., 2024; Kim, Oh, 2024; Smith, Vasquez, 2021, 2024.]). В этих работах, в частности, отмечается, что в области перед фронтами МУВ часто наблюдается повышение мощности флюктуаций различных компонентов межпланетной среды в широкой области частот, соответствующих энергетическому, инерциальному и диссипативному участкам спектра турбулентности СВ. При этом наблюдаются также изменения показателей наклонов спектров в соответствующим им точках перегибов спектров. Кроме того, в работе [Smith, Vasquez, 2021] обращается внимание на тот факт, что, несмотря на постоянное улучшение качества получаемых на КА данных, фундаментальные вопросы физики плазмы, связанные с диссипацией энергии и наблюдаемым нагревом тепловой плазмы, до сих пор во многом остаются без ответа. Причем одной из причин этого является недостаточное количество многоточечных измерений параметров ММП и СВ на КА, которые расположены достаточно близко друг от друга, что позволило бы более качественно изучить трехмерную динамику турбулентных явлений, которая лежит в основе многих происходящих в плазме СВ физических процессов.

В связи с этим представляет интерес всестороннее изучение мощных гелиогеофизических событий, произошедших в первой половине мая 2024 г. В это время после целой серии солнечных вспышек рентгеновского класса X, сопровождающихся множественными корональными выбросами массы [Ram et al., 2024; Lazzús, Salfate, 2024], на орбите Земли наблюдались значительные изменения космической погоды и, как следствие этого, разного рода ее геофизические проявления. В частности, прохождение сильной МУВ во второй половине 10 мая 2024 г. вызвало мощную геомагнитную бурю с внезапным началом (SSC) (рис. 1, *а*). Она началась в 17:05 UT 10 мая [https://www.obsebre.es/php/geomagnetisme/vrapides/sc_2024_p.txt] и была самой мощной за последние два десятилетия после известного события 20 ноября 2003 г., известного в научной литературе как Halloween Event. Эта буря сопровождалась большим эффектом Форбуша (см. рис. 1, *б*), мощными полярными сияниями, которые наблюдались даже на низких широтах [Lazzús, Salfate, 2024], и необычной реакцией низкоширотной ионосферы вблизи экваториальной аномалии в Индии [Jain et al., 2025]. Кроме того, 11 мая 2024 г. мировой сетью нейтронных мониторов было зарегистрировано наземное возрастание космических лучей (GLE74) [<https://www.nmdb.eu>]. Поэтому это неординарное гелиогеофизическое событие требует всестороннего изучения.

Настоящая статья является продолжением нашей предыдущей работы [Стародубцев, Шадрина, 2024] и посвящена экспериментальному изучению генерации, свойствам и эволюции МГД-турбулентности СВ в области передфронтальной МУВ, которая была зарегистрирована группировкой из трех, находящихся на относительно небольшом расстоянии друг от друга, КА во второй половине 10 мая 2024 г., и которая вы-

зывала ряд ярких проявлений космической погоды на Земле.

1. ДАННЫЕ И МЕТОД

В работе использовались одноточные данные о *Dst*-индексе геомагнитной возмущенности [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>] и одноточные исправленные на давление данные регистрации интенсивности КЛ на ст. «Якутск» и «Бухта Тикси» [<https://www.ysn.ru/ipm>]. К анализу привлекались также одноточные данные по КЛ, которые были зарегистрированы на КА ACE детектором LEMS120 в эксперименте EPAM. Этот прибор предназначен для измерения потоков КЛ низких энергий (главным образом протонов) в восьми различных дифференциальных энергетических каналах: 0.047–0.068, 0.068–0.115, 0.115–0.195, 0.195–0.321, 0.321–0.580, 0.587–1.06, 1.06–1.90 и 1.90–4.80 МэВ [<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>].

В целях изучения свойств турбулентной составляющей ММП и для идентификации МГД-волн были привлечены одноточные данные прямых измерений параметров ММП и СВ группировкой из трех КА: Deep Space Climate Observatory (DSCOVR), Advanced Composition Explorer (ACE) и WIND, находящихся вблизи точки либрации L1. Подробная информация об этих КА и данные регистрации различных параметров межпланетной среды находятся в открытом доступе по адресам [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_min_merge.html; https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_mag_1m.json; https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_wind_1m.json]. Нужно специально отметить, что данные измерений на борту КА являются первичными, в них присутствуют небольшие пропуски и сбои, поэтому к их использованию необходимо подходить с осторожностью.

При анализе данных измерений КА учитывалось и положение каждого из них в околосземном космическом пространстве [<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Locator.cgi>].

При использовании всей совокупности данных КА изучались спектральные характеристики ММП и МГД-волн и их динамические изменения на инерциальном участке спектра турбулентных флюктуаций СВ на частотах $\sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ – $8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц. Отметим, что первая из частот примерно соответствует границе между энергетическим и инерциальным участками спектра турбулентных флюктуаций СВ, которая изменяется на небольшую величину с циклом солнечной активности [Коваленко, 1983], а вторая определяется частотой Найквиста $v_N = 1/(2\Delta t)$, где $\Delta t = 60$ с — шаг дискретизации используемых данных. Для выделения полезной информации из данных прямых измерений применялись методы спектрального анализа, в основе которых лежит алгоритм Блэкмена—Тьюки с корреляционным окном Тьюки [Дженкинс, Ваттс, 1971; Отнес, Эноксон, 1982]. Его использование позволило построить оценки спектров мощности флюктуаций ММП с достаточно небольшим 95%-м доверительным интервалом, соответствующим числу степеней свободы, равному 66.675 [Дженкинс, Ваттс, 1971]. Перед этим все исходные временные ряды дан-

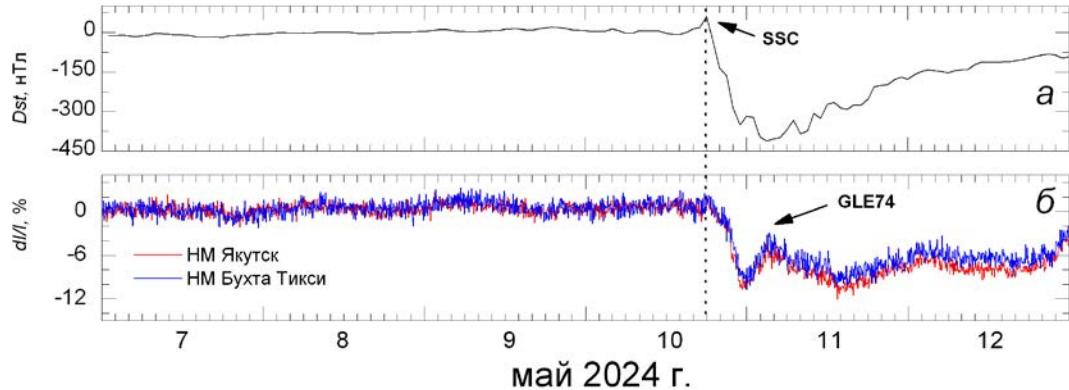


Рис. 1. Dst-индекс геомагнитной активности (а) и интенсивность КЛ по измерениям нейтронных мониторов (НМ) на ст. «Якутск» и «Бухта Тикси» (б) 7–12 мая 2024 г. Пунктир — начало геомагнитной бури и эффекта Форбуша 10 мая 2024 г., стрелки — внезапное начало магнитной бури (SSC) и наземное возрастание КЛ (GLE74)

ных подвергались стандартной процедуре подготовки к анализу. На этом этапе из данных исключались наблюдающиеся сбои и выбросы, при этом образовавшиеся пропуски в исходных рядах заполнялись значениями, полученными интерполяцией соседних измерений. Далее все временные ряды данных приводились к нулевому среднему, а затем подвергались процедуре фильтрации с помощью цифрового полосно-пропускающего фильтра в указанной выше полосе частот [Отнес, Эноксон, 1982].

Нужно заметить, что при изучении свойств флюктуаций ММП часто рассматривают спектральные характеристики его модуля и компонент. Это обусловлено тем, что по виду спектров можно сделать определенное и обоснованное заключение о наличии в СВ продольных или поперечных волн и колебаний в анализируемые интервалы времени. В частности, известно, что для поперечных альфвеновских волн наблюдаются флюктуации направления, а не величины поля. И в этом случае разница между спектрами мощности компонент и модуля ММП может достигать порядка величины. А для быстрой моды (волны сжатия) наблюдаются спектры мощности компонент и модуля ММП одного порядка, что указывает на флюктуации и направления, и величины ММП [Коваленко, 1983]. Однако по виду этих спектров мощности флюктуаций ММП невозможно сделать заключение о вкладе МГД-волн определенного типа в спектры, наблюдаемые в СВ. Но все они так или иначе вносят свой вклад в модуль ММП. Поэтому в работе при установлении спектральных характеристик МГД-волн разных типов учитывались их известные свойства. Они заключаются в том, что для альфвеновских волн (АВ) характерна корреляция между модулем ММП B и скоростью СВ V ; для быстрых магнитозвуковых волн (БМЗВ) — между B и плотностью плазмы n , а для медленных магнитозвуковых волн (ММЗВ) — между n и V [Neugebauer et al., 1978; Топтыгин, 1983]. Но поскольку в этой работе изучаются спектральные свойства флюктуаций ММП, то вместо использования коэффициента корреляции, который характеризует связь между определенными физическими величинами во временной области, используется коэффициент когерентности, который является обобщением понятия

корреляции на частотную область [Luttrell, Richter, 1986, 1987; Стародубцев и др., 2023]. Нужно отметить, что по определению коэффициент когерентности есть положительное значение квадратного корня из функции когерентности. Он изменяется от 0 до 1 и также является функцией частоты. Используемая в данной работе процедура оценок спектральных характеристик флюктуаций параметров ММП и плазмы СВ, соответствующих коэффициентов когерентности, а также методика идентификации МГД-волн и их отличие от колебаний детально описаны в [Стародубцев и др., 2023].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2–4 показаны модуль B и B_z -компоненты ММП (а), плотность n (б), скорость V (в) и температура T (г), зарегистрированные каждым из трех КА 7–12 мая 2024 г. Пунктиром показано время прихода МУВ на каждый КА. Ее приход на КА DSCOVR был зарегистрирован 10 мая 2024 г. в 16:35 UT (см. рис. 2), на КА ACE — в 16:37 UT (см. рис. 3), на WIND — в 17:05 UT (см. рис. 4). Видно (см. рис. 2–4), что начиная с 7 мая до прихода на орбиту Земли крупномасштабного возмущения СВ (выброса корональной массы сопровождавшимся МУВ) во второй половине 10 мая условия в околоземном космическом пространстве были относительно спокойными, а параметры ММП и СВ не испытывали каких-либо значительных изменений несмотря на достаточно высокие средние значения n , V , T СВ [Топтыгин, 1983].

На рис. 5, а–в в системе координат GSE показано расположение группировки трех КА относительно Земли 7 мая 2024 г. Расстояние дано в радиусах Земли R_E . Синие отрезки — направление вектора среднего ММП в разных проекциях на плоскости YX (а), ZX (б) и ZY (в). По сравнению с расстоянием от Солнца до Земли (1 а.е. $\approx 285\,185 R_E$) все КА расположены достаточно близко друг к другу. Тем не менее, можно отметить, что КА WIND находится несколько в стороне от Земли и двух остальных КА на расстоянии $\sim 100 R_E$ (рис. 5, а, в). При этом видно, что направление среднего ММП в этот период времени на всех КА практически одно и то же.

Рассмотрим теперь спектральные характеристики турбулентности СВ на основе результатов анализа

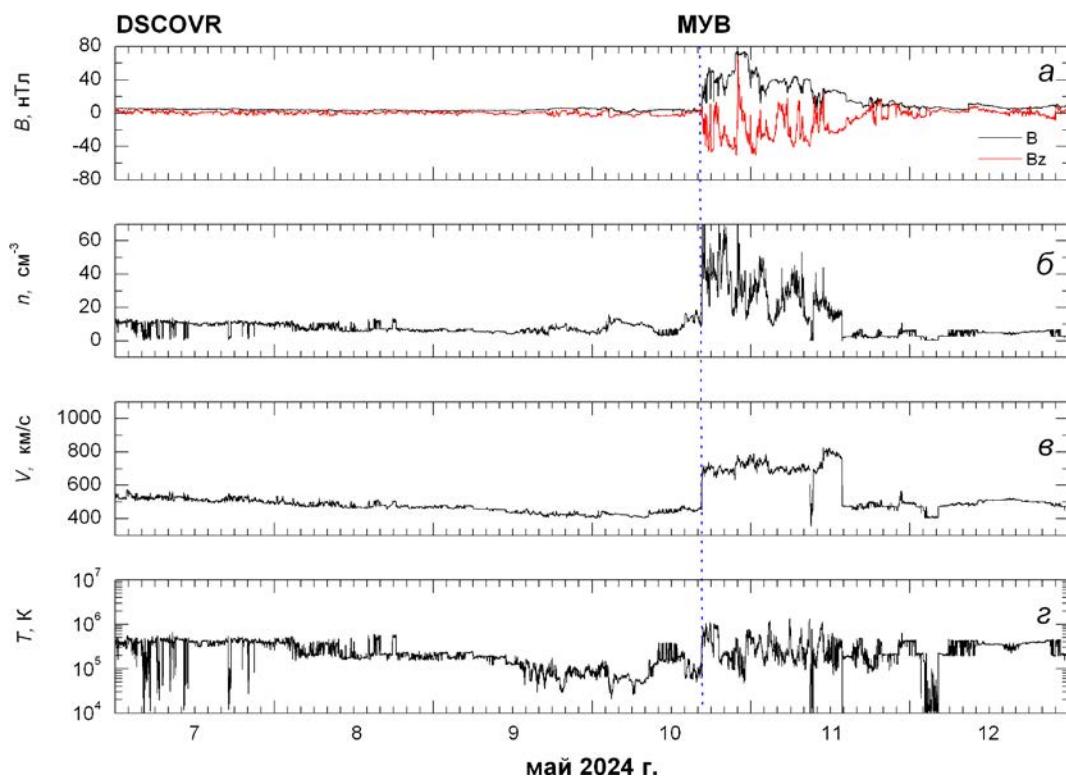


Рис. 2. Модуль B и B_z -компоненты ММП (а), плотности n (б), скорости V (в) и температуры T (г) СВ измеренные КА DSCOVR 7–12 мая 2024 г. Пунктир — время прихода МУВ

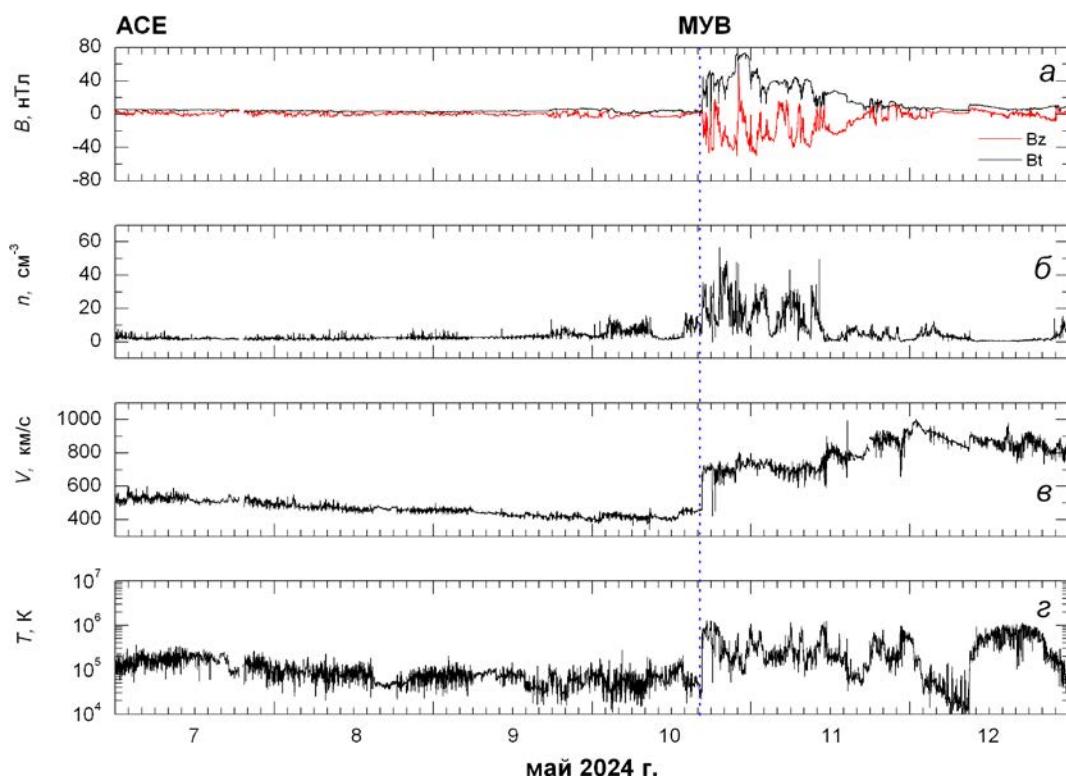


Рис. 3. То же для КА ACE

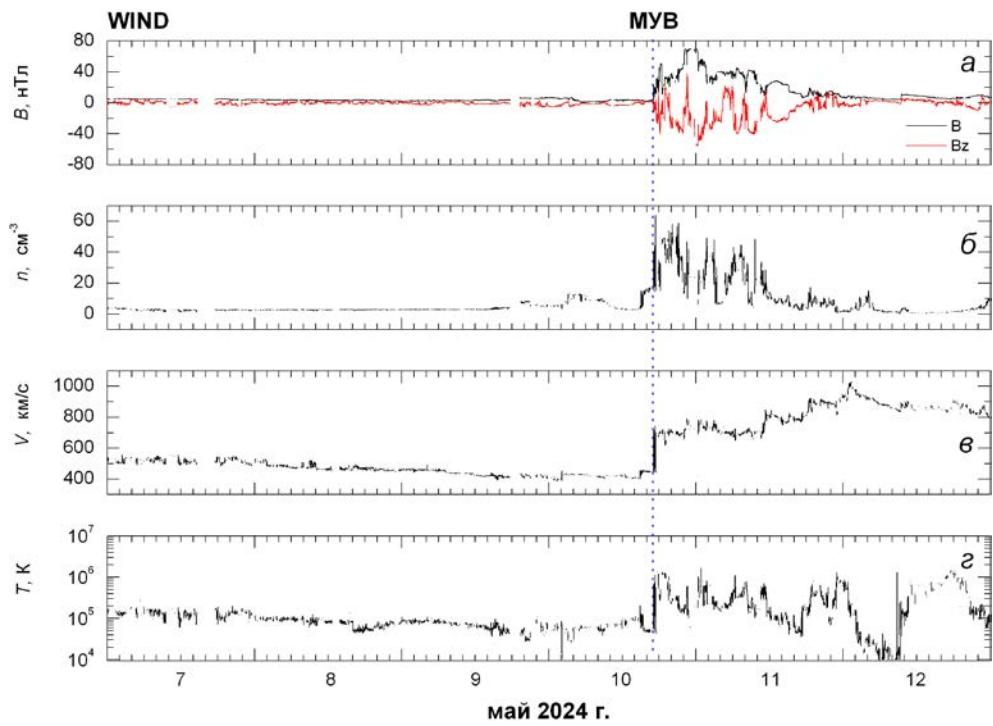


Рис. 4. То же для КА WIND

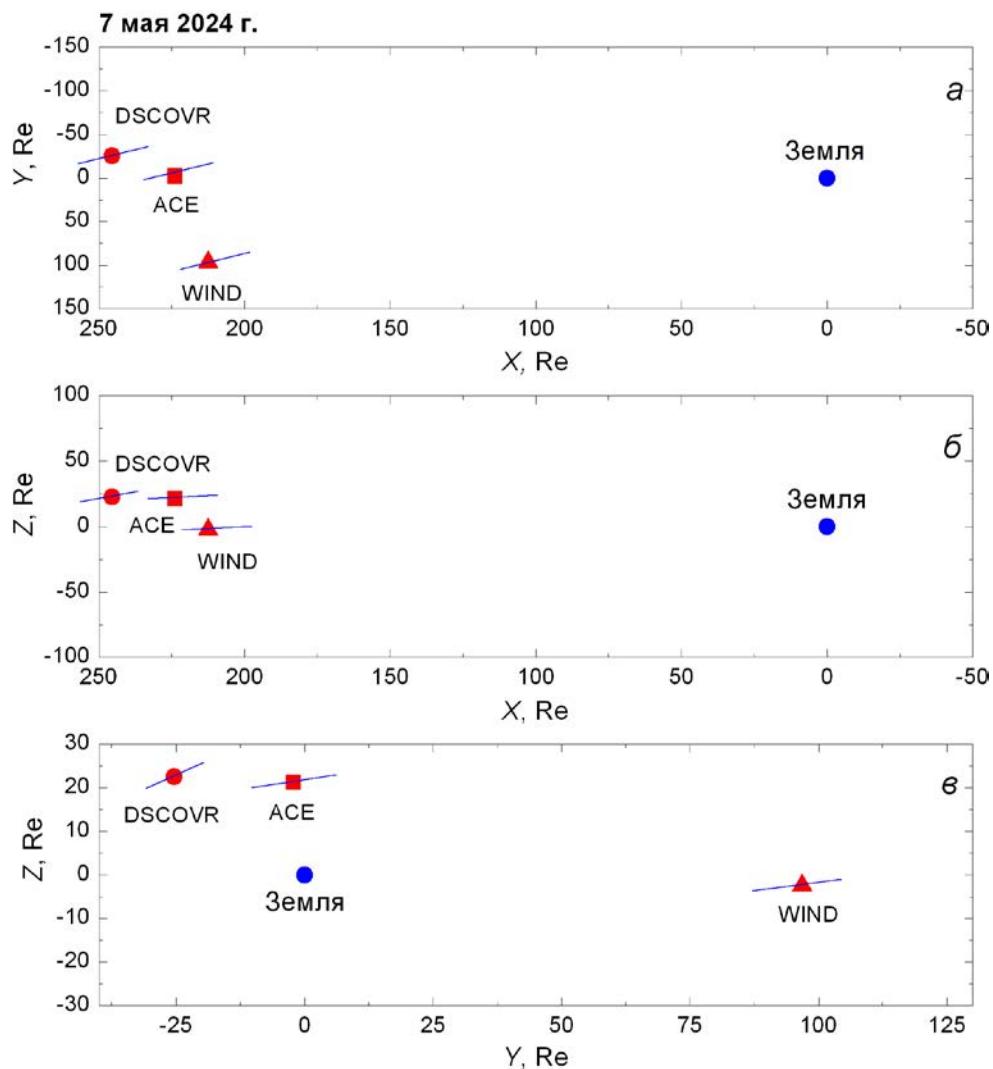


Рис. 5. Расположение группировки трех КА DSCOVR, ACE и WIND в спокойный период 7 мая 2024 г. относительно Земли в проекции на разные плоскости в системе координат GSE. Синие отрезки — направление среднего ММП на каждом КА в этот день

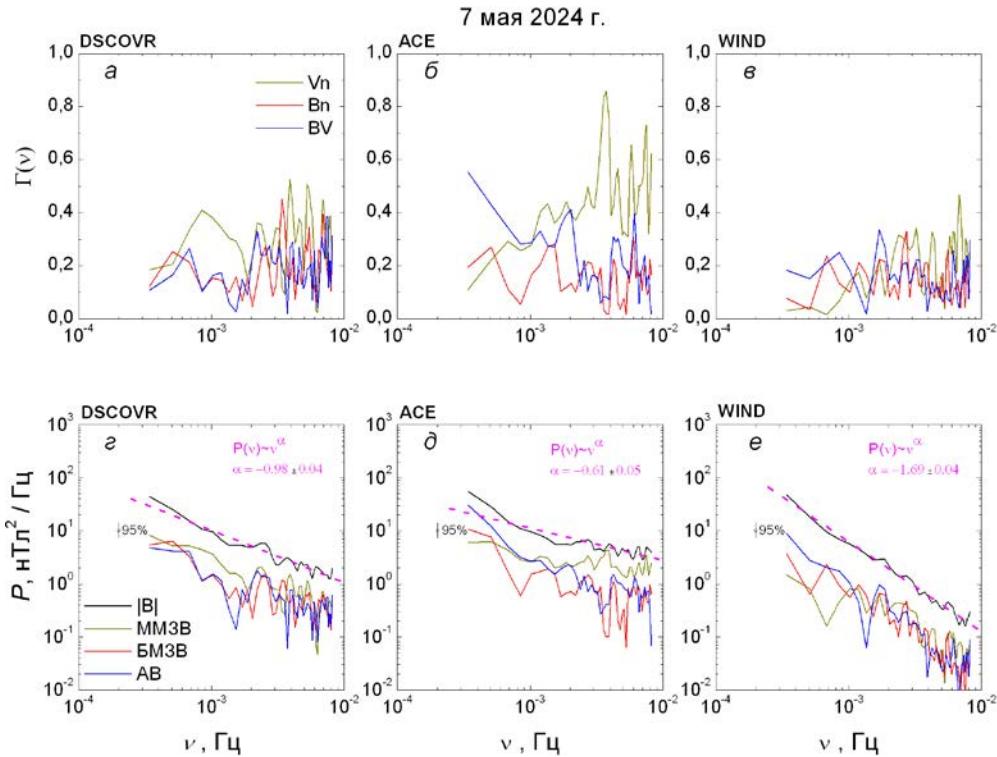


Рис. 6. Коэффициенты когерентности $\Gamma_{BI}(v)$, $\Gamma_{Bn}(v)$ и $\Gamma_{Vn}(v)$ (a–e), а также спектры мощности флюктуаций модуля ММП и установленные спектры мощности МГД-волн (e–f) для спокойного периода времени 7 мая 2024 г. Штриховая линия — аппроксимация спектров мощности флюктуаций модуля ММП; приведен описывающий их степенной закон. Показаны соответствующие легенды (a, e) для когерентностей и спектров мощности и 95 % доверительные интервалы для спектров мощности. Над каждой панелью — соответствующие названия КА

одноминутных данных прямых измерений параметров межпланетной среды на трех КА. Начнем рассмотрение со спокойного периода времени 7 мая 2024 г. На рис. 6, a–e показаны рассчитанные коэффициенты когерентности $\Gamma_{BI}(v)$, $\Gamma_{Bn}(v)$ и $\Gamma_{Vn}(v)$ как функции частоты v . Их значения определяют вклад МГД-волн одного из типов в наблюдаемый спектр мощности флюктуаций модуля ММП на определенной частоте v . Видно, что значения когерентности не очень велики, за исключением $\Gamma_{Vn}(3.5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}) = 0.86$ и $\Gamma_{BI}(3.4 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}) = 0.55$ (панель б), что означает значительный вклад ММЗВ и АВ в наблюдаемый спектр мощности флюктуаций модуля ММП на этих частотах (панель д) в рассматриваемый период времени. Что же касается вклада в него МГД-волн остальных типов на других частотах, то в целом он существенно меньше и не превышает 50 %. Вообще, чтобы установить частотные спектры МГД-волн определенного типа нужно умножить спектры мощности флюктуаций модуля ММП $P(v)$ на соответствующие значения коэффициента когерентности $\Gamma(v)$, которые рассчитаны для каждого КА. На панелях (e–f) показаны наблюдаемые спектры мощности флюктуаций модуля ММП, их аппроксимация методом наименьших квадратов и соответствующие степенные законы, которые их описывают. Необходимо отметить, что соответствующие показатели степени для КА DSCOVR и ACE имеют значения большие -1 , а для WIND — наоборот, значительно меньше -1 . Начиная с 8 мая по мере приближения к фронту МУВ показатели спектров, рассчитанные по данным КА ACE и DSCOVR, постепенно уменьшаются, стремясь к известному по-

казателю колмогоровского спектра турбулентности $-5/3$, а для WIND они достигают этого значения скачком и остаются практически такими же вплоть до ударного фронта. Возможно, это как-то связано с положением КА WIND относительно Земли и других КА, от которых он находится на расстоянии около $100R_E$ по оси Y вне границы ее магнитосферы (см. рис. 5 и 9).

На рис. 6, e–f показаны также и установленные спектры МГД-волн всех трех типов — АВ, БМЗВ и ММЗВ. Как и ожидалось, их значения не превышают значения спектров мощности флюктуаций модуля ММП, а их суммы в пределах 95 % доверительных интервалов сравнимы со спектрами мощности флюктуаций модуля ММП, измеренного каждым КА. При этом максимальные величины спектров мощности в рассматриваемой области частот вполне соответствуют спокойной ситуации в СВ [Коваленко, 1983] и даже на низкой частоте $2.5 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ их значения не превышают $10^2 \text{ нГл}^2/\text{Гц}$.

Другая картина наблюдается непосредственно перед приходом МУВ. На рис. 7, a–e для интервала времени перед приходом МУВ приведена та же информация, что и на рис. 6, a–e. Видно, что изменились значения всех коэффициентов когерентности $\Gamma(v)$, а спектр мощности флюктуаций модуля ММП вырос на порядок величины, при этом он стал более крутой с показателями степени меньше -1 . Это в полной мере относится и к каждому спектру, характеризующему МГД-волны определенного типа (см. рис. 7, e–f). Причем за фронтом МУВ в переходной турбулентной области показатели спектров на трех КА резко

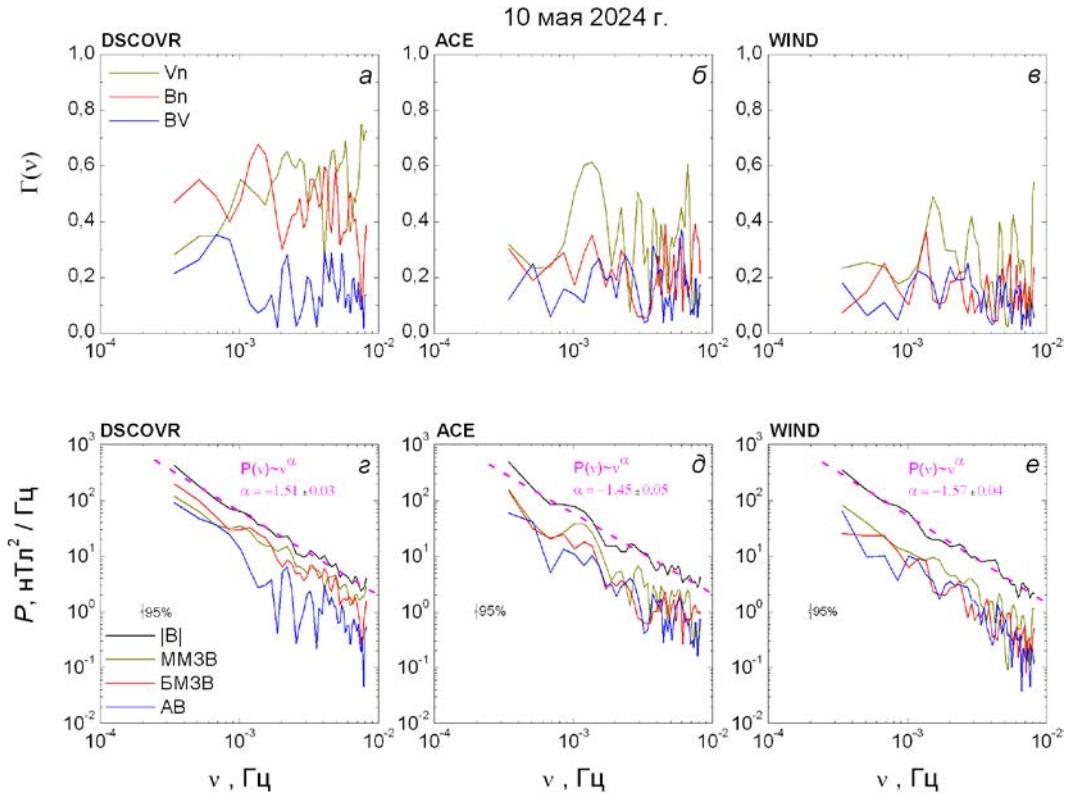


Рис. 7. То же для области предфронта МУВ 10 мая 2024 г.

в течение 2–3 ч падают до значений $-(2.0 \div 2.2)$, а затем медленно стремятся восстановиться до значений $-5/3$.

Обращает на себя внимание форма спектра мощности флюктуаций модуля ММП, рассчитанного по данным КА WIND (см. рис. 6, e и 7, e). В области предфронта МУВ он также возрастает на порядок величины, но в обоих случаях его показатель $\alpha < -1$. Это вызывает определенный вопрос, но, возможно, это связано со спагетти-структурой ММП перед фронтом МУВ или с волнистой структурой самого фронта МУВ, что мы предположили ранее в [Стародубцев, Шадрина, 2024].

Более детальный анализ динамики спектров мощности флюктуаций модуля ММП и МГД-волн показывает, что по мере приближения МУВ к КА спектры становятся все более крутыми, а их спектральная мощность возрастает. Почему это происходит, можно понять, если принять во внимание теоретические работы [Бережко, 1986, 1990; Чалов, 1988; Бережко, Стародубцев, 1988; Reames, 1989; Vainio, 2003], в которых показана возможность генерации МГД-волн потоками КЛ низких энергий. Эти авторы разработали механизмы генерации альфвеновских и магнитозвуковых волн за счет развития плазменных неустойчивостей в межпланетной среде солнечными КЛ низких энергий или частицами, ускоренными на фронтах МУВ, которые в научной литературе называют энергичными штормовыми частицами. Определяющим фактором в этих процессах является наличие в межпланетной среде КЛ низких энергий (~ 1 МэВ), характеризующихся большими потоками и градиентами. Действительно, в рассматриваемое время такие потоки КЛ после серии мощных вспышек на Солнце наблю-

дались на орбите Земли. На рис. 8, как и на рис. 2–4, показаны первичные данные. Видно, что начиная с 8 мая 2024 г. по мере приближения к КА ACE на много порядков величины возрастает поток низкоэнергичных КЛ, который состоит из солнечных и энергичных штормовых частиц с максимумом на фронте МУВ и характеризуется большим пространственным градиентом. С учетом результатов вышеупомянутых работ это позволяет сделать обоснованное заключение о причине наблюдаемого повышения уровня флюктуаций ММП, вызванного генерацией этими частицами МГД-волн в области предфронта МУВ 10 мая 2024 г.

Интересен тот факт, что в отличие от показанной на рис. 5 ситуации непосредственно в области предфронта МУВ наблюдается изменение направления среднего ММП на всех трех КА, достаточно близко расположенных относительно друг друга. Это показано на рис. 9. Можно предположить, что наличие значительных потоков штормовых частиц с энергией ~ 1 МэВ и соответствующий им рост уровня турбулентности СВ приводит к изменению направления среднего ММП в области пространства непосредственно примыкающей к фронту МУВ. Однако делать определенные выводы о причинах этого еще рано, поскольку в настоящее время набрана совсем небольшая статистика (всего 35 случаев) наблюдения подобных событий на достаточно близко расположенных относительно друг друга КА.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании проведенного исследования события регистрации МУВ 10 мая 2024 г.

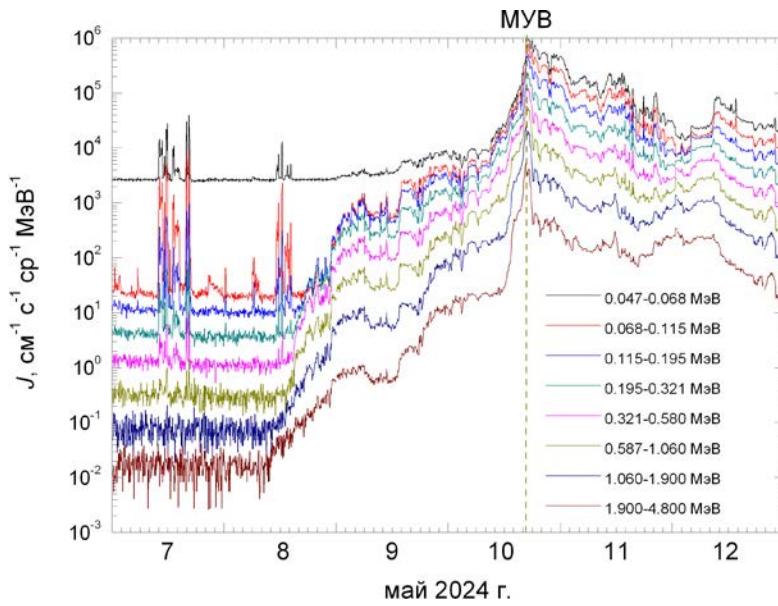


Рис. 8. Потоки низкоэнергичных КЛ в восьми различных дифференциальных каналах, зарегистрированные на борту КА ACE в эксперименте EPAM (детектор LEMS120) 7–12 мая 2024 г. Приведена легенда для дифференциальных энергетических каналов. Штриховая линия — время прихода МУВ на КА ACE, совпадающее с максимумом потока КЛ различных энергий

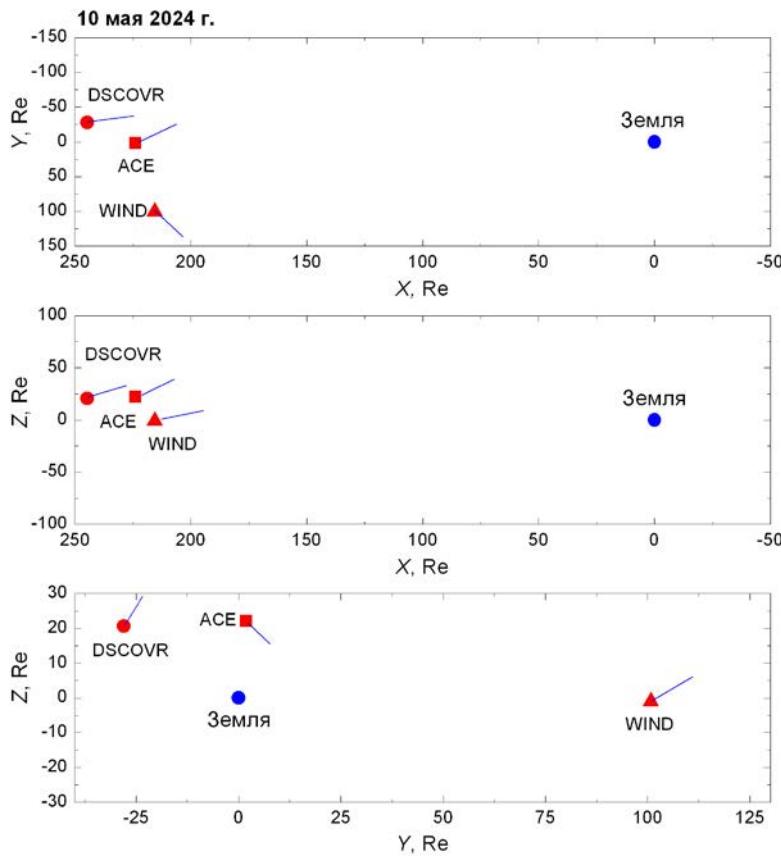


Рис. 9. То же, что на рис. 5, для области предфронта МУВ, зарегистрированной группировкой из трех КА 10 мая 2024 г.

на трех КА, которые находятся вблизи точки либрации L1, можно сделать следующие выводы.

1. На основе методов спектрального анализа с использованием данных прямых измерений параметров ММП и плазмы СВ на трех КА DSCOVR, ACE и WIND определены МГД-волны трех типов: альфвеновские, БМЗВ и ММЗВ, наблюдающиеся в рас-

сматриваемый период времени на инерционном участке спектра турбулентности СВ в области частот $\sim 2.5 \cdot 10^{-4} - 8.3 \cdot 10^{-3}$ Гц.

2. Показано, что в данном событии наблюдается значительное почти на порядок увеличение мощности флюктуаций модуля ММП и МГД-волн всех трех установленных типов в области предфронта МУВ.

3. Причиной этого являются КЛ низких энергий солнечного и межпланетного происхождения, характеризующиеся большими потоками и градиентами, наличие которых в области предфронта МУВ привели к генерации МГД-волн.

4. Предполагается, что значительный рост потоков КЛ низких энергий (~1 МэВ) и уровня турбулентности СВ может привести в изменению направления ММП в области пространства непосредственно примыкающей к фронту МУВ.

Автор благодарит сотрудников Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration, NASA/Goddard Space Flight Center, ACE Science Centers и Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism (Kyoto University) за предоставление свободного доступа к данным КА DSCOVR, ACE и WIND и информации о *Dst*-индексе геомагнитной активности.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН FWRS-2021-0012.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бережко Е.Г. Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами. *Письма в АЖ*. 1986, т. 12, с. 842–847.
- Бережко Е.Г. Генерация МГД-волн в межпланетной плазме потоками солнечных космических лучей. *Письма в АЖ*. 1990, т. 16, № 12, с. 1123–1132.
- Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей. *Изв. АН СССР. Серия физическая*. 1988, т. 52, с. 2361–2363.
- Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971, вып. 1, 316 с.
- Коваленко В.А. *Солнечный ветер*. М.: Наука, 1983, 272 с.
- Отнес Р., Эноксон Л. *Прикладной анализ временных рядов. Основные методы*. М.: Мир, 1982, 430 с.
- Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Ермолов Ю.И., Застенкер Г.Н. Спектры флуктуаций параметров плазмы солнечного ветра вблизи фронта ударной волны. *Космические исследования*. 2024, т. 62, № 1, с. 3–12. DOI: [10.31857/S0023420624010018](https://doi.org/10.31857/S0023420624010018).
- Стародубцев С.А., Шадрина Л.П. МГД-волны в области предфронта межпланетных ударных волн 6 и 7 сентября 2017 г. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 53–61. DOI: [10.12737/szf-103202406](https://doi.org/10.12737/szf-103202406) / Starodubtsev S.A., Shadrina L.P. MHD waves at the pre-front of interplanetary shocks on September 6 and 7, 2017. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 50–57. DOI: [10.12737/stp-103202406](https://doi.org/10.12737/stp-103202406).
- Стародубцев С.А., Зверев А.С., Гололобов П.Ю., Григорьев В.Г. Флуктуации космических лучей и МГД-волны в солнечном ветре. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 2, с. 78–85. DOI: [10.12737/szf-92202309](https://doi.org/10.12737/szf-92202309) / Starodubtsev S.A., Zverev A.S., Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G. Cosmic ray fluctuations and MHD waves in the solar wind. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 73–80. DOI: [10.12737/stp-92202309](https://doi.org/10.12737/stp-92202309).
- Топтыгин И.Н. *Космические лучи в межпланетных магнитных полях*. М.: Наука, 1983, 304 с.
- Чалов С.В. Неустойчивость диффузионной ударной волны в плазме с космическими лучами. *Письма в АЖ*. 1988, т. 14, № 3, с. 272–276.
- Borovsky J.E. A statistical analysis of the fluctuations in the upstream and downstream plasmas of 109 strong compression interplanetary shocks at 1 AU. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, iss. 6, article id. e27518. DOI: [10.1029/2019JA027518](https://doi.org/10.1029/2019JA027518).
- Hu Q., Zank G.P., Li G., Ao X. A power spectral analysis of turbulence associated with interplanetary shock waves. *AIP Conf. Ser.* 1539, *Proc. of the Thirteenth International Solar Wind Conf.* 2013. 175. DOI: [10.1063/1.4811016](https://doi.org/10.1063/1.4811016).
- Jain A., Trivedi R., Jain S., Choudhary R.K. Effects of the super intense geomagnetic storm on 10–11 May, 2024 on total electron content at Bhopal. *Adv. Space Res.* 2025, vol. 75, iss. 1, pp. 953–965. DOI: [10.1016/j.asr.2024.09.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.09.029).
- Kim S., Oh S. Characteristics of interplanetary shock sheath regions in the solar wind inducing the Forbush decreases. *J. Korean Astron. Soc.* 2024, vol. 57.
- Lazzús J.A., Salfate I. Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2024, vol. 261, 106304. DOI: [10.1016/j.jastp.2024.106304](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106304).
- Li G., Hu Q., Zank G.P. Upstream turbulence and the particle spectrum at CME-driven shocks. *Proc. AIP Conf. "Physics of Collisionless Shocks"*. 2005, vol. 781, pp. 233–239. DOI: [10.1063/1.2032702](https://doi.org/10.1063/1.2032702).
- Luttrell A.H., Richter A.K. Power spectra of low frequency MHD turbulence up- and downstream of interplanetary fast shocks within 1 AU. *Ann. Geophys.* 1986, vol. 4, pp. 439–446.
- Luttrell A.H., Richter A.K. Study of MHD fluctuations upstream and downstream of quasiparallel interplanetary shocks. *J. Geophys. Res.* 1987, vol. 92, pp. 2243–2252.
- Neugebauer M., Wu C.S., Huba J.D. Plasma fluctuations in the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, pp. 1027–1034.
- Pitna A., Safrankova J., Nemecek Z., et al. Turbulence upstream and downstream of interplanetary shocks. *Frontiers in Physics*. 2021, vol. 8, id. 654. DOI: [10.3389/fphy.2020.626768](https://doi.org/10.3389/fphy.2020.626768).
- Ram T., Veenadhari S., Dimri B., et al. Super- intense geomagnetic storm on 10–11 May 2024: Possible mechanisms and impacts. *Space Weather*. 2024, vol. 22, iss. 12, e2024SW004126. DOI: [10.1029/2024SW004126](https://doi.org/10.1029/2024SW004126).
- Reames D.V. Wave generation in the transport of particles from large solar flares. *Astrophys. J. Lett.* 1989, vol. 342, no. 1, Part 2, pp. L51–L53.
- Smith C.W., Vasquez B.J. Driving and dissipation of solar-wind turbulence: what is the evidence? *Front. Astron. Space Sci.* 2021, vol. 7, id. 114. DOI: [10.3389/fspas.2020.611909](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.611909).
- Smith C.W., Vasquez B.J. The unsolved problem of solar-wind turbulence. *Front. Astron. Space Sci.* 2024, vol. 11, id. 1371058. DOI: [10.3389/fspas.2024.1371058](https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1371058).
- Vainio R. On the generation of Alfvén waves by solar energetic particles. *Astron. Astrophys.* 2003, vol. 406, pp. 735–740.
- URL: https://www.obsebre.es/php/geomagnetisme/vrapides_ssc_2024_p.txt (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://www.nmdb.eu> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://www.ysn.ru/ipm> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://izwl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/wind_min_merge.html (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_mag_1m.json (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: https://services.swpc.noaa.gov/json/rtsw/rtsw_wind_1m.json (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- URL: <https://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Locator.cgi> (дата обращения 27 февраля 2025 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.
- Как цитировать эту статью:
- Стародубцев С.А. МГД-волны в области предфронта межпланетной ударной волны 10 мая 2024 г. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 56–64. DOI: [10.12737/szf-113202507](https://doi.org/10.12737/szf-113202507).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СИСТЕМЕ МАГНИТОСФЕРА—ИОНОСФЕРА КОМПРЕССИОННЫХ ДЛИНОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ, ПРОНИКАЮЩИХ ИЗ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ

FEATURES OF PROPAGATION OF COMPRESSIVE LONG-PERIOD OSCILLATIONS PENETRATING FROM THE INTERPLANETARY MEDIUM IN THE MAGNETOSPHERE—IONOSPHERE SYSTEM

А.В. Моисеев 

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, moiseev@ikfia.ysn.ru

В.И. Попов

Институт космофизических исследований и аэрономии
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, volts@mail.ru

В.В. Мишин

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vladm@iszf.irk.ru

Ю.В. Пенских

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, penskikh@iszf.irk.ru

A.V. Moiseev

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, moiseev@ikfia.ysn.ru*

V.I. Popov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, volts@mail.ru*

V.V. Mishin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vladm@iszf.irk.ru*

Yu.V. Penskikh

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, penskikh@iszf.irk.ru*

Аннотация. По спутниковым и наземным наблюдениям изучены свойства Pi3-пульсаций с периодом ~30 мин в системе магнитосфера—ионосфера. По данным наземных магнитных станций в предполуденном секторе магнитосферы, выявлено распространение пульсаций по азимуту с дневной стороны на ночную со скоростью 3–9 км/с в полосе исправленных геомагнитных широт $\Phi' = 76^\circ - 79^\circ$. Вдоль меридиана сигнал распространялся к полюсу со скоростью 0.5–5 км/с. Анализ спектров сигналов на станциях, расположенных вдоль разных меридианов, позволил выявить три максимума: первый, не зависящий от широты на частоте 0.55 мГц, и два широтнозависимых максимума на частотах 0.82 и 0.96 мГц, соответственно на более высокой и более низкой широтах. Первый максимум соответствует УНЧ-волнам, проникающим из солнечного ветра, два других — магнитосферным резонансам. Эквивалентная токовая система (ЭТС) во время регистрации пульсаций была рассчитана двумя способами: методом сферических элементарных токовых систем и с помощью техники инверсии магнитограмм. Анализ ЭТС, полученных обоими методами, показал их удовлетворительное согласие. ЭТС во время пульсаций в дополуденном секторе представляла собой большой вихрь, состоящий из более мелких, которые распространялись в ионосфере вдоль линии раздела море—суша, т. е. преобладало распространение по меридиану к полюсу со скоростями, близкими к скоростям распространения пульсаций. Согласно карте распределения продольных токов в ионосфере, широтный максимум западной электроструи лежит на широтах максимума ЭТС (на юге большого вихря) на границе между областями

Abstract. We have studied properties of Pi3 pulsations with a period of ~30 min in the magnetosphere—ionosphere system, using satellite and ground-based observations. According to the data from ground-based magnetic stations in the pre-noon sector of the magnetosphere, propagation of pulsations was revealed in azimuth from the day side to the night side at a velocity 3–9 km/s in the band of corrected geomagnetic latitudes $\Phi' = 76^\circ - 79^\circ$. Along the meridian, the signal propagated poleward at a velocity 0.5–5 km/s. Analysis of signal spectra at stations located along different meridians shows three maxima: one latitude-independent maximum at a frequency of 0.55 mHz, and two latitude-dependent maxima at frequencies of 0.82 and 0.96 mHz respectively, at higher and lower latitudes. The first maximum corresponds to ULF waves penetrating from the solar wind; the other two, to magnetospheric field line resonances. The equivalent current system (ECS) during the pulsation recording was obtained by two methods: the method of spherical elementary current systems and the magnetogram inversion technique. Analysis of ECS derived by both methods has demonstrated that they match each other. The ECS during pulsations in the pre-noon sector is a large vortex consisting of smaller vortices that propagate in the ionosphere along the “sea-land” boundary line, i.e. meridional poleward propagation at velocities close to the average pulsation propagation velocities prevailed. According to the map of field-aligned current distribution in the ionosphere, the width of the maximum of the westward electrojet lies at the latitude of the ECS maximum (in the south of the large vortex) on the boundary between the regions of inflowing and outflowing field-aligned currents

втекающих и вытекающих продольных токов (области 1 и 2), где наблюдаются резонансы силовых линий. Полученная ЭТС соответствует токовой системе DP2 с преобладающей западной электроструей в до-полуденном и ночном секторах. Анализ спутниковых данных показал следующее: в солнечном ветре УНЧ-волны в диапазоне Pi3-пульсаций распространялись со скоростью 186.4 км/с, что значительно ниже скорости движения среды, достигавшей 550 км/с. Такая скорость объясняется тем, что волны распространяются в сторону Солнца и сносятся солнечным ветром к Земле. В магнитосфере пульсации с преобладающей компрессионной компонентой распространяются сочной стороны на дневную со скоростью 90–110 км/с. По задержкам в наступлении максимумов дифференциальных потоков энергичных электронов были выявлены скорости распространения этих УНЧ-волн 20–40 км/с.

Сделан вывод, что пульсации в данном событии были обусловлены как внешним (колебаниями в солнечном ветре), так и внутренним источниками (магнитосферным резонатором, который мог быть возбужден в том числе и суббурей). При этом динамика тонкой структуры большого вихря (малых вихрей) в магнитосфере в целом совпадает по скорости и направлению распространения с геомагнитными пульсациями.

Ключевые слова: геомагнитные Pi3-пульсации, эквивалентные токовые вихри, азимутальное и меридиональное распространение, проникновение УНЧ-волн из межпланетной среды в магнитосферу, резонансы силовых линий.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что Pi3-пульсации — иррегулярные длиннопериодные колебания геомагнитного поля, которые могут генерироваться во время магнитосферной суббури [Saito, Matsushita, 1967]. В обзорной работе [Saito, 1978] приведена классификация, согласно которой Pi3 разделяются на подкатегории: Ps6 и Pip. Ps6-пульсации ($T > 400$ –600 с) преобладают в D-компоненте геомагнитного поля, у Pip-пульсаций ($T < 400$ с) амплитуды сравнимы во всех компонентах. Источником Pi3, как и других геомагнитных пульсаций, являются пространственно-временные вариации интенсивности трехмерных токовых систем [Saito, 1969]. Pi3-пульсации, связанные с суббурей, как правило, локализованы в ночном секторе магнитосферы. В то же время известна связь Pi3-пульсаций с вариациями параметров межпланетной среды [Han et al., 2007]. В работе [Alimaganbetov, Streltsov, 2018] проведен статистический анализ волновых возмущений в солнечном ветре (СВ) во время суббури и обнаружено, что волновые возмущения с частотами 0.6–0.7 мГц часто наблюдаются во время суббури одновременно и в СВ, и на Земле. Предположительно, Pi3, обусловленные внешним воздействием, должны не только регистрироваться в ночном секторе магнитосферы, но и образовывать высокоширотную токовую систему соответствующих пространственных масштабов.

(regions 1 and 2), where field line resonances are observed. The obtained ECS corresponded to the DP2 current system with a predominant westward electrojet in the pre-noon and night sectors. Satellite data analysis has shown the following. In the solar wind, ULF waves in the Pi3 pulsation range propagated at a velocity of 186.4 km/s, which is significantly lower than the velocity of the medium being as high as 550 km/s. This velocity is explained by the fact that the waves propagate toward the Sun and are carried by the solar wind to Earth. In the magnetosphere, pulsations with a predominant compression component propagated from the night side to the day side at a velocity 90–110 km/s; from the delays in the onset of maxima of energetic electron differential fluxes, velocities 20–40 km/s were identified.

Pulsations in this event were caused by both external (oscillations in the solar wind) and internal sources (magnetospheric resonator, which could be excited, among other things, by a substorm). The dynamics of the “fine structure” of a large vortex — small vortices, in the magnetosphere as a whole coincides in propagation velocity and direction with geomagnetic pulsations.

Keywords: geomagnetic Pi3 pulsations, equivalent current vortices, azimuthal and meridional propagation, penetration of ULF waves from the interplanetary medium into the magnetosphere, field line resonance.

Известно, что взаимодействие диамагнитной структуры (ДС) с магнитосферой Земли приводит к явлениям, подобным суббуровым, которые могут сопровождаться Pi3-пульсациями [Пархомов и др., 2017]. Эти структуры фактически представляют собой магнитные жгуты, заполненные плазмой [Еселеевич, Еселеевич, 2005]. На их поверхности течет диамагнитный ток, уменьшающий магнитное поле внутри и увеличивающий его вне трубы.

Важной характеристикой пульсаций является их распространение, направление которого может указывать на их источник. В работе [Моисеев и др., 2020] по наземным геомагнитным наблюдениям было обнаружено азимутальное распространение пульсаций со скоростью 0.6–10.6 км/с на восток и на запад от полуночи, вдоль меридиана пульсации распространялись к экватору со скоростью 0.75–7.87 км/с. Распространение пульсаций можно оценивать также по смещению их токовых систем. В работе [Моисеев и др., 2024a] выполнено сравнение скоростей распространения геомагнитных пульсаций, локализованных на дневной стороне и обозначаемых TCV (travelling convection vortices), по фазовым задержкам пульсаций и на основе перемещения их эквивалентных токовых систем. Скорости распространения, измеренные этими методами, отличаются примерно в два раза (больше по фазовым задержкам).

Таблица 1

Координаты наземных станций (SMAG), используемых для изучения азимутального распространения пульсаций

Усредненная широта	Аббревиатура	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
76–79	GHC	68.63	264.15	77.54	–31.68
	IGC	69.30	278.2	78.43	–5.39
	UPN	72.78	303.85	78.93	40.20
	NAL	78.92	11.95	76.57	109.96
	DMH	76.77	341.37	77.34	84.38

В настоящей работе мы проанализируем распространение Pi3-пульсаций, регистрируемых глобально по наземным и спутниковым наблюдениям. Продольные токи во время пульсаций будем изучать с помощью техники инверсии магнитограмм. Насколько нам известно, исследований динамики глобальных пульсаций и вихрей соответствующих пространственных масштабов ранее не проводилось.

Целью работы является изучение морфологии и динамики больших токовых вихрей — высокоширотной токовой системы глобальных Pi3-пульсаций, а также изучение вклада внешних и внутренних источников в частотный спектр пульсаций. Для анализа было выбрано событие 11.09.2015, в котором наблюдались геомагнитные пульсации в диапазоне Pi3.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для изучения меридионального и азимутального распространения геомагнитных Pi3-пульсаций и эквивалентных токовых вихрей использовались данные геомагнитных наблюдений известной базы данных SUPERMAG [Gjerloev, 2012; <https://supermag.jhuapl.edu/mag/>]: координаты станций приведены в табл. 1 и 2. Для построения эквивалентных токовых систем методом сферических элементарных токовых систем (СЭТС) использовалась 61 станция SUPERMAG с географическими широтами 45.14°–77.47° и долготами 199.54°–267.89°; методом техники инверсии магнитограмм (ТИМ) — 144 станции Северном полушарии, 34 — в Южном полушарии. На спутниках использовались измерения базы данных CDAWEB [<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>]. Координаты спутников приведены в табл. 3. Для изучения распространения использовались данные наземных станций с временным разрешением 60 с, поскольку длительность фазовых задержек сигналов ≥ 60 с. Спутниковые данные использовались с временным разрешением 3 (Themis), 60 (Geotail), 4 (Cluster), 5 с (GOES).

2. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Сравнивались скорости распространения по азимуту, полученные двумя методами: по фазовым задержкам магнитных вариаций на станциях и по перемещению вихрей эквивалентных ионосферных токов. Методы описаны в [Моисеев и др., 2024б]. В исследуемом событии пульсации с хорошо выраженной формой наблюдались на высоких широтах, по-

этому их азимутальное распространение изучалось только вдоль исправленных геомагнитных широт $\Phi' = 76^\circ$ – 79° .

Продольные токи (ПТ) Pi3-пульсаций изучались с помощью ТИМ [Базаржапов и др., 1979; Mishin, 1990; Пенских, 2020]. Этот метод позволяет рассчитывать основные электродинамические параметры ионосферы с одноминутным временным разрешением по данным поля геомагнитных вариаций мировой сети наземных магнитометров. В данной работе с помощью ТИМ были получены: эквивалентные токовые функции, ПТ при однородной проводимости, а также границы зон ПТ [Лунюшкин, Пенских, 2019; Пенских и др., 2021]. Для выделения Pi3-пульсаций из геомагнитных данных нами использовался цифровой полосовой фильтр, настроенный на частоты, соответствующие этим пульсациям [Моисеев и др., 2024б].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рис. 1 показаны данные измерений параметров плазмы и межпланетного магнитного поля (ММП) в СВ: компоненты ММП и концентрация ионов (a – g), V_x -компоненты скорости ионов и динамическое давление СВ P_d (d , e) по данным спутника THEMIS-B (ThB) в событии 11.09.2015. Внизу на панелях jc , z для рассматриваемого интервала показаны индексы AL и $SYM-H$. С 9:00 до 11:00 UT наблюдались три колебания с периодом ~ 30 мин в B_z -компоненте ММП и P_d , которые проявились на земной поверхности в вариациях AL и геомагнитных пульсациях в диапазоне Pi3. Колебаниям предшествовал интервал, в котором B_z ММП была направлена к югу с 07:30–09:00 UT. В это время отмечались $B_x < 0$, $B_y > 0$, V_x -компоненты скорости СВ нарастила с 450 до 550 км/с. Концентрация ионов в этом интервале изменялась в противофазе с модулем ММП, такие изменения концентрации плазмы и магнитного поля наблюдаются в ДС [Пархомов и др., 2017], а также типичны для колебаний медленной моды [Hada, Kennel, 1985]. Как показывают геомагнитные индексы, событие регистрировалось во время умеренной магнитной бури и на фоне завершения интенсивной суббури, взрывная фаза которой длилась с 08:14 до 09:40 UT.

На рис. 2 показаны изменения магнитного поля на спутниках в СВ в полуденном и утреннем секторах магнитосферы в 9:00–11:00 UT. Данные наблюдений в СВ даны со сдвигом 10 мин, чтобы проще было сравнить форму колебаний в СВ и магнитосфере.

Таблица 2

Координаты наземных магнитометрических станций,
используемых для изучения меридионального распространения геомагнитных пульсаций

Аббревиатура	Сеть	Географические координаты		Исправленные геомагнитные координаты	
		широта	долгота	широта	долгота
THL	GrW	77.47	290.77	84.72	29.24
SVS		76.02	294.9	83.00	32.87
KUV		74.57	302.82	80.69	41.92
UPN		72.78	303.85	78.93	40.20
UMQ		70.68	307.87	76.38	42.58
GDH		69.25	306.47	75.25	39.39
ATU		67.93	306.43	73.99	38.19
STF		67.02	309.28	72.64	40.87
SKT		65.42	307.10	71.43	37.22
FHB		62.00	310.32	67.41	39.05
NAQ	USAE	61.16	314.56	65.75	43.19
IGC		69.30	278.20	78.43	-5.39
RPB		66.52	273.77	75.99	-13.51
CDC		64.20	283.40	73.47	3.04
T47		62.20	284.35	71.51	4.23
T53		60.82	281.85	70.39	0.08
T46		60.05	282.71	69.60	1.36
T44		58.47	281.92	68.14	-0.04
T31		56.50	280.80	66.31	-1.92
T52		53.79	282.38	63.54	0.26
T51	USAC	48.05	282.22	57.86	-0.43
OTT		45.40	284.45	54.98	2.52
RES		74.69	265.11	82.93	-35.54
GHC		68.63	264.15	77.54	-31.68
BLC		64.32	263.99	73.60	-30.06
RAN		62.82	267.89	72.45	-23.12
FCC		58.76	265.91	68.50	-25.59
GIM		56.38	265.36	66.16	-26.08
PIN		50.20	263.96	59.96	-27.43
C08		45.87	264.92	55.72	-25.69
T56	USAWS	45.59	267.03	55.60	-22.65
YKC		62.48	245.52	69.42	-56.85
SMI		60.03	248.07	67.48	-52.27
FMC		56.66	248.79	64.28	-50.02
T36		54.71	246.69	61.95	-52.09
C06		53.35	247.03	60.64	-51.24
RED		52.14	246.16	59.25	-51.96
T43		50.87	245.70	57.86	-52.17
T03		50.37	247.02	57.60	-50.40
LET		49.64	247.13	56.88	-50.07

Сверху вниз показаны модуль B и $B_{x,y,z}$ -компоненты магнитного поля. На рис. 3 показаны те же данные после полосовой фильтрации: видно, что фильтр не вносит фазовых искажений в исходные сигналы. Вариации в СВ на ThB, ThC и в полуденном секторе магнитосферы на Geotail (GL) похожи, из чего следует, что форма изменений поля в полуденном секторе в значительной степени обусловлена их проникновением из СВ.

Значение $V=186.4$ км/с (меньше $V_{CB}=550$ км/с) скорости УНЧ-волн было определено по фазовой задержке в колебаниях модуля вектора магнитного поля $|\mathbf{B}|$ между спутниками ThC и ThB и расстоянию между ними. Мы оценили направление нормали ДС, фронт которой регистрировался в 09:10 UT (см. рис. 1). Параметры нормали рассчитывались методом смешан-

ных данных [Abraham-Shrauner, Yun, 1976] с использованием теоремы компланарности [Colburn, Sonett, 1966]

$$\mathbf{n} = \pm \frac{(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times ((\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2))}{|(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times ((\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \times (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2))|} \quad (1)$$

на основе которой определили скорость ДС

$$\mathbf{V}_{DC} = \frac{(\rho_2 \mathbf{V}_2 - \rho_1 \mathbf{V}_1) \cdot \mathbf{n}}{\rho_2 - \rho_1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{B}_1, \mathbf{V}_1, \rho_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{V}_2, \rho_2$ — магнитное поле, скорость, плотность плазмы перед фронтом ДС и за ним.

Нормаль к фронту ДС ориентирована в направлении Y -составляющей ($n=[0.1095, 0.912, 0.3953]$ в системе GSE-координат), значение скорости фронта ДС

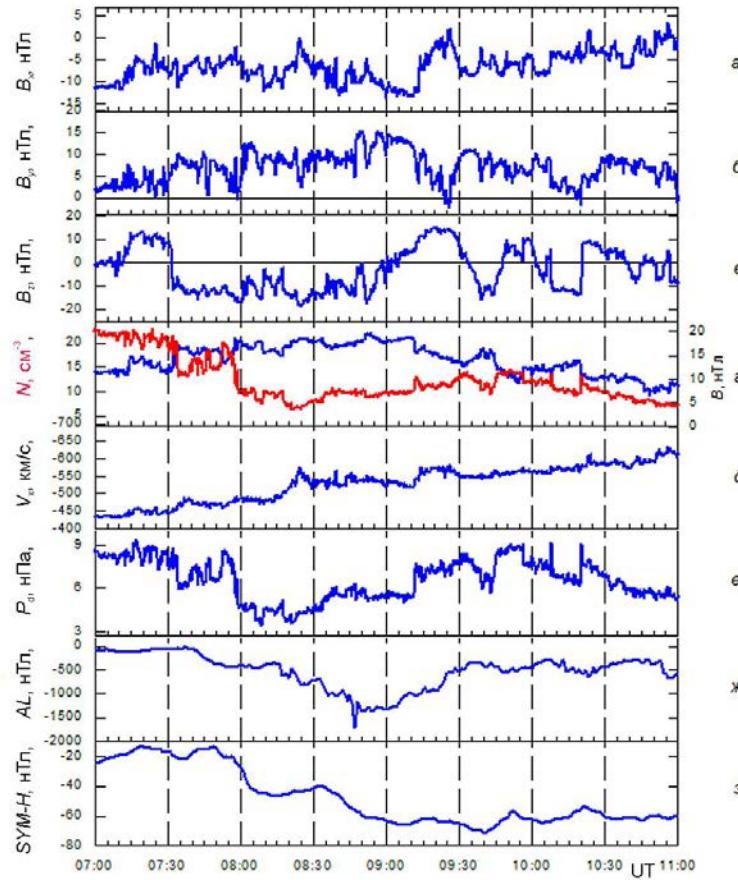


Рис. 1. Параметры плазмы и межпланетного магнитного поля в СВ: компонента ММП, его модуль B , концентрация ионов (а–д), V_x -компоненты скорости ионов и динамическое давление СВ (д, е) по данным спутника THEMIS-B в событии 11.09.2015 в 07:00–11:00 UT, AL и SYM (ж, з) для рассматриваемого интервала

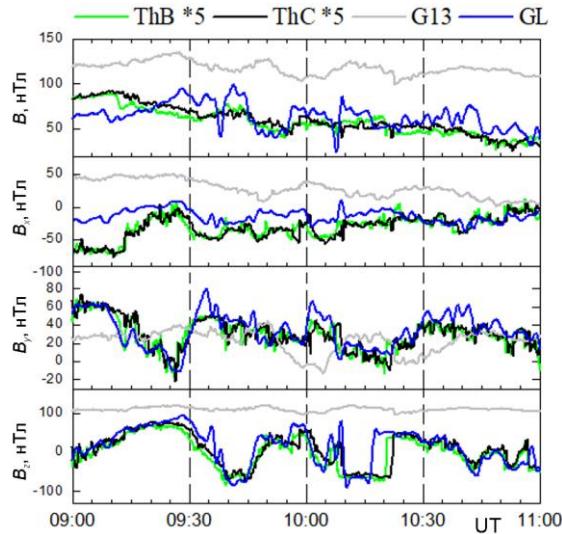


Рис. 2. Спутниковые измерения магнитного поля (модуль B и $B_{x,y,z}$ -компоненты магнитного поля в СВ (THEMIS-B, THEMIS-C) и магнитосфере (GEOTAIL и GOES-13). Данные в СВ сдвинуты на 10 мин и даны с повышающим коэффициентом

$V_{DC}=182.8$ км/с хорошо согласуется со скоростью распространения УНЧ-волны в СВ, определенной выше по фазовым задержкам между спутниками. Наблюдаемые скорости распространения можно объяснить тем, что УНЧ-волны распространяются вверх по натекающему потоку в сторону Солнца и сносятся СВ к Земле.

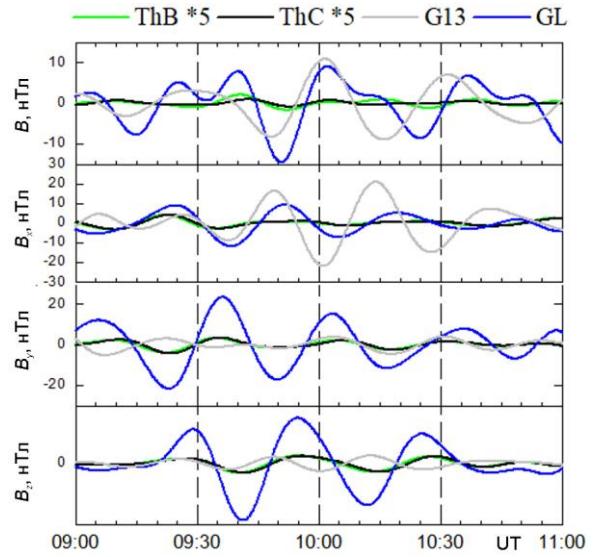


Рис. 3. Спутниковые измерения магнитного поля (модуль B и $B_{x,y,z}$ -компоненты магнитного поля в СВ (THEMIS-B, THEMIS-C) и магнитосфере (GEOTAIL и GOES-13) отфильтрованные в полосе 1000–2400 с. Данные в СВ сдвинуты на 10 мин и даны с повышающим коэффициентом

Вариации поля на GOES-13 (G13), расположеннном в утреннем секторе, отличаются по частоте от наблюдавшихся в полуденном секторе, и изучить распространение пульсаций по фазовым задержкам на этих спутниках не представляется возможным.

Таблица 3

Координаты спутников в магнитосфере 11.09.2015
в 10:00 UT в системе GSE

Спутники	GSE координаты, R_e		
	X	Y	Z
THEMIS-B	61.78	-20.97	-3.26
THEMIS-C	60.27	-24.56	-3.94
GEOTAIL	8.59	3.62	-0.02
GOES-13	-1.64	-5.94	-2.39
THEMIS-D	-4.61	-9.03	-2.09
GOES-15	-6.35	-1.85	-0.19
CLUSTER-4	-8.70	-2.71	-12.05
CLUSTER-2	-10.07	-2.00	-11.39

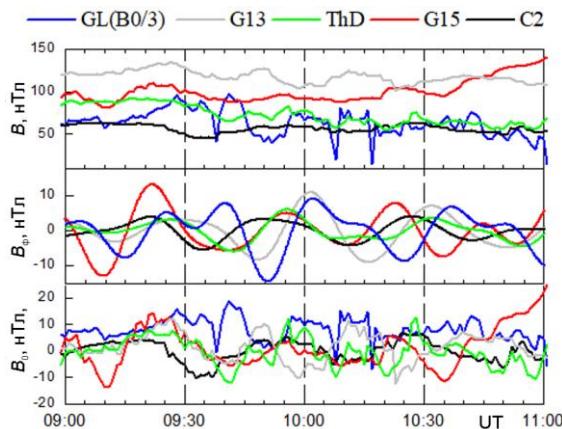


Рис. 4. Сверху вниз: модуль магнитного поля B , модуль магнитного поля B_ϕ , отфильтрованный в полосе 1000–2400 с, продольная компонента B_0 в координатах Mean Field Aligned в магнитосфере на спутниках GEOTAIL, GOES-13, THEMIS-D, GOES-15 и CLUSTER-2

На рис. 4 показаны модуль магнитного поля B , фильтрованный модуль магнитного поля B_ϕ и продольная компонента B_0 в координатах Mean Field Aligned на спутниках, расположенных в секторе от утренних до полуночных часов местного времени. Показаны измерения спутников, расположенных в 10:00 UT в следующих секторах MLT: G13 (05 MLT), THEMIS-D (ThD, 04 MLT), GOES-15 (G15, 01 MLT) и CLUSTER-2 (C2, 02:30 MLT). Подобие формы колебаний в модуле поля на разных спутниках позволяет оценить скорости распространения с ночной на утреннюю сторону: скорость C2-ThD ~ 95 км/с, G15-G13 ~ 113.7 км/с. Подобие формы пульсаций на нижней и средней панели позволяет говорить о значимом вкладе компрессионной компоненты СВ в геомагнитные пульсации, это подтверждается величиной B_0 -компоненты, максимальная амплитуда которой наблюдается в полуденном секторе, минимальная — в полуночном.

На рис. 5 показана динамика потоков в магнитосфере энергичных электронов $J_e=30$ – 50 кэВ на G13 и G15, $J_e=40$ кэВ на ThD и $J_e>>40$ кэВ на Cluster-4 (C4, 3 MLT). Видно, что на спутниках, кроме ThD, быстрые нарастания потоков сменяются более медленными спадами. Это обусловлено тем, что частицы посредством магнитного дрейфа постепенно покидают локализованную область, где они были инжектированы (на спутнике ThD скорости нарастания и спада потоков совпадают). Из фазовых задержек

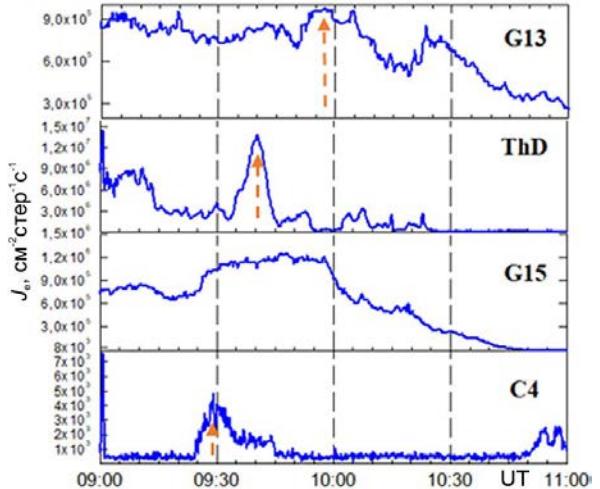


Рис. 5. Потоки энергичных $J_e=30$ – 50 кэВ (GOES-13), 40 кэВ (THEMIS-D), 30–50 кэВ (GOES-15), $J_e>40$ кэВ (CLUSTER-4)

вариаций в потоках (отмечены стрелками) можно сделать заключение о распространении энергичных J_e с ночной стороны на дневную со скоростями 39.3 (C4-ThD), 23.8 км/с (ThD-G13). Они близки скоростям распространения суббуровых инжекций 24 км/с, оцененных в [Reeves et al., 1996].

На рис. 6, *a* показаны фильтрованные вариации H -компоненты магнитометров, распределенных по азимуту на $\Phi'=76^\circ$ – 79° , справа — зависимость азимутальной скорости распространения от LT (*б*), распределения ПТ, построенные с помощью ТИМ для отрицательной полуволны на магнитограммах на 09:50–10:00 UT (*в*), для положительной полуволны в 10:05–10:20 UT (*г*), в нижней части — распределения эквивалентных ионосферных токов, построенные методом СЭТС в эти же моменты времени (*д*, *е*). Динамика вихрей с использованием этого метода была проанализирована с помощью программного кода, написанного в среде MatLab, [Vanhamäki, Juusola, 2020], доступного по ссылке [URL:https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26732-2_#Sec18]. Как следует из фазовых задержек магнитных пульсаций (панель *а*; максимумы, по которым анализировалось распространение, отмечены звездочками), они распространялись с дневной на ночную сторону со скоростями 3–9 км/с. На картах распределений ПТ ТИМ показаны втекающие (синий цвет) и вытекающие (красный цвет) ПТ (панели *в*, *г*). Между слоями противоположных ПТ происходит усиление холловских токов западного направления в утреннем секторе и восточного направления — в вечернем (зеленая и черная стрелки соответственно на панели *г*). Такое расположение электроструй соответствует токовой системе DP2. На построенных картах распределений ПТ ТИМ можно видеть, что во время положительной полуволны западный ток имеет большую протяженность по долготе и можно сказать, что дополнительно к DP2 усиливается и токовая система DP1. СЭТС на панели *д* показывает большой холловский вихрь, расположенный в утреннем секторе. Западный холловский ток на картах ТИМ соответствует нижней части этого вихря на $\Phi'=70^\circ$ – 80° . Согласно карте распределения ПТ в ионосфере, широтный максимум

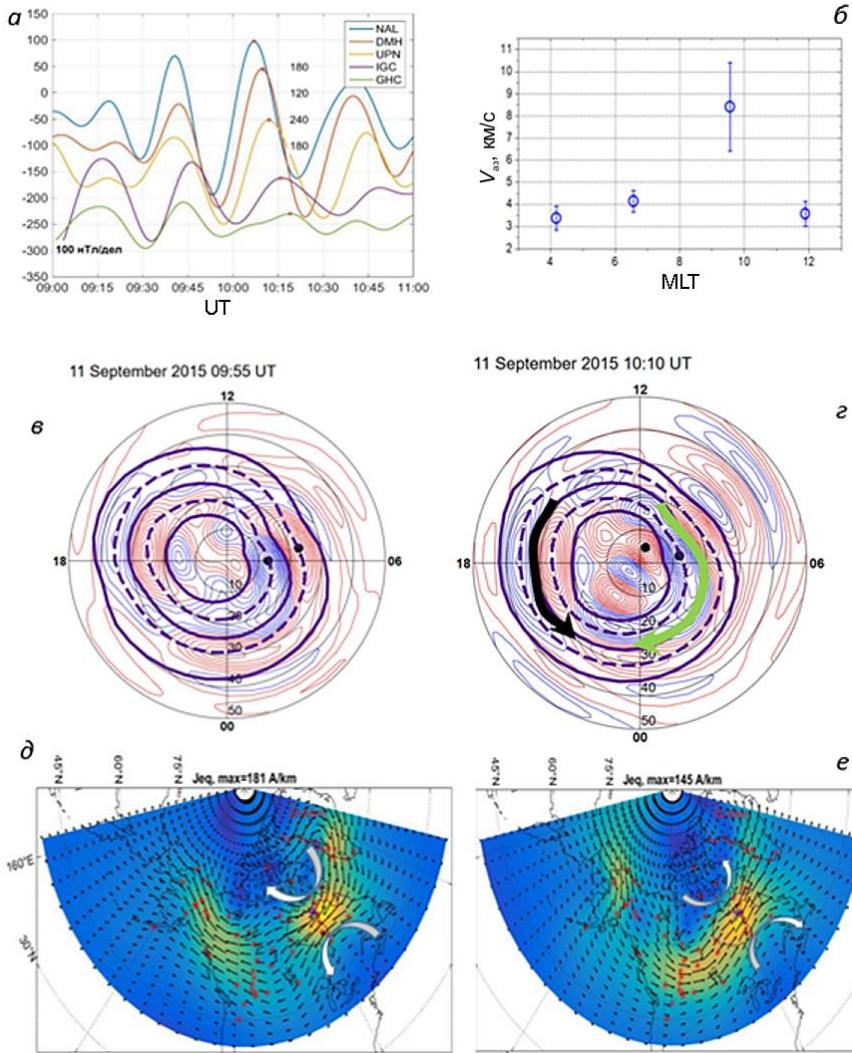


Рис. 6. Н-компоненты геомагнитного поля станций, распределенные по азимуту на исправленных геомагнитных широтах 76° – 79° , отфильтрованная в полосе 1000–2400 с (а); зависимость азимутальной скорости распространения вдоль широты $\Phi' = 76^{\circ}$ – 79° от MLT (б); распределения продольных токов с помощью ТИМ (с, г); распределения эквивалентных ионосферных токов по методу СЭТС (д, е) для отрицательной полуволны в 09:50–10:00 UT (с, д) и для положительной в 10:05–10:20 UT (г, е) геомагнитных Pi3-пульсаций (а)

западной электроструи лежит на широтах максимума ЭТС (на юге большого вихря) на границе между областями втекающих и вытекающих ПТ (области 1 и 2). Для отрицательной и положительной полуволны этот ток имеет разное направление вследствие противоположных направлений холловских токов внутри и вне вихря (направление показано белыми стрелками δ , e). ЭТС противоположного направления регистрировались также во время глобальных Pc5-пульсаций [Huang, 2021].

Мы проанализировали динамику вихрей, обозначенных белыми стрелками (панель e): траектории вихрей, меридиональная и азимутальная скорости распространения показаны на рис. 7. Траектории смещения высокоширотного (a) и низкоширотного (b) вихрей располагаются вдоль границы раздела море—суша. Вихри распространяются вдоль меридиана к северу со скоростями 1.6–4 км/с (ε). По азимуту регистрируются противоположные скорости распространения ± 25 км/с (ε), из чего можно заключить, что по азимуту вихри не распространяются. Локализацию

вихрей вдоль границы раздела море—суша можно отнести к так называемым береговым эффектам.

Для изучения частотных спектров Pi3-пульсаций, их динамики в меридиональном направлении, а также для определения широт резонансов силовых линий, были выбраны четыре меридиональные цепочки наземных магнитных станций, координаты которых даны в табл. 2. Положение этих цепочек схематично представлено на рис. 8, в. На панели a показаны спектры мощности УНЧ-волн в СВ, спектры Pi3-пульсаций на Земле на разных широтах, зависимость меридиональной скорости распространения пульсаций от широты (b) и зависимость широт западной электроструи и резонансов силовых линий от MLT (g). Видно (a), что спектры колебаний в СВ и на Земле имеют общий пик на частоте 0.55 мГц (обозначен цифрой 1), он выражен во всех компонентах ММП и в скорости СВ. Пики на частотах 0.82 и 0.96 мГц (2, 3) на спектрограммах наземных станций имеют явную зависимость от широты: с максимальной интенсивностью наблюдаются на более высоких и более низких

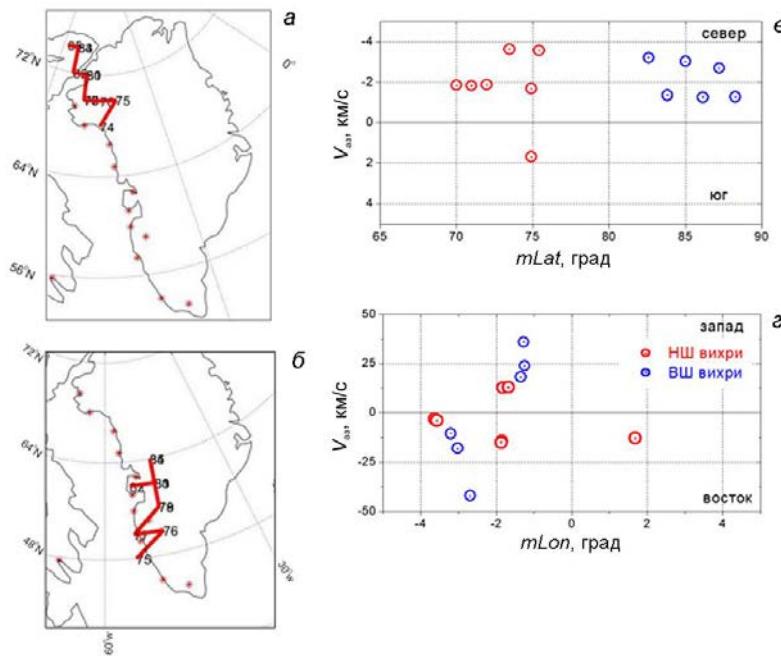


Рис. 7. Траектории вихрей на более высоких (a) и более низких (б) широтах и скорости перемещения вдоль этих траекторий по меридиану и азимуту (в, г) в 10:10–10:20 UT; НШ, ВШ — низкоширотные и высокоширотные вихри

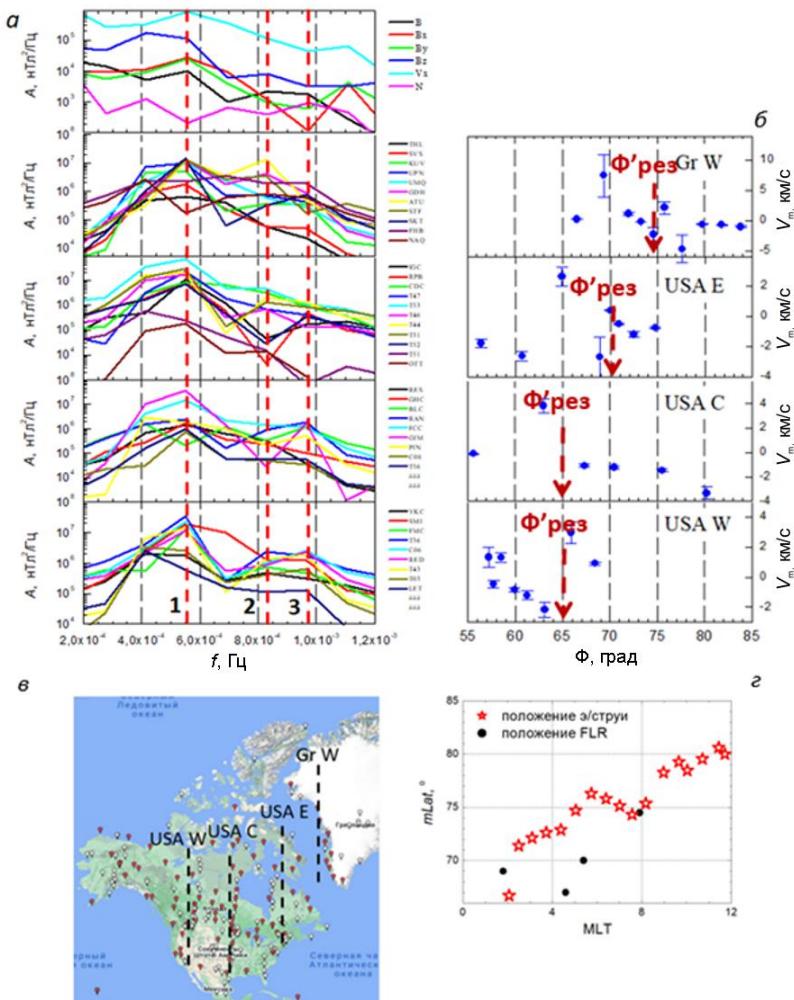


Рис. 8. Спектры УНЧ-волн в СВ, спектры Pi3-пульсаций на Земле на разных широтах, вдоль разных меридианов (а), меридиональные скорости распространения пульсаций вдоль разных меридианов (б), карта расположения меридиональных цепочек станций (в), зависимость геомагнитной широты западной электроструи и широты резонансов силовых линий от MLT (г)

широтах соответственно. Эти пики присутствуют также в спектрах параметров межпланетной среды B , B_z и N . Широта резонансных колебаний $\Phi'_{\text{рез}}$ силовых линий определялась с использованием методики [Glassmeier et al., 1999] по максимальной амплитуде и разности фаз колебаний вдоль меридиональной цепочки станций. На распределения меридиональных скоростей Pi3-пульсаций вдоль этих меридианов нанесена $\Phi'_{\text{рез}}$. Видно, что преобладает распространение пульсаций вдоль меридиана к полюсу, которому соответствуют отрицательные значения скоростей 0.5–5 км/с, на $\Phi'_{\text{рез}}$ значения скоростей претерпевают разрыв. Положения западной электроструи и $\Phi'_{\text{рез}}$ совпадают (панель ϱ).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, нами изучены частотный спектр и динамика глобальных Pi3-пульсаций на высоких широтах и их эквивалентных токовых систем в магнитосфере и ионосфере в протяженном секторе долгот 0–12 MLT. Выявлено, что спектр пульсаций имеет три пика: на всех широтах на частоте 0.55 мГц, два пика на 0.82 и 0.96 мГц на более высокой и более низкой широтах соответственно. Обнаружена сходная динамика малых вихрей, являющихся тонкой структурой большого вихря, и пульсаций в ионосфере, но только вдоль меридиана, а также распространение пульсаций с дневной стороны на ночную в ионосфере и в противоположном направлении в магнитосфере. Обнаруженные особенности описаны ниже.

4.1. Внешний и внутримагнитосферный источник Pi3-пульсаций

В [Parkhomov et al., 1998] подобно событию, рассматриваемому нами, в спектре Ps5-пульсаций обнаружены два максимума: широтно-независимый на 2.3 мГц и зависящий от широты на 4–6 мГц. Авторы предположили, что колебания первого типа связаны с колебаниями магнитопаузы, колебания второго типа вызваны внутримагнитосферными резонансами. Граница BM3-волновода, колебания в котором обусловили первый пик, по их предположению, лежит снаружи магнитопаузы. В рассматриваемом нами событии широтно-независимый пик колебаний регистрировался на 0.55 мГц в СВ, при этом регистрировались УНЧ-волны 0.4–0.7 мГц. Зависящие от широты пики на 0.82 и 0.96 мГц на наземных магнитограммах присутствуют в спектрах ММП и концентрации. Это согласуется с выводами работы [Kerko, Spence, 2003], в которой при анализе ряда событий геомагнитных пульсаций, вызванных варияциями P_d , было обнаружено, что дискретные частоты внутримагнитосферных резонансов 0.7, 1.3, 1.9, 2.6 и 3.4 мГц наблюдаются в вариациях плотности СВ и, предположительно, отражают существование структур определенных размеров в межпланетной среде. Частоты колебаний в рассматриваемом нами событии близки первой гармонике внутримагнитосферных резонансов, деление на которые выполнено весьма условно.

В рассматриваемом нами событии реализуется несколько условий, благоприятных для проникно-

вения волн из СВ и генерации изменений поля в магнитосфере, регистрируемых глобально: экстремальные значения B_z ММП, вариации P_d (отношение $\Delta P_d/P_d \sim 0.5$), скорость СВ ~ 550 км/с. Одновременные изменения N и B типичны для компрессионных МГД-волн: быстрой магнитозвуковой (БМЗ) и медленной магнитозвуковой (ММЗ). В случае БМЗ-волн эти параметры изменяются в фазе, а в случае ММЗ-волн — в противофазе [Wachtjohann, Treumann, 1996], что и наблюдается в нашем случае в межпланетной среде и магнитосфере. Альфеновская скорость СВ по данным ThB составляет ~ 90 км/с, что совпадает по порядку со скоростью УНЧ-волн в СВ (168 км/с), — таким образом, волны в СВ соответствуют ММЗ-волнам. Необходимо добавить, что альфеновские волны не проходят через тангенциальный разрыв, которым является магнитопауза, а МЗ-волны могут частично проникать через нее [Leonovich et al., 2003].

4.2. Динамика геомагнитных Pi3-пульсаций и эквивалентных токовых вихрей

Наблюдения показывают, что пульсации на широтах $\Phi' = 76^\circ - 79^\circ$ распространяются по азимуту с дневной стороны на ночную с $V_{az} = 3 - 9$ км/с, по меридиану пульсации распространяются в полюсном направлении с $V_m = 0.5 - 5$ км/с. Большой холловский вихрь диаметром ~ 3500 км, наблюдаемый в утреннем секторе, в целом неподвижен, однако в нем можно выделить малые вихри — так называемую тонкую структуру большого вихря диаметром 1000–1500 км. Малые вихри распространяются также к полюсу со сравнимыми скоростями 1.6–4 км/с.

В [Моисеев и др., 2024а, 6] исследовались меридиональное и азимутальное распространение геомагнитных пульсаций и ответственных за них малых TCV с периодами 5–10 мин. Сравнение скоростей распространения пульсаций и вихрей, полученное в этих работах и в настоящей работе, показало, что скорости распространения пульсаций и вихрей совпадают в меридиональном направлении, а в азимутальном вихри распространяются быстрее с $V = 5 - 25$ км/с, при этом TCV не испытывают берегового эффекта и распространяются по долготе в секторе протяженностью до 12 MLT. Оба явления и TCV и Pi3 имеют резонансный характер, однако, если в случае TCV отмечалось совпадение положения их центров с резонансами силовых линий (field line resonance (FLR)), то в случае Pi3 положение FLR совпадало с западной электроструей, являющейся нижней частью большого вихря.

В [Huang, 2021] при изучении глобальных Ps5-пульсаций было обнаружено, что в азимутальном направлении пульсации не распространялись, изменение фазы вдоль меридиана авторы объяснили за счет эволюции токовой системы пульсаций. Большой вихрь в рассматриваемом событии также не распространяется, а чтобы понять различие в распространении Pi3-пульсаций и малых вихрей, мы рассмотрели азимутальное распространение на тех же станциях (см. рис. 6, а) по D - и Z -компонентам. Анализ ком-

понент показал, что по ним не наблюдалось распространения (не показано), — возможно, это и объясняет разную динамику ЭТС и пульсаций, поскольку для построения ЭТС используются все компоненты.

Береговые эффекты в полярных сияниях [Самсонов, Зарецкий, 1963; Надубович, 1967] и ионосферных токах [Шпынев и др., 1977] активно исследовались по наблюдениям в Советской Арктике (район в Якутии с центром в б. Тикси) в период экспедиции СиБИЗМИР и ИКФиА СО АН СССР зимой 1968–1969 гг. Эти эффекты естественно связать с известным береговым эффектом Сенько—Мансурова [Сенько, 1959; Мансуров, 1959], который заключается в том, что индуцированные токи в море или участках Земли с повышенной электропроводностью благодаря скин-эффекту вытесняются к берегам или краям названных участков суши. Ионосферные эффекты заключались в увеличении плотности ионосферных токов в области береговой линии, а также в образовании регулярных вихревых структур в ионосферных токах. Ионосферная проекция этих явлений располагалась на суще ~ 100 – 200 км от границы раздела. СЭТС-метод позволил рассмотреть с одноминутным разрешением эволюцию малых ионосферных вихрей во времени и заключить, что положение вихрей на расстоянии от береговой линии ~ 200 км согласуется с полученными ранее результатами при исследовании береговых ионосферных эффектов. Авторы [Шпынев и др., 1977] утверждают, что в ионосферных береговых эффектах проявляются локальные неоднородности, имеющие пространственные масштабы ~ 100 – 300 км, на основании чего мы можем предположить, что малые вихри диаметром 1000–1500 км, отображаемые СЭТС-методом, существуют на самом деле.

4.3. Сопоставление спутниковых и наземных измерений

В [Моисеев и др., 2020] изучалось событие Рi3-пульсаций, источником которых были вариации B_z ММП. В магнитосфере в интервале Рi3-пульсаций по фазовым задержкам потоков энергичных электронов и на Земле по фазовым задержкам бухтообразных возмущений в риометрическом поглощении отмечалось распространение с ночной стороны на дневную. В настоящей работе по спутниковым и наземным наблюдениям отмечается противоположное распространение, ниже мы рассмотрим возможные причины этого.

Для сопоставления распространения пульсаций по наблюдениям на Земле и в магнитосфере наземные станции, расположенные вдоль широт $\Phi' = 76^\circ$ – 79° были спроектированы в экваториальную плоскость магнитосферы с помощью модели Цыганенко Ts04 [Tsyganenko, Sitnov, 2005]. Проекция наземных станций и положение спутников в экваториальной плоскости магнитосферы 11.09.2015 в 10:00 UT показаны на рис. 9. Видно, что минимальное расстояние между проекциями силовых линий, соответствующих наземным станциям, и положениями спутников составляет $\sim 5R_e$. Таким образом, наземные и спутниковые наблюдения могут охватывать разные области магнитосферы, поэтому и характер распространения пульсаций отличается.

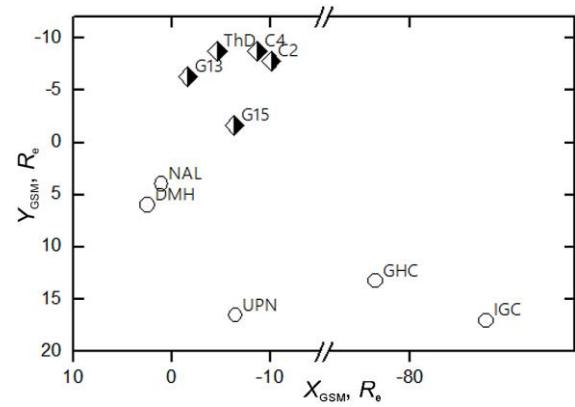


Рис. 9. Проекция наземных станций, расположенных вдоль исправленных геомагнитных широт 76° – 79° (кружки) и положение спутников (ромбы) в экваториальной плоскости магнитосферы 11.09.2015 в 10:00 UT

Возможно также, что регистрируемый нами характер распространения отражает направление конвекции плазмы: с дневной стороны на ночную по наблюдениям на высоких широтах и в противоположном направлении в экваториальной плоскости магнитосферы. В пользу этого может свидетельствовать тот факт, что период пульсаций ~ 30 мин позволяет отнести их к Ps6-пульсациям, которые сопровождаются сияниями, имеющими форму, соответствующую букве Ω [Akasofu, Kimball, 1964]. В области этих сияний в экваториальной плоскости конвекция направлена к Солнцу, а на высоких широтах — в противоположном направлении. К сожалению, отсутствие наземных и спутниковых наблюдений сияний во время этого события не позволяет сделать окончательные выводы.

По наблюдениям на спутнике ThD мы оценили скорость электрического дрейфа (скорость конвекции) 75 км/с, сравнимую со скоростями распространения, оцененными по фазовым задержкам как в магнитном поле, так и в потоках энергичных электронов.

Между положениями проекций станций в экваториальной плоскости магнитосферы по модели Ts04 были оценены расстояния в XY-плоскости, а на основе наземных временных задержек — скорости распространения $V_{NAL_DMH} = 86$, $V_{DMH_UPN} = 734.2$, $V_{UPN_IGC} = 2074.7$, $V_{IGC_GHC} = 272.9$ км/с, индексами обозначены станции, между которыми измерялись скорости. Минимальное значение этих скоростей порядка скорости конвекции, а максимальное из значений близко альфвеновской скорости 2225 км/с по данным спутника ThD.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Распространение Рi3-пульсаций и малых вихрей совпадает по величине и направлению вдоль меридиана. В азимутальном направлении вихри показывают наличие берегового эффекта. Сопоставление по спутниковым и наземным наблюдениям показывает, что распространение вихрей совпадает по направлению с конвекцией плазмы: с дневной стороны на ночную по наблюдениям на высоких широтах и в противоположном направлении в экваториальной

плоскости магнитосферы. В частотный спектр пульсаций вносят вклад и УНЧ-волны, проникающие из СВ, и магнитосферные резонансы.

Таким образом, можно заключить, что пульсации в данном событии были обусловлены как внешним (колебаниями в СВ), так и внутренним источниками (магнитосферным резонатором, который мог быть возбужден в том числе и суббурией). Динамика тонкой структуры большого вихря (малых вихрей) в магнитосфере в целом совпадает по скорости и направлению распространения с геомагнитными пульсациями.

Авторы благодарны руководителям следующих проектов за предоставление доступа к данным: проект SUPERMAG, в том числе сеть IMAGE, (PI Liisa Juusola), GREENLAND COAST CHAIN data, (PI Anna N. Willer), Themis, CANMOS, Geomagnetism Unit of the Geological Survey of Canada; GIMA; Intermagnet; USGS, а также набор данных спутниковых наблюдений из CDAWEB (D.J. McComas, R. Lepping, K. Ogilvi, G. Paschmann).

Результаты получены с использованием данных магнитометрического комплекса, входящего в состав ЦКП «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>]. Работа выполнена в рамках Государственного задания ИКФИА СО РАН и ИСЗФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. *Геомагнитные вариации и бури*. Новосибирск: Наука, 1979, 248 с.
- Есевич М.В., Есевич В.Г. Фрактальная структура геомагнитного плазменного слоя на орбите Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2005, т. 45, № 3, с. 347.
- Лунюшкін С.Б., Пенских Ю.В. Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2019, т. 5, № 2, с. 97–113. DOI: [10.12737/szf-52201913](https://doi.org/10.12737/szf-52201913) / Lunyushkin S.B., Penskikh Y.V. Diagnostics of auroral oval boundaries on the basis of the magnetogram inversion technique. *Sol.-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, no. 2, pp. 97–113. DOI: [10.12737/stp-52201913](https://doi.org/10.12737/stp-52201913).
- Мансуров С.М. *Магнитные возмущения*. М.: Изд-во АН СССР, 1959, № 1, с. 64–71.
- Моисеев А.В., Стародубцев С.А., Мишин В.В. Особенности возбуждения и распространения по азимуту и меридиану длиннопериодных Рi3-колебаний геомагнитного поля 8 декабря 2017 г. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 3, с. 56–72. DOI: [10.12737/szf-63202007](https://doi.org/10.12737/szf-63202007) / Moiseev A.V., Starodubtsev S.A., Mishin V.V. Features of excitation and azimuthal and meridional propagation of long-period Pi3 oscillations of the geomagnetic field on December 8, 2017. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 3, pp. 56–72. DOI: [10.12737/stp-63202007](https://doi.org/10.12737/stp-63202007).
- Моисеев А.В., Попов В.И., Стародубцев С.А. Сравнительный анализ распространения магнитных вариаций и эквивалентных токовых вихрей геомагнитных Рс5-пульсаций по меридиану и азимуту. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2024а, т. 64, № 4, с. 548–566. DOI: [10.31857/S0016794024040093](https://doi.org/10.31857/S0016794024040093).
- Моисеев А.В., Попов В.И., Стародубцев С.А. Исследование особенностей азимутального распространения геомагнитных Рс5-пульсаций и их эквивалентных токовых вихрей по данным наземных и спутниковых наблюдений. *Солнечно-земная физика*. 2024б, т. 10, № 3, с. 104–115. DOI: [10.12737/szf-103202412](https://doi.org/10.12737/szf-103202412) / Moiseev A.V., Popov V.I., Starodubtsev S.A. Investigating azimuthal propagation of Pc5 geomagnetic pulsations and their equivalent current vortices from ground-based and satellite data. *Sol.-Terr. Phys.* 2024б, vol. 10, no. 3, pp. 104–115. DOI: [10.12737/stp-103202412](https://doi.org/10.12737/stp-103202412).
- Надубович Ю.А. *Результаты исследований по международным геофизическим проектам. Полярные сияния*. М.: Наука, 1967, № 14, с. 77.
- Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Есевич В.Г. и др. Особенности воздействия диамагнитной структуры солнечного ветра на магнитосферу Земли. *Солнечно-земная физика*. 2017, т. 3, № 4, с. 47–62. DOI: [10.12737/szf-34201705](https://doi.org/10.12737/szf-34201705) / Parhomov V.A., Borodkova N.L., Eselevich V.G., et al. Features of the impact of the solar wind diamagnetic structure on Earth's magnetosphere. *Sol.-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, no. 4, pp. 47–62. DOI: [10.12737/stp-34201705](https://doi.org/10.12737/stp-34201705).
- Пенских Ю.В. Применение метода наибольших вкладов в технике инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2020, т. 6, № 4, с. 67–76. DOI: [10.12737/szf-64202009](https://doi.org/10.12737/szf-64202009) / Penskikh Yu.V. Applying the method of maximum contributions to the magnetogram inversion technique. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, no. 4, pp. 67–76. DOI: [10.12737/stp-64202009](https://doi.org/10.12737/stp-64202009).
- Пенских Ю.В., Лунюшкін С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 2, с. 63–76. DOI: [10.12737/szf-72202106](https://doi.org/10.12737/szf-72202106) / Penskikh Yu.V., Lunyushkin S.B., Kapustin V.E. Geomagnetic method for automatic diagnostics of auroral oval boundaries in two hemispheres of Earth. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, no. 2, pp. 57–69. DOI: [10.12737/stp-72202106](https://doi.org/10.12737/stp-72202106).
- Самсонов В.П., Зарецкий Н.С. Азимутальное и географическое распределения авроральных лучей. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1963, т. 3, № 2, с. 246.
- Сенько П.К. Береговой эффект в магнитных вариациях. М.: 1959, 61 с.
- Шпынев Г.Б., Мишин Е.В. *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. М.: Наука, 1977, вып. 43, с. 3–13.
- Abraham-Shrauner B., Yun S.H. Interplanetary shocks seen by AMES plasma probe on Pioneer 6 and 7. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, pp. 2097–2102.
- Akasofu S.I., Kimball D.S. The dynamics of the aurora: I. Instabilities of the aurora. *J. Atmos Terr. Phys.* 1964, vol. 26, pp. 205–211.
- Alimaganbetov M., Streltsov A.V. ULF waves observed during substorms in the solar wind and on the ground. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 181, pp. 10–18.
- Baumjohann W., Treumann R.A. *Basic Space Plasma Physics*. Imperial College Press, London, 1996.
- Colburn D.S., Sonett C.P. Discontinuities in the solar wind. *Space Sci. Rev.* 1966, vol. 5, pp. 439–506. DOI: [10.1007/BF00240575](https://doi.org/10.1007/BF00240575).
- Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, no. A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).
- Glassmeier K.-H., Othmer C., Gramm R., et al. Magnetospheric field-line resonances: A comparative planetology approach. *Earth Environment Sci.* 1999, vol. 20, pp. 61–109.
- Hada T., Kennel C.F. Nonlinear evolution of slow waves in the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1985, vol. 90, p. 531.
- Han D.-S., Yang H.-G., Chen Z.-T., et al. Coupling of perturbations in the solar wind density to global Pi3 pulsations: A case study. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A05217. DOI: [10.1029/2006JA011675](https://doi.org/10.1029/2006JA011675).
- Huang C.-S. Global Pc5 pulsations from the polar cap to the equator: Wave characteristics, phase variations, disturbance current system, and signal transmission. *J. Geophys. Res.* 2021, vol. 126, e2020JA029093. DOI: [10.1029/2020JA029093](https://doi.org/10.1029/2020JA029093).
- Kepko L., Spence H.E. Observations of discrete, global magnetospheric oscillations directly driven by solar wind den-

- sity variations. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, p. 1257. DOI: [10.1029/2002JA009676](https://doi.org/10.1029/2002JA009676).
- Leonovich A.S., Mishin V.V., Cao J.B. Penetration of magnetosonic waves into the magnetosphere: Influence of a transition layer. *Ann. Geophys.* 2003, vol. 21, pp. 1083–1093.
- Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications. *Space Sci. Rev.* 1990, vol. 53, no. 1-2, pp. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).
- Parkhomov V.A., Mishin V.V., Borovik L.V. Long-period geomagnetic pulsations caused by the solar wind negative pressure impulse on March 22, 1979 (CDAW-6). *Ann. Geophys.* 1998, vol. 16, pp. 134–139.
- Reeves G.D., Henderson M.G., McLachlan P.S., et al. Radial propagation of substorm injections. *Proc. the Third International Conference on Substorms*. Eur. Space Agency Spec. Publ. 1996, ESA SP-389. p. 579.
- Saito T. Geomagnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1969, vol. 10, iss. 3, pp. 319–412.
- Saito T. Long-period irregular magnetic pulsation Pi3. *Space Sci. Rev.* 1978, vol. 21, pp. 427–467. DOI: [10.1007/BF00173068](https://doi.org/10.1007/BF00173068).
- Saito T., Matsushita S. Geomagnetic pulsations associated with sudden commencements and sudden impulses. *Planetary Space Sci.* 1967, vol. 15, pp. 573–587.
- Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A03208. DOI: [10.1029/2004JA010798](https://doi.org/10.1029/2004JA010798).

- Vanhamäki H., Juusola L. Introduction to spherical elementary current systems. *Ionospheric Multi-Spacecraft Analysis Tools*. 2020, vol. 17, pp. 5–33. DOI: [10.1007/978-3-030-26732-2_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26732-2_13).
- URL: <https://supermag.jhuapl.edu/mag/> (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- URL: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-26732-2_2#Sec18 (дата обращения 7 марта 2024 г.).
- URL: <http://ckprf.ru/ckp/3056> (дата обращения 7 марта 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.

Как цитировать эту статью:

Моисеев А.В., Попов В.И., Мишин В.В., Пенских Ю.В. Особенности распространения в системе магнитосфера–ионосфера компрессионных длиннопериодных колебаний, проникающих из межпланетной среды. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 65–76. DOI: [10.12737/szf-113202508](https://doi.org/10.12737/szf-113202508).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА КРУГОВОЙ ПОЛЯРНОЙ ОРБИТЕ: ОТБОР ПРЕДИКТОРОВ

PREDICTION OF ELECTRON FLUXES IN A CIRCULAR POLAR ORBIT: SELECTION OF PREDICTORS

А.О. Белова

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, belova.ao20@physics.msu.ru

И.Н. Мягкова

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, irina@srd.sinp.msu.ru

A.O. Belova

M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, belova.ao20@physics.msu.ru

I.N. Myagkova

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, irina@srd.sinp.msu.ru

Аннотация. Исследовалась связь вариаций потоков электронов с энергиями >0.7 и >2 МэВ внешнего радиационного пояса Земли на круговой полярной орбите с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, а также с геомагнитными индексами и логарифмом потока электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите с целью выяснения возможности их прогнозирования. Был проведен отбор оптимальных входных признаков при прогнозировании потоков электронов на низких полярных орбитах, что актуально в рамках обеспечения радиационной безопасности будущих космических миссий.

Рассматривались интегральные и максимальные потоки электронов указанных энергий за сутки. На основе линейной регрессии получены прогнозы с горизонтом 1 и 2 дня на интервале 2 месяца 2020 г. для максимальных и интегральных потоков за сутки.

Ключевые слова: радиационные пояса Земли, потоки релятивистских электронов, прогнозирование, машинное обучение, круговая полярная орбита.

Abstract. We have investigated the relationship of variations in >0.7 and >2 MeV electron fluxes of Earth's outer radiation belt in a circular polar orbit with solar wind and interplanetary magnetic field parameters, as well as with geomagnetic indices and the logarithmic electron flux in the geostationary orbit in order to explore the possibility of predicting them. We have selected the optimal input features for predicting electron fluxes in low polar orbits, which is important for ensuring the radiation safety of future space missions.

We have examined integral and maximum electron fluxes of these energies over the span of a day. We have obtained forecasts with a horizon of 1 and 2 days for an interval of 2 months in 2020 for daily maximum and integral fluxes based on linear regression.

Keywords: Earth's radiation belts, relativistic electron fluxes, forecasting, machine learning, circular polar orbit.

ВВЕДЕНИЕ

Радиационные условия в околоземном космическом пространстве в значительной мере определяются потоками заряженных частиц в радиационных поясах Земли (РПЗ). Особенно существенный вклад частиц РПЗ отмечается в периоды минимума солнечной активности, когда потоки солнечных космических лучей практически отсутствуют. И если потоки частиц внутреннего РПЗ относительно стабильны и существуют общепринятые модели, с помощью которых можно достаточно надежно прогнозировать потоки частиц в нем, то внешний радиационный пояс (ВРПЗ) имеет очень нестабильный характер: потоки электронов ВРПЗ могут в течение суток изменяться на несколько порядков. Впервые электроны ВРПЗ были зарегистрированы очень давно — во время второго в истории человечества космического полета при помощи научной аппаратуры НИИЯФ МГУ [Вернов и др., 1958]. С тех пор было выполнено большое количество экспериментов по регистрации

электронов ВРПЗ на российских и зарубежных космических аппаратах (КА) [Williams et al., 1968; Li et al., 2001; Kataoka, Miyoshi, 2008; Кузнецов и др., 2007; Li, Hudson, 2019; Оседло и др., 2022; Stepanova et al., 2024]. Несмотря на это, задача надежного прогнозирования состояния ВРПЗ на основе моделирования до сих пор не решена. Это связано с тем, что на сегодняшний день не существует общепринятой теории ускорения и рассеяния электронов ВРПЗ, которая смогла бы объяснить имеющийся набор экспериментальных данных.

Мониторинг и прогнозирование электронов ВРПЗ представляют также практический интерес, обусловленный влиянием высоких потоков релятивистских и субрелятивистских электронов ВРПЗ, которые могут негативно сказаться на работе электронной аппаратуры, установленной на борту КА, поскольку при попадании в микросхемы могут возникать единичные сбои — как обратимые, так и необратимые [Cole, 2003; Белов и др., 2004; Романова и др., 2005;

Iucci et al., 2005, Pilipenko et al., 2006; Kudela, 2013] (в англоязычной литературе их еще называют электронами-киллерами — killer electrons), а также электризация КА [Новиков, Воронина, 2021].

С одной стороны, невозможно с достаточной точностью прогнозировать вариации потоков электронов ВРПЗ с помощью теоретических расчетов, с другой, — существует практическая необходимость их прогнозирования для обеспечения радиационной безопасности с использованием современных методов машинного обучения, которые помогают выявить связи между анализируемыми переменными через аппроксимацию эмпирических зависимостей.

Спутниковые измерения, проводимые во внутренней магнитосфере Земли, используются не только для описания динамики ВРПЗ, но и для создания прогностических моделей, основанных на машинном обучении. Наиболее часто для этих целей применяются данные спутников серии GOES, имеющих длинный временной ряд экспериментальных измерений, поскольку КА данной серии запускаются с 1970-х гг. (см., например, [Wei et al., 2018; Myagkova et al., 2019; Sun et al., 2021; Landis et al., 2022; Son et al., 2022]). В настоящее время один из наиболее широко применяемых методов прогнозирования общего потока за день (флюенс) релятивистских электронов в ВРПЗ — это прогноз, представленный на портале Центра прогнозирования космической погоды [<http://www.swpc.noaa.gov/>]. Данная модель, известная как REFM (Relativistic Electron Forecast Model), была разработана на основе исследований [Baker et al., 1990]. Прогноз использует тот факт, что ежедневные значения флюенса электронов с энергией >2 МэВ, измеренные на геостационарной орбите, можно предсказать на день вперед с помощью линейного фильтра, использующего в качестве входных данных скорость СВ или геомагнитные индексы K_p и AE . Исследования показали наличие характерной временной динамики в поведении потоков электронов на геостационарной орбите. Значительное увеличение потока электронов наблюдается через двое суток после достижения максимальной скорости СВ и через трое суток после регистрации пиковых значений геомагнитных индексов. Данная временная задержка обусловлена структурными особенностями потоков СВ, включающими область усиленного межпланетного магнитного поля (ММП), предшествующую пику скорости СВ. Пик ММП инициирует геомагнитную активность, приводящую к увеличению индекса K_p . Таким образом, наблюдается существенное запаздывание между показателями геомагнитной активности (K_p , AE) и ростом потока электронов по сравнению с непосредственными измерениями параметров СВ. Стоит упомянуть модель предсказания потоков релятивистских электронов >2 МэВ на геостационарной орбите, основанную на решении системы уравнений непрерывности при условии, что на ускорение частиц влияет не только скорость СВ, но и геомагнитная активность, а на потери влияет плотность СВ. Учет дополнительных факторов, влияющих на ускорение и потери электронов в РПЗ, позволил повысить точность и стабильность прогнозов [Lyatsky, Khazanov, 2008]. Для низ-

ких энергий (1 эВ – 40 кэВ) также существует модель прогнозирования с горизонтом 1 ч на основе ММП и скорости СВ [Denton et al., 2016]. Помимо решения уравнений непрерывности, для прогноза потоков электронов существуют и другие методы — например в [Potapov et al., 2016] авторы использовали для прогноза потока релятивистских электронов с энергией $>1\div2$ МэВ метод множественной регрессии со скользящим окном. Отдельно стоит упомянуть модель NARMAX (нелинейная авторегрессия со скользящим средним с внешними входными сигналами) [Balikhin et al., 2011]. Одним из этапов алгоритма является анализ коэффициента снижения погрешности ERR , что позволяет ранжировать параметры, влияющие на потоки в РПЗ. Именно этот анализ привел авторов к выводу, что наибольшее влияние на потоки электронов в РПЗ оказывает плотность, а не скорость СВ. При условии фиксированной плотности потоки возрастают по мере того, как скорость достигнет некоторого уровня насыщения, уменьшающегося с увеличением плотности СВ. Существует также подход к прогнозированию потоков заряженных частиц в РПЗ с использованием модели BAS Global Dynamic Radiation Belt Model [Glauert et al., 2014], построенной на основе решения трехмерного уравнения Фоккера—Планка. Разработанная модель базируется на комплексном подходе к описанию динамики заряженных частиц и включает в себя следующие физические процессы: радиальную диффузию частиц в магнитосфере Земли, взаимодействие частица—волна, столкновительные процессы, влияющие на потери частиц из радиационных поясов.

Отдельную проблему представляет собой прогнозирование потоков релятивистских и субрелятивистских электронов, регистрирующихся на полярных круговых орбитах, где на каждом витке спутник четыре раза пересекает ВРПЗ — дважды в Южном и дважды в Северном полушариях. Для круговых полярных орбит можно решать задачу прогнозирования максимального за сутки потока электронов и/или суммарного потока (флюенса), который набирается за сутки при всех пересечениях ВРПЗ спутником.

Данное исследование фокусируется на ВРПЗ и вариациях потоков электронов на круговой полярной орбите, схожей с орбитой, рассмотренной в работе [Botek et al., 2023]. В ней выполнен прогноз потоков электронов с энергиями 500–600 кэВ и 1–2.4 МэВ для круговой полярной орбиты на основе данных с КА PROBA-V с помощью модели долгой краткосрочной памяти (LSTM), входными параметрами для которой были выбраны данные о положении спутника и геомагнитном индексе SYM . В качестве исходных данных применен массив измерений за 2015–2018 гг. Для ВРПЗ среднеквадратичная ошибка (СКО) составила 0.153 для диапазона 500–600 кэВ с горизонтом 1 день.

Актуальность данного исследования обусловлена тем, что аналогичная низкая полярная орбита планируется к использованию в проекте Российской орбитальной станции (РОС). В связи с этим разработка методов прогнозирования радиационных условий на таких орбитах представляет значительный прак-

тический интерес для обеспечения безопасности работы КА и экипажей.

Целью данного исследования является разработка методов прогнозирования вариаций потоков релятивистских и субрелятивистских электронов ВРПЗ с энергиями >0.7 и >2 МэВ на круговой полярной орбите с использованием в качестве входных признаков параметров СВ, ММП, геомагнитных индексов и потока электронов на геостационарной орбите, а также оценка эффективности такого прогнозирования.

1. МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Обработка данных КА, обучение моделей машинного обучения и построение прогнозов были проведены с помощью программы, разработанной с использованием языка Python.

В данной работе рассматривается задача прогнозирования временных рядов, где целевой переменной является y_{t+h} , где h — горизонт прогнозирования (количество дней, на которые делается прогноз), а признаки формируются на основе лагов (запаздываний) ряда:

$$X_t = \{y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}, F_{t-1}, F_{t-2}, \dots, F_{t-p}\},$$

где F_t представляет собой временной ряд дополнительных признаков, таких как параметры СВ и пр., а p — количество лагов. Формула прогнозирования в общем виде имеет вид

$$y_{t+h} = f(X_t),$$

где f — некоторая функция прогнозирования.

Для прогнозирования потоков электронов в ВРПЗ на круговой полярной орбите использовалась модель машинного обучения — линейная регрессия. Линейная регрессия — используемая в статистике регрессионная модель зависимости одной (объясняемой) переменной \vec{y} от другой или нескольких других переменных \vec{X} с линейной функцией зависимости.

$$y_i = a_1 X_{1i} + a_2 X_{2i} + \dots + a_m X_{mi} + a_0,$$

где i — номер наблюдения; a_0, a_1, \dots, a_m — параметры, которые надо оценить (более подробно см. [Демиденко, 1981]).

Для сравнения в дальнейшем качества прогнозов, полученных с помощью линейной регрессии, был получен прогноз на основе наивной модели. Наивная модель прогнозирования — модель, значение которой в точке прогноза равно последнему известному значению прогнозируемой переменной.

2. ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве входных данных для прогнозирования были выбраны следующие признаки.

1. Параметры СВ в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем: скорость и плотность СВ, полученные в эксперименте на КА ACE приборомSWEPAM (Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor).

2. Параметры ММП: модуль вектора поля B_t и B_z , полученные на КА ACE магнитометром MAG.

3. Геомагнитные индексы: Dst и K_p , полученные наземным центром сбора данных МЦД (Киото).

4. Логарифм максимального и интегрального за сутки потоков электронов ВРПЗ ($>0.8, >2$ МэВ) по данным измерения КА серии GOES.

Использовались трехчасовой K_p , часовой Dst и остальные признаки, усредненные за 1 мин. Максимальный поток определялся как наибольшее среднее за 1 мин для каждого параметра за каждые конкретные сутки.

Данные были получены из открытых источников, а именно центра анализа данных космической погоды НИИЯФ МГУ [<https://swx.sinp.msu.ru/>].

Данные первых трех пунктов были преобразованы в суточные путем вычисления арифметического среднего и максимума по модулю за сутки. После таких преобразований количество признаков возросло в два раза. В дальнейшем был выполнен анализ значимости каждого из этих признаков и для каждого из них оставлен лишь один из двух аналогичных вариантов.

Выбор первых трех пунктов основан на опыте прогнозирования среднесуточного потока на геостационарной орбите в [Koons, Gorney, 1991; Ling et al., 2010], а также в последних работах научной группы НИИЯФ МГУ [Мягкова и др., 2021; Kaledaev et al., 2019, 2023].

Наиболее часто обучение модели прогнозирования временных рядов происходит на основе τ предыдущих значений ряда. Величину τ называют шириной окна. В работе использовалась ширина окна многомерного временного ряда, равная 26 дням. Из этого окна брались лаги, равные 1 (только для прогноза на 1 день вперед), 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13 и 26 дням. Значения лагов, соответствующие одной неделе, применяются для эффективного использования моделью текущей доступной информации о признаках, а лаги, равные 13 и 26 дням, имеют связь с периодом вращения Солнца, который составляет 25–27 дней. Как будет показано далее, рекуррентные потоки, связанные с вращением Солнца, способны оказывать значительное влияние на параметры ММП и СВ, что, в свою очередь, может существенно изменять потоки заряженных частиц в радиационных поясах.

Для работы использовался 9-месячный массив данных с 1 июня 2019 по 1 марта 2020 г., который был разбит на тренировочный и тестовый наборы данных в соотношении 7:2. Данные с 01.06.2019 по 31.12.2019 включительно использовались для тренировочного набора. Данные с 01.01.2020 по 01.03.2020 использовались в качестве тестового набора — независимых данных, которые использовались для оценки качества прогнозирования.

В рамках исследования был выбран ограниченный временной интервал, соответствующий периоду минимальной геомагнитной активности. Данный подход позволил обеспечить максимально стабильные условия для проведения сравнительного анализа, основная цель которого заключалась в сопоставлении временной динамики интегральных и максимальных за сутки потоков электронов в области ВРПЗ на малых высотах с аналогичной динамикой потоков электронов, регистрируемых на геостационарной орбите.

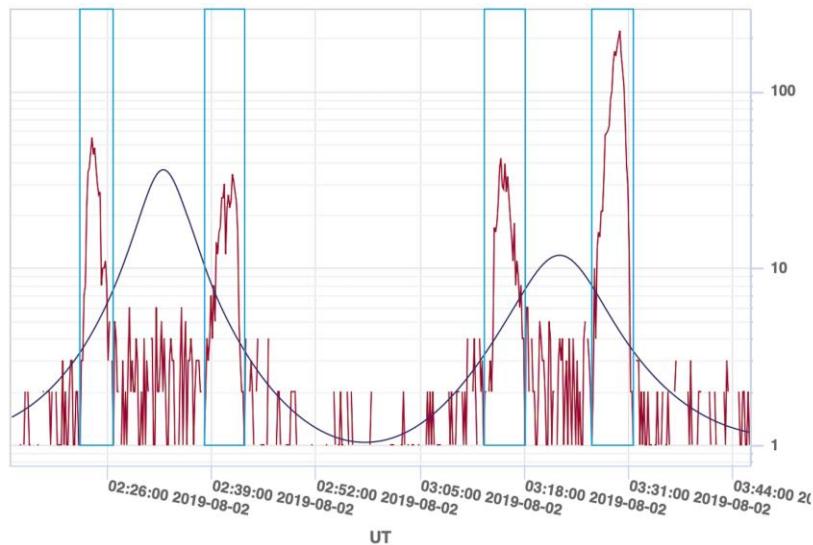


Рис. 1. Потоки электронов на круговой полярной орбите по данным КА «Метеор-М» № 2 (>0.7 МэВ) и координата Мак-Илвайна L

Данное исследование было проведено с учетом того факта, что в настоящее время разработаны и успешно функционируют прогностические модели потоков электронов на геостационарной орбите, основанные на методах машинного обучения.

Обучение производилось на основе данных о потоках электронов ВРПЗ, измеренных на ИСЗ «Метеор-М2» (запущен 08.07.2014). Прогноз выполнялся для максимального и интегрального за сутки потоков электронов ВРПЗ (>0.7 , >2 МэВ). Орбита КА «Метеор-М2» является круговой солнечно-синхронной, высота в восходящем узле $h=832$ км, наклонение $i\approx98.85^\circ$, период обращения $T=101.3$ мин. Таким образом, за один виток спутник пересекал ВРПЗ четыре раза (рис. 1).

Из данных, собранных на каждом витке, проходившем спутником, были выделены участки, где параметр Мак-Илвайна L изменялся в пределах от 3 до 6. На этих участках были рассчитаны интегральные потоки по формуле трапеций; интегральный поток за сутки был получен суммированием интегральных потоков на каждом таком участке. Максимальный поток за сутки рассчитывался как наибольшее значение потока, зарегистрированное на этих участках.

Следует отметить, что вместо значений потоков использовались их десятичные логарифмы в случае как целевой переменной, так и признаков, а именно потоков электронов на геостационарной орбите. Это связано с тем, что величины потоков имеют широкий динамический диапазон, занимающий несколько порядков величины.

3. АНАЛИЗ ВХОДНЫХ ДАННЫХ

В ходе исследования были проанализированы интегральные (рис. 2, 3) и максимальные (рис. 4, 5) потоки электронов за сутки по данным КА «Метеор-М2» и GOES для энергий >2 и >0.7 МэВ (>0.8 МэВ для GOES, так как канала с нужным порогом энергий на приборе нет). Было получено, что наблюдается заметная корреляция между данными потоками, момент возрастания на обоих спутниках совпадает,

спад же на полярной орбите более медленный и плавный по сравнению с геостационарной.

Кроме того, были проанализированы среднесуточные значения Dst , K_p , плотности и скорости СВ и значений модуля вектора ММП (рис. 6–8). В пределах рассмотренного периода средний Dst не опускался ниже -40 нТл, что говорит об отсутствии сильных геомагнитных бурь в этот период. Однако видно периодическое повышение скорости СВ до значений 600–700 км/с с периодом примерно 26 дней, что указывает на приход высокоскоростных рекуррентных потоков СВ, вызывающих значительные изменения состояния околоземного пространства и увеличение потоков заряженных частиц в радиационных поясах.

4. ОТБОР ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ

Количество полученных признаков для заданных интервалов погружения временного ряда составляет 126. Такое количество может привести к переобучению линейной регрессии на используемом интервале времени, поэтому необходимо уменьшить число признаков. Считается, что количество параметров в модели машинного обучения должно быть ниже объема обучающей выборки как минимум на порядок [Alwosheel et al., 2018]. Соответствующий расчет для нашего случая (семь месяцев, ежедневный прогноз) дает оценку 10–20 для максимального количества признаков.

Отбор осуществляется на основе значения коэффициента корреляции рассматриваемого признака с целевой переменной. Признаки с максимальным по модулю коэффициентом корреляции используются для дальнейшего прогнозирования.

Коэффициенты корреляции для интегрального потока электронов с энергией >2 и >0.7 МэВ показаны на рис. 9 и 10 соответственно. Максимальный коэффициент корреляции интегрального потока электронов с энергией >2 МэВ ожидаемо наблюдается с интегральным потоком на GOES, превышая все остальные

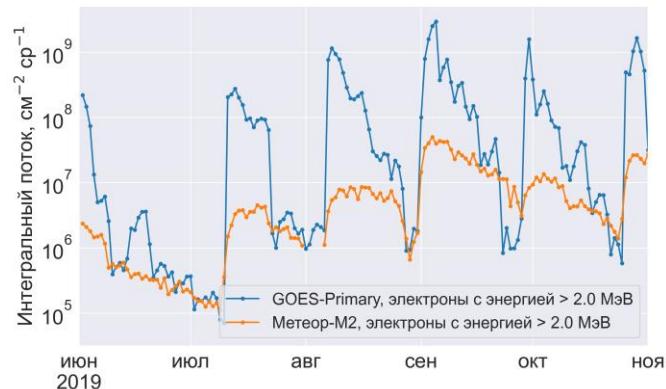


Рис. 2. Суммарные интегральные за сутки потоки электронов с энергией >2.0 МэВ по данным КА «Метеор-М2» и GOES-Primary

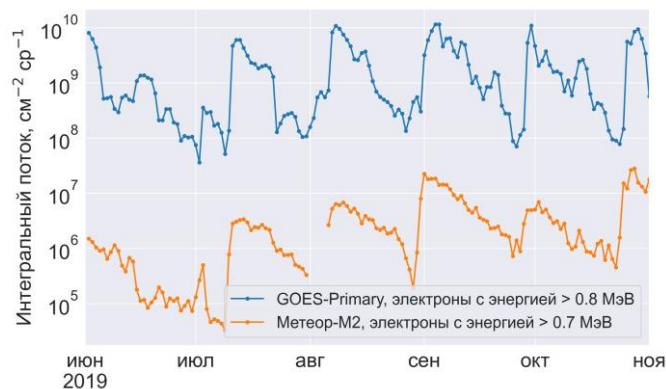


Рис. 3. Суммарные интегральные за сутки потоки электронов с энергией >0.7 и >0.8 МэВ по данным КА «Метеор-М2» и GOES-Primary соответственно

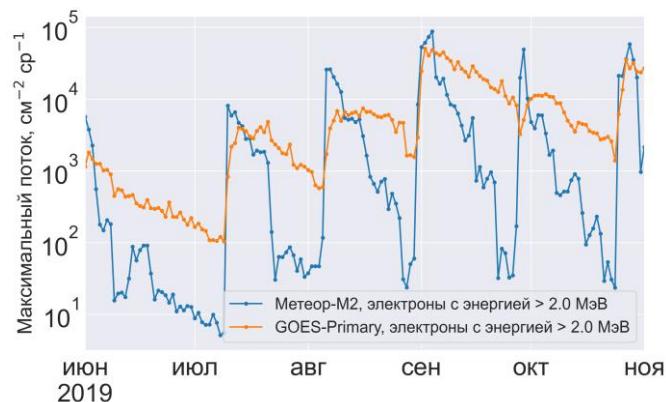


Рис. 4. Максимальные за сутки потоки электронов с энергией >2.0 МэВ по данным КА «Метеор-М2» и GOES-Primary

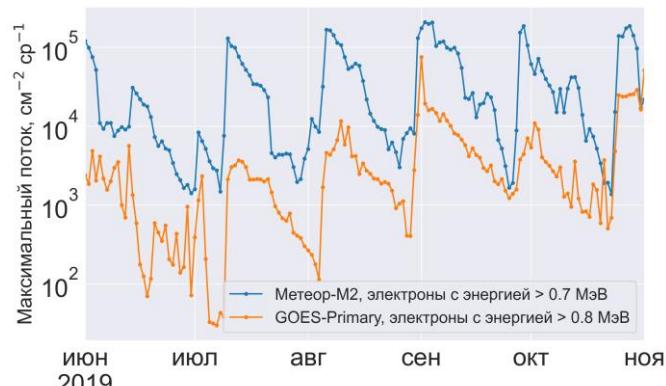


Рис. 5. Максимальные за сутки потоки электронов с энергией > 0.7 и > 0.8 МэВ по данным КА «Метеор-М2» и GOES-Primary соответственно

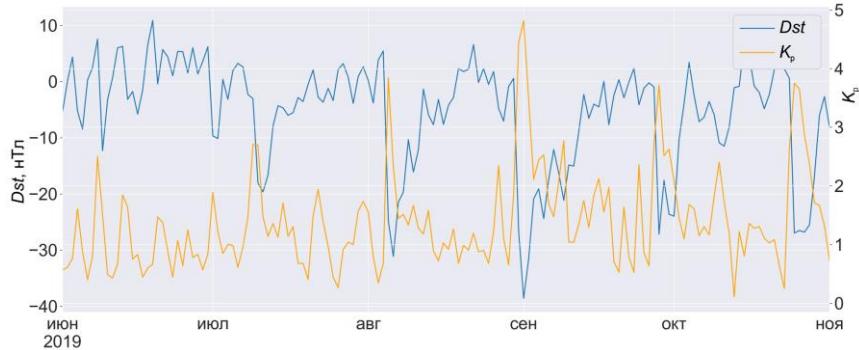
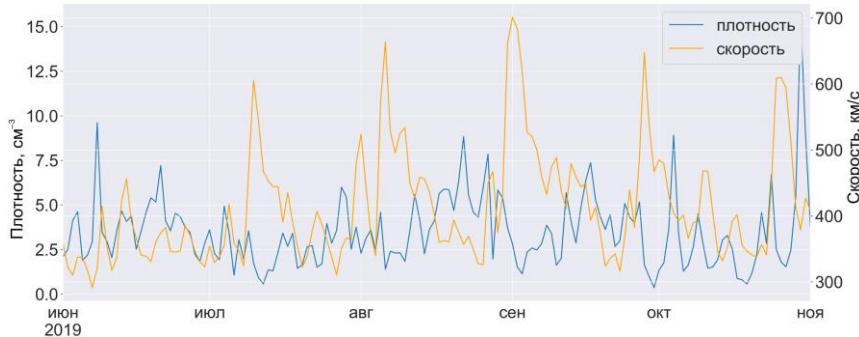
Рис. 6. Средние за сутки Dst и K_p 

Рис. 7. Средние за сутки скорость и плотность СВ

Рис. 8. Средние за сутки B_z и B_t

более чем в три раза. Это говорит о том, что основной вклад в прогноз будет вносить именно он. Следующими по значимости также ожидаются являются скорость СВ, K_p и Dst , что соответствует существующим представлениям.

Для энергии 0.7 МэВ максимальный коэффициент корреляции также принадлежит интегральному потоку на GOES, однако в этом случае он незначительно превышает остальные коэффициенты, что указывает на более высокую вариативность потоков электронов субрелятивистских энергий по сравнению с релятивистскими.

Стоит отметить, что средние за сутки значения показывают больший по модулю коэффициент корреляции по сравнению с максимальными значениями, что подтверждает необходимость использования именно их для прогноза.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Полученные с помощью линейной регрессии и наивной модели прогнозы для интегрального и мак-

симального потока электронов за сутки показаны на рис. 11–18 (k — количество признаков, используемое для получения данного прогноза).

Результаты прогнозирования потоков электронов с энергией >2 МэВ оказались значительно лучше, что, возможно, связано с их более высокой квазистационарностью. Прогнозировать максимальные потоки получается хуже, чем интегральные, так как у них наблюдается большой разброс значений за интервал времени в пределах нескольких дней.

Для оценки количественных показателей качества прогноза были рассчитаны коэффициент множественной детерминации R^2 и среднеквадратичное отклонение. Расчет проводился на тестовом наборе, т. е. на тех данных, которые не использовались в процессе обучения модели.

Для анализа качества модели решения данной задачи был получен прогноз на основе наивной модели и рассчитаны его характеристики. Значения указанных величин приведены в таблице. Синим цветом выделены лучшие показатели для каждого из горизонтов прогноза и для данной энергии. Видно, что всех случаях

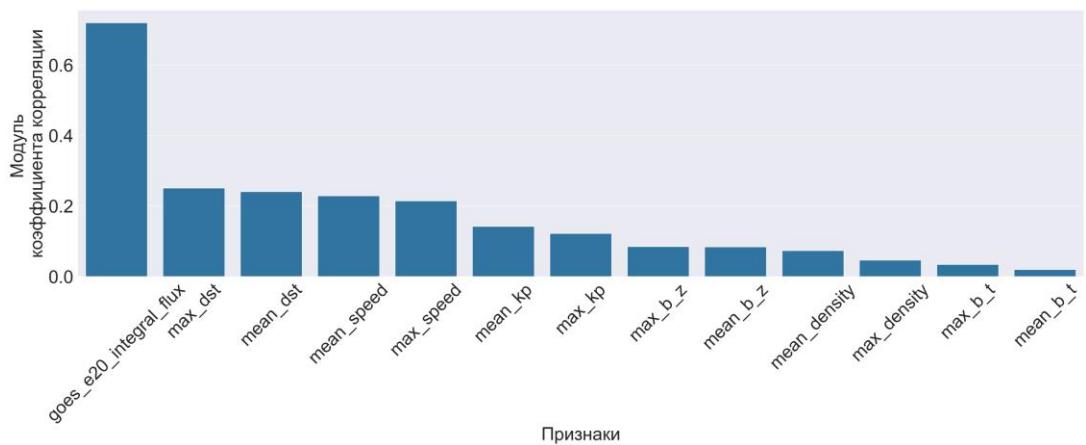


Рис. 9. Модуль коэффициента корреляции интегрального за сутки потока электронов с энергией >2 МэВ

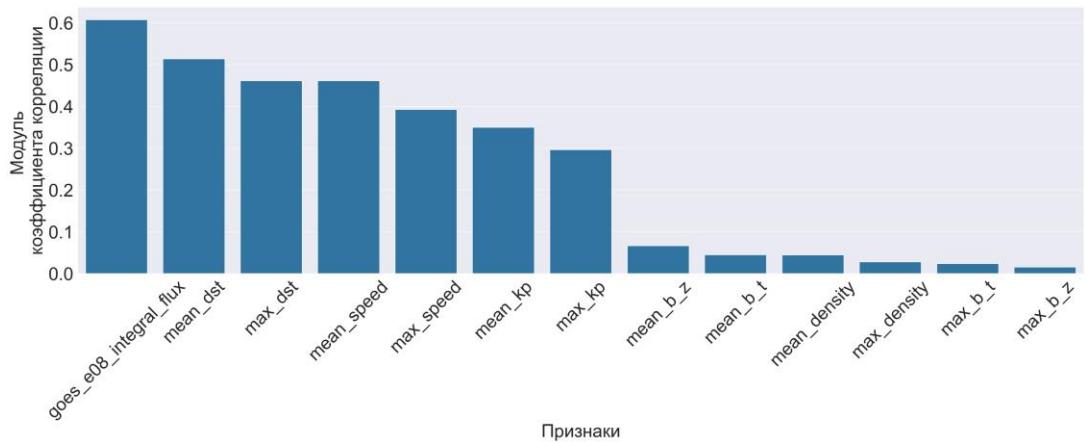


Рис. 10. Модуль коэффициента корреляции интегрального за сутки потока электронов с энергией >0.7 МэВ

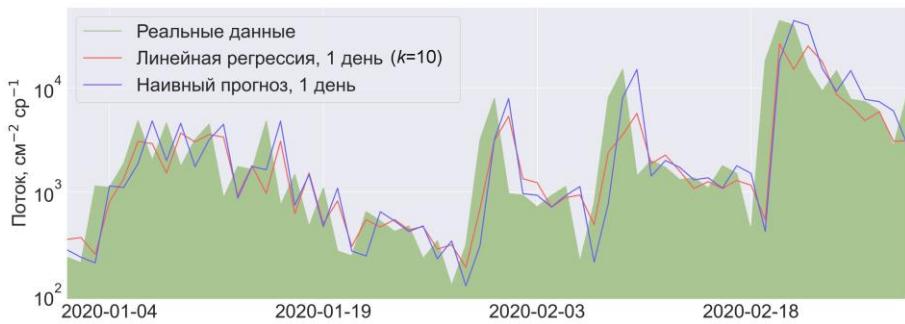


Рис. 11. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 1 день

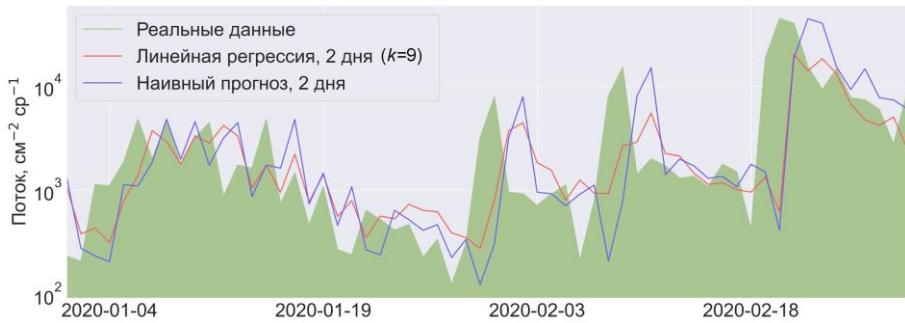


Рис. 12. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 2 дня

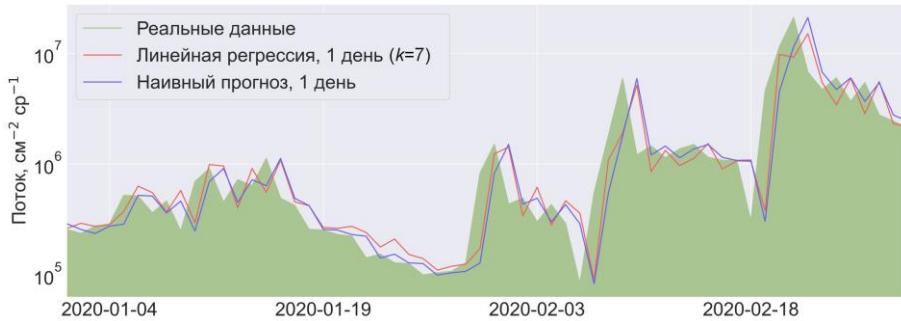


Рис. 13. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 1 день

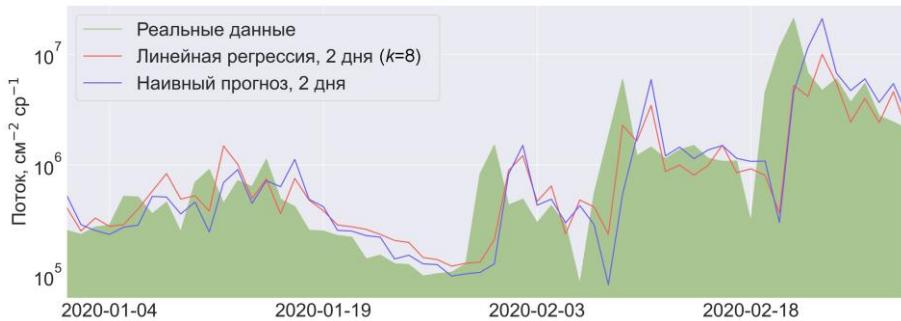


Рис. 14. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ на 2 дня



Рис. 15. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 1 день

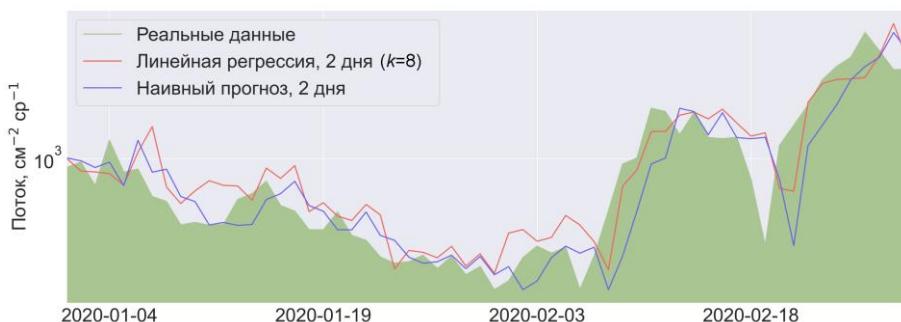
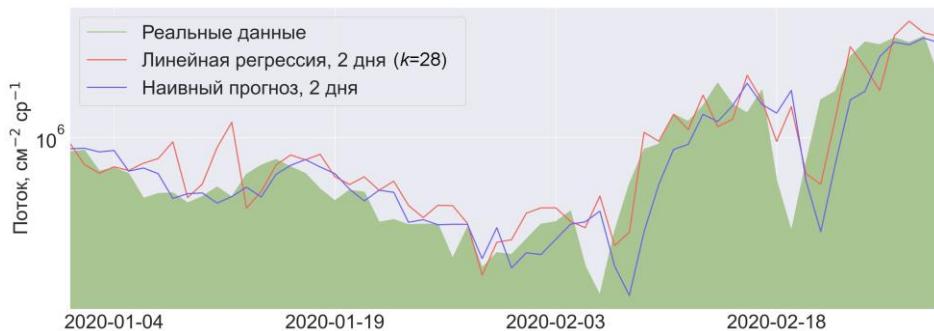


Рис. 16. Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 2 дня



Рис. 17. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 1 день

Рис. 18. Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ на 2 дня

Метрики моделей машинного обучения, используемых в задаче прогнозирования потоков электронов с энергией >0.7 и >2 МэВ

	Прогноз на 1 день		Прогноз на 2 дня	
Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ				
Модель\Метрики	R^2	СКО	R^2	СКО
Наивный прогноз	0.663	0.325	0.382	0.439
Линейная регрессия	0.696	0.308	0.550	0.375
Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >0.7 МэВ				
Модель\Метрики	R^2	СКО	R^2	СКО
Наивный прогноз	0.372	0.471	-0.046	0.608
Линейная регрессия	0.558	0.395	0.316	0.492
Прогноз интегральных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ				
Модель\Метрики	R^2	СКО	R^2	СКО
Наивный прогноз	0.819	0.156	0.603	0.232
Линейная регрессия	0.825	0.154	0.708	0.199
Прогноз максимальных за сутки потоков электронов с энергией >2 МэВ				
Модель\Метрики	R^2	СКО	R^2	СКО
Наивный прогноз	0.852	0.144	0.721	0.198
Линейная регрессия	0.888	0.125	0.776	0.177

наивный прогноз показывает результаты хуже, чем выполненный при помощи линейной регрессии. Получено также, что для $E > 0.7$ МэВ характеристики лучше для прогноза интегральных потоков, а для $E > 2$ МэВ лучше себя показывает прогноз максимальных потоков. При увеличении горизонта прогноза ожидаемо наблюдается значительное ухудшение качества прогнозов для обоих энергетических диапазонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты исследования возможности прогнозирования вариаций потоков (использовался логарифм потока) электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергиями >0.7 и >2 МэВ, измеренных на круговой полярной орбите. Прогноз выполнялся с помощью машинного обучения, где в качестве входных признаков использовались параметры солнечного ветра и межпланетного

магнитного поля, а также геомагнитные индексы и логарифм потока электронов ВРПЗ на геостационарной орбите. Проведен отбор оптимальных входных параметров при прогнозировании потока электронов на низкой полярной орбите. Получено, что на полярной орбите максимальный коэффициент корреляции интегрального потока электронов ВРПЗ с энергией >2 МэВ наблюдается с интегральным потоком на геостационарной орбите (GOES). В сочетании с уже имеющимися результатами прогнозирования потоков электронов на геостационарной орбите на несколько суток вперед [Мягкова и др., 2021; Kalegaev et al., 2023] постановку задачи прогнозирования потоков электронов на полярных орбитах можно считать перспективной.

На основании полученных в ходе исследования результатов можно предположить, что для получения более точных прогностических моделей следу-

ющим возможным этапом должно быть расширение используемого временного ряда экспериментальных данных, а также исследование в рамках данной задачи более сложных моделей машинного обучения — таких, например, как искусственные нейронные сети и градиентный бустинг.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048, [<https://rscf.ru/project/22-62-00048/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004, т. 44, № 4, с. 502–510.
- Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. *Доклады Академии наук*. 1958, т. 120, № 6, с. 1231–1233.
- Демиденко Е.З. *Линейная и нелинейная регрессия*. М.: Финансы и статистика. 1981, 302 с.
- Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др. Динамика радиационных поясов Земли во время сильных магнитных бурь по данным ИСЗ «КОРОНАС-Ф». *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2007, т. 41, № 4, с. 369–378.
- Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Шугай Ю.С. и др. Краткосрочное и среднесрочное прогнозирование потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли методами машинного обучения. *Метеорология и гидрология*. 2021, № 3, с. 47–57.
DOI: [10.52002/0130-2906-2021-3-47-57](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-3-47-57).
- Новиков Л.С., Воронина Е.Н. *Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой*. М.: КДУ. 2021, 560 с.
- Оседло В.И., Калегаев В.В., Рубинштейн И.А. и др. Мониторинг радиационного состояния околоземного пространства на спутнике «Арктика-М» № 1. *Космические исследования*. 2022, т. 60, № 6, с. 439–453.
DOI: [10.31857/S0023420622060085](https://doi.org/10.31857/S0023420622060085).
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В., Белов А.В. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов. *Космические исследования*. 2005, т. 43, № 3, с. 186–193.
- Alwosheel A., van Cranenburgh S., Chorus C.G. Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis. *J. Choice Modelling*. 2018, vol. 28, pp. 167–182.
DOI: [10.1016/j.jocm.2018.07.002](https://doi.org/10.1016/j.jocm.2018.07.002).
- Baker D.N., McPherron R.L., Cayton T.E., Klebesadel R.W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 RE. *J. Geophys. Res.* 1990, vol. 95, iss. A9, pp. 15133–15140. DOI: [10.1029/JA095iA09p15133](https://doi.org/10.1029/JA095iA09p15133).
- Balikhin M.A., Boynton R.J., Walker S.N., et al. Using the NARMAX approach to model the evolution of energetic electrons fluxes at geostationary orbit. *Geophys. Res. Lett.* 2011, vol. 38, iss. 18. DOI: [10.1029/2011GL048980](https://doi.org/10.1029/2011GL048980).
- Botek E., Pierrard V., Winant A. Prediction of radiation belts electron fluxes at a Low Earth Orbit using neural networks with PROBA-V/EPT data. *Space Weather*. 2023, vol. 21, iss. 7, e2023SW003466. DOI: [10.1029/2023SW003466](https://doi.org/10.1029/2023SW003466).
- Cole D.G. Space weather: Its effects and predictability. *Space Sci. Rev.* 2003, vol. 107, pp. 295–302.
DOI: [10.1023/A:1025500513499](https://doi.org/10.1023/A:1025500513499).
- Denton M.H., Henderson M.G., Jordanova V.K., et al. An improved empirical model of electron and ion fluxes at geosynchronous orbit based on upstream solar wind conditions. *Space Weather*. 2016, vol. 14, iss. 7, pp. 511–523. DOI: [10.1002/2016SW001409](https://doi.org/10.1002/2016SW001409).
- Glauert S.A., Horne R.B., Meredith N.P. Three-dimensional electron radiation belt simulations using the BAS Radiation Belt Model with new diffusion models for chorus, plasma-spheric hiss, and lightning-generated whistlers. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, iss. 1, pp. 268–289. DOI: [10.1002/2013JA019281](https://doi.org/10.1002/2013JA019281).
- Iucci N., Levitin A., Belov E., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005, vol. 3, iss. 1. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).
- Kalegaev V., Panasyuk M., Myagkova I., et al. Monitoring, analysis and post-casting of the Earth's particle radiation environment during February 14 – March 5, 2014. *Space Weather Space Climate*. 2019, vol. 9, iss. A29. DOI: [10.1051/swsc/2019029](https://doi.org/10.1051/swsc/2019029).
- Kalegaev V., Kapotseva K., Myagkova I., et al. Medium-term prediction of the fluence of relativistic electrons in geostationary orbit using solar wind streams forecast based on solar observations. *Adv. Space Res.* 2023, vol. 72, iss. 12, pp. 5376–5390. DOI: [10.1016/j.asr.2022.08.033](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.033).
- Kataoka R., Miyoshi Y. Average profiles of the solar wind and outer radiation belt during the extreme flux enhancement of relativistic electrons at geosynchronous orbit. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, iss. 6, pp. 1335–1339.
DOI: [10.5194/angeo-26-1335-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1335-2008).
- Koons H.C., Gorney D.J. A neural network model of the relativistic electron flux at geosynchronous orbit. *J. Geophys. Res.* 1991, vol. 96, iss. A4, pp. 5549–5556.
DOI: [10.1029/90JA02380](https://doi.org/10.1029/90JA02380).
- Kudela K. Space weather near Earth and energetic particles: Selected results. *J. Physics Conference Ser.* 2013, vol. 409, iss. 1. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012017).
- Landis D.A., Saikin A.A., Zhelavskaya I., et al. NARX neural network derivations of the outer boundary radiation belt electron flux. *Space Weather*. 2022, vol. 20, iss. 5, e2021SW002774. DOI: [10.1029/2021SW002774](https://doi.org/10.1029/2021SW002774).
- Li W., Hudson M.K. Earth's Van Allen radiation belts: From discovery to the Van Allen Probes era. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, iss. 11, pp. 8319–8351.
DOI: [10.1029/2018JA025940](https://doi.org/10.1029/2018JA025940).
- Li X., Baker D.N., Kanekal S.G., et al. Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variations. *Geophys. Res. Lett.* 2001, vol. 28, iss. 20, pp. 3827–3830.
DOI: [10.1029/2001gl013586](https://doi.org/10.1029/2001gl013586).
- Ling A.G., Ginet G.P., Hilmer R.V., Perry K.L. A neural network-based geosynchronous relativistic electron flux forecasting model. *Space Weather*. 2010, vol. 8, iss. 9.
DOI: [10.1029/2010SW000576](https://doi.org/10.1029/2010SW000576).
- Lyatsky W., Khazanov G.V. A predictive model for relativistic electrons at geostationary orbit. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, iss. 15, L15108. DOI: [10.1029/2008GL034688](https://doi.org/10.1029/2008GL034688).
- Myagkova I., Efitorov A., Shiroky V., Dolenko S.A. Quality of prediction of daily relativistic electrons flux at geostationary orbit by machine learning methods. *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2019: Text and Time Series*. 2019, pp. 556–565.
DOI: [10.1007/978-3-030-30490-4_45](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30490-4_45).
- Pilipenko V., Yagova N., Romanova N., Allen J. Statistical relationships between the satellite anomalies at geostationary orbits and high-energy particles. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, iss. 6, pp. 1192–1205. DOI: [10.1016/j.asr.2005.03.152](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.152).
- Potapov A., Ryzhakova L., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit. *Acta Astronaut.* 2016, vol. 126, pp. 47–51. DOI: [10.1016/j.actaastro.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.017).
- Son J., Moon Y.-J., Shin S. 72-hour time series forecasting of hourly relativistic electron fluxes at geostationary orbit by

- deep learning. *Space Weather*. 2022, vol. 20, iss. 10, e2022SW003153. DOI: [10.1029/2022sw003153](https://doi.org/10.1029/2022sw003153).
- Stepanova M., Pinto V., Antonova E. Regarding the relativistic electron dynamics in the outer radiation belt: a historical view. *Rev. Modern Plasma Physics*. 2024, vol. 8, iss. 25. DOI: [10.1007/s41614-024-00165-4](https://doi.org/10.1007/s41614-024-00165-4).
- Sun X., Lin R., Liu S., et al. Modeling the relationship of ≥ 2 MeV electron fluxes at different longitudes in geostationary orbit by the machine learning method. *Remote Sensing*. 2021, vol. 13, iss. 17, p. 3347. DOI: [10.3390/rs13173347](https://doi.org/10.3390/rs13173347).
- Wei L., Zhong Q., Lin R., et al. Quantitative prediction of high-energy electron integral flux at geostationary orbit based on deep learning. *Space Weather*. 2018, vol. 16, iss. 7, pp. 903–916. DOI: [10.1029/2018SW001829](https://doi.org/10.1029/2018SW001829).
- Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J. Observations of trapped electrons at low and high altitudes. *J. Geophys. Res.* 1968, vol. 73, iss. 17, pp. 5673–5696. DOI: [10.1029/ja073i017p05673](https://doi.org/10.1029/ja073i017p05673).
- URL: <https://swx.sinp.msu.ru/> (дата обращения 10 сентября 2024 г.).
- URL: <http://www.swpc.noaa.gov/> (дата обращения 10 сентября 2024 г.).
- URL: <https://rscf.ru/project/22-62-00048/> (дата обращения 10 сентября 2024 г.).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.*
- Как цитировать эту статью:*
- Белова А.О., Мяткова И.Н. Прогнозирование потоков электронов на круговой полярной орбите: отбор предикторов. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 77–87. DOI: [10.12737/szf-113202509](https://doi.org/10.12737/szf-113202509).

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НЕЕ НЕОБЫКНОВЕННОЙ РАДИОВОЛНОЙ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ НА ЧАСТОТЕ, БЛИЗКОЙ К НАГРЕВНОЙ

IONOSPHERE RESPONSE TO THE IMPACT OF AN EXTRAORDINARY RADIO WAVE WHEN LOCATED AT A FREQUENCY CLOSE TO THE HEATING FREQUENCY

Н.В. Бахметьева

Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

Г.И. Григорьев

Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, grig19@list.ru

И.Н. Жемяков

Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, ilia.zhem@yandex.ru

Е.Е. Калинина

Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, kalinina@nirfi.unn.ru

А.А. Лисов

Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, lisov@nirfi.unn.ru

N.V. Bakhmetieva

Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

G.I. Grigoriev

Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, grig19@list.ru

I.N. Zhemyakov

Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, ilia.zhem@yandex.ru

E.E. Kalinina

Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, kalinina@nirfi.unn.ru

A.A. Lisov

Radiophysical Research Institute,
Lobachevsky State University,
Nizhniy Novgorod, Russia, lisov@nirfi.unn.ru

Аннотация. В работе представлены результаты экспериментов по воздействию на ионосферу Земли мощным высокочастотным радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда СУРА (56.1° N, 46.1° E). Возмущение в ионосфере создавалось радиоволной необыкновенной поляризации в условиях, когда обыкновенная компонента мощной волны не отражалась ионосферой. Зондирование возмущенной области осуществлялось пробной радиоволной той же поляризации на частоте выше частоты нагрева на 228–400 кГц. Во время воздействия на ионосферу с высоты отражения мощной радиоволны принимался слабый рассеянный сигнал с амплитудой на 40–60 дБ ниже амплитуды сигнала зеркального отражения от F-области. Это означает, что искусственное возмущение плотности плазмы происходило в области отражения мощной радиоволны необыкновенной поляризации. Обсуждаются возможные причины возникновения возмущения.

Ключевые слова: ионосфера, плазма, высокочастотный нагрев, зондирование пробными радиоволнами, рассеяние, искусственные периодические неоднородности, нагревный стенд СУРА.

Abstract. The paper presents the results of experiments on the impact of powerful high-frequency radio emission from the SURA mid-latitude heating facility (56.1° N, 46.1° E) on Earth's ionosphere. The disturbance in the ionosphere was created by a radio wave of extraordinary polarization under conditions when the ordinary component of the powerful wave was not reflected by the ionosphere. The sounding of the disturbed region was carried out with a probe radio wave of the same polarization at a frequency higher than the heating frequency by 228–400 kHz. During the impact on the ionosphere, a weak scattered signal with an amplitude 40–60 dB lower than the amplitude of the specular reflection signal from the F-region was received from the height of reflection of the powerful radio wave. This means that the artificial disturbance of the plasma density occurred in the region of reflection of the powerful radio wave of extraordinary polarization. Possible causes of the disturbance are discussed.

Keywords: ionosphere, plasma, high-frequency heating, sounding with a probe radio wave, artificial periodic irregularities, SURA heating facility.

ВВЕДЕНИЕ

Начатые в 60-х гг. прошлого столетия исследования ионосферы при воздействии на нее мощным КВ-радиоизлучением нагревных стендов обнаружили множество явлений как предсказанных и обоснованных в теоретических работах, так и в какой-то степени неожиданных. Результатам этих исследований посвящена обширная литература, включающая монографии и десятки сотен статей в научной периодике. Среди них монографии [Гуревич, Шварцбург, 1973; Митяков и др., 1989; Благовещенская, 2001; Фролов, 2017; Kelley, 2009], обзоры [Гинзбург, Гуревич, 1960; Utlaut, Cohen, 1971; Stubbe, Hagfors, 1997; Leyser, 2001; Гуревич, 2007; Gurevich, 1999; Грач и др., 2016; Streltsov et al., 2018; Беликович и др., 2007; Фролов и др., 2007; Благовещенская, 2010, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2020, 2022; Кюо, 2021], в которых приведена обширная библиография теоретических и экспериментальных исследований искусственного возмущения ионосферы мощным радиоизлучением. В выполненных на нагревных стендах Arecibo, HAARP, EISCAT, «Зименки», СУРА экспериментах по воздействию на ионосферу мощной радиоволнной обыкновенной поляризации был исследован широкий круг возникающих при этом явлений. Одним из них было возникновение искусственной турбулентности ионосферной плазмы как следствие развития плазменных неустойчивостей разного типа вблизи уровня верхнего гибридного резонанса, т. е. высоты резонансного взаимодействия поля мощной волны с электронами ионосферы [Гуревич, 2007; Васьков, Гуревич, 1973, 1975а, б, 1979]. Подробный обзор результатов многочисленных экспериментов по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением дан в монографии [Фролов, 2017], в работах [Streltsov et al., 2018; Rietveld et al., 1993, 2016; Blagoveshchenskaya, 2020; Кюо, 2021]. Важным условием усиления нагревных эффектов оказалось излучение передатчиками стендов мощной радиоволны в направлении магнитного зенита [Gurevich et al., 2002; Pedersen et al., 2003].

Долгое время возмущения ионосферы при радионагреве связывали с комплексом нелинейных процессов, развивающихся в поле мощной обыкновенной волны и вызывающих образование развитой структуры неоднородностей плазмы, сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля. Излучение радиоволн необыкновенной поляризации использовалось для исследования ионосферы и нейтральной атмосферы методом создания искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы (ИПН), впервые реализованном на нагревном стенде «Зименки» и впоследствии развитом на стенде СУРА [Беликович и др., 1975, 1999; Belikovich et al., 2002; Bakhmetieva, Grigoriev, 2022]. В монографии [Фролов, 2017] подробно описываются и обсуждаются результаты экспериментов по возмущению ионосферы необыкновенной радиоволной, в которых было установлено, что мелкомасштабные неоднородности с поперечным относительно геомагнитного поля масштабом $l_{\perp} \approx 10-20$ м не возбуждались; дециметровые мелкомасштабные неоднородности с по-

перечным масштабом 50–200 м и среднемасштабные с $l_{\perp} \approx 3$ км возбуждались только в вечерние иочные часы, а крупномасштабные неоднородности с $l_{\perp} \approx 10-20$ км и более возбуждались в эти же часы при условии близости частоты нагрева к критической частоте F-слоя для необыкновенной волны [Фролов и др., 2014; Фролов, 2015]. Лучший результат достигался при излучении мощной радиоволны в направлении магнитного зенита.

Большой объем исследований нелинейных явлений в плазме при возмущении ее мощной радиоволной необыкновенной поляризации был выполнен международным коллективом на высокоширотном нагревном стенде EISCAT [Благовещенская и др., 2018; Blagoveshchenskaya, 2020; Blagoveshchenskaya et al., 2019, 2020, 2022; Kalishin et al., 2021; Борисова и др., 2023]. Эти эксперименты показали, что в условиях спокойной высокоширотной ионосферы мощная радиоволна необыкновенной поляризации, излученная в направлении магнитного зенита, может воздействовать на F-область ионосферы эффективнее и вызывать более сильное возмущение ионосферной плазмы, чем радиоволна обыкновенной поляризации.

На основе опыта, приобретенного нами в результате многолетних исследований ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН, в 2006 г. на среднеширотном стенде СУРА был начат новый цикл экспериментов по исследованию возмущенной области ионосферы, создаваемой при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами необыкновенной поляризации. Зондирование возмущенной области пробными радиоволнами той же поляризации на частоте, близкой к нагревной, проводилось на базе установки частичных отражений. Рассеяние пробных радиоволн из области, возмущенной радиоволной необыкновенной поляризации, наблюдалось нерегулярно, при определенных условиях. Целью данной работы является обсуждение результатов этих экспериментов.

1. СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ И ЕГО ЛОКАЦИЯ ПРОБНЫМИ РАДИОВОЛНАМИ

Измерения проводились 10–11 октября 2006 г., 1–2 сентября и 8 октября 2014 г., 18 мая 2016 г. и 24–25 сентября 2024 г. в вечерние часы, иногда в условиях сильной диффузности F-слоя ионосферы. В тексте приведено московское время (МСК), по которому работают нагревный стенд СУРА и диагностический комплекс, с указанием в скобках всемирного универсального времени (UTC).

10–11 октября 2006 г.

Эксперимент проходил с 19:00 до 22:00 МСК (UTC+4). Воздействие на ионосферу производилось синфазно тремя передатчиками с излучаемой мощностью $P_1=210$ кВт, $P_2=220$ кВт и $P_3=190$ кВт на частоте 4.3 МГц. Мощная радиоволна необыкновенной поляризации излучалась в зенит.

Локация возмущенной области осуществлялась также необыкновенной радиоволной на частоте $f_{\text{проб}}=4.7$ МГц (т. е. выше нагревной частоты на 400 кГц) передатчиком «Поиск» установки частичных отражений. В режиме нагрева ионосферы стенд СУРА 30 с непрерывно излучал мощные радиоволны, затем следовала 60-секундная пауза. Эксперимент проводился в условиях, когда критическая частота F2-слоя $f_{\text{o}}\text{F2}$ была ниже нагревной частоты и волны обыкновенной поляризации не отражались ионосферой. Состояние ионосферы контролировалось ионозондом «Базис». Во время эксперимента наблюдалось явление естественного F-рассеяния, при котором зеркальное отражение волны от F-слоя становится размытым [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Во время нагрева и паузы в работе стенд проводилось импульсное зондирование возмущенной области ионосферы. Для регистрации характеристик амплитуд и фаз сигналов, отраженных и рассеянных ионосферой, использовалась специализированная аппаратура, разработанная для исследования ионосферы методом частичных отражений, применяемая также при исследовании ионосферы и нейтральной атмосферы методом ИПН [Беликович и др., 2003]. Передатчик установки частичных отражений излучал в зенит линейно-поляризованные радиоволны в импульсном режиме с длительностью импульса 25 (50) мкс и частотой повторения 25 (50) Гц. Приемопередающая антенная система установки имеет 12 вибраторов для каждой из двух взаимно ортогональных поляризаций. На приеме, как правило, выделялась волна, соответствующая необыкновенной компоненте. Принятые сигналы усиливались приемником с полосой 40 (80) кГц, их квадратурные компоненты регистрировались в цифровом виде с шагом по действующей высоте 0.7–1.4 км в диапазоне действующих высот от 0 до 700 км. Эксперимент показал, что в период воздействия на ионосферу радиоволной необыкновенной поляризации в интервале действующих высот на 30–40 км ниже зеркально отраженного сигнала появлялся слабый рассеянный сигнал, пропадавший после окончания нагрева.

1–2 сентября 2014 г.

Эксперимент проходил с 21:25 до 07:10 МСК (UTC+4). Нагрев ионосферы производился двумя передатчиками с излучаемой мощностью $P_1=150$ кВт и $P_2=160$ кВт на частоте $f_{\text{нагр}}=4.3$ МГц. Пробные волны излучались, как и в 2006 г., на частоте $f_{\text{проб}}=4.7$ МГц. После 00:16 МСК обыкновенная компонента пробной волны перестала отражаться от ионосферы. В целом были выполнены условия эксперимента 2006 г., но F-рассеяния не наблюдалось. Рассеянные сигналы во время воздействия на ионосферу не были зарегистрированы. После 02:45 МСК нагревная волна перестала отражаться от ионосферы.

8 октября 2014 г.

Эксперимент проходил с 22:30 до 24:00 МСК (UTC+4). На нагрев работали три передатчика с излучаемой мощностью $P_1=170$ кВт, $P_2=150$ кВт и $P_3=150$ кВт на частоте $f_{\text{нагр}}=4.3$ МГц. Использовались диагностический передатчик пробных волн и частота пробных радиоволн такие же, как в сен-

тябре 2014 г. Рассеянные сигналы во время воздействия на ионосферу не были зарегистрированы.

18 мая 2016 г.

Эксперимент проходил с 18:25 до 20:00 МСК (UTC+3). Нагрев производился на частоте 5.750 МГц двумя передатчиками с $P_1=200$ кВт и $P_2=120$ кВт, частоту пробных волн изменяли с 5.600 до 5.900 МГц. К концу работы критическая частота F-слоя (х-компоненты) снизилась до 5.5 МГц, т. е. в этом эксперименте зондирование ионосферы с помощью установки частичных отражений проводилось временами на частоте ниже частоты нагрева. Рассеянные сигналы во время воздействия на ионосферу не были зарегистрированы.

24–25 сентября 2024 г.

Эксперимент проходил с 21:30 до 23:15 МСК (UTC+3) 24 сентября и 05:30 до 07:15 МСК (UTC+3) 25 сентября. Нагрев ионосферы непрерывно проводился двумя передатчиками стенд СУРА на частоте 5.227 МГц с излучаемой мощностью $P_1=220$ кВт и $P_2=200$ кВт. Пробные радиоволны на частоте 5.455 МГц, т. е. выше нагревной частоты на 228 кГц, излучались третьим передатчиком мощностью $P_3=170$ кВт с длительностью импульса 50 мкс и частотой повторения 50 Гц.

Для приема и регистрации всех отраженных и рассеянных ионосферой сигналов использовалась антenna система установки частичных отражений и приемный комплекс на основе 14-разрядной платы National Instruments. Полоса приема составляла 850 кГц.

2. ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ

Приведем основные результаты каждого цикла измерений.

2.1. Характеристики рассеянного сигнала 10–11 октября 2006 г.

Как упоминалось выше, во время воздействия на ионосферу необыкновенной волной появлялся слабый рассеянный сигнал на действующих высотах, в основном на 30–40 км ниже высоты зеркального отражения сигнала от F-области. Рассеянный сигнал наблюдался с 19:40 до 21:00 МСК 10 октября 2006 г. и с 20:45 до 21:57 МСК 11 октября 2006 г. Эффект был настолько выраженным, что появление и развитие рассеянного сигнала при нагреве ионосферы наблюдалось в реальном времени без дополнительной обработки. На рис. 1 в координатах действующая высота — время показан фрагмент регистрации в реальном времени амплитуды сигнала, появившегося при воздействии на ионосферу. Амплитуда рассеянного сигнала была на 40–50 дБ ниже амплитуды зеркального отражения пробной радиоволны от F-слоя ионосферы и быстро изменялась с высотой и во времени. Время развития сигнала составляло около 1 с, а время релаксации приблизительно доли секунды. Сигнал имел шумоподобный характер: временной интервал корреляции не превышал 0.2 с.

Выше 340–350 км видны диффузные зеркальные отражения пробной волны от F-области. На высоте

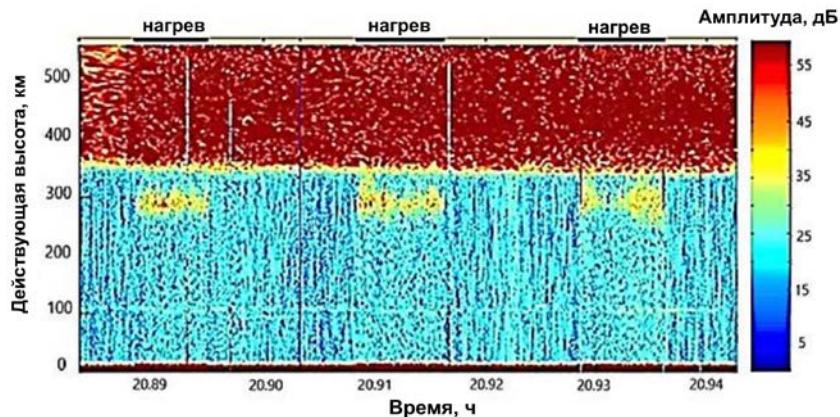


Рис. 1. Фрагмент регистрации в реальном времени амплитуды сигнала, появлявшегося при воздействии на ионосферу в трех сеансах нагрева. Отдельные белые или черные вертикальные линии означают неправильные сканы из-за сбоев в приемной аппаратуре. Интервалы нагрева показаны сверху темными полосами. Время дано в долях часа

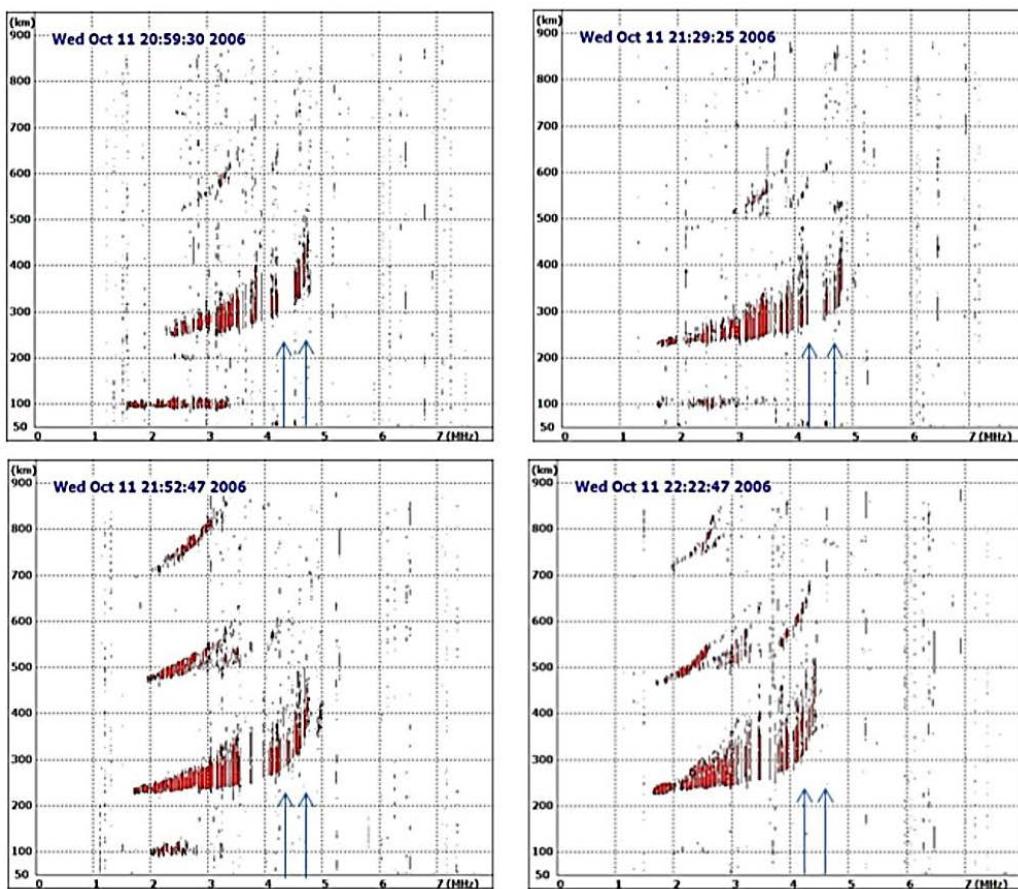


Рис. 2. Ионограммы, полученные с помощью ионозонда «Базис» 11.10.2006 в часы эксперимента. Время на ионограммах указано МСК (UTC+4). Стрелками обозначены частоты нагревной и пробной радиоволн. Видно, что в часы проведения эксперимента наблюдалось интенсивное F-рассеяние

~105 км наблюдается спорадический слой E (E_s) с критической частотой $f_o E_s = 2.5\text{--}3.1$ МГц. Соответствующие ионограммы, полученные ионозондом «Базис», приведены на рис. 2. В этих условиях радиоволна обычной поляризации частотой 4.3 МГц не отражалась от ионосферы.

На рис. 3 в тех же координатах приведены амплитуды рассеянного и зеркально отраженного сигналов для серии нагревов после 21:30 МСК. Выше 310 км отмечается диффузный зеркальный сигнал

на частоте пробной волны. На рис. 3 выше 270 км под высотой зеркального отражения пробной волны (~310–320 км) виден рассеянный сигнал частотой 4.7 МГц, развитие которого коррелирует с моментами включения нагрева. В середине пятого сеанса нагрева после 21.71 МСК (время дано в долях часа) падала мощность, излучаемая передатчиками нагревного стенда. Видно, что амплитуда рассеянного сигнала также заметно упала, что означает ее прямую зависимость от мощности нагрева. К концу седьмого сеанса

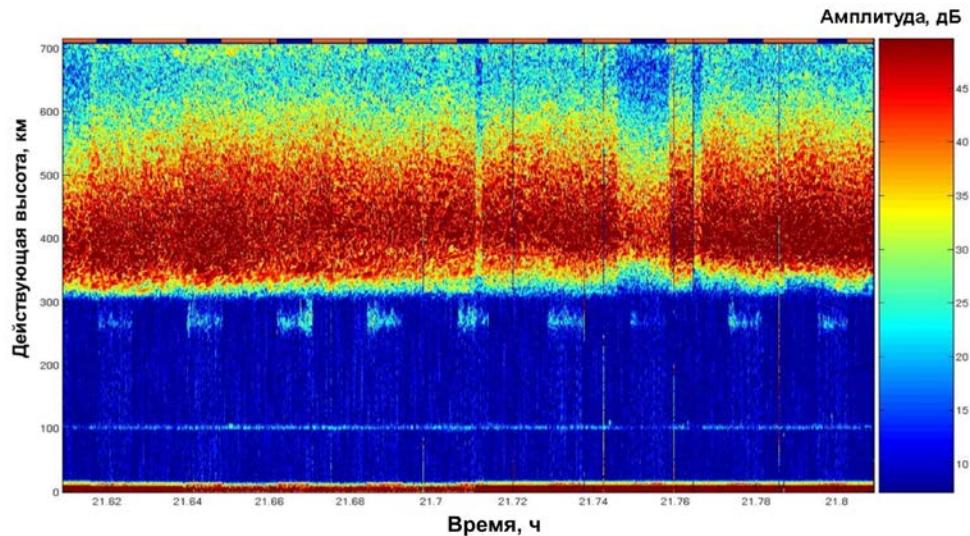


Рис. 3. Фрагмент регистрации в реальном времени амплитуды сигнала, появлявшегося при воздействии на ионосферу, для девяти сеансов нагрева после 21:30 МСК. Интервалы нагрева показаны сверху темными полосами

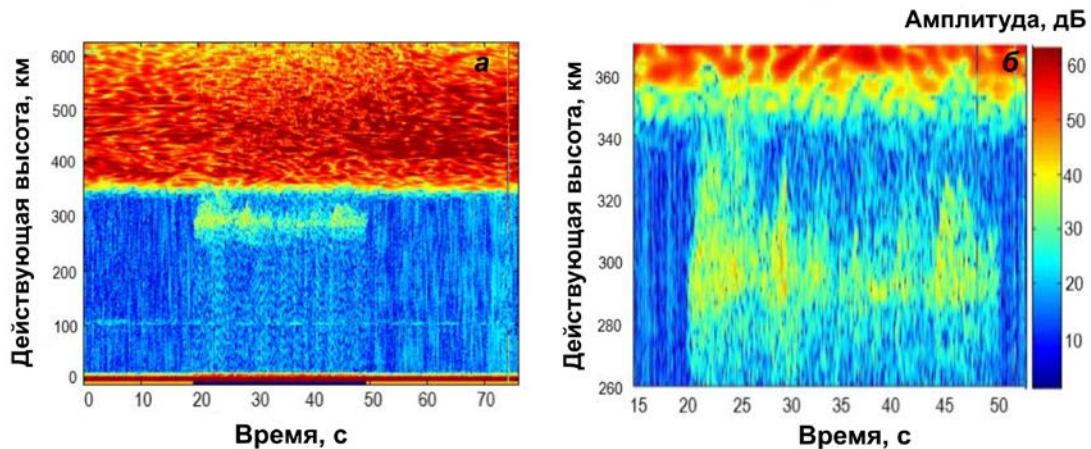


Рис. 4. Развитие рассеянного сигнала в сеансе нагрева с началом в 20:55:03 МСК: а — в интервале действующих высот 0–700 км; б — в более узком интервале высот 260–360 км

нагрева после 21.75 МСК было уменьшено напряжение на приеме (вручную включено ослабление на 20 дБ на приемной установке), что привело к уменьшению амплитуды принимаемого сигнала. Сporадический слой Е наблюдался на высоте 100–105 км все время измерений.

Из анализа высотных профилей электронной концентрации, восстановленных из ионограмм вертикального зондирования, следует, что пробная радиоволна частотой 4.7 МГц отражалась на высотах, близких к высоте отражения нагревной волны частотой 4.3 МГц. Напомним, что речь идет о необыкновенных компонентах нагревной и пробной радиоволн.

Во время нагрева изменялся характер диффузности F-слоя и, как следствие, отраженный от F-слоя ионосферы зеркальный сигнал приобретал более мелкую структуру по высоте и во времени. Это хорошо видно на рис. 4, на котором показано развитие рассеянного сигнала в сеансе с началом в 20:55:03 МСК (ч:мин:с). Из рис. 3 и 4 следует, что амплитуда рассеянного сигнала нерегулярно изменялась с высотой и во времени. В пределах каждого отдельного сеанса нагрева рас-

сейнныи сигналы занимали интервал действующих высот от 20 до 100 км. Видны квазипериодические изменения амплитуды с периодами 5–10 с.

Приемная часть установки частичных отражений была спроектирована таким образом, что обыкновенная и необыкновенные моды пробной волны могли приниматься переменно (через такт). Заметим, что рассеянный сигнал в обыкновенной компоненте не наблюдался. Иллюстрацией этому служит рис. 5, на котором показан результат попеременного (через такт) приема обеих компонент пробной волны в сеансе в 21:21:54 МСК.

Хорошо видно, что рассеянный сигнал появился во время нагрева только в необыкновенной компоненте пробной волны (рис. 5, а) и отсутствовал в обыкновенной (рис. 5, б). Поскольку в это время обыкновенная волна частотой 4.7 МГц не отражалась ионосферой (критическая частота F-слоя была ниже частоты пробной волны), то сигнал выше 320 км на рис. 5, б представляет собой сигнал пробной волны необыкновенной поляризации, ослабленный из-за недостаточной связки магнитоионных компонент в приемном тракте установки частичных отражений.

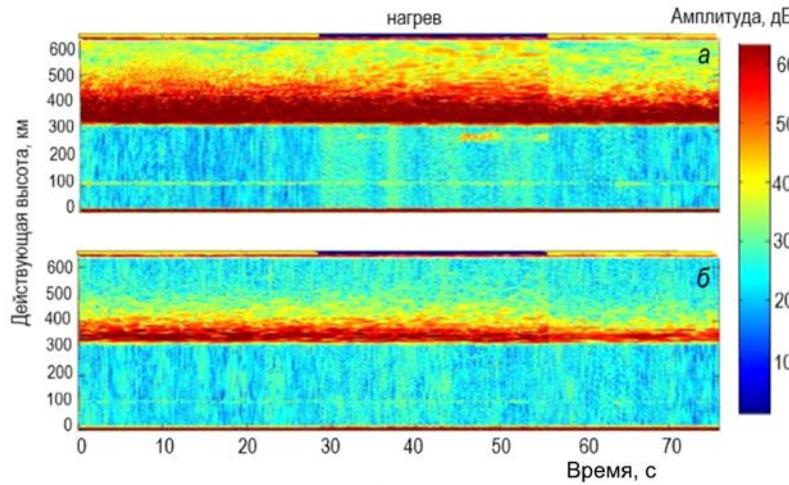


Рис. 5. Пример регистрации рассеянного сигнала необыкновенной (а) и обычновенной (б) поляризации пробной волны в сеансе в 21:21:54 МСК (ч:мин:с)

Заметим, что результаты эксперимента 10–11 октября 2006 г. в свое время не публиковались и не докладывались на конференциях. Перед авторами стояла задача повторить эксперимент, вновь получить наблюдавшийся эффект и выяснить причину появления рассеянного сигнала при нагреве ионосферы радиоволной необыкновенной поляризации и зондировании возмущенной области пробной радиоволной той же поляризации, но на частоте на несколько сотен килогерц выше частоты нагрева. Несколько таких экспериментов были проведены позднее, ниже приводятся их результаты. Насколько нам известно, подобные эксперименты до этого не проводились.

2.2. Результаты экспериментов 2014 г. и 2016 г.

1–2 сентября 2014 г. (вечер, ночь, утро)

После 0:16 МСК обыкновенная компонента пробной волны перестала отражаться от ионосферы и были выполнены условия эксперимента 2006 г., но F-рассеяния не наблюдалось. Рассеянные сигналы, подобные зарегистрированным в 2006 г., также не наблюдались. Вероятно, мощность излучения (работали два передатчика 150 и 160 кВт) оказалась недостаточной. После 02:45 МСК нагревная волна перестала отражаться от ионосферы.

8 октября 2014 г.

При казалось бы подходящих условиях эксперимента рассеянные сигналы при нагреве также не наблюдались. Нагрев производился тремя передатчиками с излучаемой мощностью 170, 150 и 150 кВт, наблюдалась естественная диффузность F-слоя без интенсивного F-рассеяния. На рис. 6 показана амплитуда зеркального отражения необыкновенной компоненты пробной волны на частоте 4.7 МГц. Волна обычновенной поляризации не отражалась ионосферой.

18 мая 2016 г.

На нагрев работали два передатчика с излучаемой мощностью $P_1=200$ кВт и $P_2=120$ кВт на частоте 5.750 МГц, пробные волны излучались в диапазоне

5.6–5.9 МГц. В начале наблюдений частота пробной волны была ниже частоты нагревной волны, затем была увеличена, и разность между ними составила 150 кГц. Был получен результат, подобный приведенному на рис. 6 для 8 октября 2014 г., т. е. рассеянные сигналы во время нагрева не наблюдались.

2.3. Характеристики рассеянного сигнала 24–25 сентября 2024 г.

Как отмечалось выше, в следующем эксперименте в сентябре 2024 г. прием ионосферных сигналов осуществлялся антенной системой установки частичных отражений, а пробный сигнал излучался одним из трех передатчиков нагревного стендса СУРА. Регистрация сигналов в цифровом виде проводилась с помощью 14-разрядной платы NI с шагом съема данных по высоте 150 м. Разность частот нагревной $f_{нагр}=5.227$ МГц и пробной $f_{проб}=5.455$ МГц радиоволн составила 228 кГц. Ввиду того, что полоса приемного устройства была шире, при последующей обработке проводилась фильтрация принимаемых сигналов фильтром Бесселя шестого порядка с полосой 40 кГц, что позволило практически полностью удалить из данных регистрации сигнал на частоте нагрева. Расписание работы было составлено таким образом, чтобы включить вечерние (ночные) часы в условиях диффузности F-слоя ионосферы и ранние утренние часы в условиях более регулярной ионосферы. На рис. 7 показаны фрагменты регистрации ионосферных сигналов при нагреве продолжительностью 30 с и паузе в работе нагревных передатчиков 60 с.

Пробные волны необыкновенной поляризации частотой 5.455 МГц отражались выше 350 км, наблюдалась диффузность F-слоя. Во время нагрева ниже высоты отражения пробной радиоволны появлялись рассеянные сигналы. Рассеянный сигнал был на 60–70 дБ слабее зеркального сигнала и занимал область 20–25 км по действующей высоте, непосредственно примыкая к высотам зеркального отражения сигнала (в отличие от эксперимента 2006 г.). Сигнал раз-

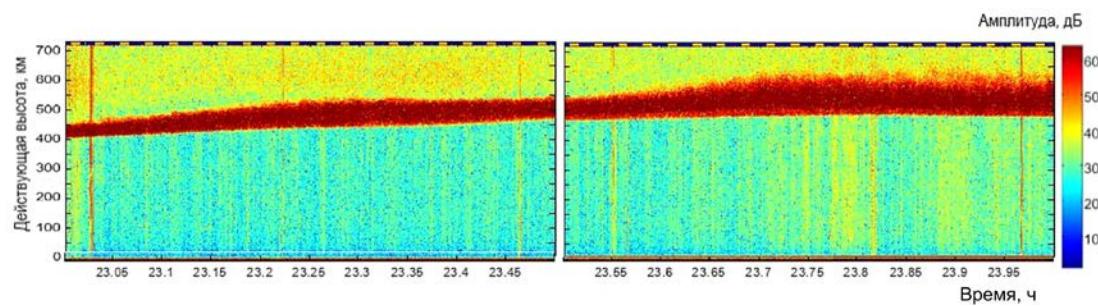


Рис. 6. Зеркальное отражение пробной волны от F-слоя 8 октября 2014 г., интервалы нагрева показаны на верхней оси светлыми полосами

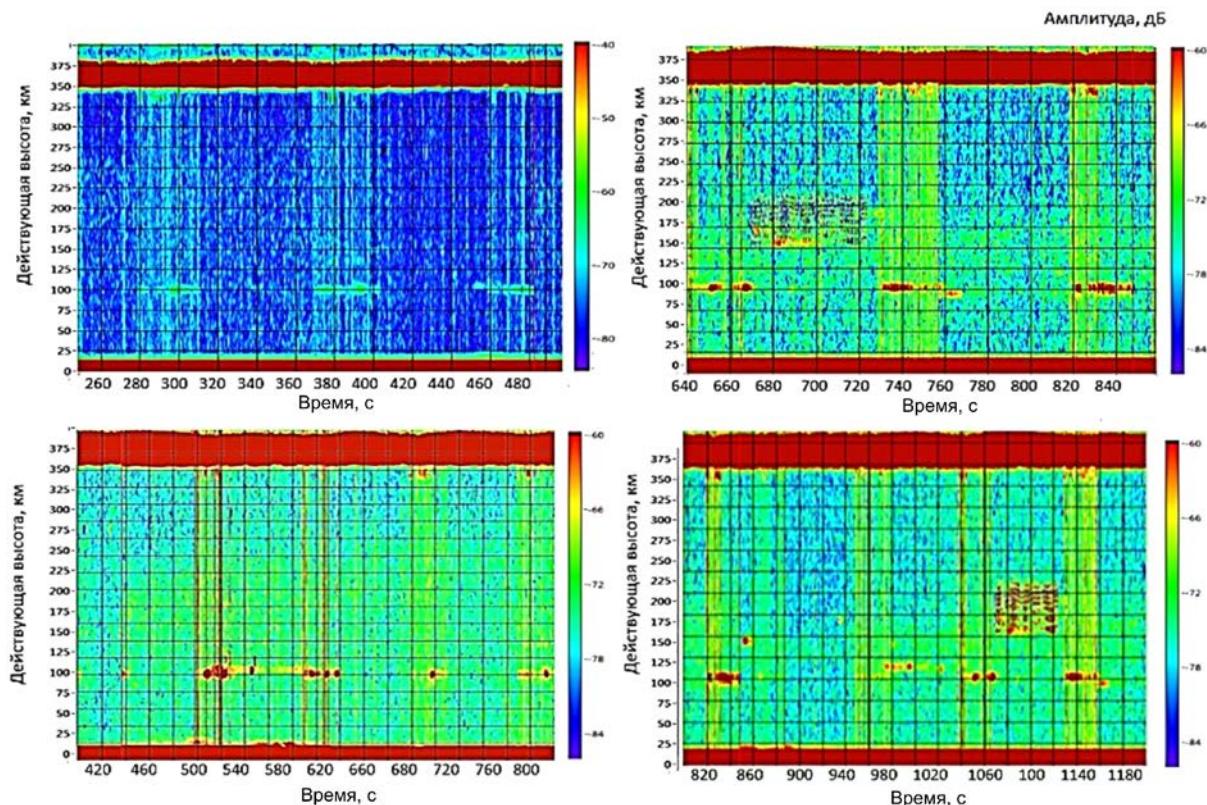


Рис. 7. Появление рассеянных сигналов ниже действующей высоты 350 км под высотой зеркального отражения пробной волны и сигналов E-области на высоте 100 км во время воздействия на ионосферу: вверху — в сеансе с началом в 21:45:50, внизу — в сеансе с началом в 21:15:50. Периоды нагрева хорошо идентифицируются по вертикальным полосам, которые означают не до конца отфильтрованный мощный сигнал на частоте нагрева

вивался за время около 1 с и пропадал за более короткое время, как и в 2006 г. Кроме того, во время нагрева появлялись (усиливались) сигналы с высот Е-области. На ионограммах в это время на высоте 100–105 км эпизодически наблюдался полупрозрачный спорадический слой Е с критической частотой 2.5–3.1 МГц. Одновременно с этим наблюдалось ослабление рассеянного сигнала в F-слое при росте амплитуды отраженного сигнала от E_s-слоя в сеансах нагрева ионосферы.

В утренние часы на восходе и после восхода Солнца в условиях быстрого роста критических частот, снижения высоты F-слоя, выраженной динамики ионосферы рассеянный сигнал на частоте пробной волны 5.455 МГц при воздействии на ионосферу необыкновенной волной частоты 5.227 МГц не наблюдался. На рис. 8 приведен фрагмент регистрации ионосферных сигналов в течение 12 мин

в сеансе с началом в 06:30:50. Показаны обе компоненты пробной волны. Видны множественные боковые отражения ниже действующей высоты 200 км, наклонные отражения около высоты 150 км и радиоотражения от следов метеоров вблизи высоты 100 км.

Таким образом, рассеянный сигнал на частоте, отличной от частоты нагрева на 228–400 кГц, наблюдался только в двух из пяти проведенных нами в разные годы экспериментов по воздействию на ионосферу мощной радиоволновой необыкновенной поляризации и зондированию возмущенной области пробными радиоволнами той же поляризации.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ высотных профилей электронной концентрации, полученных из ионограмм вертикального

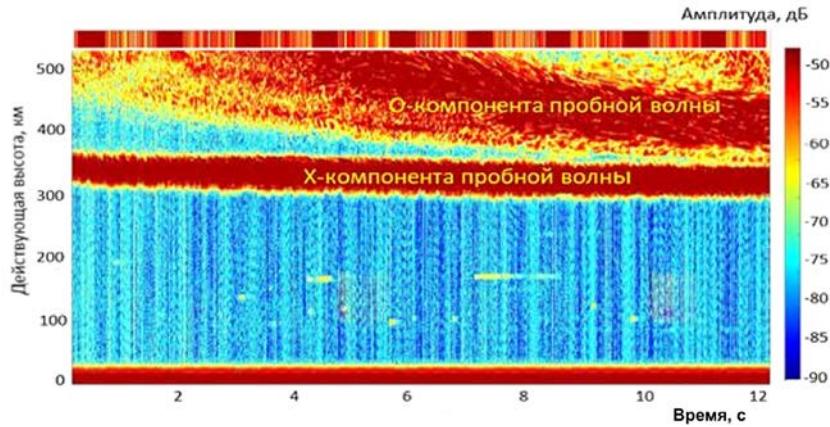


Рис. 8. Фрагмент регистрации ионосферных сигналов в течение 12 мин в сеансе с началом в 06:30:50. Интервалы нагрева длительностью 30 с показаны на верхней оси темно-красными полосами

зондирования 10–11 октября 2006 г., показал, что область появления рассеянных сигналов практически совпадала с уровнем отражения мощной волны на истинной высоте 223.4 км. Это означает, что искусственное возмущение плотности плазмы происходило в области отражения мощной радиоволны необыкновенной поляризации. Возможны два объяснения наблюдавшегося эффекта.

3.1. Гипотеза 1 — возбуждение плазменных волн и индуцированное рассеяние на ионах

Эксперимент 10–11 октября 2006 г. показал, что мощная радиоволна необыкновенной поляризации вызывает возмущение плотности плазмы в области ее отражения от ионосферы. Вопрос о природе возмущения в ионосфере при ее нагреве мощной радиоволной необыкновенной поляризации подробно рассмотрен в работе [Васьков, Рябова, 1997]. Это возмущение может создаваться как непосредственно электрическим полем радиоволны, так и полем возбуждаемых плазменных колебаний. В случае больших волновых векторов такие колебания могут распространяться ниже уровня отражения необыкновенной радиоволны близкой частоты и возбуждаться мощной радиоволной за счет развития различных неустойчивостей стрикционного типа. Причиной этого является возбуждение высокочастотных колебаний плазмы в результате индуцированного рассеяния необыкновенной радиоволны на ионах, для которого, как показано в работе [Васьков, Рябова, 1997], величина порогового поля оказывается сравнительно малой. Расчеты, сделанные на основе этой работы, показали, что в условиях экспериментов 10–11 октября 2006 г. при частоте нагревной волны необыкновенной поляризации $f_{\text{нагр}} = 4.3$ МГц и эффективной мощности ее излучения $\sim 100\text{--}120$ МВт можно было бы ожидать достаточно сильного возбуждения плазменных волн за время порядка 10^{-4} с. Однако эксперимент показал, что возбуждение плазменных волн полем необыкновенной радиоволны, если оно и происходило, то сильно подавлялось. Об этом свидетельствуют малая интенсивность рассеянного сигнала и его локализация вблизи уровня отражения

мощной волны от ионосферы, где ее электрическое поле возрастает вследствие фокусировки. В отсутствие (или при сильном подавлении) плазменных волн искусственные неоднородности должны создаваться непосредственно полем мощной радиоволны. Как следствие, амплитуда рассеянного сигнала должна возрастать прямо пропорционально интенсивности мощной волны. Эксперимент с поэтапным возрастанием мощности нагрева планировался, но не был осуществлен по техническим причинам.

3.2. Гипотеза 2 — рассеяние пробных радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы

Как известно, ИПН в поле мощной волны наиболее эффективно создаются необыкновенной радиоволной (Х-модой) [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002; Bakhmetieva, Grigoriev, 2022]. Они существуют во всей толще ионосферы — в D-, E-, F-областих и межслоевой E–F-впадине. Вблизи точки зеркального отражения в F-области усиление ИПН происходит за счет «разбухания» поля мощной волны и увеличения ее длины [Гинзбург, 1967]. В спокойных условиях ИПН повторяют структуру поля стоячей волны, описываемой функцией Эйри [Гинзбург, 1967], и рассеивают только пробные радиоволны той же поляризации, что и нагревная волна, если частоты нагревной и пробной радиоволн совпадают, т. е. выполняется условие пространственного синхронизма [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002]. Полоса синхронизма по частоте определена нами в эксперименте 16 июля 2006 г. [Бахметьева, Беликович, 2007, 2008], задачей которого было исследование влияния на ИПН E_s-слоя. Для определения частотной полосы синхронизма при локации ИПН для приема рассеянных сигналов последовательно выбирались частоты, отстоящие от нагревной частоты 4.785 МГц на 30, 35 и 20 кГц, до частоты 4.700 МГц. Оказалось, что при последовательной отстройке от частоты создания ИПН амплитуды сигналов, рассеянных периодическими неоднородностями, уменьшались, а при отстройке на 85 кГц (частота сигнала на приеме 4.700 МГц) сигналы

от ИПН пропадали совсем, регистрировались только зеркальные отражения от F-слоя, E-области и E_s-слоя. Экспериментально определенная нами частотная полоса синхронизма [Бахметьева, Беликович, 2007, 2008] в этих условиях не превышала 85 кГц (полное пропадание рассеянного сигнала от ИПН) при длительности зондирующего импульса 30 мкс и полосе приемника 40 кГц.

В соответствии с найденной частотной полосой синхронизма в спокойных условиях при разнице частот нагревной и пробной радиоволн 228–400 кГц рассеянный ИПН сигнал не должен был наблюдаваться. Однако во время эксперимента 10–11 октября 2006 г. наблюдалось сильное F-рассеяние, очевидно вызванное естественной возмущенностью ионосферы (естественными неоднородностями плазмы). Эта возмущенность должна была искажать упорядоченную структуру квазипериодических неоднородностей и приводить к уширению углового и частотного спектра сигнала, рассеянного ИПН. Вероятно, это и явилось причиной появления рассеянного сигнала во время нагрева в некоторой области высот вблизи высоты отражения мощной волны более низкой частоты. Авторы полагали, что проверкой этой гипотезы могло быть проведение подобного эксперимента в спокойных условиях и при наличии F-рассеяния, что в определенной степени являлось задачей эксперимента 24–25 октября 2024 г. Эксперимент подтвердил, что рассеянный сигнал во время нагрева наблюдался в вечерние часы в условиях диффузности F-слоя и не наблюдался в ранние утренние часы в условиях быстрого роста критических частот, снижения высоты F-слоя и ярко выраженной динамики ионосферы.

Чем могла быть вызвана естественная возмущенность F-слоя? Известно, что в F-слое существуют потоки плазмы, направленные днем вверх, ночью вниз из магнитосферы или сопряженного полуширота [Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Если считать, что F-рассеяние создается подобными потоками со скоростями 20 м/с и более, то периодическая структура (ИПН), которая образуется в такой движущейся среде, будет искажена и сдвинута вечером по высоте вниз. Тогда появится градиент скорости по высоте и периодическая структура будет сжиматься, а условие синхронизма будет выполняться на более высокой частоте в результате уменьшения периода ИПН по высоте [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002]. Можно предположить, что в таком случае в условиях сильной естественной возмущенности частотная полоса синхронизма может превышать найденные ранее 85 кГц и ИПН будут рассеивать пробные сигналы в более широкой полосе частот.

На ионограммах E-область в это время отсутствовала, эпизодически наблюдался полупрозрачный E_s-слой с критической частотой $f_0E_s=2.5\text{--}3.1$ МГц на высоте 100–105 км. Как отмечалось выше, в сеансах нагрева ионосферы при росте амплитуды сигнала, отраженного на высоте 100 км, как правило, рассеянный сигнал в F-слое ослабевал, что хорошо видно на рис. 7. Это можно объяснить ростом коэффициента отражения пробной волны от E-слоя вследствие роста в нем электронной концентрации при нагреве. В работах [Гершман, Игнатьев, 1997; Иг-

натьев, 1975] подробно рассмотрен вопрос о возмущении E-области ионосферы, включая E_s-слой, при воздействии на нее мощным радиоизлучением. При нагреве ионосферы в E-области с ростом температуры электронов уменьшается эффективный коэффициент рекомбинации [Гуревич, Шварцбург, 1973], вследствие чего электронная концентрация под действием мощного радиоизлучения возрастает. В результате возрастает коэффициент отражения мощной волны в нижней ионосфере, что приводит к уменьшению мощности воздействия на F-слой и, соответственно, к уменьшению интенсивности рассеяния пробной волны в F-слое. Такое же влияние оказывает полупрозрачный E_s-слой в случае, если он образован перераспределением атмосферных ионов NO⁺ и O₂⁺, а не ионов металлов, вероятность чего не исключена в вечерние иочные часы [Гершман, Игнатьев, 1997; Игнатьев, 1975]. Заметим также, что вочные часы электронная концентрация в E-области заметно уменьшается, но не пропадает полностью [Данилов, Власов, 1973; Брюнелли, Намгаладзе, 1988]. Исследования ионосферы в заходно-восходные часы, проведенные нами методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН в разные годы, показали, что достаточная ионизация в E-области может существовать всю ночь [Belikovich et al., 2002; Бахметьева и др., 2005, 2024]. В том числе измерения, выполненные методом ИПН 23–24 сентября 2024 г., показали, что по крайней мере до 23 ч МСК, т. е. уже после захода Солнца в ионосфере, сигналы, рассеянные ИПН, надежно регистрировались в интервале высот 90–130 км. Отметим, что метод, основанный на резонансном рассеяния радиоволн на ИПН, позволяет обнаруживать ионосферные регулярные и спорадические слои с низкой ионизацией, недоступные для обнаружения с помощью ионозондов [Беликович и др., 1999; Belikovich et al., 2002; Бахметьева, Беликович, 2007, 2008].

4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЛАНИРОВАНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Проанализировав условия проведения и результаты экспериментов в разные годы, мы сделали следующие выводы по оптимальной организации подобного эксперимента по воздействию на ионосферу излучением в зенит мощной радиоволны необыкновенной поляризации на нагревном стенде СУРА.

Эксперименты показали, что требуется стабильная, желательно максимальная мощность нагрева. К сожалению, возможности стенда СУРА в этом отношении ограничены. Мощность диагностического передатчика не так важна, об этом можно судить по результатам экспериментов 2006 и 2024 гг., когда при использовании в качестве источника пробных волн маломощного передатчика установки частичных отражений отчетливый рассеянный сигнал регистрировался в реальном времени. Таким образом, выраженность эффекта рассеяния в значительной степени зависит от мощности нагрева и в гораздо меньшей степени от мощности диагностического передатчика.

Оптимальной является ситуация, когда частота нагрева выше критической частоты F2-слоя для обыкновенной компоненты и ниже критической частоты F2-слоя для необыкновенной, в этом случае только мощная волна необыкновенной поляризации отражается ионосферой. Разность частот нагревной и пробной волн 228–400 кГц, на наш взгляд, была велика, вероятно, она должна быть меньше. В то же время желательна узкая полоса приема пробного сигнала, чтобы отстроиться от частоты нагрева. И, наконец, следует принимать во внимание сильную зависимость результата от состояния ионосферы: в наших условиях более выраженный эффект наблюдался при сильном F-рассеянии или диффузности ионосферы и не наблюдался в их отсутствие.

В отличие от экспериментов по воздействию на ионосферу, выполненных на нагревном стенде EISCAT [Благовещенская, 2010; Blagoveshchenskaya, 2020; Борисова и др., 2023], в экспериментах с 2006 по 2024 г. на стенде СУРА эффекты возмущения ионосферы мощной радиоволной необыкновенной поляризации при ее локации пробными радиоволнами той же поляризации, но другой частоты, наблюдались нерегулярно и были довольно слабыми. Очевидно, решающее значение имела мощность нагревной волны. На стенде СУРА недостижима мощность излучения, сопоставимая с мощностью излучения высоколатитурного стенда EISCAT. Кроме того, мощная радиоволна излучалась в зенит, а не в направлении магнитного зенита, что, вероятно, могло бы усилить наблюдавшийся эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При воздействии на ионосферу мощной радиоволной необыкновенной поляризации и зондировании возмущенной ионосферы пробными радиоволнами той же поляризации на частоте, близкой к нагревной, но с разницей 228–400 кГц, на действующих высотах ниже высоты зеркального отражения пробной волны появлялся рассеянный сигнал. В октябре 2006 г. амплитуда рассеянного сигнала была на 40–50 дБ ниже амплитуды зеркально отраженного сигнала, он занимал диапазон действующих высот на 30–40 км ниже высоты сигнала, зеркально отраженного от F-слоя. Время развития рассеянного сигнала составляло около 1 с, а время релаксации — на порядок меньше. Сигнал имел шумоподобный характер, его амплитуда быстро изменялась с высотой и во времени. Эффект наблюдался в вечерние часы в условиях сильной диффузности F-слоя (явление F-рассеяния). В сентябре 2024 г. в поздние вечерние часы рассеянный сигнал с амплитудой на 50–60 ниже амплитуды сигнала, зеркально отраженного от F-слоя, появлялся непосредственно под ним и занимал диапазон действующих высот 15–25 км. Во время сеансов нагрева длительностью 30 с в течение 1 с и менее появлялся (усиливался) сигнал от E-области или спорадического слоя Е. При появлении рассеянного сигнала в E-области рассеянный сигнал в F-слое, как правило, ослабевал.

Анализ высотных профилей электронной концентрации показал, что пробная волна необыкновен-

ной поляризации с частотой выше частоты нагревной волны на 228–400 кГц той же поляризации отражалась практически на высоте отражения последней и рассеянный сигнал появлялся вблизи этой высоты. Это означает, что мощная радиоволна необыкновенной поляризации вызывала возмущение плотности плазмы в области ее отражения от ионосферы. В утренние часы после восхода Солнца в условиях быстрого роста критических частот ионосферы подобный рассеянный сигнал при воздействии на ионосферу не наблюдался.

Предложены два объяснения наблюдавшегося явления. На данный момент предпочтительным кажется предположение о рассеянии пробных радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы, возникающих в поле мощной радиоволны. Рассеяние радиоволн на ИПН в случае, когда поляризация нагревной и пробной радиоволн совпадают, а рассеянный сигнал появляется на частоте, отличной от нагревной, может быть обусловлено изменением условий синхронизма и расширением полосы наблюдаемых частот при рассеянии на ИПН в условиях интенсивного F-рассеяния. Подтверждением этому служит отсутствие рассеянного сигнала утром после восхода Солнца в условиях более регулярной ионосферы. Тем не менее приходится констатировать, что проведенные эксперименты убедительно это показали, что вопрос о механизмах образования неоднородностей плазмы в поле мощной радиоволны необыкновенной поляризации в теоретическом плане остается открытым.

Авторы работы с благодарностью вспоминают безвременно ушедших в 2009 г. Беликовича Витольда Витальевича и Васькова Виктора Викторовича, совместно с которыми в 2006 г. были начаты эксперименты, результаты которых представлены в данной работе.

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках гранта № 25-27-00031.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бахметьева Н.В., Беликович В.В. Воздействие на ионосферу Земли мощным коротковолновым радиоизлучением: искусственные периодические неоднородности и спорадический слой Е. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007, т. 50, № 8, с. 695–708.
- Бахметьева Н.В., Беликович В.В. Результаты исследований спорадического слоя Е методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2008, т. 51, № 11, с. 956–969.
- Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Каган Л.М., Понятов А.А. Заходно-восходные характеристики спорадических слоев ионизации в нижней ионосфере, наблюдаемые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2005, т. 48, № 1, с. 16–32.
- Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н. и др. Особенности нижней ионосферы Земли во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы по измерениям методом ИПН вблизи Нижнего Новгорода. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 129–145. DOI: [10.12737/szf-103202414](https://doi.org/10.12737/szf-103202414) / Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Zhemyakov I.N., et al. Features of Earth's lower ionosphere during

- solar eclipse and sunset and sunrise hours according to measurements by the API method near Nizhny Novgorod. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3, pp. 121–136. DOI: [10.12737/stp-103202414](https://doi.org/10.12737/stp-103202414).
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др. О рассеянии радиоволн от искусственно возмущенной F-области ионосферы. *Письма в ЖЭТФ*, 1975, т. 22, вып. 10, с. 497–499.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. *Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей*. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999, 155 с.
- Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. и др. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений на средних широтах и в авроральной зоне. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003, т. 46, № 3, с. 181–191.
- Беликович В.В., Грач С.М., Карапшин А.Н. и др. Стенд «Сура»: исследования атмосферы и космического пространства. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2007, т. 50, № 7, с. 545–576.
- Благовещенская Н.Ф. *Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве*. СПб.: Гидрометеоиздат, 2001, 287 с.
- Благовещенская Н.Ф. Комплексные исследования эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн высоколатитную ионосферу: итоги и перспективы. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010, т. 84, № 1, с. 81–98.
- Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С. и др. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн обыкновенной (O-мода) и необыкновенной (X-мода) поляризации на высоколатитную F-область ионосферы. *Космические исследования*. 2018, т. 56, № 1, с. 14–29. DOI: [10.7868/S002342061801003X](https://doi.org/10.7868/S002342061801003X).
- Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Особенности искусственной ионосферной турбулентности, вызванной высокочастотным нагревом O- и X-мод вблизи критической частоты слоя F2. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 1, с. 22–32. DOI: [10.12737/szf-91202303](https://doi.org/10.12737/szf-91202303) / Borisova T.D., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S. Features of artificial ionosphere turbulence induced by the O- and X-mode HF heating near the F2-layer critical frequency. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 1, pp. 21–30. DOI: [10.12737/stp-91202303](https://doi.org/10.12737/stp-91202303).
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988, 527 с.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Параметрическое возбуждение ленгмюровских колебаний в ионосфере в поле сильных радиоволн. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1973, т. 16, № 2, с. 188–198.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Нелинейная резонансная неустойчивость в поле обыкновенной электромагнитной волны. *ЖЭТФ*. 1975а, т. 69, № 1, с. 176–178.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Расслоение плазмы в области отражения мощных радиоволн в ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975б, т. 18, № 9, с. 1261–1272.
- Васьков В.В., Гуревич А.В. Самофокусировочная и резонансная неустойчивости в F-области ионосферы. *Тепловые нелинейные явления в плазме*. Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81–138.
- Васьков В.В., Рябова Н.А. Возбуждение коротковолновых колебаний ионосферной плазмы полем мощной радиоволны необыкновенной поляризации в результате индуцированного рассеяния на ионах. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1997, т. 40, № 5, с. 541–559.
- Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А. Теория образования спорадического слоя Е и возникновения в нем неоднородностей. *Ионосферные исследования*. 1997, № 50, с. 7–28.
- Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. М.: Наука, 1967, 683 с.
- Гинзбург В.Л., Гуревич А.В. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле. УФН. 1960, т. 70, с. 201–246. DOI: [10.3367/UFNr.0070.196002a.0201](https://doi.org/10.3367/UFNr.0070.196002a.0201).
- Грач С.М., Сергеев Е.Н., Мишин Е.В., Шиндин А.В. Динамические характеристики плазменной турбулентности ионосферы, инициированные воздействием мощного коротковолнового радиоизлучения. УФН. 2016, т. 186, № 11, с. 1189–1228. DOI: [10.3367/UFNr.2016/07/037868](https://doi.org/10.3367/UFNr.2016/07/037868).
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. УФН. 2007, т. 177, № 11, с. 1145–1177. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200711a.1145](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200711a.1145).
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*. М.: Наука, 1973, 272 с.
- Данилов А.Д., Власов М.Н. *Фотохимия ионизованных и возбужденных частиц в нижней ионосфере*. Л.: Гидрометеоиздат, 1973, 190 с.
- Игнатьев Ю.А. Влияние на спорадический слой Е нагрева ионосферы мощным радиоизлучением. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1975, т. 18, № 9, с. 1365–1369.
- Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. *Итоги науки и техники. Серия “Геомагнетизм и высокие слои атмосферы”*. М.: ВИНИТИ, 1989, Т. 9, 138 с.
- Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований. *Солнечно-земная физика*. 2015, т. 1, № 2, с. 22–48. DOI: [10.12737/10383](https://doi.org/10.12737/10383) / Frolov V.L. Spatial structure of plasma density perturbations, induced in the ionosphere modified by powerful HF radio waves: review of experimental results. *Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 1, iss. 2, pp. 22–48. DOI: [10.12737/10383](https://doi.org/10.12737/10383).
- Фролов В.Л. *Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы*. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского университета, 2017, 468 с.
- Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением. УФН. 2007, т. 177, № 3, с. 330–340. DOI: [10.3367/UFNr.0177.200703j.0330](https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200703j.0330).
- Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. и др. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей при воздействии на среднеширотную ионосферу Земли мощными КВ-радиоволнами с необыкновенной поляризацией. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2014, т. 57, № 6, с. 437–463.
- Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. Study of the mesosphere and lower thermosphere by the method of creating artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma. *Atmosphere*. 2022, vol. 1, iss. 9, p. 1346. DOI: [10.3390/atmos13091346](https://doi.org/10.3390/atmos13091346).
- Belikovich V.V., Benediktov E.A., Tolmacheva A.V. Bakhmet'eva N.V. *Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities*. Katlenburg-Lindau: Copernicus GmbH, 2002, 160 p.
- Blagoveshchenskaya N.F. Perturbing the high-latitude upper ionosphere (F region) with powerful HF radio waves: A 25-year collaboration with EISCAT. *URSI Radio Science Bulletin*. 2020, vol. 373, pp. 40–55. DOI: [10.23919/URSIRSB.2020.9318436](https://doi.org/10.23919/URSIRSB.2020.9318436).
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Characterization of artificial, small-scale, ionospheric irregularities in the high-latitude F region induced by high-power, high-frequency radio waves of extraordinary polarization. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019, vol. 59, no. 6, pp. 759–773. DOI: [10.1134/s0016793219060045](https://doi.org/10.1134/s0016793219060045).
- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Distinctive features of Langmuir and ion-acoustic turbulences induced by O- and X-mode HF pumping at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020, vol. 125, no. 7, e2020JA028203. DOI: [10.1029/2020JA028203](https://doi.org/10.1029/2020JA028203).

- Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., et al. Disturbances of electron density in the high latitude upper (F-region) ionosphere induced by X-mode HF pump waves from EISCAT UHF radar observations. *Arctic and Antarctic Research*. 2022, vol. 68, no. 3, pp. 248–257. DOI: [10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257).
- Gurevich A.V. Modern problems of ionospheric modification. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1999, vol. 42, no. 7, pp. 599–606. DOI: [10.1007/BF02677558](https://doi.org/10.1007/BF02677558).
- Gurevich A.V., Zybin K.P., Carlson H.C., Pedersen T. Magnetic zenith effect in ionospheric modifications. *Phys. Lett. A*. 2002, vol. 305, no. 5, pp. 264–274. DOI: [10.1016/S0375-9601\(02\)01450-0](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(02)01450-0).
- Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K. Ion gyro-harmonic structures in stimulated emission excited by X-mode high power HF radio waves at EISCAT. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021, vol. 126, no. 8, e2020JA028989. DOI: [10.1029/2020JA028989](https://doi.org/10.1029/2020JA028989).
- Kelley M. C. *The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics*. Academic Press is an imprint of Elsevier, 2009, 556 p.
- Kuo S. Linear and Nonlinear Plasma Processes in Ionospheric HF Heating. *Plasma*. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 108–144. DOI: [10.3390/plasma4010008](https://doi.org/10.3390/plasma4010008).
- Leyser T.B. Stimulated electromagnetic emissions by high-frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma. *Space Sci. Rev.* 2001, vol. 98, no. 3-4, pp. 223–328. DOI: [10.1023/A:1013875603938](https://doi.org/10.1023/A:1013875603938).
- Pedersen T.R., McCarrick M., Selcher E., et al. Magnetic zenith enhancement of HF radio-induced airglow production at HAARP. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, no. 4, 1169. DOI: [10.1029/2002GL016096](https://doi.org/10.1029/2002GL016096).
- Rietveld M.T., Kohl H., Kopka H., Stubbe P. Introduction to ionospheric heating at Tromsø. I. Experimental overview. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993, vol. 55, no. 4/5, pp. 577–599. DOI: [10.1016/0021-9169\(93\)90007-L](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90007-L).
- Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 9, pp. 1533–1546. DOI: [10.1002/2016RS006093](https://doi.org/10.1002/2016RS006093).
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., et al. Past, present and future of active radio frequency experiments in space. *Space Sci. Rev.* 2018, vol. 214, article number 118. DOI: [10.1007/s11214-018-0549-7](https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7).
- Stubbe P., Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory. *Surveys in Geophysics*. 1997, vol. 18, no. 1, pp. 57–127. DOI: [10.1023/A:1006583101811](https://doi.org/10.1023/A:1006583101811).
- Utlaut W.F., Cohen R. Modifying the Ionosphere with Intense Radio Waves. *Science*. 1971, vol. 245, pp. 245–254. DOI: [10.1126/science.174.4006.245](https://doi.org/10.1126/science.174.4006.245).
- Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Россия.*
- Как цитировать эту статью:*
Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А. Отклик ионосферы на воздействие на нее необыкновенной радиоволновой при зондировании возмущенной области на частоте, близкой к нагревной. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 88–99. DOI: [10.12737/szf-113202510](https://doi.org/10.12737/szf-113202510).

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ОТКЛИК НА ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ИОНОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННОГО ВОЗМУЩЕННЫМ СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ

METEOROLOGICAL RESPONSE TO CHANGES

IN IONOSPHERIC ELECTRIC POTENTIAL CAUSED BY DISTURBED SOLAR WIND

А.А. Караканян

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, asha@iszf.irk.ru

С.И. Молодых

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, sim@iszf.irk.ru

А.А. Karakhanyan

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, asha@iszf.irk.ru

С.И. Molodykh

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, sim@iszf.irk.ru

Аннотация. Электрический потенциал (ЭП) ионосферы используется в качестве характеристики солнечного воздействия для определения тропосферного отклика во время мощных возмущений. Проведено сопоставление расчетов ЭП, выполненных по версиям 2001 и 2005 г. модели Веймера. Выявлены различия в пространственном распределении ЭП во время мощных геомагнитных бурь в рассмотренных моделях. Представлено поведение аномалий ЭП и контраста ЭП, усредненных для высоколатитудной области. Контраст ЭП представляет собой разность аномалий ЭП, усредненных по областям одного знака. Обнаружено, что изменения аномалий ЭП различаются в разных версиях модели, тогда как вариации контраста ЭП, рассчитанные по разным версиям, ведут себя синхронно во время возмущений. Корреляционный анализ изменений усредненного контраста ЭП с вариациями геомагнитного индекса PC показал, что обе характеристики можно использовать в качестве индикатора солнечной активности для изучения изолированных мощных магнитных бурь. Во время возмущений увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности.

Ключевые слова: электрический потенциал ионосферы, мощная геомагнитная буря, геомагнитный индекс, уходящая длинноволновая радиация, облачность, водяной пар, климат.

Abstract. The ionospheric electric potential (EP) is utilized as a characteristic of the solar forcing to determine the tropospheric response during strong disturbances. We compare EP calculations carried out using the 2001 and 2005 versions of the Weimer model. Differences in the spatial distribution of EP during geomagnetic superstorms have been revealed for the models considered. The behavior of EP anomalies and contrast averaged over high latitudes is shown. The EP contrast is the difference between EP anomalies averaged over regions of the same sign. It has been found that changes in EP anomalies differ in different versions of the model, whereas EP contrast variations, calculated by both versions, behave synchronously during disturbances. Correlation analysis of variations in the averaged EP contrast with variations in the PC geomagnetic index has shown that both can be used as indicators of solar activity to study individual geomagnetic superstorms. An increase in the EP contrast is accompanied by an increase in the contrast of the meteorological parameters, in particular in the contrast of high clouds during disturbances.

Keywords: ionospheric electric potential, geomagnetic superstorm, geomagnetic index, outgoing longwave radiation, cloud, water vapor, climate.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая волна потепления климата за инструментальный период наблюдений, начавшаяся в 1970-х гг. и усилившаяся в 1990-х гг., в настоящее время проявляется в резком увеличении количества опасных явлений на планете [Мохов, 2023; <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>]. Одной из возможных причин происходящих климатических изменений является воздействие солнечной активности на атмосферу Земли. Отсутствие прямого механизма влияния солнечной активности на нижнюю атмосферу привело к поиску опосредованного механизма воздействия солнечных

процессов на приходящую часть радиационного баланса. Источниками солнечного влияния являются: коротковолновое и УФ-излучение и корпускулярные потоки (ГКЛ, солнечные протонные выбросы, высокoenергичные частицы). Вследствие их воздействия меняются состояние озонового слоя и глобальной электрической цепи, а также стратотропосферная циркуляция и микрофизика облаков [Mironova et al., 2015; Криволуцкий и др., 2017; Harrison, Lockwood, 2020; Veretenenko et al., 2023a]. Физическая модель, разрабатываемая в ИСЗФ СО РАН, описывает электромагнитное взаимодействие между компонентами системы магнитосфера—ионосфера—тропосфера. В отличие

от модели Тинсли [Tinsley, 2008], в данной модели изменение оптических свойств водяного пара в ИК-диапазоне, а именно изменение поглощения излучения димерами воды в линиях и континууме водяного пара, приводит к увеличению парникового эффекта, что вызывает динамические изменения в тропосфере. Поскольку водяной пар распределен в пространстве неоднородно, наблюдается неоднородный тропосферный отклик, в том числе в виде образования или перераспределения по высоте облачности, которая уменьшает уходящую длинноволновую радиацию (УДР), тем самым меняя радиационный баланс тропосферы [Молодых и др., 2020].

Подробнее остановимся на описании процесса поглощения водяным паром излучения в ИК-диапазоне. Известно, что инфракрасный спектр поглощения водяного пара состоит из отдельных спектральных линий и расположенных между ними «окон прозрачности» атмосферы. В этих окнах поглощение является слабоселективным, или континуальным, а спектр поглощения представляет собой континуум водяного пара. Поглощение димерами (комплексами из двух молекул) воды является доминирующим фактором в поглощении собственного континуума, т. е. в поглощении водяного пара в чистой атмосфере.

С момента обнаружения континуального поглощения излучения водяным паром проведено большое количество его исследований, в основном в окнах прозрачности ближнего ИК- и видимого диапазонов. Экспериментально установлено, что континуальное поглощение в окне прозрачности 8–12 мкм пропорционально квадрату парциального давления водяного пара и экспоненциально уменьшается с ростом температуры [Пташник, 2015].

Особенности континуума позволяют спектрально различить его на фоне более сильной интенсивности линий поглощения воды, вследствие чего получило развитие восстановление континуума в микроокнах прозрачности между полосами поглощения водяного пара. Механизм, основанный на поглощении излучения димером воды, хорошо объясняет основные температурные и спектральные зависимости континуума водяного пара в полосах поглощения. Свойства димеров воды (энергия диссоциации и время жизни) позволяют их разделить на стабильные, или с-димеры, и метастабильные, или м-димеры, имеющие разные спектральные характеристики. Поглощение стабильных или метастабильных димеров преобладает в континууме поглощения воды в зависимости от термодинамических условий: с-димеры распространены при более низких температурах, а м-димеры — при более высоких температурах. Температура перехода в ту или иную сторону зависит от межмолекулярного потенциала и различна для разных молекулярных пар, например, для димеров воды близка к комнатной температуре. Следовательно, доля стабильных и метастабильных димеров в водяном паре примерно одинакова для атмосферных условий. Модельные расчеты показали, что полуэмпирическая модель поглощения димера воды лучше воспроизводит экспериментальный внутриволновой собственный континуум в ближнем ИК-диапазоне. Благодаря своей спектральной протяженности (окно

прозрачности в среднем ИК-диапазоне и вклад спектральных участков линий поглощения воды), континуальное поглощение водяного пара может приводить к уменьшению УДР, тем самым оказывая влияние на радиационный баланс климатической системы [Simonova et al., 2022]. Исходя из вышеизложенных представлений, мы провели в данной работе анализ связи вариаций электрического потенциала (ЭП) ионосферы с метеопараметрами (УДР, поглощение излучения водяным паром в окне прозрачности 8–12 мкм, верхняя облачность) для возмущенных условий в межпланетном пространстве.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Наблюдаемые климатические изменения, особенно в высоких широтах, требуют более детального изучения влияния физических процессов, происходящих в околосземном космическом пространстве, на состояние нижней атмосферы. Это необходимо для их параметризации с целью включения в численные модели климата. Индекс геомагнитной активности *PC*, описывающий возмущенность магнитного поля Земли в полярной шапке [Troshichev et al., 1988; <https://pcindex.org/>], ранее использовался нами в качестве proxy солнечной активности для изучения солнечно-тропосферных связей. Данный геомагнитный индекс отражает предполагаемые физические процессы, но при их параметризации возникают следующие недостатки: 1) интегральная характеристика солнечной активности на границе магнитосферы; 2) необходимость включения модели магнитосферы; 3) интегральная характеристика солнечной активности в области ионосферы. Перечисленные недостатки усложняют использование *PC*-индекса из-за неоднородности в пространстве тропосферного отклика на солнечное воздействие. В связи с этим мы выбрали ЭП в качестве оптимальной характеристики солнечного воздействия на тропосферу. Данный гелиоаэрофизический параметр описывает предполагаемые физические процессы, а применение модели Веймера для его расчета позволяет параметризовать процессы в магнитосфере и получить пространственное распределение ЭП в области ионосферы.

Несколько слов о модели Веймера, которая используется нами для расчета ЭП. Ранее в наших исследованиях применялась версия 2001 г., в данной работе расчеты выполнялись на основе последней версии модели, т. е. версии 2005 г. [Weimer, 2001, 2005]. Остановимся на основных изменениях, внесенных в модель для ее улучшения:

1. Более точные значения поля и более точное местоположение низкоширотной границы конвективного электрического поля.

2. Сферические гармонические функции используются только в пределах небольшой области на полюсе. На более низких широтах потенциалы строятся из нескольких функций рядов Фурье долготы с дискретными широтными шагами, т. е. расчет выполняется по кругу с радиусом, который изменяется в зависимости от параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра с постоянным смещением на 4.2°.

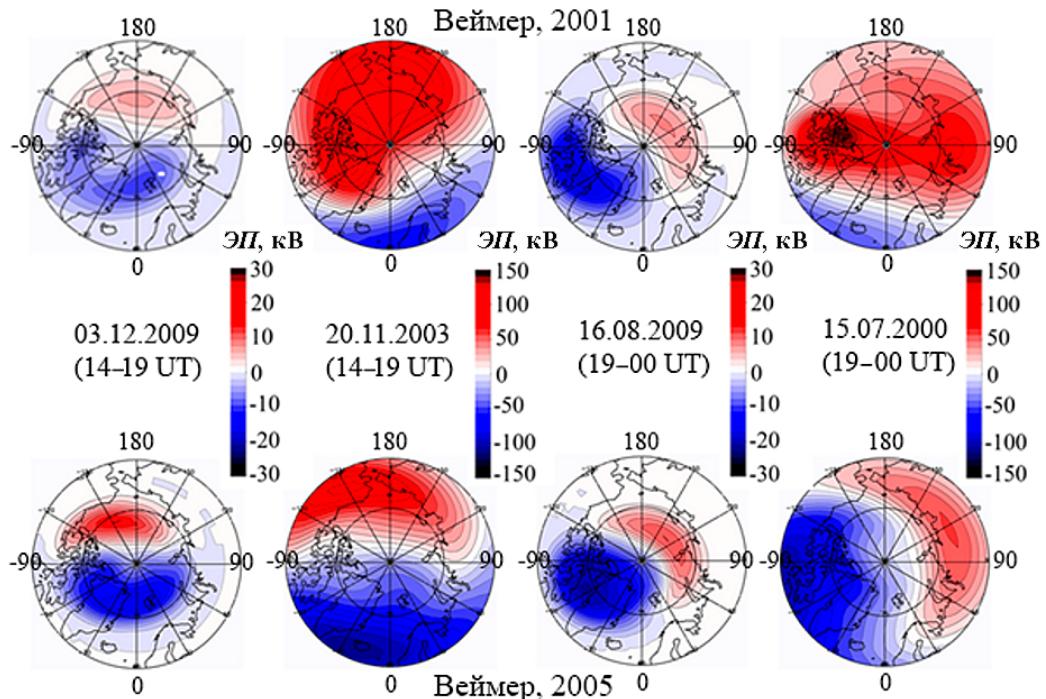


Рис. 1. Пространственные распределения ЭП, рассчитанные с помощью двух версий модели Веймера для спокойных условий 2009 г. и мощных геомагнитных бурь 20.11.2003 и 15.07.2000

3. Нелинейные эффекты насыщения связи солнечного ветра и магнитосфера лучше воспроизведятся для нормальных условий ММП, но необходимо контролировать результаты применения модели к случаям с большими значениями ММП.

На рис. 1 показано пространственное распределение ЭП, рассчитанное для событий 20 ноября 2003 г. (слева) и 15 июля 2000 г. (справа). В качестве спокойного периода выбран 2009 г. На верхней панели представлены расчеты по модели 2001 г., на нижней панели — по модели 2005 г.

Пространственное распределение ЭП для спокойного периода по модели 2005 г. отличается от распределения по модели 2001 г. небольшим увеличением положительного и отрицательного потенциала. Значительные различия в структуре ЭП наблюдаются во время максимума возмущений: в модели 2005 г. наблюдается увеличение как области, так и величины отрицательного потенциала, тогда как по модели 2001 г. больше увеличивается положительный потенциал. Отмеченные различия связаны со смещением зоны конвекции на ночную сторону вследствие улучшений, внесенных в модель 2005 г.

Для дальнейшего анализа в качестве характеристики солнечного воздействия использовался пространственный контраст ЭП. Данный параметр получен следующим образом. На первом шаге по модели Веймера версии 2005 г. [<https://zenodo.org/records/2530324>] рассчитывалось пространственное распределение аномалий ЭП, структура которого состоит из двух областей: отрицательного и положительного знака. Расчет аномалий ЭП выполнен по формуле

$$\mathcal{EP}_i = \mathcal{EP}_i - \langle \mathcal{EP} \rangle, \quad (1)$$

где i — номер часа; $\langle \mathcal{EP} \rangle$ — среднее за семь предшествующих суток.

На втором шаге построено пространственное распределение контраста ЭП согласно формуле

$$\Delta \mathcal{EP}_i = \langle \mathcal{EP}_i^+ \rangle - \langle \mathcal{EP}_i^- \rangle, \quad (2)$$

где i — номер часа; $\langle \mathcal{EP}_i \rangle$ — среднее по области одного знака.

Изменения аномалий и контраста ЭП, усредненных для области широт выше 60° N, проанализированы на примере событий 20 ноября 2003 г. и 23 апреля 2023 г. (см. таблицу), спровоцированных классическим корональным выбросом массы. Выбранные очень большие магнитные бури похожи по условиям развития межпланетных возмущений, вследствие которых они наблюдались [Grechnev et al., 2014; Абунина и др., 2024]. Выбор магнитных бурь в разные сезоны позволил также дополнительно учесть сезонные изменения геомагнитной активности с максимумом весной и осенью, которые могут проявляться в изменениях метеопараметров во время возмущений [Karakhanyan, Molodykh, 2025].

Расчет ионосферного ЭП по модели Веймера выполнялся на основе часовых данных о солнечном ветре и параметрах ММП, полученных из базы данных OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html]. На основе методики для расчета контраста ЭП рассчитывался также контраст метеопараметров, чтобы провести сравнительный анализ ЭП с метеопараметрами во время возмущений. Мы использовали часовые значения метеовеличин в сетке $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ из набора данных [Wielicki et al., 1996; <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp>]. Следует отметить, что в тропосфере существует естественный синоптический период

Параметры межпланетной среды во время мощных магнитных бурь

Дата события	V_{\max} , км/с	n , см^{-3}	$B_{z_{\max}}$, нТл	B_y , нТл	AL , нТл	Дата и значение Dst , нТл
20–21.11.2003	703	7.6	-50.9	22.5	-1790	20.11.2003, $Dst = -422$ нТл
23–24.04.2023	711*	10.2*	-32.4*	-2.5*	-1015*	24.04.2023, $Dst = -213^*$ нТл

*Предварительные данные [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html; <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>]

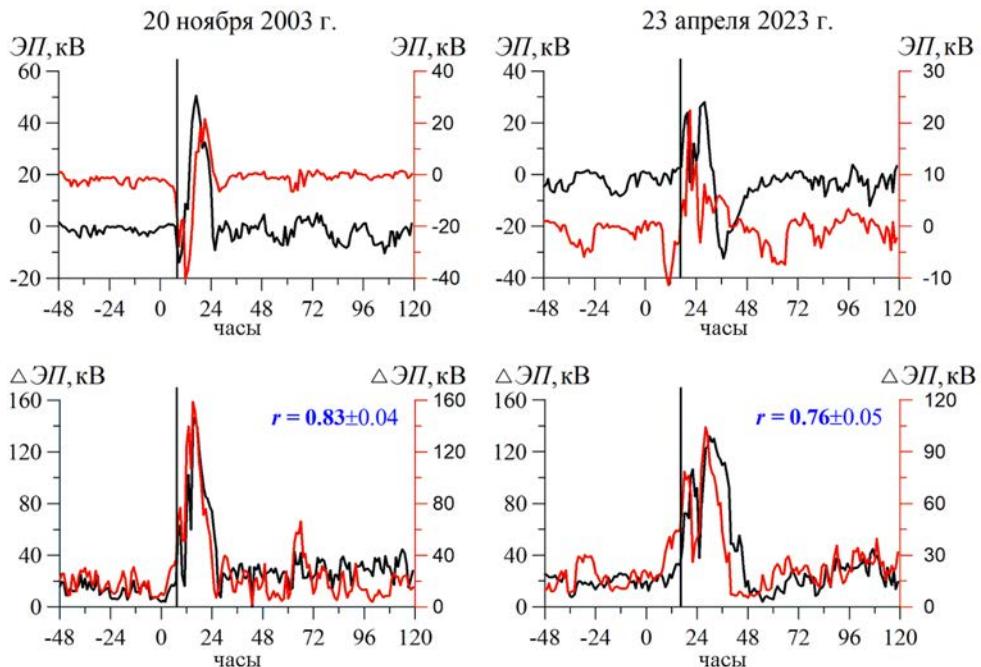


Рис. 2. Изменения во время мощных магнитных бурь аномалий ЭП (сверху) и контраста ЭП (снизу), усредненные для области широт выше 60° N: черная линия — модель Веймера 2001 г., красная линия — модель Веймера 2005 г.; вертикальная линия — начало геомагнитной бури; ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури

(ЕСП) — промежуток времени, на котором сохраняется перемещение циклонов/антициклонов и расположение их центров в определенном районе Земли или на всем полушарии (ЕСП ~ 7 сут). Для минимизации влияния синоптических процессов расчет аномалий метеопараметров проводился относительно среднего за семь предшествующих суток до начала события. УДР представлена наблюдаемым CERES широкополосным тепловым потоком на верхней границе тропосферы (высота $h \sim 20$ км); поглощение излучения водяным паром в окне прозрачности 8–12 мкм — излучаемым тепловым потоком ($h \sim 20$ км) инфракрасного атмосферного окна CERES (8–12 мкм). Верхняя облачность характеризуется количеством облаков верхнего яруса (от уровня 300 гПа до тропопаузы) в процентных долях покрытия неба.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Пространственные распределения ЭП во время возмущений (см. рис. 1), полученные с помощью версий модели Веймера 2001 и 2005 гг., существенно различаются.

Проанализируем динамику вариаций ЭП, усредненных для области широт выше 60° N, во время мощных геомагнитных бурь 20 ноября 2003 г. и 23 апреля 2023 г. На рис. 2 представлены измене-

ния аномалий ЭП (верхние панели) и контраста ЭП (нижние панели), рассчитанные с помощью двух версий модели Веймера. Сравнительный анализ показал, что во время мощных магнитных бурь вклад отрицательных значений ЭП в общую изменчивость аномалий ЭП больше в модели 2005 г., чем в модели 2001 г. Данное различие связано с внесенными в модель 2005 г. изменениями, отмеченными ранее. Вариации контраста ЭП во время возмущений, рассчитанные по модели 2001 г., хорошо коррелируют с изменениями контраста ЭП, полученными по модели 2005 г. Поведение контраста ЭП в двух версиях модели Веймера согласуется лучше, чем динамика аномалий ЭП для высоких широт.

Рассмотрим линейную связь изменений контраста ЭП, усредненного для области широт выше 60° N, с вариациями геомагнитного индекса PC во время мощных магнитных бурь 20 ноября 2003 г. и 23 апреля 2023 г. Корреляция составляет 0.71 ± 0.5 между изменениями контраста ЭП, рассчитанного по модели Веймера 2001 г., и вариациями PC -индекса для рассматриваемых случаев.

Изменения контраста ЭП, рассчитанные по модели 2005 г., лучше коррелируют с вариациями PC -индекса для анализируемых геомагнитных бурь (рис. 3, верхние панели). Высокий коэффициент корреляции между параметрами позволяет нам говорить о том, что

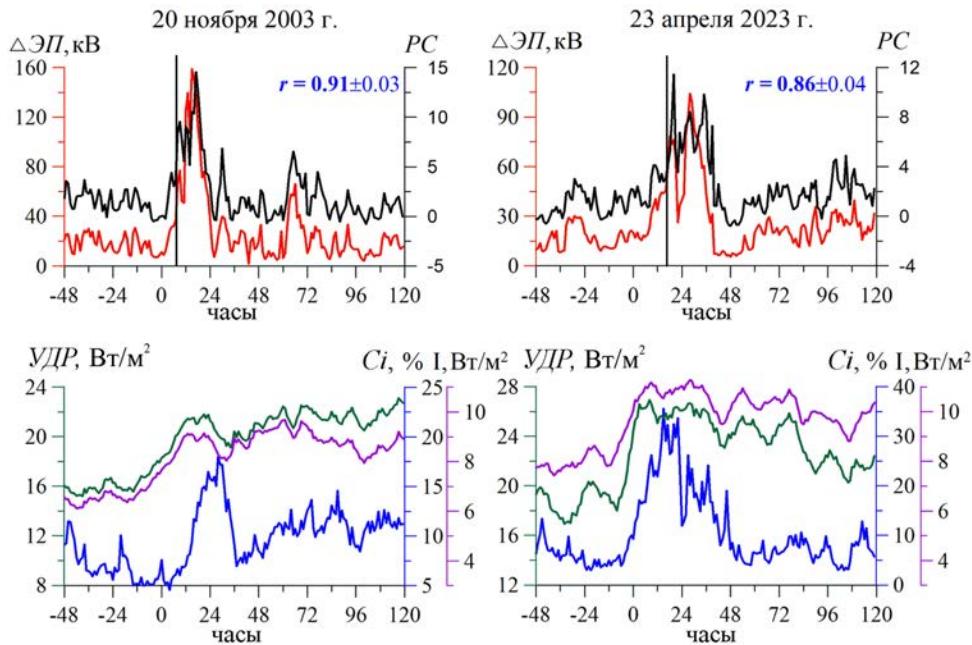


Рис. 3. Усредненные для области широт выше 60° N изменения контраста ЭП (верхние панели, красная линия) и контраста метеопараметров (нижние панели): зеленая линия — УДР; фиолетовая — поглощения излучения водяным паром в окне прозрачности 8–12 мкм (I); синяя — верхней облачности (Ci), а также вариации геомагнитного индекса PC (верхние панели, черная линия) во время мощных магнитных бурь. Вертикальная линия — начало геомагнитной бури; ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури

геомагнитный индекс PC можно использовать в качестве индикатора солнечной активности во время изолированных мощных магнитных бурь.

Для определения тропосферного отклика на изменение потенциала во время магнитных бурь использовался контраст ЭП, рассчитанный по модели Вермера 2005 г. (см. рис. 3, вверху). Во время очень сильной магнитной бури 20 ноября 2003 г. увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности. Максимум контраста метеопараметров наблюдается в первые 12 ч относительно максимума контраста ЭП. Для геомагнитной бури 23 апреля 2023 г. отмеченные особенности в изменении рассматриваемых параметров менее выражены, возможно, вследствие влияния суббуровой активности, наблюданной до начала магнитной бури и являющейся результатом усиления продольных токов, обусловленных электрическим полем магнитосферной конвекции, которое возникает при взаимодействии солнечного ветра и ММП с магнитосферой.

Изменения аномалий верхней облачности имеют однодиапазонную тенденцию с динамикой аномалий ЭП в высоких широтах во время мощных геомагнитных бурь (рис. 4). Особенности, характерные для динамики контраста рассматриваемых параметров, сохраняются в поведение их аномалий. Однако амплитуда отклика положительных аномалий верхней облачности на изменение положительного ЭП на порядок величины выше, чем амплитуда отклика отрицательных аномалий верхней облачности на изменение отрицательного ЭП. Рассмотрим карты аномалий ЭП и пространственное распределение аномалий верхней облачности (рис. 5) во время магнитной бури 23 апреля 2023 г. В спокойных условиях

на широтах выше 60° N аномалии верхней облачности однородно распределены и составляют единицы процентов. Наибольшее увеличение верхней облачности наблюдается в области усиления положительного потенциала, который оказывает нелинейное воздействие на свойства водяного пара, в данном случае поступающего из средних широт с циклонами, которые возникают у восточного побережья Евразии и, перемещаясь к северо-востоку, достигают максимального развития в районе Алеутских островов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наша планета, являясь открытой системой, подвержена влиянию изменений в солнечном ветре вследствие активных процессов на Солнце. Быстрые изменения климата на Земле являются причиной продолжения дискуссии о величине и характере солнечного влияния на нижнюю атмосферу. Пространственная неоднородность тропосферного отклика на солнечное воздействие в большей степени может проявляться в изменчивости регионального климата в результате изменения оптических свойств водяного пара в тропосфере во время геомагнитных возмущений [Karakhanyan, Molodykh, 2025]. Детальное изучение изменений местного климата (высокие широты, внутриконтинентальные регионы) под действием процессов на Солнце возможно на основе данных, полученных на инструментальной базе ИСЗФ СО РАН, в частности, с использованием УНУ «Оптические инструменты» [<https://iszf.irk.ru/usu-optical-instruments/>].

В проведенном исследовании мы использовали контраст в вариациях ЭП, который является proxy солнечной активности, что позволило минимизировать

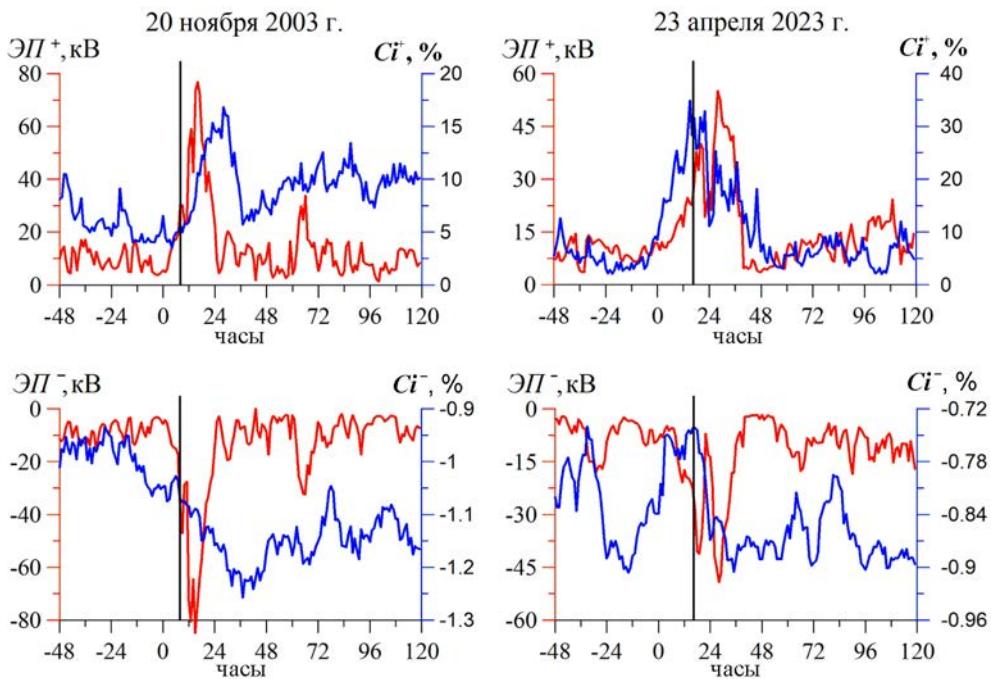


Рис. 4. Изменения положительных (сверху) и отрицательных (снизу) аномалий ЭП (красные кривые) и аномалий верхней облачности (синие кривые), усредненные для области широт выше 60° N, во время мощных магнитных бурь. Вертикальная линия — начало геомагнитной бури; ноль по оси абсцисс — 00 UT дня начала геомагнитной бури

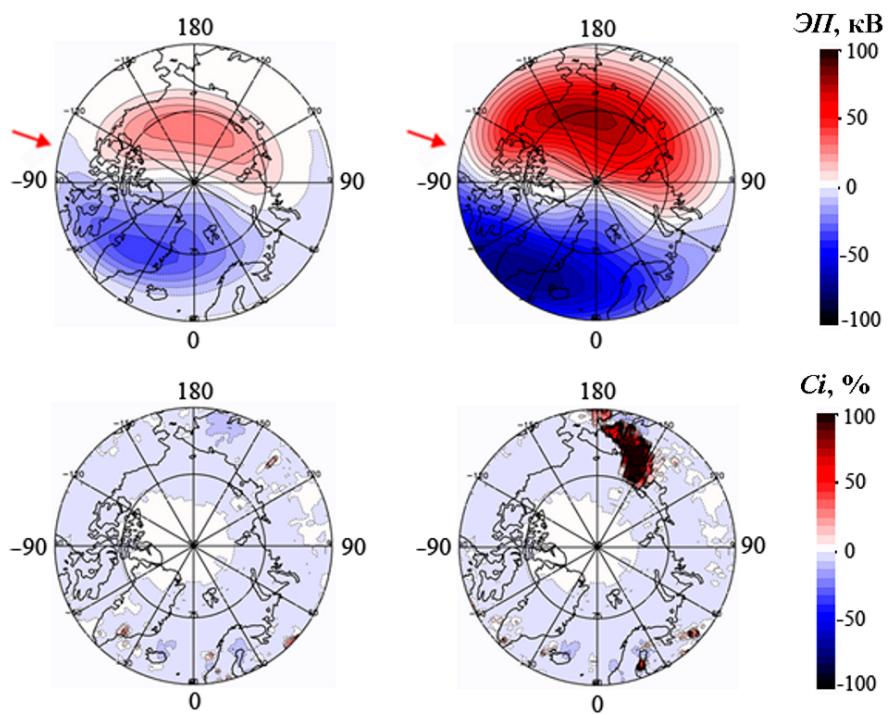


Рис. 5. Пространственные распределения аномалий ЭП (сверху) и верхней облачности (снизу) в спокойный период (слева) и в период их максимума (справа) в среднем за 3 ч с 18 UT по 20 UT для области широт выше 60° N во время очень большой геомагнитной бури 23 апреля 2023 г. Полуденный меридиан показан стрелками

различия между его расчетами по разным версиям модели Веймера (см. рис. 2). Показана высокая корреляция между изменениями контраста ЭП, усредненного для высоколатитной области, и вариациями геомагнитного индекса PC (см. рис. 3). Основываясь на данном результате, можно рекомендовать обе характеристики в качестве индикатора солнечной активности при изучении мощных магнитных бурь.

Спектр метеопараметров состоит из высокочастотной (суточная, сезонная, годовая и 2–5-летние вариации) и низкочастотной составляющих. Последняя содержит вариации, близкие к гелиогеофизическим периодам, в частности, обнаружена ~22-летняя вариация, подобная магнитному циклу Хейла на Солнце, в изменчивости траекторий внетропических циклонов в Северной Атлантике [Veretenenko et al., 2023b].

Поскольку солнечный сигнал, присутствующий в метеопараметрах, меньше амплитуды их суточной и сезонной вариаций, мы изучаем изменения не самой величины, а изменение аномалий или отклонений метеопараметров от их среднего значения во время возмущения. На примере очень сильных геомагнитных бурь 23-го и 25-го солнечных циклов, которые являются циклами средней величины и вторыми компонентами 22-летнего цикла магнитной активности [Ishkov, 2010, 2024], показано, что во время отдельных мощных возмущений увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности (см. рис. 3). Применительно к метеопараметрам контраст использовался в качестве интегральной характеристики для иллюстрации амплитуды изменений метеорологического отклика на солнечное влияние из-за неоднородной структуры тропосферного отклика в пространстве. Результаты исследования получены в рамках модели механизма опосредованного влияния солнечных процессов на радиационный баланс климатической системы, разрабатываемой в ИСЗФ СО РАН. Они помогут создать параметризацию физических процессов в тропосфере в соответствии с предлагаемым сценарием и, следовательно, включить солнечную активность, наряду с солнечной постоянной, в климатические модели.

ВЫВОДЫ

Анализ связи вариаций ЭП с изменениями метеопараметров во время мощных магнитных бурь позволил получить следующие результаты.

Пространственные распределения ЭП, полученные с помощью версий 2001 и 2005 гг. модели Веймера, наиболее сильно различаются во время максимума возмущения.

Вариации аномалий ЭП, усредненные для области широт выше 60° N, существенно различаются в рассмотренных версиях модели Веймера. Однако вариации усредненного контраста ЭП, рассчитанные по версиям 2001 и 2005 гг., во время мощных возмущений происходят синхронно.

Корреляционный анализ изменений усредненного контраста ЭП с вариациями геомагнитного индекса PC показал, что обе характеристики можно использовать в качестве proxy солнечной активности для изучения изолированных мощных возмущений.

Во время возмущений увеличение контраста ЭП сопровождается ростом контраста метеопараметров, особенно контраста верхней облачности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абунина М.А., Шлык Н.С., Белов С.М. и др. О наиболее интересных событиях в солнечном ветре и космических лучах в 2023–2024 гг. *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XVIII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом»*. Иркутск. 2024, с. 5–7. DOI: [10.62955/0135-3748-2024-5](https://doi.org/10.62955/0135-3748-2024-5).
- Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Миронова И.А. Изменения химического состава в полярных областях

Земли после протонных вспышек на Солнце (трехмерное моделирование). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017, т. 57, № 2, с. 173–194. DOI: [10.7868/S0016794017020079](https://doi.org/10.7868/S0016794017020079).

Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Карапетян А.А. Оценка влияния солнечной активности на уходящий поток инфракрасного излучения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2020, т. 60, № 2, с. 208–215. DOI: [10.31857/S0016794020020108](https://doi.org/10.31857/S0016794020020108).

Мохов И.И. Российские климатические исследования в 2019–2022 гг. *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2023, т. 59, № 7, с. 830–851. DOI: [10.31857/S0002351523070106](https://doi.org/10.31857/S0002351523070106).

Пташник И.В. Контигуальное поглощение водяного пара: краткая предыстория и современное состояние проблемы. *Оптика атмосферы и океана*. 2015, т. 28, № 5, с. 443–459. DOI: [10.15372/AOO20150508](https://doi.org/10.15372/AOO20150508).

Grechnev V.V., Uralov A.M., Chertok I.M., et al. A challenging solar eruptive event of 18 November 2003 and the causes of the 20 November geomagnetic superstorm. IV. Unusual magnetic cloud and overall scenario. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, iss. 12, pp. 4653–4673. DOI: [10.1007/s11207-014-0596-5](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0596-5).

Harrison R.G., Lockwood M. Rapid indirect solar responses observed in the lower atmosphere. *Proc. Roy. Soc. A*. 2020, vol. 476, iss. 2241, 20200164. DOI: [10.1098/rspa.2020.0164](https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0164).

Ishkov V.N. Properties and surprises of solar activity XXIII cycle. *Sun and Geosphere*. 2010, vol. 5, iss. 2, pp. 43–46.

Ishkov V.N. Current solar cycle 25 on the eve of the maximum phase. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024, vol. 64, iss. 7, pp. 1167–1175. DOI: [10.1134/S0016793224700257](https://doi.org/10.1134/S0016793224700257).

Karakhanyan A.A., Molodykh S.I. A decline of linear relation between outgoing longwave radiation and temperature during geomagnetic disturbances. *JASTP*. 2025, vol. 270, iss. 5, 106503. DOI: [10.1016/j.jastp.2025.106503](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106503).

Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., et al. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere. *Space Sci. Rev.* 2015, vol. 194, iss. 1–4, pp. 1–96. DOI: [10.1007/s11214-015-0185-4](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0185-4).

Simonova A.A., Ptashnik I.V., Elsey J., et al. Water vapour self-continuum in near-visible IR absorption bands: Measurements and semiempirical model of water dimer absorption. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022, vol. 277, iss. 1, 107957. DOI: [10.1016/j.jqsrt.2021.107957](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107957).

Tinsley B.A. The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics. *Reports on Progress in Physics*. 2008, vol. 71, iss. 6, 066801. DOI: [10.1088/0034-4885/71/6/066801](https://doi.org/10.1088/0034-4885/71/6/066801).

Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vernerstrom S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index. *Planet. Space Sci.* 1988, vol. 36, iss. 11, pp. 1095–1102. DOI: [10.1016/0032-0633\(88\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3).

Veretenenko S.V., Dmitriev P.B., Dergachev V.A. Long-term effects of solar activity on cyclone tracks in the North Atlantic. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2023a, vol. 16, iss. 1.2, pp. 454–460. DOI: [10.18721/JPM.161.269](https://doi.org/10.18721/JPM.161.269).

Veretenenko S.V., Dmitriev P.B., Dergachev V.A. Long-term changes main trajectories of extratropical cyclones in the North Atlantic and their possible association with solar activity. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023b, vol. 63, iss. 7, pp. 953–965. DOI: [10.1134/S0016793223070265](https://doi.org/10.1134/S0016793223070265).

Weimer D.R. An improved model of ionospheric electric potentials including substorm perturbations and application to the Geospace Environment Modeling November 24, 1996, event. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2001, vol. 106, iss. A1, pp. 407–416. DOI: [10.1029/2000JA000604](https://doi.org/10.1029/2000JA000604).

Weimer D.R. Improved ionospheric electrodynamic models and application to calculating Joule heating rates. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, iss. A5, A05306. DOI: [10.1029/2004JA010884](https://doi.org/10.1029/2004JA010884).

Wielicki B.A., Barkstrom B.R., Harrison E.F., et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment. *Bull. American Meteorological Society*. 1996, vol. 77, iss. 5, pp. 853–868. DOI: [10.1175/1520-0477\(1996\)077<0853:CATERE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0853:CATERE>2.0.CO;2).

URL: <https://zenodo.org/records/2530324> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://iszfirk.ru/usu-optical-instruments/> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

URL: <https://pcindex.org/> (дата обращения 4 апреля 2025 г.).

Статья подготовлена по материалам Двадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2025 г., Институт космических исследований РАН, Москва, Russia.

Как цитировать эту статью:

Карабахян А.А., Молодых С.И. Метеорологический отклик на изменение электрического потенциала ионосферы, обусловленного возмущенным солнечным ветром. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 100–107. DOI: [10.12737/szf-113202511](https://doi.org/10.12737/szf-113202511).

CHINESE-RUSSIAN JOINT RESEARCH CENTER ON SPACE WEATHER: RESULTS AND PROSPECTS

ОБЪЕДИНЕНИЙ РОССИЙСКО-КИТАЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ПО КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

A.V. Medvedev 

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, medvedev@iszf.irk.ru*

А.В. Медведев

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, medvedev@iszf.irk.ru*

G.A. Zhrebtssov 

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, gaz@iszf.irk.ru*

Г.А. Жеребцов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, gaz@iszf.irk.ru*

N.P. Perevalova 

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pereval@iszf.irk.ru*

Н.П. Перевалова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pereval@iszf.irk.ru*

Abstract. We present an overview of the history, the main scientific results and prospects of the Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather. The Chinese-Russian Joint Research Center was established by the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (ISTP SB RAS) and National Space Science Center CAS (NSSC CAS) in 2000. The center deals with fundamental issues in modern solar-terrestrial physics, such as quantitative description of the processes in complex interconnected system Sun — interplanetary medium — magnetosphere — ionosphere — atmosphere, assessment of capabilities of predicting interactions within this system, development of effective models for forecasting the state of the atmosphere and near-Earth space. Over the 24-year period, the Joint Research Center has united more than 10 scientific institutes in Russia and China; about 60 scientific projects have been implemented, and more than 400 joint scientific articles have been published. Joint efforts of Russian and Chinese researchers allowed obtaining important results in study of physical processes in near-Earth space. The Chinese-Russian Joint Research Center has proven its usefulness and continues studying the Sun, solar-terrestrial relations, and near-Earth space.

The future work of the Joint Research Center will be closely linked to the implementation of major unique projects in China and Russia: the International Meridian Circle Program (IMCP) led by NSSC CAS, and the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences (NHC RAS) led by ISTP SB RAS. We describe these projects in this paper.

Keywords: Chinese-Russian Joint Research Center, space weather; international cooperation, International Meridian Circle Program, National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences.

Аннотация. Представлен обзор истории, основных научных результатов и перспектив Объединенного Российско-Китайского научного центра по космической погоде. Объединенный Российско-Китайский научный центр был создан Институтом солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) и Национальным центром космических исследований КАН (НЦКИ КАН) в 2000 г. Деятельность Объединенного научного центра направлена на решение фундаментальных вопросов современной солнечно-земной физики, таких как количественное описание процессов в сложной взаимосвязанной системе «Солнце — межпланетная среда — магнитосфера — ионосфера — атмосфера», оценка возможностей прогнозирования взаимодействий внутри этой системы, разработка эффективных моделей для прогноза состояния атмосферы и околоземного космического пространства. За 24 года деятельности к Объединенному научному центру присоединилось более 10 исследовательских институтов России и Китая, было реализовано около 60 научных проектов и опубликовано более 400 совместных научных статей. Совместные усилия российских и китайских исследователей позволили получить много важных результатов в изучении физических процессов в околоземном космическом пространстве. Объединенный Российско-Китайский научный центр доказал свою эффективность и продолжает исследования в области изучения Солнца, солнечно-земных связей и околоземного космического пространства.

Дальнейшая работа Объединенного научного центра будет тесно связана с реализацией крупных уникальных проектов в Китае и России: International Meridian Circle Program (IMCP), возглавляемая НЦКИ КАН, и Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук (НГК РАН), возглавляемый ИСЗФ СО РАН. В статье приводится описание этих проектов.

Ключевые слова: Объединенный Российско-Китайский научный центр, космическая погода, международное сотрудничество, International Meridian Circle Program, Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук.

INTRODUCTION

In the new millennium, near-Earth space has become an area of intense practical activity. The rapid development of technosphere and its growing expansion to space lead to the fact that the processes occurring on the Sun and in near-Earth space (known as space weather) significantly affect space-borne and ground-based technological systems, such as spacecraft, television, communication, navigation, electric power grids, and pipelines. Space weather factors can also pose a threat to human health and life. It is therefore essential to have complete information about these processes, to be able to diagnose and predict space weather, and to assess the potential consequences. Thus, space weather monitoring and forecasting are major scientific challenges for the scientific community of the XXI century. To provide an adequate response to these major challenges, many countries have established special National Space Weather programs. These programs identify priorities in near-Earth space research: development of diagnostic tool networks, advancement of fundamental knowledge about processes in near-Earth space, development and improvement of empirical and theoretical models.

However, physical processes in all regions of near-Earth space are closely interrelated. The system Sun — interplanetary medium — magnetosphere — ionosphere — atmosphere should be studied as a whole. New tools and methods are required to solve this complex problem. International cooperation is also essential, as the processes under study are global in scale. The Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather is focused on solving these problems. The main research areas of the Joint Research Center include:

- solar activity related to solar disturbances;
- propagation of solar disturbances through the solar corona and interplanetary space;
- dynamic processes of various spatial and temporal scales associated with the near-Earth space disturbances;
- propagation of disturbances from high to middle and low latitudes of Earth's ionosphere and atmosphere;
- diagnostics of near-Earth space and forecasting techniques; interaction between near-Earth space and Earth's atmosphere;
- global space weather system and its response to external influences.

MILESTONES

The Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather was established by the Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS) and the National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences (NSSC CAS, until 2010 known as the Center for Space Science and Applied Research CAS, CSSAR CAS).

Agreement for Scientific Cooperation between the Russian Academy of Sciences and the Chinese Academy of Sciences signed on December 18, 1992 and Agreement for Scientific Cooperation between the Chinese Academy of Sciences and Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences signed on October 13, 1999 served as the basis for creating the Joint Research Cen-

ter. Within the framework of these agreements, Director of CSSAR CAS Professor Gu Yidong and Director of ISTP SB RAS Academician Gelyi A. Zherebtsov signed the Agreement for Joint Studies on Solar-Terrestrial Physics and Its Applications in Beijing on November 2, 2000. In December 2000, the first joint workshop was held in Irkutsk. Representatives of CSSAR CAS and ISTP SB RAS took decision to establish the Joint Research Center on Space Weather, and signed its Charter. The first co-directors of the Joint Research Center were Academician Gelyi A. Zherebtsov and Professor Wu Ji. Since 2018, co-director of the Joint Research Center from the Chinese side is the Director General of NSSC CAS Academician Wang Chi. In 2012–2017, co-director of the Joint Research Center from the Russian side was the Director of ISTP SB RAS, Corresponding Member of RAS Aleksandr P. Potekhin. Today, co-director of the Joint Research Center is the Director of ISTP SB RAS Corresponding Member of RAS Andrey V. Medvedev.

In accordance with the Charter of the Joint Research Center on Space Weather, workshops are held alternately in Russia and China on a regular basis. At workshops researchers present their scientific results and discuss the prospects for further joint research. The first workshop took place in Irkutsk in 2000. The 10th Anniversary Meeting was held in Beijing in 2010. In 2024, ISTP SB RAS hosted the 15th Anniversary Workshop in Irkutsk (Figure 1).

At the 15th Russian-Chinese Workshop, special attention was given to the International Meridian Circle Program (IMCP) that is led by NSSC CAS and aims to study atmospheric and near-Earth space phenomena and processes using ground-based scientific instruments located along the 120° E and 60° W meridians. China and Russia play a special role in this program since a significant part of the 120° E meridian passes through their territories. New opportunities for IMCP can be provided by the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences (NHC RAS), which is being created by ISTP SB RAS. The development of cooperation within IMCP was discussed during the 15th Russian-Chinese Workshop. In the following sections, we address some of the issues related to this cooperation.

The Joint Research Center promotes expanding multilateral cooperation. Many Russian and Chinese institutions have joined our investigations: National Astronomical Observatories of China CAS (NAOC CAS), Institute of Geology and Geophysics CAS (IGG CAS), Peking University (PKU), Yunnan Astronomical Observatory CAS (YNAO CAS), China Research Institute of

Radiowave Propagation (CIRIP), Shandong University (SDU), Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS (SICRA SB RAS), Space Research Institute RAS (IKI RAS), Pushkov Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Central Astronomical Observatory of RAS at Pulkovo (GAO RAS), Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS (IKIR FEB RAS), Polar Geophysical Institute RAS (PGI RAS).

Over the 24-year period, approximately 60 scientific projects have been implemented, around 200 exchange visits took place, and more than 230 joint scientific reports



Figure 1. The 15th Russian-Chinese Workshop on Space Weather, Irkutsk, September 2024

have been presented at workshops and conferences. Additionally, over 400 joint scientific articles and two monographs have been published.

MAIN SCIENTIFIC RESULTS

Joint efforts of Russian and Chinese researchers allowed obtaining important results in study of physical processes in near-Earth space. The most interesting scientific results obtained during our cooperation are presented in this Section.

First observations of a microwave zebra pattern (ISTP SB RAS, NAOC CAS)

In 2003, researchers from the Institute of Solar-Terrestrial Physics and the National Astronomical Observatories of China first detected a zebra pattern in the microwave range [Altyntsev et al., 2005a, 2005b]. Zebra patterns are intriguing fine spectral structures that look as a number of parallel bright and dark stripes in the dynamic spectra of the solar radio emission. To date, there is no definite conclusion about the formation mechanism of zebra patterns, with more than a dozen of different models proposed. Zebra patterns are generally observed in the metric and decimetric wavelength ranges. In the microwave range, the radio burst was first recorded simultaneously with the Siberian Solar Radio Telescope (at frequencies of 5.70, 5.72, and 5.76 GHz) and the spectropolarimeter of the Huairou Solar Observing Station (in the 5.2–7.6 GHz range). This combination has allowed us to determine not only spectral, but also spatial characteristics of the event. The radio burst consisted of three (possibly, four) parallel equidistant bright stripes with a synchronous temporal evolution. The frequency interval between the stripes was \sim 160 MHz. The emission had 100 % circular polarization corresponding to the extraordinary mode. The sources of different zebra stripes were found to coincide spatially. It was concluded that the most probable generation mechanism of the zebra pattern considered was nonlinear interaction between harmonics of plasma waves known as Bernstein modes. In this case, the magnetic field in the emission source, as determined by the frequency separation of the zebra stripes, was \sim 60 G.

Fine wave dynamics in umbral flash sources (ISTP SB RAS, YNAO CAS)

For the first time, information has been obtained on the dynamics of wave processes occurring in small an-

gular solar magnetic structures associated with the Umbral Flashes (Us) [Sych and Wang, 2018]. Fast periodic disturbances related to wave activity in the sunspot umbra were observed over a three-hour period. These disturbances align with the continuous diffuse brightening of specific wave fronts described by Yuan et al. [2014]. Additionally, short-term emergences of small local sources, known as UFs, were identified. The observed umbral brightening can be categorized into two types. The first type consists of background UFs, which exhibit random brightening of separated parts of wave fronts during propagation. These UFs are constantly observed in the umbra and lack stable shapes and spatial localization. The second type consists of local UFs, which are associated with increased wave activity near the footpoints of magnetic loops. These sources demonstrate pronounced wave dynamics and do not change spatial position over time. Different spatial shapes were observed for the local UF sources. Point sources are located at the footpoints of large magnetic loops and display activity with rare low-power pulses. Extended sources are related to the footpoints of low magnetic loops with large inclinations, exhibiting series of recurrent UF pulses. The emergence of the main UF maximum coincides with the peak power of three-minute oscillation trains in separated loops. This wave dynamics follows previously described background UFs by a number of authors, but it is localized within magnetic loops. A correlation exists between UF emergence in the photosphere and increased power of three-minute wave trains in the corona. The observed UF parameters are primarily influenced by the wave cut-off frequency. Further research will focus on investigating the relationship between the shape of local UF sources and the inclination of magnetic loops near their footpoints.

The origin of the helicity hemispheric sign rule reversals in the mean-field solar-type dynamo (NAOC CAS, ISTP SB RAS, IZMIRAN)

Observations at Huairou Solar Observatory of proxies of magnetic helicity in the Sun over the past two solar cycles have revealed reversals of the helicity hemispheric sign rule (negative in the Northern Hemisphere and positive in the Southern one). The mean-field solar dynamo model was used to study changes in the sign of the magnetic helicity for the dynamo, which operate in the bulk of the solar convection zone. The reversal of the sign of the small-scale magnetic helicity was found

to follow the dynamo wave propagating inside the convection zone. Thus, the spatial configuration of the magnetic helicity reversals reflects the processes that contribute to the generation and evolution of large-scale magnetic fields. On the surface, the patterns of the helicity rule reversals are determined by the magnetic helicity boundary conditions at the top of the convection zone. The obtained results suggest that the magnetic helicity of a large-scale axisymmetric field can be treated as an additional observational tracer for the solar dynamo and it probably can be used for the solar activity forecast [Pipin et al., 2013].

Improvement of full-disk measurements of solar longitudinal magnetic fields at the Huairou observatory (NAOC CAS, ISTP SB RAS)

Magnetograms of the full solar disk are a necessary element of space weather forecasting algorithms. The Solar Magnetism and Activity Telescope (SMAT) of the Huairou Solar Observatory is one of the few instruments in the world capable of receiving full-disk magnetograms. As a result of joint Russian-Chinese studies of the instrumental characteristics of SMAT, some problems were identified that impede high-precision measurements of weak background magnetic fields of the Sun. Nonetheless, methods to improve the quality of SMAT measurements were proposed, resulting in a significant increase in data reliability [Demidov et al., 2018]. These techniques will allow us to utilize SMART measurements to address a wide range of solar physics issues related to studies of global solar magnetism and space weather.

Saturation of the magnetosphere and the polar cap during superstorms (ISTP SB RAS, NSSC CAS)

Using data from more than 110 ground-based geomagnetic observatories and the magnetogram inversion method developed at ISTP SB RAS, new patterns of the magnetosphere saturation process have been obtained: stopping the growth of the electromagnetic energy flux through the magnetosphere boundary and the polar cap from the solar wind (SW) with its unusual intensification during superstorms [Mishin et al., 2016]. Saturation was shown to be caused not only by an increase in the southern component of the interplanetary magnetic field, but also by an increase in the solar wind dynamic pressure (Figure 2, a). Saturation was explained by the magnetosphere finite compressibility (during the increasing SW, the compression of the magnetopause — a decrease in the radius of its subsolar point — stops quickly due to the geomagnetic field pressure increasing earthward (Figure 2, b)), which also causes a stop in the growth of the polar cap and the flow of energy into the ionosphere through it. This result was confirmed by numerical simulation using a global MHD model and the Piecewise Parabolic Method with a Lagrangian Remap (PPMLR) [Hu et al., 2009; Wang et al., 2014] (Figure 2, a, c).

Estimated peak density of atomic oxygen between 2000 and 2004 at 52°N (NSSC CAS, ISTP SB RAS)

A method for deriving the peak density of atomic oxygen in the Mesosphere and Low Thermosphere (MLT)

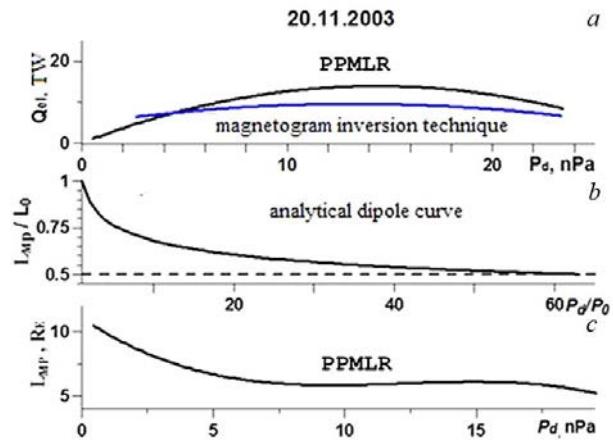


Figure 2. Saturation during an increase in the SW dynamic pressure P_d in the November 20, 2003 storm: electromagnetic energy flux Q_{el} (a), subsolar magnetopause radius L_{mp} (b, c)

region from atomic oxygen [OI] 557.7 nm nightglow intensity has been developed. The method is based on the photochemical model for [OI] 557.7 nm emission and an approximate expression for the altitude distribution of the atomic oxygen density in the MLT region. This method was used to derive the peak density of atomic oxygen from the 557.7 nm airglow data obtained at the ISTP SB RAS Geophysical observatory in 2000–2004 [Hong Gao et al., 2009]. Nighttime and seasonal variations in the [OI] 557.7 nm intensity and the derived peak density of atomic oxygen were analyzed. The results show that the nighttime variations in the 557.7 nm emission intensity depend on season. The monthly mean 557.7 nm airglow intensity changes with month, showing peaks in March, June, and October, and larger values in winter months. Nocturnal and seasonal variations in the peak density of atomic oxygen are generally similar to those in the 557.7 nm airglow intensity.

Local empirical models of regular ionospheric variations (ISTP SB RAS, NSSC CAS)

Based on long-term ionospheric measurements with vertical sounding ionosondes located at Irkutsk, Norilsk, and Hainan, local empirical models of regular ionospheric variations were worked out (Figure 3) [Ratovsky et al., 2014]. Using the models, common properties and regional features were identified. A common property of the high-, mid- and low latitude ionosphere is the semi-annual daytime anomaly of the peak electron density N_mF2 under low solar activity and the intensification of the winter anomaly with increasing solar activity. The generality is a consequence of the global thermospheric circulation in which all regions of the ionosphere are involved. A distinctive feature of the low-latitude ionosphere is the semi-annual nighttime anomaly of N_mF2 under low solar activity and the highest growth rate of N_mF2 with an increase in $F10.7$ in the evening and night time. A regional feature of the ionosphere over Hainan (not reproduced by the IRI model) is the multi-peak diurnal variation in the peak height h_mF2 over Hainan. A distinctive feature of the mid-latitude ionosphere is the greatest intensification of the winter anomaly with increase in $F10.7$ and the evening anomaly in the summer diurnal variation in N_mF2 . A regional feature of the ionos-

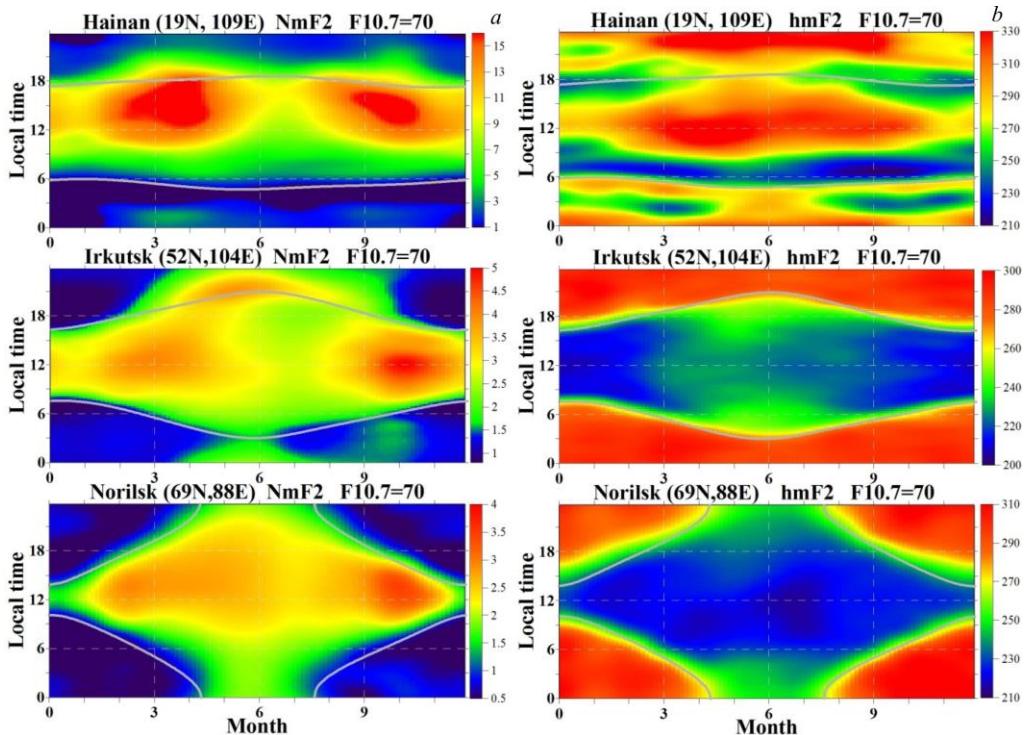


Figure 3. Diurnal-seasonal variations in N_mF2 [10^5 cm^{-3}] (a) and h_mF2 [km] (b) under low solar activity

sphere over Irkutsk (not reproduced by the IRI model) is the morning-evening asymmetry in the summer diurnal variation of N_mF2 at high solar activity. A distinctive feature of the high-latitude ionosphere is the absence of diurnal anomalies in any season and the absence of a winter anomaly at low solar activity. A regional feature of the ionosphere over Norilsk (not reproduced by the IRI model) is the “polar day effect” under low solar activity (no nighttime rise in the peak height h_mF2 in the summer).

Ionospheric response to geomagnetic storms at the meridional chain of ionosondes in the East Asian region (ISTP SB RAS, NSSC CAS)

In 2000–2017, coordinated studies of ionospheric effects of geomagnetic storms were carried out at the meridional chain of ionospheric stations located in the East Asian sector (90° – 160° E) in Russia and China (Figure 4) [Pirog et al., 2010; Shi et al., 2011]. For some storms, these studies were supplemented with measurements in the European and American sectors. The following has been revealed: 1) Medium-latitude ionosphere shows properties of high-latitude ionosphere during superstorms. 2) There are differences in the East Asian ionospheric response to geomagnetic storms under high and low solar activity. 3) Three groups of anomalous ionospheric disturbances caused by geomagnetic storms and observed at low solar activity have been identified: a special type of large-scale traveling ionospheric disturbances, quasi-two-day Wave Like Disturbances (WLDs), oscillations of Short Duration (OSD). 4) Longitudinal alternation of positive and negative ionospheric response during the recovery phase of some storms is observed. Longitude variations of storm ionospheric disturbances are determined by the local time of the storm sudden commencement. 5) A comparative analysis of the behavior

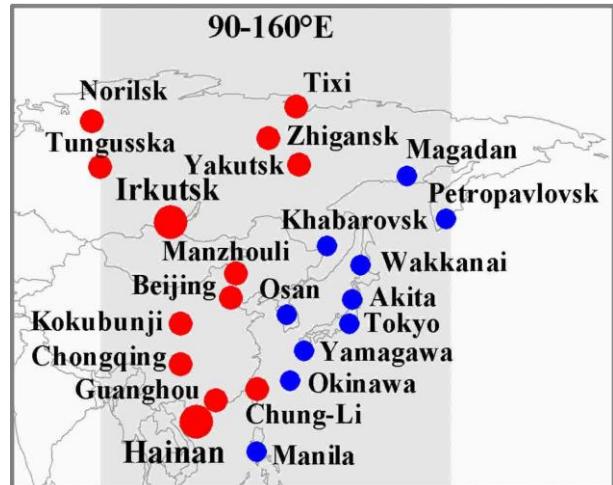


Figure 4. Meridional chains of ionosondes in East Asia of F-scattering in equatorial and high latitudes was performed [Shi et al., 2011].

FROM MERIDIONAL CHAINS TO THE INTERNATIONAL MERIDIAN CIRCLE PROGRAM (IMCP)

Ground-based chains of geophysical instruments are a powerful tool for studying and monitoring the effects of space weather in Earth’s ionosphere and magnetosphere. Due to the latitudinal difference in solar radiation and the bounding of charged particles by the geomagnetic field, space weather disturbances are usually manifested along the meridians. As a result, observing along a specific meridian line has a great deal of advantages. The effectiveness of observations at the meridional chains has been confirmed by a rich history of such observations.

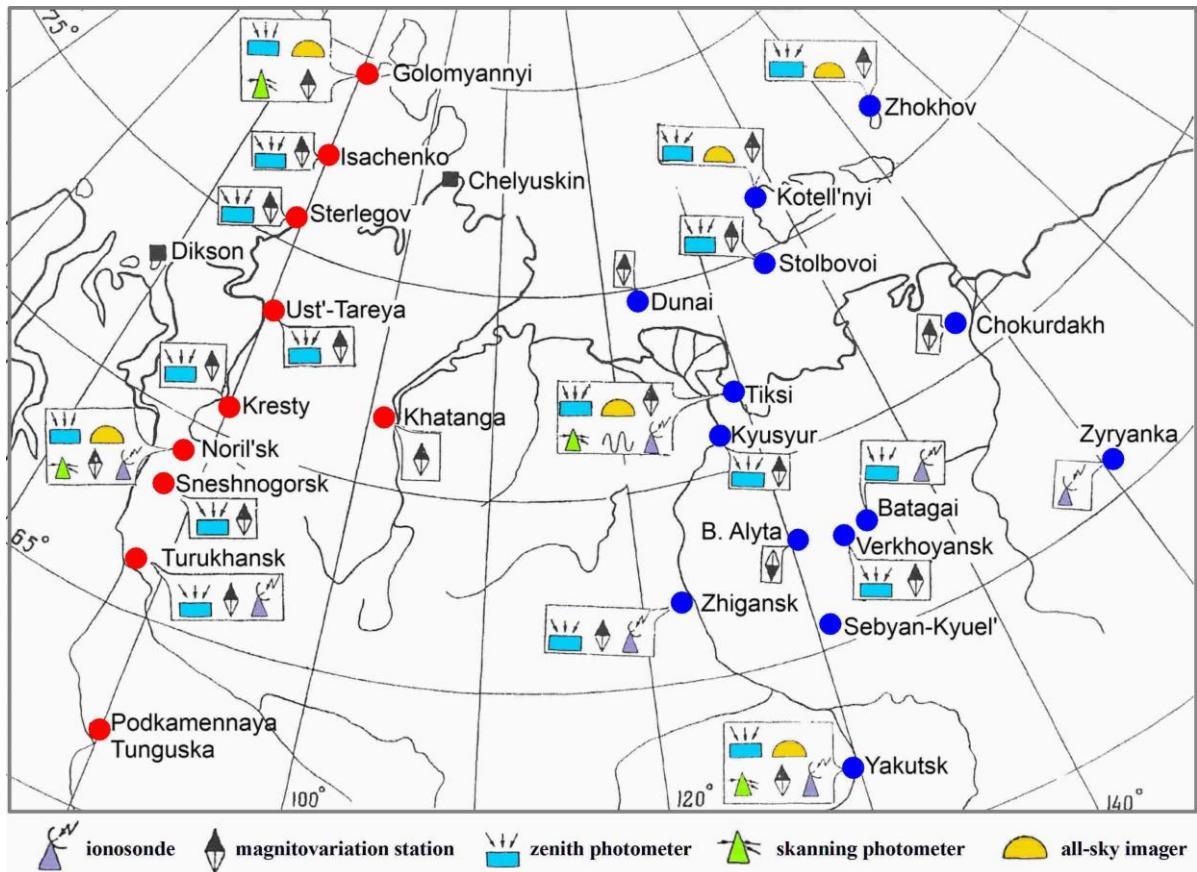


Figure 5. Norilsk and Yakutsk meridional chains of stations. Based on the materials of [Rakhmatullin, 2010]

Observations at the Norilsk and Yakutsk meridional chains of stations in Russia: 1969–1983

To study geophysical phenomena in the upper atmosphere of high latitudes, ISTP SB RAS and SHICRA SB RAS organized synchronous observations at the Norilsk and Yakutsk meridional chains of stations (Figure 5). The observations were conducted as part of the International Magnetospheric Study (IMS) program (1976–1979). From 1969 to 1983, a total of 6 measurements campaigns (expeditions) were organized: 1969 — at the Yakutsk meridian; 1973 — at the Norilsk meridian; 1976 — Siberia-IMS-76, start of synchronous observations at the Yakutsk and Norilsk meridians; 1979 — Siberia-IMS-79; 1982 and 1983 — Taimyr-82. Each expedition had its own scientific program. The observation stations were fitted with the same type of equipment, and the observations were carried out according to a unified coordinated program. The standard set of equipment included magnetovariation station, all-sky camera, zenith photometer, scanning photometer, and ionosonde. The Khatanga station, located to the east of the Norilsk meridian, was used to link observations with data from the Yakutsk meridian chain.

As a result of these observations, we have first of all formulated the principles for organizing meridional chains of stations [Rakhmatullin, 2010, and references therein]:

- stations along the meridian should be positioned with the least scatter in longitude to minimize errors related to longitudinal effects;

- two or three meridional chains are necessary to study longitudinal effects and control the geophysical conditions;

- stations of the chain should be equipped with geophysical instruments of various types, such as magnetometers, ionosondes, photometers, to not only record processes in different geospheres, but also to study their interaction and identify physical mechanisms.

Substorm in geomagnetic pulsations

Observations at meridional chains were essential for understanding the mechanism of a magnetospheric substorm [Rakhmatullin, 2010]. The development of geomagnetic pulsations during substorms was studied in detail. This work was pioneering for that time. And the resultant pattern of the magnetospheric substorm in geomagnetic pulsations has not changed significantly so far. For the first time, the longitudinal and latitudinal dimensions of the sources of Pi2 and Pi1B pulsations were determined, their relation to auroras was shown, and generalized schemes of drifts of pulsation sources were created. Fundamental differences in generation of Pi2 pulsations at auroral and mid-latitudes were found. It was shown that the amplitude and spectral composition of the mid-latitude Pi2 pulsations are controlled by the state of the ionospheric F2 layer.

A method was developed to determine the longitude of substorm development in the auroral zone from parameters of mid-latitude Pi2 pulsations (Figure 6). After the onset, the substorm propagates as a series of successive amplifications of magnetic activity; each occurs north-

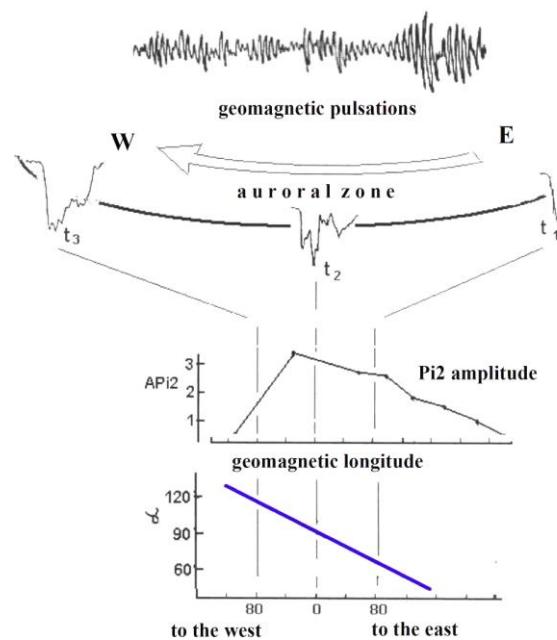


Figure 6. Scheme of substorm development in the auroral zone and in midlatitudes. Based on the materials of [Rakhmatullin, 2010]

west of the previous one and is accompanied by Pi2 generation. The main axis of the Pi2 polarization ellipse is always directed toward the source. With the motion of the substorm disturbance, the polarization axis rotates counterclockwise. Thus, the longitude of the substorm can be determined from the direction of the polarization axis.

Model of ionospheric substorm

According to the data from the Norilsk meridian, a morphological description of the processes in the high latitude ionosphere was made [Zherebtsov et al., 1986; Pirog et al., 1997]. Statistical schemes of ionospheric substorm development north of the MIT in LT- K_p coordinates at different latitudes were constructed, and the effect of solar activity was revealed. In addition, a regional model of critical frequencies of E and F regions for the Norilsk meridian was developed. Complex processing of data from meridional chains made it possible to obtain an equation describing the position of the Main Ionospheric Through (MIT) under different magnetic activity: $\Phi = 150.6 - 5t - 25(0.1K_p^2 - 1.3t + 12.7)^{1/2}$, where Φ is invariant latitude, t is the time counted from midnight, K_p is the geomagnetic activity index.

The extensive experimental material obtained during complex high-latitude expeditions became the basis for further research. Nowadays, we are turning to the expedition archives to confirm this or that experimental fact. The archives also serve as an experimental base for studying long-term trends. The results obtained confirm the effectiveness of meridional chains of geophysical instruments in studying the magnetosphere-ionosphere interactions.

Chinese Meridian Project (CMP)

In China, the concept of the national Meridian Project was proposed in the early 1990s [<http://imcp.ac.cn/en/about/planning/>; <https://www.meridianproject.ac.cn/mcmp/>]. Development of the Chinese Meridian Project

(CMP) began in 2005 [Wang Chi et al., 2020, 2022; <https://www.meridianproject.ac.cn/en/>]. The project rolled into realization stage in 2008 upon being approved by the government as one of the major scientific structures. The Chinese Meridian Project is a ground-based space environment monitoring network. It is a joint effort of more than 10 research institutions and universities in China, led by NSSC CAS. The Project aims to study the propagation processes of disturbances caused by solar activities, from the Sun to the interplanetary space, magnetosphere, ionosphere, until mid-to-upper atmosphere; coupling mechanisms of different space spheres and layers, namely solar atmosphere, inter- planetary space, magnetosphere, ionosphere, and mid-to-upper atmosphere; regional characteristics of the space environment above China's territory, and its relationship with global variations [Wang Chi et al., 2020]. CMP was built in two stages (Figure 7). The Phase I construction began in 2008 and was completed in 2012.

Since 2012, Phase I has been in operation. Phase II started in 2019 and was successfully completed in 2024 [Wang Chi et al., 2020, 2022, 2024]. CMP Phase I consists of 15 ground-based observatories located along 120° E and 30° N (Figure 7, a). Each observatory is equipped with multiple instruments including magnetometers, radars, optical equipment, and sounding rockets to monitor parameters of solar wind, geomagnetic field, middle and upper atmosphere, ionosphere. CMP Phase II has added 16 new stations to Phase I, and thus created a monitoring network of 31 stations and nearly 300 instruments along 100° E and 120° E, and 30° N and 40° N (Figure 7, c). In addition to the usual instruments, Phase II comprises several large and advanced devices including a radio heliograph, an interplanetary scintillation telescope, an MST radar, a new generation tristatic incoherent scatter radar, etc.

CMP and Chinese-Russian Joint Research Center

Within the framework of the Chinese-Russian Joint Research Center, Russian stations have joined the chain of Chinese observatories since 2005 (Figures 4, 7, b). A significant number of joint studies on the ionospheric morphology over the East-Asian region under different levels of solar and magnetic activity have been conducted. Many interesting results have been obtained, some of them are described in the Section "Main scientific results". Comprehensive analysis of data from Chinese-Russian chains allowed clarifying mechanisms of interplanetary, magnetospheric, and thermospheric factors' impact on the ionospheric dynamics. It also allowed evaluating the possibility to use the existing theoretic models for reproducing the spatio-temporal dynamics of the ionosphere and to identify the possible ways of correcting models in order to improve their diagnostic and, in a long run, predictive features. The results are summarized in a collective monograph "Ionospheric disturbances in East-Asian region" [Zherebtsov et al., 2021].

INTERNATIONAL MERIDIAN CIRCLE PROGRAM (IMCP)

The International Meridian Circle Program (IMCP) became an excellent development of the CMP concept

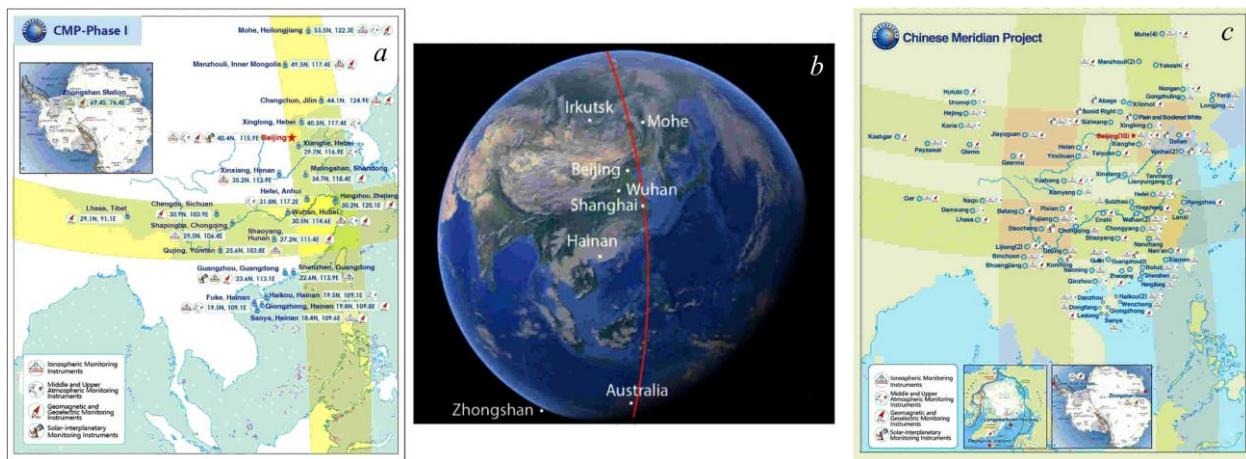


Figure 7. Chinese Meridian Project: Phase I (a) and Phase II (c) [<https://www.meridianproject.ac.cn/bi/>]. Observatories along 120° E making part of the Meridian Space Weather Monitoring Project in 2005 (b) [The 20th Anniversary, 2021]



Figure 8. International Meridian Circle Program (IMCP) [<http://imcp.ac.cn/en/about/objectives/>]

[Liu et al., 2020, 2022; Blanc et al., 2020; Wang Chi et al., 2024; <http://imcp.ac.cn/en/>]. This large and unique project of NSSC CAS was proposed to bring together more than 1000 instrumentation from over 10 countries along the 120° E and 60° W meridians to create a global monitoring network (Figure 8) [<http://imcp.ac.cn/en/about/objectives/>]. The Great Meridian Circle crosses China, Russia, Southeast Asia, Australia, Antarctica, Latin America, the United States, Canada. IMCP aims to conduct all-latitude, all-weather observations of the system formed by near-Earth space, the atmosphere, the Earth surface. It is designed to track propagation of space weather events from the Sun to Earth as well as to monitor various disturbances generated within the Earth system that impact near-Earth space [Liu et al., 2022; Wang Chi et al., 2024].

The instruments deployed along Great Meridian Circle can provide a complete cross-sectional scan of near-Earth space from the ground level up to approximately 3000 km, including density, temperature, magnetic and electric fields, wind fields, planetary waves, and distribution of minor species involved in Global Change [<http://imcp.ac.cn/en/about/sw/>]. Due to Earth's rotation,

this network can give a complete three-dimensional representation of these key near-Earth space parameters every 12 hours. Accumulated over years and decades, this dataset will provide valuable insight on how climate and long-term atmospheric change are influenced by solar and terrestrial energy input. By detecting and tracking short-term anomalies, the network can warn about space weather and terrestrial disasters.

Currently, significant progress has been made on IMCP [Wang Chi et al., 2024]. The IMCP scientific program committee has been formed, and the China-Brazil joint laboratory for space weather has also been established. Networks in the North Pole and Southeast Asia are under construction. IMCP is supported by an array of Chinese and foreign research institutions, as well as international scientific associations such as the European Incoherent Scatter Radar Scientific Association (EISCAT), the Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics (SCOSTEP), and the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) [<http://imcp.ac.cn/en/about/objectives/>].

Moving forward, in addition to the 120° E – 60° W meridian circle, IMCP also plans to establish network



Figure 9. NHC RAS instruments in Eastern Siberia: 1— Large Solar Telescope-Coronagraph; 2 — Multiwave Siberian Radioheliograph; 3 — Complex of Passive Optical Instruments; 4 — Heating Facility; 5 — Data Center; 6 — IS-MST Radar; 7 — Mesostratospheric Lidar

along the 30° E – 150° W meridian circle in collaboration with the International Space Weather Initiative (ISWI) [Wang Chi et al., 2024; Blanc, 2023]. Thousands of IMCP instruments will create a three-dimensional information grid covering five continents. This grid will provide real-time data on near-Earth space, helping to protect our planet from natural and human-made hazards.

NATIONAL HELIOGEOPHYSICAL COMPLEX OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES (NHC RAS)

The National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences (NHC RAS) [Zherebtsov, 2020; <http://ngkran.ru/>] can make a significant contribution to IMCP for mid- and high-latitude observations at 120° E meridian. NHC RAS has been developed and is being created by ISTP SB RAS which has a long history of expertise and operation of large heliogeophysical instruments. In 2014, NHC RAS received the support from the President of the Russian Federation and the Government of the Russian Federation. The complex should provide solutions to the most important problems of solar-terrestrial physics considering the Sun — Earth system as a uniform and interrelated one. The National Heliogeophysical Complex has been developed on the basis of new technical solutions with the use of modern technologies. It integrates unique facilities, instruments, and devices.

The objectives of the National Heliogeophysical Complex RAS are: to get to a new level of development of experimental (ground-based) research in solar-terrestrial physics; to solve urgent fundamental and applied problems in the interest of development of new space technologies. Fundamental research involves studying solar activity (magnetic fields, flares, plasma ejections, etc.) and its ef-

fect on space weather; studying the magnetosphere-ionosphere-atmosphere system and effects imposed on it by solar factors and meteorological and lithospheric processes. Applied research involves studying the effects of space factors on operation of spacecraft and various engineering systems (radio communications, radar, GPS-GLOASS and others); monitoring of near-Earth space, spacecraft and space debris; developing methods for solar activity and near-Earth space monitoring and prediction to the benefit of different consumers.

The NHC RAS includes five large, new generation experimental instruments for research in the field of solar physics and near-Earth space physics [Zherebtsov, 2020; <http://ngkran.ru/>]: Large Solar Telescope-Coronagraph, Multiwave Radioheliograph, Radiophysical Complex for Atmospheric and Ionospheric Research, Network of Coherent Ionospheric Radars, Lidar Optical Complex (Figure 9). Collection, real-time processing, and storage of information from NHC RAS instruments will be performed at the Data Center which will be established in Irkutsk (ISTP SB RAS). At present, the first NHC RAS instruments (Radioheliograph and Optical tools) have commenced their functioning. The development and construction of the Large Solar Telescope and a Radiophysical Complex are underway.

The Large Solar Telescope-Coronagraph (LST-3)

One of the most pressing issues in contemporary solar physics is the observation of the small-scale structure in the solar atmosphere at various heights (including the chromosphere and corona). These observations can only be conducted using large solar telescopes. The Large Solar Telescope-Coronagraph with a mirror 3 m in diameter (LST-3) is designed for observing the solar atmosphere and corona with previously unattainable spatial,

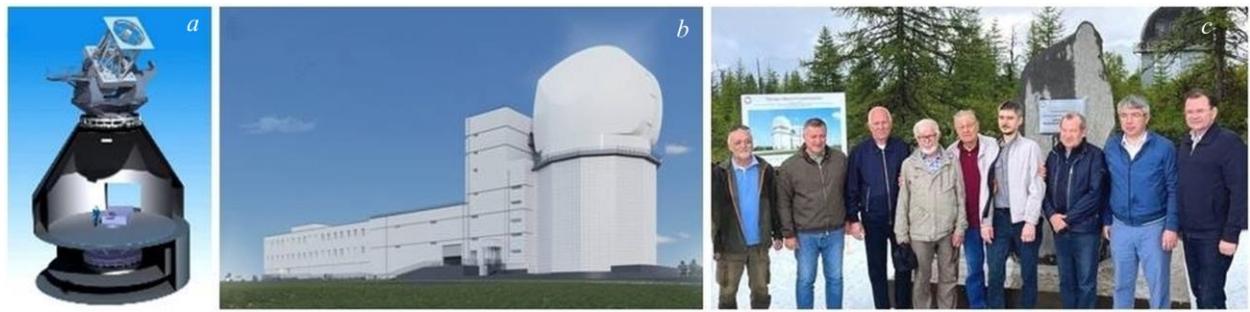


Figure 10. NHC RAS: Large Solar Telescope-Coronagraph. General view of LST-3 (a) and LST-3 building (b). Groundbreaking ceremony of LST-3 on August 5, 2023 (c)

temporal, and spectral resolution [Grigoryev et al., 2020]. Missions of LST-3 include studies of energy release in flares and other dynamic phenomena, heating processes in the corona, the origin of solar magnetism and cyclicity. Operation of LST-3 in coronagraphic mode will allow us to observe space objects such as asteroids and comets near the Sun including hazardous ones in the daytime. The telescope will be installed at the Sayan Solar Observatory, located at an altitude over 2000 m (Figure 10). The choice was made in favor of the classic axisymmetric Gregory optical layout on an alt-azimuth mount. The scientific equipment of LST-3 will consist of several systems of narrow-band tunable filters and spectrographs for various wave ranges. The equipment will be placed both in the main coudé focus on a rotating platform and in the Nasmyth focus. To achieve a diffraction resolution, high-order adaptive optics will be used. It is assumed that with a certain modification of the optical configuration, LST-3 will work as a 0.7 m mirror coronagraph in near infrared lines and can also be used for observing astrophysical objects in the nighttime. The development of LST-3 should make a decisive contribution to our understanding of solar activity, which drives space weather phenomena.

The Multiwave Siberian Radioheliograph

The Multiwave Siberian Radioheliograph (MSRH) performs all-weather monitoring of processes in the solar atmosphere (in the range from meter to millimeter waves, including measurements of the solar activity index at 2.8 GHz) [Altyntsev et al., 2020; <http://badary.iszf.irk.ru>]. This is essential for predicting and diagnosing geoeffective solar activity phenomena. The fundamental research that may be implemented with the radioheliograph includes: topology of coronal magnetic fields during the active and quiet Sun; wave processes and shock waves in the solar atmosphere; evolution of large scale structures in the solar atmosphere during the 11-year solar cycle; regular measurements of radio emission at a wavelength of 10.7 cm; assessment of geoeffectiveness of solar flare parameters; short-term prediction of powerful solar flares with a lead time of 2 to 3 days. MSHR is located at the ISTP SB RAS Radio Astrophysical Observatory (Figure 11, a). This allows us to carry out observations using MSHR in conjunction with the existing instruments. MSHR is an interferometer that produces solar images in the 3–24 GHz frequency range in both circularly-polarized components [Altyntsev et al., 2020]. It con-

sists of three separate antenna arrays, each designed for one frequency band: 3–6 GHz, 6–12 GHz, and 12–24 GHz. The antenna diameters for these bands are 3, 1.8, and 1 m respectively. The numbers of antennas in the arrays are 129, 192, 207. Radioheliograph data is necessary to develop and implement methods of short-term forecast of solar flares, measurements of kinematics and characteristics of coronal mass ejection plasma, forecast of characteristics of fast solar wind streams. All-weather monitoring of explosive processes on the Sun will enable us to solve an important applied problem — to assess their impact on the operation of space facilities, as well as ground-based communication, navigation, radar, and other technological systems. MSHR is already in operation. Figure 11, b–c show solar images obtained with MSHR at three frequencies on September 19, 2023.

The Radiophysical Complex

The Radiophysical Complex (RPhC) for ionospheric and atmospheric research is the largest complex and multifunctional information system in the National Heliogeophysical Complex [Zherebtsov, 2020; Medvedev et al., 2020; Vasilyev et al., 2020a]. RPhC includes the most powerful and promising research instruments: a radio wave incoherent scatter (IS) radar for ionospheric sounding; a mesospheric-stratospheric-tropospheric (MST) radar for sounding the neutral atmosphere; a heating facility for modifying the ionosphere with powerful HF radio waves. This cluster of large tools will be supplemented with a system of small problem-oriented instruments and a meridional chain of stations Norilsk—Irkutsk (ionosondes, magnetometers, photometers, etc.). The IS-MST Radar, which combines capabilities of IS and MST measurements, will be able to cover layers from the troposphere to the plasmasphere (altitude range 10–1500 km) and to study processes of energy transfer from the lower and middle atmosphere to the ionosphere as well as the interaction of the magnetosphere with the upper atmosphere. Apart from atmospheric research, the radar will allow us to track spacecraft and space debris, determining precise coordinate characteristics. The antenna system is also suitable for radio astronomical observations.

RPhC will be located near Lake Baikal in Tazheran steppes [Medvedev et al., 2020]. The RPhC location is unique since the complex will provide important geo-physical data and monitor near-Earth space in the center of Russia, significantly complementing observational data

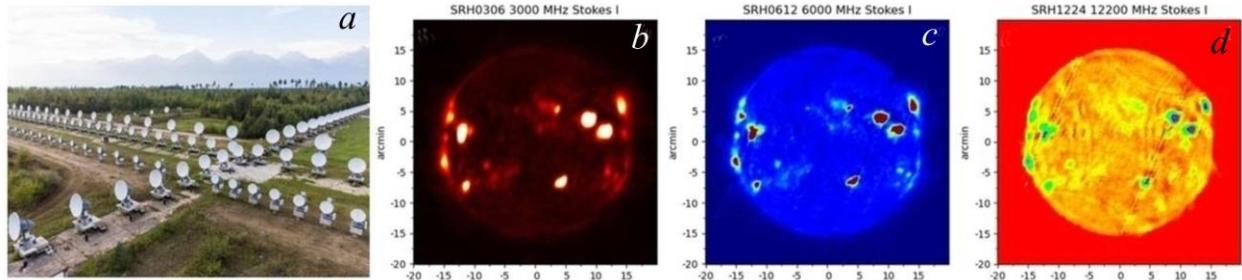


Figure 11. NHC RAS: Multiwave Siberian Radioheliograph. MSRH antenna arrays (a). Solar images at 3.0, 6.0, 12.2 GHz obtained by Radioheliograph on September 19, 2023 (b–d)

acquired by geophysical centers in the USA, Europe, and Japan in studying global distributions of environmental parameters.

The main focus of RPhC studies is on the upper atmosphere (80–1500 km) as one of the most important parts of the Sun — Earth system. The results of the ionospheric and upper atmospheric research with RPhC are important for various fields of science and technology: space and terrestrial radio communications, radar, and navigation; near-Earth space monitoring, including problems of comet and asteroid impact hazards and space debris.

The IS-MST Radar

The IS-MST Radar includes two phased arrays spaced by 100 m and have a tilt of 20° in opposite directions so as to cover as large area as possible (Figure 12) [Medvedev et al., 2020]. The radar operating frequency band is 154–162 MHz, and the peak transmitted power of each array is 1 MW.

Figure 13 shows the main operating modes of RPhC [Medvedev et al., 2020]. The MST mode (Figure 13, a) will be used for diagnostics of dynamics (the neutral wind parameters) in the lower and middle atmosphere. For ionospheric research, we will utilize two operating modes corresponding to two height ranges (below 500 and above 500 km): mode IS-1 for studying interactions in the atmosphere-ionosphere system and multi-parameter diagnostics of the ionospheric plasma (Figure 13, b); mode IS-2 for studying interactions within the ionosphere — plasmasphere system as well as measuring variations in the ion composition and tracks of plasma fluxes (Figure 13, c). The SO monitoring mode will provide monitoring of space objects (SO) such as spacecraft and space debris (Figure 13, d). In the cooperative observation mode (Figure 13, e), an ionospheric region, irradiated by the heater, will be scanned by the IS-MST Radar, optical tools, HF and GNSS receivers; this will ensure comprehensive diagnostics of phenomena occurring upon powerful high-frequency impact on the ionosphere. The passive mode (Figure 13, f), where the radar does not transmit, but detects space signals from various directions, will be useful for radioastronomy observations of radiation from the Sun and space radio sources, as well as for studying radio storms and radio signal scintillations.

The heating facility IKAR-AI

Developed with NHC RAS, the new heating facility IKAR-AI (Irkutsk short-wave antenna array with active

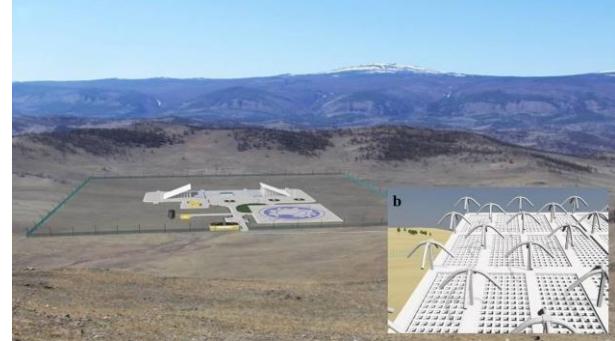


Figure 12. NHC RAS: IS-MST Radar. General view near Lake Baikal (a), antenna of IS-MST Radar (b)

transmitters) takes into account the extensive experience in heating in Russia and abroad [Vasilyev et al., 2020a]. The heating facility is a complex of 60 antennas on an area of 700×700 m (Figure 14, a). IKAR-AI will radiate in a frequency range 2.5–6.0 MHz with an effective power of several hundred megawatts. The proposed frequency band is the best to undertake new research at IKAR-AI. The transfer of shortwave radiation energy to a charged particles in the upper atmosphere is the most effective in the lower band 2.5–3.5 MHz, where the second electron gyrofrequency harmonic is located and where the most intense artificial ionospheric turbulences and optical airglow occur. The upper band part (the 4–6 MHz) allows for the efficient operation of the heating facility periods of higher solar activity, as well as for the use of IKAR-AI as a short-wave radar for ionospheric diagnostics. It is important that the heater will be surrounded by such multifunctional instruments as the incoherent scatter radar, mesostratospheric lidar, optical and radiophysical observational systems that can enable us to diagnose artificial plasma disturbances and artificial airglow structures (Figure 14, b).

Network of Coherent Ionospheric Radars (SECIRA)

Under the NHC RAS project, ISTP SB RAS is deploying the Russian network of coherent ionospheric radars analogous to SuperDARN [Berngardt et al., 2020; Zhrebtskov, 2020]. The Russian radars can make observations over almost the entire territory of the Russian Federation (Figure 15, a) and are capable of studying the magnetosphere-ionosphere coupling, including effects of magnetospheric substorms and geomagnetic storms in mid-latitude and subauroral regions. The project of SECIRA radars has been developed at ISTP SB RAS.

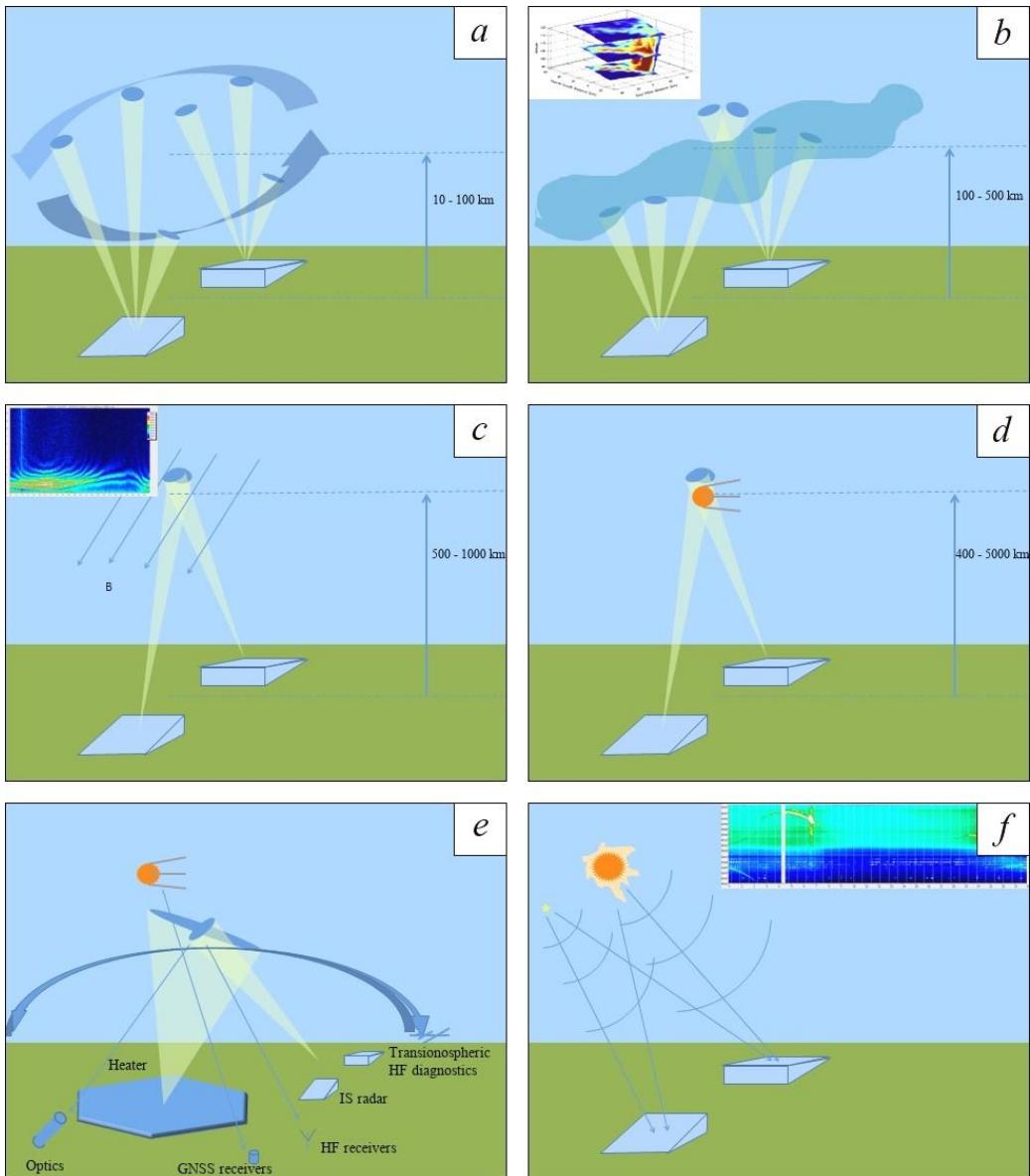


Figure 13. NHC RAS: IS-MST Radar. Operating modes of IS-MST Radar: MST mode (a); IS-1 mode (b); IS-2 mode (c); SO monitoring mode (d); cooperative observation mode (e), radioastronomical (passive) mode (f) [Medvedev et al., 2020]

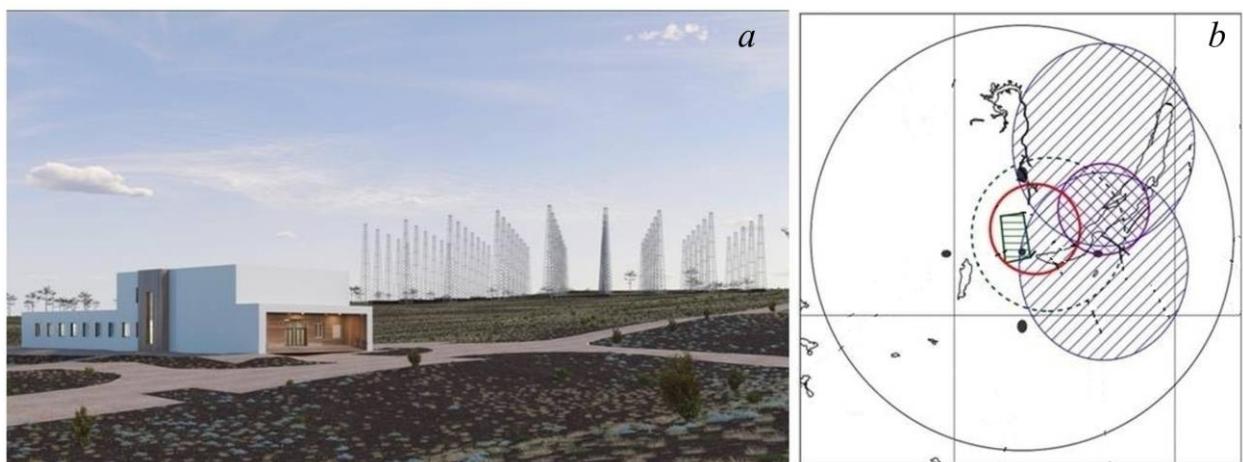


Figure 14. NHC RAS: Heating Facility. General view of the Heating Facility (a). Fields of view of the NHC RAS instruments at an altitude of 250 km are (b): red circle for the Heating Facility; blue ellipses with right hatching for the IS-MST Radar; purple circle with left hatching for the MS lidar; green trapezium with horizontal hatching for the existing Irkutsk IS-radar; green dashed circle for the existing ionosonde DPS-4; black circle for the all-sky camera; gray ellipses for the Fabry — Perot interferometer [Vasilyev et al., 2020a]

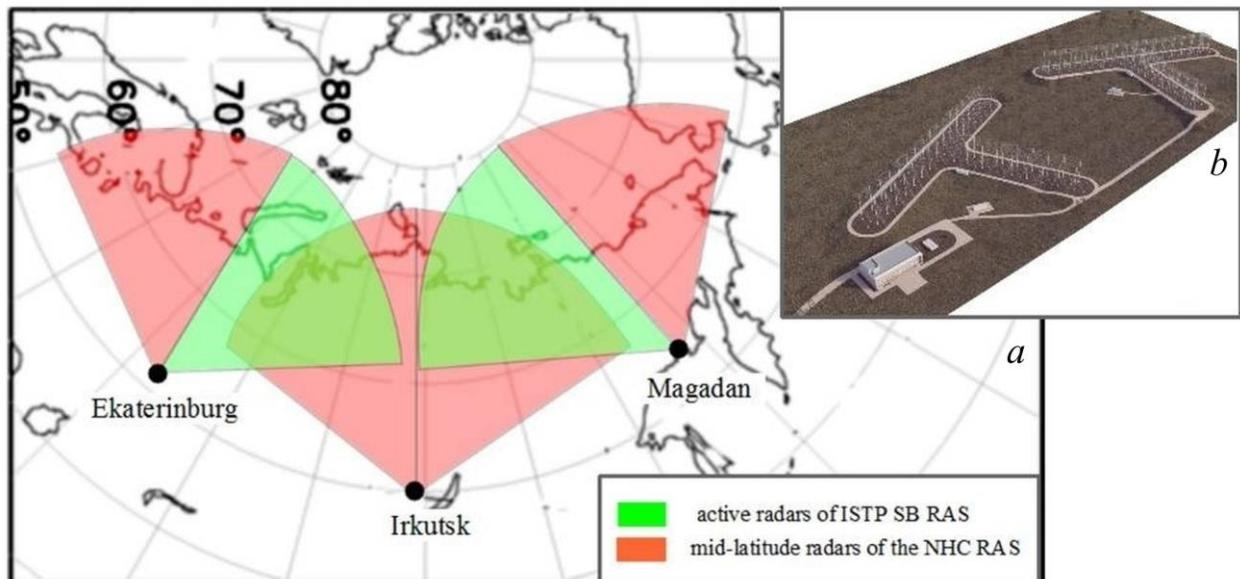


Figure 15. NHC RAS: Network of Coherent Ionospheric Radars. Position of coherent radars and their fields of view (a). General view of coherent radar of NHC RAS (b)

The radar is based on fully digital generation and receiving of signals, which is currently the major approach in developing new radars [Berngardt et al., 2020].

Unlike SuperDARN radars, SECIRA radars will have T-shaped phased antenna arrays (PAA) (Figure 15, b). Each PAA consists of 16 transmitting/receiving and 8 receiving antennas arranged in two perpendicular linear phased arrays. The distance between antennas (~ 15 m) coincides with distances in SuperDARN PAA. The maximum radiation power of each antenna is 1 kW. The SECIRA PAA geometry allows us to minimize the problems associated with the phase uncertainty of the received signal, as well as to consistently identify signals coming from the back lobe. The Russian system of coherent radars provides studies in several major areas: solar wind interaction with the magnetosphere and ionosphere; internal atmospheric waves; scattering by meteors and mesospheric winds; natural and artificial plasma irregularities. The Russian SECIRA network will also provide the solution to the following applied problems: continuous monitoring of ionospheric disturbances in sub-polar regions affecting the various technological systems; monitoring of the auroral oval boundary for efficient prediction of blackouts in high-frequency radio channels and optimal operating frequencies under different geophysical conditions; near real-time diagnostics of wave ionospheric disturbances as most unpredictable factor of disturbances for communication and navigation systems.

Lidar Optical Complex (LOC)

Lidar Optical Complex (LOC) is designed to study profile characteristics of physical parameters (temperature, density, wind) and composition (gas components, aerosol) of the middle and upper atmosphere, which are formed under the influence of natural processes and anthropogenic impacts [Matvienko et al., 2020; Vasilyev et al., 2020b]. The optical complex combines active laser systems [Matvienko et al., 2020] and passive optical instruments for recording the atmospheric emission [Vasilyev et al.,

2020b]. The Lidar Optical Complex will allow solving basic problems in atmospheric research at different altitudes, along with important practical problems in the field of environmental ecology and global climate change.

The mesostratospheric lidar

The study of the upper atmosphere, including the mesosphere and the thermosphere, requires lidar systems with large optics and high-power lasers. Such a mesostratospheric (MS) lidar (Figure 16) will be developed as part of NHC RAS with the use of theoretical and experimental developments, received at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IAO SB RAS) [Matvienko et al., 2020]. The MS lidar should allow us to measure profiles of thermodynamic parameters of the atmosphere and distribution of the aerosol-gas composition in the altitude range 10–100 km. The proposed version of the MS lidar utilizes different laser sources within 350–1100 nm range and corresponding narrowband high-sensitivity detectors of lidar signals. The wide spectral range is necessary for realizing various laser sensing methods when obtaining information about remote atmospheric layers. The problem of combining various measurement methods for one receiving antenna will be solved by spectral selection and using the multilobe antenna pattern.

The passive optical instrument

The passive optical instruments (Figure 17) include [Vasilyev et al., 2020b] Fabry—Perot interferometers with diameter of etalon 70 mm, equipped with automatically interchangeable light filters and an automatically controlled periscope input window having a sensitivity sufficient to detect wind and temperature variations in the upper atmosphere at a level of 5 m/s and 5 K respectively; all-sky cameras with spatial resolution $\sim 0.1^\circ$ – 0.5° and sensitivity in several Rayleigh, equipped with automatically interchangeable light filters; high-speed photometers with a field of view of $\sim 10^\circ$ and time resolution of 1 ms; diffraction spectrometers in visible and infrared spectral ranges with ~ 0.1 nm spectral resolution and sensitivity sufficient to observe variations

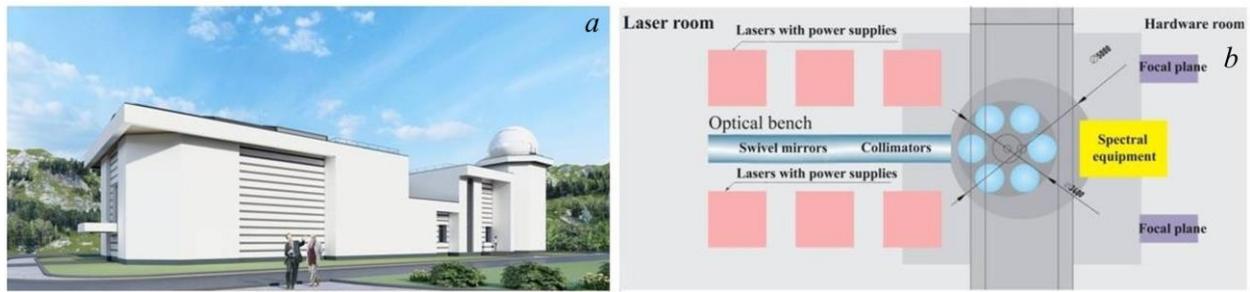


Figure 16. NHC RAS: Mesostratospheric lidar. General view of MS lidar building (a); arrangement of the main elements of the MS lidar (b) [Matvienko et al., 2020]



Figure 17. NHC RAS: Complex of passive optical instruments at GPO ISTP RAS. Building (a); an all-sky camera in the dome space (b); SAR-arcs detected with the all-sky camera at a wavelength of 630 nm during the April 23, 2023 strong geomagnetic storm (c)



Figure 18. NHC RAS: Data Center. General view of Data Center building

in the intensity of lines in several Rayleigh. The complex of passive optical instruments has been put into operation and carries out regular measurements at the Geophysical Observatory of ISTP SB RAS (GPO ISTP RAS). Figure 17, *c* shows SAR-arcs detected at GPO ISTP RAS (midlatitudes) with an all-sky camera at a wavelength of 630 nm during the April 23, 2023 strong geomagnetic storm.

The Data Center

The Data Center to be established in Irkutsk will provide collection, real-time processing, and storage of

data from NHC RAS instruments; it will also allow for data transfer to users (Figure 18). Its computing power and hardware as well as software architecture should ensure compliance with the requirements for speed, storage capacity (at least 100000 terabytes per year), generation of necessary warnings, indices, and other indicators of the state of the Sun and near-Earth space.

The main goals of Data Center are: carrying out experiments to the benefits of scientific organizations (Shared Equipment Center); preparing data products for end users (customers); space weather conditions: warnings and alarms for consumers; online control of working

modes of the instruments of NHC RAS; collecting data from NHC RAS instruments; data processing; data storage.

The National Heliogeophysical Complex will facilitate the transition to a qualitatively new level of development of basic and applied research in solar-terrestrial physics, and ensure high-level implementation of these works for the next 25–30 years. The geographical location of the complex, its multifunctionality and technical equipment will allow Russian scientists to participate in international programs including IMCP and the Chinese-Russian Joint Research Center.

CONCLUSION

The foundation of the Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather in 2000 reflected the main trends in society and science. The center's activities focus on addressing fundamental issues in modern solar-terrestrial physics, such as quantitative description of the processes in complex interconnected system Sun — interplanetary medium — magnetosphere — ionosphere — atmosphere, assessment of capabilities of predicting interactions within this system, development of effective models for forecasting the state of the atmosphere and near-Earth space. The Joint Research Center is aimed at the study of all major space weather events from the Sun to the magnetosphere, ionosphere, and atmosphere.

In 2024, the Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather celebrated its 24th anniversary. We have been working together for two solar cycles already. Founded by ISTP SB RAS and NSSC CAS, the Joint Research Center has united more than 10 scientific institutes in Russia and China. About 60 scientific projects have been implemented and more than 400 joint scientific articles have been published. As part of the Joint Research Center's work, the following important results were obtained. Simultaneously at the Siberian Solar Radio Telescope (Russia) and the Huairou Solar Observing Station (China), zebra patterns in the microwave range were recorded for the first time. This allowed us to determine not only spectral, but also spatial characteristics of the event. For the first time, data was collected on the evolution of wave processes in small angular solar magnetic structures linked to umbral flashes. The spatial patterns of the magnetic helicity reversals in the Sun were shown to reflect the processes which contribute to generation and evolution of the large-scale magnetic fields. New patterns of Earth's magnetosphere saturation process were obtained: stopping the growth of the electromagnetic energy flux through the magnetosphere boundary and the polar cap from the solar wind with its unusual intensification during superstorms. Local empirical models of regular ionospheric variations at high, mid-, and low latitudes were created based on long-term ionospheric measurements with vertical sounding ionosondes in Norilsk, Irkutsk and on Hainan island. Coordinated studies of the ionospheric effects of geomagnetic storms in 2000–2017 were performed at the meridional chain of ionospheric stations in Russia and China. The medium-latitude ionosphere was found to exhibit properties of high-latitude ionosphere during superstorms. Additionally, there are differences in the

East Asian ionospheric response to geomagnetic storms at high and low solar activity. Furthermore, there is longitudinal alternation of positive and negative ionospheric response during the recovery phase of some storms.

The future work of the Joint Research Center will be closely linked to the implementation of major unique projects in China and Russia: the International Meridian Circle Program (IMCP) led by NSSC CAS, and the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences (NHC RAS) led by ISTP SB RAS.

IMCP connects 120° E and 60° W meridian chains of ground-based observatories to enhance the ability to monitor space environment worldwide. Currently, institutes from more than 10 countries (in particular China, Russia, Brazil, Australia, Canada) as well as some international scientific associations (EISCAT, SCOSTEP, SuperDARN) participate in the program. IMCP is designed to track propagation of space weather events from the Sun to Earth as well as to monitor various disturbances generated within the Earth system that impact near-Earth space. The IMCP observation system will provide monitoring and better understanding of the interactions between solar activities and terrestrial processes.

NHC RAS is a complex of large heliogeophysical instruments of new generation. NHC RAS is being deployed by ISTP SB RAS in the Eastern Siberia. The complex includes five big scientific instruments: Large Solar Telescope-Coronagraph, Multiwave Radioheliograph, Radiophysical Complex for Atmospheric and Ionospheric Research, Network of Coherent Ionospheric Radars, Lidar Optical Complex. NHC RAS should provide solutions to the most important problems of solar-terrestrial physics, considering the Sun — Earth system as a uniform and interrelated one. NHC RAS is aimed at studying solar activity and its impact on space weather; studying the magnetosphere — ionosphere — atmosphere system and effects imposed on it by solar factors and meteorological and lithospheric processes; studying the effects of space factors on operation of spacecraft and various engineering systems; monitoring of near-Earth space, spacecraft and space debris; developing methods for solar activity and near-Earth space monitoring and prediction to the benefit of different consumers. NHC RAS can make a significant contribution to IMCP for observations at middle and high latitudes at 120° E meridian.

We would like to thank all those who took part in establishment of the Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather, and facilitated its successful work.

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

REFERENCES

- Altyntsev A.T., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Rudenko G.V., Yan Yihua. On the origin of microwave zebra pattern. *Astron. Astrophys.* 2005a, vol. 431, pp. 1037–1046. DOI: [10.1051/0004-6361:20048337](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20048337).
- Altyntsev A.T., Kuznetsov A.A., Meshalkina N.S., Yan Yihua. Observations of “zebra” pattern in cm-range with spatial resolution. *Adv. Space Res.* 2005b, vol. 35, pp. 1789–1794. DOI: [10.1016/j.asr.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.01.018).
- Altyntsev A.T., Lesovoi S.V., Globa M.V., Gubin A.V., Kochanov A.A., Grechnev V.V., Ivanov E.F., et al. Mul-

- tiwave Siberian Radioheliograph. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 30–40. DOI: [10.12737/stp-62202003](https://doi.org/10.12737/stp-62202003).
- Berngardt O.I., Kurkin V.I., Kushnarev D.S., Grkovich K.V., Fedorov R.R., Orlov A.I., Kharchenko V.V. ISTP SB RAS decameter radars. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 63–73. DOI: [10.12737/stp-62202006](https://doi.org/10.12737/stp-62202006).
- Blanc M., Bounhir A., Donovan E., and 31 co-authors. Science objectives and observation system for the International Meridian Circle. *Taikong ISSI-BJ Magazine*. 2020, no. 19.
- Blanc M. The International Meridian Circles Program. A major opportunity for science, space weather monitoring and international collaboration. *CEDAR Workshop 2023*, San Diego, June 25–30, 2023.
- Demidov M.L., Wang X.F., Wang D.G., Deng Y.Y. On the Measurements of full-disk longitudinal magnetograms at Huairou Solar Observing Station. *Solar Phys.* 2018, vol. 293, A146. DOI: [10.1007/s11207-018-1366-6](https://doi.org/10.1007/s11207-018-1366-6).
- Grigoryev V.M., Demidov M.L., Kolobov D.Yu., Pulyaev V.A., Skomorovsky V.I., Chuprakov S.A. AMOS team. Project of the Large Solar Telescope with mirror 3 m in diameter. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 14–29. DOI: [10.12737/stp-62202002](https://doi.org/10.12737/stp-62202002).
- Hong Gao, Jiyao Xu, Mikhalev A.V., Wei Yuan, Medvedeva I.V. The estimate of the peak density of atomic oxygen between 2000 and 2004 at 52° N. *Proc. SPIE*. 2009, vol. 7296, 72960M, pp. 72960M-1–72960M-6. DOI: [10.1117/12.823817](https://doi.org/10.1117/12.823817).
- Hu Y.Q., Peng Z., Wang C., Kan J.R. Magnetic merging line and reconnection voltage versus IMF clock angle: Results from global MHD simulations. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A08220. DOI: [10.1029/2009JA014118](https://doi.org/10.1029/2009JA014118).
- Liu W., Wang C., Shen X., Wu J., Blanc M., Yan Y., Fu S., et al. Yang F. International Meridian Circle Program. *Chin. J. Space Sci.* 2020, vol. 40, no. 5, pp. 723–725. DOI: [10.11728/cjss2020.05.723](https://doi.org/10.11728/cjss2020.05.723).
- Liu W., Blanc M., Wang C., Xu J., Li H., Ren L., Liu Z., et al. Progress of International Meridian Circle Program. *Chin. J. Space Sci.* 2022, vol. 42, no. 4, pp. 584–587. DOI: [10.11728/cjss2022.04.yg10](https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg10).
- Matvienko G.G., Marichev V.N., Bobrovnikov S.M., Yankovlev S.V., Chistilin A.Yu., Sautkin V.A. Mesostratospheric lidar for the heliogeophysical complex. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 74–83. DOI: [10.12737/stp-62202007](https://doi.org/10.12737/stp-62202007).
- Medvedev A.V., Potekhin A.P., Setov A.G., Kushnarev D.S., Lebedev V.P. All-atmosphere IS-MST radar. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 41–48. DOI: [10.12737/stp-62202004](https://doi.org/10.12737/stp-62202004).
- Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Yu., Han J.P., Wang C. Saturation of the Poynting flux and the finite compressibility of the magnetosphere during superstorms: Results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, pp. 6734–6741. DOI: [10.1002/2016GL069649](https://doi.org/10.1002/2016GL069649).
- Pipin V.V., Zhang H., Sokoloff D.D., Kuzanyan K.M., Gao Y. The origin of the helicity hemispheric sign rule reversals in the mean-field solar-type dynamo. *Monthly Not. Royal Astron. Soc.* 2013, vol. 435, pp. 2581–2588. DOI: [10.1093/mnras/stt1465](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1465).
- Pirog O.M., Besprozvannaya A.S., Shchuka T.I. Dependence of the location of the main ionospheric through poleward edge on geomagnetic activity indexes and IMF parameters. *Studies on Geomagnetism, Aeronomy, and the Physics of the Sun*. 1997, vol. 105, pp. 122–128. (In Russian).
- Pirog O.M., Polekh N.M., Romanova E.B., Zhrebtssov G.A., Shi J.K., Wang X. Study of ionospheric response to magnetic superstorms in the East Asian sector. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010, vol. 72, no. 2-3, pp. 164–175. DOI: [10.1016/j.jastp.2009.11.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.11.004).
- Rakhmatullin R.A. Substorm in geomagnetic pulsations. Experiments at meridional chains of stations on the Eurasian continent in 1973–2003. *Thesis for the degree of Doctor of Science (Phys&Math)*. Irkutsk, 2010, 312 p. (In Russian).
- Ratovsky K.G., Shi J.K., Oinats A.V., Romanova E.B. Comparative study of high-latitude, mid-latitude and low-latitude ionosphere on basis of local empirical models. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, no. 3, pp. 509–516. DOI: [10.1016/j.asr.2014.02.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.02.019).
- Shi J.K., Wang G.J., Reinisch B.W., Shang S.P., Wang X., Zhrebtssov G.A., Potekhin A. Relationship between strong range spread F and ionospheric scintillations observed in Hainan from 2003 to 2007. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A08306. DOI: [10.1029/2011JA016806](https://doi.org/10.1029/2011JA016806).
- Sych R., Wang M. Fine wave dynamics in umbral flash sources. *Astron. Astrophys.* 2018, vol. 618, id. A123. DOI: [10.1051/0004-6361/201732139](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732139).
- The 20th Anniversary of China-Russia Joint Research Center on Space Weather. Irkutsk, Vostsibpechat Publ., 2021, 234 p.
- Vasilyev R.V., Setov A.G., Frolov V.L., Ratovsky K.G., Beletsky A.B., Oinats A.V., Yasyukevich Yu.V., Medvedev A.V. Modern heating facility for research into the mid-latitude ionosphere. *Sol.-Terr. Phys.* 2020a, vol. 6, iss. 2, pp. 49–62. DOI: [10.12737/stp-62202005](https://doi.org/10.12737/stp-62202005).
- Vasilyev R.V., Artamonov M.F., Beletsky A.B., Zorkaltseva O.S., Komarova E.S., Medvedeva I.V., Mikhalev A.V., et al. Scientific goals of optical instruments of the National Heliogeophysical Complex. *Sol.-Terr. Phys.* 2020b, vol. 6, iss. 2, pp. 84–97. DOI: [10.12737/stp-62202008](https://doi.org/10.12737/stp-62202008).
- Wang C., Han J.P., Li H., Peng Z., Richardson J.D. Solar wind-magnetosphere energy coupling function fitting: Results from a global MHD simulation. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 6199–6212. DOI: [10.1002/2014JA019834](https://doi.org/10.1002/2014JA019834).
- Wang Chi, Chen Zhiqing, Xu Jiyao. Introduction to Chinese Meridian Project — Phase II. *Chin. J. Space Sci.* 2020, vol. 40, no. 5, pp. 718–722. DOI: [10.11728/cjss2020.05.718](https://doi.org/10.11728/cjss2020.05.718).
- Wang Chi, Xu Jiyao, Lu Daren, Yue Xinan, Xue Xianghui, Chen Gang, Yan Jingye, et al. Construction Progress of Chinese Meridian Project Phase II. *Chin. J. Space Sci.* 2022, vol. 42, no. 4, pp. 539–545. DOI: [10.11728/cjss2022.04.yg09](https://doi.org/10.11728/cjss2022.04.yg09).
- Wang Chi, Michel Blanc, Zhang Shunrong, Denardini Clezio Marcos, Liu William, Shen Xuhui, Wu Jian, et al. Progress of International Meridian Circle Program. *Chin. J. Space Sci.* 2024, vol. 44, no. 4, pp. 1–5. DOI: [10.11728/cjss2024.04.2024-yg24](https://doi.org/10.11728/cjss2024.04.2024-yg24).
- Yuan D., Nakariakov V.M., Huang Z., Li B., Su J., Yan Y., Tan B. Oscillations in a sunspot with light bridges. *Astrophys. J.* 2014, vol. 792, no. 1. DOI: [10.1088/0004-637X/792/1/41](https://doi.org/10.1088/0004-637X/792/1/41).
- Zherebtsov G.A., Pirog O.M., Razuvaev O.I. Structure and dynamics of the high-latitude ionosphere. *Studies on Geomagnetism, Aeronomy, and the Physics of the Sun*. 1986, vol. 76, pp. 165–177. (In Russian).
- Zherebtsov G.A. Complex of heliogeophysical instruments of new generation. *Sol.-Terr. Phys.* 2020, vol. 6, iss. 2, pp. 3–13. DOI: [10.12737/stp-62202001](https://doi.org/10.12737/stp-62202001).
- Zherebtsov G.A., Shi Jiankui, Perevalova N.P., Polekh N.M., Zolotukhina N.A. *Ionospheric disturbances in East-Asian region*. Moscow, GEOS Publ., 2021, 339 p.
- URL: <http://imcp.ac.cn/en/about/planning/> (accessed March 10, 2025).
- URL: <https://www.meridianproject.ac.cn/mcmp/> (accessed March 10, 2025).
- URL: <https://www.meridianproject.ac.cn/en/> (accessed March 10, 2025).
- URL: <https://www.meridianproject.ac.cn/bi/> (accessed March 10, 2025).
- URL: <http://imcp.ac.cn/en/about/objectives/> (accessed March 10, 2025).
- URL: <http://imcp.ac.cn/en/> (accessed March 10, 2025).
- URL: <http://imcp.ac.cn/en/about/sw/> (accessed March 10, 2025).

URL: <http://ngkran.ru/> (accessed March 10, 2025).

URL: <http://badary.iszf.irk.ru> (accessed March 10, 2025).

15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.

Как цитировать эту статью:

Medvedev A.V., Zhrebtsov G.A., Perevalova N.P. Chinese-Russian Joint Research Center on Space Weather: Results and prospects. *Солнечно-земная физика*. 2005, т. 11, №. 3, с. 108–124. DOI: [10.12737/szf-113202512](https://doi.org/10.12737/szf-113202512).

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЭЛЕЯ—ТЕЙЛОРА КАК ТРИГГЕР СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

THE RAYLEIGH—TAYLOR INSTABILITY AS A TRIGGER OF SOLAR FLARES

А.В. Степанов

Главная (Пулковская) астрономическая
обсерватория РАН,
Санкт-Петербург, Россия, stepanov@gaoran.ru
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия

В.В. Зайцев

Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
Нижний Новгород, Россия, za130@ipfran.ru

A.V. Stepanov

Central Astronomical Observatory at Pulkovo,
St. Petersburg, Russia, stepanov@gaoran.ru
Ioffe Institute,
St. Petersburg, Russia

V.V. Zaitsev

Institute of Applied Physics RAS,
Nizhny Novgorod, Russia, za130@ipfran.ru

Аннотация. Обзор работ авторов посвящен фундаментальной роли неустойчивости Рэлея—Тейлора (НРТ) как триггера вспышечного энерговыделения. Исследованы два случая НРТ: вблизи оснований корональной магнитной петли и в ее вершине. В первом случае требуется предварительный нагрев хромосферной плазмы, который может быть вызван джоулевой диссипацией в частично ионизированной плазме при сопротивлении Каулинга. НРТ в вершине петли обусловлена расположенным над ней протуберанцем. Определены условия развития НРТ как триггера вспышки в этих двух случаях. Показано, что НРТ возбуждает сверхдрайсеровское электрическое поле в хромосферных основаниях петли. Этим можно объяснить громадное количество ускоренных во вспышке частиц. Неустойчивость Рэлея—Тейлора является также причиной появления быстрых (~10 с) предвестников вспышек.

Ключевые слова: Солнце, триггер вспышек, джоулева диссипация, ускорение частиц.

Abstract. The review of authors' papers is devoted to the essential role of the Rayleigh—Taylor instability (RTI) as a trigger of flare energy release. We have analyzed two cases of RTI: near coronal loop footpoints and at the loop top. RTI near loop footpoints requires pre-heating of chromospheric plasma. This pre-heating can be realized due to Joule dissipation in partially ionized plasma under condition of the Cowling resistivity. RTI at the loop top arises in current-carrying coronal loop loaded by prominence. We have determined the conditions of RTI as a flare trigger in both cases. It is shown that RTI generates super-Dreicer electric field in the chromospheric parts of a loop. This is the promising solution of longstanding “number problem” of particle acceleration. RTI can be also a cause of prompt (~10 s) hot onset precursor events (HOPE).

Keywords: Sun, flare trigger, Joule dissipation, particle acceleration.

ВВЕДЕНИЕ

Эпиграфом к настоящей обзорной статье являются слова Корнелиса де Ягера (C. de Jager) “Flares are different”. В самом деле, наблюдаемое разнообразие вспышек не укладывается в прокрустово ложе стандартной модели. В последние десятилетия выяснилось, что в большинстве вспышек нагрев вспышечной плазмы происходит до появления жесткого рентгеновского излучения, вызываемого ускоренными во вспышке электронами [Veronig et al., 2002; Sharykin, Kosovichev, 2015; Мешалкина, Алтынцев, 2024]. Более того, в ряде случаев наблюдается необычно быстрый (~10 с) предвспышечный нагрев хромосферной плазмы в основаниях корональных магнитных петель до 10–15 МК [Hudson et al., 2021]. Природе предвестников быстрого нагрева (Hot Onset Precursor Events, HOPE) посвящен целый ряд современных работ (см., например, [da Silva et al., 2023; Battaglia et al., 2023]). Тем не менее, до настоящего времени не определен механизм такого быстрого нагрева.

Неясным в физике солнечных вспышек остается проблема объяснения громадного количества ускоренных во вспышке заряженных частиц [Hoonyng et al., 1976]. Установлено, что солнечная вспышка в импульсной фазе производит $\sim 10^{37}$ энергичных (>20 кэВ) электронов в секунду, а общее число таких электронов за время импульсной фазы (~100 с) составляет 10^{39} [Miller et al., 1997]. Это превышает число тепловых электронов в корональной части магнитной петли: $(1\div 5)10^{37}$ [Emslie, Hénon, 1995]. В гигантских вспышках число электронов с энергией >20 кэВ может достигать 10^{41} [Kane et al., 1995], т. е. вся плазма во вспышечной петле должна находиться в режиме ускорения. Одним из возможных решений такой проблемы является ускорение в более плотных слоях солнечной атмосферы.

Важной проблемой является определение триггера солнечных вспышек. В литературе обсуждался целый ряд возможных триггеров вспышек: тепловой триггер [Sytovatckii, 1976; Ledentsov, 2021], топологический

триггер [Somov, 2008; Kusano et al., 2012], взаимодействие магнитных петель [Kumar et al., 2010], триггер-протуберанец [Pustil'nik, 1974; Zaitsev, Stepanov, 1992]. В настоящей работе мы исследуем роль неустойчивости Рэля—Тейлора (НТР) как триггера солнечной вспышки в типичной магнитной конфигурации — токонесущей вспышечной петле. Будут рассмотрены два случая развития НТР: вблизи оснований петли и в ее вершине вследствие активности протуберанца. Мы изучим также два важных следствия развития НТР как триггера вспышки: нагрев плазмы из-за джоулевой диссипации и ускорение заряженных частиц.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РЭЛЕЯ—ТЕЙЛORA В ОСНОВАНИИ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛИ

Мы исходим из представления вспышечной петли в виде эквивалентного электрического контура [Alfvén, Carlqvist, 1967], когда электрический ток генерируется за счет конвективных движений фотосферы, а замыкание текущего по петле тока происходит либо через фотосферу на уровне $\tau_{5000}=1$ [Zaitsev, Stepanov, 1992; Zaitsev et al., 2020], либо через поверхность петли [Melrose, 1991]. На рис. 1 схематически показано основание вспышечной петли, расположенной в частично ионизованной хромосфере. НТР вызвана наличием центробежного ускорения при подходящей кривизне магнитного поля с радиусом R_c [Zaitsev, Stepanov, 2015]:

$$\vec{g}_c = \frac{\vec{f}_c}{\rho} = \frac{2k_B T}{m_i R_c^2} \frac{n}{n+n_a} \vec{R}_c, \quad (1)$$

где ρ — плотность плазмы; k_B — постоянная Больцмана; T — температура плазмы на внешней границе трубы; n, n_a — концентрации электронов и нейтральных атомов соответственно. Подходящая кривизна магнитного поля петли формируется в области резкого увеличения ширины петли из-за уменьшения внешнего давления, поэтому вертикальный размер области НТР можно оценить как $l \approx (0.5 \div 1.0) 10^8$ см. На внешнюю границу трубы действует также градиент динамического давления конвективного потока $-m_i(n+n_a)\partial V_r^2/\partial r$. Полагая $V_r(r, t) = -V_0(t)r/a$ получим условие развития НТР (баллонная мода) $g_c + \frac{2V_0^2}{a} \sin \theta - g \cos \theta > 0$, которое при $H(z) = \frac{k_B T_e(z)}{m_i g} > a(z)$ принимает вид [Zaitsev, Stepanov, 2015]:

$$\frac{nT}{2(n+n_a)T_e} + \frac{8HV_0^2(t)}{a^2 g} > 1. \quad (2)$$

Здесь T_e — температура внутри магнитной трубы; g — ускорение силы тяжести на Солнце. Из (2) следует, что баллонная неустойчивость развивается при нагреве внешней оболочки трубы и при резком возрастании скорости конвективного потока плазмы

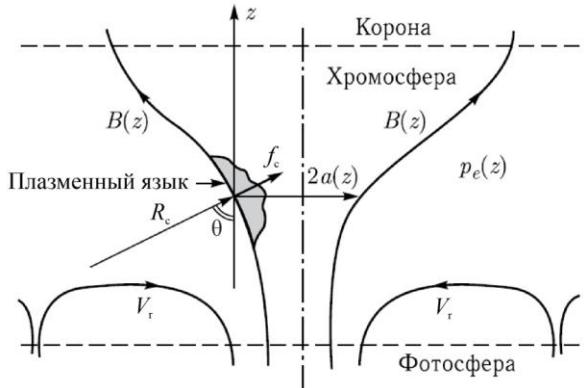


Рис. 1. Схема инъекции плазмы из хромосферы в основание магнитной петли при развитии НТР: f_c — центробежная сила; $a(z)$ — радиус магнитной трубы; p_e — внешнее газовое давление; θ — угол между направлением радиуса кривизны и вертикалью [Zaitsev, Stepanov, 2015]

(динамическая сила). Для определения температуры, до которой следует нагреть внешнюю оболочку, можно воспользоваться модифицированной формулой Саха для атома водорода [Brown, 1973]:

$$\frac{(n+n_a)x^2}{1-x} = 7.2 \cdot 10^{18} T^{1/2} \exp\left(-6.583 - \frac{1.185 \cdot 10^5}{T}\right), \quad (3)$$

где $x = n/(n+n_a)$ — степень ионизации. Из (3) следует, что для хромосферного слоя с плотностью $n+n_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ критерий неустойчивости (2) выполняется при относительно малых значениях скорости потока плазмы $V_0(t)$ если оболочка трубы нагрета до температуры $T \approx 2.5 \cdot 10^4$ К. Тогда степень ионизации x достигает 90 %, а критерий неустойчивости принимает вид $xT/(2T_c) \approx 2.6 > 1$. В этом случае характерное время НТР в магнитной трубке с радиусом $a \approx (3 \div 5)10^7$ см

$$\tau_{\text{NT}} \approx (3^{3/2} a T_e / 4\pi T g)^{1/2} \approx 10 \text{ с.} \quad (4)$$

Эта величина порядка a/V_{T_i} за которое язык внешней плазмы с тепловой скоростью ионов проникает в магнитную трубку.

Неустойчивость Рэля—Тейлора вызывает возмущение магнитного поля петли и сжатие токового канала, приводящее к усилению тока и его повышенной диссипации, обусловленной столкновениями ионов с нейтральными частицами плазмы хромосферы.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ИНДУЦИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Ускорение заряженных частиц электрическим полем наиболее эффективно. При вторжении в основание петли языка хромосферной плазмы со скоростью $V_r(r, t) = -V_0(t)r/a$ компоненты магнитного поля B_z и $B_\phi = 2I/(ca)$, следовательно, и ток, согласно уравнению $\partial \vec{B} / \partial t = \text{rot} [\vec{V} \times \vec{B}]$, эволюционируют следующим образом:

$$B_\varphi(r, t) = B_{\varphi 0} \frac{r}{a} \exp\left(\frac{2}{a} \int_0^t V_0(t') dt'\right), \quad (5)$$

$$B_z(r, t) = \text{const} \cdot \exp\left(\frac{2}{a} \int_0^t V_0(t') dt'\right).$$

Из формулы (5) и уравнения $\text{rot} \vec{E} = -(1/c) \partial \vec{B} / \partial t$ можно показать, что при развитии НТР индукционное электрическое поле $\vec{E} = -(1/c) [\vec{V} \times \vec{B}]$ перпендикулярно магнитному, поэтому оно не ускоряет заряженные частицы. Однако за время $\tau_A \approx l/V_A \approx 5 \div 10$ с, где $l \approx (0.5 \div 1.0) \cdot 10^8$ см — протяженность по высоте области НТР, импульс натяжения магнитного поля B_φ «кубогает» из области неустойчивости с альфевеновской скоростью V_A в форме импульса продольного электрического тока

$$\frac{\partial^2 B_\varphi}{\partial t^2} = \frac{B_{\varphi 0}^2}{4\pi\rho} \frac{\partial^2 B_\varphi}{\partial z^2}. \quad (6)$$

Импульс магнитного давления $B_z(r, t)$ остается в области вторжения языка плазмы, возбуждая БМЗ-колебания (рис. 2).

Если ток мал ($B_\varphi^2 \leq 8\pi p$, где p — газовое давление плазмы), возмущение магнитного поля компенсируется возмущением газового давления и $E_z = 0$. Импульс электрического тока распространяется вдоль петли в виде линейной альфевеновской волны. При $B_\varphi^2 \gg 8\pi p$ возникает индукционное электрическое поле, направленное вдоль магнитного поля петли B_{z0} . Это вызвано тем, что при $B_\varphi^2 \gg 8\pi p$ возмущения магнитного поля уже не компенсируются градиентом газового давления, как в линейном альфевеновском импульсе, а появляются возмущения скорости вдоль радиуса трубы и вдоль невозмущенного магнитного поля B_{z0} , которые приводят к генерации нелинейной по полю и по току компоненты электрического поля B_φ вдоль оси трубы [Zaitsev et al., 2016]:

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = -\frac{1}{c} \frac{B_\varphi^2}{4\pi\rho V_A^2} \frac{\partial B_\varphi}{\partial t}. \quad (7)$$

Среднее по сечению петли электрическое поле

$$\bar{E}_z = \frac{2I_0^2 V_A}{5c^4 B_{z0}^2} \frac{\partial I_0}{\partial \xi}, \quad \xi = z - V_A t. \quad (8)$$

Например, при $n_a = 10^{14}$ см⁻³, $B_{z0} = 300$ Гс, $I_0 = 10^{10}$ А находим $\bar{E}_z \approx 0.1$ В/см, т. е. электроны могут ускоряться на длине $l \approx (0.5 \div 1.0) \cdot 10^8$ см до энергии ~ 10 МэВ. Отношение максимальной величины поля к полю Драйсера $E_D = 6 \cdot 10^{-8} n/T$ В/см, когда электроны плазмы переходят в режим убегания, равно [Zaitsev et al., 2016]

$$\frac{E_{zm}}{E_D} = 2.2 \cdot 10^8 \frac{T I_0^3 (A)}{a^2 B_{z0} n^{3/2} \Delta \xi}. \quad (9)$$

На рис. 3 показаны области генерации электрических полей, больших и меньших поля Драйсера для типичных условий в хромосфере.

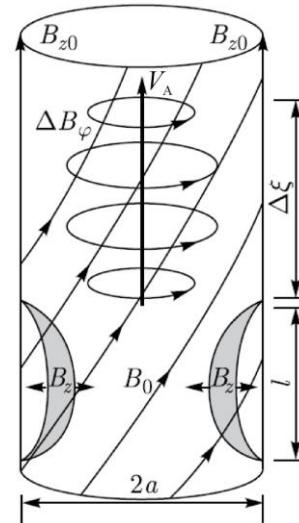


Рис. 2. Возмущение магнитного поля в трубке в результате развития НТР. Здесь l — вертикальный размер проникающего языка внешней плазмы; a — радиус магнитной трубы; $\Delta\xi$ — размер импульса электрического тока вдоль B_{z0} [Zaitsev et al., 2016]

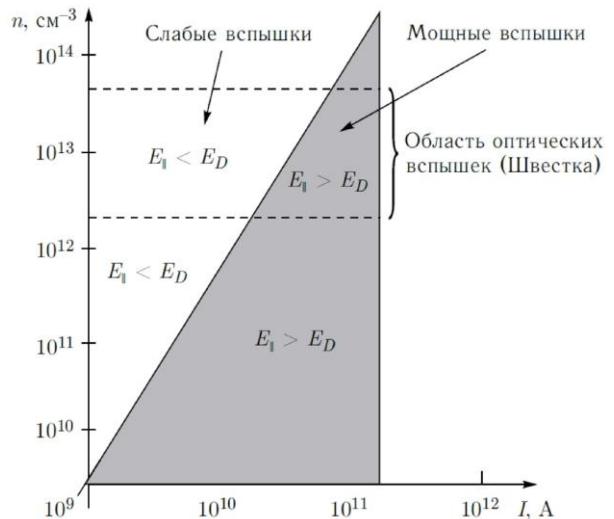


Рис. 3. Диаграмма плотность плазмы — электрический ток для $a = 10^7$ см, $B_{z0} = 2 \cdot 10^3$ Гс, $T = 2 \cdot 10^4$ К, $\Delta\xi = 5 \cdot 10^7$ см. Показаны области субдрайсеровских и супердрайсеровских (серым цветом) электрических полей, образующихся на переднем фронте импульса тока, распространяющегося по магнитной петле от области НТР [Zaitsev et al., 2016]

Почему для эффективного ускорения частиц во вспышке необходимы электрические поля порядка поля Драйсера? В хромосферной части петли в столбе от температурного минимума до переходной области между хромосферой и короной количество частиц в среднем составляет $\sim 5 \cdot 10^{39}$. Этого достаточно, чтобы обеспечить инъекцию в режим ускорения необходимого числа электронов $\sim 10^{39}$ [Miller et al., 1997]. Поскольку общее количество ускоренных электронов не сильно отличается от полного количества частиц в хромосферной части петли, это свидетельствует о высокой эффективности механизма ускорения, когда концентрация ускоренных электронов сравнима по порядку величины с концентрацией фоновой плазмы. Это означает, что при ускорении регулярными электрическими полями поля должны

быть либо близки к полю Драйсера, либо превышать его. Поэтому в достаточно мощных вспышках ускорение электронов должно, по всей вероятности, происходить в хромосфере. Иначе трудно объяснить большую концентрацию ускоренных электронов $n \sim 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ с энергией $> 20 \text{ кэВ}$. Электрические поля больше поля Драйсера могут возникать на фронте импульса электрического тока, генерируемого в петле из-за развития НТР, если амплитуда тока превышает 10^{10} А (см. рис. 3). Представленные результаты об ускорении частиц в хромосфере можно рассматривать как *déjà vu* — возврат к понятию хромосферной вспышки [Giovanelli, 1946; Fritzová-Švestková, Švestka 1967].

ВСПЫШЕЧНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ, ИНИЦИИРУЕМОЕ ПРОТУБЕРАНЦЕМ

Некоторые авторы (см., например, [Zimovets et al., 2020]) считают, что недостаток модели вспышки в виде эквивалентной электрической цепи (the current interruption model) состоит в невозможности объяснения наблюдаемого энерговыделения в вершине петли, которое наблюдается в жестком рентгеновском излучении — “above-the loop-top flare” [Masuda et al., 1994]. Мы покажем, что НТР, вызванная протуберанцем в вершинах вспышечных петель способна объяснить подобное явление. Впервые на возможность инициирования вспышки в магнитных петлях, нагруженных протуберанцем (волокном), обратил внимание Пустильник [Pustil'nik, 1974] в предположении о магнитном пересоединении. В самом деле, плотный ($n_a + n \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$) и относительно холодный ($T \sim 0.01 \text{ МК}$) протуберанец толщиной $D \approx (3 \div 10) 10^8 \text{ см}$, расположенный над вспышечной петлей или аркадой петель с $T \sim (1 \div 10) \text{ МК}$ и $n \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$, представляет собой классическую картину НТР: тяжелая жидкость над легкой (рис. 4). Подходящая кривизна магнитного поля также имеется. В результате в горячую токонесущую петлю проникают языки частично ионизованной плазмы, которые приводят к повышенной джоулевой диссипации при сопротивлении Каулинга и ускорению заряженных частиц в индуцированных электрических полях, описанным в предыдущем разделе. Если петли последовательно располагаются по высоте (см. рис. 4),

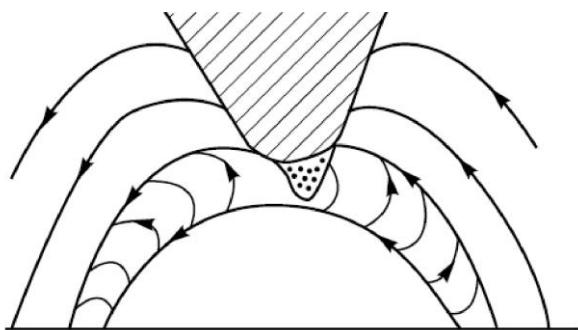


Рис. 4. Взаимодействие вспышечной петли с протуберанцем. Язык плотной частично ионизованной плазмы протуберанца проникает в петлю вследствие НТР [Zaitsev, Stepanov, 1992]

возможен эффект вспышки Масуда, поскольку повышенная плотность плазмы обеспечивает достаточно толстую мишень для генерации жесткого рентгеновского излучения ускоренными в вершинах петель электронами. Таков вкратце наш сценарий триггера вспышки из-за НТР, инициированной протуберанцем.

В этой связи сделаем некоторые оценки. НТР (баллонная мода) возникает, если толщина протуберанца $D > D_c = B^2 / (10\pi\rho g)$ [Pustil'nik, 1974]. При $\rho = m_i(n_a + n) = 5 \cdot 10^{-13} \text{ г/см}^3$ и $B = 10 \text{ Гс}$ находим $D_c = 2 \cdot 10^8 \text{ см}$, что меньше наблюдаемой толщины волокон.

Скорость джоулевой диссипации на единицу объема магнитной трубы определяется как [Степанов, Зайцев, 2018]

$$q = \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} \mathbf{V} \times \mathbf{B} \right) \mathbf{j} = \frac{j_z^2}{\sigma} + \frac{F^2 B_\phi^2 j_z^2}{(2-F)c^2 n m_i v'_{ia}} \text{ эрг/(см}^3 \text{ с}), \quad (10)$$

где $j_z = I / (\pi a^2)$, $\sigma = ne^2 / (m_e v_{ei})$ — классическая проводимость (Спитцера), $F = n_a / (n + n_a)$, $B_\phi = 2I / (ca)$, $v'_{ia} \approx 1.6 \cdot 10^{-11} F (n + n_a) \sqrt{T}$. Второе слагаемое в уравнении (10) описывает диссипацию из-за сопротивления Каулинга, связанную с ионно-атомными столкновениями, которая в случае инъекции нейтральных частиц из протуберанца в магнитную петлю является преобладающей. Тогда скорость диссипации можно представить в виде

$$q = \frac{4F^2 I^4}{(2-F)\pi^2 c^4 a^6 n m_i v'_{ia}} \text{ эрг/см}^3 \text{ с} \quad (11)$$

Полагая $I = 10^{11} \text{ А}$, $F = 0.5$, радиус петли в короне $a = 10^8 \text{ см}$, $n = 10^9 \text{ см}^{-3}$, $T = 10^4 \text{ К}$, находим $q \approx 4 \cdot 10^3 \text{ эрг/(см}^3 \text{ с)}$. Если область энерговыделения в вершине петли составляет $\sim 3 \cdot 10^{25} \text{ см}^3$ получаем его мощность $\sim 10^{29} \text{ эрг/с}$.

Количество энергичных электронов, ускоренных в вершине токонесущей петли при вторжении в нее языка плазмы протуберанца, можно оценить как $N \approx 2\pi n \Delta x D V_{Ti} \Delta t$. За время $\Delta t \approx 100 \text{ с}$, при $n \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, длине вторгающегося в вершину петли языка $\Delta x \approx D \approx 3 \cdot 10^8 \text{ см}$, $V_{Ti} (T = 10^4 \text{ К}) \approx 10^6 \text{ см/с}$ находим $N \approx 2 \cdot 10^{37}$. Такое количество ускоренных электронов соответствует вспышке средней мощности.

ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ ХРОМОСФЕРЫ И БЫСТРЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Среди явлений HOPE наблюдаются и необычно быстрые предвестники вспышек. Например, Hudson et al. [2021] на основании данных наблюдений GOES и RHESSI показали, что перед импульсной фазой вспышки 7 января 2017 г. хромосферные основания корональных магнитных петель быстро, за время $\sim 10 \text{ с}$, нагреваются до температуры 10–15 МК, при этом она почти не уменьшалась в течение 1.5 мин.

Мера эмиссии излучающих оснований петель медленно возрастала и по данным GOES достигала $n^2 V \approx 10^{47} \text{ см}^{-3}$. При объемах оснований петель $V \approx 5 \cdot 10^{23} \div 10^{25} \text{ см}^3$ это приводит к оценке плотности плазмы в области предвестников $n \approx (3.0 \div 4.5) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, характерной для хромосферы. В фазе нагрева не наблюдался нагрев хромосферы ускоренными электронами. Аналогичный результат был получен и в ряде других работ [Awasthi, Jain, 2011; Battaglia et al., 2023]. Следовательно, предвспышечный нагрев не связан со столкновительным нагревом активной области нетепловыми электронами, что противоречит стандартной модели вспышек.

Мы предполагаем, что предвспышечный нагрев связан с резким возрастанием продольного электрического тока (компоненты B_ϕ магнитного поля петли) при развитии в основании петель НРТ, описанной в предыдущих разделах. Импульс продольного электрического тока большой амплитуды остается в хромосфере в течение времени $\tau_A \approx l/V_A \approx 5 \div 10$ с. За это время ток нагревает хромосферное основание до $T \approx 10^7 \text{ К}$, формируя рентгеновский предвестник вспышки. Затем импульс продольного электрического тока покидает область неустойчивости в виде нелинейной альфвеновской волны (см. рис. 2) с индукционным электрическим полем, ускоряющим электроны до энергий, достаточных для формирования источника жесткого рентгеновского излучения вспышки. Таков возможный сценарий возникновения вспышки с предвестником [Зайцев, Степанов, 2025].

Исследуем условия формирования такого быстрого предвестника. Сначала на основе уравнения (11) определим время нагрева оснований магнитной петли электрическими токами до температуры $T \geq 10^7 \text{ К}$. Диссипацией из-за сопротивления Спиртцера можно пренебречь, поскольку при токах $\sim 3 \cdot 10^{11} \text{ А}$ такое сопротивление существенно лишь для высот $< 1000 \text{ км}$ [Stepanov et al., 2024]. При оценке времени нагрева пренебрежем радиационными потерями из-за высоких температур, а также теплопроводностью вдоль петли, которая подавлена значительной азимутальной компонентой магнитного поля B_ϕ , связанной с продольным током j_z . Предположим, что при $T > 10^6 \text{ К}$ относительная концентрация нейтралов зависит от температуры так же, как в условиях квазистационарной короны, т. е. $F \approx 0.15/T$ [Verner, Ferland, 1996; Zaitsev, 2015]. Из уравнения теплового баланса

$$\frac{1}{\gamma-1} \frac{\partial p}{\partial t} = 2.6 \cdot 10^{-9} \frac{I^4}{n^2 a^2 T^{3/2}},$$

$$p = 2k_B n T, \gamma = \frac{5}{3}$$
(12)

определим зависимость температуры от времени

$$T^{5/2} - T_0^{5/2} = 3.25 \cdot 10^{-9} (\gamma-1) \frac{I^4}{k_B n^3 a^6} t.$$
(13)

Из (13) находим время нагрева хромосферных оснований $t_H \approx 10^4 \text{ с} \sim 3 \text{ ч}$ до температуры $T \geq 10^7 \text{ К}$ при

токе $I = 10^{12} \text{ А}$, $n = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $a = 3 \cdot 10^7 \text{ см}$. Такое большое время нагрева означает, что нельзя пользоваться формулой относительной концентрации нейтралов для квазистационарной короны, а нужно учитывать импульсный характер нагрева и нестационарность процесса ионизации. Скорость изменения плотности электронов в плазме при ионизации нейтральных атомов электронным ударом можно оценить из уравнения

$$\frac{dn}{dt} = nn_a \langle \sigma_H V_{Te} \rangle.$$
(14)

Сечение ионизации атома водорода $\sigma_H \approx 2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ при $T \approx 10^7 \text{ К}$ [Андреев, 2010]. Время нагрева плазмы предвестника электрическим током $\tau_H \approx 10 \text{ с}$. За это время плазма в основании петли лишь частично ионизуется, сохраняя определенное количество нейтралов. Концентрацию нейтралов на стадии нагрева оценим из уравнения (14):

$$n_a \approx \frac{\partial n / \partial t}{n \langle \sigma_H V_{Te} \rangle} \approx \frac{1}{\tau_H \langle \sigma_H V_{Te} \rangle} \approx 4 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}.$$
(15)

При плотности плазмы в области генерации предвестника $n \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ относительная концентрация нейтралов $F = n_a / n = 10^{-5}$. Это значение на три порядка превышает относительную долю нейтралов в короне с $T = 10^7 \text{ К}$ ($F \approx 0.15 / T \approx 10^{-8}$). Такое различие вызвано тем, что при импульсном включении большого электрического тока темп нагрева больше темпа ионизации (ионизация не успевает за нагревом). Поэтому, когда импульс тока «убегает» из области предвестника вспышки в виде нелинейной альфвеновской волны, остаточная концентрация нейтралов в этой области остается достаточно большой [Зайцев, Степанов, 2025]. Для определения тока, необходимого для нагрева предвестника до $T \approx 10^7 \text{ К}$ за время $\tau_H \approx 10 \text{ с}$ при содержании нейтралов $F \approx 10^{-5}$, воспользуемся уравнением (12), из которого находим время нагрева

$$\tau \approx \frac{1.6 \cdot 10^{-8} n^3 a^6 T^{3/2}}{FI^4} \text{ с.}$$
(16)

Из (16) следует, что для области с $n = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $a = 3 \cdot 10^7 \text{ см}$, $F = 10^{-5}$ нагрев плазмы до $T \approx 10^7 \text{ К}$ за время $\tau_H \leq 10 \text{ с}$ возможен при токах $I \geq 10^{12} \text{ А}$. Для плотности плазмы $n = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ величина критического тока $I \geq 5 \cdot 10^{11} \text{ А}$. Такие электрические токи наблюдаются в предвестниках вспышек [Wang et al., 2017]. Поскольку время нагрева $\sim I^{-4}$, быстрые рентгеновские предвестники при токах менее 10^{11} А маловероятны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что неустойчивость Рэлея—Тейлора является триггером вспышек как в основаниях петель, так и в их вершинах. НРТ в основании петель приводит к вторжению в петлю окружающей хромо-

сферной плазмы со скоростью порядка V_{Ti} за время $\sim a/V_{Ti} \sim 10$ с, при этом происходит усиление продольного электрического тока $I_z = I_0 \exp\left(\frac{2}{a} \int_0^t V(t') dt'\right)$.

Джоулема диссипация при повышенном сопротивлении Каулинга приводит к нагреву хромосферы в основаниях петель и к ускорению значительного количества электронов в индуцированных электрических полях до энергий $\sim 1\text{--}3$ МэВ. При этом для ускорения $\sim 10^{38}\text{--}10^{39}$ электронов за время вспышки электрические поля должны быть либо близкими к полю Драйсера, либо супердрайсеровскими. Наши результаты об энерговыделении и ускорении частиц в хромосфере можно рассматривать как *déjà vu* — возврат к понятию хромосферной вспышки.

Неустойчивость Рэлея—Тейлора в вершинах вспышечных петель, нагруженных плотным холодным волокном, инициирует явления, подобные описанным для оснований петель. В этом случае волокно инжектирует в токонесущие магнитные петли значительное количество нейтральных частиц, резко увеличивающих джоулему диссипацию в вершинах петель, сопровождающую ускорением заряженных частиц. Таким образом, можно объяснить вспышки типа “above-the loop-top” [Masuda et al., 1994] в модели токонесущей магнитной петли.

Важным следствием НРТ как триггера солнечных вспышек является и возможность объяснения быстрых (~ 10 с) горячих (10–15 МК) предвестников солнечных вспышек. Мы показали, что, если величина импульсного тока превышает 10^{11}A , темп джоулема нагрева плазмы опережает темп ионизации, что приводит к повышенной диссипации электрического тока. Нужно заметить, что предварительный нагрев вспышечной плазмы до температуры >12 МК является также необходимым условием ускорения высокоэнергичных (>100 МэВ) протонов [Струминский и др., 2024]. Более того, понимание физической природы триггера солнечных вспышек имеет первостепенное значение для прогнозирования космической погоды и смягчения ее воздействия на технологическую инфраструктуру.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-12-00308-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев Г.В. Расчет сечения ионизации электронным ударом для атомов водорода и азота. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2010, т. 9, с. 1–2.
- Зайцев В.В., Степанов А.В. К природе быстрых рентгеновских предвестников солнечных вспышек. *Письма в Астрономический журнал*. 2025, т. 51, № 1. (В печати).
- Мешалкина Н.С., Алтынцев А.Т. Проявления нагрева в начале вспышки 29 июня 2012. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 3, с. 13–20. DOI: [10.12737/szf-103202402](https://doi.org/10.12737/szf-103202402) // Meshalkina N.S., Altyntsev A.T. Heating manifestations at the onset of the 29 June 2012 flare. *Sol.-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 3. DOI: [10.12737/stp-103202402](https://doi.org/10.12737/stp-103202402).
- Степанов А.В., Зайцев В.В. *Магнитосфера активных областей Солнца и звезд*. М.: Физматлит, 2018, 387 с.
- Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю. Критерии для предсказания протонных событий по солнечным наблюдениям в реальном времени. *Гео-*

магнетизм и аэрономия. 2024, т. 64, № 2, с. 163–174. DOI: [10.31857/S0016794024020019](https://doi.org/10.31857/S0016794024020019).

Alfvén H., Carlqvist P. Currents in the Solar Atmosphere and a Theory of Solar Flares. *Solar Phys.* 1967, vol. 1, p. 220–228. DOI: [10.1007/BF00150857](https://doi.org/10.1007/BF00150857).

Awasthi A.K., Jain R. Multi-wavelength diagnostics of precursor phase in solar flares. *First Asia-Pacific Solar Physics Meeting. Astron. Soc. India Conf.* 2011, vol. 2, pp. 297–305.

Battaglia A.F., Hudson H., Warmuth A., et al. The existence of hot X-ray onsets in solar flares. *Astron. Astrophys.* 2023, vol. 679, article number A139. DOI: [10.1051/0004-6361/202347706](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202347706).

Brown J.C. On the Ionization of Hydrogen in Optical Flares. *Solar Phys.* 1973, vol. 29, pp. 421–427. DOI: [10.1007/BF00150822](https://doi.org/10.1007/BF00150822).

da Silva D. F., Hui L., Simoes P.J.A., et al. Statistical analysis of the onset temperature of solar flares in 2010–2011. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2023, vol. 525, iss. 3, pp. 4143–4148. DOI: [10.1093/mnras/stad2244](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2244).

Emslie A.G., Henoux J.-C. The electrical current structure associated with solar flare electrons accelerated by large-scale electric fields. *Astrophys. J.* 1995, vol. 446, p. 371. DOI: [10.1086/175796](https://doi.org/10.1086/175796).

Fritzová-Švestková L., Švestka Z. Electron density in flares. II. Results of measurement. *Solar Phys.* 1967, vol. 2, pp. 87–97. DOI: [10.1007/BF00155894](https://doi.org/10.1007/BF00155894).

Giovanelli R.G. A theory of chromospheric flares. *Nature*. 1946, vol. 158, pp. 81–82. DOI: [10.1038/158081a0](https://doi.org/10.1038/158081a0).

Hooyng P., Brown J.C., van Beek H.F. High time resolution analysis of solar hard X-ray flares observed on board the ESRO TD-1A satellite. *Solar Phys.* 1976, vol. 48, p. 197–254. DOI: [10.1007/BF00151992](https://doi.org/10.1007/BF00151992).

Hudson H., Simoes P.J.A., Fletcher L., et al. Hot X-ray onsets of solar flares. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2021, vol. 501, iss. 1, pp. 1273–1281. DOI: [10.1093/mnras/staa3664](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3664).

Kane S.R., Hurley K., McTiernan J.M., et al. Energy release and dissipation during giant solar flares. *Astrophys. J. Lett.* 1995, vol. 446, p. L47. DOI: [10.1086/187927](https://doi.org/10.1086/187927).

Kumar P., Srivastava A.K., Somov B.V., et al. Evidence of solar flare triggering due to loop-loop interaction caused by footpoint shear motion. *Astrophys. J.* 2010, vol. 723, pp. 1651–1664. DOI: [10.1088/0004-637X/723/2/1651](https://doi.org/10.1088/0004-637X/723/2/1651).

Kusano K., Bamba Y., Yamamoto T.T. Magnetic field structures triggering solar flares and coronal mass ejections. *Astrophys. J.* 2012, vol. 760, no. 1, p. 31. DOI: [10.1088/0004-637X/760/1/31](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/31).

Ledentsov L. Thermal trigger for solar flares I: Fragmentation of the preflare current layer. *Solar Phys.* 2021, vol. 296, article number 74. DOI: [10.1007/s11207-021-01817-1](https://doi.org/10.1007/s11207-021-01817-1).

Masuda S., Kosugi T., Hara H., et al. A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection. *Nature*. 1994, vol. 371, pp. 495–497. DOI: [10.1038/371495a0](https://doi.org/10.1038/371495a0).

Melrose D.B. Neutralized and Unneutralized current patterns in the solar corona. *Astrophys. J.* 1991, vol. 381, p. 306. DOI: [10.1086/170652](https://doi.org/10.1086/170652).

Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A.G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, pp. 14631–14659. DOI: [10.1029/97JA00976](https://doi.org/10.1029/97JA00976).

Pustil'nik L.A. Instability of quiescent prominences and the origin of solar flares. *Soviet Astronomy*. 1974, vol. 17, p. 763.

Sharykin I.N., Kosovichev A.G. Dynamics of electric currents, magnetic field topology, and helioseismic response of a solar flare. *Astrophys. J.* 2015, vol. 808, no. 1. DOI: [10.1088/0004-637X/808/1/72](https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/1/72).

Somov B.V. Magnetic reconnection and topological trigger in physics of large solar flares. *Asian J. Phys.* 2008, vol. 17, no. 2-3, pp. 421–454. DOI: [10.48550/arXiv.0901.4697](https://doi.org/10.48550/arXiv.0901.4697).

Stepanov A.V., Zaitsev V.V., Kupriyanova E.G. Features of electric current dissipation in the solar atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024, vol. 64, pp. 1203–1214. DOI: [10.1134/S001679322470030](https://doi.org/10.1134/S001679322470030).

Syrovatskii S.I. Current sheet characteristics and thermal trigger of solar flares. *Soviet Astronomy Lett.* 1976, vol. 2, p. 13.

Verner D.A., Ferland C.J. Atomic data for astrophysics. I. Radiative recombination rates for H-like, He-like, Li-like, and Na-like ions over a broad range of temperature. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1996, vol. 103, no. 2, pp. 467–473. DOI: [10.1086/192284](https://doi.org/10.1086/192284).

Veronig A., Vršnak B., Dennis B. R., et al. Investigation of the Neupert effect in solar flares. I. Statistical properties and the evaporation model. *Astron. Astrophys.* 2002, vol. 392, no. 2, pp. 699–712. DOI: [10.1051/0004-6361:20020947](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020947).

Wang H., Liu Ch., Ahn K., et al. High-resolution observations of flare precursors in the low solar atmosphere. *Nature Astronomy*. 2017, vol. 1, article number 0085. DOI: [10.1038/s41550-017-0085](https://doi.org/10.1038/s41550-017-0085).

Zaitsev V.V. Ultrafine magnetic structures in the chromosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 55, pp. 846–849. DOI: [10.1134/S0016793215070294](https://doi.org/10.1134/S0016793215070294).

Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Towards the circuit theory of solar flares. *Solar Phys.* 1992, vol. 139, pp. 343–356. DOI: [10.1007/BF00159158](https://doi.org/10.1007/BF00159158).

Zaitsev V.V., Urpo S., Stepanov A.V. Temporal dynamics of Joule heating and DC-electric field acceleration in single flare loop. *Astron. Astrophys.* 2000, vol. 357, pp. 1105–1114.

Zaitsev V.V., Stepanov A.V. Particle acceleration and plasma heating in the chromosphere. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, pp. 3559–3572. DOI: [10.1007/s11207-015-0731-y](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0731-y).

Zaitsev V.V., Kronshtadtov P.V., Stepanov A.V. Rayleigh—Taylor instability and excitation of super-Dreicer electric fields in the solar chromosphere. *Solar Phys.* 2016, vol. 291, pp. 3451–3459. DOI: [10.1007/s11207-016-0983-1](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0983-1).

Zaitsev V.V., Stepanov A.V., Kronshtadtov P.V. On the possibility of heating the solar corona by heat fluxes from coronal magnetic structures. *Solar Phys.* 2020, vol. 295, article number 166. DOI: [10.1007/s11207-020-01732-x](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01732-x).

Zimovets I.V., Sharykin I.N., Gan W.Q. Relationships between photospheric vertical electric currents and hard X-ray sources in solar flares: Statistical study. *Astrophys. J.* 2020, vol. 891, no. 2. DOI: [10.3847/1538-4357/ab75bc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab75bc).

15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.

Как цитировать эту статью:

Степанов А.В., Зайцев В.В. Неустойчивость Рэлея—Тейлора как триггер солнечных вспышек. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 3, с. 125–131. DOI: [10.12737/szf-113202513](https://doi.org/10.12737/szf-113202513).

OBSERVATIONS OF LARGE-SCALE SOLAR MAGNETIC FIELDS WITH A NEW CHINESE TELESCOPE CONSTRUCTED FOR THE INTERNATIONAL MERIDIAN CIRCLE PROGRAM (IMCP)

НАБЛЮДЕНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ НОВОГО КИТАЙСКОГО ТЕЛЕСКОПА, СОЗДАННОГО ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРОГРАММЫ «МЕРИДИАННЫЙ КРУГ» (IMCP)

M.L. Demidov 

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Россия, demid@iszf.irk.ru*

*National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China*

X.F. Wang

*National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China, wxf@nao.cas.cn*

*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China*

Y.Z. Sun

*National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China, syz@nao.cas.cn*

*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China*

Y.Y. Deng

*National Astronomical Observatories,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China, dyu@nao.cas.cn*

*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather,
National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China*

*School of Astronomy and Space Science,
University of Chinese Academy of Sciences,
Beijing, China*

М.Л. Демидов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, demid@iszf.irk.ru*

*Национальные астрономические обсерватории,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай*

С.Ф. Ван

*Национальные астрономические обсерватории,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай, wxf@nao.cas.cn*

*Государственная ключевая лаборатория
солнечной активности и космической погоды,
Национальный центр космических наук,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай*

И.Ц. Сунь

*Национальные астрономические обсерватории,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай, syz@nao.cas.cn*

*Государственная ключевая лаборатория
солнечной активности и космической погоды,
Национальный центр космических наук,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай*

Ю.Ю. Дэн

*Национальные астрономические обсерватории,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай, dyu@nao.cas.cn*

*Государственная ключевая лаборатория
солнечной активности и космической погоды,
Национальный центр космических наук,
Китайская академия наук,
Пекин, Китай*

*Школа астрономии и космических наук,
Университет Китайской академии наук,
Пекин, Китай*

Abstract. One of the very important international events in space science that has happened recently is the launch of the International Meridian Circle Program (IMCP). A key element of IMCP is a quite new instrument — the Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph (SFMM) installed at Gan Yu Solar Station (GYSS) of the Purple Mountain Observatory (Jiangsu Province). The main objective of this telescope is to provide data on distribution of magnetic fields across the solar surface, which is necessary for prediction of some space weather (SW) parameters since this information is actually the low boundary condition for corresponding numerical simulations.

Аннотация. Одним из важнейших международных событий в космической науке, произошедших за последнее время, является начало работы в операционном режиме Международной программы «Меридианный круг» (IMCP). Одним из ключевых элементов IMCP является совершенно новый инструмент — Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph (SFMM), который был установлен на солнечной станции Гань Юй (GYSS) обсерватории Пурпурная гора (провинция Цзян Су). Основная задача SFMM — получение данных о распределении магнитных полей по всей поверхности Солнца, что необходимо для прогнозирования некоторых параметров космичес-

There are plans to construct a network of such telescopes (similar to GONG or to ngGONG), so it is very important to test how reliable the measurements of weak large-scale magnetic fields (LSMF) are with these instruments. It is just LSMF, not strong magnetic fields in active regions (which are relatively easy to measure), that determines the structure of the heliosphere. To do this, using first observations with SFMM at GYSS, is the main purpose of this study.

After a brief description of the instrument and some methodical issues, we present the results of comparison of SFMM observations with the Wilcox Solar Observatory (WSO) data. WSO measurements of LSMF are the most reliable in the world, and the results of such comparison are extremely important. We have found out that the correlation coefficient is high enough (≈ 0.70) if we consider the whole range of measured strengths, but it is lower (≈ 0.57) if the consideration is restricted only to relatively weak ($|B| \leq 10.0$ G) fields. Note that there is a significant difference between regression coefficients (R) for these two cases: $R \approx 5.1$ in first case and only $R \approx 1.8$ in the second one. The reason of this is still unclear and will be the subject of future investigations.

Keywords: the Sun, solar magnetic field, space weather, telescope.

кой погоды (КП), поскольку эта информация фактически является нижним граничным условием для соответствующего численного моделирования.

В будущем планируется построить сеть таких инструментов (по аналогии с GONG или ngGONG), поэтому очень важно проверить, насколько надежны измерения слабых крупномасштабных магнитных полей (КМП) с их помощью. Потому что именно КМП, а не сильные магнитные поля в активных областях (которые относительно легко измерить) определяют структуру гелиосферы. Сделать это на примере первых наблюдений с помощью SFMM и является основной целью данной работы.

После краткого описания инструмента и некоторых методических вопросов представлены результаты сравнения наблюдений с SFMM с измерениями в Солнечной обсерватории им. Уилкокса (Wilcox Solar Observatory, WSO). Измерения КМП в WSO являются самыми надежными в мире, и результаты такого сравнения чрезвычайно важны. Получено, что коэффициент корреляции достаточно высок (≈ 0.70), если рассматривать весь диапазон измеренных напряженностей, но он ниже (≈ 0.57), если рассмотрение ограничено только относительно слабыми ($|B| \leq 10.0$ Гс) полями. Стоит отметить существенное различие в коэффициентах регрессии (R) для этих двух случаев: $R \approx 5.1$ в первом случае и $R \approx 1.8$ во втором. Причина этого пока не ясна и станет предметом будущих исследований.

Ключевые слова: Солнце, солнечные магнитные поля, космическая погода, телескоп.

INTRODUCTION

Space weather (SW) is a rapidly developing branch of modern science that deals with detection and prediction of plasma parameters in near-Earth space and in the interplanetary medium, which originated from the Sun. Many aspects of SW are crucially important for a larger number of applied problems such as geomagnetic activity. No wonder it is precisely with SW that many modern large projects are connected. Two of them are carried out in China. The first is the International Meridian Circle Program, (IMCP), which has been launched recently; the second is the Advanced Space-based Solar Observatory (ASO-S, Chinese nickname Kuafu-1). It was launched on 8 October 2022. One of the ASO-S instruments is the Full-disk Vector Magnetograph (FMG), designed for full-disk observations of solar magnetic fields.

A key element of IMCP is a quite new instrument — the Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph (SFMM), installed at Gan Yu Solar Station (GYSS) of the Purple Mountain Observatory, Jiangsu Province (see Figure 1). The new telescope was briefly described at the 15th Russian-Chinese Workshop on Space Weather [Sun et al., 2024]. The telescope is designed for observing magnetic fields and other parameters in the photosphere and chromosphere (it is therefore called “multi-layer”), covering the full disk quasi-simultaneously in four spectral lines: FeI 532.419 nm, H β 486.134 nm, H α 656.28 nm, and CaII 854.21 nm. Actually, SFMM consists of two



Figure 1. General view of the SFMM telescope at Gan Yu Solar Station of the Purple Mountain Observatory, Jiangsu Province. At the right bottom corner is a strip with sea

telescopes on the same mount: the first one (Full-disk Magnetograph Telescope) is designed for magnetic observations in the first couple of lines; and the other (Full-disk Chromospheric Telescope), for observations of velocities and intensities in the second couple.

The aperture of the objective lens of this magnetograph telescope is 120 mm (the aperture of the chromospheric telescope is 200 mm), and the spatial resolution is higher than 2 arcsec. It alternately measures the solar magnetic field in two spectral lines: FeI 532.419 nm and H β 486.134 nm. For the FeI line there are 6 measure-

ment positions in regular observations (and 21 in special) ranging from -0.016 nm to $+0.016$ nm from line center; for the H β line there are 12 measurement positions from -0.05 nm to $+0.05$ nm. The exposure time at one wavelength position is ~ 5 – 20 ms. The scanning time for a single spectral line is less than 15 min.

It is obvious that in some aspects SFMM reminds the old SMAT (Solar Magnetism and Activity Telescope) facility at Huairou Solar Observing Station (HSOS): it utilizes a DKDP electro-optical crystal as a polarization analyzer (PA), it uses the same spectral line FeI 532.419 nm, but it has as well a fundamental difference — Liquid Crystal Variable Retarder (LCVR) — an LCVR-based Lyot filter with fast scanning of the spectral line profile.

There are plans to develop a Chinese network of SFMM-like telescopes (similar to GONG or to ngGONG); therefore, it is very important to test how reliable the measurements of weak large-scale magnetic fields (LSMF) are with these instruments. It is precisely LSMF, rather than strong magnetic fields in active regions which are relatively easy to measure (see the most recent comparison of local magnetic fields with Chinese data in Xu et al., [2024]), that determines the structure of the heliosphere (actually, LSMF synoptic maps provide low boundary conditions for corresponding numerical simulations [Demidov et al., 2023]). Especially if to take into account that observations of LSMF with SMAT (made in one wing of line profile) had some problems [Demidov et al., 2018].

The objective of this study is to make such a test, using first SFMM observations (at present, we consider only line-of-sight or longitudinal component).

RESULTS

It has long been recognized by solar physics community that the most reliable observations of LSMF are provided by the Wilcox Solar Observatory (WSO). So it makes an obvious sense to compare SFMM measurements with WSO ones. Note that at SFMM the direct method of measurements is used for calculating the magnetic field strength at every pixel of a solar image [Chen et al., 2025]. It reminds the center-of-gravity (COG) method [Uitenbroek, 2003], but it is based on the detection of the difference ($2\Delta\lambda$) between wavelength positions of the minimum intensity of the corresponding Zeeman-components when PA is running. Remind that for the linear Zeeman effect the shift value of splitted components (relative to the case without magnetic field B) is determined by the formula:

$$\Delta\lambda[\text{nm}] = \pm 4.668 \cdot 10^{-8} g_{\text{eff}} \lambda^2 B[\text{T}],$$

where g_{eff} is the effective Lande factor. So for the spectral line FeI 532.419 nm with Lande factor $g=1.5$ we have:

$$\Delta\lambda[\text{cm}] = \pm 1.92 \cdot 10^{-9} B[\text{T}].$$

For this study, we have used one of the best SFMM (but typical) observations made on April 18, 2023, when a number of scanning points along the line profile was as many as 21. The original matrix of data has a size 2048×2048 px. However, for comparison with low spatial resolution WSO data such high resolution is not needed, and we have remapped them through different

smoothing. Since we are planning to compare SFMM data with observations made at the telescope STOP of the Sayan Solar Observatory with spatial resolution 21×21 px, the lowest SFMM spatial resolution used here is the same. Remind that WSO original measurements are performed with 3 arcmin aperture, and the scanning grid consists of 11 scan lines in the north-south direction and 21 east-west positions at the equator.

Some following figures show how SFMM full-disk magnetograms look like with a different spatial resolution and with different scales of color bars. Figure 2 presents a magnetogram with spatial resolution 256×256 px and with a linear color bar. We can see that only strong magnetic fields in active regions are visible, and it is hardly possible to say something about weaker magnetic fields on the rest of the surface. Much more informative is Figure 3, where the same magnetogram but with a non-linear color scale bar is presented. In this case, we can see large-scale features of weak magnetic fields, which, as has been mentioned above, determine the structure of the open magnetic flux, which, in turn, builds the structure of the helio-magnetosphere. At last, Figure 4 exhibits the same magnetogram with a non-linear color scale bar with a spatial resolution 21×21 px in the mosaic form. It is this data with such a spatial resolution that will be used in the following. Note that here SFMM magnetogram fortunately does not show any strange artificial large-scale structures, which were found in SMAT data [Demidov et al., 2018] (see, e.g., the left

SFMM.18.04.2023

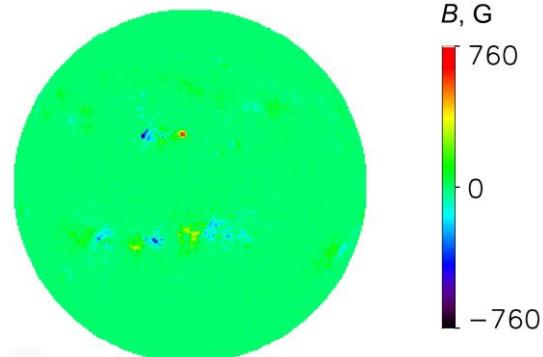


Figure 2. Full-disk magnetogram of longitudinal solar magnetic fields observed with SFMM telescope on April 18, 2023. The spectral line is FeI 532.419 nm; the remapped spatial resolution is 256×256 px

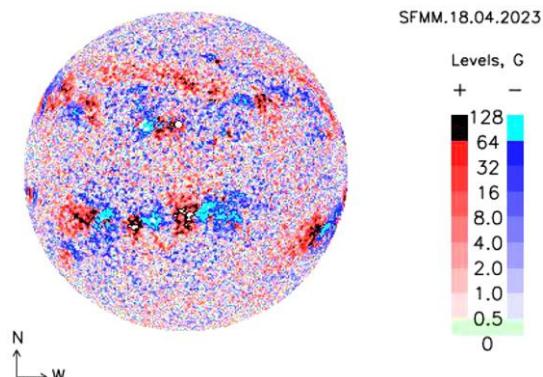


Figure 3. Same as in Figure 2 but with a non-linear color scale bar

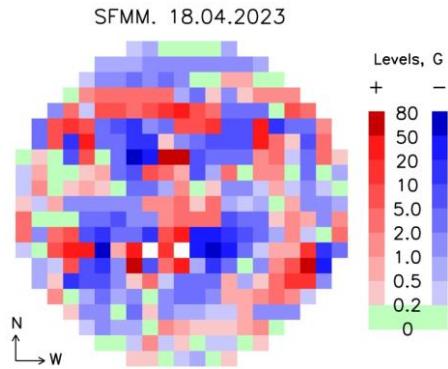


Figure 4. Same as in Figure 3, but with spatial resolution 21 by 21 px and with other levels of scale on the non-linear color bar

bottom panel in Figure 1). It is a good indicator that SFMM probably does not have systematical field-of-view errors that SMAT has.

Unfortunately, WSO does not have any observations of magnetograms for April 18, 2023, so it is impossible to make a direct comparison between SFMM and WSO full-disk observations. But we can use a WSO synoptic map for similar analysis. Indeed, the central meridian of the SFMM magnetogram for Carrington Rotation (CR) 2269 has a longitude $\approx 30^\circ$, so we can employ for comparison a part of the SFMM magnetogram and the corresponding data at the beginning of the synoptic map. Figure 5 shows the WSO synoptic map in latitude-longitude coordinates. Figure 6 displays a part of the SFMM magnetogram in Carrington coordinates for the range of longitudes $0^\circ \div 90^\circ$. The results of comparison between the overlapping (SFMM-WSO) points (for WSO from $\lambda=0^\circ$ to $\lambda=90^\circ$) are presented in Figure 7.

The correlation coefficient is seen to be rather high ($\rho=0.7$), which suggests that SFMM observations are quite reliable. The question arises about a big difference between amplitudes of magnetic field strengths: for SFMM, they are by five times higher than for WSO. Why it is happening is still unclear. It is most likely to be somehow connected with the use of different spectral lines at SFMM and WSO (WSO employs FeI 525.02 nm line with the Lande factor $g=3.0$). The question of comparison between solar magnetic field measurements in different spectral lines is separate and very complicated; it deserves a special consideration. Furthermore, this question is important for solving the open magnetic flux problem [Linker et al., 2017]. It is worth noting here that Wang et al. [2022] suggested to correct WSO observations by a factor of 4.5 (at the disk center) (that is close to the value we have just obtained) to compensate for signal saturation in the extremely sensitive FeI 525.02 nm line. The SFMM observations in the FeI 532.419 nm line with $g=1.5$ should not be affected by saturation.

If we look at Figure 7 more carefully, we find that points of small values do not follow this regression. To explore this question in more detail, we analyze points with magnetic field strengths $|B| \leq 10$ G separately. The results are presented in Figure 8. As expected, the correlation coefficient in this case becomes lower ($\rho=0.57$), but is still high enough. What is more important is that the regression coefficient decreases very significantly ($R \approx 1.8$), which raises a question as to the need for using

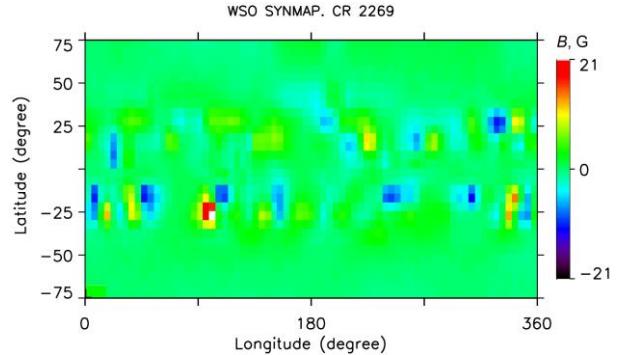


Figure 5. Synoptic map for Carrington Rotation (CR) 2269, observations of the solar magnetic field at the Wilcox Solar Observatory (WSO)

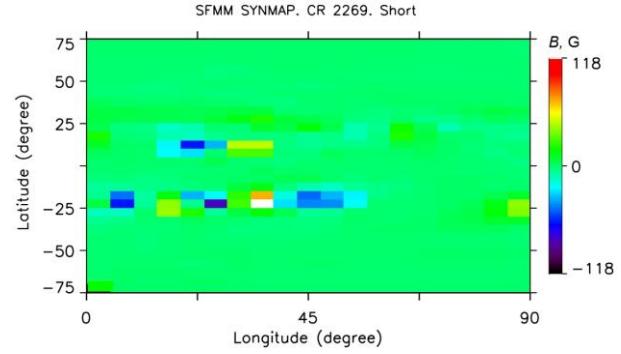


Figure 6. Part of the SFMM magnetogram (April 18, 2023) in Carrington coordinates for the range of longitudes $0^\circ \div 90^\circ$ for CR 2269

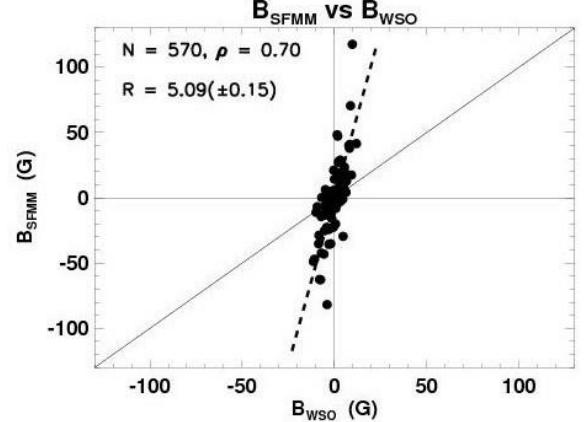


Figure 7. Comparison between SFMM and WSO data sets for a part of CR 2269, $0^\circ \div 90^\circ$ longitude range: N indicates the number of point pairs (pixels); ρ is the correlation coefficient; R is the linear regression coefficient (dashed line). The solid line is $R=1.0$

different coefficients in cross-calibration of SFMM-WSO observations for weak and strong magnetic fields. In the future, to improve the accuracy of observations of weak magnetic fields, it is necessary to employ measurements in the “deep integration” mode.

CONCLUSION

At present, for many aspects of human civilization existence and development it is very important to know and predict conditions in near-Earth space and often far beyond. This branch of science is called space weather (SW). To monitor parameters of high layers of the atmos-

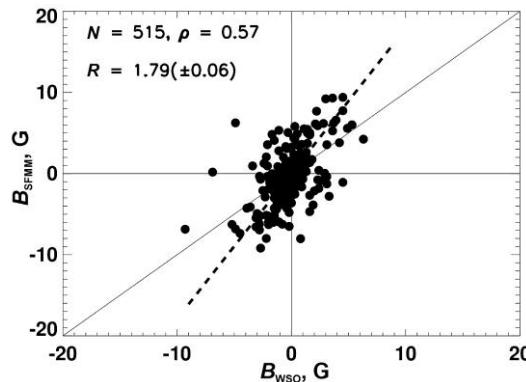


Figure 8. The same as in Figure 7, but for points with magnetic field strength $|B| \leq 10$ G for both data sets. ρ is the correlation coefficient; R is the linear regression coefficient (dashed line). The solid line is $R=1.0$.

sphere, ionosphere, and magnetosphere, many facilities are used around the world. One of the most ambitious projects is the International Meridian Circle Program (IMCP), developed and realized in China. Since many parameters detected by IMCP instruments strongly depend on conditions on the Sun, it is extremely important to obtain information about such processes. That is why, under IMCP a special instrument — the Solar Full-disk Multi-layer Magnetograph (SFMM) — was developed. One of the most important aims of this instrument is to provide the full-disk solar magnetograms.

The purpose of this study is to test the reliability of measurements of large-scale magnetic fields (LSMF) with this new instrument. LSMFs are rather weak, and it is a big challenge to measure them. By comparing SFMM data with Wilcox Solar Observatory (WSO) observations (which are considered as the most reliable), we have drawn a conclusion that correspondence between these two data sets is fairly close.

The next natural step is to construct SFMM-based synoptic maps and to use them for calculating the solar wind velocity and other space weather parameters. This is our task for the nearest future.

This study was partly financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Wilcox Solar Observatory data used in this study was taken from the website [<http://wso.stanford.edu>] courtesy of J.T. Hoeksema.

REFERENCES

- Chen J., Su J., Xie W., Deng Y., Bai X., et al. Direct measurement of the longitudinal magnetic field in the solar photosphere with the Zeeman effect. *Solar Phys.* 2025, vol. 300, iss. 4, article id. 49. DOI: [10.10007/s11207-025-02455-7](https://doi.org/10.10007/s11207-025-02455-7).
- Demidov M.L., Wang X.F., Wang D.G., Deng, Y.Y. On the measurements of full-disk longitudinal magnetograms at Huairou solar observing station. *Solar Phys.* 2018, vol. 293, iss. 10, article id. 146, 18 p. DOI: [10.10007/s11207-018-1366-6](https://doi.org/10.10007/s11207-018-1366-6).
- Demidov M.L., Hanaoka Y., Wang X.F., Kirichkov P.N. On the differences in the ambient solar wind speed forecasting caused by using synoptic maps from different observatories. *Solar Phys.* 2023, vol. 298, article id. 120, 14 p. DOI: [10.10007/s11207-023-02206-6](https://doi.org/10.10007/s11207-023-02206-6).

Linker J.A., Caplan R.M., Downs C., P. Riley, Z. Mikic, et al. The open flux problem. *Astroph. J.* 2017, vol. 848, no. 1, 11 p. DOI: [10.3847/1538-4357/aa8a70](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8a70).

Sun Y., Tong L., Deng Y., Wang D., Wang X., et al. Development of the full-disk vector magnetographs for the Meridian Project II. *The 15th Russian-Chinese Workshop on Space Weather. Irkutsk, Russia*, 2024, p. 46.

Uitenbroek H. The accuracy of the center-of-gravity method for measuring velocity and magnetic field strength in the solar photosphere. *Astrophys. J.* 2003, vol. 592, p. 1225–1233. DOI: [10.1086/375736](https://doi.org/10.1086/375736).

Wang Y.-M., Ulrich R.K., Harvey J.W. Magnetograph saturation and open flux problem. *Astroph. J.* 2022, vol. 926, article id. 113, 14 p. DOI: [10.3847/1538-4357/ac4491](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4491).

Xu H., Su J., Liu S., et al. Comparison of line-of-sight magnetic field observed by ASO-S/FMG, SDO/HMI and HSOS/SMAT. *Solar Phys.* 2024, vol. 299, article id. 17. DOI: [10.1007/s11207-024-02260-8](https://doi.org/10.1007/s11207-024-02260-8).

URL: <http://wso.stanford.edu> (accessed April 23, 2025).

15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.

Как цитировать эту статью:

Demidov M.L., Wang X.F., Sun Y.Z., Deng Y.Y. Observations of large-scale solar magnetic fields with a new Chinese Telescope constructed for the international Meridian Circle Program (IMCP). *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, №. 3, с. 132–136. DOI: [10.12737/szf-113202514](https://doi.org/10.12737/szf-113202514).

**МОНИТОРИНГ ЯВЛЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППИРОВКИ НАНОСПУТНИКОВ
«СОЗВЕЗДИЕ-270» МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**MONITORING OF SPACE WEATHER EFFECTS WITH
SOZVEZDIE-270 NANOSATELLITE CONSTELLATION
OF MOSCOW UNIVERSITY**

А.В. Богомолов

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, aabboogg@srds.sinp.msu.ru

В.В. Богомолов

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, bogovit@rambler.ru
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

А.Ф. Июдин

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, aiyudin@srds.sinp.msu.ru

В.В. Калегаев

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, klg@dec1.sinp.msu.ru
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

И.Н. Мягкова

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, irina@srds.sinp.msu.ru

В.И. Оседло

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, osedlo@mail.ru

С.И. Свертилов

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, sis@coronas.ru
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

И.В. Яшин

МГУ им. М.В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скobelцына,
Москва, Россия, ivn@eas.sinp.msu.ru

A.V. Bogomolov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, aabboogg@srds.sinp.msu.ru

V.V. Bogomolov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, bogovit@rambler.ru
M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

A.F. Iyudin

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, aiyudin@srds.sinp.msu.ru

V.V. Kaledaev

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, klg@dec1.sinp.msu.ru
M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

I.N. Myagkova

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, irina@srds.sinp.msu.ru

V.I. Osedlo

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, osedlo@mail.ru

S.I. Svertilov

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, sis@coronas.ru
M.V. Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

I.V. Yashin

M.V. Lomonosov Moscow State University,
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Moscow, Russia, ivn@eas.sinp.msu.ru

Аннотация. В настоящее время реализуется космический проект «Созвездие-270» Московского университета. Он подразумевает развертывание группировки наноспутников формата кубсат. К настоящему времени запущено 20 спутников, 9 из них продолжают функционировать на околоземной орбите, в ближайшее время будет запущен еще один. Специально для использования в экспериментах на борту малых космических аппаратов формата кубсат разработаны

Abstract. The space project Sozvezdie-270 of Moscow University is in progress now. It involves the deployment of a CubeSat nanosatellites constellation. To the present, 20 satellites have been launched, 9 of them continue to function in near-Earth orbit; one more will be launched in the near future. Instruments were developed specifically for the experiments on board small spacecraft of the CubeSat format, which provide measurements of fluxes and spectra of charged particles, primarily

приборы, обеспечивающие измерения потоков и спектров заряженных частиц, — в первую очередь, электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, а также гамма-квантов. Наряду с космической группировкой создается сеть наземных приемных станций. Многоспутниковая группировка дает ряд преимуществ при изучении динамических процессов в околоземном космическом пространстве. В частности, она позволяет проводить одновременные измерения потоков заряженных частиц с использованием однотипных приборов в разных точках околоземного космического пространства. Такие измерения дают уникальную информацию о потоке субрелятивистских электронов, включая изменения, обусловленные высыпаниями электронов, что имеет большое значение для понимания механизмов ускорения и потерь захваченных и квазизахваченных электронов радиационных поясов Земли (РПЗ).

Обсуждаются различные недавние проявления космической погоды, связанные с повышенной вспышечной активностью Солнца. Среди таких эффектов — заполнение полярных шапок частицами солнечных космических лучей, динамические процессы во внешнем РПЗ во время магнитных бурь, быстрые изменения потоков электронов из-за высыпаний.

Ключевые слова: космическая погода, радиационные пояса Земли, солнечные космические лучи, наноспутники, кубсат.

ВВЕДЕНИЕ

Космическая погода — сравнительно молодой раздел современной физики, изучающий крайне изменчивые условия в околоземном космическом пространстве (ОКП). Эти изменения обусловлены активными процессами на Солнце, условиями в межпланетной среде (вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ)) и в системе магнитосфера—ионосфера—термосфера, а также их влиянием на Землю и деятельность человека. Неблагоприятные изменения в ОКП могут снизить производительность и надежность космических аппаратов и наземных систем, что, в свою очередь, может повлечь за собой крупные потери из-за проблем в работе систем связи, навигации, энергосистем и разведывательных спутников [Baker, 2001; Белов и др., 2004; Iucci et al., 2005, Романова и др., 2005; Potapov et al., 2016; Новиков, Воронина, 2021]. Вот почему космическая погода (КП) стала одной из самых быстроразвивающихся областей исследования за последние несколько десятилетий [Daglis, 2001; Cole, 2003; Schrijver et al., 2015; McGranaghan et al., 2021]. Сегодня центры космических прогнозов были созданы несколькими национальными правительствами и академическими институтами (например, [Wei et al., 2003; Lundstedt, 2006; Wilkinson, 2009]).

Одним из основных проявлений КП являются вариации потоков энергичных заряженных частиц в различных областях ОКП [Kudela, 2013]. При этом регистрируемые приборами вариации потоков частиц

electrons of relativistic and sub-relativistic energies, as well as gamma quanta. Along with the space constellation, a network of ground receiving stations is also being created. A multi-satellite constellation gives a number of advantages in studying dynamic processes in near-Earth space. In particular, it makes possible to carry out simultaneous measurements of charged particle fluxes with instruments of the same type at different points in near-Earth space. Such measurements provide unique information about the flux of sub-relativistic electrons, including variations due to precipitation of electrons, which is of great importance for understanding the mechanisms of acceleration and losses of trapped and quasi-trapped electrons in Earth's radiation belts (ERB).

We discuss various recent space weather manifestations associated with increased solar flare activity. Among such effects is the filling of the polar caps with particles of solar cosmic rays, dynamic processes in outer ERB during magnetic storms, rapid variations in electron fluxes due to precipitation.

Keywords: space weather, Earth's radiation belts, solar cosmic rays, nanosatellites, CubeSat.

и квантов могут быть вызваны как пересечением спутником компактной области с повышенной концентрацией частиц (так называемые пространственные эффекты), так и ростом (или уменьшением) интенсивности (временные эффекты). В свою очередь, и пространственные, и временные эффекты могут быть связаны как с ускорением частиц, так и с их высыпанием из областей захваченного излучения — радиационных поясов Земли (РПЗ), а также с проникновением в магнитосферу частиц, ускоренных во вспышках на Солнце, т. е. так называемых солнечных космических лучей (СКЛ) [Дорман, Мирошниченко, 1968].

Экспериментальные измерения потоков энергичных заряженных частиц в ОКП начались в первые годы космической эры [Вернов и др., 1958]. На основе этих измерений в 1970–80-х гг. были разработаны эмпирические модели РПЗ. Эти модели описывают пространственное и энергетическое распределение всенаправленных потоков протонов с энергиями от сотен килоэлектронвольт до сотен мегаэлектронвольт и электронов с энергиями от десятков килоэлектронвольт до ~7–10 МэВ в большой области ОКП от высот ~250 км до геостационарных и высокоэллиптических орбит. Наиболее известны модели AP8, AE8 (США), а также модели AP9/AE9 [Ginet et al., 2013], основанные на более новых экспериментальных данных. В НИИЯФ МГУ также разработаны модели РПЗ [Кузнецов и др., 2014], которые легли в основу отечественных стандартов, регламентирующих методы оценки радиационных условий полета спутников.

Однако эти модели являются стационарными. Вариации потоков частиц отражаются в них лишь заданием потоков для эпох минимальной и максимальной солнечной активности, при этом соответствующие значения потоков различаются лишь для некоторых энергий максимум в несколько раз. В то же время реальные потоки заряженных частиц в окрестности Земли даже в геомагнитно-спокойных условиях испытывают весьма существенные средние- и долгосрочные вариации, связанные с солнечной и геомагнитной активностью, изменениями магнитного поля Земли и плотности верхней атмосферы. Необходимо также обратить внимание на быстрые вариации потоков космического излучения, к которым, в первую очередь, относятся кратковременные (с характерными временами менее нескольких секунд) вариации потоков электронов субрелятивистских и релятивистских энергий (от сотен килоэлектронвольт до ~ 10 МэВ).

Для построения адекватной динамической картины трехмерного распределения потоков энергичного излучения в ОКП необходимо учитывать их временные изменения, в том числе кратковременные вариации потоков высокoenергичных электронов. При этом центральной задачей является выявление того, являются ли обнаруженные вариации потоков частиц следствием пространственных или временных эффектов. Эту задачу трудно решить с помощью одного космического аппарата (КА). Для этого необходимы одновременные измерения на нескольких КА, что может быть реализовано с помощью многоспутниковой группировки. Наиболее эффективно такие задачи решаются путем сравнительного анализа данных нескольких КА, работающих как на близких, так и на существенно разных орбитах. Реализация такой стратегии может включать следующие варианты:

1) последовательное прохождение одной и той же области близкорасположенными спутниками, что позволит наиболее надежно разделить пространственные и временные эффекты;

2) одновременные измерения на разных L-оболочках, что необходимо для восстановления динамической картины распределения потока захваченных частиц в широком диапазоне орбит, что, в частности, позволит наблюдать смещение максимума РПЗ во время геомагнитных возмущений;

3) одновременные измерения на одной высоте однотипными приборами, расположенными на нескольких спутниках, смещенных по долготе друг относительно друга, что позволит оценить влияние фактора локального времени на динамику потока частиц.

Часть этих задач может быть решена группировкой нескольких одновременно запускаемых КА с идентичными детекторами на борту, другая часть — анализом данных одного или нескольких наноспутников совместно с данными более крупного КА, оснащенного комплексом приборов, обеспечивающим детальные измерения потоков частиц, электромагнитного поля и других параметров магнитосферной плазмы. Представляется, что микро- и наноспутники стандартного формата, включая кубсаты, являются

наиболее подходящими КА для реализации рассматриваемой стратегии многоспутниковых измерений. Такие аппараты относительно дешевы, не требуют сложных этапов разработки и специальных испытаний. Как правило, их вывод на орбиту осуществляется методом попутного запуска, что также серьезно снижает стоимость миссии. При этом нет необходимости полностью дублировать функционал крупных КА. Преимущество группировки микро- и наноспутников заключается как раз в возможности более детального изучения временных вариаций различных компонент космического излучения в различных областях ОКП [Caspi et al., 2022].

1. МНОГОСПУТНИКОВАЯ МИССИЯ «СОЗВЕЗДИЕ-270» МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

В последние годы Московский государственный университет реализует собственную космическую программу, в ходе которой ведется мониторинг потоков заряженных частиц в ОКП, а также солнечного рентгеновского и гамма-излучения — электромагнитных транзиентов различной природы. В этой связи следует отметить успешный запуск спутников «Университетский—Татьяна» [Садовничий и др., 2011], «Университетский—Татьяна-2» [Садовничий и др., 2016], «Вернов» [Панасюк и др., 2016а, б], «Ломоносов» [Sadovnichii et al., 2017]. Следующим шагом в этом направлении является новый проект «Созвездие-270» Московского университета, предусматривающий развертывание группировки наноспутников. На конец 2024 г. запущено 20 наноспутников формата кубсат (начиная с 2018 г.), 9 из которых продолжают работать на полярной орбите на высоте ~ 500 км. Среди них КА «Авион», запущенный 27 июня 2023 г., позволивший получить максимальный объем научных данных.

На сегодняшний день развернутая в рамках проекта «Созвездие-270» группировка спутников работает в режиме наблюдения отдельных событий, однако в перспективе предполагается ее наращивание, а также создание сети приемных станций, распределенных по меридианам, что позволит оперативно получать большие объемы данных и тем самым перейти к мониторингу космической радиации в режиме близком к реальному времени. В этом плане не менее пяти наземных приемных станций должны быть развернуты с использованием антенн, работающих в диапазонах VHF, S и X в регионах от Калининграда до Камчатки. В результате будет создана единая система, состоящая из космического и наземного сегментов, которая должна обеспечить управление КА, а также регулярный прием данных со спутников группировки, расположенных в разных точках ОКП, что существенно увеличит объем передаваемой информации. Основной целью многоспутниковой группировки является мониторинг космического излучения и электромагнитных транзиентов различной природы: атмосферного, астрофизического и солнечного происхождения.

Для проведения экспериментов на спутниках кубсат разработаны различные приборы для реги-

стракции энергичных заряженных частиц, жесткого рентгеновского и гамма-излучения, а также оптического (ультрафиолетового и красного) свечения атмосферы.

К настоящему времени в ходе измерений на спутниках группировки Московского университета получены важные сведения об эффектах, связанных с различными проявлениями солнечной вспышечной активности и ее влиянием на геомагнитную обстановку в ОКП. К числу таких явлений относится проникновение СКЛ в полярные шапки, приводящее к существенному изменению радиационных полей во внутренней магнитосфере. В этом плане важную роль играет также изменение пространственной структуры распределения потоков высокоэнергичных электронов во внешнем РПЗ из-за магнитных бурь, которые, в свою очередь, являются следствием изменений параметров ММП и СВ из-за активных процессов на Солнце. Еще одним направлением в исследовании радиационной обстановки в ОКП является изучение динамики потоков субрелятивистских электронов в областях высыпаний из внутреннего ($L \sim 1.6 \div 1.8$) и внешнего РПЗ.

Ниже будут рассмотрены примеры наблюдений указанных явлений с использованием в основном приборов на КА «Авион» и некоторых других КА группировки «Созвездие-270». На борту КА «Авион» установлено три детекторных модуля прибора типа «ДекоР»: «ДекоР-1», «ДекоР-2» и «ДекоР-3» [Богомолов и др., 2020]. Приборы «ДекоР» представляют собой сцинтилляционные спектрометры, в которых в качестве детекторного элемента используется комбинация тонкого слоя пластикового сцинтиллятора и более толстого кристалла CsI(Tl). Перед кристаллом CsI(Tl) расположен тонкий слой пластикового сцинтиллятора, который одновременно служит детектором заряженных частиц (в основном электронов) и активной защитой канала CsI(Tl), использующей разделение событий в разных сцинтилляторах по форме светового импульса на выходе фотодетекторов. Жесткое рентгеновское излучение регистрируется с помощью сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl).

Детекторы, установленные на КА «Авион», отличаются размером чувствительной области, оптимизированной для решения конкретных научных задач. В частности, модуль «ДекоР-2» оптимизирован для регистрации и изучения космических гамма-всплесков различной природы. Он имеет эффективную площадь, увеличенную до $\sim 65 \text{ см}^2$, что необходимо для повышения чувствительности и улучшения временного разрешения, которое определяется, в первую очередь, статистикой регистрируемых гамма-квантов. Модуль «ДекоР-2» представляет собой составной сцинтилляционный детектор (фосвич), состоящий из 3-мм пластикового сцинтиллятора и 9-мм кристалла CsI(Tl). Оба сцинтиллятора просматриваются сборкой кремниевых фотоумножителей (SiPM), что обеспечивает разделенную регистрацию гамма-квантов и электронов в диапазоне энерговыделений в сцинтилляторах от 20 кэВ до 1 МэВ. Такое разделение важно при проведении экспери-

мента по изучению гамма-всплесков на полярной орбите.

Для обеспечения более точных измерений в комплекс оборудования, помимо «ДекоР-2», входят еще два детекторных модуля. Модуль «ДекоР-1» со сцинтилляторами площадью $\sim 18 \text{ см}^2$, просматриваемыми двумя вакуумными фотоумножителями (ФЭУ), предназначен для изучения изменений потока электронов в диапазоне энерговыделения от 50 кэВ до 2 МэВ. Он полностью аналогичен приборам «ДекоР», эксперименты с которыми проводились на КА «ВДНХ-80», «Норби», «Декарт» и других кубсатах [Богомолов и др., 2020]. Модуль «ДекоР-3» добавлен для расширения диапазона регистрируемых гамма-квантов в область высоких энергий, т. е. до 5 МэВ. Его основное назначение — измерение энергетических спектров гамма-излучения солнечных вспышек и космических гамма-всплесков. Детектирующим элементом данного блока является сцинтилляционный кристалл CsI(Tl) размерами $30 \times 30 \times 30 \text{ мм}^3$, который просматривается двумя вакуумными ФЭУ.

Данные с каждого модуля «ДекоР» регистрируются как в виде кадров мониторинга (скорость счета по нескольким каналам), так и в виде детальной по-событийной записи. Объем научных данных, передаваемых с приборов комплекса «ДекоР» КА «Авион», составляет $\sim 5 \text{ МБ}$ в сутки. Основной тип передаваемых данных — кадры в режиме мониторинга с временным разрешением 1 с, причем в течение полета возможно многократное изменение этого значения как в большую, так и в меньшую сторону. Нижний порог регистрации квантов составляет несколько десятков килоэлектронвольт, его также можно изменять в ходе полета с учетом фоновых условий на околоземной орбите, при этом детекторы могут быть настроены по-разному.

Данные спутников кубсат группировки МГУ, включая КА «Авион», доступны в виде графиков и таблиц на сайте космической погоды НИИЯФ МГУ [<https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php>].

2. ПРИМЕРЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

2.1. Солнечные космические лучи

В качестве примера, иллюстрирующего возможности экспериментов по регистрации событий СКЛ наnanoспутниках формата кубсат, рассмотрим два возрастания потоков солнечных электронов в полярных шапках: первое началось сразу после полуночи 8 июня 2024 г., второе — около полуночи 12 июня 2024 г. (рис. 1). На верхней панели показаны временные зависимости скоростей счета N электронов с энергией $>300 \text{ кэВ}$, полученные приборами «ДекоР-1» и «ДекоР-3» на борту КА «Авион» (темно-голубые и фиолетовые точки соответственно). Показаны измерения в полярных шапках — областях открытых силовых линий, куда проникают СКЛ.

Обведенные маркеры (квадратами для ДекоР-1 и кругами для ДекоР-3) соответствуют измерениям

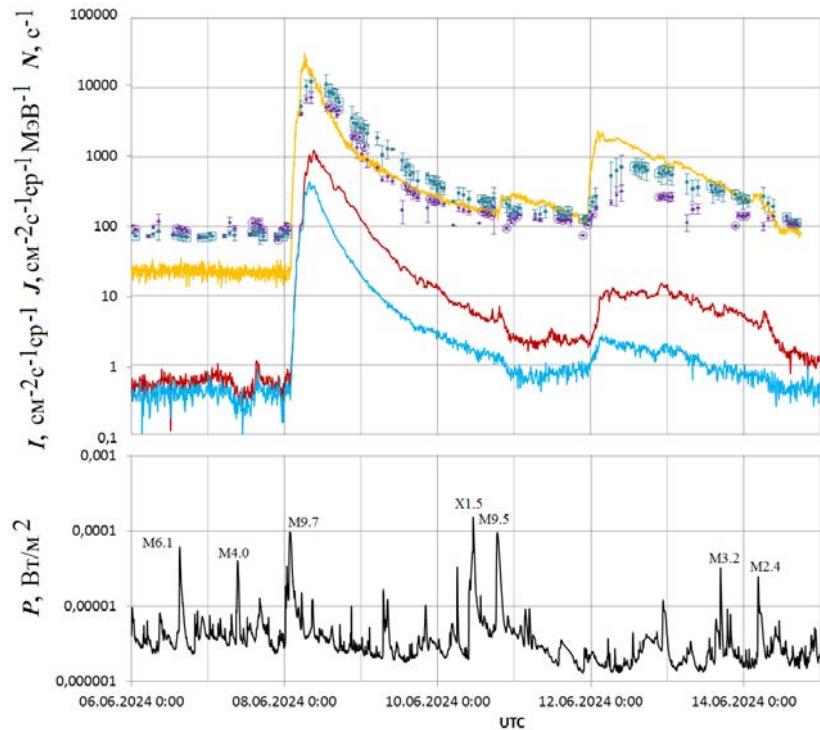


Рис. 1. Временные зависимости (вверху) скоростей счета N электронов с энергией >300 кэВ, полученные приборами «ДекоП-1» и «ДекоП-3» на борту КА «Авион» (темно-голубые и фиолетовые точки соответственно, обведенные маркеры соответствуют измерениям в южной полярной шапке, не обведенные — в северной), временная зависимость потока J электронов с энергией 175–315 кэВ, полученная в эксперименте на борту КА ACE (желтая кривая) и временные зависимости потоков I протонов с энергией 9–20 МэВ (красная кривая) и 20–40 МэВ (синяя кривая), полученные в эксперименте на борту КА «Электро-Л2»; внизу — временная зависимость потоков рентгеновского излучения, полученных по данным GOES

в южной полярной шапке, не обведенные — в северной. Видно, что кривые потоков электронов СКЛ в северной и южной шапках в данном событии не полностью идентичны, т. е. наблюдается асимметрия, которая может быть связана как с анизотропией потоков, так и с разной ориентацией приборов относительно силовых линий магнитного поля Земли. Одновременно с измерениями КА «Авион» на верхней панели показана временная зависимость потока J электронов с энергией 175–315 кэВ, полученная в эксперименте на борту КА ACE (желтая кривая) и временные зависимости потоков I протонов с энергией 9–20 МэВ (красная кривая) и 20–40 МэВ (синяя кривая), полученные прибором «СКИФ» в эксперименте на борту КА «Электро-Л2», функционирующего на геостационарной орбите. На нижней панели показана временная зависимость потоков рентгеновского излучения, полученная по данным КА GOES-16. Видно, что временные зависимости потоков электронов СКЛ в полярных шапках и в точке L1 достаточно хорошо согласуются, как наблюдалось в более ранних экспериментах [Кузнецов и др., 2003]. Следует отметить, что возможность получения данных о потоках электронов СКЛ вблизи Земли является преимуществом экспериментов на круговых полярных орбитах, поскольку такие данные не могут быть получены в экспериментах на геостационарной орбите вследствие того, что она находится во внешнем РПЗ.

Источником первого возрастания СКЛ (8 июня – 10 июня) стала солнечная вспышка класса M9.8

по классификации GOES (см. нижнюю панель рис. 1). Вспышка началась в 01:23 UT 8 июня 2024 г. в активной области (АО) A013697, которая в момент вспышки находилась в южном полушарии вблизи западного лимба (координаты вспышки S18W69). Она была достаточно продолжительной — максимум мягкого рентгеновского излучения был отмечен в 01:49 UT, окончание вспышки — в 02:07 UT. Вспышка сопровождалась корональным выбросом массы (КВМ), который наблюдался в 01:48 UT 8 июня 2024 г. Из рис. 1 видно, что временные зависимости потоков протонов СКЛ по данным «Электро-Л2», и электронов СКЛ по данным КА ACE и «Авион» подобны, хотя и не идентичны, и имеют характерный для событий СКЛ от западных вспышек профиль — быстрый рост потока частиц СКЛ и значительно более длительный плавный спад. Видно, что увеличение потока солнечных протонов по данным «Электро-Л2» началось сразу после вспышки мягкого рентгеновского излучения в ~02:10 UT, максимальный поток протонов в указанном выше диапазоне, вызванный этим событием, наблюдался 8 июня в 06:20 UT.

Второе достаточно интенсивное событие СКЛ, показанное также на рис. 1, началось около полуночи 12 июня 2024 г. Его источником стала залимбовая вспышка, произошедшая, вероятно, в той же самой A013697, что и вспышка, вызвавшая рассмотренное выше событие СКЛ. Данная вспышка также сопровождалась КВМ типа гало с начальной скоростью

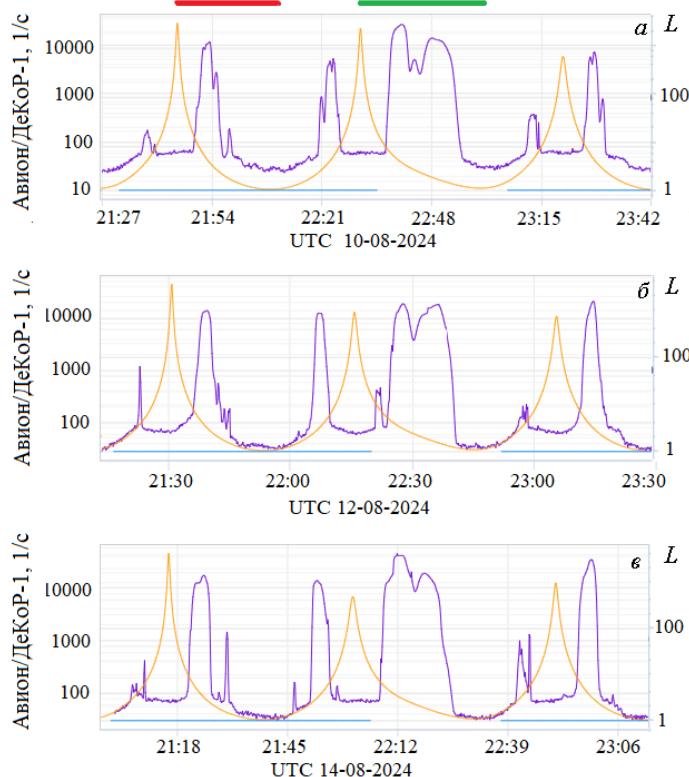


Рис. 2. Временные зависимости скоростей счета электронов прибором «ДекоР-1» на борту спутника «Авион» (фиолетовая линия, левая шкала) и параметра МакИлвайна L (желтая линия, правая шкала) 10 августа (а), 12 августа (б) и 14 августа 2024 г. (в). Горизонтальными красной и зеленой линиями отмечены интервалы времени, использованные на рис. 4 (см. ниже)

~2000 км/с, который был зафиксирован 11 июня 2024 г. в 23:20 UT. Как и в первом рассмотренном событии СКЛ, одновременно с возрастаниями потоков электронов СКЛ в полярных шапках («Авион») и в L1 (ACE) вблизи полуночи с 11 на 12 июня 2024 г. прибором «СКИФ», установленным на геостационарном спутнике «Электро-Л2», также было отмечено возрастание, т. е. в обоих событиях СКЛ к орбите Земли пришли и протоны, и электроны СКЛ.

В заключение данного раздела хотелось бы отметить, что, несмотря на многолетние наблюдения событий СКЛ, создание каталогов СПС и теоретических моделей, некоторые вопросы остаются нерешенными. Так, даже в короткий рассмотренный выше период времени (см. рис. 1) можно видеть, что ни наиболее интенсивная за данный период вспышка X1.5 10 июня 2024 г. все в той же АО13697, ни последовавшая за ней (снова в той же АО) вспышка класса M9.5 не относятся к значимым СПС, сопоставимым по амплитуде с двумя рассмотренными выше событиями СКЛ для протонов и электронов. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования событий СКЛ, которые будут полезны при создании теоретических и прогностических моделей.

2.2. Динамика внешнего радиационного пояса Земли во время магнитной бури

Другим существенным проявлением космической погоды, которое также может быть отслежено

в экспериментах на наноспутниках формата кубсат, является изменение внешнего РПЗ во время магнитных бурь. Рассмотрим подробнее динамику внешнего РПЗ по данным спутника «Авион» в период с 11 по 15 августа 2024 г., когда наблюдалась достаточно высокая геомагнитная активность.

На рис. 2 показаны временные зависимости скоростей счета электронов с энергией >300 кэВ, зарегистрировавшихся прибором «ДекоР-1» на борту КА «Авион» (фиолетовая линия, левая шкала) и параметра МакИллвайна L (желтая линия, правая шкала) для временных интервалов 10 августа 2024 г. с 21:27 по 23:42, 12 августа 2024 г. с 21:15 по 23:30 и 14 августа 2024 г. с 21:03 по 23:18 UT до, во время и после магнитной бури, начавшейся в конце суток 11 августа 2024 г. Приведенные интервалы подобраны таким образом, чтобы исключить долготный эффект, поскольку для каждого из трех интервалов времени КА проходит по одним и тем же долготам.

Видно, что полученные временные зависимости скоростей счета электронов внешнего РПЗ меняются со временем.

Рассмотрим подробнее геомагнитные условия данного интервала времени. Сильное возмущение ММП, вызванное, вероятно, прибытием к Земле межпланетного КВМ (МКВМ), который был результатом слияния нескольких, по крайней мере трех, КВМ, покинувших Солнце с 8 по 10 августа 2024 г. Максимальная скорость выброса, зарегистрированная LASCO/SOHO 8 августа 2024 г. в 19:48 UT, составила

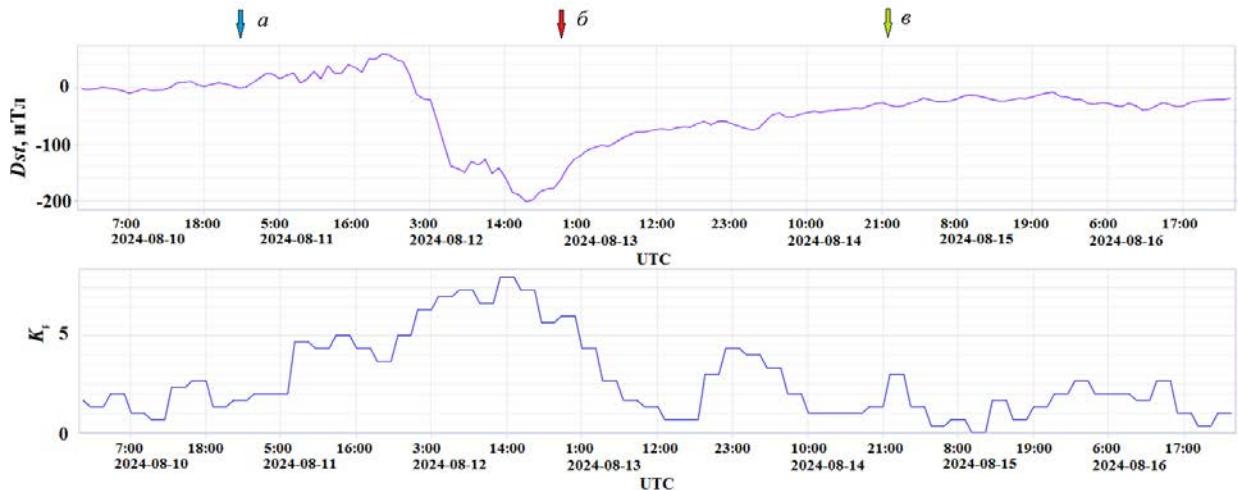


Рис. 3. Временные зависимости индексов геомагнитной активности Dst (вверху) и K_p (внизу). Стрелками отмечены моменты измерений на КА «Авион», показанные на рис. 4

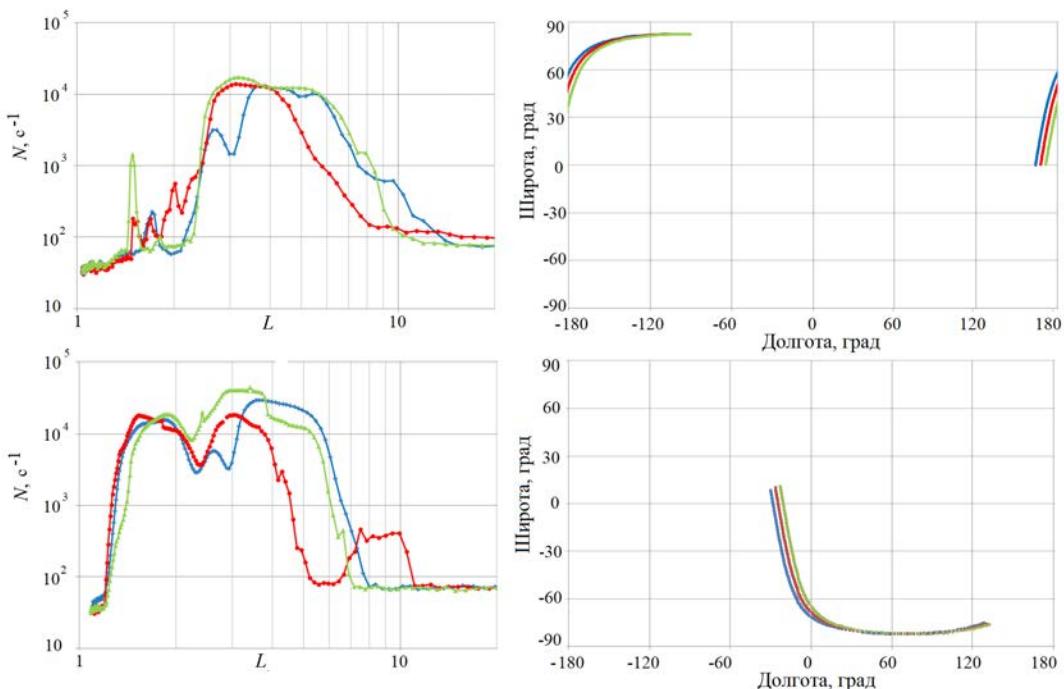


Рис. 4. Слева: зависимости от L скоростей счета электронов до (синяя линия), во время (красная линия) и после (зеленая линия) магнитного возмущения 11–12 августа 2024 г. для интервалов времени, отмеченных на рис. 2 красной линией (верхняя панель) и зеленой линией (нижняя панель). Справа: карты с проекцией на Землю орбиты спутника «Авион» для наблюдений, показанных на левых панелях

составила 789 км/с, максимальная скорость СВ на орбите Земли составила ~ 520 км/с, максимальная плотность СВ — ~ 35 см $^{-3}$.

Главная фаза бури началась около полуночи с 11 на 12 августа 2024 г. Максимальная амплитуда вариации $Dst \sim -203$ нТл была отмечена в 17:00 12 августа, максимальный индекс K_p составил 8. Геомагнитные индексы K_p и Dst для 9–16 августа 2024 г. показаны на рис. 3. Цветные стрелки — моменты времени, когда были получены данные о внешнем РПЗ (см. далее рис. 4).

На левой панели рис. 4 показаны зависимости от L пропорционального магнитной широте места измерения, скоростей счета электронов до (синяя линия), во время (красная линия) и после (зеленая линия) маг-

нитного возмущения 11–12 августа 2024 г. для интервалов времени (см. стрелки на рис. 3). На правой панели показаны карты с проекцией на Землю орбиты спутника «Авион» для наблюдений, представленных на левых панелях. Кривые получены по данным наблюдений для следующих интервалов времени, которые соответствуют пересечению орбиты спутника с РПЗ (см. рис. 2), когда КА двигался из полярной области к экватору. Верхняя панель показывает данные 10 августа 2024 г. в 21:46–22:10, 12 августа в 21:31–21:55 и 14 августа в 21:16–21:40 UT, т. е. в Северном полушарии. Нижняя панель показывает данные 10 августа 2024 г. в 22:30–23:00, 12 августа 2024 г. в 22:15–22:45 и 14 августа в 22:00–22:30 UT, т. е. в Южном полушарии.

Видно, что в Северном полушарии в максимуме бури интенсивность внешнего РПЗ практически не изменилась, но его максимум сместился ближе к Земле, с $L=4$ до $L=3$, где до бури располагался зазор между внешним и внутренним поясами. Высокоширотная граница внешнего РПЗ также передвинулась на меньшие L — с $L \sim 8 \div 9$ до $L \sim 6 \div 7$. В Южном полушарии в максимуме бури интенсивность потоков субрелятивистских электронов падала в несколько раз, экваториальная граница, как и в Северном полушарии сдвинулась на меньшие L , т. е. в обоих полушариях зазор заполнился частицами. В Южном полушарии полярная граница внешнего РПЗ сместилась с $L \sim 7 \div 8$ до $L \sim 5 \div 6$. Поскольку экваториальная граница внешнего пояса сдвигалась слабее в обоих полушариях, можно сказать, что к концу главной фазы бури внешний пояс как бы сжался. В Южном полушарии также обращает на себя внимание дополнительное высокоширотное возрастание потоков электронов в области L от 8 до 10. Выяснение природы подобных высокоширотных возрастаний требует дальнейших исследований.

В конце фазы восстановления (14 августа) высокоширотная граница внешнего РПЗ вернулась в добуревое состояние в обоих полушариях. В Южном полушарии интенсивность в максимуме, который оставался ближе к Земле, чем до бури, возросла. Полярная граница внешнего РПЗ вернулась к добуревому состоянию в обоих полушариях, добуревой зазор остался заполненным частицами, т. е. область пространства, заполненная электронами внешнего РПЗ в результате воздействия геомагнитной бури в данном случае увеличилась, как это неоднократно наблюдалось в других экспериментах (например, [Мягкова и др., 2021]).

2.3. Высыпание электронов из внутреннего пояса

Третьей проблемой с точки зрения явлений космической погоды является исследование вариаций высыпаний из внутреннего РПЗ. В качестве примера рассмотрим вариации скорости счета электронов в области высыпаний из внутреннего РПЗ ($L \sim 1.6 \div 1.8$). Перед магнитной бурей наблюдался один пик интенсивности на $L \sim 1.7$ (синяя кривая на рис. 4). Во время бури появилось еще два дополнительных пика — на $L \sim 1.6$ и $L \sim 2$ (красная кривая на рис. 4). После окончания бури амплитуда пика на $L \sim 1.6$ значительно возросла после ее окончания (зеленая кривая на рис. 4). Отметим, что пики вблизи 1.6 наблюдались в ~21:44 12 августа и ~21:30 UT 14 августа, т. е. примерно в одно время. Таким образом, возникает вопрос, связана ли динамика скорости счета субрелятивистских электронов, высыпающих из внутреннего РПЗ на $L \sim 1.6$, с геомагнитной активностью или есть другие факторы.

Для прояснения этого вопроса были рассмотрены данные измерений, полученные на КА «Авион» во время магнитной бури 8 августа 2024 г. и в спокойный период 25 сентября – 3 октября 2024 г. Временные зависимости скорости счета электронов

с энергией >300 кэВ по измерениям КА «Авион» с помощью прибора «ДекоР-1» показаны на рис. 5. Также были проанализированы данные кубсата «Альтаир», полученные 13 декабря 2024 г., также во время магнитно-спокойного периода.

Карта с проекцией на Землю орбит кубсатов «Авион» и «Альтаир» для этих измерений показана на рис. 6. Поскольку орбиты КА близки к солнечно-синхронным, они проходят через одни и те же регионы примерно в одно и то же время UT. Кружками отмечены области, где наблюдались высыпания субрелятивистских электронов из внутреннего РПЗ.

Зависимости скоростей счета электронов >300 кэВ от L , полученные с помощью кубсатов «Авион» и «Альтаир» (см. траектории на рис. 6), показаны на рис. 7. Зеленая линия — данные КА «Авион», полученные 14 августа 2024 г., 21:16–21:40 по всемирному времени (после магнитной бури, начавшейся 11 августа 2024 г.); желтая («Авион») — 28 сентября 2024 г., 21:38–22:00 по всемирному времени (аналогичная орбита и всемирное время, $Dst = -11$ нТл, $K_p = 2+$); фиолетовая («Авион») — 28 сентября 2024 г., 12:06–12:30 по всемирному времени (другая орбита и всемирное время, $Dst = 3$ нТл, $K_p = 2-$); красная («Альтаир») — 13 декабря 2024 г., 09:48–10:11 по всемирному времени (аналогичная орбита, другое всемирное время, $Dst = 1$ нТл, $K_p = 1+$); голубая («Альтаир») — 13 декабря 2024 г., 16:53–17:17 по всемирному времени (другая орбита, похожее всемирное время, $Dst = -6$ нТл, $K_p = 1+$).

На показанных выше рисунках видно, что в исследуемых областях (на $L \sim 1.7$) наблюдались кратковременные резкие возрастания (пики) потоков электронов с энергией >300 кэВ и до начала магнитной бури (10 августа), и во время магнитной бури (12 августа), и в декабре 2024 г. в магнитно-спокойный период (данные кубсата «Альтаир»). В то же время во время магнитной бури в августе появился еще один пик на $L \sim 1.6$, достигший существенно большей амплитуды 14 августа, а пик на $L \sim 1.7$ перестал наблюдаться. Совокупность этих фактов позволяет предположить, что геомагнитная буря 11–12 августа 2024 г. была настолько сильной, что вызвала возмущение не только внешнего, но и внутреннего РПЗ, что привело к изменению распределения потоков субрелятивистских электронов в области высыпаний.

Если же рассматривать эту область в целом, т. е. от $L \sim 1.6 \div 1.9$, следует отметить, что резкие возрастания потоков субрелятивистских электронов на данных L -оболочках могут наблюдаться в районе 180° E как во время магнитных бурь, так и в магнитоспокойные периоды, и достигать максимальных значений в вечернее время по UT.

Для того чтобы проверить, обусловлены ли наблюдаемые максимумы интенсивности высыпающихся электронов определенным UT или отражают пространственное распределение потоков на определенных дрейфовых оболочках или в определенных географических областях, были проанализированы изменения на орбитах, пересекающих оболочки $L \sim 1.6 \div 1.9$ на других долготах (фиолетовая кривая на рис. 6, 7).

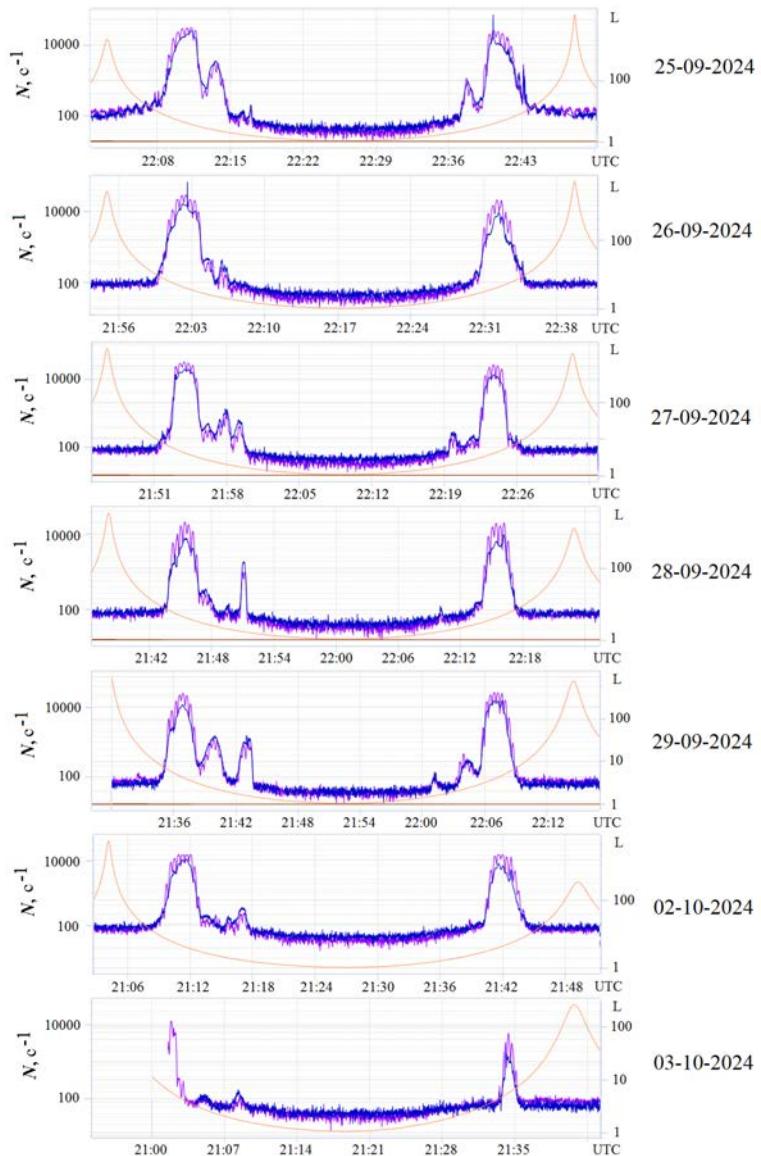


Рис. 5. Временные зависимости скоростей счета электронов от приборов «ДекоП-1» (фиолетовая линия, левая шкала) и «ДекоП-3» (синяя линия, левая шкала) на КА «Авион», а также параметра МакИллвайна L (оранжевая линия, правая шкала) для магнитостабильных периодов

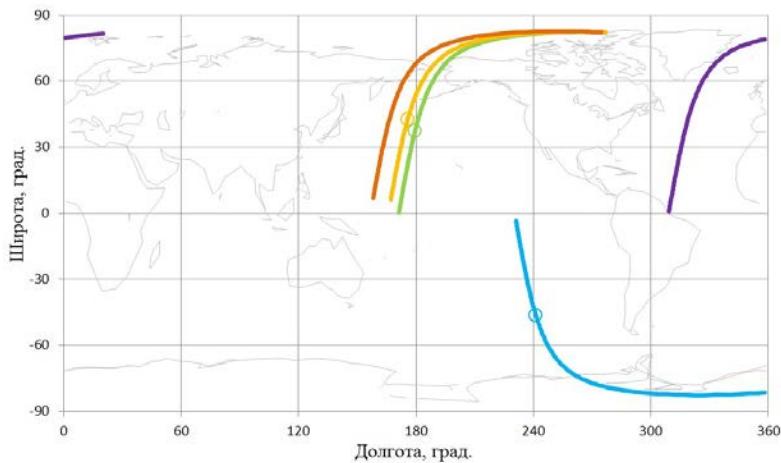


Рис. 6. Карта с проекцией на Землю орбит кубсатов «Авион» и «Альтаир»: зеленая линия — орбита КА «Авион» 14 августа 2024 г. в 21:16–21:40; желтая линия — орбита КА «Авион» 28 сентября 2024 г. в 21:38–22:00; фиолетовая линия — орбита КА «Авион» 28 сентября 2024 г. в 12:06–12:30; оранжевая линия — орбита КА «Альтаир» 13 декабря 2024 г. в 09:48–10:11; синяя линия — орбита КА «Альтаир» 13 декабря 2024 г. в 16:53–17:17 UT. Кружками отмечены области, где наблюдались высыпания субрелятивистских электронов из внутреннего пояса

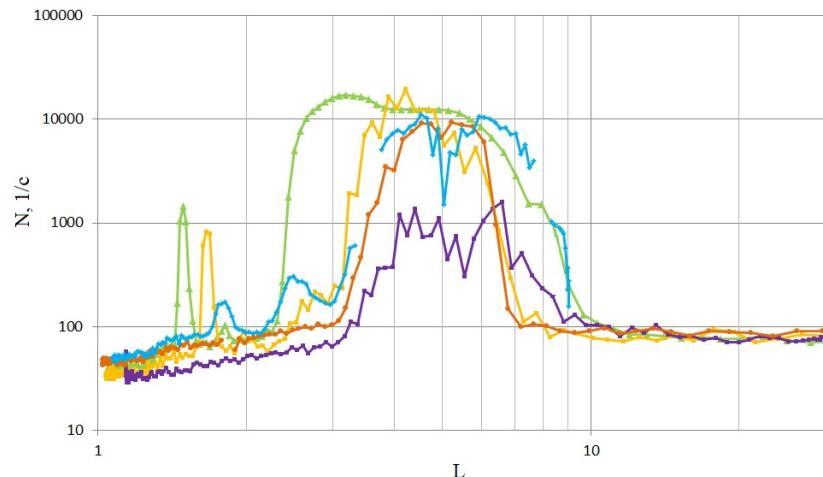


Рис. 7. Зависимости от L скоростей счета электронов, полученные на кубсатах «Авион» и «Альтаир» для измерений, показанных на рис. 5 и 6. Зеленая линия — «Авион» 14.08.2024, 21:16–21:40 UT (после магнитной бури); желтая линия — «Авион» 28.09.2024, 21:38–22:00 UT (аналогичная орбита и всемирное время); фиолетовая линия — «Авион» 28.09.2024, 12:06–12:30 UT (другая орбита и всемирное время); красная линия — «Альтаир» 13.12.2024, 09:48–10:11 UT (аналогичная орбита, другое всемирное время); голубая линия — «Альтаир» 13.12.2024, 16:53–17:17 UT (другая орбита, похожее всемирное время)

На рис. 7 видно, что на долготах $\sim 320^\circ$ – 330° около полудня по мировому времени не наблюдалось повышений интенсивности на $L \sim 1.6$ – 1.7 , что позволяет сделать вывод о том, что высыпания на этих долготах, вероятно, привязаны либо к определенной географической области, либо к определенному интервалу UT.

Для анализа обеих возможностей было проведено сравнение скорости счета электронов, измеренной при прохождении одного и того же региона разными КА, пересекающими его в разные моменты мирового времени. Для этого в дополнение к данным КА «Авион» на рис. 6, 7 показаны еще две траектории и два дополнительных профиля скорости счета субрелятивистских электронов в зависимости от L (красная и голубая линии). Они были получены в результате измерений с помощью «ДекоР-2» (измерял также скорости счета электронов с энергией >300 кэВ) на кубсате «Альтаир», орбита которого аналогична орбите КА «Авион». Красная кривая на рис. 7 показывает зависимость потока электронов от L , измеренную, когда «Альтаир» пересекал ту же область на $L \sim 1.6$, что и «Авион», но гораздо раньше (09:48–10:11 UT). В этом случае не наблюдалось увеличения потока электронов на $L < 2$. Однако пик на $L \sim 1.8$ был выявлен во время других пролетов КА «Альтаир», зависимость от L для одного из которых показана на рис. 7 голубой линией. В это время (16:53–17:17 UT) «Альтаир» двигался от южной полярной шапки к экватору над Тихим океаном. Эти результаты позволяют сделать вывод, что значительные пики на $L \sim 1.6$ – 1.9 наблюдаются в разных географических регионах, но в определенные интервалы UT, т. е. в основном днем и вечером.

Следует отметить, что значительные потоки субрелятивистских электронов на $L \sim 1.6$ – 1.9 ранее наблюдались на КА «OHZORA» [Nagata et al., 1988], «КОРОНАС-И» [Bashkirov et al., 1999; Кузнецов, Мягкова, 2001; Kuznetsov, Myagkova, 2002] и орбитальной станции «Мир» [Богомолов и др., 2005]. В част-

ности, в [Kuznetsov, Myagkova, 2002] показано, что электроны на $L \sim 1.6$ регистрируются в основном от 10 до 24 UT на долготах 110° – 200° , 200° – 290° . Авторы работы [Kuznetsov, Myagkova, 2002] делают вывод, что высыпания на $L \sim 1.6$ могут быть вызваны грозовой активностью, однако не исключают и их возможную связь с вариациями индексов геомагнитной активности. Можно сказать, что результаты измерений потоков субрелятивистских электронов на $L \sim 1.6$ – 1.9 на КА группировки Московского университета не противоречат этим выводам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведены примеры наблюдения некоторых явлений космической погоды в экспериментах, проводимых с помощью приборов, созданных в НИИЯФ МГУ и установленных на кубсатах группировки спутников «Созвездие-270» Московского университета. В частности, показаны возможности измерений потоков солнечных электронов в ОКП для событий СКЛ, проведены наблюдения за заполнением полярных шапок частицами СКЛ, на основании которых получены временные зависимости средней скорости счета субрелятивистских электронов в полярных шапках во время событий СКЛ 8–10 и 12–14 июня 2024 г. Эти зависимости хорошо согласуются с временным ходом потоков электронов СКЛ в точке либрации L1, измеренных на КА ACE, а также с профилем протонов СКЛ по данным КА «Электро-Л2». Получены также данные о динамике пространственных распределений потоков субрелятивистских электронов во внешнем РПЗ во время сильной магнитной бури 11 и 12 августа 2024 г., показавшие, что во время главной фазы магнитной бури область внешнего РПЗ как бы сжимается. В данном случае это происходит за счет меньшего сдвига экваториальной границы пояса (в область добуревого положения зазора) по сравнению с более

заметным сдвигом полярной границы РПЗ. На фазе восстановления полярная граница возвращается к положению, наблюдавшемуся до бури, а экваториальная граница продолжает оставаться близко к Земле, за счет чего область, занятая субрелятивистскими электронами внешнего РПЗ, расширяется.

Стоит отметить также результаты исследований динамики потоков субрелятивистских электронов, высыпающихся из внутреннего РПЗ на $L \sim 1.6 \div 1.8$. Показано, что в целом значимые потоки на указанных дрейфовых оболочках наблюдаются в разных географических районах в определенном интервале UT при разных уровнях геомагнитной активности. В то же время в случае очень сильной магнитной бури 11, 12 августа 2024 г. пространственное распределение потоков электронов в области высыпаний претерпело некоторые вариации. Полученные результаты не противоречат выводам, которые были сделаны ранее по наблюдениям на КА «ОНЗОРА» и «КОРОНАС-И». Особо следует отметить, что для получения более полной картины динамики и пространственной структуры высыпающихся электронов впервые были использованы данные наблюдений с разных КА многоспутниковой группировки «Созвездие-270» Московского университета. Естественно, для того чтобы сделать определенные выводы о динамике и механизмах высыпаний субрелятивистских электронов из внутреннего РПЗ, необходимы дальнейшие исследования, в которые многоспутниковые измерения могут внести существенный вклад. В этой связи роль наноспутниковой группировки «Созвездие-270» Московского университета крайне важна.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса», проект № 24-Ш01-05 «Созвездие 270», а также в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2004, т. 44, № 4, с. 502–510.
- Богомолов А.В., Денисов Ю.И., Колесов Г.Я. и др. Потоки квазизахваченных электронов с энергиями >0.08 МэВ в околосземном пространстве на дрейфовых оболочках $L < 2$. *Космические исследования*. 2005, т. 43, № 5, с. 323–329.
- Богомолов В.В., Богомолов А.В., Дементьев Ю.Н. и др. Первый опыт мониторинга космической радиации в мультиспутниковом эксперименте Московского университета в рамках проекта «Универсат-СОКРАТ». *Вестник Московского университета. Сер. 3: Физика, астрономия*. 2020, т. 73, № 6, с. 135–141.
- Вернов С.Н., Григоров Н.Л., Логачев Ю.И., Чудаков А.Е. Измерения космического излучения на искусственном спутнике Земли. *Доклады Академии наук*. 1958, т. 120, № 6, с. 1231–1233.
- Дорман Л.И., Мирошниченко Л.И. *Солнечные космические лучи*. М.: Наука, 1968, 468 с.
- Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н. Потоки квазизахваченных частиц над радиационными поясами Земли. *Геомагнетизм и аэрономия*, 2001, т. 41, № 1, с. 12–15.
- Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Денисов Ю.И. и др. Солнечная вспышка 4 ноября 2001 г. и ее проявления в энергичных частицах по данным ИСЗ «Коронас-Ф». *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2003, т. 37, № 2, с. 137–143. DOI: [10.1023/A:1023384425209](https://doi.org/10.1023/A:1023384425209).
- Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И. Попова Е. Действующие модели потоков заряженных частиц космического пространства и новые экспериментальные данные. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру*. 2014, № 1, с. 44–48.
- Мягкова И.Н., Богомолов А.В., Еремеев В.Е. и др. Динамика радиационной обстановки в околосземном пространстве в сентябре–ноябре 2020 г. по данным спутников «Метеор-М» и «Электро-Л». *Космические исследования*. 2021, т. 59, № 6, с. 460–472. DOI: [10.31857/S0023420621060078](https://doi.org/10.31857/S0023420621060078).
- Новиков Л.С., Воронина Е.Н. *Взаимодействие космических аппаратов с окружающей средой*. М.: КДУ, 2021.
- Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. 1. Описание эксперимента. *Космические исследования*. 2016а, т. 54, № 4, с. 277–285. DOI: [10.7868/S002342061604004X](https://doi.org/10.7868/S002342061604004X).
- Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. 2. Первые результаты. *Космические исследования*. 2016б, т. 54, № 5, с. 369–376. DOI: [10.7868/S0023420616050071](https://doi.org/10.7868/S0023420616050071).
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В. и др. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов. *Космические исследования*. 2005, т. 43, № 3, с. 186–193.
- Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. Исследования космической среды на микроспутниках «Университетский—Татьяна» и «Университетский—Татьяна-2». *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы*. 2011, т. 45, № 1, с. 5–31.
- Baker D.N. Satellite Anomalies due to space storms. *Space Storms and Space Weather Hazards*. 2001, vol. 38. Springer, Dordrecht. DOI: [10.1007/978-94-010-0983-6_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6_11).
- Bashkirov V.F., Denisov Y.I., Gotselyuk Y.V., et al. Trapped and quasi-trapped radiation observed by “CORONAS-I” satellite. *Radiation Measurements*. 1999, vol. 30, no. 5, pp. 537–546.
- Caspi A., Barthelemy M., Bussy-Virat C.D., et al. Small satellite mission concepts for space weather research and as pathfinders for operations. *Space Weather*, 2022, vol. 20, iss. 2, e2020SW002554. DOI: [10.1029/2020SW002554](https://doi.org/10.1029/2020SW002554).
- Cole D.G. Space weather: Its effects and predictability. *Space Sci. Rev.* 2003, vol. 107, pp. 295–302. DOI: [10.1023/A:1025500513499](https://doi.org/10.1023/A:1025500513499).
- Daglis I.A. *Space Storms and Space Weather Hazards*. Kluwer, Dordrecht, Boston, 2001. DOI: [10.1007/978-94-010-0983-6](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6).
- Ginet G.P., O’Brien T.P., Huston S.L. AE9, AP9 and SPM: New models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment. *Space Sci. Rev.* 2013, vol. 179, pp. 579–615 DOI: [10.1007/s11214-013-9964-y](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9964-y).
- Iucci N., Levitin A., Belov E., Eroshenko E.A. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. *Space Weather*. 2005, vol. 3, S01001. DOI: [10.1029/2003SW000056](https://doi.org/10.1029/2003SW000056).
- Kudela K. Space weather near Earth and energetic particles: selected results. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2013, vol. 409, iss. 1, article id. 012017. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012017](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012017).
- Kuznetsov S.N., Myagkova I.N. Quasi-trapped electron fluxes (>0.5 MeV) under the radiation belts: analysis of their con-

- nection with geomagnetic indices. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, no. 5-6. pp. 601–605.
- Lundstedt H. The Sun, space weather and GIC effects in Sweden. *Adv. Space Res.* 2006, vol. 37, no. 6, pp. 1182–1191. DOI: [10.1016/j.asr.2005.10.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.10.023).
- McGranaghan R.M., Camporeale E., Georgoulis M., Anastasiadis A. Space weather research in the digital age and across the full data lifecycle: Introduction to the topical issue. *J. Space Weather and Space Climate.* 2021, vol. 11, p. 50. DOI: [10.1051/swsc/2021037](https://doi.org/10.1051/swsc/2021037).
- Nagata K., Kohno T., Murakami H., et al. Electron (0.19–3.2 MeV) and proton (0.58–35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low latitude zones $L=1.6$ –1.8. *Planet. Space Sci.* 1988, vol. 36, pp. 591–606.
- Potapov A., Ryzhakova L., Tsegmed B. A new approach to predict and estimate enhancements of “killer” electron flux at geosynchronous orbit. *Acta Astronaut.* 2016, vol. 126, pp. 47–51. DOI: [10.1016/j.actaastro.2016.04.017](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.017).
- Sadovnichii V.A., Panasyuk M.I., Amelyushkin A.M., et al. “Lomonosov” satellite — space observatory to study extreme phenomena in space. *Space Sci. Rev.* 2017, vol. 212, no. 3-4, pp. 1705–1738.
- Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D., et al. Understanding space weather to shield society: A global road map 772 for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, pp. 2745–2807. DOI: [10.1016/j.asr.2015.03.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023).
- Wei F., Feng X., Guo J.S., et al. Space weather research in China. *Adv. in Space Environment Res.* Springer, Dordrecht. 2003, pp. 327–334. DOI: [10.1007/978-94-007-1069-6_31](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1069-6_31).
- Wilkinson P. Space weather studies in Australia. *Space Weather: The Intern. J. Research and Applications.* 2009, vol. 7, S06002. DOI: [10.1029/2009SW000485](https://doi.org/10.1029/2009SW000485).
- URL: <https://swx.sinp.msu.ru/tools/davisat.php> (дата обращения 22 июля 2025 г.).
- 15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.*
- Как цитировать эту статью:*
Богомолов А.В., Богомолов В.В., Июдин А.Ф., Калегаев В.В., Мягкова И.Н., Оседло В.И., Свертилов С.И., Яшин И.В. Мониторинг явлений космической погоды с использованием группировки наноспутников Московского университета «Созвездие-270». *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, № 3, с. 137–148. DOI: [10.12737/szf-113202515](https://doi.org/10.12737/szf-113202515).

SPACE WEATHER RESEARCH IN YAKUTIA

ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ЯКУТИИ

A.V. Moiseev 

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, moiseev@ikfia.ysn.ru

А.В. Моисеев

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, moiseev@ikfia.ysn.ru

A.Yu. Gololobov 

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, golart87@gmail.com

А.Ю. Гололобов

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, golart87@gmail.com

I.B. Ievenko 

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, ievenko@ikfia.ysn.ru

И.Б. Иевенко

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, ievenko@ikfia.ysn.ru

A.A. Korsakov 

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, korsakovaa@ikfia.ysn.ru

А.А. Корсаков

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, korsakovaa@ikfia.ysn.ru

I.S. Petukhov 

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, i_van@ikfia.ysn.ru

И.С. Петухов

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, i_van@ikfia.ysn.ru

S.A. Starodubtsev 

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru

С.А. Стародубцев

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

Abstract. The article reports on the studies of various manifestations of space weather (SW) on Earth, conducted by SHICRA SB RAS at the network of geo-physical stations located in Yakutia. It is noted that the Institute researchers study various phenomena occurring in the solar wind and Earth's magnetosphere such as magnetic clouds, Forbush effects, magnetic storms, substorms and associated subauroral glow, as well as high-latitude impulses in the dayside magnetosphere and sudden phase anomalies in the lower ionosphere. In addition to the data from the network of stations in Yakutia, data from other domestic and foreign stations, as well as direct measurements of the parameters of the interplanetary medium and magnetosphere, carried out on various spacecraft, are used to study these phenomena. The paper also describes physical models of magnetic clouds in the solar wind, high-latitude disturbed ionosphere, and methods for short-term forecasting of SW based on cosmic ray (CR) measurements developed at SHICRA SB RAS.

Keywords: geomagnetic Pc5 pulsations, equivalent current systems, azimuthal and meridional propagation, space weather monitoring, space weather forecast, lower ionosphere, solar flare, VLF signal, sudden phase anomaly.

Аннотация. В статье сообщается о проводимых в ИКФИА СО РАН на основе расположенной в Якутии сети геофизических станций исследованиях различных проявлений космической погоды (КП) на Земле. Отмечается, что сотрудники Института изучают различные явления, протекающие в солнечном ветре и в магнитосфере Земли: магнитные облака, эффекты Форбуша, магнитные бури, суббури и связанные с ними субавроральные свечения, а также высокоширотные импульсы в дневной магнитосфере и внезапные фазовые аномалии в нижней ионосфере. Помимо данных сети станций в Якутии для изучения этих явлений привлекаются данные других отечественных и зарубежных станций, а также прямые измерения параметров межпланетной среды и магнитосферы, которые проводятся на различных космических аппаратах. Описываются также разработанные в Институте физические модели магнитных облаков в солнечном ветре, высокоширотной возмущенной ионосфере и методы краткосрочного прогноза КП на основе измерений КП.

Ключевые слова: геомагнитные пульсации Pc5, эквивалентные токовые системы, азимутальное и меридиональное распространение, мониторинг космической погоды, прогноз космической погоды, нижняя ионосфера, солнечная вспышка, ОНЧ-сигнал, внезапная фазовая аномалия.

INTRODUCTION. SPACE WEATHER MONITORING AND FORECASTING IN RUSSIA

With the development of high technologies, space physics research has become of great importance for fundamental and applied science. Nowadays, space weather monitoring and forecast play an equally important role in the successful operation of space technology and human safety than the ordinary weather forecast. The term “space weather” (SW) refers to the state of near-Earth space (NES). In contemporary Russia, the information on the state of NES is generally provided by geophysical stations located at high latitudes of the Russian Arctic. The number of these stations is limited due to difficulties with staff, logistics, high electricity and heat tariffs in the Arctic. In addition, these stations belong to scientific organizations subordinate to different departments such as the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and Roshydromet. As a result, SW monitoring and forecasting is carried out by a number of Russian scientific organizations (IZMIRAN, IKI RAS, SINP MSU, LPI RAS, ISTP SB RAS, IPG, AARI, SHICRA SB RAS, IKIR FEB RAS, etc.). Despite the SW problem importance, this work has not yet been coordinated, and each organization does it independently. By contrast, SW issues are given much more attention abroad. As far back as 1995, the National Space Weather Program was created in the United States (National Space Weather Program. Strategic Plan. Office of Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research FCM-P30-1995. Washington DC. 1995); in 2001, the European ILWS (International Living with a Star) Program was launched. China keeps up with them and has also created the National Space Science Center, Chinese Academy of Science [<http://eng.sepc.ac.cn/>]. The importance of this problem is emphasized by the creation of the scientific journals “Space Weather” and “Space Weather and Space Climate”, which very quickly became highly rated. Also noteworthy are the ground-based instruments for studying SW: a developed network of geophysical stations in the Western Hemisphere compared to the Eastern one. By contrast, the SW problem is poorly addressed in present-day Russia. The number of scientific events in the country that draw attention to this problem, such as conferences on SW held by the Joint Russian-Chinese Scientific Center for SW, is very limited. Thus, scientific organizations engaged in SW research in Russia work under such difficult conditions.

This paper describes the network of geophysical stations of the Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS in Yakutia and presents the results of SW research the Institute carries out.

1. GEOPHYSICAL NETWORK OF STATIONS IN YAKUTIA

The main experimental measurements for studying the physical picture of phenomena in the subauroral and auroral zones are carried out on the basis of the unique meridional network of SHICRA SB RAS geophysical

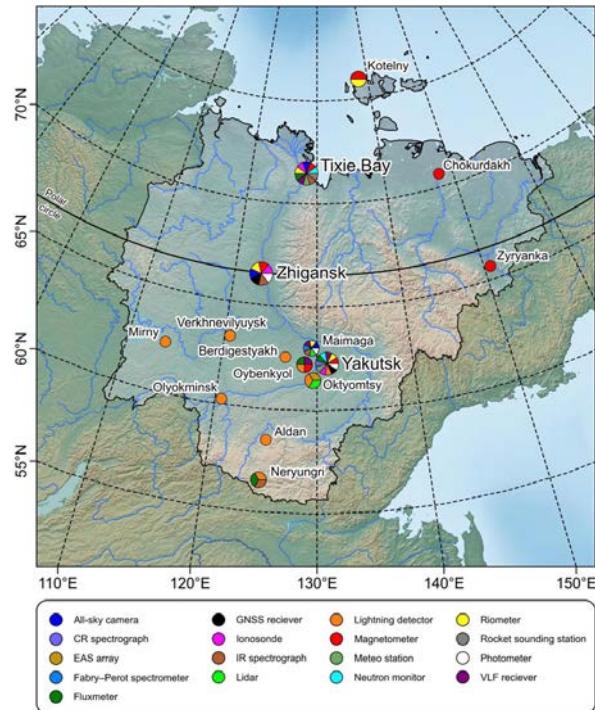


Figure 1. Stations of the meridional geophysical network in Yakutia in geographic coordinates. Measurement types are shown in color in the legend (for 2024)

stations in the territory of Yakutia (Figure 1). Geophysical phenomena during substorms and magnetic storms often cover a significant latitudinal and longitudinal interval. Therefore, in a number of situations only the ground-based method of recording SW manifestations can provide general information about magnetospheric processes.

The experimental base includes a network of stations in Yakutia, among which the following stationary polygons should be highlighted:

- Yakutsk EAS Array named after D.D. Krasilnikov (Oktymotsy);
- Yakutsk cosmic ray spectrograph named after A.I. Kuzmin (Yakutsk);
- Tixie Polar Geocosmophysical Observatory (Tixie Bay);
- Complex geophysical station Zhigansk (Zhigansk);
- The Maimaga optical station named after V.M. Ignatiev (Maimaga);
- Magnetic observatory and ionospheric station Yakutsk (Yakutsk);
- Radiophysical station “Oybenkyol” (Oybenkyol).

According to types of spatial measurements, the following networks of stations can be distinguished in Yakutia:

- network of magnetometric stations;
- network of riometric stations;
- network of stations for measuring the atmospheric electric field intensity;
- network of stations monitoring thunderstorm activity in Yakutia.

In the area of research into the geomagnetic field and magnetospheric electromagnetic disturbances, SHICRA SB RAS participates in three large international projects —

INTERMAGNET [<http://www.intermagnet.org>], MAGDAS [<http://magdas2.serc.kyushu-u.ac.jp/station/index.html>], and PWING [<http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/en/>], and also conducts joint research with the group of low-frequency radio emissions of the Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. Consequently, SHICRA SB RAS stations are equipped with modern scientific instruments from the world's leading manufacturers.

2. RESULTS OF SPACE WEATHER RESEARCH AND FORECAST

Below we present the results obtained by studying SW phenomena experimentally and via modeling, as well as the result of SW forecast from satellite measurements.

2.1. Comparative analysis of meridional and azimuthal propagation of $Pc5$ pulsations and their current systems based on ground and satellite observations

One of the daytime impulsive high-latitude phenomena is Travelling Convection Vortices (TCVs) [Glassmeier, 1992]. TCV is a structure consisting of a pair of oppositely directed vortices in the magnetosphere, connected by field-aligned currents with vortices in the ionosphere. During its development, TCV shifts azimuthally from noon to dawn sector and along the meridian poleward. The location of magnetospheric and ionospheric TCVs, as well as the field-aligned currents connecting them in the pre-noon sector, is shown in Figure 2, *a* from [Tavares, Santiago, 1999], with arrows V_{EW} and V_{conv} indicating TCV propagation in the azimuthal direction and plasma convection respectively. According to ground-based and satellite observations, TCV consists of 2–3 pulses of opposite polarities with 5–10 min periods; TCVs are observed locally on the dayside at high latitudes. It is important to study the dynamics of TCVs in terms of SW since they cause geomagnetic field variability $|dB/dt|$ in the absence of magnetic storms and can affect technical infrastructure at high latitudes [Pilipenko et al., 2023].

Moiseev et al. [2024a] have used ground observations in 8 events to compare TCV velocities by phase delays of $Pc5$ pulsations and by the motion of their equivalent current systems. Figure 2, *b*, *c* presents histograms of meridional velocities; and Figure 2, *d*, *e*, of azimuthal velocities. On the ordinate axis in Figure 2, *b*, *d* is the number of measurements of $Pc5$ pulsation velocities; on the ordinate axis in Figure 2, *c*, *e* is the number of measurements of vortex propagation velocities. The histograms show a smoothing line as the result of a non-parametric method for estimating the density of random variable (Kernel Density Estimation). It is evident from the histograms that propagation of pulsations and vortices is similar: along the meridian, pulsations and vortices predominantly propagate to the north. In most cases, propagation velocities of pulsations and vortices were ~ 5 km/s and 2 km/s respectively, whereas in azimuth, pulsations and vortices propagate to the west, their propagation velocities were ~ 10 km/s and 3 km/s respectively. However, in the distribution of azimuthal velocities

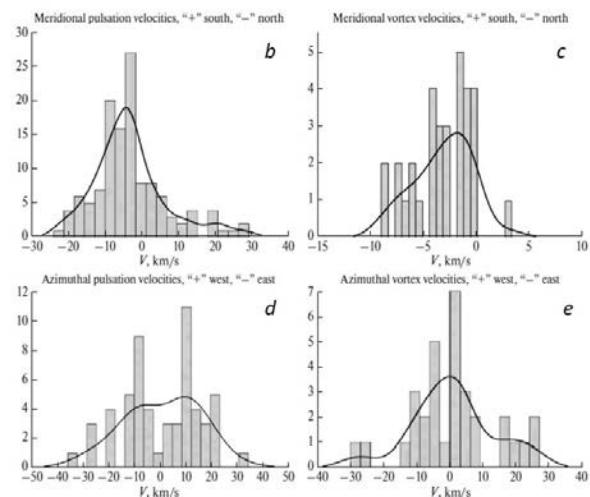
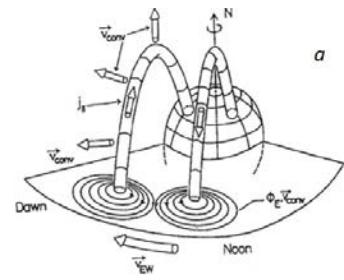


Figure 2. Travelling convection vortices in the magnetosphere and ionosphere (*a*); histograms of propagation velocities of geomagnetic pulsations and equivalent current vortices; meridional velocities (*b*, *c*); azimuthal velocities (*d*, *e*)

of both pulsations and vortices there are comparable maxima corresponding to eastward propagation: the velocity of pulsations is 10 km/s, and that of vortices is 5 km/s. Moiseev et al. [2024b] have studied TCV propagation, using satellite and ground-based observations. Pulsations in the magnetosphere and ionosphere, and equivalent current vortices in the ionosphere were found to propagate in the azimuthal direction from the day side to the night side. The propagation velocities according to ground observations are 5–25 km/s; according to satellite observations, 114–236 km/s.

The results of the work show that the dynamics of equivalent current systems correspond to the dynamics of pulsations, and they can be utilized to study propagation as an additional method, especially when it is impossible to determine propagation velocities from phase delays, but it is necessary to take into account the difference between velocities of pulsations and vortices. TCVs are recorded in an extended longitude sector (up to 12 hours). It is assumed that the observed dynamics of $Pc5$ pulsations and vortices reflects propagation of MHD waves in the magnetosphere, not only from the day side to the night side, but also in the opposite direction (from the night side to the noon side).

2.2. Study of the magnitude of sudden phase anomalies on VLF radio paths during solar flares

Changes in lower ionosphere parameters are sensitive to space weather events [Silber, Price, 2017]. Very low frequency (VLF 3–30 kHz) radio waves propagate for a long distance as in a waveguide due to reflection from water, ground, and lower ionosphere. An increase

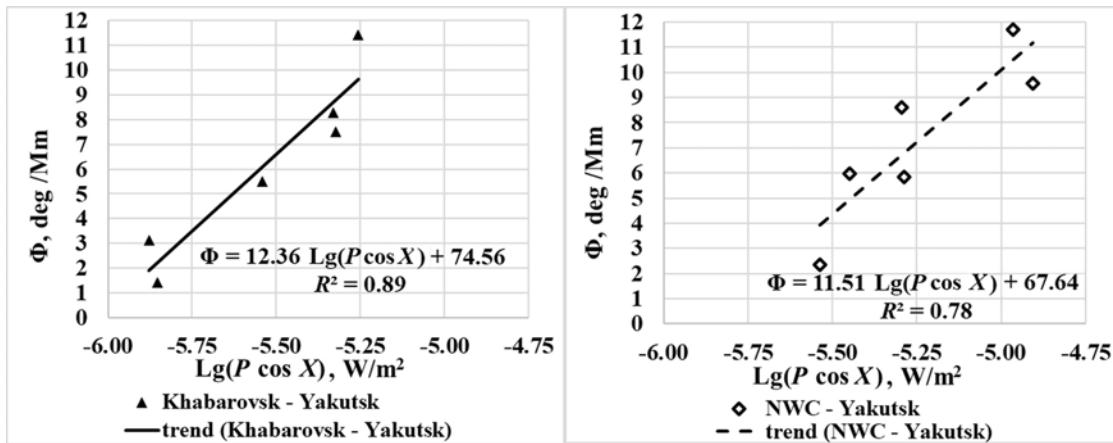


Figure 3. Sudden phase anomalies Φ of signals from transmitters Khabarovsk (left) and NWC (right) recorded in Yakutsk as a function of solar X-ray flux

in the X-ray flux intensity during solar flares leads to sudden ionospheric disturbances (SIDs). A sharp increase in the electron density during SIDs causes sudden phase anomalies (SPAs) of VLF radio signals during daytime propagation in the Earth — ionosphere waveguide [Kumar, Kumar, 2018]. Recording of VLF signal parameters allows ionosphere research to be conducted with high resolution both in time and space. The Antarctic—Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition-VLF Atmospheric Research Consortium is widely known, it provides continuous observations of the lower ionosphere in the polar regions [Clilverd et al., 2009]. The problem of high-resolution VLF monitoring of large, hard-to-reach areas of the Pacific Ocean and Northern Asia remains unresolved [Wendt et al., 2024]. VLF observations in Yakutia are described below.

In Yakutsk (62.02° N, 129.70° E) and in the Polar Geocosmophysical Observatory (PGO) in Tixie Bay (71.60° N, 128.90° E), SHICRA SB RAS records signals from VLF radio transmitters. The phase variations of signals from the transmitters Khabarovsk (Russia, RSDN-20 system, 50.07° N, 136.6° E, signal frequency 11.904 kHz) and NWC (Australia, 21.82° S, 114.17° E, signal frequency 19.8 kHz) have been selected for the analysis [Kozlov et al., 2025]. Radio propagation paths Khabarovsk—Yakutsk (the length is 1.4 Mm) and NWC—Yakutsk (the length is 9.4 Mm) cover the East Asia territory. SPAs of signals from the Khabarovsk and NWC transmitters recorded in Yakutsk are plotted in Figure 3 as a function of solar X-ray flux. Changes in the VLF signal phase Φ relative to the undisturbed value are reduced to the propagation path length unit (deg/Mm). The value P is the maximum X-ray flux intensity (0.1 – 0.8 nm) during a solar flare (W/m^2). The value $\cos X$ is the cosine of a solar zenith angle X averaged along the entire propagation path. The solar zenith angle X was calculated from geographic coordinates along each of the radio paths with a step of 200 km by the algorithm [<http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>].

The standard deviations of residuals are 1.37 deg/Mm (the Khabarovsk—Yakutsk propagation path) and 1.73 deg/Mm (the NWC—Yakutsk propagation path). The reliability level of model SPA parameters is not lower

than 98% (the Fisher criterion). The SPA model parameters were applied to solar flares for the VLF propagation paths. The X-ray flux during solar flares can be estimated by the ground-based method, using VLF data [George et al., 2019; Korsakov et al., 2021].

2.3. Relationship of the SAR arc to the energetic ion flux boundary inside the plasmasphere and the plasmapause based on ground and satellite observations

Stable auroral red (SAR) arcs occur during magnetic storms due to overlap of the ring current with the outer plasmasphere, where energetic ion fluxes heat plasmaspheric electrons. SAR arcs are optical manifestations of SW in Earth's atmosphere. The resulting downward flux of superthermal electrons along magnetic field lines increases the ambient electron temperature at altitudes of the ionospheric F2 region in the form of a subauroral electron temperature peak (T_e peak). As a result, the intensity of the red line of atomic oxygen in the SAR arc, which reflects the plasmapause, increases [Cole, 1965, 1970; Cornwall et al., 1971; Kozyra et al., 1997]. Long-term observations of subauroral glow at the Yakutsk meridian have shown that under conditions of low magnetic activity ($Dst \geq -50$ nT, $K_p \leq 3$ – 4) SAR arcs appear during individual substorms and are observed at corrected geomagnetic latitudes (CGMLat) 55 – 60° [Ievenko, 1999; Ievenko, Alekseev, 2004]. During periods of high geomagnetic activity, SAR arcs are recorded at lower latitudes.

Below are the results of comparison of SAR arc observations by the digital all-sky camera (All-sky imager “Keo Sentry”) at the station Maimaga (CGMLat= 58° , CGMLon= 202°) with data from simultaneous recording of plasmapause and energetic ion fluxes on board the Van Allen Probe B (VAP-B) satellite at the beginning of the major magnetic storm on March 17, 2015 [Ievenko, 2020; Ievenko, Parnikov, 2020].

The ground-based and satellite observations in Figure 4 show the following.

1. An intense SAR arc was observed equatorward of the diffuse aurorae at low auroral activity at CGMLat= 52 – 59° in the dusk MLT sector. Variations

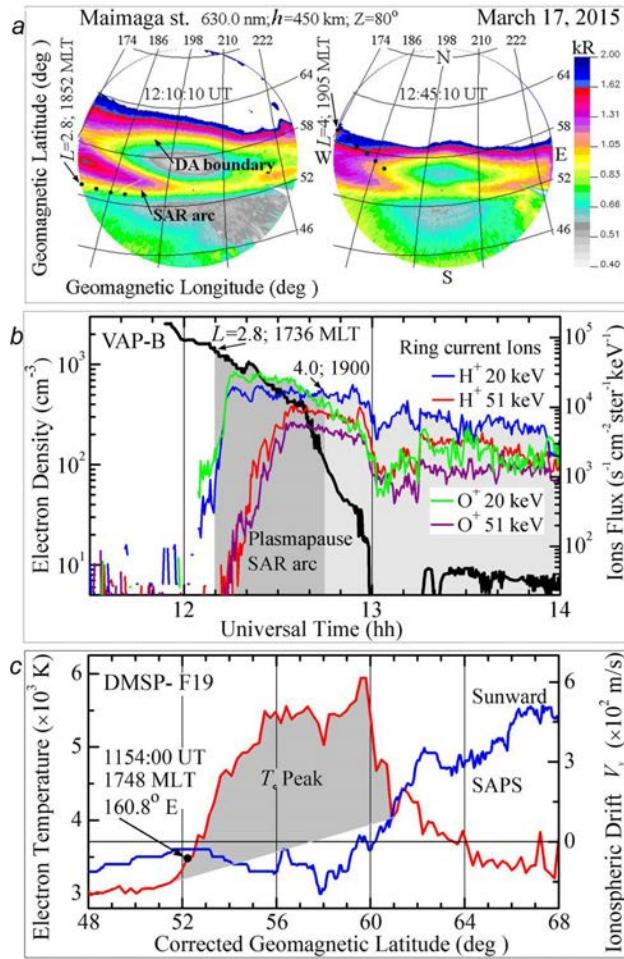


Figure 4. SAR arc at Maimaga station during recording of plasmapause energetic ion fluxes and T_e peak on board the VAP-B and DMSP-F19 satellites, respectively, on March 17, 2015. All sky images in the 630.0 nm emission projected onto Earth's surface for the glow altitude of 450 km ($Z \leq 80^\circ$) in corrected geomagnetic coordinates (a). The color scale of the emission intensity is given only up to two kilorayleigh (kR) for better display of the SAR arc. The density of thermal electrons and fluxes of energetic protons and oxygen ions (b). The dark gray column shows the region of VAP-B measurements, which was conjugate with the observed SAR arc. Latitudinal distribution (c) of electron temperature and ionospheric drift in the F region based on DMSP-19 measurements in the dusk MLT sector. The bold dot marks the location of the equatorial boundary of the T_e peak, with magnetic longitude and MLT indicated

in the intensity and location of the red arc during the period considered were insignificant (a).

2. At 12:10:10 UT (~18:52 MLT), the equatorial edge of the red arc at CGMLon~179° coincided with the boundary of the flux of energetic H^+ and O^+ ions inside the plasmasphere at $L \sim 2.8$, as measured by VAP-B at ~17:36 MLT (b).

3. At 12:45:10 UT (~19:05 MLT), the polar edge of the arc at CGMLon~174° was due to a sharp decrease in the electron density to $\sim 100 \text{ cm}^{-3}$ (plasmapause) at $L \sim 4.0$ at ~19:05 MLT (b).

4. The width and location of the SAR arc were in good agreement with the intense T_e peak, as measured by DMSP-19 in the dusk MLT sector at ~11:54 UT (c). Electron temperature measurements verify ground-based observations of the SAR arc.

2.4. Study of ionospheric disturbances based on numerical modeling of large-scale structure of the ionosphere

The high-latitude ionosphere has a complex structure and is characterized by the presence of regular

large-scale structural features such as the tongue of ionization and polar cavity at high latitudes, polar and auroral peaks in the daytime cusp region and in the night sector, as well as the main ionospheric trough (MIT) at subauroral latitudes [Mizun, 1980]. The ionosphere depends significantly on SW. Thus, during geomagnetic storms, the configurations of these structural features become more complex, which is mainly caused by the disturbance of the large-scale electric field of magnetospheric convection controlled by the orientation of the interplanetary magnetic field (IMF).

Changes in the electron density distribution in turn affect radio wave propagation and the positioning accuracy of global navigation satellite systems (GNSS).

SHICRA SB RAS conducts research into the large-scale structure of the ionosphere and the processes occurring in it, using the developed non-stationary three-dimensional model of the ionosphere in Euler variables [Kolesnik, Golikov, 1982; Golikov et al., 2005, 2012, 2016]. Below are the results of the study into the effect of magnetospheric convection on the large-scale structure of the ionosphere during a moderate geomagnetic storm

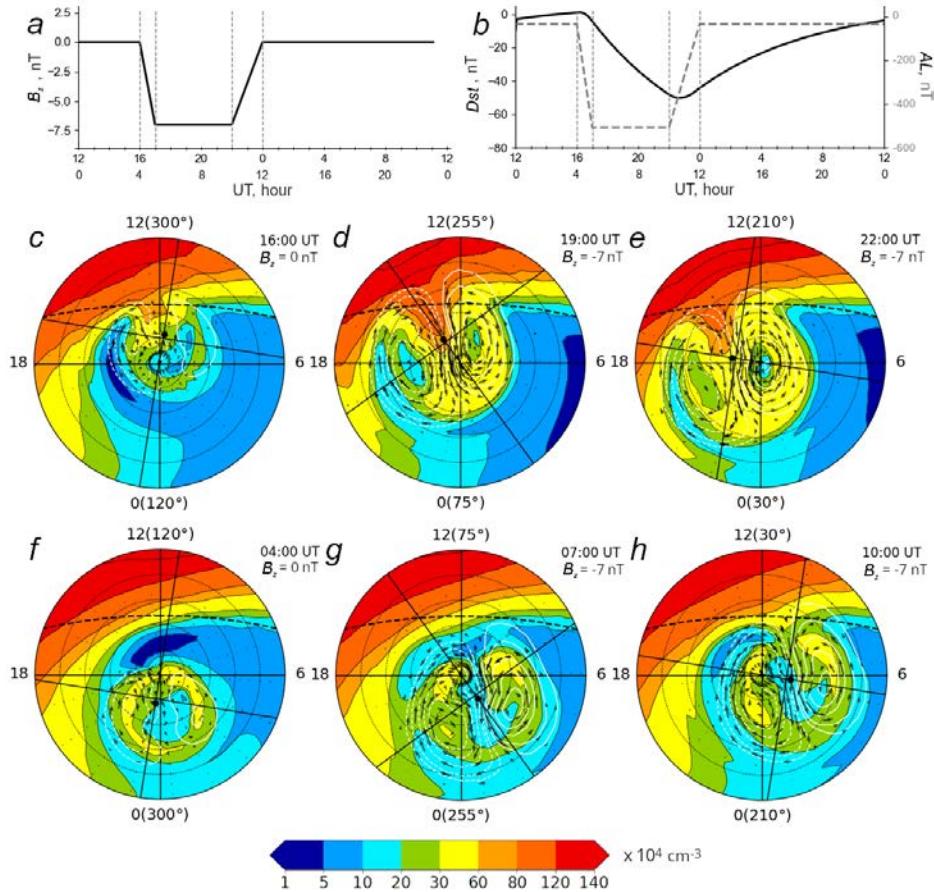


Figure 5. IMF B_z component (a), geomagnetic activity indices Dst and AL (b), and spatiotemporal distributions of the electron density at the height of the F2 maximum (n_mF2) at different moments of universal time at the onset of the storm at 16 UT (c–e) and 04 UT (f–h). Concentric circles denote the geographic latitudes of the Northern Hemisphere drawn through 10° . The lower boundary corresponds to 40° N. The numbers near the outer circle are local time and next to them in brackets are geographic longitude. The dashed line (upper) is the position of the terminator at the zenith angle $\chi=90^\circ$. The intersection point of two mutually perpendicular lines is the geomagnetic pole, which is 11.5° away from the geographic pole. The arrows indicate drift velocities of ionospheric plasma caused by the electric field of magnetospheric convection. White isolines show the electric field potentials calculated by the Weimer model [Weimer, 1996]. Charged particle precipitation is specified using the APM PGIA model [Vorobjev et al., 2013]

for winter conditions ($\delta=-23^\circ$). Two diametrically opposed scenarios are considered: 1) with the onset of the storm at 16 UT; 2) with the onset of the storm at 04 UT.

Figure 5 illustrates variations in the IMF B_z component (a) and geomagnetic activity indices Dst and AL (b) and spatiotemporal distributions of the electron density at the F2 maximum altitude (n_mF2) at different moments of universal time (UT) at the onset of the storm at 16 UT (c–e) and 04 UT (f–h). Under quiet conditions (Figure 5, c), the convection region is seen to partially enter the illuminated zone above the terminator at 16 UT, which leads to transfer of plasma from the dayside ionosphere to the night side and the formation of an ionization tongue. In polar latitudes ($\Phi_m \geq 80^\circ$), a region of low n_mF2 is formed — a polar cavity surrounded by ionization in the auroral oval (Figure 5, c). In the latitudinal variation in the dusk sector in the full shadow region [Kolesnik, Golikov, 1982], a deep concentration trough is observed: the main ionospheric trough (MIT) (Figure 5, c). After the onset of the disturbance, convection intensifies and its area of action

increases (Figure 5, d, e). This causes an increase in the area of overlap of the convection region with the illuminated ionosphere and hence an increase in the transfer of dayside ionization to the night side by the anti-sunward flow, subsequent extension of the ionization tongue in the day-night direction, and the disappearance of the polar cavity at 19 UT. At 22 UT, the depth of MIT decreases, and MIT shifts southward by $\sim 5^\circ \div 10^\circ$.

The storm onset at 04 UT is diametrically opposite to the magnetic storm onset at 16 UT (Figure 5, f–h). In this case, the Eastern Hemisphere is on the day side. As can be seen, at 04 UT the geomagnetic pole and with it the convection and precipitation region are located entirely on the night side (Figure 5, f). As a result, the ionization tongue is seen to separate from the dayside ionosphere. In the latitudinal variation on the dayside in the range $70\text{--}80^\circ$ N, a great dip in n_mF2 is observed — a daytime dip (Figure 5, f) [Kolesnik, Golikov, 1984]. At CGMLat above $\sim 80^\circ$, a polar cavity is formed, where $n_mF2 \leq 10^4 \text{ cm}^{-3}$. After the disturbance starts, the increase in magnetospheric convection leads to the expansion

sion of the detached tongue of ionization and to the smoothing of the auroral peaks of $n_m F2$ (Figure 5, g, h). At 07 UT, convection covers the daytime trough and significantly increases $n_m F2$ compared to their values under quiet conditions (Figure 5, g, f).

Thus, magnetospheric convection during a moderate magnetic storm causes a change in the shapes and sizes of the main large-scale structural features of the ionosphere and depends on the time of the geomagnetic storm onset due to the displacement of the geographic and geomagnetic poles. The storm effect is most pronounced in the case of storm onset at 16 UT, when the disturbed electric field of magnetospheric convection enhances the transfer of plasma from the dayside ionosphere to the night side. The results are presented in more detail in [Gololobov, Golikov, 2024; Gololobov et al., 2025].

2.5. Explanation of Forbush decreases in cosmic rays based on a physical model

Large-scale coronal mass ejections (CMEs) are one of the largest energetic events on the Sun and an important factor in SW affecting geomagnetic activity, the spatiotemporal distribution of CRs, and solar wind plasma properties. The modern approach to determining the properties of ejections and their identification in interplanetary space is usually based on the use of local spacecraft measurements. Since the number and spatial coverage of such spacecraft are fairly limited, there is a need for alternative sources of information, for example, CR measurements, which, due to high mobility, contain information about large-scale properties of the medium.

Part of CME is magnetic clouds (MCs) — areas filled with a helical magnetic field. Due to its force-free structure, such a field is preserved at large distances. Some MCs are oriented in such a way that in the vicinity of Earth, regular IMF will have a high intensity and a long-term southern orientation, which is a necessary condition for the occurrence of a geomagnetic storm.

To determine properties of MC from observed characteristics of CRs, it is necessary to describe their interaction. We have proposed an electromagnetic mechanism for such interaction. In this mechanism, particle scattering is neglected, and propagation is determined only by the magnetic field of the ejection and the electric field induced in the moving plasma. By calculating trajectories of CRs from the point of interest to the source (the point where the characteristics have not yet been altered by the Sun), it is possible to determine the change in their energy and the corresponding change in intensity. For theoretical calculations, an MC model has also been proposed which allows us to identify the magnetic field at an arbitrary point at any time.

The calculations have shown that the energy losses during the motion of CRs in the induced electric field, although small, are monotonous; hence, the longer the particle moves in interplanetary space, the more energy it loses, which leads to a decrease in the recorded intensity of CRs (Figure 6, a).

Since the calculations allow us to determine the CR distribution function, knowing it, we can find not only the zero moment (the integral intensity), but also higher

moments: the first — the vector anisotropy (Figure 6, b), and the second — the tensor anisotropy (Figure 6, c, d). The CR anisotropy inside MC increases, which is consistent with experimental observations. Comparison of the experimental results with calculations suggests that the adopted assumptions and the constructed models are adequate. The method and the results obtained on its basis are described in more detail in [Petukhova et al., 2019, 2020].

In the future, it is planned to take into account in the model not only the magnetic field of MC, but also the effect of the coronal mass ejection plasma, the region of compressed solar wind, and the shock wave on CRs. This will allow a more accurate determination of ejection properties long before it arrives at Earth's orbit and hence refinement of space weather forecast.

2.6. Forecast of geoeffective disturbances from satellite and ground cosmic ray measurements

Since 2009, SHICRA SB RAS has been conducting an experiment on short-term (1–2 days) forecasting of the arrival of large-scale SW disturbances into the Earth orbit, such as interplanetary shock waves (ISWs) and high-speed SW streams, using measurements from the global network of CR stations, which include SHICRA SB RAS stations Yakutsk and Tixie Bay, as well as real-time spacecraft (SC) measurements of interplanetary medium parameters.

In this paper, we illustrate the capabilities of the ISW forecast from 1 hr [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>] and 1 min ACE SC data [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace/>]. This SC is located near the libration point L1 at a distance of ~1500 000 km from Earth toward the Sun. The flight time of large-scale SW disturbances from the location of ACE SC to Earth's magnetosphere is on average ~1 hr, which is clearly insufficient for taking any preventive measures to prevent possible negative effects of SW changes on various technical space or ground systems. However, the forecast method we developed using data from this SC allows us to receive a warning about upcoming changes in SW much longer in advance, ~1 day.

Of all the experiments conducted on board ACE SC, we use data from the MAG, SWEPAM, and EPAM experiments. In the latter case, the data is from measurements of proton fluxes in 8 different differential energy channels with energies from 47 to 4800 keV, which are measured by the LEMS120 detector. Note that all data is primary and so should be analyzed with a certain caution, and possible risks associated with their use must be assumed.

At present, we have already accumulated the necessary knowledge to construct a physical picture of the occurrence of fluctuations (or short-term variations with periods less than 3 hrs) of CR in order to apply it to a forecast of the arrival of large-scale solar wind disturbances at the Earth orbit [Berezko, Starodubtsev, 1988; Starodubtsev et al., 1996; Grigoryev et al., 2008]. In brief, the knowledge boils down to the following.

In many cases, significant CR fluxes with ~1 MeV energies are often observed in the region before large-scale

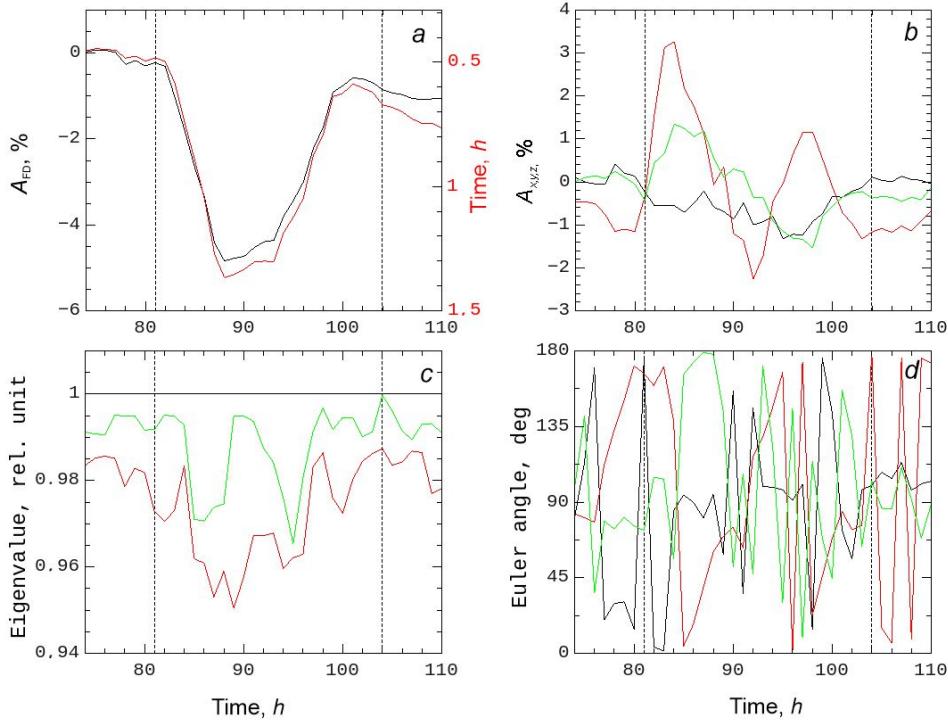


Figure 6. Characteristics of the Forbush decrease in time: *a* — the amplitude of the Forbush decrease is shown by the black curve (left scale); and the average time of CR transition from the surrounding space to MC, by the red curve (right scale); *b* — vector anisotropy component (black curve — A_x ; red curve — A_y ; green curve — A_z); *c* — relative eigenvalues (the maximum eigenvalue, indicated by the black line, is 1; green curve is the average; red curve is the smallest); *d* — three Euler angles defining the orientation of the ellipsoid (black and red curves are α_1 , α_2 ; green curve, α_3). $B_m = 11.6$ nT is maximum magnetic field strength when MC crosses Earth. Dashed vertical lines are the leading and trailing boundaries of MC

solar wind disturbances, e.g. ISWs or high-speed solar wind streams. Moreover, compared to the background, these CRs are characterized by large values of both the fluxes and their gradients. This leads to the development of plasma instabilities, which in turn are converted into MHD waves of various types. If fast magnetosonic waves develop in interplanetary space before the aforementioned solar wind disturbances, they, in turn, modulate the isotropic part of the CR distribution function in a wide energy range (from tens of keV to units of GeV) and hence lead to the emergence of CR fluctuations. Nonetheless, since CR fluctuations have a low amplitude (less than 1 %), then to isolate them against the background of the persistent noise, it is necessary to correctly apply spectral analysis methods [Starodubtsev et al., 2023]. One of the methods for forecasting SW developed at SHICRA SB RAS from CR measurements is based on these concepts.

The fluctuation extraction technique involves calculating the coherence between CR flux measurements in different differential channels in the EPAM/LEMS120 experiment. According to the results obtained in [Grigoryev et al., 2008], there is a significant CR coherence value between CRs with different energies in the frequency range above 10^{-4} Hz in the case of significant CR fluxes in the region of the ISW pre-front. Our experience shows that for forecasting purposes it is necessary for the coherence to exceed a certain critical level equal to 0.85, and it is sufficient for this to occur not in the entire range, but at individual frequencies that corre-

spond to the inertial section of the MHD wave turbulence spectrum, where fast magnetosonic waves are observed. Therefore, as a precursor of the arrival of interplanetary disturbances of the solar wind at the Earth orbit we utilize a maximum coherence coefficient (Coher MAX) between measurements in the energy channels P2 and P5.

As an example, let us consider the ISW event of May 10, 2024. Figure 7, *a–e* presents 1-hr measurement data on the IMF modulus and B_z component (*a*), solar wind density (*b*), temperature (*c*), and velocity (*d*), as well as Dst (*e*) for the event under study from May 8 to 13, 2024. It is evident that at the leading edge of strong ISW at $\sim 18:00$ UT on May 10, 2024, all parameters significantly exceeded their average values. In this case, the IMF modulus B was more than 40 nT, the B_z component was less than -16 nT, the solar wind plasma density $n \approx 33$ cm $^{-3}$, its temperature $T \approx 5 \cdot 10^5$ K, and the solar wind speed U was as high as 680 km/s (Figure 7, *a–d*). Since this was a complex event in all respects, caused by almost simultaneous arrival of multiple CMEs at Earth [Hayakawa et al., 2025; Lazzús, Salfate, 2024; Ram et al., 2024], all SW parameters subsequently changed even more dramatically. The passage of this strong ISW caused a powerful geomagnetic storm with SSC (Figure 7, *e*). This storm began at 17:05 UT on May 10, 2024. As a result of the passage of multiple CMEs through the Earth orbit, Dst at the storm minimum decreased to -406 nT [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>]. It was the most powerful geomagnetic storm

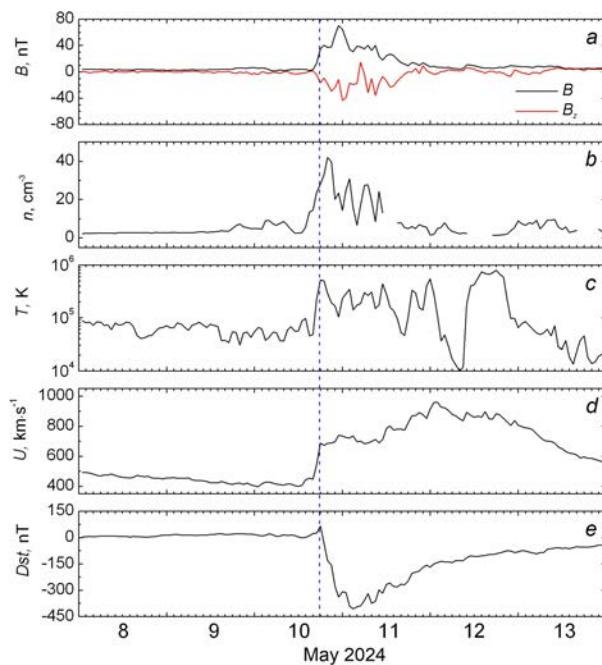


Figure 7. Variations in the IMF modulus B and B_z component (a), density n (b), temperature T (c) and solar wind velocity U (d), as well as the Dst index (e) for May 8–13, 2024, as measured by ACE SC. The vertical dashed line indicates the arrival of ISW at ACE SC and the storm sudden commencement (SSC)

observed in the last two decades since the famous event of November 20, 2003, which is known in the scientific literature as the Halloween Event [Piersanti et al., 2025].

Figure 8 presents the results of the ISW arrival forecast and it needs some explanations. The names of the experiments and the corresponding SC on board which they are conducted are given at the top of the figure. Further, from top to bottom, the large panels show the time dependence of the variations in the IMF modulus B and B_z component, the SW plasma velocity U and density n , the low-energy CR flux J , and the maximum value of the coherence coefficient between measurements in the P2 and P5 energy channels (Coher MAX). Vertical lines designate the universal time (UT), which is given under the bottom panel as day of the year. Four bottom small panels from left to right exhibit the current values of the IMF power spectrum density and the power function approximating it, as well as the coherence coefficients depending on the frequency between B and U , B and n , and between P2 and P5. Inscriptions below these panels contain information about the fact of using data in real time and the time of creating the figure. In the case of generating a forecast, a red inscription appears in Figure 8, which states that an interplanetary disturbance is expected to arrive at the spacecraft within ~ 1 day.

It is evident from Figure 8 that, as expected, increased low-energy CR fluxes were observed in this event in the region of the strong ISW pre-front. It can therefore be expected that they will generate fast magnetosonic waves in the region of the ISW pre-front,

which will modulate the isotropic part of the CR flux and lead to the occurrence of fluctuations a sufficiently long time before the arrival of ISW. Indeed, the first maximum values of coherence between the channels of recording of proton fluxes P2 and P5 with energies 115–195 and 1060–1900 keV respectively, exceeding the critical level were observed at 01:00 UT on May 9, 2024, 36 hours before the arrival of ISW at ACE SC and remained above this level until 22:00 UT on May 11, i. e. until the SW parameters were disturbed (see Figure 8).

Thus, based on ACE SC measurements of CR fluxes with a lead time of 36 hours, a forecast was given for the arrival of a large-scale SW disturbance of the ISW type at the Earth orbit on May 10, 2024. Our experience shows that in such cases the accuracy of the forecast is $\sim 80\%$.

Note also that SHICRA SB RAS has been continuously monitoring near-Earth space in real time for many years. For this purpose, measurement data is employed from ACE SC and on the CR intensity from the stations Yakutsk and Tixie Bay. All calculations are performed automatically once per hour, using the *cron* daemon program under the control of the Linux operating system. All output information, including measurement data and calculation results in graphical form, is available at [<https://www.ysn.ru/~starodub/CosmicRayFluctuations/index.html>].

CONCLUSION

The SW phenomena of different spatial scales have been studied: global (magnetic storm), local (TCV, sub-storm). Local phenomena are recorded in the daytime (TCV) and nighttime sectors (substorm). We have examined the formation of disturbances in the solar wind and their development in the magnetosphere. Using the example of a strong magnetic storm in May 2024, the result of a short-term forecast of the arrival of a large-scale solar wind disturbance of the ISW type at the Earth orbit with a lead time of 36 hours has been shown.

SHICRA SB RAS is ready to participate in international projects, as well as in collaborations with Russian scientific organizations in the field of space weather.

The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

REFERENCES

- Berezko E.G., Starodubtsev S.A. Nature of the dynamics of the cosmic-ray fluctuation spectrum. *Bull. Academy of Sciences of USSR. Ser. Physics.* 1988, vol. 52, pp. 2361–2363.
- Clilverd M.A., Rodger C.J., Thomson N.R., Brundell J.B., Ulich T., Lichtenberger J., Cobbett N., et al. Remote sensing space weather events: Antarctic-Arctic radiation-belt (dynamic) deposition-VLF atmospheric research Konsortium network. *Space Weather.* 2009, vol. 7, iss. 4, S04001. DOI: [10.1029/2008SW000412](https://doi.org/10.1029/2008SW000412).
- Cole K.D. Stable auroral red arcs, sinks for energy of Dst main phase. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, iss. 7, pp. 1689–1706.
- Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude auroras. *Ann. Geophys.* 1970, vol. 26, iss. 1, pp. 187–193.
- Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R.M. Unified theory of SAR arc formation at the plasmapause. *J. Geophys. Res.* 1971, vol. 76, iss. 19, pp. 4428–4445.
- George H.E., Rodger C.J., Clilverd M.A., Cresswell-Moorcock K., Brundell J.B., Thomson N.R. Developing a nowcasting

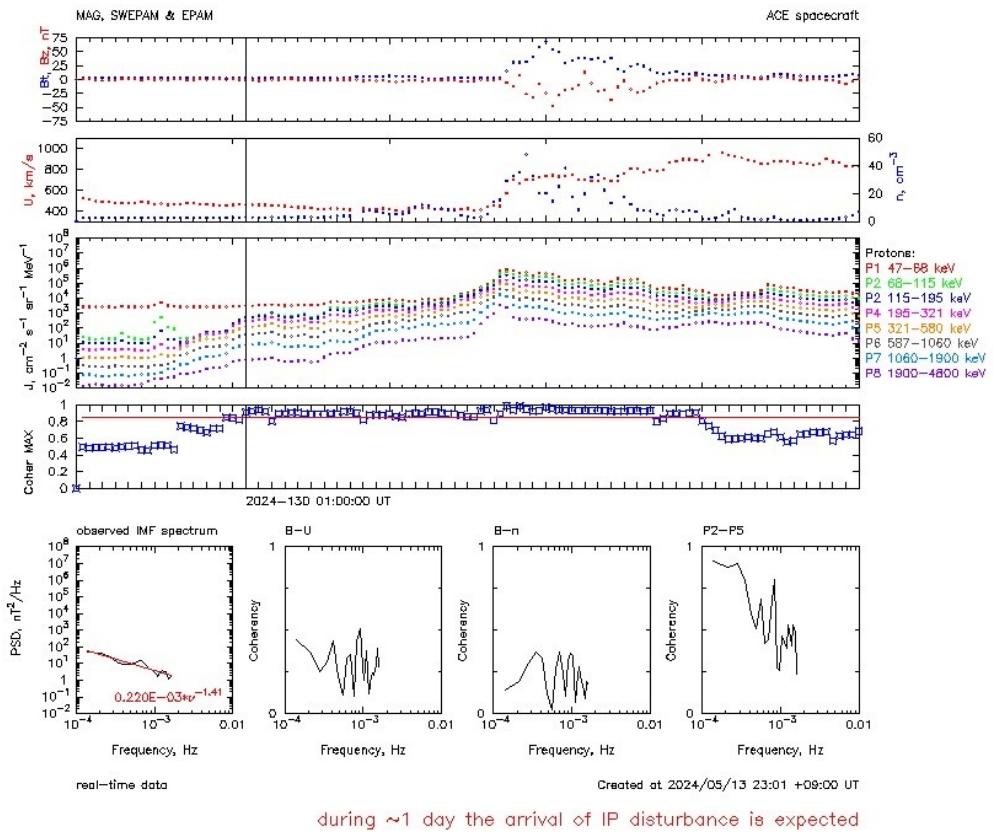


Figure 8. Variations in the IMF modulus B and the B_z component (top panel), the solar wind plasma velocity U and density n (second panel from the top), the low-energy CR flux J (third panel from the top), the maximum value of the coherence coefficient between measurements of the J energy channels P2 and P5 (fourth panel from the top), the red horizontal line indicates the critical level. The vertical lines show the current time. A legend is given for the differential CR energy channels. Four bottom panels from left to right present the current values: the density of the IMF power spectrum and the power function approximating it; the coherence coefficients between B and U , B and n , and between P4 and P5

capability for X-Class solar flares using VLF radiowave propagation changes. *Space Weather*. 2019, vol. 17, iss. 12, pp. 1783–1799. DOI: [10.1029/2019SW002297](https://doi.org/10.1029/2019SW002297).

Glassmeier K.-H. Traveling magnetospheric convection twin vortices: Observations and theory. *Ann. Geophys.* 1992, vol. 10, iss. 8, pp. 547–565.

Golikov I.A., Kolesnik A.G., Chernyshov V.I., Popov V.I. Mathematical model of the F2 region of the high-latitude ionosphere taking into account the thermal regime. *Bull. Yakutsk State University*, 2005, vol. 2, iss. 3, pp. 61–69.

Golikov I.A., Gololobov A.Yu., Popov V.I. Numerical modeling of the thermal regime of the high-latitude ionosphere. *Bull. North-Eastern Federal University*, 2012, vol. 9, iss. 3, pp. 22–28.

Golikov I.A., Gololobov A.Yu., Popov V.I. Modeling the electron temperature distribution in F2 region of high-latitude ionosphere for winter solstice conditions. *Sol.-Terr. Phys.* 2016, vol. 2, iss. 4, pp. 54–61. DOI: [10.12737/19424](https://doi.org/10.12737/19424).

Gololobov A.Yu., Golikov I.A. Numerical modeling of the influence of IMF on the large-scale structure of the ionosphere taking into account the misalignment of the poles. *Bull. North-Eastern Federal University*. 2024, vol. 21, iss. 1, pp. 45–57. DOI: [10.25587/2222-5404-2024-21-1-45-57](https://doi.org/10.25587/2222-5404-2024-21-1-45-57).

Gololobov A.Yu., Golikov I.A., Popov V.I. Modeling of the influence of magnetospheric storm on the large-scale structure of the high-latitude ionosphere for winter solstice conditions. *Sol.-Terr. Phys.* 2025, vol. 11, iss. 2, pp. 88–98. DOI: [10.12737/stp-112202509](https://doi.org/10.12737/stp-112202509).

Grigoryev A.V., Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., Usoskin I.G., Mursula K. Fluctuations of cosmic rays and IMF in the vi-

cinity of interplanetary shocks. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 41, iss. 6, pp. 955–961. DOI: [10.1016/j.asr.2007.04.044](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.044).

Hayakawa H., Ebihara Y., Mishev A., Koldobskiy S., Kusano K., Bechet S., Yashiro S., et al. The solar and geomagnetic storms in 2024 May: A flash data report. *Astrophys. J.* 2025, vol. 979, iss. 1, 26 p. DOI: [10.3847/1538-4357/ad9335](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad9335).

Ievenko I.B. Effects of magnetospheric activity on the plasmasphere as inferred from observations of diffuse aurorae and SAR arcs. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1999, vol. 39, iss. 6, pp. 697–703.

Ievenko, I.B. SAR-arc observation during the overlap registration of an energetic plasma with a plasmapause aboard the Van Allen Probe. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020, vol. 209, 105386. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105386](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105386).

Ievenko I.B., Alekseyev V.N. Effect of the substorm and storm on the SAR arc dynamics: A statistical analysis. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2004, vol. 44, iss. 5, pp. 592–603.

Ievenko I.B., Parnikov S.G. Ground-based and satellite observations of the SAR arc in the MLT evening sector at the beginning of the magnetic storm on March 17, 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2020, vol. 60, iss. 6, pp. 737–746. DOI: [10.1134/S0016793220050096](https://doi.org/10.1134/S0016793220050096).

Kolesnik A.G., Golikov I.A. Three-dimensional model of the high-latitude F region taking into account the displacement between geographical and geomagnetic coordinates. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1982, vol. 22, iss. 3, pp. 435–439.

Korsakov A.A., Kozlov V.I., Karimov R.R. Sudden phase anomalies of VLF radio transmitters signals (11.9 kHz) of RSDN-20 system registered in Yakutsk during 2009–2017. *Proc. SPIE*, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Op-

- tics, *Atmospheric Physics*. Moscow, Russian Federation, 2021, 119167X. DOI: [10.1117/12.2603367](https://doi.org/10.1117/12.2603367).
- Kozlov V.I., Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., et al. Analysis of helio- and geophysical events in October–November 2021 from comprehensive observations of SHICRA SB RAS. *Sol.-Terr. Phys.* 2025, vol. 11, iss. 1, pp. 7–26. DOI: [10.12737/stp-111202502](https://doi.org/10.12737/stp-111202502).
- Kozyr J.U., Nagy A.F., Slater D.W. High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs. *Rev. Geophys.* 1997, vol. 35, iss. 2, pp. 155–190.
- Kumar A., Kumar S. Solar flare effects on D-region ionosphere using VLF measurements during low- and high-solar activity phases of solar cycle 24. *Earth, Planets and Space.* 2018, vol. 70, iss. 29, pp. 1–14. DOI: [10.1186/s40623-018-0794-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8).
- Lazzús J.A., Salfate I. Report on the effects of the May 2024 Mother's day geomagnetic storm observed from Chile. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2024, vol. 261, 106304. DOI: [10.1016/j.jastp.2024.106304](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106304).
- Mizun Yu.G. *Polar Ionosphere*. Leningrad: Nauka Publ., 1980, 216 p.
- Moiseev A.V., Popov V.I., Starodubtsev S.A. Comparative analysis of the propagation of magnetic variations and equivalent current vortices of geomagnetic Ps5 pulsations along the meridian and azimuth. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2024a, vol. 64, iss. 4, pp. 548–566. DOI: [10.31857/S0016794024040093](https://doi.org/10.31857/S0016794024040093).
- Moiseev A.V., Popov V.I., Starodubtsev S.A. Investigating azimuthal propagation of Ps5 geomagnetic pulsations and their equivalent current vortices from ground-based and satellite data. *Sol.-Terr. Phys.* 2024b, vol. 10, iss. 3, pp. 97–107. DOI: [10.12737/stp-103202412](https://doi.org/10.12737/stp-103202412).
- Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I. Theory of the formation of Forbush decrease in a magnetic cloud: Dependence of Forbush decrease characteristics on magnetic cloud parameters. *Astrophys. J.* 2019, vol. 880, iss. 1, art. no. 17. DOI: [10.3847/1538-4357/ab2889](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2889).
- Petukhova A.S., Petukhov I.S., Petukhov S.I. Forbush decrease characteristics in a magnetic cloud. *Space Weather.* 2020, vol. 18, iss. 12, art. no. e02616. DOI: [10.1029/2020SW002616](https://doi.org/10.1029/2020SW002616).
- Piersanti M., Oliveira D.M., D'Angelo G., Diego P., Napolestanj G., Zesta E. On the geoelectric field response to the SSC of the May 2024 super storm over Europe. *Space Weather.* 2025, vol. 23, e2024SW004191. DOI: [10.1029/2024SW004191](https://doi.org/10.1029/2024SW004191).
- Pilipenko V.A., Chernikov A.A., Soloviev A.A., Yagova N., Sakharov Y., Kudin D.V., Kostarev D., et al. Influence of space weather on the reliability of the transport system functioning at high latitudes. *Russian J. Earth Sciences.* 2023, vol. 23, ES2008. DOI: [10.2205/2023ES000824](https://doi.org/10.2205/2023ES000824).
- Ram T., Veenadhari S., Dimri B., Bulusu J., Bagiya M., Gurubaran S., Parihar N., et al. Super-intense geomagnetic storm on 10–11 May 2024: Possible mechanisms and impacts. *Space Weather.* 2024, vol. 22, e2024SW004126. DOI: [10.1029/2024SW004126](https://doi.org/10.1029/2024SW004126).
- Silber I., Price C. On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere–lower thermosphere. *Surveys in Geophysics.* 2017, vol. 38, iss. 2, pp. 407–441. DOI: [10.1007/s10712-016-9396-9](https://doi.org/10.1007/s10712-016-9396-9).
- Starodubtsev S.A., Transkii I.A., Verigin M.I., Kotova G.A. Intensity fluctuations of cosmic rays and of the interplanetary magnetic field in the region of interaction of solar-wind streams with different velocities. *Geomagnetism and Aeronomy.* 1996, vol. 36, pp. 241–245.
- Starodubtsev S.A., Zverev A.S., Gololobov P.Yu., Grigoryev V.G. Cosmic ray fluctuations and MHD waves in the solar wind. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 73–80. DOI: [10.12737/stp-92202309](https://doi.org/10.12737/stp-92202309).
- Tavares M., Santiago M.A.M. What are traveling convection vortices? *Brazilian J. Physics.* 1999, vol. 29, iss. 3, pp. 524–528.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral precipitation model and its application to ionospheric and magnetospheric studies. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 102, pp. 157–171. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).
- Weimer D.R. A flexible, IMG dependent model of high-latitude electric potentials having “space weather” applications. *Geophys. Res. Lett.* 1996, vol. 23, no. 18, pp. 2549–2552.
- Wendt V., Schneider H., Banyś D., Hansen M., Clilverd M.A., Raita T. Why does the October effect not occur at night? *Geophys. Res. Lett.* 2024, vol. 51, iss. 7, pp. e2023GL107445. DOI: [10.1029/2023GL107445](https://doi.org/10.1029/2023GL107445).
- URL: <http://eng.sepc.ac.cn/> (accessed February 10, 2025).
- URL: <http://www.intermagnet.org> (accessed February 10, 2025).
- URL: <http://magdas2.serc.kyushu-u.ac.jp/station/index.html> (accessed February 10, 2025).
- URL: <http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/en/> (accessed February 10, 2025).
- URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (accessed February 10, 2025).
- URL: <http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/> (accessed February 10, 2025).
- URL: <http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace/> (accessed February 10, 2025).
- URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html> (accessed February 10, 2025).
- URL: <https://www.ysn.ru/~starodub/CosmicRayFluctuations/index.html> (accessed February 10, 2025).

15-я Российско-Китайская конференция по космической погоде, 9–13 сентября 2024 г., Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия.

Как цитировать эту статью:

Moiseev A.A., Gololobov A.Yu., Ievenko I.B., Korsakov A.A., Petukhov I.S., Starodubtsev S.A. Space weather research in Yakutia. *Солнечно-земная физика.* 2025, т. 11, №. 3, с. 149–159. DOI: [10.12737/szf-113202516](https://doi.org/10.12737/szf-113202516).

Редакторы

Волкова Н.О.
Никонова М.В.

Editors

Volkova N.O.
Nikonova M.V.

Технические редакторы

Амбаева И.Г.

Technical editors

Ambayeva I.G.

Переводчик

Кулиш О.А.

Translator

Kulish O.A.

Адрес редакции

664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126а,
Тел.: (3952) 51-16-73
E-mail: solater@iszf.irk.ru

Editorial Office

126a Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia
Tel.: (3952) 51-16-73
E-mail: solater@iszf.irk.ru

Адрес издателя

ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
Тел.: (495) 280-15-96, 280-33-86; Факс: 280-36-29
E-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>

Publisher

Limited Liability Company
“Scientific Publishing Centre INFRA-M”
31B Polyarnaya St., Build 1, Moscow, 127282, Russia
Tel.: (495) 280-15-96, 280-33-86; Fax: 280-36-29
E-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>

Отдел подписки

Меркулова Н.Б.
Тел.: (495) 280-15-96 (доб. 590)
E-mail: podpiska@infra-m.ru

Subscription Department

Merkulova N.B.
Tel.: (495) 280-15-96 (ext. 590)
E-mail: podpiska@infra-m.ru

URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/journal/48view>

Присланные рукописи не возвращаются

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов публикуемых материалов.

Поступившие в редакцию материалы будут свидетельствовать о согласии авторов принять требования редакции.

Перепечатка материалов допускается с письменного разрешения редакции.

При цитировании ссылка на журнал «Солнечно-земная физика» обязательна.

© ИНФРА-М, 2025

The submitted manuscripts are not sent back.

The opinion of members of the Editorial Board is possible not to agree with the authors' opinion.
The materials submitted to the Editorial Office are assumed authors' agreement to accept its requirements.

Republishing materials needs the written permission of the Editorial Board.

When citing, the reference to the “Solar-Terrestrial Physics” journal is necessary.

© INFRA-M, 2025

Подписано в печать 10.09.2025

Формат 60×90/8. Бумага офсетная

Тираж 1000 экз.

Адрес типографии: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»

127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1

Тел.: (495) 280-15-96, 280-33-86. Факс: (495) 280-36-29