

ISSN 0023-4206

Том 62, Номер 2

Март - Апрель 2024



КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 62, номер 2, 2024

Динамика магнитосферы и аврорального овала во время магнитной бури 27 февраля 2023 года <i>А. С. Лаврухин, И. И. Алексеев, Е. С. Беленькая, В. В. Калегаев, И. С. Назарков, Д. В. Невский</i>	141
Радиопредвестники корональных выбросов массы, зарегистрированных в феврале – марте 2023 года <i>О. А. Шейнер, В. М. Фридман</i>	157
Отклик ионосферы земли на явления солнечной активности в феврале–марте 2023 года <i>Ф. И. Выборнов, О. А. Шейнер</i>	168
Потоки солнечных энергичных протонов в околоземном пространстве 13–23 марта 2023 года <i>Н. А. Власова, Г. А. Базилевская, Е. А. Гинзбург, Е. И. Дайбог, В. В. Калегаев, К. Б. Капорцева, Ю. И. Логачев, И. Н. Мяжкова</i>	177
Источники солнечных протонов в событиях 24–25 февраля и 16–17 июля 2023 года <i>А. Б. Струминский, А. М. Садовский, И. Ю. Григорьева</i>	188
Магнитогидродинамические волны в плазме солнечного ветра в периоды событий геомагнитных бурь в феврале – марте 2023 года <i>С. А. Стародубцев, П. Ю. Гололобов, В. Г. Григорьев, А. С. Зверев</i>	201
Структура и динамика векторных графов межпланетного магнитного поля <i>Ю. А. Антонов, В. И. Захаров, И. Н. Мяжкова, Н. А. Сухарева, Ю. С. Шугай</i>	210
Геостационарные пересечения магнитопаузы в феврале – апреле 2023 года <i>А. В. Дмитриев</i>	225

УДК 523.4-854

ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРЫ И АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 27 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА

© 2024 г. А. С. Лаврухин^{1,*}, И. И. Алексеев¹, Е. С. Беленькая¹,
В. В. Калегаев¹, И. С. Назарков¹, Д. В. Невский^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: lavrukhin@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 18.10.2023 г.

Принята к публикации 18.10.2023 г.

В работе обсуждаются причины экстремального сжатия магнитосферы во время бури 27.II.2023, когда магнитопауза пересекала геостационарную орбиту. При этом полярные сияния наблюдались на средних широтах. Глобальные параметры магнитосферных токовых систем были рассчитаны по данным параметров межпланетной среды и геомагнитных индексов, характеризующих эволюцию кольцевого тока и западного аврорального электроджета, с использованием параболической модели магнитосферы. Был вычислен вклад различных токовых систем в наблюдаемое значение D_{st} -индекса. Вклад токового слоя хвоста сравним с вкладом кольцевого тока для данной бури. Рассчитанное модельное поле сопоставлено с данными магнитометров космических аппаратов GOES-16, 18; результаты достаточно хорошо согласуются с наблюдениями.

DOI: 10.31857/S0023420624020014, EDN: kzsflj

ВВЕДЕНИЕ

С конца февраля 2023 г. Земля активно подвергалась воздействию межпланетных корональных выбросов массы, спровоцированных солнечными вспышками. Реакция магнитосферы Земли на эти возмущения в солнечном ветре проявилась в череде магнитных бурь. Наиболее мощное событие произошло в 20:03 UT 24 февраля, когда на Солнце произошла мощная длительная вспышка класса M3.7 – средняя из больших по классификации солнечных вспышек. Сразу после вспышки (в 20:36 UT) в короне Солнца сформировался корональный выброс массы, который достиг орбиты Земли 26 февраля и вызвал серьезные возмущения магнитосферных токовых систем. Полярные сияния, возникшие в результате магнитной бури, наблюдались на широтах Подмосковья.

Магнитосферное магнитное поле определяется глобальными токовыми системами – токами внутри планеты, токами на магнитопаузе, кольцевым током, токами хвоста магнитосферы и продольными токами. Во время магнитной бури данные токовые системы, за исключением собственного поля планеты, претерпевают сильные изменения,

что приводит к изменениям магнитосферного поля в целом. Основной вклад в развитие магнитной бури в магнитосфере Земли вносят кольцевой ток и токи геомагнитного хвоста. Их изменения существенно влияют на депрессию магнитного поля на поверхности Земли во время бури, которая численно описывается D_{st} -индексом. Соотношение между вкладами этих токовых систем зависит от мощности бури и из-за невозможности разделить эффекты магнитосферных токов в спутниковых измерениях определяется главным образом благодаря использованию моделей магнитосферы [1]. Динамическое давление солнечного ветра, межпланетное магнитное поле (ММП), сила тока в хвосте магнитосферы и величина кольцевого тока контролируют размер и положение полярной шапки и аврорального овала во время магнитной бури.

В данной работе приведены результаты исследований динамики токовых систем магнитосферы во время магнитной бури 27.II.2023 на основе одновременных наземных и космических измерений магнитного поля. Исследование магнитных бурь представляет большой интерес, так как позволяет выявить относительные вклады магнитосферных

токовых систем в магнитные возмущения на поверхности Земли и в магнитосфере, измеренные на космических аппаратах (КА). Правильный учет вклада каждой токовой системы в магнитное поле позволяет прогнозировать магнитную обстановку в земной среде, характер и величину магнитного возмущения на Земле.

Сравнение модельного магнитного поля со спутниковыми данными позволяет проверить выбранный подход к моделированию, надежность модели для исследований магнитосферы в возмущенных условиях и возможность ее использования для прогноза космической погоды. Наиболее распространены численные реализации различных магнитогазодинамических (МГД) моделей. Плазма магнитосферы в основном сильно разрежена и бесстолкновительна. Она требует кинетических подходов, а все МГД-модели включают в себя множество артефактов, которые практически невозможно отделить от реальных физических явлений. Следовательно, нас будут интересовать так называемые основанные на первых принципах модели, так или иначе описывающие магнитосферные токовые системы. Вероятно, центральная проблема, не позволяющая в течение полувека закрыть вопрос и зафиксировать наиболее надежную модель магнитосферы, заключается в изменчивости всех магнитосферных явлений. Имеются целые классы динамических магнитосферных процессов, различающихся частотой реализации и амплитудой. Прежде всего это магнитосферные суббури и магнитные бури, при которых происходит кардинальная глобальная перестройка магнитосферы. Здесь можно выделить три подхода к построению сначала наиболее простой квазистационарной модели магнитосферы, которая описывает вариации магнитосферного поля как реакцию на прямое воздействие набегающего солнечного ветра. Больше всего проработаны эмпирические модели, развиваемые Н.А. Цыганенко [2–4], которые минимизируют невязку между моделью и собранными в единый массив магнитными измерениями вдоль траектории различных КА. При этом усредняются сильно различающиеся вектора поля, полученные в одной области пространства при различных геомагнитных явлениях. Имеется несколько адаптивных моделей, например [5], которые предназначены для описания конкретной бури, суббури или другого динамического процесса в магнитосфере и используют для определения внутренних параметров модели все имеющиеся измерения в изучаемый период. Они позволяют

лучше понять конкретное явление, но требуют изменения модели в каждом конкретном случае.

Наш подход основан на том, что мы ограничиваемся небольшим набором из квазистационарных глобальных токовых систем, пренебрегая переходными процессами и волновыми явлениями. Вычисляется относительный вклад кольцевого тока, токов магнитосферного хвоста и токов магнитопаузы в индекс D_{st} , оценивается относительная роль каждого источника магнитного поля на разных этапах развития возмущения, при этом учитывается как динамика параметров солнечного ветра по данным КА, находящимся в точке либрации, так и геомагнитная обстановка по измерениям геомагнитных индексов. Длительные периоды моделирования для каждой бури позволяют таким образом исследовать и сравнивать долгосрочную эволюцию различных токовых систем во время магнитных бурь различной интенсивности.

Целью данной работы является ответ на вопрос, что определяет амплитуду данной магнитной бури и почему полярные сияния наблюдались на средних широтах, что бывает довольно редко. Расчеты демонстрируют, что одним из основных факторов, контролирующих появление сияний на более низких широтах, является сильное смещение дневной магнитопаузы к Земле. В течение рассматриваемого возмущения дневная магнитопауза пересекала геостационарную орбиту во время внезапного начала бури. Также целью работы является экспериментальное изучение относительной динамики кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы для данной магнитной бури. Сравнение модельного магнитного поля со спутниковыми данными позволит проверить предлагаемые подходы к моделированию магнитосферного магнитного поля и их надежность для исследований возмущенной магнитосферы.

ПАРАМЕТРЫ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ И МАГНИТОСФЕРЫ 26–28.11.2023

24 и 25 февраля 2023 г. в околоземном пространстве наблюдались два солнечных протонных события. Измерения на КА GOES-16 показали начало возрастания потоков солнечных энергичных протонов в 21:05 UT 24 февраля и в 20:30 UT 25 февраля. Потоки протонов с энергиями >10 МэВ возросли на полтора и более чем два порядка соответственно. Источником протонных событий стали две солнечные вспышки: 24 февраля в 20:03 UT и примерно

через сутки в 18:40 25 февраля, которые были зарегистрированы детектором рентгеновского излучения на *GOES-16*. Вспышки привели к корональным выбросам массы в 20:36 UT 24 февраля и в 19:24 UT 25 февраля. В итоге в первом событии энергичные частицы распространялись в более спокойной межпланетной среде, чем во втором, что обусловило задержку момента начала второго события примерно на 1 ч.

Корональные выбросы массы от солнечных вспышек достигли Земли в ночь с 26 на 27 февраля. В базе данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) отсутствуют данные с 01:00 до 11:00 UT 27 февраля, поэтому мы использовали данные SWX (<https://swx.sinp.msu.ru/>). Как видно на рис. 1, по данным SWX наблюдалось два сильных скачка давления солнечного ветра. Первый начался примерно в 19:25 UT 26 февраля. Его начало совпало с усилением отрицательной компоненты B_y с -2 до -15 нТл и с поворотом ММП от северного направления к южному. При этом скорость солнечного ветра резко возросла

от ~ 460 до ~ 550 км/с, а плотность n_{sw} — с 10 до 20 частиц в см^{-3} , что вызвало сильную магнитную бурю. Эти скачки скорости и плотности определили скачок динамического давления солнечного ветра P_{sw} от примерно 3 до 10 нПа. Затем скорость солнечного ветра начала плавно возрастать с ~ 550 до ~ 700 км/с, а плотность — до 30 частиц в см^{-3} . Второй скачок давления солнечного ветра начался примерно в 04:00 UT 27.11.2023 одновременно со скачком плотности от 3 до 18 частиц в см^{-3} при практически постоянной скорости ~ 620 км/с и южном ММП. В середине дня 27 февраля скорость солнечного ветра превысила 850 км/с.

Таким образом, в анализируемый период магнитосфера Земли находилась в высокоскоростном потоке солнечного ветра и временами была сильно поджата. Динамическое давление потока плазмы, измеряемое в точке $L1$, превышало 10 нПа, т.е. было примерно в 5 раз больше, чем нормальное среднее значение давления солнечного ветра в подсолнечной точке головной

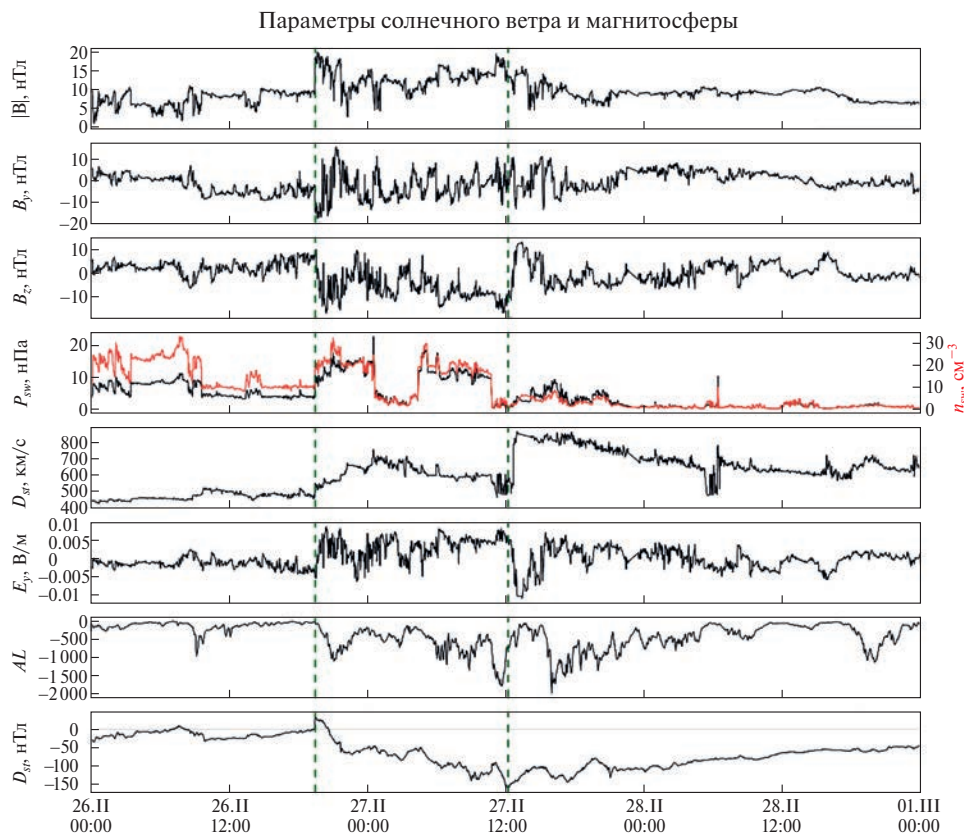


Рис. 1. Параметры солнечного ветра (плотность n , скорость v и динамическое давление P_{sw}), ММП ($|B|$, B_y , B_z), E_y -компоненты электрического поля в солнечном ветре и параметров возмущения магнитосферы AL , D_{st} в период 26–28.11.2023 (<https://swx.sinp.msu.ru/>). Данные о солнечном ветре и ММП получаются с различных КА с учетом смещения времени конвекции примерно на 40 мин). Здесь и далее вертикальными штрихованными линиями показано время начала магнитной бури и ее максимума.

ударной волны перед магнитосферой. Внезапное начало магнитной бури в 19:23 UT 26 февраля, когда D_{st} -индекс увеличился с 2 до 36 нТл, являлось реакцией магнитосферы на возрастание динамического давления плазмы более чем в 3 раза с одновременным поворотом ММП к югу. В последующие пару часов наблюдался дальнейший рост давления до 15 нПа, что в 5 раз превышает начальный уровень. Это привело к поджатию магнитосферы и усилению токов Чепмена – Ферраро на магнитопаузе, которые создают положительную вариацию северо-южной компоненты магнитного поля в магнитосфере, что и вызвало кратковременный положительный скачок D_{st} (точнее, скачок 1-минутного SYM-H) в момент внезапного начала бури. Причем этот рост северо-южной компоненты магнитного поля магнитосферы зафиксирован практически одновременно и на наземных станциях, и на геостационарной орбите. Измерения магнитного поля на КА *GOES-16* (13:30 MLT) и *GOES-18* (09:30 MLT) (рис. 3) показывают одновременный скачок B_H (перпендикулярной плоскости географического экватора компоненты магнитного поля, измеренной магнитометрами) на 45 нТл (от 110 до 155 нТл) и на 54 нТл (от 124 до 178 нТл) соответственно. Магнитограмма 3 показывает, что 26 февраля КА *GOES-18* в течение почти 1 ч, спустя 1.5 ч после резкого начала бури (20:48–21:31 UT), находился выше по потоку за магнитопаузой в переходном слое в полуденной части магнитосферы, и B_z -компонента имела южное направление, противоположное магнитосферному полю. Это говорит о глобальном сжатии магнитосферы практически в 1.5–2 раза.

Главная фаза бури начинается, когда направленная с утра на вечер компонента межпланетного электрического поля становится положительной и большой по величине. При этом увеличивается скорость инжекции энергии в токовый слой и далее в кольцевой ток. Развитие кольцевого тока и интенсификация токов хвоста магнитосферы приводят к падению D_{st} на главной фазе до –161 нТл в 12.12 UT 26 февраля. Таким образом, амплитуда депрессии экваториального магнитного поля сравнительно не велика, и бурю следует считать средней. Однако длительность повышенного потока энергии в магнитосферу составила не менее 27 ч, а Kp -индекс (индекс геомагнитной активности – усредненное значение геомагнитной активности для каждых 3 ч в сутках) достигал 7. В результате смены знака B_z -компоненты ММП с южного (–12 нТл в 12:09 UT) на северное (11 нТл в 12:56 UT) и соответствующего изменения знака межпланетного

электрического поля скорость инжекции стала меньше, в результате чего начался распад кольцевого тока и последующее восстановление уровня геомагнитного поля до спокойного. При этом, как видно на рис. 1, электрическое поле периодически продолжало увеличиваться до положительных величин, инжекция энергии в кольцевой ток снова возрастала, и уменьшение D_{st} происходило не так быстро.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В работе используются данные магнитометров, установленных на КА *THEMIS A, E, D* и *GOES-16, 18*. Миссия *THEMIS* (<http://themis.ssl.berkeley.edu/index.shtml>) состоит из трех спутников. Высота перигея аппаратов А и Е составляет 1.16...1.5 R_E , апогея ~13 R_E , период обращения – около суток. Для анализа мы ограничиваемся данными только двух из трех аппаратов *THEMIS*, находящихся на околоземной орбите, так как у аппарата *THEMIS D* отсутствует часть внутримангнитосферных данных 28 февраля. На рис. 2 приведены данные измерений модуля магнитного поля на КА *THEMIS A, E* с 26 по 28 февраля 2023 г., за это время аппараты совершили примерно 3 оборота вокруг Земли. Внутримангнитосферные участки КА *THEMIS* занимают около 8 ч во время магнитной бури 27 февраля и более 15 ч (с 09:00 до 24:00) 28 февраля на фазе восстановления. Оба КА *THEMIS* были внутри магнитосферы во время максимума бури почти в точке перигея.

Спутники *GOES-16* и *18* находились на геостационарной орбите (~6.6 R_E) на долготях 75.2°W и 137°W соответственно. За 1 ч Земля и спутники *GOES* вместе с ней поворачиваются на 15° по азимуту относительно местного полдня, поэтому местное время *GOES-16* и *18* различается на ~4 ч (*GOES-16* опережает *GOES-18*). На рис. 3 приведены данные измерений модуля магнитного поля на КА *GOES-16* и *18* с 26 по 28 февраля 2023 г. Как видно на рисунке, в 20:48 UT 26 февраля *GOES-18* пересек границу магнитопаузы, точнее говоря, магнитопауза пересекла геостационарную орбиту (6.6 R_E) при движении к Земле при переходе в новое состояние сжатой импульсом давления магнитосферы. После 06:00 UT 27 февраля на обоих спутниках наблюдались временные профили поля, характерные для токового клина суббури, с тремя ярко выраженными минимумами величины магнитного поля. Вероятно, суббури продолжались и дальше, несмотря на отсутствие их проявлений на магнитограммах, так как спутники покинули

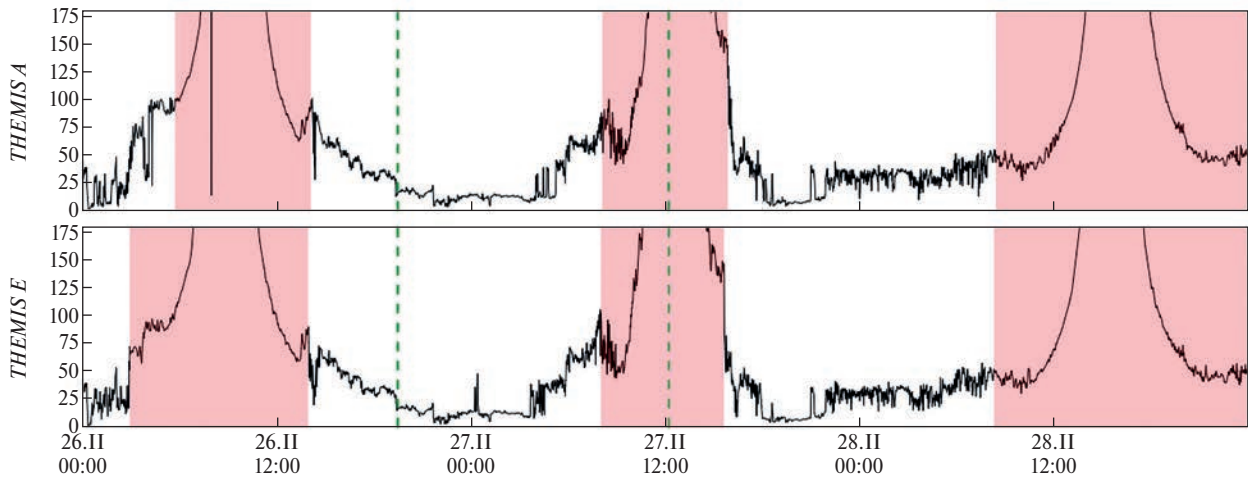
Модуль магнитного поля на КА *THEMIS A* и *E*

Рис. 2. Модуль магнитного поля вдоль траектории спутников *THEMIS A*, *E*, измеренный 26–28 февраля. Вертикальными пунктирными синими линиями обозначено время внезапного начала бури (19:30 UT 26 февраля) и минимума индекса D_{st} (12:00 UT 27 февраля). Розовым выделены те интервалы времени, в которые КА находился внутри магнитосферы.

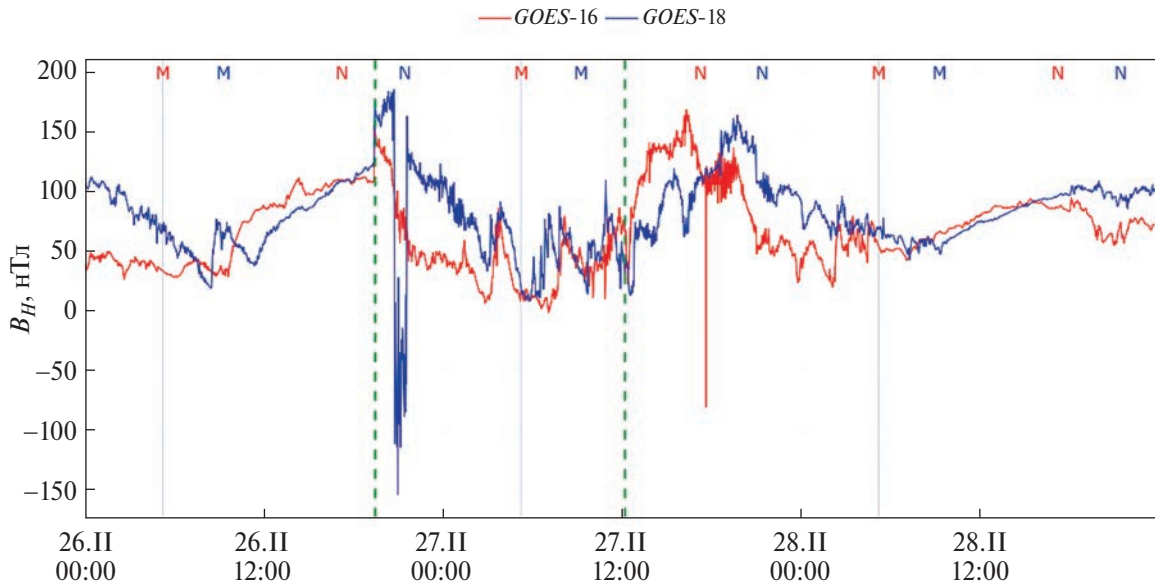
Магнитное поле на КА *GOES-16* и *18*

Рис. 3. B_z -компонента магнитного поля системы VDH на геостационарной орбите в период сильно поджатой магнитосферы 26–28.И.2023 по данным КА *GOES-16* и *GOES-18*.

область хвоста магнитосферы. *GOES-16* вернулся в эту зону после 00:00 28 февраля, и на нем продолжались наблюдения сильных скачков магнитного поля вплоть до 06:00 28 февраля.

На рис. 4 показаны траектории КА *THEMIS A*, *E* и *GOES-16*, *18* в солнечно-магнитосферной системе координат 26 и 27 февраля. На каждую из траекторий нанесены точки пересечения магнитопаузы КА, определяемые по магнитограммам (рис. 2): пересечение магнитопаузы можно

определить как переход из области турбулентного переходного слоя в область гладкой кривой спокойной магнитосферы [6] и по соответствующему резкому повороту вектора магнитного поля. Через точки пересечения магнитопаузы можно провести параболоид вращения с фиксированной параболоидальной координатой β [7], который хорошо описывает поверхность дневной магнитопаузы. Таким образом, можно восстановить расстояние до подсолнечной точки для каждого из моментов пересечения

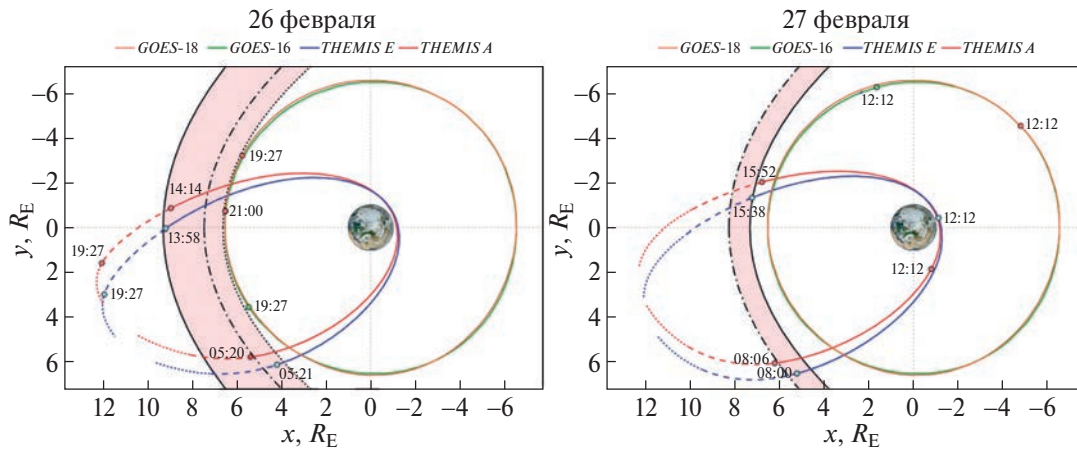


Рис. 4. Траектории спутников *GOES-16, 18* и *THEMIS A, E* (26–27. II. 2023) в солнечно-магнитосферных координатах (GSM) в плоскости X - Y . Черной линией точка–тире показано положение магнитопаузы при входе КА *THEMIS A, E* в магнитосферу (05:20/05:21 UT 26 февраля и 08:06/08:00 UT 27 февраля); сплошной черной линией показано положение магнитопаузы при выходе КА *THEMIS* из магнитосферы (14:14/13:58 UT 26 февраля и 15:52/15:38 UT 27 февраля). Черными точками показано положение магнитопаузы при ее пересечении КА *GOES-18* (21:00 UT 26 февраля). Изменения в положениях магнитопаузы в плоскости X - Y в системе GSM выделено на рисунке розовым цветом. Также 26 февраля отмечены положения спутников во время резкого начала магнитной бури в 19:27 UT; 27 февраля во время минимума SYM-H в 12:12 UT.

магнитопаузы КА. Поверхность магнитопаузы, аппроксимируемой параболоидом вращения с фиксированной параболической координатой $\beta = 1$ для произвольного параметра флэринга γ , определяется следующим образом [8]:

$$\left(\frac{z_{mp}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{y_{mp}}{R_1}\right)^2 + 2\frac{x_{mp}}{R_1} = \gamma^2 + 1. \quad (1)$$

Расстояние до подсолнечной точки R_1 поверхности параболоида вращения с фиксированной координатой $\beta = \beta_m = 1$ и параметром флэринга $\gamma = 1$ определяется следующим образом [8]:

$$R_1 = \frac{Y^2 + Z^2}{-X + \sqrt{X^2 + 4 \cdot (Y^2 + Z^2)}}. \quad (2)$$

В уравнении (2) X, Y, Z – координаты точки пересечения магнитопаузы КА, которая, по нашему предположению, лежит на параболоиде вращения с расстоянием до подсолнечной точки R_1 .

Усредняя полученные значения R_1 для двух КА *THEMIS*, получаем, что 26 февраля при входе в магнитосферу расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы составляло около $7.4 R_E$, при выходе $9.3 R_E$. Аналогичные расчеты по формуле [9] для расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы (4) дают значения $8.0 R_E$ и $8.7 R_E$ соответственно. Однако эти величины не характеризуют максимальное приближение магнитопаузы, так как пока КА были в точке

перигея либо в области переходного слоя расстояние до подсолнечной точки могло уменьшиться еще сильнее. Это подтверждают наблюдения на КА *GOES-18*, который через 2 ч после внезапного начала магнитной бури оказался в переходном слое магнитосферы. Данное событие фиксировалось по резкому уменьшению амплитуды вертикальной B_H компоненты магнитного поля с изменением знака до -100 нТл (рис. 3). Проводя по описанному выше методу расчет расстояния до подсолнечной точки по точке пересечения магнитопаузы КА *GOES-18*, получаем $R_1 = 6.6 R_E$. Это почти совпадает со значением, рассчитанным по формуле (4), которая дает $6.5 R_E$. Для 27 февраля расстояние до магнитопаузы при входе в магнитосферу составляло около $8.3 R_E$, при выходе – $7.3 R_E$. Расчеты (4) дают значения $6.9 R_E$ и $7.6 R_E$. В целом изменения в расстояниях до подсолнечной точки сопоставимы с теми, что наблюдались 26 февраля.

В работах [10–11] рассматривалась точность предсказания пересечения магнитопаузой геосинхронной орбиты различными МГД-моделями на фоне сильных геомагнитных возмущений. В этих работах сделано заключение, что, хотя точность предсказаний достаточно велика для всех моделей, разница в определении разными моделями R_1 может достигать $3 R_E$, что очень существенно для средней магнитосферы. В работе [10] показано, что использование адекватной модели кольцевого тока улучшает согласие, но существенная ошибка остается, и она

наиболее значима при больших отрицательных B_z , что как раз наблюдалось в рассматриваемой нами буре с относительно небольшим максимумом кольцевого тока. Наш результат показывает, что расхождение, возможно, связано с некорректным учетом тока в хвосте магнитосферы и отсутствием в рассматриваемых моделях параметра Φ_∞ , который описывает сформированный открытыми линиями полярной шапки магнитный поток. Он пропорционален полному току, текущему через единицу длины токового слоя хвоста магнитосферы и магнитному потоку в долях хвоста. Методика определения конкретного значения этого параметра модельного магнитосферного поля в данный момент времени будет описана в следующем разделе, формулы (7) и (8).

Следует подчеркнуть, что если вклады кольцевого тока и токового слоя хвоста в наземное возмущение (D_{st}) совпадают по знаку: оба уменьшают модуль магнитного поля, — то в районе дневной магнитопаузы вклад токового слоя остается отрицательным, а вклад кольцевого тока, напротив, меняет знак, и рост b_r должен увеличивать R_1 . Для токового слоя хвоста имеется положительная обратная связь: с ростом магнитного потока в долях хвоста Φ_∞ расстояние до подсолнечной точки R_1 уменьшается, что увеличивает магнитный поток в хвосте и еще ближе перемещает магнитопаузу к Земле. Останавливает этот процесс формирование токового клина суббури у переднего края токового слоя хвоста, которое уменьшает ток токового слоя и восстанавливает баланс в дневной магнитосфере.

ПАРАБОЛОИДНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСФЕРЫ

Для вычислений магнитного поля крупномасштабных токовых систем в магнитосфере используются динамические (эмпирические, теоретические и адаптивные) модели [2–5, 12–14]. Авторы работы [15] изучили динамику крупномасштабных токовых систем для двух магнитосферных бурь, используя три различные модели магнитного поля: параболоидную модель A2000 [12, 13], событийно-ориентированную модель [5] и модель Цыганенко T01 [3, 4]. Все модели показали довольно хорошее согласие с наблюдениями.

Для описания магнитной бури 26–28.II.2023 выбрали параболоидную модель магнитосферы A2000. В ней магнитосферное магнитное поле состоит из двух слагаемых. Первое порождается внутриземными токами, второе — токами,

текущими в магнитосфере. Внутриземное магнитное поле вычисляется по модели IGRF 13 (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>), в которой оно представлено в виде разложения по сферическим гармоникам [16].

Внешнее поле порождается крупномасштабными токами в магнитосфере Земли. Параметры токовых систем испытывают быстрые вариации, связанные с изменениями скорости и плотности солнечного ветра и ММП. В каждый момент времени параметры модели определяют мгновенное состояние магнитосферы, а динамика магнитосферы может быть представлена как последовательность таких состояний. Поскольку разные источники магнитосферного магнитного поля изменяются с собственным характерным временем, каждый источник будет демонстрировать собственную динамику во время магнитосферных возмущений. Магнитное поле магнитосферных токов в экваториальной плоскости имеет доминирующую B_z -компоненту, которая положительна у дневной магнитопаузы, где поле определяется главным образом токами Чепмена — Ферраро, и отрицательна в ночной стороне магнитосферы, где становится преобладающим магнитное поле токовой системы хвоста магнитосферы, которое направлено на юг, противоположно дипольному полю и полю токов экранировки. B_z -компонента уменьшается, и преобладающей становится B_x -компонента, которая при этом меняет знак при переходе из северной доли хвоста в южную. Максимум поля токовой системы хвоста находится у его переднего края, где суммарное магнитное поле имеет минимум.

В первом приближении регулярное магнитное поле в магнитосфере симметрично относительно плоскости XZ в системе GSM и антисимметрично $B_x(z) = -B_x(-z)$ относительно экваториальной плоскости.

В параболоидной модели магнитосферы A2000 магнитное поле каждой крупномасштабной магнитосферной токовой системы определяется как аналитическое решение уравнения Лапласа для потенциала при фиксированной форме магнитопаузы (параболоид вращения). Компоненты магнитного поля, перпендикулярные магнитопаузе, принимаются равными нулю. Модель представляет магнитное поле внутри магнитосферы как суперпозицию магнитных полей от диполя планеты B_d , токов на магнитопаузе, экранирующих поле внутриземных токов B_{CF} , токов хвоста магнитосферы, кольцевого тока B_r , токов на магнитопаузе, экранирующих поле кольцевого тока B_{sr} , продольных токов

зоны 1 B_{fac} и доли ММП $k(R_1) \cdot \vec{B}_{IMF}$, проникающей в магнитосферу [17]:

$$\vec{B}_m = \vec{B}_d(\psi) + \vec{B}_{cf}(\psi, R_1) + \vec{B}_i(\psi, R_1, R_2, \Phi_\infty) + \vec{B}_r(\psi, b_r) + \vec{B}_{sr}(\psi, R_1, b_r) + B_{fac}(\psi, R_1, \Phi_\infty, I_0) + k(R_M) \cdot \vec{B}_{IMF}, \quad (3)$$

где ψ — угол наклона диполя; R_1 и R_2 — геоцентрические расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы и до переднего края токового слоя хвоста, соответственно; Φ_∞ — магнитный поток через перпендикулярное сечение долей удаленного хвоста магнитосферы; b_r — магнитное поле кольцевого тока в центре Земли; I_0 — полная величина продольных токов зоны 1; $k(R_M)$ — коэффициент (≈ 0.2), определяющий долю ММП, проникающего внутрь магнитосферы; R_M — магнитное число Рейнольдса для набегающего потока солнечного ветра; \vec{B}_{IMF} — вектор ММП в невозмущенном солнечном ветре выше по потоку от головной ударной волны. Эти параметры являются ключевыми для описанных выше магнитосферных токовых систем, которые отражают их расположение и интенсивность. Они являются входными данными для модели и определяются из эмпирических данных с использованием субмоделей. Это позволяет легко изменять параметризацию параболоидной модели.

При моделировании D_{st} -вариаций не учитываются вклады двух последних членов в уравнении (3), так как продольные токи системы 1 не вносят существенный вклад в симметричные возмущения на Земле [18], а $k(R_M) \cdot \vec{B}_{IMF}$ составляет всего около 0.1–0.2 от величины ММП [17]. Входные параметры вычисляются на основе следующих подходов:

- Проекция угла наклона (ψ) геомагнитного диполя на плоскость XZ солнечно-магнитосферной системы координат определяется наклоном оси вращения Земли к плоскости эклиптики и географическим положением магнитного полюса. Угол ψ является известной функцией UT [12];

- Подсолнечное расстояние до магнитопаузы R_1 определяется балансом давления в подсолнечной точке магнитопаузы и рассчитывается по формуле, полученной в работе [9]:

$$R_1 = 10.75 \left(1 + 0.050 \tanh(0.35 B_z + 1.6) \right) \times \left(P_{dyn} + P_m \right)^{-0.161}. \quad (4)$$

Авторы работы [9] провели статистический анализ формы и положения магнитопаузы, используя каталог, содержащий 17 230 пересечений

магнитопаузы 17 различными КА от дневной магнитопаузы до лунной орбиты в ночной стороне. Эта формула совпадает с формулой [19], которая использовалась ранее в работах [12, 15, 17], лишь в полном давлении плазмы присутствует вклад ММП. В целом эта формула согласуется со степенной зависимостью размеров магнитосферы от давления солнечного ветра с показателем $-\frac{1}{6}$:

$$R_1 \sim \frac{P_{sw}^{-1}}{6}.$$

- Расстояние до переднего края токового слоя хвоста R_2 было рассчитано как проекция аврорального овала вдоль магнитной силовой линии в полуденном меридиане на широте φ_n при помощи формулы, верной в случае дипольного приближения: $R_2 = 1 / \cos^2 \varphi_n$. Величина φ_n определяется на основе полученной эмпирически формулы из работы [20] для значений $D_{st} < -10$ нТл:

$$\varphi_n = 74.9^\circ - 8.6^\circ \cdot \log_{10}(-D_{st}). \quad (5)$$

Для более точных вычислений можно использовать проектирование вдоль реальных (модельных) силовых линий магнитного поля.

В данной формуле подразумевается, что D_{st} -индекс характеризует не только интенсивность кольцевого тока, но и рост магнитного потока в хвосте магнитосферы. Такой подход игнорирует зависимость положения переднего края токового слоя от суббуревой активности. В этом смысле он требует уточнения, но мы ограничиваемся первым приближением, чтобы сохранить преемственность с нашим предыдущим анализом. При этом переносим эффекты суббури в зависимость Φ_∞ от AL (8). Поскольку магнитный поток в долях хвоста и через экваториальное сечение токового слоя равен потоку через овал, более последовательным было бы использовать соотношение

$$\Phi_\infty(t) = \Phi_{dip} \cdot \sin^2 \varphi_n(t)$$

или

$$\begin{aligned} \varphi_n &= \arcsin \sqrt{\frac{\Phi_\infty}{\Phi_{dip}}} = \\ &= \arcsin \sqrt{\frac{R_E}{2R_1} + \frac{-AL \cdot R_{ss}^2}{28B_E R_E^2} \sqrt{1 + 2\frac{R_2}{R_1}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Магнитный поток сквозь доли хвоста $\Phi_\infty(t)$ представляется как сумма магнитного потока в долях хвоста в спокойное время $\Phi_0(t)$, связанного с медленными адиабатическими вариациями геомагнитного хвоста, вызванными вариациями размеров магнитосферы, и дополнительного магнитного потока $\Phi_S(t)$, связанного с усилением электрического поля в солнечном ветре,

с усилением конвекции в хвосте магнитосферы и с суббуревой активностью.

В рамках параболоидной модели для спокойных условий и средних значениях динамического давления солнечного ветра, когда расстояние до лобовой точки на магнитопаузе $R_1 = 10 R_E$, магнитный поток на открытых линиях в долях хвоста составляет $\Phi_0 = 385 \text{ МВб}$ [21]. При масштабировании магнитосферы с уменьшением R_1 радиальное магнитное поле на ночной полусфере радиусом R_1 растет как дипольное поле обратно пропорционально R_1^{-3} , а площадь сечения ночной полусферы в плоскости терминатора уменьшается как R_1^2 , поэтому уходящий в хвост магнитный поток $\Phi_0(t)$ обратно пропорционален R_1 и может быть приближенно описан формулой:

$$\Phi_0 = 385 \text{ МВб} \cdot \frac{10 R_E}{R_1}, \quad (7)$$

где $\Phi_{dip} = 2\pi R_E^2 \cdot B_E \approx 7700 \text{ МВб}$ – магнитный поток дипольного поля через одно из полушарий, а $B_E \approx 30000 \text{ нТл}$ – дипольное поле Земли на экваторе. Дополнительный магнитный поток, возникающий из-за увеличения темпа инжекции энергии солнечного ветра в хвост магнитосферы $\Phi_S(t)$ определяется как [13]:

$$\Phi_S(t) = -\frac{AL}{7} \frac{\pi R_1^2}{2} \sqrt{\frac{2R_2}{R_1} + 1}. \quad (8)$$

Суммарный магнитный поток через переднее сечение хвоста равен магнитному потоку через полярную шапку и овал полярных сияний. Он является ключевым параметром магнитосферы, и его изменения отражают динамику хвоста магнитосферы.

Модель A2000 не зависит от конкретной базы данных измерений, что могло бы накладывать ограничения на область ее применимости, таким образом, модель может достаточно точно описывать магнитное поле как для спокойной, так и сильно возмущенной геомагнитной обстановки. Динамика магнитосферы во время бури может быть представлена временными изменениями параметров крупномасштабных токовых систем.

Субмодель: Кольцевой ток

Уравнение Десслера – Паркера – Скопке, связывающее магнитное поле кольцевого тока в центре Земли b_r с полной энергией частиц кольцевого тока ϵ_r , имеет вид [22, 23]:

$$b_r = -\frac{2}{3} B_0 \frac{\epsilon_r}{\epsilon_d}, \quad (9)$$

где $\epsilon_d = \frac{1}{3} B_0 M_E$ – энергия геомагнитного диполя над поверхностью Земли; B_0 – магнитное поле

диполя на экваторе. Исходя из уравнения инжекции кольцевого тока ϵ_r :

$$\frac{d\epsilon_r}{dt} = F(E_y) - \frac{\epsilon_r}{\tau}, \quad (10)$$

получаем уравнение, определяющее поле кольцевого тока в центре Земли b_r во время магнитной бури [24]:

$$\frac{db_r}{dt} = F(E_y) - \frac{b_r}{\tau}, \quad (11)$$

где $F(E_y)$ – функция инжекции частиц кольцевого тока; τ – время жизни частиц кольцевого тока; О’Брайан и Мак-Феррон [25] определили $\tau(t) = 2.37e^{9.74/(4.78+E_y)}$. Это уравнение связывает процесс инжекции частиц из хвоста магнитосферы с процессом распада кольцевого тока. Функция инжекции $F(E_y)$ определяется электрическим полем солнечного ветра утро – вечер E_y и может быть представлена в виде:

$$F(E) = \begin{cases} f_{pr}(p_{sw}) f_{ar}(AL) \times \\ \times d(E_y - 0.5 \text{ МВ/м}), E_y > 0.5 \text{ МВ/м}, \\ 0, E_y < 0.5 \text{ МВ/м} \end{cases} \quad (12)$$

где E_y – электрическое поле утро – вечер в солнечном ветре и d – коэффициент, определяющий скорость инжекции как функцию напряженности электрического поля солнечного ветра. В момент максимума бури $db_r/dt = 0$ и из уравнения (11) можно определить коэффициент d , зная полную энергию частиц (или b_r) в момент максимума и время τ . Поскольку между бурями скорость инжекции может различаться, этот коэффициент определяется процедурой минимизации отклонения между измеренными и модельными значениями D_{st} [15, 18]. Используем величину d , полученную в работе [18] при анализе магнитной бури 24–26.IX.1998 с $D_{st} = -200 \text{ нТл}$, сходной с магнитной бурей, рассматриваемой в настоящей статье. Числовые коэффициенты, описывающие темп поступления энергии в магнитосферу, были получены из требования минимизации отклонения наблюдаемого D_{st} от модельного возмущения на уровне Земли в предположении, что коэффициент d не зависит от напряженности электрического поля. Для максимальной скорости поступления энергии в зону кольцевого тока $2.2 \cdot 10^{30} \text{ кэВ/ч}$ [26] они определили коэффициент d равным $-1.3 \text{ нТл/МВ} \cdot \text{ч}$.

Дополнительные множители $f_{pr}(p_{sw})$ и $f_{ar}(AL)$ дают возможность учесть влияние динамического давления солнечного ветра и суббуревой

активности на инжекцию энергии в кольцевой ток. Большие величины динамического давления солнечного ветра увеличивают эффективность инжекции в кольцевой ток из-за увеличения переноса плазмы солнечного ветра поперек магнитопаузы и в плазменный слой. AL -индекс показывает величину энергии, текущей прямо в ионосферу. Большие величины AL -индекса или, другими словами, увеличение суббуревой активности показывают, что большая часть энергии, аккумулированной в хвосте магнитосферы, переносится прямо в ионосферу. Это является причиной уменьшения инжекции. Эти эффекты описываются множителями $f_{pr}(p_{sw})$ и $f_{ar}(AL)$ в уравнениях (13) и (14) [18]:

$$f_{pr}(p_{sw}) = \begin{cases} 1, & p_{sw} < p_k \\ 1 + \left(\frac{p_{sw} - p_k}{p_{sw}} \right)^{\alpha_p}, & p_{sw} > p_k \end{cases}, \quad (13)$$

$$f_{ar}(AL) = \begin{cases} 1, & |AL| \leq AL_k \\ 1 + \left(\frac{|AL| - AL_k}{|AL|} \right)^{\alpha_{al}}, & |AL| > AL_k \end{cases}. \quad (14)$$

Авторы работы [18] выбрали наиболее простую форму данных функций и, минимизируя отклонение рассчитанного D_{st} от измеренного для бури 24–26.IX.1998, получили следующие значения коэффициентов: $\alpha_p = 2$, $p_k = 5$ нПа, $\alpha_{al} = 1$ и $AL_k = 600$ нТл. Ввиду схожести рассматриваемых магнитных бурь и близких максимальных значений D_{st} (-200 нТл в статье [18] и -161 нТл в рассматриваемом случае), будем использовать эти коэффициенты в наших расчетах.

Поле токового слоя хвоста

В работе [13] величина магнитного поля $b_t(t)$ на внутреннем краю токового слоя хвоста определялась с использованием индекса AL . В работе [18] было разработано обобщение этого подхода, основанное на более сложных выражениях, описывающих зависимости потока в долях хвоста от электрического поля и динамического давления солнечного ветра, а также от индекса AL . Все эти факторы контролируют поступление энергии в хвост магнитосферы, ее хранение и высвобождение. В отличие от разработанных ранее подходов (глобальное моделирование магнитосферы), этот подход позволяет изучать конкретное событие (событийно-ориентированное моделирование). В настоящей работе ограничимся рассмотрением зависимости величины $b_t(t)$ только от AL -индекса:

$$b_t = -\frac{AL}{7} \text{ нТл.}$$

ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

Расчет параметров магнитосферы в ходе рассматриваемой магнитной бури производился при помощи параболической модели магнитосферы с использованием субмоделей, описанных выше. Результат представлен на рис. 5.

Фельдштейн Я.И. и соавторы в работе [27] по экспериментальным данным АМРТЕ/ССЕ оценили положение внутренней границы плазменного слоя в интервалах магнитных бурь. Для трех магнитных бурь 1985–1988 гг. они показали, что геоцентрическое расстояние до внутренней кромки токового слоя в ходе магнитной бури уменьшается, максимально приближаясь к Земле, до $3.5 R_E$. Связь R_2 с D_{st} -индексом отчетливо проявляется в уменьшении R_2 с ростом D_{st} .

На основе стандартной процедуры вычисления D_{st} в параболической модели были рассчитаны вклады в возмущение, связанные с разными источниками магнитосферного магнитного поля: токами на магнитопаузе, кольцевым током и токами хвоста магнитосферы. Ток на магнитопаузе развивается первым, в самом начале бури, в ответ на сжатие магнитосферы солнечным ветром. В это время он дает основной вклад в D_{st} и ответственен за положительную вариацию магнитного поля в магнитосфере. Депрессия (понижение) магнитного поля при развитии бури наблюдается позже и обусловлена главным образом развитием кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы. Токовый слой хвоста начинает развиваться раньше, чем кольцевой ток,

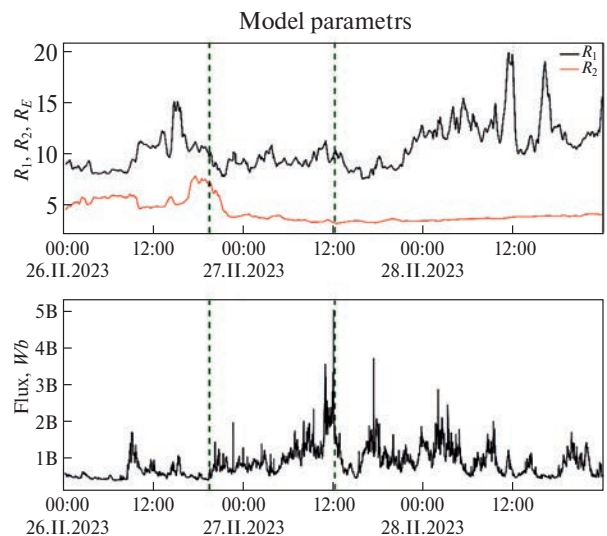


Рис. 5. Параметры параболической модели, рассчитанные для магнитной бури 27.11.2023.

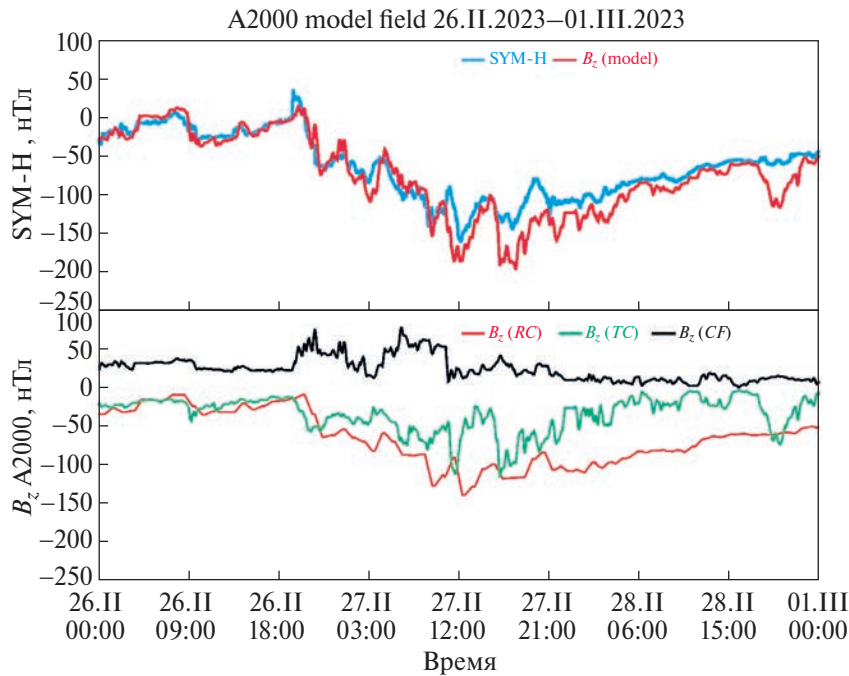


Рис. 6. Верхняя панель: сравнение измеренного на Земле значения D_{st} (синяя кривая) и рассчитанного по модели (красная кривая); нижняя панель: вклады различных токовых систем (токи Чепмена – Ферраро, кольцевой ток и токи слоя хвоста магнитосферы) в модельное D_{st} .

и начинает затухать в то время, как кольцевой ток продолжает развиваться. В итоге кольцевой ток и токи хвоста вносят сопоставимые вклады в D_{st} . Наибольший вклад в максимальное значение D_{st} , согласно использованной в настоящей работе модели, дал токовый слой хвоста магнитосферы. Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями умеренных магнитных бурь [1, 15, 17, 28].

На верхней панели рис. 6 представлены измеренный D_{st} -индекс и магнитное поле на поверхности Земли, рассчитанное по параболической модели. Видно совпадение модельных расчетов с реальным D_{st} . Отклонение небольшое, так как параметры модели настроены для достижения совпадения с наблюдаемым D_{st} для данной бури. На нижней панели рис. 6 показан относительный вклад крупномасштабных магнитосферных токовых систем в D_{st} : токов магнитопаузы (черная кривая), кольцевого тока (красная кривая) и токов хвоста магнитосферы (зеленая кривая). В параболическую модель A2000 не включен вклад частичного кольцевого тока, однако его вклад не столь существен, по разным оценкам он составляет около $\sim 1/7$ от суммарного кольцевого тока во время максимума бури [29].

В результате начала суббури, которая видна на магнитограмме КА GOES (рис. 3), происходит диполизация поля токового слоя и его вклад в D_{st}

уменьшается, что приводит к соответствующему уменьшению модуля D_{st} . Развитие токового слоя хвоста хорошо коррелирует со связанным с суббуриями AL -индексом, что отражается в результатах расчетов по параболической модели A2000. Вклад токового слоя хвоста в D_{st} -индекс, рассчитанный по модели A2000, меняется во время магнитной бури. Он коррелирует с суббуриевой активностью и приближается к максимуму во время суббуриевой активности, оцениваемого по усилению AL -индекса. С другой стороны, кольцевой ток коррелирует с общим D_{st} , и его максимум стремится быть вблизи минимума D_{st} .

Магнитное поле на КА GOES-16 и 18

Для оценки надежности результатов расчетов по параболической модели сравним наблюдаемое магнитное поле со спутников GOES-16 и GOES-18 с модельным магнитным полем вдоль траектории этих КА. Результаты расчета и сравнение с измерениями представлены на рис. 7, 8.

Отсутствие в параболической модели A2000 вклада частичного кольцевого тока, возможно, является причиной расхождений, обнаруженных при сравнении модельных расчетов с данными, измеренными вдоль орбит КА. Однако симметричная часть его магнитного поля включается в магнитное поле кольцевого тока в рамках подхода, используемого для расчета b_r . Таким

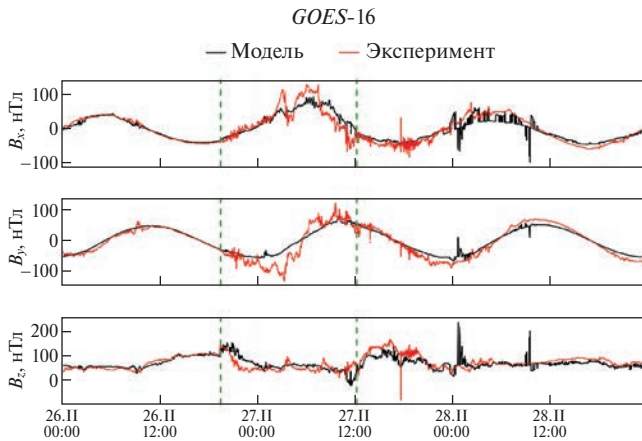


Рис. 7. Сравнение модельных значений и измерений магнитного поля на КА GOES-16.

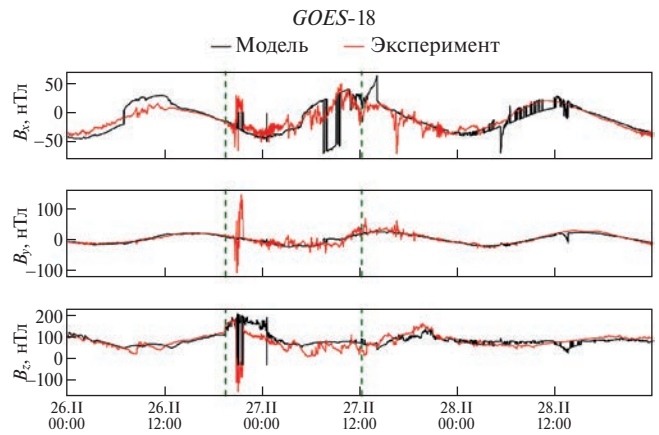


Рис. 8. Сравнение модельных значений и измерений магнитного поля на КА GOES-18.

образом, A2000 позволяет рассчитать полное магнитное поле симметричного кольцевого тока (создаваемое как симметричным, так и частичным кольцевым током), а также вклад полного кольцевого тока в D_{st} .

Если модель A2000 занижает значения B_z , то это может быть связано с тем, что модель параболоида представляет токи поперек хвоста магнитосферы в виде разрыва между противоположно направленными пучками магнитного поля в южной и северной долях хвоста и в результате дает очень малую компоненту B_z вблизи токового слоя хвоста магнитосферы. Кроме того, это может быть связано с отсутствием в ней частичного кольцевого тока. Модель A2000 дает дополнительные несоответствия (например, падения в компоненте B_x), возникающие из-за модели токового слоя хвоста, рассмотренной выше.

Видно хорошее совпадение наблюдений и результатов расчетов за некоторыми исключениями. Отрицательные пики в компонентах B_z рассчитанного магнитного поля связаны с мнимыми пересечениями внутреннего края модельного токового слоя спутниками, появляющимися из-за больших погрешностей в описании переднего края токового слоя во время главной фазы бури. Такое поведение магнитного поля обусловлено особенностью модели параболоида: параболической формой внутреннего края плоского хвостового токового слоя. Сравнение измеренных и рассчитанных компонентов магнитного поля показывает, что поправки на магнитное поле, обусловленные вариациями параметров модели во время бури, обеспечивают согласие модели с экспериментом.

Авроральный овал

Известно, что в активную фазу магнитосферных суббурь и магнитных бурь экваториальная граница овала полярных сияний смещается к экватору вплоть до средних широт. Проектирование этой границы в магнитосферу по любой магнитосферной модели геомагнитного поля свидетельствует о приближении ее к Земле до геоцентрических расстояний $(3.5-4)R_E$. В фазе развития авроральных суббурь область дискретных форм полярных сияний в ночном секторе не только движется к полюсу, но и одновременно расширяется к экватору. Такое экваториальное расширение области с активными формами полярных сияний должно быть естественно связано с приближением к Земле внутренней границы плазменного слоя [27].

Наиболее сильный эффект расширения аврорального овала в рассматриваемой магнитной буре связан с резким ростом динамического давления солнечного ветра и последующим движением магнитопаузы к Земле, при котором она пересекала геостационарную орбиту, и КА GOES-18 оказывался за пределами магнитопаузы в переходном слое (рис. 3 и 4). Для иллюстрации этого эффекта показаны границы овала в полярной зоне (рис. 9) и сечение магнитосферы в сечении полдень – полночь (рис. 10, 11) соответственно. На обоих рисунках построены проекции токового слоя хвоста магнитосферы в полярную область для спокойной ($R_1 = 10 R_E$) и сильно сжатой ($R_1 = 6.6 R_E$) магнитосферы. Магнитосфера симметрична относительно экваториальной плоскости, ее структуру показывают либо северное, либо симметричное ей южное полупространство. Мы использовали это свойство магнитосферы и продемонстрировали

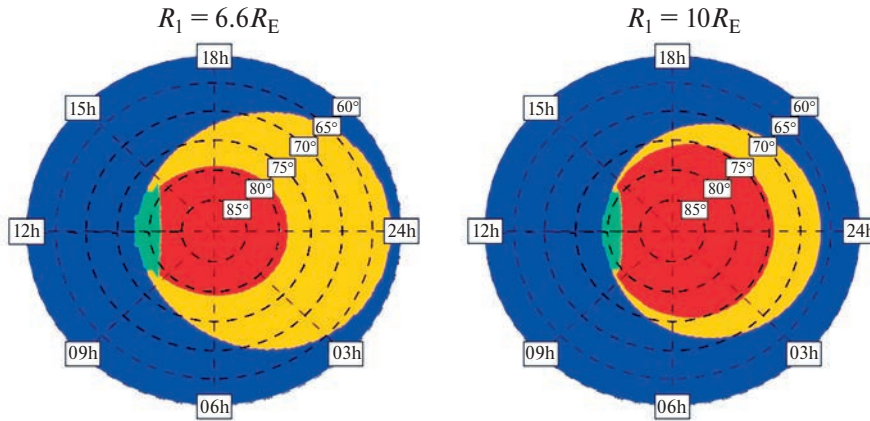


Рис. 9. Увеличение размеров аврорального овала в 1.5 раза при сжатии магнитосферы на $\Delta R_1 = 3.4 R_E$ во время бури 27.11.2023, вид сверху на полярную шапку. Проекция токового слоя хвоста магнитосферы закрашена оранжевым цветом. Открытые силовые линии, идущие в доли хвоста, показаны красным цветом, а замкнутые силовые линии сердцевины магнитосферы – синим. Зеленым цветом закрашена зона дневного каспа, куда проникают солнечные протоны вдоль магнитного поля.

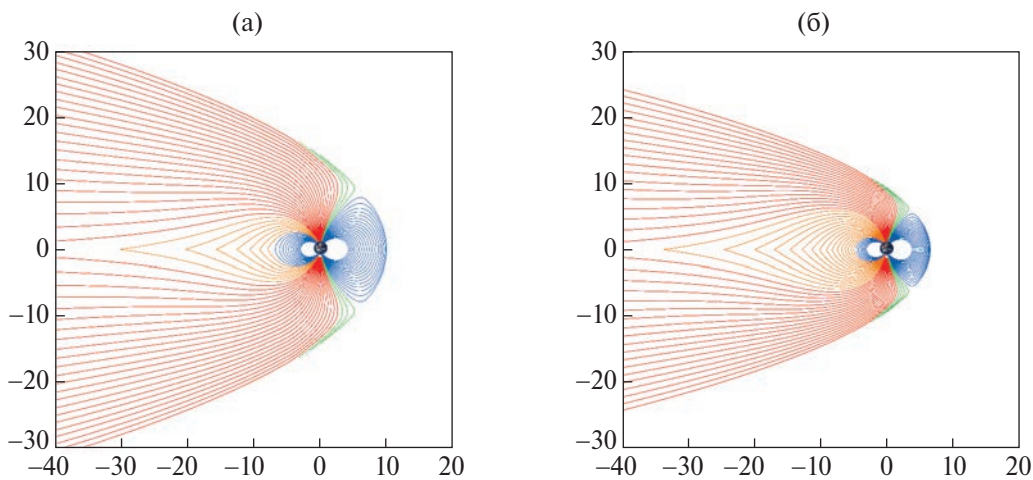


Рис. 10. Сжатие магнитосферы до геостационарной орбиты при приходе фронта коронального выброса массы во время внезапного начала магнитной бури в 19:30 UT 26.11.2023. Показано соответствующее изменение структуры магнитосферы. Нарисованы модельные силовые линии в сечении полдень – полночь в системе координат GSM для двух состояний магнитосферы, при которых расстояние до подсолнечной точки равно $10 R_E$ (а) и $6.6 R_E$ (б) соответственно. По осям расстояние выражено в R_E . Различные типы силовых линий маркированы разными цветами. Линии каспа, которые соединяют магнитопаузу и ионосферу, окрашены зеленым цветом, открытые линии полярной шапки, уходящие в торцевое сечение хвоста магнитосферы, – красным, силовые линии аврорального овала, которые соединяют токовый слой хвоста и ионосферу, – оранжевым, а замкнутые силовые линии, которые заполняют сердцевину магнитосферы и пересекают экваториальную плоскость ближе к Земле, чем располагается передний край токового слоя, – синим.

изменения размеров аврорального овала при уменьшении характерного размера для северного полушария. Для южного овала картина будет симметричной. На рис. 9 для сравнения на левой панели показана спокойная магнитосфера, а на правой – сжатая. Аналогично на рис. 10 слева показано сечение спокойной магнитосферы

в сечении полдень – полночь, а справа – сжатая магнитосфера.

Положение зоны полярных сияний существенно как для изучения совокупности явлений при магнитосферно-ионосферных возмущениях в переменном магнитном поле Земли, так и ионизации верхней атмосферы. Увеличение

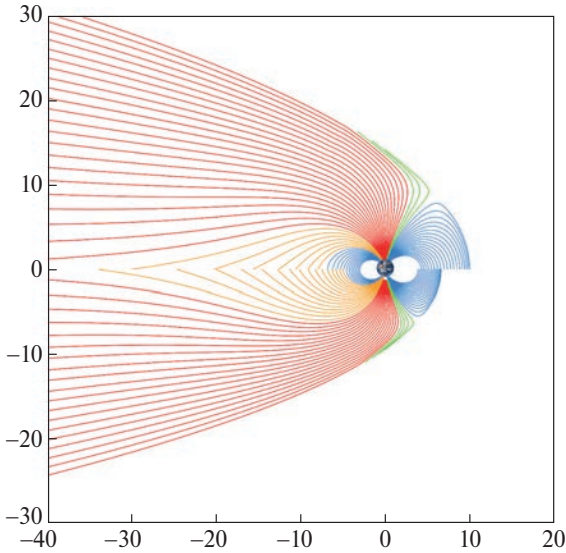


Рис. 11. Сравнение модельных силовых линий магнитосферы Земли в сечении полдень – полночь системы координат GSM для двух состояний магнитосферы во время магнитной бури, сверху – для расстояния до подсолнечной точки, равного $10 R_E$, снизу – для $6.6 R_E$. По осям расстояние выражено в R_E .

размеров овала сопровождается, как показывают прямые измерения, ростом температуры и плотности верхней атмосферы в этой области до высот ≈ 500 км. Этот эффект критически сказывается на надежности систем вывода тяжелой ракетой на околоземную орбиту целого набора спутников, для которых промежуточная орбита располагается на высотах ≈ 200 км.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ динамики магнитосферы во время магнитной бури 27.11.2023. Интерес к данной буре возник из-за появления полярных сияний на широте Москвы при не столь значительном понижении D_{st} , что происходит довольно редко. Во время данной магнитной бури расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы в моменте уменьшалось до $6.6 R_E$, т.е. до геостационарной орбиты, что было отмечено на одном из спутников *GOES*.

Детальное исследование динамики токового слоя хвоста и кольцевого тока по модели A2000 показывает, что вклад токового слоя хвоста, как и других токов магнитосферы, в D_{st} меняется во время магнитной бури. Токовый слой хвоста начинает развиваться раньше, чем кольцевой ток, и начинает затухать, в то время как кольцевой ток продолжает развиваться, что согласуется с результатами, полученными ранее [15].

Глобальные изменения хвоста магнитосферы во время магнитной бури контролируются в основном солнечным ветром и ММП, но сопровождаются резкими вариациями, связанными с суббуриями. Вклад кольцевого тока слегка больше вклада токового слоя хвоста, однако, согласно моделированию, именно последний дает наименьшее значение D_{st} . Сравнение с измерениями геостационарных спутников свидетельствует о том, что величину тока в хвосте магнитосферы не была переоценена. В целом модельные коэффициенты, связывающие параметры солнечного ветра с параметрами модели, и константы, определяющие функции инжекции и потери в субмоделях, использованных в модельных расчетах, должны уточняться для каждой конкретной бури. В этом случае параболическая модель будет соединять в себе преимущества теоретической модели, построенной на первых принципах, и достоинства конкретной модели для данного возмущения. Поиск минимума χ^2 соответствующего функционала в методе максимального правдоподобия для векторных переменных может производиться при помощи пакета FUMILIM, успешно использованного при обработке данных КА *MESSENGER* [30].

Данная задача актуальна для анализа данных продолжавшихся весной и летом 2023 г. магнитных бурь, создававших полярные сияния на широтах Москвы, а также прогноза динамики магнитосферы в будущем, что важно учитывать при запусках КА на низкие орбиты. Из-за рассматриваемой магнитной бури 27 февраля на 5 ч был отложен запуск спутников *Starlink*, который в итоге состоялся в 22:13 UT. В начале февраля 2022 г. из-за средней магнитной бури и последовавшего повышения плотности термосферы было потеряно 38 спутников *Starlink*. Следующие друг за другом магнитные бури приводят к увеличению Джуолева разогрева атмосферы в полярных областях и ее последующему расширению, т.е. к увеличению плотности на высоких широтах. В результате направленного к экватору потока области увеличения плотности распространяются к средним широтам. Авторы работы [31], используя модель атмосферы и термосферы GAIA, показали, что во время умеренной бури в феврале 2022 г. произошло значительное возрастание плотности термосферы в очень большой области до 50% на высотах как 200, так и 400 км. Такие большие возрастания привели к увеличению силы лобового сопротивления КА и последующему их сходу с орбиты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 21-52-12025.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalegaev V.V., Makarenkov E.V.* Relative importance of ring and tail currents to Dst under extremely disturbed conditions // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2008. V. 70. Iss. 2–4. P. 519–525. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.029>
2. *Tsyganenko N.A.* Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. Iss. A4. P. 5599–5612. <https://doi.org/10.1029/94JA03193>
3. *Tsyganenko N.A.* A model of the magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry, 1, Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. Iss. A8. <https://doi.org/10.1029/2001JA000219>
4. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 2. Parameterization and fitting to observations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. Iss. A8. <https://doi.org/10.1029/2001JA000220>
5. *Ganushkina N. Yu., Pulkkinen T.I., Kubyshkina M.V. et al.* Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. P. 1317–1334. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-1317-2004>
6. *Невский Д.В., Лаврухин А.С., Алексеев И.И.* Автоматическое определение положения головной ударной волны и магнитопаузы магнитосферы Меркурия по данным магнитометра космического аппарата MESSENGER // *Космические исследования*. 2023. Т. 61. № 3. С. 189–201. <https://doi.org/10.31857/S0023420623700073>
7. *Алексеев И.И., Шабанский В.П.* Модель магнитосферного магнитного поля // *Геомагнетизм и аэрономия*. 1971. Т. 11. № 4. С. 571–579.
8. *Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Y., Alexeev I.I. et al.* A model of Jupiter's magnetospheric magnetic field with variable magnetopause flaring // *Planetary and Space Science*. 2005. V. 53. Iss. 9. P. 863–872. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.03.004>
9. *Nguyen G., Aunai N., Michotte de Welle B. et al.* Massive multi-mission statistical study and analytical modeling of the Earth's magnetopause: 2. Shape and location // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2022. V. 127. Art.ID. e2021JA029774. <https://doi.org/10.1029/2021JA029774>
10. *Collado-Vega Y.M., Dredger P., Lopez R.E. et al.* Magnetopause standoff position changes and geosynchronous orbit crossings: Models and observations // *Space Weather*. 2023. V. 21. Art.ID. e2022SW003212. <https://doi.org/10.1029/2022SW003212>
11. *Dredger P.M., Lopez R.E., Collado-Vega Y.M. et al.* Investigating potential causes for the prediction of spurious magnetopause crossings at geosynchronous orbit in MHD simulations // *Space Weather*. 2023. V. 21. Art.ID. e2022SW003266. <https://doi.org/10.1029/2022SW003266>
12. *Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al.* Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. Iss. A4. P. 7737–7747. <https://doi.org/10.1029/95JA03509>
13. *Alexeev I.I., Kalegaev V.V., Belenkaya E.S. et al.* Dynamic model of the magnetosphere: Case study for January 9–12, 1997 // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. Iss. A11. P. 25683–25693. <https://doi.org/10.1029/2001JA900057>
14. *Kubyshkina M.V., Sergeev V.A., Pulkkinen T.I.* Hybrid Input Algorithm: An event-oriented magnetospheric model. *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. Iss. A11. P. 24977–24993. <https://doi.org/10.1029/1999JA900222>
15. *Kalegaev V.V., Ganushkina N.Y., Pulkkinen T.I. et al.* Relation between the ring current and the tail current during magnetic storms // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23. P. 523–533. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-523-2005>
16. *Alken P., Thébaud E., Beggan C.D. et al.* International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // *Earth Planets Space*. 2021. V. 73. Iss. 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
17. *Alexeev I.I., Feldstein Ya.I.* Modeling of geomagnetic field during magnetic storms and comparison with observations // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001. V. 63. Iss. 5. P. 431–440. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00170-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00170-X)
18. *Bobrovnikov S. Yu., Alexeev I.I., Belenkaya E.S. et al.* Case study of September 24–26, 1998 magnetic storm // *Advances in Space Research*. 2005. V. 36. Iss. 12. P. 2428–2433. ISSN 0273-1177. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.11.023>
19. *Shue J.-H., Song P., Russel C.T. et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. Iss. A8. P. 17691–17700. <https://doi.org/10.1029/98JA01103>
20. *Старков Г.В.* Планетарная морфология сияний // *Магнитосферно-ионосферная физика: Краткий справочник / под ред. Ю.П. Мальцев.* СПб.: Наука, 1993.
21. *Alexeev I.I.* Energy flux in the Earth's magnetosphere: Storm – substorm relationship // *Space Science Reviews*. 2003. V. 107. P. 141–148. <https://doi.org/10.1023/A:1025519622160>

22. *Dessler A.J., Parker E.N.* Hydromagnetic theory of geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.* 1959. V. 64. Iss. 12. P. 2239–2252. <https://doi.org/10.1029/JZ064i012p02239>
23. *Sckopke N.* A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the Earth // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. Iss. 13. P. 3125–3130. <https://doi.org/10.1029/JZ071i013p03125>
24. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. Iss. 31. P. 4204–4214. <https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204>
25. *O'Brien T.P., McPherron R.L.* An empirical phase space analysis of ring current dynamics: Solar wind control of injection and decay // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. Iss. A4. P. 7707–7719. <https://doi.org/10.1029/1998JA000437>
26. *Jordanova V.K., Torbert R.B., Thorne R.M. et al.* Ring current activity during the early $B_z < 0$ phase of the January 1997 magnetic cloud // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. Iss. A11. P. 24895–24914. <https://doi.org/10.1029/1999JA900339>
27. *Фельдштейн Я.И., Дремухина Л.А., Луи А.Т.Ю.* Околоземная граница плазменного слоя в хвосте магнитосферы в периоды магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2000. Т. 40. № 6. С. 21–24.
28. *Калегаев В.В., Власова В.А.* Относительная динамика кольцевого тока – токов хвоста магнитосферы во время геомагнитных бурь разной интенсивности // *Геомагнетизм и аэрномия.* 2017. Т. 57. № 5. С. 572–577. <https://doi.org/10.7868/S0016794017040083>.
29. *Тсыганенко Н.А., Singer H.J., Kasper J.C.* Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get? // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. A5. Art. ID. 1209. <https://doi.org/10.1029/2002JA009808>
30. *Sitnik I.M., Alexeev I.I., Nevsky D.V.* Debugging the FUMILIM minimization package // *Computer Physics Communications.* 2024. V. 294. Art.ID. 108868. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2023.108868>
31. *Kataoka R., Shiota D., Fujiwara H. et al.* Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022 // *J. Space Weather Space Clim.* 2022. V. 12. Art.ID. 41. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022034>

УДК: 523.985.7-77

РАДИОПРЕДВЕСТНИКИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ФЕВРАЛЕ – МАРТЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. О. А. Шейнер*, В. М. Фридман

Научно-исследовательский радиофизический институт

Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

**e-mail: rfj@nirfi.unn.ru*

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 13.11.2023 г.

Принята к публикации 20.11.2023 г.

На основе анализа данных за февраль – март 2023 г. рассмотрены результаты исследований связи между возникновением спорадического микроволнового излучения, предшествующего явлениям корональных выбросов массы, и этими явлениями с целью разработки методов краткосрочного прогнозирования корональных выбросов массы по радиоданным.

DOI: 10.31857/S0023420624020027, EDN: kzparw

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы уделяется большое внимание изучению корональных выбросов массы (КВМ) – наиболее важных солнечных явлений, основного движущего фактора космической погоды [1]. В процессах и явлениях, происходящих в солнечной атмосфере, магнитное поле и его вариации играют решающую роль, в том числе и в формировании КВМ. Изучение КВМ важно как с точки зрения понимания фундаментальных солнечных процессов, так и с прикладной – выяснения их воздействия и оценки влияния на параметры и динамику «космической погоды».

Мощное излучение в широком диапазоне электромагнитных волн, генерация ускоренных заряженных частиц, формирование ударных волн в межпланетном пространстве, характерные для КВМ, вызывают возмущения в магнитосфере и ионосфере Земли, приводящие к нарушениям функционирования различных систем (ориентации, связи), оказывают влияние на ионосферу, погодообразующие процессы и на здоровье людей [2–5]. Таким образом, возникает проблема изучения связи характеристик и динамики явлений КВМ на Солнце с их проявлениями в околоземном пространстве. Очевидна при этом важность прогноза явлений КВМ с возможной заблаговременностью, повышающей эффективность оценки состояния и развития характеристик околоземной среды, обусловленных факторами «космической

погоды». Возможности прогноза начала и временных профилей событий, вызванных солнечной активностью, включая вспышки солнечного рентгеновского излучения и КВМ, имеют решающее значение для информационного обеспечения профильных служб, объявления алертных периодов, принятия решений и, соответственно, смягчения потенциального воздействия КВМ.

Большинство современных опубликованных работ по прогнозированию КВМ относится к проблеме определения возможной геоэффективности КВМ [6], тогда как алгоритмов прогнозирования факта КВМ довольно мало [7–10]. При этом в качестве прогностических признаков событий используются, как правило, магнитограммы, карты распределения фотосферных магнитных полей, их изменения или машинные алгоритмы на основе статистических связей событий КВМ и элементов магнитных структур.

Нет единого мнения о том, что представляет собой предэруптивная стадия взрывного высвобождения магнитной энергии, вызывающая КВМ, какие физические процессы ответственны за образование КВМ [11–13]. В то же время известно, что наиболее энергичные КВМ формируются вблизи активных областей (АО) в нижней короне, поэтому структура и динамика коронального магнитного поля являются ключом к пониманию процессов, управляющих формированием и извержением КВМ. Но нет возможности мониторинга коронального магнитного поля, и, как известно, измерить его трудно [14].

Именно здесь радионаблюдения помогут заполнить пробел в знаниях либо как индикаторы накопления энергии и дисбаланса в АО, либо как предвестники надвигающегося извержения.

Радиоизлучение генерируется во всей солнечной атмосфере, от хромосферы до межпланетного пространства, посредством множества плазменных процессов, в основном при наличии магнитного поля, горячими, сильно ионизованными газами внешней атмосферы Солнца. Эти разреженные газы, практически прозрачные для видимого света, оказываются непрозрачными для радиоизлучения с определенными длинами волн. Хромосфера, которая имеет достаточно высокую концентрацию электронов и температуру $T \approx 10^4$ К, прозрачна только для сантиметровых волн. Дециметровые и метровые волны могут прийти только из лежащей выше более разреженной и горячей короны Солнца с температурой $T \approx 1-2 \cdot 10^6$ К [15–19]. Даже слабо ускоренные электроны с энергией в несколько килоэлектронвольт могут излучать заметное радиоизлучение, что делает такие наблюдения чувствительным показателем даже слабых энергетических процессов. Следовательно, их обнаружение в области последующего извержения может быть предвестником активности. Эта предпосылка, а также данные моделей о том, что предэруптивная конфигурация магнитного поля развивается по мере того, как система движется к потере равновесия, стали стимулом для попыток идентифицировать радиопредвестники КВМ.

Так, ни одно из исследований связи между КВМ и шумовыми бурями I типа [20, 21] не предоставило убедительных доказательств: «Кажется, что эти два явления каким-то образом взаимосвязаны, но детали взаимосвязи (физические, временные и/или пространственные) до сих пор неясны» [20]. Исследование радиоизлучения III типа [22] показало, что оно, как правило, происходит в непосредственной временной близости (около минут) к импульсной фазе вспышки и имеет мало значения в качестве предвестника [23, 24]. Восходящий континуум, впервые предложенный в качестве предвестника в работе [25], обнаружен также за 30 мин до крупного извержения 28 октября 2003 г. [26]. Особенности были зарегистрированы только в дециметровом диапазоне, на высоте нескольких 10^5 км над поверхностью, и поэтому могут быть признаками системы восходящего потока перед извержением.

При разработке краткосрочных прогнозов мощных солнечных вспышек [27, 31] была

показана эффективность использования микроволнового излучения Солнца, как индикатора дисбаланса в АО за 1–2 дня до возникновения вспышек с использованием данных как с высоким пространственным разрешением [28], так и без него [27, 29–31]. Предвестники, предшествующие импульсной фазе всплеска, в виде спорадических последовательных повышений уровня излучения были зарегистрированы в радиодиапазоне на 6 фиксированных частотах: 9100, 2950, 950, 650, 200 и 100 МГц, – и эти данные расширены на более чем два 11-летних цикла солнечной активности (1970–1994 гг.) [32]. Регистрация предвестников такого типа находит подтверждение и в более поздних (2002, 2015 г.) наблюдениях с высоким пространственным разрешением [33].

Первые работы по выявлению микроволновых (сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн) предвестников КВМ относятся к радионаблюдениям на станции Службы Солнца в радиодиапазоне НИРФИ «Зимёнки» [34]. В результате исследований с использованием данных, охватывающих 21–23-й циклы солнечной активности, установлены соотношения между спорадической компонентой микроволнового излучения на стадии, предшествующей КВМ, и их параметрами [35, 36]. Отметим, что представленные результаты получены с использованием данных рутинных наблюдений обсерваторий без пространственного разрешения, принадлежащих Мировой службе Солнца.

ДАнные И МЕТОД

На основе анализа временных и спектральных данных микроволнового солнечного излучения в широком диапазоне частот (от сотен до 15000 МГц) в период, предшествующий явлению КВМ, создан способ краткосрочного прогноза времени регистрации КВМ на коронографе [37]. Способ включает операции, обусловленные процессами, охватывающими на начальном этапе значительную часть Солнца, с их последующей локализацией в центрах непосредственного формирования КВМ и их отражением в солнечном микроволновом радиоизлучении.

Предлагаемый способ, как метод, основанный на эмпирических данных, представляет собой классическую комбинацию методов прогнозирования: точечного, когда указывается, наступит событие или нет, и вероятностного, поскольку определяется временной интервал регистрации события. По структуре метод основан на схеме

идентификации, наиболее простым вариантом которой является синоптическая диаграмма, когда по предыстории обучающая выборка определяет совокупность характеристик, которые чаще всего предшествовали прогнозируемому событию, что позволяет нам предсказать событие в определенном интервале времени [38].

Полная реализация способа предусматривает схему, использующую связанные процедуры: наличие и рост амплитуды долгопериодных ($T > 20$ мин) пульсаций микроволнового излучения за 2–3 сут. до события; наличие устойчивых узкополосных (шириной до 1 МГц) особенностей радиоизлучения за 5–8 ч до события и регистрацию на интервале за 2 ч до события широкополосных микроволновых предвестников (далее радиопредвестников) в виде подобного поведения спорадической компоненты радиоизлучения на различных частотах. Последняя – совокупность всплесковых явлений со взрывным ростом (от долей до десятков секунд). Характерной особенностью является также отсутствие всплесков на протяжении 1–1.5 ч до возникновения предвестников [36]. В дальнейшем исследования показали, что можно сократить интервал 5–8 ч до 3 ч без ущерба для применения в прогнозировании третьей части схемы указанного способа.

Повышенная солнечная активность и значительное число событий КВМ, зарегистрированных в феврале – марте 2023 г., позволили продолжить изучение связи между событиями КВМ и характеристиками явлений в микроволновом диапазоне на 2-часовом временном интервале, непосредственно предшествующем регистрации КВМ; а также провести исследование возможностей и повышения эффективности указанного выше способа краткосрочного прогноза времени регистрации КВМ коронографом, основанного на анализе временных и спектральных данных микроволнового солнечного излучения в широком диапазоне частот.

Важно отметить, что высокий уровень солнечной активности в 2023 г. не позволяет использовать в проведенных исследованиях полную схему ранее разработанного способа краткосрочного прогноза времени регистрации КВМ по радиоданным без пространственного разрешения. Это обусловлено невозможностью отделения радиоизлучения областей Солнца, связанных с формированием КВМ, от радиоизлучения других АО Солнца. Таким образом, в работе при исследованиях применена та часть способа прогноза, которая связана с микроволновыми предвестниками для изолированных событий КВМ,

поэтому можно говорить только о сверхкраткосрочном прогнозе явления КВМ.

Информация о регистрации КВМ доступна в каталоге SACTus (<http://sidc.be/cactus>). Данные о КВМ вносятся в каталог автоматически с использованием наблюдений LASCO C2/C3. Для анализа использовались день и время первого появления КВМ в поле зрения коронографа LASCO/C2, позиционный угол pa , угловая ширина da и медианная скорость выброса, указанные в каталоге SACTus. Эти параметры были использованы при выявлении предполагаемого места извержения КВМ, направления его распространения и мощности. Для уточнения факта выброса и его местоположения использовались разностные изображения Солнца, приведенные в каталоге SOHO LASCO CME CATALOG (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Магнитограммы Солнца по данным SDO/HMI (stanford.edu; HMI Image and Movie Browser) так же, как и изображение Солнца в рентгеновских лучах (solarmonitor.org), использовались нами для идентификации расположения источника КВМ.

Методологические принципы изучения микроволновых предвестников так же, как и в работах [35, 36], основаны на анализе данных Мировой службы Солнца (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>) с использованием международной классификации радиовсплесков, приведенной в каталоге [39]. В указанный период исследования были доступны данные солнечных обсерваторий Learmonth, Sagamore Hill, Palehua, San Vito.

Данные Мировой службы Солнца в рассматриваемом диапазоне частот, получены с помощью радиотелескопов с широкой диаграммой направленности – без высокого пространственного разрешения. При исследовании явлений в радиоизлучении, предшествующих первому появлению в поле зрения коронографа конкретного КВМ, необходимо быть уверенным, что никакие другие КВМ в течение рассматриваемого интервала времени не наблюдаются. Исходя из этого из всех событий, приведенных в каталоге за февраль – март 2023 г., были выбраны такие выделенные события КВМ, перед которыми на протяжении по крайней мере 3 ч не наблюдалось других событий КВМ или мощных вспышечных явлений.

Выбор временного интервала исследования радиоизлучения (2 ч) подтверждается результатами работы [40], авторы которой проанализировали число радиособытий в зависимости от разности

между временем первой регистрации КВМ на коронографе (нулевой момент времени) и началом радиособытия за период 1996–2000 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По данным Каталога LASCO SOHO в феврале 2023 г. зарегистрировано 130 КВМ, в марте 2023 г. – 186 КВМ различной мощности и направленности. Для исследований с учетом условий использования указанного выше метода обработки данных (изолированность в пределах 3 ч до регистрации события) выделено 86 уединенных КВМ в феврале 2023 г. и 97 КВМ в марте 2023 г.

Совместный анализ магнитограмм Солнца (по данным SDO/HMI), изображений КВМ (по данным каталогов CACTus и SOHO LASCO) и солнечного радиоизлучения (по данным Мировой службы Солнца) установил, что для более чем 36% отобранных для анализа изолированных КВМ в феврале и около 30% КВМ марте за 2 ч до регистрации КВМ отмечены спорадические явления

в солнечном радиоизлучении, которые можно характеризовать как радиопредвестники КВМ.

Стоит отметить, что в части из анализируемых событий предполагаемый источник КВМ находился за пределами видимого солнечного диска. Таким образом, процент событий КВМ, связанных с источниками на видимой стороне диска Солнца и в которых наблюдаются микро-волновые предвестники, значительно больше, чем указан выше. Уточнение местоположения изолированных КВМ говорит о том, что, по нашим представлениям, в феврале 2023 г. 51 КВМ (из 86) произошли за лимбом, а в марте – 61 КВМ (из 97). Тогда почти 90% КВМ в феврале и 70% КВМ в марте предшествует радиоизлучение в широком диапазоне длин волн. Увеличение числа залимбовых событий КВМ в марте по отношению к февралю может свидетельствовать об увеличении общего уровня активности.

На рис. 1–4 приведены характерные примеры КВМ и их радиопредвестников. Временные изменения потока радиоизлучения S показаны

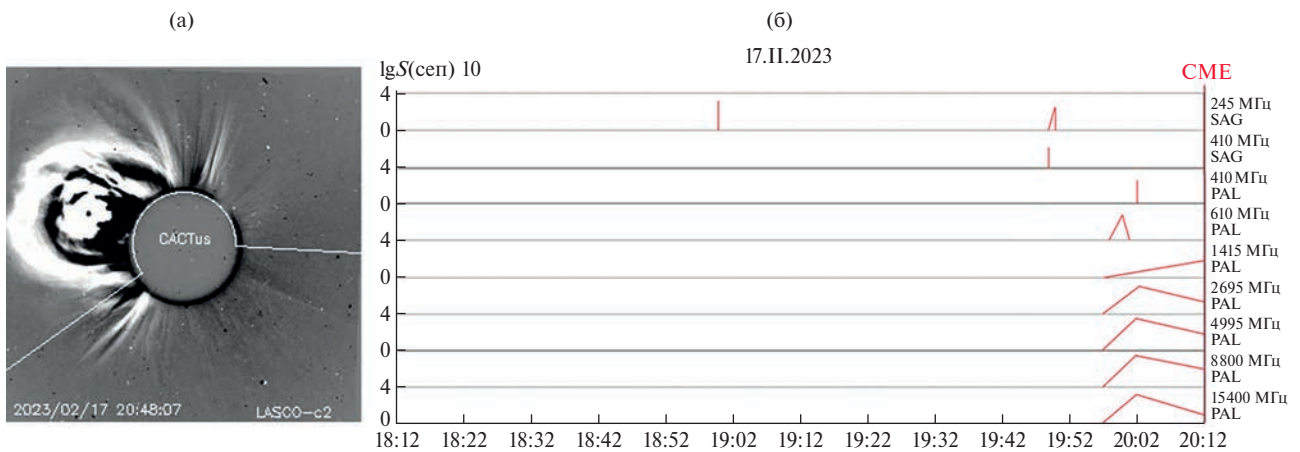


Рис. 1. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 17.11.2023 в 20:12 UT (а), и его радиопредвестников (б).

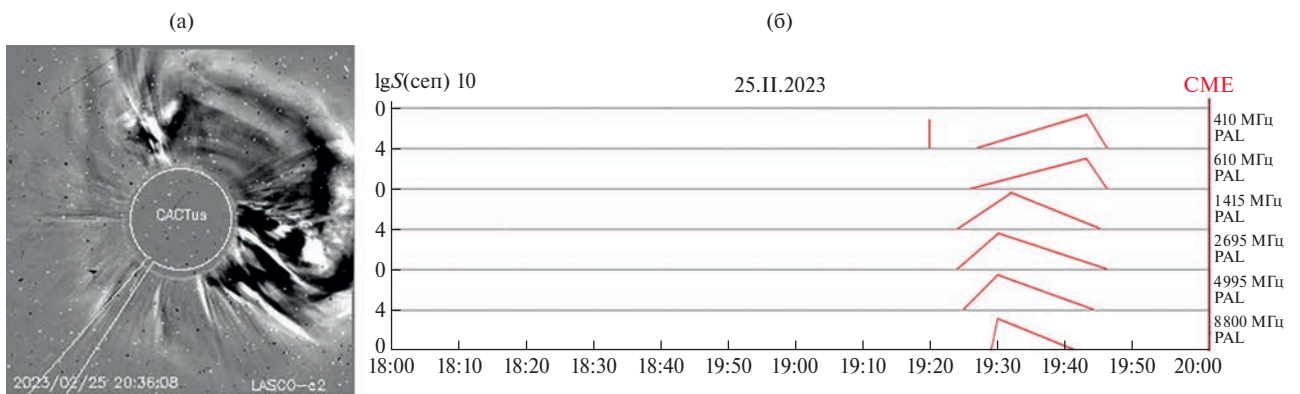


Рис. 2. То же, что рис. 1, 25.11.2023 в 20:00 UT.

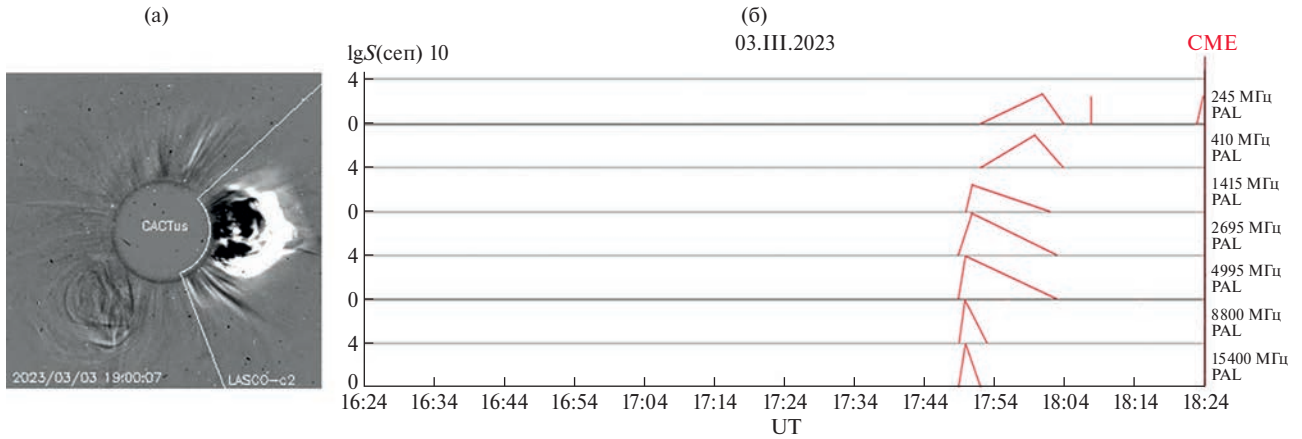


Рис. 3. То же, что рис. 1, 03.III.2023 в 18:24 UT.

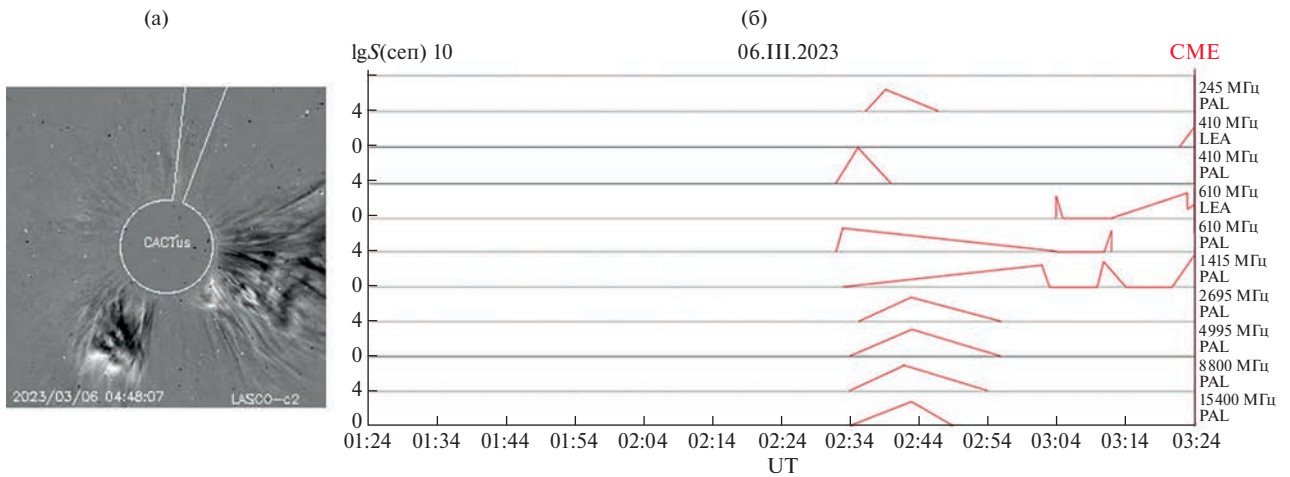


Рис. 4. То же, что рис. 1, 06.III.2023 в 03:24 UT.

в форме схематических профилей: справа указаны частоты наблюдений в мегагерцах и аббревиатуры соответствующих обсерваторий (данные радиоизлучения Мировой службы Солнца), слева – величины потоков, выраженные в сеп (10^{-22} Вт/м² Гц, в логарифмическом масштабе – $\lg(S(\text{сеп}) 10)$. Правая граница горизонтальной оси соответствует моменту регистрации КВМ на коронографе LASCO/C2. Данный масштаб по оси ординат для потока радиоизлучения выбран в связи с большим диапазоном наблюдаемых величин зарегистрированных событий, нулевой уровень потока на каждой частоте сдвинут на 4 единицы относительно соседних частот.

Примеры КВМ на рис. 1–4 показаны как разностные изображения солнечной короны, полученные в белом свете с помощью коронографа LASCO/C2 (<http://sidc.be/cactus>). Белым цветом на изображении отмечены границы зарегистрированных КВМ. КВМ видны как яркие выбросы.

КВМ (20:12 UT, LASCO/C2) 17.II.2023 (рис. 1а) связан с АО 3229, расположенной на восточном краю диска Солнца. Рентгеновская вспышка X2.2 и зарегистрированное радиоизлучение ассоциируется также с указанной АО. Наблюдаемое в широком диапазоне частот радиоизлучение (рис. 1б) отражает процесс начального распространения КВМ в нижних слоях атмосферы Солнца в соответствии с ранее разработанной концепцией разработанного способа прогноза КВМ [37].

На рис. 2 приведены данные наблюдений 25.II.2023. КВМ типа Гало (20:00 UT, LASCO/C2) ассоциируется с той же АО 3229, расположенной уже на западном краю диска Солнца. Радиопредвестники КВМ, зарегистрированные в виде подобных всплесков, возникают примерно за 40 мин до регистрации КВМ на коронографе и также в соответствии с физической концепцией способа [37] свидетельствуют о процессах формирования КВМ.

Примеры отдельных событий марта 2023 г. приведены на рис. 3 и 4.

КВМ 03.III.2023 (рис. 3а) связан с АО 3234, расположенной на западном лимбе, там же произошла мощная вспышка (X2.1). Радиопредвестники КВМ (рис. 3б) наблюдаются на 7 частотах микроволнового диапазона. Отметим, начало радиоизлучения регистрируется одновременно на 4 частотах (15400, 8800, 4995 и 2695 МГц), которые генерируются на разных высотах атмосферы Солнца, что может свидетельствовать о месте и размере процесса формирования КВМ.

В событии КВМ 06.III.2023 в 03:24 UT (рис. 4а) за 1 ч до регистрации КВМ также наблюдается группа радиопредвестников, охватывающих широкий диапазон частот радиоизлучения (рис. 4б).

Таким образом, в тех случаях, когда источник КВМ находится на видимой стороне диска Солнца, регистрируется широкополосное спорадическое радиоизлучение (радиопредвестники КВМ) на интервале формирования и начального распространения КВМ.

Очевидно, что, когда источник КВМ находится на обратной стороне диска Солнца, радиопредвестники не регистрируются.

В то же время, поскольку радиоизлучение Солнца из центров активности, с которыми, как правило, связаны источники вспышек и КВМ, формируется на всей совокупности высот фотосферы, хромосферы и короны Солнца, существуют возможности обнаружения радиоизлучения спорадической компоненты в более низкочастотной области спектра в наблюдениях за АО в периоды их нахождения за восточным и западным краями солнечного диска. Что также может найти применение в способе краткосрочного прогноза КВМ по радиоизлучению.

На рис. 5 и 6 приведены примеры залимбовых КВМ и наблюдаемого радиоизлучения в феврале 2023 г.

КВМ (рис. 5а) зарегистрирован 20.II.2023 в 09:48 UT. Источник КВМ находится за восточной частью лимба, АО хорошо видна на следующий день (рис. 5б). Спорадическое радиоизлучение в виде шумовых бурь метрового диапазона отмечено за 1 ч до регистрации КВМ (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>).

На рис. 6а показан КВМ, зарегистрированный 10.II.2023 в 09:24 UT. Радиоизлучение в виде импульсных всплесков на $f = 245$ МГц (рис. 6б) отмечено в интервале 2 ч до регистрации КВМ. Скорее всего, КВМ выходит из области, расположенной

на самом краю солнечного диска, что подтверждается картой распределения магнитных полей (рис. 6б) и изображением данной области Солнца в рентгеновских лучах (рис. 6в) (solarmonitor.org).

Особый интерес вызывают события марта 2023 г., когда было зарегистрировано внезапное повышение уровня геомагнитной активности без увеличения вспышечной активности Солнца. Рассмотрим несколько примеров.

Событию КВМ 22.III.2023 в 18:48 UT (рис. 7а) предшествовало спорадическое радиоизлучение в диапазоне до 180 МГц и радиопредвестники в низкочастотной части спектра (245 МГц) за 2 ч до регистрации события (рис. 7в) (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>). Расположение АО на карте магнитных полей на Солнце (рис. 7б) и наличие радиопредвестников можно расценивать как свидетельство существования источника КВМ в области, находящейся в соответствии с развиваемыми представлениями на невидимой части диска Солнца.

На рис. 8а показан КВМ 24.III.2023 в 17:00 UT. Источник КВМ проецируется на область, рядом с развивающейся группой (рис. 8б) (XRT20230324_170258.3 – Hinode SDC Europe (uiop)). По данным радиослужбы Солнца (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>) в низкочастотной части спектра двумя станциями было зарегистрировано импульсное радиоизлучение с временем существования, характерным для микроволновых предвестников КВМ (рис. 8в).

Второе событие КВМ 24.III.2023 в 21:48 UT (рис. 9а) проецируется на западную часть диска Солнца. Поскольку согласно карте магнитных полей (рис. 9б) в этой части Солнца нет АО, и в этот период не регистрируется нестационарное микроволновое излучение, то это служит свидетельством возникновения события КВМ далеко на обратной стороне Солнца.

Причисление КВМ 20 марта в 02:41 UT к геоэффективным (по данным каталогов МКВМ) является, с нашей точки зрения, ошибочным: выброс распространялся из-за восточного лимба и не мог привести к сильной магнитной буре. КВМ 20 марта в 14:42 UT произошел на обратной стороне Солнца, поэтому, естественно, радиоизлучение, как предшествующее КВМ, так и его сопровождающее, не может быть зарегистрировано на Земле. В наших исследованиях, основанных на данных, охватывающих 23–25-й 11-летние циклы солнечной активности, были единичные случаи, когда не наблюдались радиопредвестники событий КВМ типа Гало. Когда такие исследования проводились для источников КВМ на видимой части диска

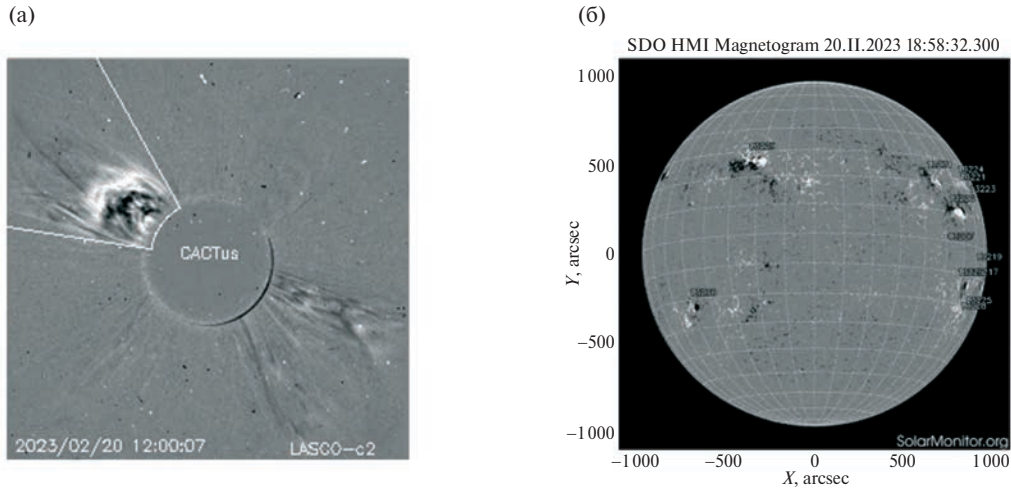


Рис. 5. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 20.11.2023 в 09:48 UT (а), и магнитограмма Солнца по данным SDO HMI на этот день (б).

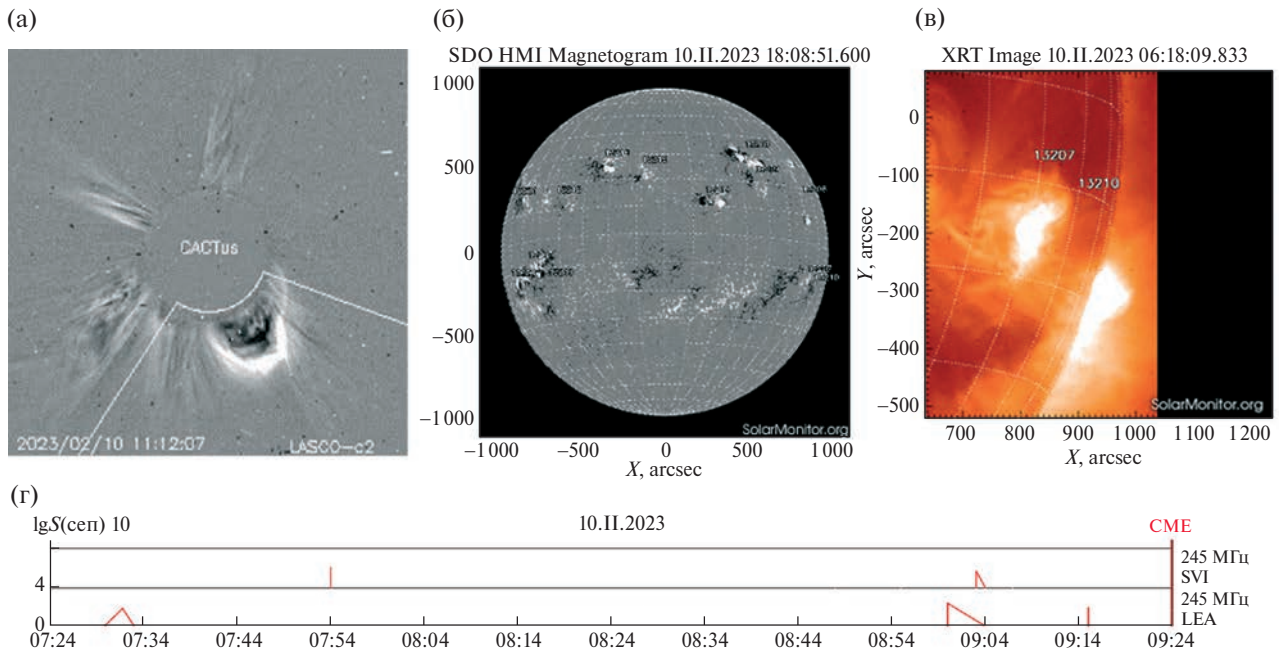


Рис. 6. То же, что рис. 5, 10.11.2023 в 09:24 UT, изображение области Солнца в рентгеновских лучах (в) и радиопредвестники КВМ (г).

Солнца, в абсолютном большинстве случаев для этого типа событий наблюдаются одновременное возникновение, быстрый рост и подобная форма радиопредвестников во всем диапазоне анализируемого частотного диапазона [36] (в этом случае показателен рис. 2 для источника КВМ типа Гало на видимой части диска Солнца). Данное событие обладает особенностями, которые выделяют его из остального ранее рассматриваемого множества КВМ типа Гало. Такая особенность, очевидно, связана с положением источника КВМ в наиболее удаленной части невидимого диска Солнца, т.е. когда

предлагаемые в статье возможности дополнительного сверхкраткосрочного прогнозирования событий КВМ не могут быть реализованы.

Таким образом, можно утверждать, что проведенные результаты исследований свидетельствуют об эффективности рассмотренного способа краткосрочного прогнозирования времени регистрации КВМ по широкополосным данным солнечного радиоизлучения и возможности расширения применения указанного способа для событий вне видимого диска Солнца.

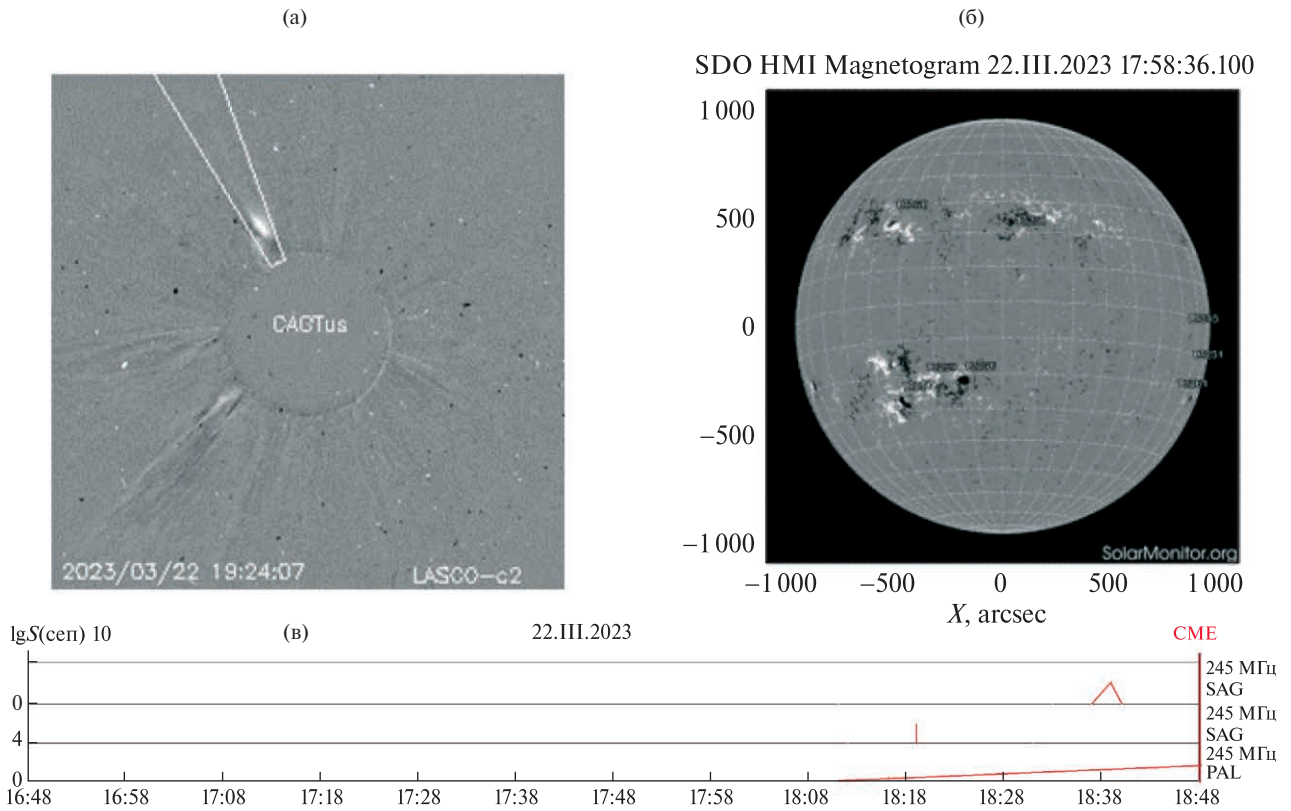


Рис. 7. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 22.III.2023 в 18:48 UT (а), магнитограмма Солнца по данным SDO HMI на этот день (б) и радиопредвестники КВМ (в).

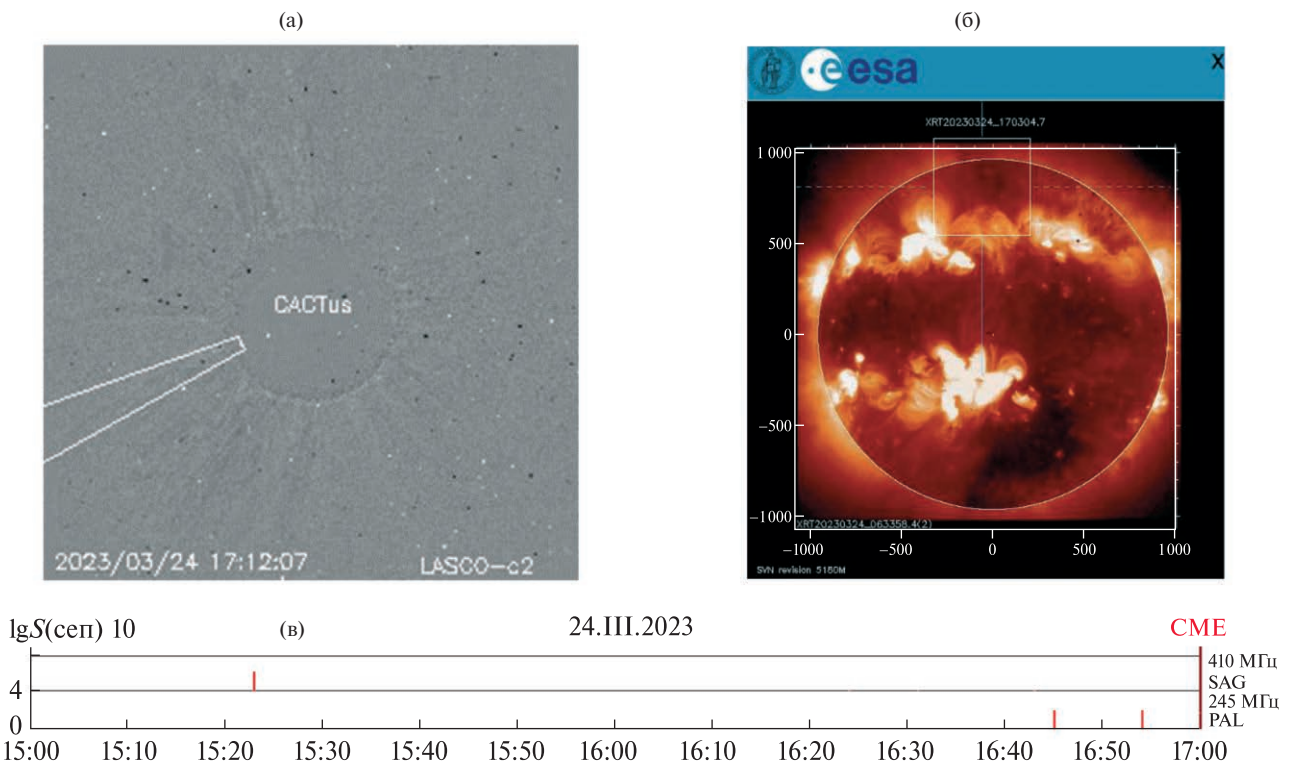


Рис. 8. Пример КВМ, зарегистрированного CACTus (LASCO/C2) 24.III.2023 в 17:00 UT (а), изображение области Солнца в рентгеновских лучах (б) и радиопредвестники КВМ (в).

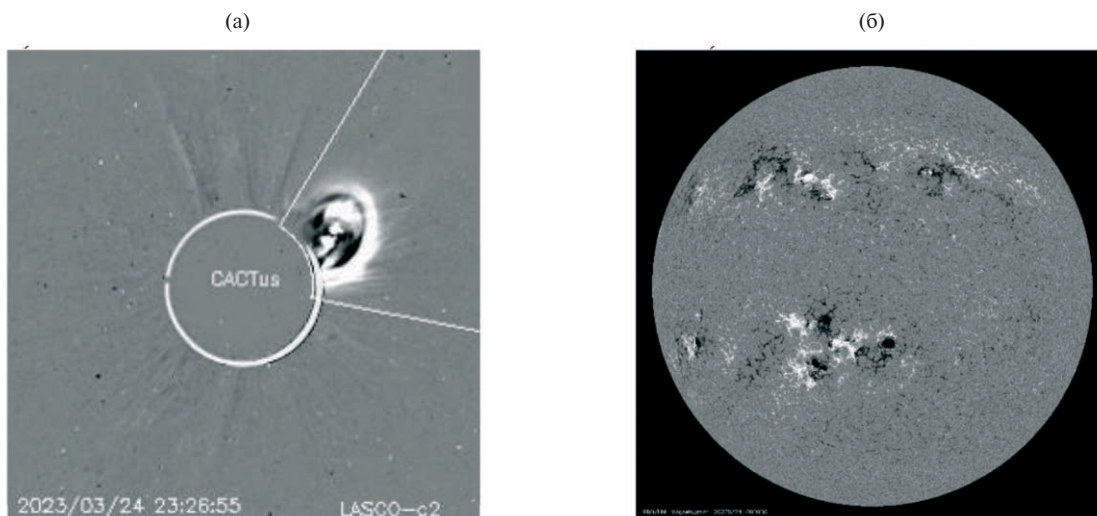


Рис. 9. То же, что рис. 5, 24.III.2023 в 21:48 UT.

Следует отметить, что с введением в строй солнечных радиоинтерферометров дециметрового и метрового диапазонов с высоким пространственным разрешением [41, 42] можно ожидать повышение эффективности применения развиваемого в данной работе метода прогноза КВМ с использованием радиоданных. Это обусловлено двумя факторами. Первый — повышение возможного числа прогнозируемых событий за счет исключения необходимого для применения метода условия о 3-часовом временном интервале между анализируемыми событиями, т.е. исключения условия изолируемости событий, — это количественный фактор. Второй — повышение вероятности прогноза вследствие однозначной привязки к АО, являющимися источниками КВМ и радиопредвестников КВМ в низкочастотной области спектра радиоизлучения, — это качественный фактор.

ВЫВОДЫ

Рассмотрен непрерывный ряд значительного массива данных, связанных с событиями КВМ, зарегистрированными в феврале — марте 2023 г. на восходящей фазе 25-го 11-летнего цикла солнечной активности, который позволил продолжить изучение связи между событиями КВМ и характеристиками явлений в микроволновом диапазоне на 2-часовом временном интервале, непосредственно предшествующем регистрации КВМ.

По совокупности событий рассмотренного периода подтверждены основные положения предложенного ранее способа краткосрочного прогноза времени регистрации коронографом находящихся на видимой части диска Солнца КВМ,

основанного на анализе временных и спектральных данных спорадического широкополосного микроволнового солнечного излучения, являющегося радиопредвестником КВМ, со станций Службы Солнца, не обладающих высоким пространственным разрешением.

Предложены и продемонстрированы возможности расширения применения указанного способа прогноза для источников КВМ, расположенных на краю солнечного диска или за ним. Расширение применения способа базируется на возможности наблюдений радиоизлучения АО, связанных с источниками КВМ, в периоды их нахождения за восточным и западным краями солнечного диска, в низкочастотной части спектра радиоизлучения, формируемого в более высоких слоях солнечной хромосферы и нижней короны.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по проекту FSWR-2023-0038 в рамках базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gopalswamy N.* The Sun and space weather // *Atmosphere*. 2022. V. 13. Iss. 11. Art.ID. 1781. <https://doi.org/10.3390/atmos13111781>

2. *Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // *Space Weather*. 2017. V. 15. Iss. 7. P. 828–856. <https://doi.org/10.1002/2016SW001501>
3. *Kutiev I., Tsagouri I., Perrone L. et al.* Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // *J. Space Weather Space Clim*. 2013. V. 3. Iss. A06. <https://doi.org/10.1051/swsc/2013028>
4. *Tsagouri I., Galkin I., Asikainen T.* Long-term changes in space weather effects on the Earth's ionosphere // *Advances in Space Research*. 2017. V. 59. Iss. 1. P. 351–365. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.004>
5. *Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрукович А.А.* Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы // *Успехи физических наук*. 2016. Т. 186. № 5. С. 568–576. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2015.12.037693>
6. *Vourlidas A.* Improving the Medium-Term Forecasting of Space Weather: A Big Picture Review From a Solar Observer's Perspective // *Front. Astron. Space Sci*. 2021. V. 8. Art.ID. 651527. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.651527>
7. *Falconer D.A., Moore R.I., Gary G.A.* Magnetogram measures of total nonpotentiality for prediction of solar coronal mass ejections from active regions of any degree of magnetic complexity // *Astroph. J*. 2008. V. 689. P. 1433–1442. <https://doi.org/10.1086/591045>
8. *Qahwaji R., Colak T., Al-Omari M. et al.* Automated Prediction of CMEs Using Machine Learning of CME – Flare Associations // *Solar Phys*. 2008. V. 248. Iss. 2. P. 471–483. <https://doi.org/10.1007/s11207-007-9108-1>
9. *Al-Omari M., Qahwaji R., Colak T. et al.* Machine Learning-Based Investigation of the Associations between CMEs and Filaments // *Solar Phys*. 2010. V. 262. Iss. 2. P. 511–539. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9516-5>
10. *Baker D., van Driel-Gesztelyi L., Green L.M.* Forecasting a CME by Spectroscopic Precursor? // *Solar Phys*. 2012. V. 276. P. 219–239. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9893-4>
11. *Chen P.F.* Coronal mass ejections: Models and their observational basis // *Living Rev. Solar Phys*. 2011. V. 8. Iss. 1. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2011-1>
12. *Schmieder B., Aulanier G.* What are the physical mechanisms of eruptions and CMEs? // *Adv. Space Res*. 2011. V. 49. Iss. 11. P. 1598–1606. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.10.023>
13. *Green L.M., Török T., Vršnak B, et al.* The origin, early evolution and predictability of solar eruptions // *Space Sci. Rev*. 2018. V. 214. Iss. 1. Art.ID. 46. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0462-5>
14. *Casini R., White S.M., Judge P.G.* Magnetic diagnostics of the solar corona: synthesizing optical and radio techniques // *Space Sci. Rev*. 2017. V. 210. P. 145–181. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0400-6>
15. *Железняков В.В.* Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964. 560 с.
16. *Злотник Е.Я.* К теории медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения I // *Астрономический журнал*. 1968. Т. 45. № 2. С. 310–320.
17. *Злотник Е.Я.* К теории медленно меняющейся компоненты солнечного радиоизлучения II // *Астрономический журнал*. 1968. Т. 45. № 3. С. 585–596.
18. *Kuroda N., Fleishman G.D., Gary D.E. et al.* Evolution of Flare-Accelerated Electrons Quantified by Spatially Resolved Analysis // *Front. Astron. Space Sci*. 2020. V. 7. Art.ID. 22. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00022>
19. *Nindos A.* Incoherent Solar Radio Emission // *Front. Astron. Space Sci*. 2020. V. 7. Art.ID. 57. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00057>
20. *Vourlidas A.* Radio observations of coronal mass ejection // *Solar and Space Weather Radiophysics: Current Status and Future Developments*. Eds. D.E. Gary and C.U. Keller (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers). 2004. V. 314. P. 223–242. https://doi.org/10.1007/1-4020-2814-8_11
21. *Vourlidas A., Carley E.P., Vilmer N.* Radio observations of coronal mass ejections: space weather aspects // *Front. Astron. Space Sci*. 2020. V. 7. Art.ID. 43. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00043>
22. *Carley E.P., Vilmer N., Vourlidas A.* Radio Observations of Coronal Mass Ejection Initiation and Development in the Low Solar Corona // *Front. Astron. Space Sci*. 2020. V. 7. Art.ID. 551558. <https://doi.org/10.3389/fspas.2020.551558>
23. *Pohjolainen S., Vilmer N., Khan J.I. et al.* Early signatures of large-scale field line opening. Multi-wavelength analysis of features connected with a “halo” CME event // *Astron. Astrophys*. 2005. V. 434. P. 329–341. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041378>
24. *Aurass H., Holman G., Braune S. et al.* Radio evidence for breakout reconnection in solar eruptive events // *Astron. Astrophys*. 2013. V. 555. Iss. A40. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321111>
25. *Aurass H., Vourlidas A., Andrews M.D. et al.* Nonthermal radio signatures of coronal disturbances with and without coronal mass ejections // *Astrophys. J*. 1999. V. 511. P. 451–465. <https://doi.org/10.1086/306653>
26. *Pick M., Malherbe J.-M., Kerdraon A. et al.* On the Disk H α and radio observations of the 2003 October 28 flare and coronal mass ejection event // *Astrophys. J. Lett*. 2005. V. 631. Art.ID. L97. <https://doi.org/10.1086/497137>
27. *Кобрин М.М., Семенова С.В., Пахомов В.В. и др.* Результаты исследований эффекта возрастания

- долгопериодных пульсаций сантиметрового радиоизлучения Солнца перед мощными вспышками // АЦ. 1981. № 1201. С. 1–3.
28. *Авдюшин С.И., Богомолов А.Ф., Борисова Е.А. и др.* О связи вспышечной активности Солнца с характеристиками радиоизлучения локальных источников на нем // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 1. С. 67–70.
29. *Liu Y., Zheng L.* Solar microwave radiation flux and the short-term prediction of proton events // Proc. Solar-Terrestrial Prediction-V (STPW'96). Japan. January 23–27, 1996. Tokyo: RCW, 1997. P. 196–199.
30. *Li X.-C., Kang L.-Sh.* Evidence for a strong correlation of solar proton events with solar radio bursts // Chin. J. Astron. Astrophys. 2005. V. 5. Iss. 1. P. 110–116.
31. Патент № 2009136134/28 Российская Федерация. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек. Опубл. 27.05.2011 Бюл. № 15 / *Снегирев С.Д., Фридман В.М., Шейнер О.А.*
32. *Дурасова М.С., Подстригач Т.С., Фридман В.М. и др.* Исследование предвспышечных ситуаций по спектральным данным потоков радиоизлучения Солнца за 1970–1994 г. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1996. Т. 39. № 11–12. С. 1425–1435.
33. *Wang H., Liu Ch., Ahn K. et al.* High-resolution observations of flare precursors in the low solar atmosphere // Nature Astronomy. 2017. V. 1. Art.ID. 0085. <https://doi.org/10.1038/s41550-017-0085>
34. *Sheiner O.A., Durasova M.S.* Solar microwave precursors and Coronal Mass Ejection: possible connection // Radiophys. Quantum Electron. 1994. V. 37. Iss. 7. P. 575–578. <https://doi.org/10.1007/BF01046806>
35. *Шейнер О.А., Фридман В.М.* Явления в микроволновом солнечном излучении, наблюдаемые во время образования и начального распространения корональных выбросов массы // Известия Вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 5–6. С. 311–328.
36. *Шейнер О.А., Фридман В.М.* Характер микроволнового солнечного излучения, наблюдаемого на стадии формирования и начального распространения геоэффективных корональных выбросов массы // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 10. С. 727–740.
37. Патент № 2630535 Российская Федерация. Способ краткосрочного прогноза времени регистрации явления коронального выброса массы (КВМ): заявл. № 2016100808 от 12.01.2016: опубл. 11.09.2017 / *Фридман В.М., Шейнер О.А.*
38. *Ванник В.Н.* Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука, 1979. 448 с.
39. Solar-Geophysical Data (explanation of data reports). 1981. Suppl. Iss. 438. <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solardata/solarradio/bursts/radio.txt>
40. *Дурасова М.С., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М.* О распределении частоты возникновения микроволновых радиовсплесков в периоды, связанные с существованием корональных выбросов массы // Актуальные проблемы физики солнечной и звездной активности. Конф. стран СНГ и Прибалтики. Нижний Новгород, 2–7 июня 2003 г.: Сб. докл. в двух томах. Т. 1. С. 136–139.
41. *Yan J., Wu J., Wu L. et al.* A super radio camera with a one-kilometre lens // Nature Astronomy. 2023. V. 7. Art.ID. 750. <https://doi.org/10.1038/s41550-023-01932-y>
42. *Алтынецев А.* Сибирский Радиогелиограф: мноволновый мониторинг в диапазоне 3–12 ГГц в феврале – марте 2023 г. // Тезисы докл. Конф. «Проблемы космофизики» имени М.И. Панасюка.

УДК 551.510.535

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ФЕВРАЛЕ – МАРТЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. Ф. И. Выборнов^{1, 2, *}, О. А. Шейнер^{1, **}

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

*e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

**e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 09.10.2023 г.

Принята к публикации 17.10.2023 г.

В результате анализа данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы в феврале – марте 2023 г. с применением нового ионосферного индекса установлено, что солнечные корональные выбросы массы типа петля приводят к длительному понижению критической частоты F -слоя ионосферы, тогда как другие типы корональных выбросов массы могут не приводить к значительным изменениям состояния ионосферы. Отмечена возможная роль высокоскоростных потоков солнечного ветра и энергичных протонов в возникновении ионосферных возмущений. Приводятся дистанционно-частотные характеристики трассы Кипр – Нижний Новгород во время геомагнитных возмущений, которые свидетельствуют как о сильной деформации F -слоя ионосферы, так и появлении z -образных волновых возмущений, распространявшихся в область меньших высот.

DOI: 10.31857/S0023420624020037, EDN: kzmcca

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы много внимания уделяется причинам возникновения ионосферных возмущений и динамике их развития. Это связано с широким использованием дальней коротковолновой радиосвязи и загоризонтной радиолокации, необходимостью повышения надежности их функционирования и прогнозируемости параметров ионосферного канала связи [1–3]. Состояние ионосферы влияет на работу спутниковых радионавигационных систем и может ограничивать точность позиционирования наземных объектов [4–6].

Появление большого числа исследовательских спутников и наземных средств диагностики за параметрами космической погоды позволяет получать огромный объем данных, где ионосфера может выступать средой, являющейся чутким индикатором солнечно-земных связей.

Согласно многочисленным исследованиям [7–14], параметры ионосферы сильно зависят от геоэффективных явлений, возникающих на Солнце, таких как корональные выбросы

массы (КВМ) и высокоскоростные потоки солнечного ветра. Регистрация возмущений в ионосфере может проводиться как наземными средствами зондирования (ионозондами вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования, риометрами, радаром некогерентного рассеяния и др.), так и с использованием ракет и искусственных спутников Земли (прямые измерения, применение бортовых ионозондов или использование методов транс-ионосферного зондирования сигналами искусственных спутников Земли) [15].

В данной статье рассматривается влияние солнечных геоэффективных возмущений на параметры ионосферы в феврале и марте 2023 г. В качестве параметров ионосферы исследовалось изменение во времени критической частоты $f_0 F_2$ -слоя ионосферы при вертикальном зондировании и максимально наблюдаемой частоты при наклонном зондировании ионосферы методом линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала с использованием предложенного нами ранее нового ионосферного индекса [16].

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В исследовании использовались данные вертикального и наклонного зондирования ионосферы. Значения критических частот F -слоя ионосферы приводятся по данным (<https://ulcar.uml.edu/stationlist.html>, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/index.html>) ионосферных станций Тромсё (69.6°N, 19.2°E – географические координаты; 36.26°N, 103.07E – геомагнитные координаты), Варшавы (52.21°N, 21.06°E; 50.48°N, 105.18°E) и Афин (38.0°N, 23.5°E; 36.26°N, 103.07°E). Выбор этих станций определялся их близким расположением к одному меридиану, что позволяет оценить скорость развития ионосферных возмущений от полярного овала к экватору.

Критические частоты F -слоя ионосферы по данным ионозонда CAD1, расположенного в п. Васильсурск (56.15°N, 46.10°E; 50.77°N, 129.13°E), были получены в ходе специальных измерений. Ионозонд работал в 15-минутном режиме зондирования ионосферы в диапазоне частот 1–12 МГц. Данные максимальных наблюдаемых частот F -слоя ионосферы приводятся по результатам специальных измерений на трассе Кипр – г. Нижний Новгород. Прием ЛЧМ-сигнала проводился каждые 5 мин в диапазоне 8–33 МГц. Координаты всех станций вертикального зондирования, данные которых использовались в статье, приведены рядом с их названием, а взаимное расположение станций

вертикального зондирования (отмечены красными точками) и трассы наклонного зондирования (показана желтой линией) приведены на рис. 1. Средняя точка трассы Кипр – г. Нижний Новгород (отмечена также красной точкой) имеет координаты 45.6°N, 37.45°E – географические; 41.61°N, 118.15°E – геомагнитные.

Используемый в данном исследовании новый ионосферный индекс основан на вычислении отклонения текущего значения критической частоты Δf_0 (или максимально наблюдаемой частоты) ионосферного слоя F_2 от усредненного суточного профиля за месяц, измеренного с помощью метода вертикального (или наклонного) зондирования ионосферы [16]. Девиация Δf_0 в каждый момент регистрации ионограммы (для вертикального зондирования) или дистанционно-частотной характеристики наклонного зондирования определялась как

$$\Delta f_{0jk} = f_{0jk} - \overline{f_{0j}},$$

где

$$\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N,$$

f_{0jk} – измеренное значение; j – номер точки измерения в течение суток; k – номер суток в месяце; N – число дней в месяце. Аналогичная процедура могла проводиться и при анализе данных максимально наблюдаемой частоты наклонного зондирования.

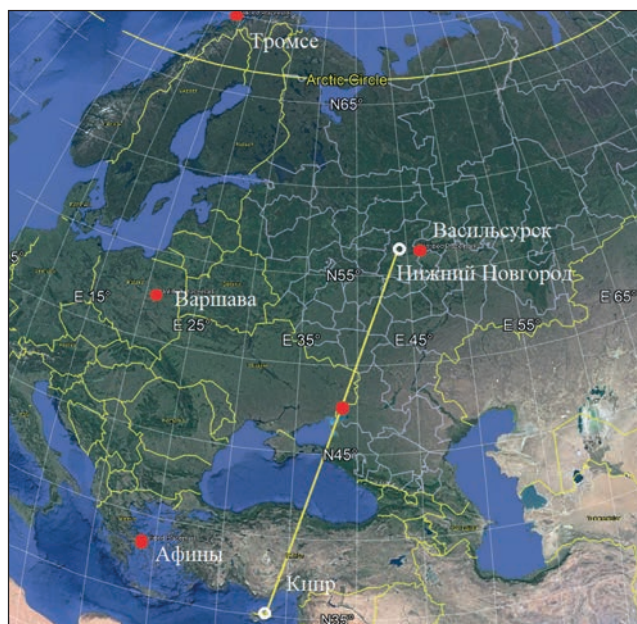


Рис. 1. Взаимное расположение станций вертикального (отмечены красными точками) и трассы наклонного зондирования (желтая линия). Средняя точка трассы Кипр – г. Нижний Новгород отмечена красной точкой.

Дифференциальный параметр, предложенный нами для исследования данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы, позволяет устранить стационарные зависимости (исключить среднесуточное поведение $f_0 F_2$ или максимально наблюдаемой частоты), а используемая цветовая гамма — повысить чувствительность определения девиации Δf_0 в зависимости от времени суток и дня месяца.

Дополнительно анализировалось влияние повышенной геомагнитной активности на среднеширотную ионосферу. Для этого проводилось сопоставление данных Кр- и Dst -индексов за февраль и март 2023 г. и ионограмм ионосферной станции п. Васильсурск или

дистанционно-частотной характеристики ионосферы для трассы Кипр — г. Нижний Новгород.

В качестве событий, влияющих на состояние ионосферы Земли, в первую очередь рассматривались КВМ разных типов, включая и заливочные случаи, зарегистрированные на Солнце в феврале — марте 2023 г.; а также (при необходимости) изменение скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра, потоки солнечных протонов разных энергий и динамика изменения коротковолнового (рентгеновского) излучения. Информация о регистрации КВМ доступна в Каталоге SACTus (<http://sidc.be/sactus>). Данные о КВМ вносятся в каталог автоматически с использованием наблюдений

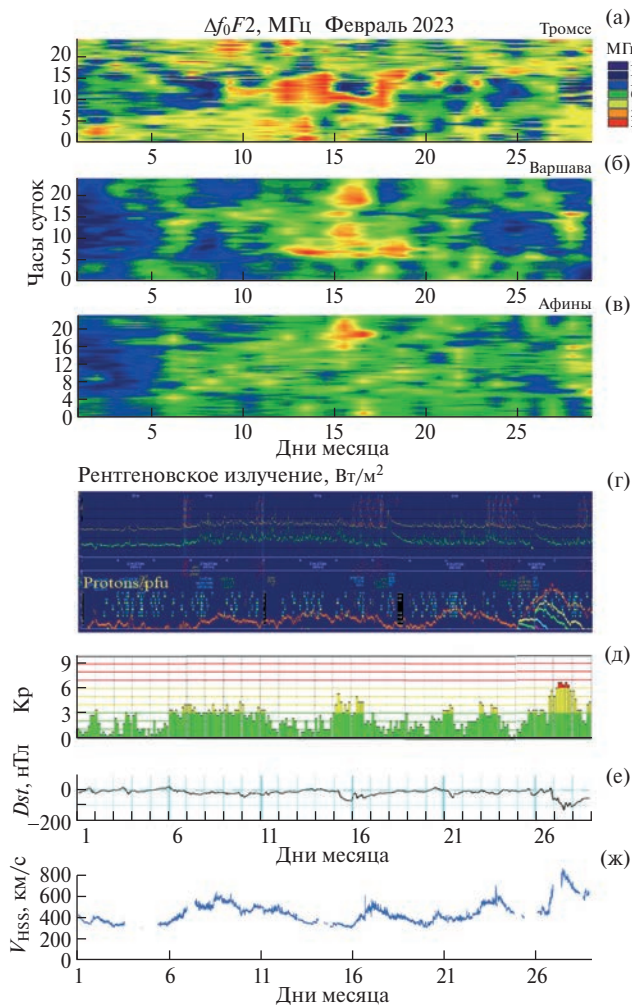


Рис. 2. Поведение индекса $\Delta f_0 F_2$ для 3 ионосферных станций: Афины (в), Варшава (б), Тромсё (а); временной ход рентгеновского излучения и потока протонов (г); индексы Кр (д) и Dst (е); график скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра (V_{HSS} , км/с) за февраль 2023 г. Горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось: для $\Delta f_0 F_2$ — время суток (ч, УТ), для всех остальных — значения величин.

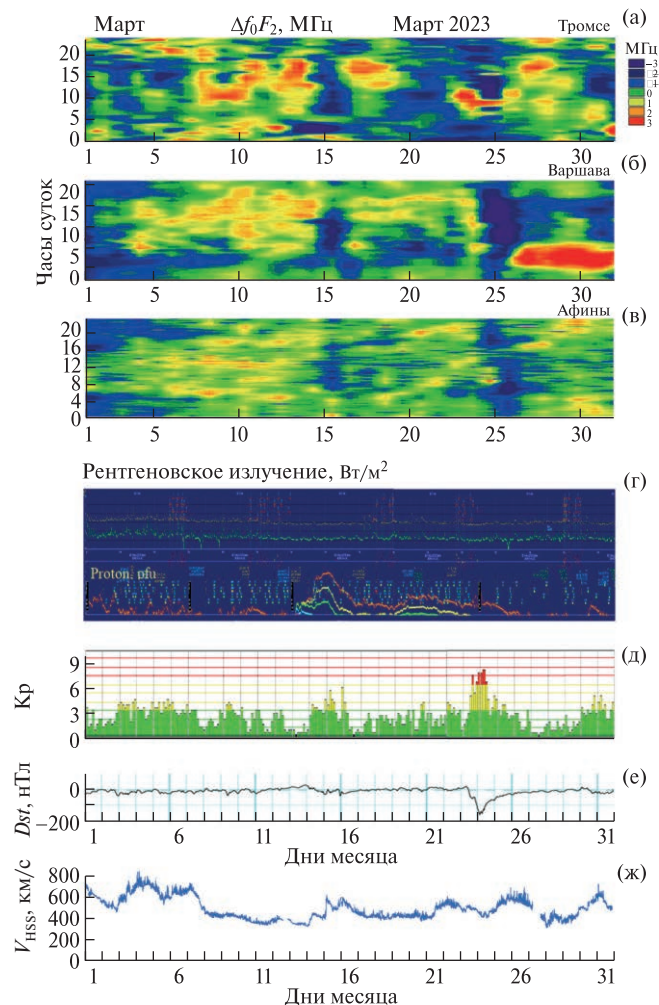


Рис. 3. Поведение индекса $\Delta f_0 F_2$ для 3 ионосферных станций: Афины (в), Варшава (б), Тромсё (а); временной ход рентгеновского излучения и потока протонов (г); индексы Кр (д) и Dst (е); график скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра (V_{HSS} , км/с) за март 2023 г. Горизонтальная ось — дни месяца; левая вертикальная ось: для $\Delta f_0 F_2$ — время суток (ч, УТ), для всех остальных — значения величин.

LASCO C2/C3. Уточненные данные о регистрации КВМ приводятся в Каталоге SOHO LASCO CME (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Ниже в тексте даты и время приводятся по Гринвичу, но дата и время на используемых для анализа снимках оставлены в том виде, в котором они приводятся на сайтах исходных данных.

Для удобства сопоставления данных по девиации Δf_0 в зависимости от времени суток и дня месяца и КВМ центральная часть рис. 2 и 3 (для станции Варшавы) повторяется с отметками зон влияния конкретных КВМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Примеры возникающих ионосферных возмущений для наблюдений, проведенных в феврале и марте 2023 г. на 3 станциях Афины, Варшава и Тромсё, показаны соответственно на рис. 2 и 3. Там же приведены данные об индексах Кр, X-ray, Dst, которые свидетельствуют о повышенной геомагнитной активности (https://tesis.xras.ru/magnetic_storms.html; https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202210/index.html): в конце февраля и марта произошли сильные магнитные бури, и временной ход скорости

высокоскоростных потоков солнечного ветра (V_{HSS} , км/с) (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>).

ФЕВРАЛЬ 2023 ГОДА

Примеры сопоставлений зарегистрированных КВМ и наблюдаемых ионосферных возмущений в феврале 2023 г. показаны на рис. 4 на примере ионосферных данных Варшавы. С учетом Кр- и Dst-индексов такое сопоставление позволяет идентифицировать возможный источник влияния на критические частоты F-слоя ионосферы и рассматривать КВМ как источник ионосферных возмущений.

Примеры КВМ на рис. 4, 7 показаны как разностные изображения солнечной короны, полученные в белом свете с помощью коронографа LASCO/C2. Белым цветом на изображении отмечены границы зарегистрированных КВМ. КВМ видны как яркие блики.

Понижение критических частот (хорошо видно по данным станции Варшава) за первую декаду февраля было связано с петлеобразными КВМ 03.ИИ.2023 в 10:00 UT, 09.ИИ.2023 в 06:12 UT и 10.ИИ.2023 в 09:24 UT, которые были зафиксированы LASCO-C2 (<http://sidc.be/cactus>).

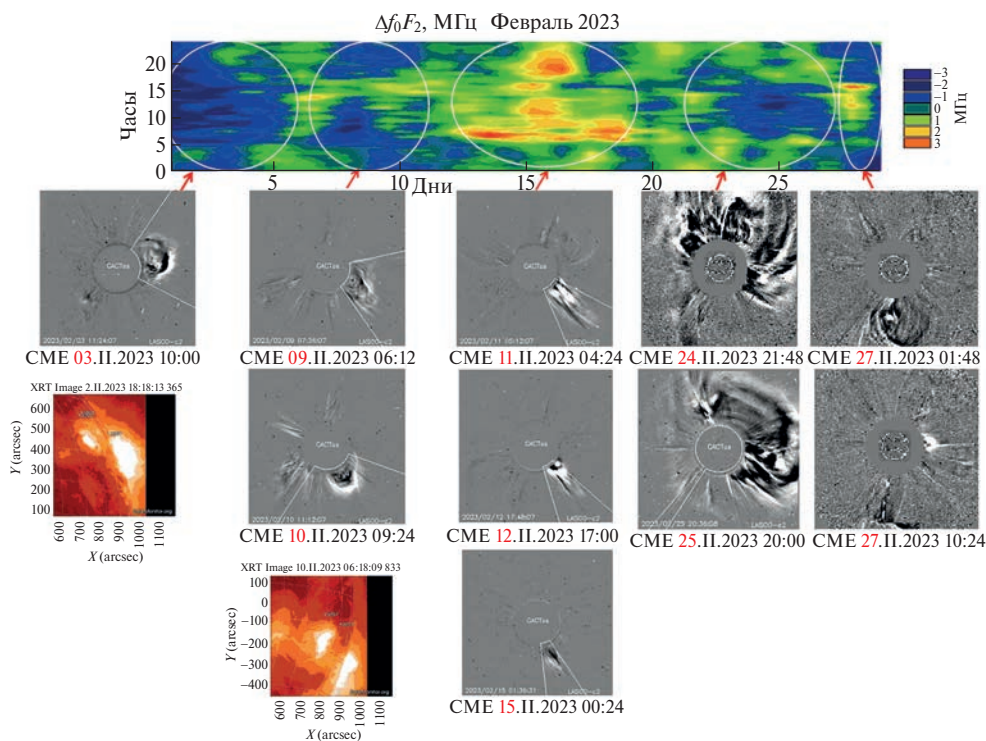


Рис. 4. Иллюстрация совместного анализа поведения индекса $\Delta f_0 F_2$ по данным ионосферной станции Варшава и регистрации КВМ в феврале 2023 г.

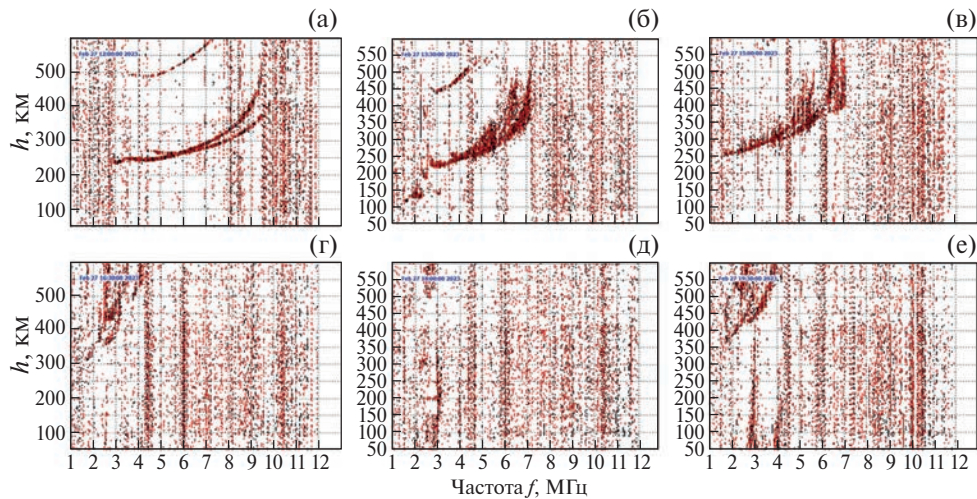


Рис. 5. Ионограммы вертикального зондирования, полученные на ионосферной станции п. Васильсурск 27.11.2023: 12:00 (а), 13:30 (б), 15:00 (в), 16:30 (г), 18:00 (д), 19:30 UT (е).

Кипр—Нижний Новгород

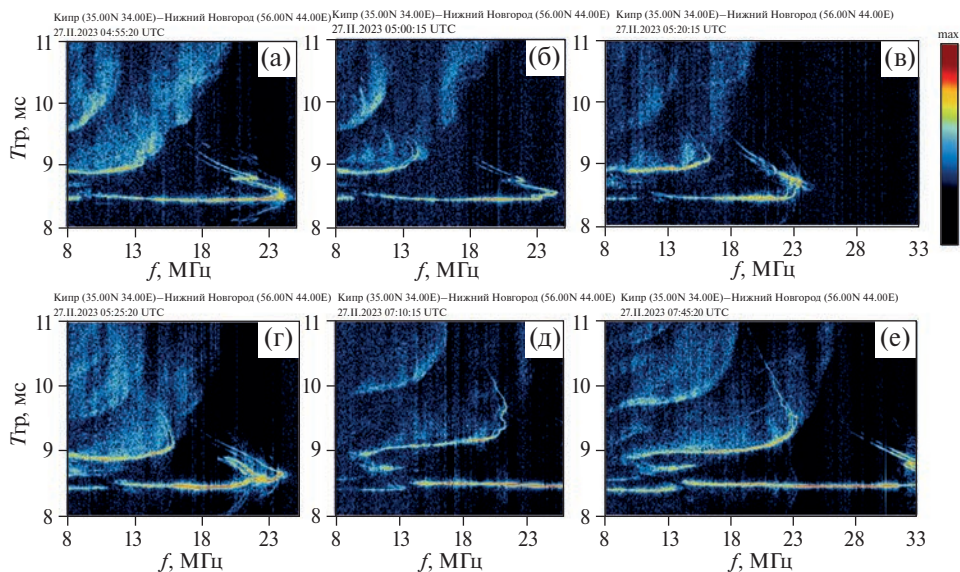


Рис. 6. Дистанционно-частотная характеристика ЛЧМ-сигнала на трассе зондирования Кипр – г. Нижний Новгород 27.11.2023: 04:55 (а), 05:00 (б), 05:20 (в), 12:00 (г), 05:25 (д), 07:10 (е).

Увеличение критических частот в середине месяца было вызвано радиальными КВМ 11.11.2023 в 04:24 UT, 12.11.2023 в 17:00 UT, 15.11.2023 в 00:24 UT, которые также были зафиксированы LASCO-C2 (<http://sidc.be/cactus>).

Повторное понижение критических частот по данным станции Варшава 24–25 февраля было связано с КВМ типа Гало 24.11.2023 в 20:36 UT и 25.11.2023 в 19:24 UT (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Увеличение скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра с 400 до 800 км/с

26 февраля (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) и КВМ 24.11.2023 в 20:36 UT и 25.11.2023 в 19:24 UT (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) привели к сильной магнитной буре, которая началась вечером 26.11.2023 и продолжалась 27.11.2023. При этом резко изменились критические частоты *F*-слоя ионосферы. По уточненным данным Каталога (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), это могло быть откликом на КВМ 27.11.2023, зарегистрированные на C2 в 01:48 и 10:24 UT.

На среднеширотную ионосферу центрального региона России магнитная буря 27.11.2023

оказала существенное влияние. По данным станции вертикального зондирования п. Васильсурск наблюдались сильные возмущения критических частот, диффузные отражения (*F*-spread), наличие множественных отражений. На рис. 5 приведены ионограммы, где в 12:00 UT (рис. 5а) наблюдался профиль невозмущенной ионосферы с критической частотой *F*-слоя около 9.5 МГц. Резкое изменение вида ионограмм началось в 12:45 UT. В 13:30 UT (рис. 5б) критическая частота *F*-слоя ионосферы уменьшилась до 6 МГц, наблюдалась сильная диффузность (до 3 баллов). В дальнейшем продолжалось уменьшение критической частоты *F*-слоя ионосферы, наблюдалось расслоение в области критических частот (рис. 5в–е), отраженный сигнал от слоев *E* и *F*₁ перестал регистрироваться. Только в 6:00 UT 28.II.2023 ионосфера полностью восстановилась. Необходимо отметить, что в ночь с 26.II.2023 на 27.II.2023 наблюдалась очень сильная диффузность *F*-слоя ионосферы.

Магнитная буря проявилась и на трассе ЛЧМ-зондирования Кипр – г. Нижний Новгород. На дистанционно-частотной характеристике ЛЧМ-сигнала наблюдались *z*-образные возмущения (следствие перемещающихся ионосферных возмущений (рис. 6а–г, е), диффузность, появился сильный *Es*-слой (рис. 6д, е). Наблюдалась сильная искажения треков отражения. Искаженными на дистанционно-частотной характеристике оказались треки не только одно-, но и двух-, трехкачковых трасс. Наблюдалось сильное возвратно-наклонное рассеяние.

МАРТ 2023 ГОДА

На рис. 7 приводятся графики $\Delta f_0 F2$ за март 2023 г. для данных станции Варшава, которые с учетом *Kp*- и *Dst*-индексов позволяют идентифицировать возможный источник влияния на критические частоты *F*-слоя ионосферы.

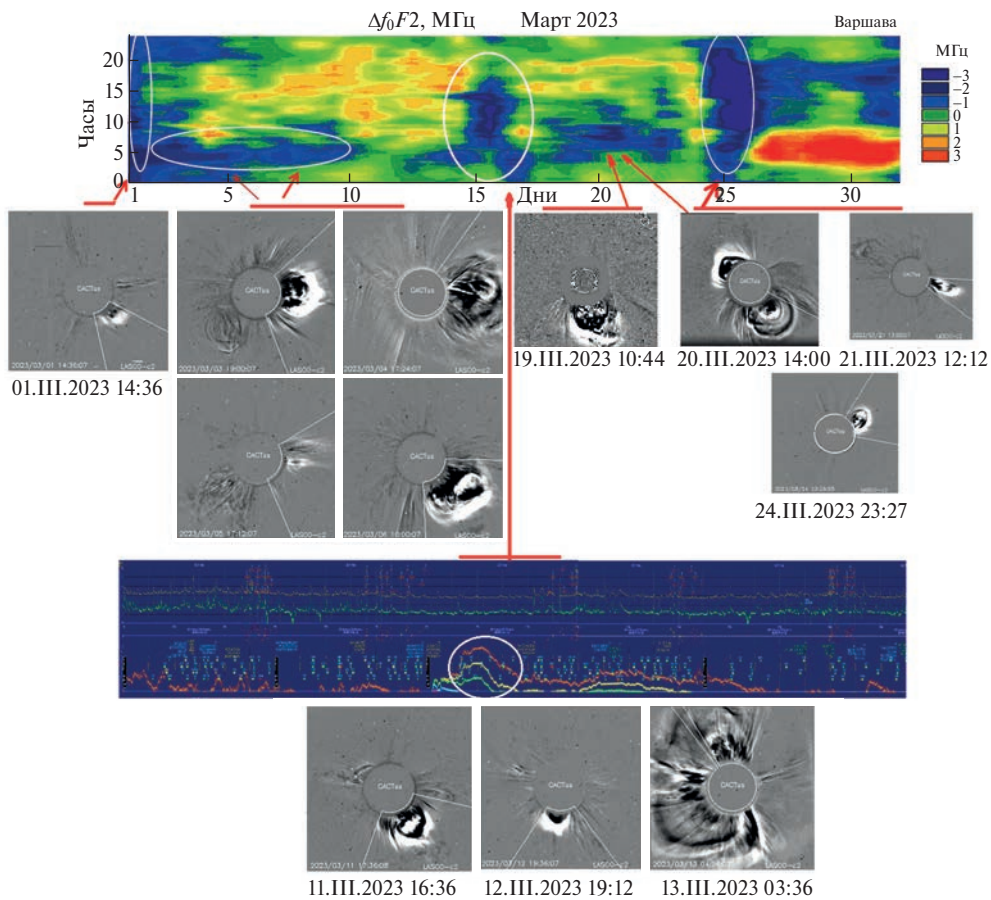


Рис. 7. Иллюстрация совместного анализа поведения индекса $\Delta f_0 F2$ по данным ионосферной станции Варшава и регистрации КВМ в марте 2023 г.

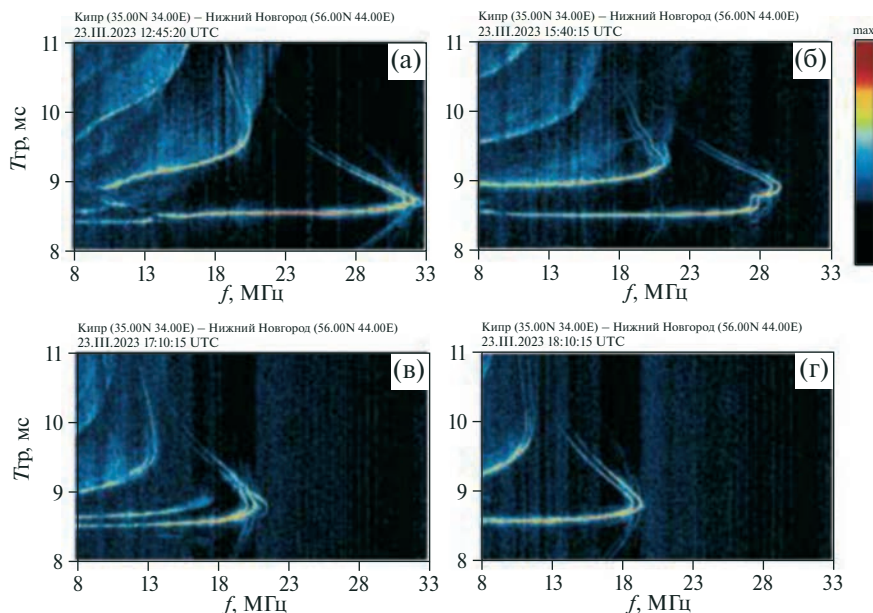
Кипр—Нижний Новгород
23.ИИ.2023

Рис. 8. Дистанционно-частотная характеристика ЛЧМ-сигнала на трассе зондирования Кипр – г. Нижний Новгород 23.ИИ.2023: 12:45 (а), 15:40 (б), 17:10 (в), 18:10 UT (г).

Понижение критических частот в начале месяца может быть следствием солнечной активности в конце февраля, в то же время и дополнительно отклик на КВМ 01.ИИ.2023. Длительное понижение критических частот 02–10.ИИ.2023 может быть откликом на КВМ 03–06.ИИ.2023 из АО на западном лимбе.

Особенность возникших 13–17.ИИ.2023 ионосферных возмущений – это то, что они совпадают с КВМ, зарегистрированным 13.ИИ.2023, очень большой мощности на обратной от Земли стороне Солнца, который стал и источником потока солнечных протонов. Подтверждением этому служит отсутствие солнечной вспышки, с которой можно ассоциировать начало события. Дополнительный вклад в возмущения ионосферы могут внести КВМ типа Гало 11–12.ИИ.2023 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Кратковременные возмущения ионосферы 20–21 марта, скорее всего, связаны с откликом на КВМ 19.ИИ.2023 и залимбового 20.ИИ.2023 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

Возмущения в ионосфере 24–25.ИИ.2023 вызываются КВМ на обратной от Земли стороне Солнца, в этот период солнечных вспышек не было зарегистрировано. Отклик наблюдается с большой задержкой, поскольку КВМ идет из-за лимба (20.ИИ.2023 типа Гало, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

[gov/CME_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)). В то же время дополнительный вклад в реакцию ионосферы могут внести КВМ 21–24.ИИ.2023 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/).

На рис. 8 приведены дистанционно-частотные характеристики ЛЧМ-сигнала на трассе ЛЧМ-зондирования Кипр – г. Нижний Новгород, полученные 23.ИИ.2023. Дистанционно-частотные характеристики, полученные в 15:40 и 17:10 UT, свидетельствуют о сильной возмущенности ионосферы. Присутствуют сильные искажения формы треков одно- и двухскачковых трасс. Явно присутствуют z -образные возмущения (рис. 8б, в). Дистанционно-частотные характеристики, полученные в 12:45 и 18:10 UT, свидетельствуют об отсутствии сильных возмущений в ионосфере в области отражения. Сравнивая реакцию ионосферы на геомагнитные возмущения 26–27 февраля и 23 марта 2023 г., необходимо отметить, что первые проявились значительно сильнее.

Сравнивая рис. 2а–в и рис. 3а–в, можно заметить, что вариации критических частот ионосферы по данным станций, расположенных близко к одной долготе, сильно отличаются. Наиболее слабо они проявляются для низкоширотной ионосферы и сильно (до ± 3 МГц) – для высокоширотной. Не получилось идентифицировать источник возмущения 26–31.ИИ.2023 для станции Варшава (на рис. 3б. выделено красным цветом). По нашему

мнению, это результат неправильного определения критической частоты при использовании компьютерной обработки ионосферных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований степени ионосферных возмущений в зависимости от кратковременных вариаций солнечной активности (регистрации КВМ и высокоскоростных потоков солнечного ветра) по результатам вертикального и наклонного зондирования ионосферы в феврале и марте 2023 г. и использования нового ионосферного индекса подтверждено наличие закономерности во влиянии КВМ на параметры ионосферы: наблюдается продолжительное снижение значений $\Delta f_0 F_2$ после начала КВМ (типа петля), тогда как после обнаружения других типов КВМ значительных изменений не наблюдается. Отмечена возможная роль высокоскоростных потоков солнечного ветра и энергичных протонов в возникновении ионосферных возмущений.

Приведены ионограммы станции п. Васильсурск вертикального зондирования ионосферы, где отмечалось сильное поглощение отраженного сигнала во время геомагнитной бури в феврале 2023 г. На дистанционно-частотных характеристиках трассы Кипр – Нижний Новгород во время геомагнитных возмущений в феврале – марте 2023 г. наблюдались искажения формы F -слоя ионосферы, отмечалось регулярное появление z -образных волновых возмущений, распространявшихся в область меньших высот.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FSWR-2023-0038.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. 2022. Т. 62. № 2. С. 245–256. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020110>

2. Фабрицио Д.А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. Москва: Техносфера, 2018. 936 с. (*Fabrizio Giuseppe Aureliano*. High frequency over the horizon radar: fundamental principles, signal processing and practical applications. New York: McGraw-Hill Education, 2013.)
3. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавропольной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 2. С. 83–94. https://doi.org/10.52452/00213462_2021_64_02_83 (Uryadov V.P., Vybornov F.I., Pershin A.V. Variations of the Frequency Range of HF Signals on the Subauroral Path During Magnetic-Ionospheric Disturbances in October 2016. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2021. V. 64. Iss. 2. P. 77–87. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10113-8>.)
4. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск: ИГУ, 2014. 349 с.
5. Афраймович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В. и др. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением Солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. // Косм. исслед. 2009. Т. 47. № 2. С. 146–157.
6. Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В. и др. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури // Геомагнетизм и аэронавигация. 2020. Т. 60. № 6. С. 769–782. <https://doi.org/10.31857/S0016794020060152>
7. Жеребцов Г.А., Shi Jiankui, Перевалова Н.П. и др. Ионосферные возмущения в Восточно-Азиатском регионе. Москва: ГЕОС, 2021. 338 с. <https://doi.org/10.34756/GOES.2021.16.37867>
8. Balan N., Alleyne H., Walker S. et al. Magnetosphere-ionosphere coupling during the CME events of 07–12 November 2004 // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2008. V. 70. Iss. 17. P. 2101–2111.
9. Berényi K.A., Barta V., Kis Á. Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events – caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study // Adv. Space Res. 2018. V. 61. Iss. 5. P. 1230–1243. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.021>
10. Burns A.G., Solomon S.C., Wang W. et al. The ionospheric and thermospheric response to CMEs: Challenges and successes // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 77–85.
11. Qiu N., Chen Y.H., Wang W.B. et al. Statistical analysis of the ionosphere response to the CIR and CME in

- Mid-latitude regions // Chinese J. Geophysics- Chinese Edition. 2015. V. 58. Iss. 7. P. 2250–2262.
12. Рубцов А.В., Малецкий Б.М., Данильчук Е.И. и др. Возмущения ионосферы над Восточной Сибирью во время геомагнитных бурь 12–15 апреля 2016 г. // Солнечно-земная физика. 2020. № 1. С. 75–85.
 13. Sheiner O.A., Fridman V.M., Krupenya N.D. et al. Effect of solar activity on the Earth' environment // Proc. Second Solar Cycle and Space Weather Euroconference. ESA SP-477. 24–29 September 2001. Vico Equense, Italy. Huguetta Sawaya-Lacoste (ed.). 2002. P. 479–481.
 14. Vybornov F.I., Sheiner O.A. Coronal mass ejections and high-speed solar wind streams effect on HF ionospheric communication channel // J. Physics: Conf. Series. 2021. V. 2131. Iss. 5. Art.ID. 052096. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052096>
 15. Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Выборнов Ф.И. Пассивная загоризонтная КВ-радиолокация с использованием ЛЧМ-ионозондов различной конфигурации для обнаружения и позиционирования ионосферных неоднородностей // Научные технологии. 2022. Т. 23. № 5. С. 25–33. <https://doi.org/10.18127/j19998465-202205-04>
 16. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V. et al. New Ionospheric Index for Space Weather Services // Advances in Space Research. 2020. V. 66. Iss. 6. P. 1415–1426. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.022>

УДК 537.591.5

ПОТОКИ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ 13–23 МАРТА 2023 ГОДА

© 2024 г. Н. А. Власова^{1, *}, Г. А. Базилевская², Е. А. Гинзбург³, Е. И. Дайбог¹,
В. В. Калегаяев^{1, 4}, К. Б. Капорцева^{1, 4}, Ю. И. Логачев¹, И. Н. Мягкова¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва, Россия

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 18.08.2023 г.

После доработки 04.10.2023 г.

Принята к публикации 04.10.2023 г.

Представлены результаты исследования потоков солнечных протонов с энергией больше 5 МэВ в околоземном космическом пространстве 13–23.III.2023. Особенности исследуемого периода являются отсутствие наблюдаемой солнечной вспышки, с которой можно ассоциировать начало события, нехарактерный временной профиль потоков протонов, а также большая длительность существования потоков солнечных протонов в околоземном пространстве. Предпринята попытка объяснить источники наблюдаемых вариаций потоков частиц и понять, что происходило на Солнце и в окружающем Землю пространстве. Источником солнечных протонов 13.III.2023 был взрывной процесс на обратной от Земли стороне Солнца, зарегистрированный как корональный выброс массы очень большой мощности. Причиной длительного и сложного временного профиля солнечных протонов был вклад процессов ускорения частиц на Солнце и в межпланетной среде, а также модуляция потоков частиц структурами межпланетного магнитного поля. Предложен возможный сценарий, объясняющий существование повышенных потоков солнечных частиц 15–23.III.2023: формирование гелиосферной структуры – замкнутой области-ловушки, образованной двумя межпланетными корональными выбросами массы и областями взаимодействия высокоскоростных и медленных потоков солнечного ветра. В работе использованы экспериментальные данные, полученные с космического аппарата *Solar Orbiter* и с космических аппаратов, расположенных вблизи точки *L1* системы Земля – Солнце (*ACE* и *DSCOVR*) и на геостационарной орбите (*GOES-16*).

DOI: 10.31857/S0023420624020045, EDN: kzjhop

ВВЕДЕНИЕ

Одним из проявлений солнечной активности является взрывной процесс в атмосфере Солнца, двумя сторонами которого являются вспышка и корональный выброс массы (КВМ). Долгое время только солнечные вспышки считались источником энергичных частиц [1], но по мере исследования КВМ стали появляться экспериментальные и теоретические доказательства ускорения солнечных частиц ударными волнами, являющимися неотъемлемой составляющей при зарождении и дальнейшем распространении КВМ [2]. Наиболее признанная точка зрения состоит в том, что солнечные энергичные частицы ускоряются и в области

солнечной вспышки, и на ударных волнах, ассоциированных с КВМ [3].

В области вспышки заряженные частицы могут ускоряться несколькими механизмами, главные из которых – ускорение при магнитном пересоединении, стохастическое ускорение и ускорение на ударных волнах [4, 5]. Ускорению частиц на ударных волнах, связанных с КВМ, посвящен обзор [6].

Модели, предполагающие возможность накопления частиц в короне и их диффузию, были предложены в работах [7–10]. Корональное распространение ускоренных частиц получило подтверждение из наблюдений в ранних

работах [11, 12] и многих других, вплоть до измерений на космическом аппарате (КА) *Parker Solar Probe*, находящемся 04.IV.2019 на расстоянии 0.17 а.е. от Солнца и зарегистрировавшем потоки энергичных частиц из активной области, расположенной на 80° восточнее области на Солнце, связанной с КА силовыми линиями магнитного поля [13]. В последние годы найдены доказательства ускорения частиц корональными ударными волнами и построены модели, учитывающие ускорение частиц в короне Солнца и в межпланетной среде, связанное с КВМ [14, 15]. В работе [16] описывается формирование большой магнитной полости, ограниченной токовыми слоями, в результате взаимодействия потоков солнечного ветра и/или потока солнечного ветра с гелиосферным токовым слоем. В магнитных полостях, в свою очередь, возникают динамические мелкомасштабные магнитные острова, в которых может происходить ускорение частиц.

Главным фактором, определяющим условия для распространения солнечных энергичных заряженных частиц в межпланетной среде, является межпланетное магнитное поле (ММП) [17]. В спокойном солнечном ветре энергичные частицы распространяются в основном вдоль силовых линий и демонстрируют гладкий временной профиль потоков частиц. Возмущения солнечного ветра, в том числе так называемые межпланетные КВМ (МКВМ), меняют структуру ММП, что отражается на временных профилях потоков солнечных энергичных частиц. Основные особенности временных профилей частиц, возникающие при распространении ударных волн в межпланетной среде, описаны в работе [18].

Результаты анализа наблюдаемых временных профилей потоков частиц, которые отличаются большим разнообразием, представляют ценный материал для понимания процессов, происходящих в межпланетной среде. Для исследования статистических закономерностей, выделения типичных и экстремальных характеристик создаются каталоги солнечных протонных событий (СПС), основным достоинством которых является многолетний однородный ряд экспериментальных данных [19]. Особенности же отдельного события отражают и конкретные параметры источника, и конкретные условия распространения в неоднородной и нестационарной межпланетной среде. Цель данной работы — объяснить наличие в околоземном пространстве потоков солнечных энергичных протонов в течение длительного периода 13–23.III.2023, а также

особенности их временных профилей на основе результатов сравнительного анализа экспериментальных данных по потокам частиц и измерений параметров солнечного ветра и ММП.

ИСТОЧНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследование динамики потоков солнечных протонов 13–23.III.2023 выполнены на основе экспериментальных данных, полученных с КА, расположенных в межпланетном пространстве (КА *ACE* и *Solar Orbiter*) и в магнитосфере Земли (искусственный спутник Земли (ИСЗ) *GOES-16*). КА *ACE* расположен в точке либрации *L1* (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). КА *Solar Orbiter* в исследуемый период был расположен на расстоянии 0.61 а.е. от Солнца, а область на Солнце, связанная с КА силовыми линиями магнитного поля при скорости солнечного ветра 400 км/с, находится примерно на 60° восточнее, чем соответствующая область для Земли (<https://solar-mach.github.io/>). В статье представлен рисунок по данным с КА *Solar Orbiter* с прибора ЕРТ [20]. ИСЗ *GOES-16* — геостационарный спутник Земли. В работе использованы экспериментальные данные по потокам солнечных протонов с энергией >5 , >10 , >30 , >60 и >100 МэВ, полученные с прибора *Solar and Galactic Proton Sensor* (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes-r.html>).

Экспериментальные данные о параметрах солнечного ветра и ММП получены с КА *DISCOVER*, расположенного в точке либрации *L1* (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Используются данные о параметрах КВМ, полученные с коронографа *LASCO/C2* на КА *SOHO* (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), а также результаты расчета времен прихода ударных волн КВМ в околоземное космическое пространство (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>). Информация по параметрам солнечных вспышек получена на сайте <https://www.solarmonitor.org/>.

Большинство рисунков данной статьи создано на сайте центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ, который обеспечивает доступ к оперативным данным космических экспериментов и моделям оперативного прогнозирования явлений космической погоды. На сайте ЦДОКМ в разделе «Космическая погода» (<https://swx.sinp.msu.ru/>) собраны данные, необходимые для оценки и анализа радиационной обстановки не только в околоземном космическом пространстве, но и межпланетной среде. Там же представлены

электронные интерактивные версии каталогов СПС 24-го и 25-го циклов солнечной активности и ссылки на печатные варианты каталогов СПС 20-го – 24-го циклов солнечной активности (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru). Усовершенствованные графические приложения дают возможность проводить сравнительный анализ как экспериментальных данных, так и результатов моделирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В период 13–23.III.2023 в гелиосфере наблюдались повышенные потоки энергичных солнечных протонов. На рис. 1 представлены временные профили потоков солнечных протонов с энергией ~ 6.649 МэВ по данным КА *Solar Orbiter* (а), с энергией >10 и >30 МэВ по данным КА *ACE* (б) и с энергиями >5 , >10 , >30 , >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ *GOES-16* (в) 11–24.III.2023. Аналогичный набор энергетических каналов по данным ИСЗ *GOES-16* будет использован на всех последующих рисунках данной статьи. Можно видеть, что и на КА *Solar Orbiter* (рис. 1а), который расположен в исследуемый период на 0.61 а.е. и имеет Кэррингтоновскую долготу на 26.6° меньше, чем у Земли, и на КА *ACE* (рис. 1б), расположенном в точке *L1*, и на ИСЗ *GOES-16* (рис. 1в) на геостационарной орбите наблюдаются повышенный поток частиц в течение длительного периода, а также нехарактерный для СПС временной профиль потоков частиц. Возрастание потоков солнечных протонов по данным КА *ACE* и ИСЗ *GOES-16* начинается 13.III.2023 и обрывается 23.III.2023. В табл. 1 представлены параметры основных солнечных вспышек и КВМ в исследуемый период, которые будут использованы в данной работе. Все солнечные вспышки, внесенные в табл. 1, имели длительность существенно больше 10 мин, а в работе [21] показано, что в таких продолженных вспышках происходит стохастическое ускорение частиц. Для проведения подробного исследования особенностей динамики потоков солнечных протонов в точке *L1* и в околоземном космическом пространстве и поиска источников наблюдаемых вариаций период разделен на две части: 13–15.III.2023 и 15–23.III.2023 (рис. 1).

Рассмотрим динамику потоков солнечных протонов в околоземном пространстве 13–15.III.2023. Временные профили потоков частиц по данным ИСЗ *GOES-16* и некоторых важных для исследования параметров 12–15.III.2023

представлены на рис. 2. Начало возрастания потоков протонов с энергией >100 МэВ зарегистрировано в 04:30 UT 13.III.2023. Солнечных вспышек непосредственно перед возрастанием потоков частиц не наблюдалось (рис. 2а), но было зарегистрировано гало от КВМ на обратной стороне Солнца. КВМ классифицируется как редкое. Модель *NASA* (<https://blogs.nasa.gov/sunspot/2023/03/14/a-powerful-solar-eruption-on-far-side-of-sun-still-impacted-earth/>) показывает, что движение КВМ направлено от Земли. Изображения КВМ, полученные на КА *SOHO*, показали наличие ускоренных энергичных частиц, которые могли быть зарегистрированы на ИСЗ *GOES-16*. Можно предположить, что источником первых потоков энергичных частиц в околоземном пространстве 13.III.2023 был взрывной процесс на обратной к Земле стороне Солнца в 03:36 UT, КВМ от которого был зарегистрирован, а рентгеновского излучения от соответствующей ему вспышки обнаружено не было. Начало роста потоков протонов с энергией >100 МэВ по данным ИСЗ *GOES-16* зарегистрировано

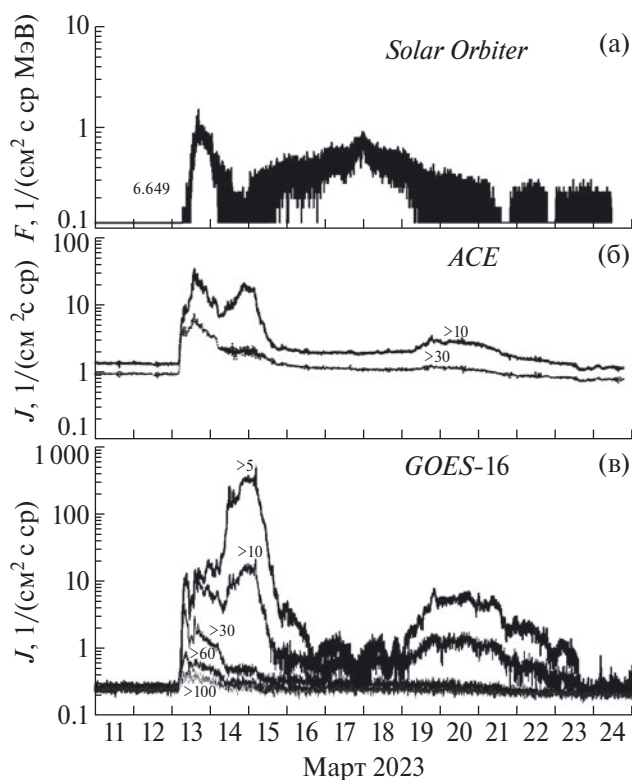


Рис. 1. Временные профили потоков солнечных протонов по данным КА *Solar Orbiter* (а), по данным КА *ACE* (б) и по данным ИСЗ *GOES-16* (в) 11–24.III.2023. Цифры рядом с кривыми — энергия солнечных протонов в МэВ.

Таблица 1. Параметры солнечных вспышек, КВМ и активных областей на Солнце и время прихода ударных волн КВМ к Земле

Солнечные вспышки				Корональные выбросы массы						Активная область	Время прихода ударных волн в околоземное космическое пространство, дата и UT ⁵
Дата	UT	Координаты	Балл	Координаты ¹	Дата	UT	V км/с ²	$\Delta\phi$, град. ³	PA , град. ⁴		
				S25W30	10.III.2023	13:36	750	302	214		14.III.2023 03:58
				N05W60	10.III.2023	17:24	461	211	263		
				S30W45	11.III.2023	16:36	684	360	Halo		
				S20E25	12.III.2023	19:12	649	360	Halo		15.III.2023 03:48
					13.III.2023	03:36	1699	360	Halo		
13.III.2023	09:50	N27E07	C3.1		13.III.2023	10:36	1015	360	Halo		15.III.2023 03:48
14.III.2023	05:52	S20W11	C3.0							13250	
14.III.2023	11:00	S24W30	C2.9							13254	
17.III.2023	06:12	S20E87	C6.4		17.III.2023	10:58	675	114	207	13256	
	06:45	S19E83	C6.4								
17.III.2023	12:58	S22W64	C7.3		17.III.2023	13:11	204	025	116	13254	
17.III.2023	15:04	S22W66	M1							13254	
18.III.2023	00:27	S19E72	C3.8							13256	
18.III.2023	07:10	S19E70	C9.4		18.III.2023	07:29	763	104	062	13256	
20.III.2023	00:57	S20E57	C4.1							13259	
20.III.2023	01:19	S21E37	M1.3		20.III.2023	02:41	424	086	214	13259	23.III.2023 09:10
20.III.2023	14:07	N18E18	C4.4		20.III.2023	14:42	727	360	Halo	13258	23.III.2023 09:10

Примечание. ¹ Гелиокоординаты КВМ определены по положению на Солнце диммингов (<https://www.sidc.be/solardemon/>).

² Медианное (начальное) значение скорости (V , км/с) радиального распространения КВМ при движении в поле зрения коронографа. ³ $\Delta\phi$ – угловой раcтвор (угловая ширина) КВМ вблизи Солнца. ⁴ PA – позиционный угол первого появления КВМ. ⁵ Время прихода ударной волны в околоземное космическое пространство (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>).

в ~04.30 UT, т.е. примерно через 1 ч после регистрации КВМ.

13.III.2023 в 09:50 UT произошла солнечная вспышка класса C3.1 (рис. 2а), имеющая гелиокоординаты N27E07. Длительность вспышки 1.5 ч. Вспышка сопровождалась КВМ со скоростью 1015 км/с, приход которого был зарегистрирован в околоземном пространстве 15.III.2023 (табл. 1). Это солнечное взрывное событие могло внести вклад в поток солнечных протонов. Солнечные вспышки рентгеновского класса C3 и C2.9 14.III.2023 (рис. 2а и табл. 1), расположенные на неоптимальных для прихода к Земле долготам, могли также внести, вероятно, небольшой вклад в наблюдаемый поток протонов (рис. 2б). Например, СПС 18.IX.2012 и 16.III.2016 в 24-м цикле солнечной активности ассоциировались с солнечными вспышками C3.7 и C2.2

соответственно [19]. Источниками довольно большого количества СПС 25-го цикла солнечной активности также считаются вспышки класса C (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru).

По данным сайта CME Scoreboard Общественно-координируемого центра моделирования (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>) к Земле пришли две ударные волны МКВМ: 14.III.2023 в 03:58 UT и 15.III.2023 в 03:48 UT (табл. 1). Источником МКВМ 14.III.2023 могли быть несколько КВМ зарегистрированных в коронографе 10–11.III.2023. Источником МКВМ 15.III.2023 могли быть два КВМ, зарегистрированные в коронографе 12.III.2023 (19:12 UT) и 13.III.2023 (10:36 UT). В обоих случаях, вероятно, произошло взаимодействие КВМ в гелиосфере, когда КВМ с большей скоростью догоняет

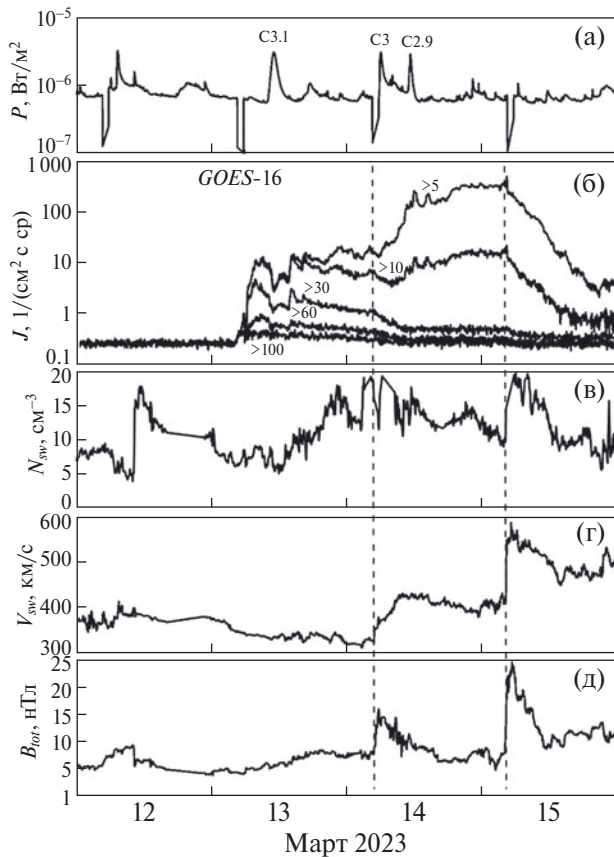


Рис. 2. Временные профили плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0.1–0.8 нм и указанием балла вспышки (а) и потоков солнечных протонов с энергией >5, >10, >30, >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ GOES-16 (б), плотности (в) и скорости (г) солнечного ветра и модуля величины ММП (д) по данным КА DISCOVER 12–15.III.2023.

ранее ушедший КВМ. Моменты прихода ударных волн показаны вертикальными пунктирными линиями на рис. 2. На рис. 2в–д можно видеть, что в указанные моменты времени плотность и скорость солнечного ветра и величина магнитного поля терпят резкие изменения. Потоки протонов с энергиями >5 и >10 МэВ в интервале между двумя ударными волнами увеличиваются, в то время как поток более энергичных частиц (>30 МэВ) уменьшается до фонового уровня (рис. 2б). Изломы на профилях потоков частиц: с энергиями >5 и >10 МэВ в сторону увеличения, а с энергиями >30 и >60 МэВ в сторону уменьшения – могут означать приход области с сильным магнитным полем, препятствующим внешним частицам и принесшим частицы меньших энергий. Можно предположить, что наблюдаются ускоренные ударными волнами потоки протонов с энергией

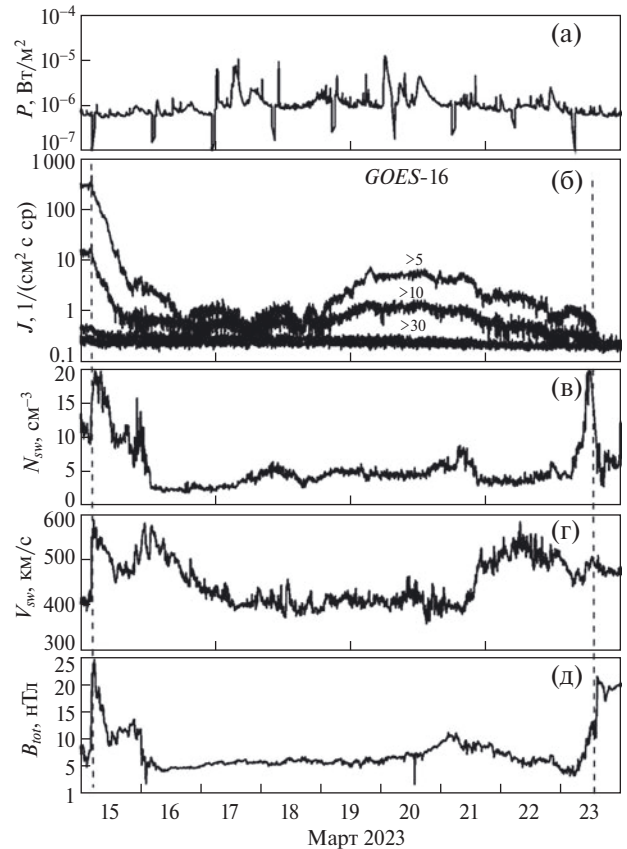


Рис. 3. Временные профили плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0.1–0.8 нм (а) и потоков солнечных протонов по данным ИСЗ GOES-16 (б), плотности (в) и скорости (г) модуля величины ММП (д) по данным КА DISCOVER 15–23.III.2023.

<30 МэВ – энергичные штормовые частицы, примерно аналогично тому, что описано в работе [22].

Рассмотрим динамику потоков солнечных протонов в околоземном пространстве 15–23.III.2023. Временные профили потоков частиц по данным ИСЗ GOES-16 и некоторых важных для исследования параметров представлены на рис. 3. Наблюдаются потоки протонов с энергиями <30 МэВ (рис. 3б). Вертикальными пунктирными линиями на рис. 3 показаны моменты прихода ударных волн (<https://kuaui.csdc.gsfc.nasa.gov/CMEScoreboard/>). Максимум потоков протонов в начале 15.III.2023 мы считаем связанным с ударной волной, пришедшей в 03:48 UT. В период 15–23.III.2023 наблюдалось несколько солнечных вспышек (рис. 3а и табл. 1), которые могли внести вклад в поток солнечных протонов в межпланетной среде.

Можно видеть, что вариации плотности и скорости солнечного ветра (рис. 3в, г) и модуля величины ММП (рис. 3д) свидетельствуют о приходе к Земле ударных волн МКВМ: 15.ИИ.2023 в 03:48 UT и 23.ИИ.2023 в 09:10 UT (табл. 1). Нужно отметить, что МКВМ 15 и 23.ИИ.2023 – это совокупный эффект двух КВМ, догоняющих друг друга: МКВМ 15.ИИ.2023 – КВМ 12.ИИ.2023 в 19:12 UT и 13.ИИ.2023 в 10:36 UT; МКВМ 23.ИИ.2023 – КВМ 20.ИИ.2023 в 02:41 UT и в 14:42 UT (табл. 1). Величина ММП превышает 20 нТл, что более чем в 4 раза превышает величину среднего ММП на 1 а.е. Важно отметить, что потоки солнечных протонов уменьшаются до фонового уровня 23.ИИ.2023 после прохождения фронта ударной волны и одновременного пересечения гелиосферного токового слоя.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью исследуемого периода повышенных потоков солнечных протонов 13–23.ИИ.2023 является начало их возрастания 13.ИИ.2023 без наблюдаемой солнечной вспышки, с которой это событие могло бы быть ассоциировано, но на обратной от Земли поверхности Солнца был зарегистрирован очень сильный КВМ. Скорость солнечного ветра во время прихода первых частиц составляла ~ 350 км/с (рис. 2г) – это медленный солнечный ветер, распространяющийся от Солнца радиально и дошедший до околоземного космического пространства за ~ 5 сут. Следовательно, источник силовых линий магнитного поля, вытянутых этим солнечным ветром, 13.ИИ.2023 мог находиться на гелиодолготе $\sim W65$, и быстрый приход частиц от залимбовой вспышки является неожиданностью.

В работе [23] предложена модель долгого коронального распространения частиц, позволяющая объяснить быстрый приход частиц в широком (~ 30 – 50°) диапазоне долгот хаотичным движением частиц поперек магнитного поля, вследствие рассеяния на турбулентных неоднородностях в потоке плазмы. В работе [24] показано, что во время солнечных вспышек наблюдается усиление глобальных высокочастотных волн на Солнце, причем более интенсивное, чем от других источников. Мощные и регистрируемые в широком диапазоне долгот СПС часто ассоциируются с быстрыми и объемными КВМ, производящими корональные и межпланетные ударные волны [25]. В некоторых событиях наблюдаются распространяющиеся над солнечной

поверхностью глобальные волны, что дает возможность предполагать, что ударные волны могут охватывать всю поверхность Солнца, способствуя и долгому переносу энергичных частиц [26]. 13.ИИ.2023 наблюдался КВМ редкой мощности. Таким образом, потоки солнечных протонов в этот день можно объяснить корональным распространением частиц от взрывного процесса на обратной от Земли стороне Солнца, зарегистрированного в 03:36 UT.

В статье о КВМ 13.ИИ.2023 в 03:36 UT на сайте НАСА (<https://blogs.nasa.gov/sunspot/2023/03/14/a-powerful-solar-eruption-on-far-side-of-sun-still-impacted-earth/>) высказано предположение, что КВМ произошел в активной области 13234. 03.ИИ.2023 в 17:39 UT в активной области 13234 произошла солнечная вспышка рентгеновского класса X2.1 с гелиокоординатами N21W76 (<https://www.solarmonitor.org/>). Через 9.4 дня активная область 13234 переместилась по долготе на $\sim 125^\circ$, т.е. находилась на расстоянии $\sim 69^\circ$ от восточного лимба Солнца на противоположной от Земли стороне Солнца. Таким образом, солнечные частицы должны были преодолеть по короне Солнца расстояние по долготе 134 и/или 226° .

Проведена оценка времени выхода солнечных частиц из Солнца в межпланетную среду. В событии 13.ИИ.2023 частицы разных энергий достигли Земли в разное время, т.е. наблюдается прямой приход частиц от источника. Определены моменты первого прихода потоков солнечных частиц (указаны стрелками на рис. 4а–в). Предполагая, что они прошли одинаковое расстояние S , можем представить время прихода частиц как $t = S/v$, где v – скорость частицы. На рис. 4г зависимость представлена для протонов с энергией >10 , >60 и >100 МэВ по данным ИСЗ GOES-16 и для электронов с энергиями 0.038–0.053, 0.053–0.103, 0.103–0.175 и 0.175–0.315 МэВ по данным КА ACE. Для интегральных каналов взята пороговая энергия, для протонов с энергиями >10 и >60 МэВ учтен вклад каналов с большей энергией. Для удобства вычислений скорость (v) дана в долях скорости света (c), время – в часах 13.ИИ.2023. Полученная зависимость может быть аппроксимирована линейной функцией $t = 0.2125c/v + 4.0489$ с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.9418$. Экстраполяция полученной зависимости к $c/v = 0$ дает время выхода частиц из источника – 04:03 UT. Если предположить, что рождение частиц на Солнце произошло одновременно с зарегистрированным КВМ в 03:36 UT, то ≥ 30 мин длился процесс распространения частиц по короне Солнца.

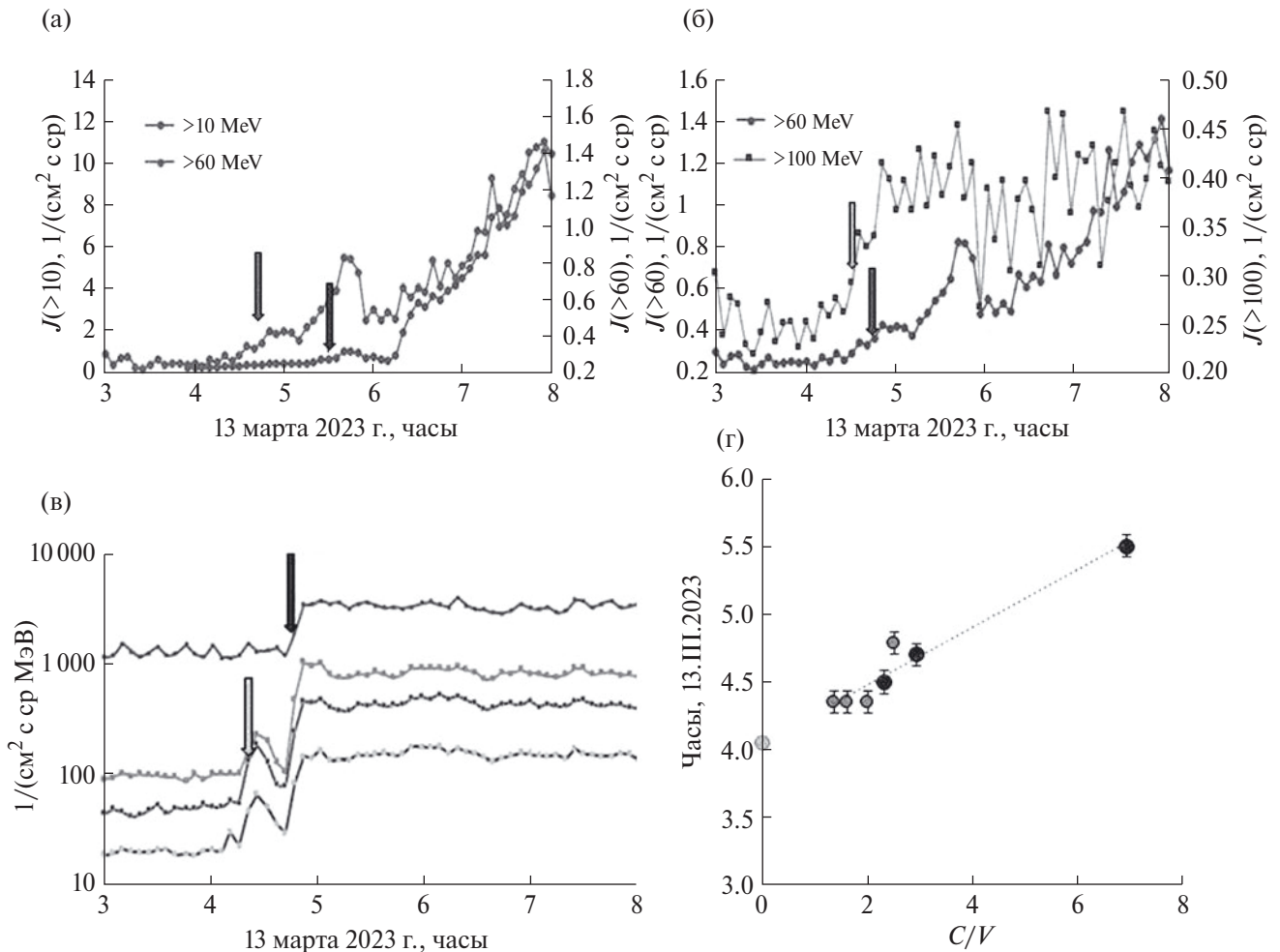


Рис. 4. Временные профили потоков протонов с энергией >10 и >60 МэВ (а), >60 и >100 МэВ (б) по данным ИСЗ *GOES-16* и потоков электронов с энергиями $0.038-0.053$, $0.053-0.103$, $0.103-0.175$ и $0.175-0.315$ МэВ (в) по данным КА *ACE* 13. III. 2023 (стрелками указаны моменты первого прихода частиц). Зависимость (г) времени прихода частиц в околоземное пространство от скорости частиц (протоны – темные значки, электроны – более светлые). Значок на оси Y – экстраполяция полученной зависимости для оценки момента выхода частиц из Солнца в межпланетную среду.

14–15. III. 2023 наблюдается возрастание потоков протонов с энергией <30 МэВ. Возрастание потоков солнечных энергичных частиц вблизи фронта ударной волны, инициированной КВМ, интерпретируют как результат процесса ускорения частиц (быстрые штормовые частицы, англ. *Energetic Storm Particles*) ударной волной [27]. Временной профиль потоков протонов 14–15. III. 2023 с увеличением потока протонов до и уменьшением потока после ударной волны, пришедшей к Земле 15. III. 2023 в 03:48 UT, свидетельствует об ускорении частиц на фронте именно этой волны (рис. 2).

Начиная со второй половины 15. III. 2023 потоки протонов с энергией ниже 30 МэВ не уменьшались вплоть до 23. III. 2023 и даже

демонстрировали небольшое увеличение 18–22. III. 2023, после чего произошел довольно быстрый спад потоков частиц. Мы наблюдали необычное явление, которое может быть объяснено только при некоторых предположениях.

Ранее в публикациях были предложены различные механизмы переноса энергичных частиц в структурах, сформировавшихся в гелиосфере. Эмпирическая “отражательная модель” предполагает захват и перенос частиц в полупрозрачных магнитных ловушках, образованных силовыми линиями ММП, вытянутыми от Солнца [9, 10]. В работе [28] существование вариаций потоков юпитерианских электронов вблизи Земли объясняется, в частности, пребыванием электронов в магнитных ловушках, имеющих форму

замкнутых магнитных структур, возникающих при взаимодействии разнородных потоков солнечного ветра (англ. Stream Interaction Region, SIR). Если эти структуры существуют длительное время, вращаясь вместе с Солнцем, то возникают корототирующие области взаимодействия (англ. Corotating Interaction Regions, CIR), которые могут оказывать влияние на динамику солнечных энергичных частиц [29, 31]. Существование в пространстве нескольких областей взаимодействия (SIR) или корототирующих областей взаимодействия (CIR), их взаимодействие друг с другом и с МКВМ приводят к образованию слившихся областей взаимодействия (англ. Merged Interaction Regions, MIR) [32], содержащих усиленное магнитное поле. Обычно такие области образуются на нескольких а.е. за орбитой Земли, но существуют свидетельства формирования слившихся областей взаимодействия и на расстояниях до 1 а.е. [33].

В работах [6, 18] подробно обсуждаются “резервуары” – обширные области пространства за распространяющимся ударным фронтом, содержащие захваченные частицы (рис. 5 в работе [6]). Резервуар располагается между ударным фронтом и Солнцем. Согласно [6], захват частиц в резервуар является результатом взаимодействия ускоренных на ударном фронте частиц с альфвеновской и/или гидромагнитной волновой активностью, сопровождающей ударный фронт. Внутри резервуара потоки частиц однородны, размеры резервуара могут составлять несколько астрономических единиц по радиусу и несколько десятков градусов по долготе. Границы резервуара могут частично совпадать с границами магнитного облака. Однако ни резервуар, ни магнитное облако не являются замкнутой ловушкой заряженных частиц. Фактически в работах [6, 18] они привлекаются для описания монотонного спада временного профиля потока частиц в постепенных событиях солнечных энергичных частиц, который другими авторами обычно приписывается их диффузионному распространению в пространстве. Для поддержания постоянных потоков частиц и образования замкнутой области на открытой границе резервуара должны были сформироваться области усиленного магнитного поля, препятствующие уходу частиц.

Используя приведенные выше возможные геосферные структуры, можно предположить сценарий, объясняющий наблюдение повышенных потоков солнечных протонов с $E < 30$ МэВ 15–23.III.2023. Практическое постоянство потоков протонов на протяжении почти 8 сут.

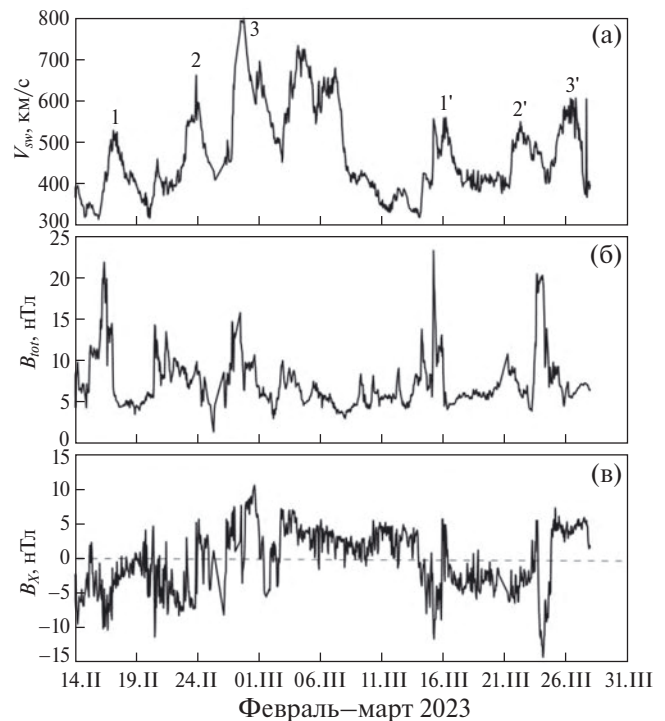


Рис. 5. Временные профили скорости солнечного ветра (а), модуля (б) и V_x -компоненты (в) ММП 14.II–27.III.2023. Цифры у кривых соответствуют номеру высокоскоростного потока.

означает, что область более 100° по долготе была равномерно населена протонами. В этой области и находилась Земля. Такая ситуация могла сложиться, если протоны были захвачены в замкнутой области-ловушке. Возникает вопрос, что создало границы этой области?

15–23.III.2023 зарегистрированы 2 прошедших мимо Земли МКВМ: 15 и 23.III.2023 (рис. 3). Каждый из МКВМ сформирован двумя КВМ, источниками которых являются взрывные процессы на восточной части диска Солнца, причем один в северной полусфере, а другой в южной (табл. 1). В результате могли сформироваться 2 мощных ударных фронта МКВМ с большими перепадами плотности и скорости солнечного ветра (рис. 3в, г) и очень сильными магнитными полями (рис. 3д). Экспериментальные данные, представленные на рис. 3, получены вблизи плоскости эклиптики, но можно предположить, что подобная картина наблюдается выше и ниже по широте, так как КВМ-источники на Солнце были разнесены по широтам. Можно предположить, что “резервуар” для

наблюдаемых 15–23.III.2023 солнечных протонов мог быть образован МКВМ, пришедшим к Земле 15.III.2023. Его ударный фронт являлся одной из границ (фронтальной границей) предполагаемой области-ловушки.

В феврале 2023 г. наблюдалось несколько высокоскоростных потоков солнечного ветра (рис. 5): скорость плазмы превышала 500 км/с 16–18 (№ 1), 23–25 (№ 2), 27–29.II.2023 (№ 3), причем в последнем случае скорость солнечного ветра достигла почти 800 км/с. В марте 2023 г. высокоскоростные потоки солнечного ветра 15–16 (№ 1'), 22–23 (№ 2') и 26–27.III.2023 (№ 3') были рекуррентными по отношению к соответствующим потокам в феврале 2023 г. На сайте ЦДОКМ (https://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1) можно видеть изображения корональных дыр на Солнце, ассоциированных с высокоскоростными потоками солнечного ветра. Каждый из высокоскоростных потоков сформировал область взаимодействия с предшествовавшим медленным солнечным ветром. Слившаяся область взаимодействия высокоскоростного потока № 1' и МКВМ, пришедшие к Земле 15.III.2023, могли сформировать западный край области-ловушки. Скорость солнечного ветра в потоке № 3 оставалась высокой в течение 13 дней (23.II–07.III.2023) и должна была сформироваться достаточно протяженная область взаимодействия потоков (SIR) с усиленным магнитным полем. Так как скорость потока 27–29.II.2023 (№ 3) была на ~200 км/с больше, чем потока 23–25.II.2023 (№ 2) (рис. 5а), то в результате за орбитой Земли могла образоваться и слившаяся область взаимодействия (MIR) также с усиленным магнитным полем. Мы полагаем, что существование в межпланетном пространстве 15–23.III.2023 нескольких областей взаимодействия с усиленным магнитным полем привело к образованию восточной границы области-ловушки, хотя это лишь качественная оценка. Поскольку эта область со временем расширялась, потоки частиц внутри нее должны были уменьшаться. Это не наблюдалось, а 19–23.III.2023 потоки частиц даже увеличились. Приходится допустить, что внутри области происходило ускорение протонов, источником которого были вспышки на Солнце (рис. 3а и табл. 1) и ударные волны за орбитой Земли, так как наблюдаемые вблизи Земли параметры межпланетной среды были в это время достаточно спокойными (рис. 3в–д).

Таким образом, по нашим предположениям, границами замкнутой области пространства

15–23.III.2023 с фронтальной стороны и частично с восточной был ударный фронт, который возник в результате взаимодействия КВМ 12 и 13.III.2023, а с восточной и западной сторон — области усиленного магнитного поля, образовавшиеся в результате взаимодействия быстрых и медленных потоков солнечного ветра. Ударный фронт МКВМ 23.III.2023 в 09:10 UT (рис. 3 и табл. 1) отрезал околоземное пространство от замкнутой области, и измеряемые потоки частиц вернулись к фоновому значению. В подтверждение представленному сценарию можно отметить, что 16–23.III.2023 Земля располагалась в одной части гелиосферы: 15 и 23.III.2023 наблюдались пересечения гелиосферного токового слоя (рис. 5в).

Следует подчеркнуть, что здесь представлено чисто качественное объяснение наблюдаемого временного профиля потоков протонов 15–23. III.2023, так как по имеющимся данным мы пока не можем восстановить реальную конфигурацию силовых линий ММП в это время. Для дальнейшего понимания происходивших процессов необходимо моделирование.

13–23. III.2023 в динамике потоков солнечных протонов наблюдается еще 2 интересных эффекта: 13. III.2023 в начале события существенно более сильные вариации потоков протонов, измеренные на геостационарной орбите, по сравнению с вариациями, одновременно измеренными в точке L1, и 16–19. III.2023 суточная модуляция потоков протонов с энергией >5 и >10 МэВ. Наблюдаемые особенности динамики потоков солнечных протонов связаны с процессами проникновения частиц в магнитосферу Земли. Это предмет дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование потоков солнечных протонов с энергией больше 5 МэВ в околоземном космическом пространстве 13–23. III.2023. Особенности исследуемого периода являются отсутствие наблюдаемой солнечной вспышки, с которой можно ассоциировать начало события, нехарактерный временной профиль потоков протонов, а также большая длительность существования потоков солнечных протонов в околоземном пространстве. Результаты сравнительного анализа динамики потоков солнечных протонов и вариаций параметров солнечного ветра и ММП дали возможность сделать следующие выводы:

- источником солнечных протонов 13. III.2023 был взрывной процесс на обратной от Земли

стороне Солнца, зарегистрированный как КВМ очень большой мощности, произошедший в 03:36 UT и не дошедший до околоземного космического пространства;

- приход солнечных протонов в околоземное пространство мог быть обусловлен распространением частиц в короне Солнца в течение ≥ 30 мин с последующим выходом в межпланетную среду на долготе $\sim W65$;

- причиной формирования 15.III.2023 максимума потоков частиц с энергией < 30 МэВ может быть ускорение частиц на ударной волне МКВМ, пришедшего к Земле в этот день в 03:48 UT (энергичные штормовые частицы);

- предложен возможный сценарий, объясняющий существование повышенных, почти постоянных потоков солнечных частиц 15–23.III.2023: образование гелиосферной замкнутой области-ловушки, сформированной двумя МКВМ и областями взаимодействия высокоскоростных и медленных потоков солнечного ветра.

Представленный сценарий является первым приближением к пониманию сложного комплекса событий на Солнце и в межпланетной среде в период 13–23.III.2023 г. В будущем этот период еще предстоит исследовать более детально.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны всем исследователям, представляющим через Интернет данные о потоках протонов, параметрах солнечного ветра и КВМ. Экспериментальные данные получены в Goddard Space Flight Center NASA: по солнечному ветру и ММП в OMNIWeb: High Resolution OMNI (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html); по потокам солнечных протонов в CDAWeb: the Coordinated Data Analysis Web (<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>). Информация по солнечным вспышкам и КВМ получена в Coordinated Data Analysis Workshops (CDAW) (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov>), SOHO LASCO CME CATALOG (<http://sidc.oma.be/cactus/catalog.php>). Времена прихода ударных волн КВМ получены на сайте (<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/CMEscoreboard/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meyer P., Parker E.N., Simson J.A. Solar Cosmic Rays of February, 1956 and Their Propagation through Interplanetary Space // *Physical Review*. 1956. V. 104. Iss. 3. P. 768–783. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.104.768>
2. Reames D.V. Solar energetic particles: A paradigm shift // *Reviews of Geophysics, Supplement*. 1995. P. 585–589. <https://doi.org/10.1029/95RG00188>
3. Bazilevskaya G.A. Once again about origin of the solar cosmic rays // *J. Physics: Conf. Series*. 2017. V. 798. Art. ID. 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/798/1/012034>
4. Klein K.-L., Dalla S. Acceleration and Propagation of Solar Energetic Particles // *Space Science Reviews*. 2017. V. 212. P. 1107–1136. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0382-4>
5. Struminsky A.B., Grigorieva I. Yu., Logachev Yu.I., Sadovski A.M. Two Phases of Solar Flares and a Stochastic Mechanism for Acceleration of Electrons and Protons // *Astrophysics*. 2020. V. 63. P. 388–398. <https://doi.org/10.1007/s10511-020-09643-2>
6. Reames D.V. The two sources of solar energetic particles // *Space Science Reviews*. 2013. V. 175. P. 53–92. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9>
7. Reid G.C. A diffusive model for the initial phase of a solar proton event // *J. Geophys. Res.* 1964. V. 69. Iss. 13. P. 2659–2667. <https://doi.org/10.1029/JZ069i013p02659>
8. Axford W.I. Anisotropic diffusion of solar cosmic rays // *Planetary and Space Science*. 1965. V. 13. Iss. 12. P. 1301–1309. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(65\)90063-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(65)90063-2)
9. Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // *Астрономический циркуляр АН СССР*. 1988. № 1531. С. 19–20.
10. Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // *Косм. исслед.* 2007. Т. 45. № 1. С. 12–19.
11. Reinhard R., Wibberenz G. Propagation of Flare Protons in the Solar Atmosphere // *Solar Physics*. 1974. V. 36. Iss. 2. P. 473–494. <https://doi.org/10.1007/BF00151216>
12. Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V. Some Features of Coronal and Interplanetary Propagation of Solar Cosmic Rays of High Energy // *Proc. 16th International Cosmic Ray Conference*. 1979. V. 5. Art.ID. 156.

13. *Leske R.A., Christian E.R., Cohen C.M.S. et al.* Observations of the 2019 April 4 Solar Energetic Particle Event at the Parker Solar Probe // *Astrophysical J. Supplement Series*. 2020. V. 246. Art. ID. 35. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab5712>
14. *Frassati F., Laurenza M., Bemporad A. et al.* Acceleration of Solar Energetic Particles through CME-driven Shock and Streamer Interaction // *Astrophysical J.* 2022. V. 926. Iss. 2. P. 227–246. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac460e>
15. *Zhang M., Cheng L., Zhang J. et al.* A Data-driven, Physics-based Transport Model of Solar Energetic Particles Accelerated by Coronal Mass Ejection Shocks Propagating through the Solar Coronal and Heliospheric Magnetic Fields // *Astrophysical J. Supplement Series*. 2023. V. 266. Art. ID. 35. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/accb8e>
16. *Malandraki O., Khabarova O., Bruno R. et al.* Current sheets, magnetic islands, and associated particle acceleration in the solar wind as observed by Ulysses near the ecliptic plane // *Astrophysical J.* 2019. V. 881. Art. ID. 116. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab289a>
17. *Паркер Е.Н.* Динамические процессы в межпланетной среде. М.: МИР, 1965.
18. *Reames D.V.* How Do Shock Waves Define the Space-Time Structure of Gradual Solar Energetic Particle Events? // *Space Science Reviews*. 2023. V. 219. Art. ID. 14. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00959-x>
19. *Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А. и др.* Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). Москва: МЦД, 2022. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-008>
20. *Rodríguez-Pacheco J., Wimmer-Schweingruber R.F., Mason G.M. et al.* The Energetic Particle Detector. Energetic particle instrument suite for the Solar Orbiter mission // *Astronomy & Astrophysics*. 2020. V. 642. Art. ID. A7. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935287>
21. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.* Формирование источника солнечных космических лучей в эруптивных вспышках X6.9 9 августа 2011 года и M5.1 17 мая 2012 года // *Астрономический журнал*. 2022. Т. 99. № 6. С. 486–495. <https://doi.org/10.31857/S0004629922060044>
22. *Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И.* Изолированные события солнечных космических лучей, обусловленные приходом быстрых штормовых частиц (ESP) // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023. Т. 63. № 4. С. 503–510. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600254>
23. *Laitinen T., Kopp A., Eenberg F. et al.* Solar energetic particle access to distant longitudes through turbulent field-line meandering // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. V. 591. Art. ID. A18. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527801>
24. *Kumar B., Mathur S., García R.A., Venkatakrishnan P.* On the flare induced high-frequency global waves in the Sun // *Astrophysical J. Letters*. 2010. V. 711. P. L12–L18. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/711/1/L12>
25. *Rodríguez-García L., Gómez-Herrero R., Zouganelis I. et al.* The unusual widespread solar energetic particle event on 2013 August 19 – Solar origin and particle longitudinal distribution // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 653. A137. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039960>
26. *Downs C., Warmuth A., Long D.M. et al.* Validation of Global EUV Wave MHD Simulations and Observational Techniques // *Astrophysical J.* 2021. V. 911. P. 118–135. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abea78>
27. *Bryant D.A., Cline T.L., Desai U.D., McDonald F.B.* Explorer 12 observations of solar cosmic rays and energetic storm particles after the solar flare of September 28, 1961 // *J. Geophys. Res.* 1962. V. 67. Iss. 13. P. 4983–5000. <https://doi.org/10.1029/JZ067i013p04983>
28. *Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л. и др.* 27-дневная периодичность потоков юпитерианских электронов на орбите Земли // *Астрономический журнал*. 2017. Т. 94. № 12. С. 1062–1070. <https://doi.org/10.7868/S0004629917120027>
29. *Richardson I.G.* Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Science Reviews*. 2004. V. 111. P. 267–376. <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.52830.3e>
30. *Reames D.V.* Solar Energetic Particles. A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation. Part of the book series: Lecture Notes in Physics. V. 932. 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50871-9>
31. *Richardson I.G.* Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere // *Living Reviews in Solar Physics*. 2018. V. 15. A1. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>
32. *Burlaga L., Berdichevsky D., Gopalswamy N. et al.* Merged Interaction Regions at 1 AU // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2003. V. 108. Iss. A12. Art. ID. 1425. <https://doi.org/10.1029/2003JA010088>
33. *Wang Z., Guo J., Feng X. et al.* The merging of two stream interaction regions within 1 au: the possible role of magnetic reconnection // *The Astrophysical J. Letters*. 2018. V. 869. Art. ID. L6. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf398>

УДК 523.985, 524.1-52

ИСТОЧНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ В СОБЫТИЯХ 24–25 ФЕВРАЛЯ И 16–17 ИЮЛЯ 2023 ГОДА

© 2024 г. А. Б. Струминский¹*, А. М. Садовский¹, И. Ю. Григорьева²

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

² Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: astruminsky@gmail.com

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 15.10.2023 г.

Принята к публикации 17.10.2023 г.

С начала января 2021 г. по конец августа 2023 г. монитор радиационной обстановки космического аппарата *Спектр-РГ* зарегистрировал три возрастания темпа счета, которые превышают вариации фона в ходе цикла солнечной активности и имеют сопоставимую максимальную величину. Эти возрастания связаны с солнечными протонными событиями от вспышек X1.0 28 октября 2021 г., M6.3 25 февраля и M5.7 17 июля 2023 г. На примере этих событий, а также меньших солнечных протонных событий от вспышек M3.7 24 февраля и M4.0 16 июля 2023 г. обсуждаются пороговые критерии «протонных» вспышек. В мощных солнечных протонных событиях вклад от солнечных протонов в радиационную дозу может превысить суммарный вклад от галактического космического излучения за достаточно длительный период, поэтому такие солнечные протонные события являются источниками повышенной радиационной опасности и нуждаются в прогнозировании по наблюдениям в реальном времени. Показано, что в этих пяти вспышках были преодолены пороги по трем критериям: температуре плазмы >12 МК (источник мягких рентгеновских лучей), длительности (>5 мин) микроволнового или жесткого рентгеновского излучения (ускорения электронов >100 кэВ), высоте развития вспышечного процесса >60 Мм (радиоизлучение на плазменных частотах <610 МГц).

Приход первых солнечных протонов >100 МэВ на орбиту Земли был ожидаем не ранее 10 мин относительно начала жесткого рентгеновского или микроволнового излучения, т.е. мог быть предсказан заблаговременно. Для исследования взаимосвязи солнечных вспышек и протонных событий использовались данные антисовпадатальной защиты спектрометра на *ИНТЕГРАЛЕ* (ACS SPI), которая представляет собой эффективный, но не калиброванный детектор жесткого рентгеновского излучения >100 кэВ и протонов >100 МэВ, а также патрульные наблюдения радиоизлучения на фиксированных частотах (Radio Solar Telescope Network). Отмечается, что вспышка X2.2 (N25E64) 17 февраля 2023 г. удовлетворяла всем трем критериям «протонности» и могла стать источником мощного солнечного протонного события вблизи Земли при условии благоприятного расположения на Солнце. Во вспышке M8.6 (N27W29) 28 февраля 2023 г. не был выполнен третий критерий, и она ожидаемо не привела к солнечному протонному событию (развивалась в плазме с плотностью >2.5·10¹⁰ см⁻³, плазменная частота >1415 МГц).

DOI: 10.31857/S0023420624020052, EDN: kzclxb

ВВЕДЕНИЕ

Телескоп *СПГ/ART-XC* им. М.Н. Павлинского обладает чувствительными детекторами для регистрации первичного рентгеновского излучения слабых далеких источников, поэтому вторичное рентгеновское излучение от космических лучей является для него вредным фоном ($E_{\text{HXR}} > 60$ кэВ). Во время солнечного протонного события (СПС) 28 октября 2021 г. [1–3], сопровождавшегося наземным возрастанием

интенсивности космических лучей (англ. Ground Level Enhancement – GLE), детекторы ART-XC зарегистрировали четырехкратный рост фона. Руководство *ART-XC* приняло решение сделать информацию о радиационной обстановке в точке Лагранжа *L2* общедоступной и начать выкладывать данные о фоне детекторов на сайте (<https://monitor.srg.cosmos.ru>). Монитор радиационной обстановки *СПГ/ART-XC* предоставляет усредненную скорость счета детекторов за 10 мин (кривые блеска) в энергетическом диапазоне

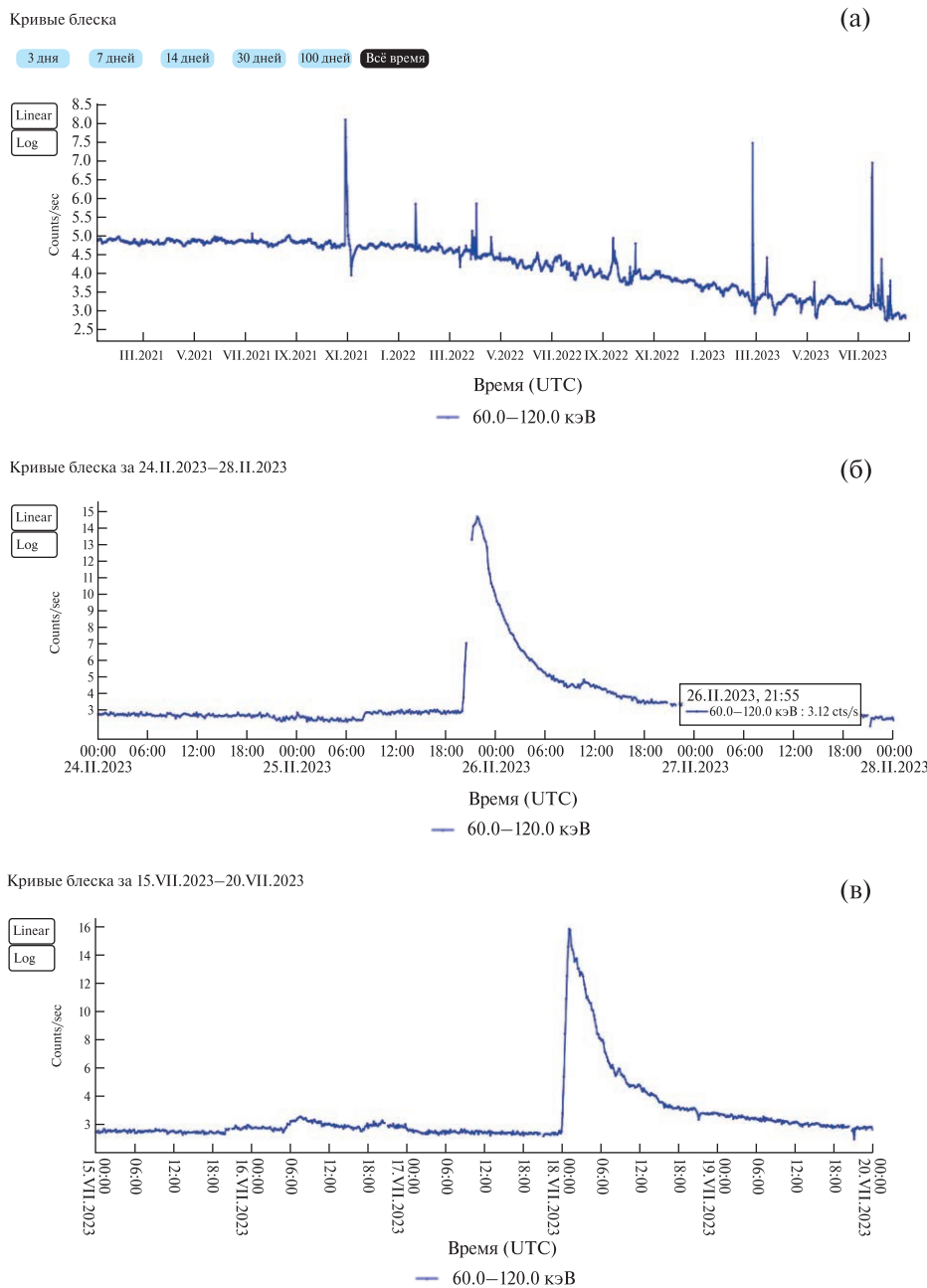


Рис. 1. Радиационная обстановка в точке *L2* по данным *СРГ/АRT-XC*: (а) с начала января 2021 г. по конец августа 2023 г.; (б) с 24 по 28 февраля 2023 г.; (в) с 15 по 20 июля 2023 г.

60–120 кэВ с задержкой в 1 сут. Пользователь может построить кривые темпа счета *ART-XC* за различные промежутки времени от 3 последних дней до всего времени наблюдения.

На рис. 1а представлен скриншот экрана в момент, когда была построена кривая блеска монитора радиационной обстановки с начала января 2021 г. по конец августа 2023 г. На таком

масштабе времени отлично виден эффект модуляции космических лучей в цикле солнечной активности (октябрь 2021 г., фаза роста вблизи минимума 24–25-го циклов, июль 2023 г. – фаза роста вблизи максимума цикла). Глубина модуляции зависит от энергии галактического космического излучения (ГКЛ) и изменяется от единиц процентов на экваториальных нейтронных мониторах до $\approx 20\%$ на полярных нейтронных

мониторах, до сотен процентов при измерениях в стратосфере и до порядка величины в открытом космосе [4]. На рис. 1а видны три возрастания, которые превышают вариации фона ГКЛ в цикле активности, имеют сопоставимую интенсивность и связаны с приходом солнечных космических лучей. Вклад одного мощного СПС в радиационную дозу может превышать суммарный вклад от ГКЛ за длительный период. Именно такие события нуждаются в прогнозировании по наблюдениям в реальном времени для обеспечения безопасной космической деятельности. Меньшие события представляют лишь ограниченный, в основном академический интерес.

По каталогу протонных событий 25-го цикла (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru) с этими тремя большими возрастаниями темпа счета монитора радиационной обстановки *CPI/ART-XC* (рис. 1а) можно связать пять СПС – 28 октября 2021 г., 24 и 25 февраля 2023 г., 16 и 18 июля 2023 г. На временном масштабе порядка нескольких дней видно, что монитор *CPI/ART-XC* (рис. 1б) не зарегистрировал возрастания от СПС 24 февраля 2023 г., а в СПС 16 июля 2023 г. (рис. 1в) было два последовательных возрастания, возможно, от разных солнечных источников.

Событие 28 октября 2021 г. полностью укладывается в концепцию ускорения солнечных протонов >100 МэВ [5] в длительных эруптивных вспышках на фоне ускорения корональных выбросов массы (КВМ). Отрезок времени во вспышках, в котором ускоряются протоны, длится несколько минут и более и характеризуется: температурой плазмы >12 МК, излучающей мягкие рентгеновские лучи (SXR); ускорением электронов до энергий >100 кэВ (т.е. жесткими рентгеновскими лучами (HXR) >100 кэВ и/или микроволновым излучением на частотах >1.5 ГГц) и развитием вспышечного процесса вверх в корону (плазменное излучение на частотах <610 МГц) [6]. Итогом развития вспышечного процесса вверх в корону является ускорение КВМ. Отсутствие радиоизлучения на частотах <1415 МГц характерно для вспышек без КВМ и СПС 23-го и 24-го солнечных циклов, исследованных в работах [7] и [8, 9] соответственно.

В статье [6] было высказано предположение, что ускорение протонов с энергией более 1 МэВ возможно при электронной температуре плазмы ~ 10 МК. При такой температуре скорости тепловых электронов и протонов с энергией ~ 1 МэВ примерно равны, что поможет сохранить электронейтральность плазмы при одновременном

ускорении протонов и электронов. Из принципа электронейтральности также следует, что при взаимодействии протонов в плазме генерация π_0 -мезонов будет возможна при энергии электронов ~ 150 кэВ (протоны с $E \sim 300$ МэВ эквивалентны по скоростям электронам с $E \sim 150$ кэВ). Следовательно, ускорение солнечных протонов >100 МэВ должно происходить на фоне микроволнового (ГГц) или HXR-излучения с $E > 100$ кэВ.

Для достижения протонами скоростей, равных скоростям электронов, требуется время, как минимум в m_p/m_e раз большее, поэтому, ключевым моментом для оценки времени ускорения протонов является время ускорения электронов до энергий ~ 100 кэВ [10], которое определяет необходимую длительность наблюдения HXR-излучения с $E > 100$ кэВ и/или микроволнового излучения, а также ожидаемый момент прихода первых ускоренных протонов на Землю при свободном распространении в межпланетном пространстве (МП).

Наблюдательные данные показывают, что время ускорения электронов до кинетической энергии ~ 100 кэВ составляет порядка ~ 400 мс [11]. Также наблюдаются задержки между HXR-всплесками на различных энергиях электронов (20, 50, 100, 200 и 300 кэВ) порядка десятков миллисекунд, которые могут быть обусловлены временем ускорения электронов [12, 13]. Время, необходимое для набора протонами $E \sim 200$ МэВ, будет ~ 1 мин при ускорении электронов до кинетической энергии ~ 100 кэВ за 40 мс («быстрое» ускорение) или ~ 10 мин при ускорении электронов до ~ 100 кэВ за 400 мс («медленное» ускорение) [6].

Если за ноль времени в солнечных событиях принять начало микроволнового излучения 8.8–15.4 ГГц (оно обычно совпадает с появлением значимого сигнала HXR-излучения с $E \sim 100$ кэВ), то ожидаемое время прихода протонов с $E \sim 200$ МэВ ($V/c = 0.57$) на орбиту Земли будет ~ 11 мин и ~ 21 мин при «быстром» и «медленном» ускорении соответственно, и последующем распространении без рассеяния по спирали Паркера до Земли (1.3 а.е., скорость солнечного ветра – 300 км/с). Таким образом, неопределенность характерного времени ускорения солнечных электронов до $E \sim 100$ кэВ обуславливает неопределенность времени первого прихода СП с $E \sim 200$ МэВ на орбиту Земли и составляет порядка 10 мин [6]. Необходимое время (характерный размер) для ускорения протонов >100 МэВ задает, по всей видимости, развитие вспышечного процесса вверх, связанное

с ускорением КВМ. Также в неопределенность около 11 мин укладывается эффект дисперсии по скоростям между протонами 100 МэВ ($V/c = 0.43$) и 500 МэВ ($V/c = 0.76$).

Эти идеи были развиты нами в работе [6] и стали основой предложений для сверхсрочного прогноза СПС в реальном времени [14]. В ходе солнечной вспышки, сопровождающейся СПС, должны последовательно преодолеваются четыре энергетических порога: по температуре вспышечной плазмы, по энергии и длительности ускорения электронов, по развитию процесса вверх в корону и по ускорению межпланетного КВМ (>618 км/с на поверхности Солнца).

Целью работы является ответ на вопрос, можно ли было предсказать эти пять СПС заблаговременно по наблюдаемому солнечному электромагнитному излучению в реальном времени? В работе сделана привязка наблюдавшихся в это время СПС к конкретным солнечным вспышкам; определен необходимый темп ускорения протонов на Солнце для объяснения наблюдаемого времени первого прихода солнечных протонов на орбиту Земли; обсуждены критерии прогноза «протонных» вспышек [14]. Для сравнения к этим пяти событиям добавлены еще две солнечные вспышки – 17 и 28 февраля 2023 г., от которых не были зарегистрированы солнечные энергичные протоны.

ИНСТРУМЕНТЫ И МЕТОДЫ

Временное разрешение монитора радиационной обстановки *ART-XC* не позволяет решать поставленные задачи, в частности нет возможности разделить первичные солнечные НХР и вторичные НХР (связанные с приходом солнечных протонов). В работе исследовались протонные возрастания монитора *ART-XC* с использованием данных других детекторов, т.е. решалась обратная задача их прогноза: определялась последовательность характеристик родительской солнечной вспышки, которая привела к СПС. Если такая последовательность характеристик будет наблюдаться в будущем, то через 10–20 мин следует ожидать начало протонного возрастания >100 МэВ.

Антисовпадательная защита спектрометра на КА *ИНТЕГРАЛ* (англ. Anti-Coincidence Shield of Spectrometer on *INTEGRAL* – ACS SPI) регистрирует НХР с $E > 100$ кэВ. Это могут быть как первичные фотоны, так и вторичные, рожденные в теле детектора под воздействием протонов с $E > 100$ МэВ. Защита ACS SPI представляет собой эффективный, но не калиброванный детектор

НХР и протонов, с помощью его данных мы уже исследовали ранее взаимосвязь солнечных вспышек и протонных событий [5, 6, 9, 10]. Данные ACS SPI доступны на сайте (<https://isdc.unige.ch/~savchenk/spiaccs-online/spiaccspnlc.pl>) с временным разрешением 50 мс. При одноминутном сглаживании и вычитании фона значимым становится темп счета ACS SPI – менее 10 отсчетов за 50 мс [9]. Возрастание темпа счета ACS SPI во время наблюдения солнечного радиоизлучения вызвано солнечным НХР-излучением. Моментом первого прихода СП на орбиту Земли считаем начало значимого возрастания темпа счета на фоне или после всплеска солнечного НХР-излучения [6].

Для контроля за интенсивностью потоков протонов энергий <100 МэВ и релятивистских электронов в МП вблизи Земли используются данные протонных каналов (7.8–25 МэВ и 25–53 МэВ) и электронных каналов детектора EPHIN (англ. Electron Proton Helium Instrument) [15] на борту КА *SOHO*, который находится в точке Лагранжа *L1*. Данные *SOHO*/EPHIN были взяты на сайте (www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phreph/EPHIN.htm). При анализе СПС используются оценки максимального потока протонов с $E > 10$ МэВ, указанные в каталоге СПС 25-го цикла солнечной активности НИИЯФ МГУ (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru).

Температура (T) и мера эмиссии (EM) вспышечной плазмы были вычислены из 2-секундных интегральных потоков SXR-излучения в каналах 1–8 и 0.5–4 Å детектора КА *GOES* (англ. Geostationary Operational Environmental Satellite, <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/>) в пакете *SolarSoft* в однотемпературном приближении.

В данной работе используется информация о радиоизлучении, представленная в *YYYYMMDDevents.txt* файлах (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/NOAA/org_events_text/2023/). Эти файлы содержат информацию о начале, максимуме и конце наблюдавшегося радиоизлучения на восьми патрульных частотах Radio Solar Telescope Network (RSTN). На четырех из них (15.4, 8.8, 4.995 и 2.695 ГГц) регистрируется преимущественно гиротронное излучение, а на трех (610, 410 и 245 МГц) – плазменное излучение, на частоте 1415 МГц возможен вклад обоих механизмов. Первичное ускорение электронов во вспышках с КВМ происходит в местах с плазменной частотой ~ 500 МГц [16]. По величине эмиссии (EM) и наблюдавшимся плазменным

Таблица 1. Общие характеристики вспышек и КВМ

Параметры	События							
	1	2	3	4	5	6а	6б	7
А	28.X.21 15:27 UT	17.II.23 19:57 UT	24.II.23 20:23 UT	25.II.23 19:23 UT	28.II.23 17:43 UT	16.VII.23 04:33 UT	16.VII.23 17:38 UT	17.VII.23 23:25 UT
Б	S26W05 2N 2887	N25E64 2B 3229	N28W28 2B 3229	N26W43 3N 3229	N27W29 3234	S23W49 SF 3363	S23W58 2B 3363	S26W87 3363
В	X1.0 -10	X2.2 -19	M3.7 -20	M6.3 -43	M8.6 -8	C1.9 +16	M4.0 -2	M5.7 -7
Г	0 +17	-5 >+100	-3 +10	-6 +40	-3 +14	? 	+2 +15	-3 +25
Д	0 +20	0 нет	нет +25	0 +25	нет нет	нет +30	0 +13	0 +30
Е	15400 0 +10	15400 0 +19	15400 0 +1	8800 +5 +17	15400 0 +5	245 0 +5	15400 0 +3	15400 +10 +21
Ж	245 0 +25	245 -8 -7	245 -4 +3	410 +3 +22	2695 -1 0	245 0 +5	245 -1 +6	245 -12 +25
З	IV +5 +102	нет	IV +5 +216	СТМ -130 +276	нет	СТМ -1 +291	V 0 +14	СТМ +35 +374
И	+2 +26	0 +39	нет	0 +14	нет	нет	нет	нет
К	+21 1526 189	+15 1315 56	+13 1336 345	+1 1170 294	нет	+9 1970 275	+15 1239 220	+11 1385 223
Л	22	фон	0.75	35	фон	18	?	614

Примечание: А – дата события и нулевое время; Б – координаты, оптический балл, номер активной области; В – балл и начало SXR-вспышки; Г – начало и конец SXR-температуры по данным GOES (>12MK); Д – начало регистрации ACS SPI солнечного HXR-излучения и начало протонного возрастания ACS SPI; Е – наибольшая зарегистрированная RSTN частота МГц, начало и конец возрастания; Ж – наименьшая зарегистрированная RSTN частота МГц, начало и конец возрастания; З – тип непрерывного радиоизлучения, <180 МГц, начало и конец; И – начало и конец II типа радиоизлучения; К – время (UT) первого появления КВМ в поле зрения LASCO и средняя скорость км/с, угол PA; Л – единицы потока протонов >10 МэВ на орбите Земли ($1 \text{ pfu} = 1(\text{cm}^2 \text{ с ср})^{-1}$). В строках от «В» до «К» время дано в минутах относительно нуля в каждом событии.

частотам $\nu_p = 9000\sqrt{n}$ можно делать оценки размера SXR источника $R = (EM2n^2)^{1/3}$ [17].

О развитии вспышечного процесса вверх в корону свидетельствуют радиовсплески на частотах <180 МГц: II типа – медленно дрейфующий всплеск, обычно ассоциируемый с распространением в короне ударной волны; IV типа – всплеск с широким, сглаженным и непрерывным спектром, который связывают с ускорением и захватом электронов в постэруптивной аркаде; V типа – короткий непрерывный всплеск, обычно связанный с серией всплесков; III типа – быстрый дрейфующий всплеск; СТМ – широкополосный, долгоживущий, непрерывный декаметровый всплеск. В статье [18] развит метод предсказания СПС на основе наблюдений

только всплесков II и IV типов. Теоретические подходы к радиовсплескам V типа разрабатывались в работе [19].

В табл. 1 представлены основные характеристики рассматриваемых СПС и солнечных вспышек. Данные по наблюдениям КВМ взяты из электронного каталога SOHO LASCO CME CATALOG (/cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/) [20]. Все события пронумерованы в хронологическом порядке. События исследуются относительно выбранного нулевого времени. За ноль времени выбрано начало роста интенсивности HXR-излучения, если оно наблюдалось ACS SPI. В противном случае за ноль времени принято начало роста микроволнового излучения на наибольшей частоте, наблюдавшейся RSTN.

ТЕМП СЧЕТА ACS SPI В СОБЫТИЯХ
24–25 ФЕВРАЛЯ И 16–18 ИЮЛЯ 2023 ГОДА

Возрастания протонного сигнала ACS SPI в событиях 1, 3, 4 и 7 однозначно связаны с солнечными вспышками (табл. 1), но однозначности нет в событии 6. В каталоге 25-го цикла (https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru) СПС 16 июля 2023 г. с началом в 05:40 UT и максимумом 07:35 UT ассоциируют со вспышкой C3.7 15 июля в 21:04 UT с координатами N24E25. Мы четко видим два протонных возрастания ACS SPI с началом ~04:57 UT (6a) и ~17:51 UT (6б). Характер кривых блеска ACS SPI позволяет связать возрастание в событии 6a с корональным радиоизлучением и вспышкой C1.9, а возрастание в событии 6б со вспышкой M4.0 (табл. 1). В событии 6б наблюдаемые потоки протонов ГКЛ и солнечных космических лучей могли быть промодулированы межпланетной структурой после 18:00 UT (+22 мин).

Отметим, что такая привязка протонного возрастания (6a) противоречит критериям [14] для предсказания СПС – температура плазмы не поднималась выше 12 МК, не было зарегистрированного NXR или микроволнового излучения, что не исключает залимбовый источник протонов. Действительно, рентгеновский телескоп STIX (англ. Spectrometer / Telescope for Imaging X-rays) на борту КА *Solar Orbiter*, который находился в гелиосфере на противоположной стороне Солнца от Земли, зарегистрировал 16 июля 2023 г. в 04:33 UT NXR-всплеск (<https://datacenter.stix.i4ds.net/view/ql/lightcurves>). Согласно каталогу STIX всплеск связан со вспышкой C1.9, зарегистрированной GOES вблизи Земли. Амплитуда всплеска, пересчитанная в SXR диапазон GOES, соответствует баллу X9 (с возможной ошибкой от X4 до X19).

На рис. 2 показан сглаженный за одну минуту темп счета ACS SPI за 50 мс в событиях 1, 3, 4, 6a и 7, глубина модуляции ГКЛ между 28 октября 2021 г. и 17 июля 2023 г. составляет 39.3%. Это показывает, что ACS SPI чувствителен к протонам меньшей энергии, чем полярные нейтронные мониторы (энергия атмосферного обрезания ~450 МэВ). Интенсивность протонов ГКЛ >100 МэВ в максимуме $J_{ГКЛ} \sim 0.1 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$ соответствует фоновому темпу счета $N_{фон1} = 6843 \text{ имп/50 мс}$ (28 октября 2021 г.), в СПС с амплитудой больше модуляции ГКЛ поток протонов >100 МэВ должен быть $J_{100} \sim 0.393 \times 0.1 > 0.04 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$.

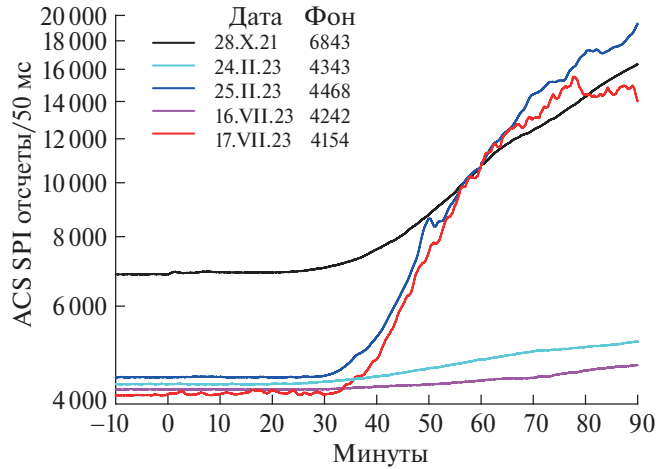


Рис. 2. Полный темп счета ACS SPI за 50 мс, сглаженный за 1 мин, вблизи нуля времени событий: (1) – 28 октября 2021 г., (3) – 24 февраля 2023 г., (4) – 25 февраля 2023 г., (6a) – 16 июля 2023 г., (7) – 17 июля 2023 г. (табл. 1).

Можно оценить J_{100} в СПС по данным ACS SPI, зная фоновый счет $N_{фон}$ и наблюдаемый счет N : $J_{100} = J_{ГКЛ} (N - N_{фон}) / N_{фон1}$. Результаты этих оценок приведены в табл. 2. Наблюдавшийся максимальный поток протонов >10 МэВ в событии 1 был $J_{10} = 22 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$, а в событии 7 – $J_{10} = 614 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$ (табл. 1). Для степенного спектра $J = AE^{-\gamma}$ оценка его показателя будет $\gamma = (\lg J_{10} - \lg J_{100}) / (\lg E_{100} - \lg E_{10})$. Подставляя числа для событий 1 и 7 получаем соответственно $\gamma = 1.7$ и $\gamma = 3.4$. Если для оценки J_{10} взять J_{100} в событиях с амплитудой меньше модуляции ГКЛ, то при $\gamma = 1.7$ получим $J_{10} = J_{100} E_{100}^{\gamma} / E_{10}^{\gamma} = 2.0 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$ (ниже порога СПС) и при $\gamma = 3.4$ получим $J_{10} = 100 \text{ (см}^2 \text{ с ср)}^{-1}$ (выше порога СПС).

На рис. 3а построены кривые блеска ACS SPI в событиях, которые превышают амплитуду модуляции ГКЛ (рис. 1а) – 28 октября 2021 г. (1), 25 февраля (4) и 17 июля (7) 2023 г., а также во время и после вспышки X2.2 17 февраля 2023 г. – событие 2. Во всех этих четырех событиях на рис. 3а после 0 мин видны возрастания темпа счета ACS SPI, связанные с солнечным NXR-излучением. В событиях 1, 4 и 7 протонное возрастание в темпе счета ACS SPI наблюдалось позднее 20 мин. Мы считаем, что вспышка 2 могла бы стать источником такого же мощного СПС при благоприятном расположении на солнечном диске. Действительно, согласно данным SOHO/ERIN (рис. 4) 16–17 февраля 2023 г. началось слабое протонное возрастание, характерное для восточных событий. Оно может быть связано со слабой вспышкой и быстрым КВМ (10:48 UT,

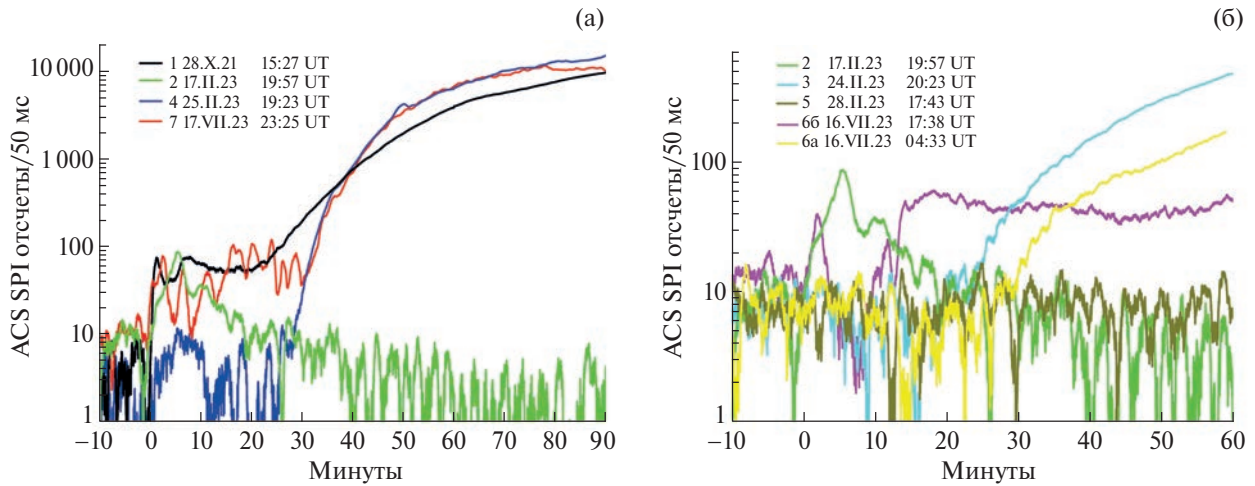


Рис. 3. (а) Вклад солнечных НХР и протонов в темп счета ACS SPI во время солнечных вспышек и протонных событий: (1) X1.1–28 октября 2021 г., (2) X2.2–17 февраля 2023 г., (4) M6.3–25 февраля 2023 г., (7) M5.7–17–18 июля 2023 г. (б) Вклад солнечных НХР и протонов в темп счета ACS SPI во время солнечных вспышек и протонных событий: (2) X2.2–17 февраля 2023 г., (3) M3.7–24 февраля 2023 г., (5) M8.6–28 февраля 2023 г., (6a) C1.3 и (6b) M4.0–16 июля 2023 г.

1549 км/с, PA 301) 16 февраля и вспышкой 2 с КВМ (20.12 UT, 1315 км/с, PA 56) 17 февраля.

Солнечное НХР-излучение во вспышках 1, 2 и 7 было сравнимой максимальной интенсивности, что говорит о взаимодействии ускоренных электронов со сходным спектром в условиях одинаковых мишеней. Возрастание НХР (вспышка 4) по амплитуде сопоставимо с вариациями фона ACS SPI, но выделяется длительностью и корреляцией с солнечным радиоизлучением на частоте 2695 МГц. В случае 4 спектр электронов, по всей видимости, был более мягким, а мишень менее плотной. Также обращает на себя внимание различие временной структуры кривых блеска: в событиях 1 и 2 – два максимума, а в случае 7 – восемь максимумов (рис. 3а).

Протонные возрастания событий 1, 4 и 7 различались временем первого прихода протонов и темпом роста счета ACS SPI. По классификации времени прихода [6] эти события относятся к «поздним» и медленным. Различие оценки времени первого прихода в 5 мин в событиях 4 и 7 разумно приписать влиянию НХР-фона при практически идентичных кривых блеска после +30 мин. С другой стороны, могли различаться и темпы ускорения протонов в случаях 4 и 7. Протонное возрастание (вспышка 4) началось на +25 мин, а в событии 7 на +30 мин. Время запаздывания прихода протонов 100 МэВ при длине распространения 1.3 а.е. ~17 мин. Протоны должны были выйти в МП не позднее +8 мин в событии 4 или +13 мин в событии 7. Длительность ускорения протонов до 100 МэВ была ~480 с (вспышка 4) и ~780 с (вспышка 7), а минимальный темп

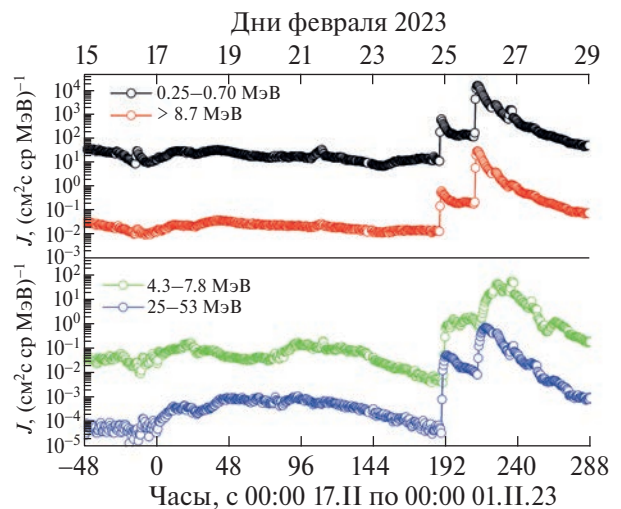


Рис. 4. Поток протонов и электронов, зарегистрированные SOHO/EPHIN 15–28 февраля 2023 г.

Таблица 2. Оценка потока протонов >100 МэВ по темпу счета ACS SPI в выбранных СПС событиях

Параметры	События					
	1	3	4	6a	6b	7
$N_{фон}$	6843	4343	4470	4242	4242	4154
N_{max}	35000	5270	25000	4900	4450	20500
J_{100}	0.4	0.02	0.3	0.01	0.003	0.2

ускорения протонов $100 \text{ МэВ}/480 \text{ с} = 0.2 \text{ МэВ}/\text{с}$ и $100 \text{ МэВ}/780 \text{ с} = 0.1 \text{ МэВ}/\text{с}$.

Отличие кривой блеска в событии 1 от событий 4 и 7 до +30 мин связано, вероятнее всего, с большим темпом ускорения частиц, который характерен для GLE-событий [6]. Минимальный темп ускорения протонов в событии $1100 \text{ МэВ}/180 \text{ с} = 0.56 \text{ МэВ}/\text{с}$. Возможно, что меньший темп ускорения в событиях 4 и 7 обусловлен большими задержками между эпизодами ускорения, которые не перекрываются между собой (восемь максимумов HXR в случае 7). Так как выход протонов в МП в событии 1 был затруднен в силу направления распространения КВМ (величины PA), примерно после 40 мин кривая события 1 оказывается ниже кривых событий 4 и 7. Только вне масштаба по времени (рис. 3а) кривая в событии 1 будет выше, чем в случаях 4 и 7, именно в это время наблюдалось GLE на нейтронных мониторах [1, 2].

В событиях 1, 4 и 7 обращает на себя внимание различие как минимум на порядок величины максимальных интенсивностей потоков протонов $>10 \text{ МэВ}$. Согласно выводам работы [21] GLE-событие 28 октября 2021 г. (вспышка 1) отличалось аномально жестким спектром. Так как темп счета ACS SPI (протоны $>100 \text{ МэВ}$) и ART-XC в этих событиях были сравнимы, можно сделать вывод, что протоны $<100 \text{ МэВ}$ практически не создавали вторичные HXR в этих детекторах и не были источником дополнительной ионизации.

На рис. 3б показаны протонные возрастания кривых 3, ба и бб, которые теряются в масштабе рис. 1а, а также темп счета ACS SPI в событиях 2 и 5 без протонных возрастаний. Отметим, что событие 5 наблюдалось на фоне слабого роста фона ACS SPI. Кривая 5 на рис. 3б получена после вычитания прямой $Y = 9.0172 + 0.41853X$, где X – время в минутах относительно нуля. Сравнение кривых 2 и 5 показывает, что в событии 5 действительно не было HXR-возрастания ранее +20 мин, а после +20 мин не было и протонного возрастания. В событии 3 и ба не было HXR-возрастания ранее +25 мин, которое соответствовало бы наблюдавшемуся микроволновому излучению. После +25 мин в событии 3 и +30 мин в событии ба началось протонное возрастание. Необходимый темп ускорения протонов в событии 3 был $100 \text{ МэВ}/480 \text{ с} = 0.2 \text{ МэВ}/\text{с}$. Оценить темп ускорения протонов в случае ба не представляется возможным ввиду неопределенности времени распространения в короне и МП.

В событии бб было как HXR, так и протонное возрастание ACS SPI (рис. 3б), их характеристики заслуживают подробного исследования. Ускорение

протонов (нагрев плазмы до 12 МК) задержалось на +2 мин относительно ускорения электронов $>100 \text{ кэВ}$ (HXR ACS SPI и микроволны 15.4 ГГц). Протонное возрастание (бб) было ранним (первый приход протонов $<+13$ мин) и слабым (менее 100 отсчетов ACS SPI за 50 мс). Возрастание на 13 мин в случае бб могло быть вызвано только протонами $>500 \text{ МэВ}$, так как, если протоны начали ускоряться на +2 мин ($T > 20 \text{ МК}$), у них есть только 11 мин на ускорение и распространение. При длине распространения 1.3 а.е. запаздывание прихода протонов 500 МэВ составляет ~ 6 мин, а длительность ускорения протонов в случае бб будет 5 мин. Темп ускорения протонов должен был быть $>500 \text{ МэВ}/300 \text{ с} = 1.7 \text{ МэВ}/\text{с}$. Наблюдение такого раннего и слабого протонного возрастания позволяет предположить, что в темп счета ACS SPI в событии 1 после +10 мин мог быть существенный вклад от протонов $>500 \text{ МэВ}$.

Таким образом, в событиях 1 и бб реализовалось «раннее» протонное возрастание ACS SPI, темп ускорения протонов $\sim 2 \text{ МэВ}/\text{с}$ (ускорение электронов до 100 кэВ за десятки миллисекунд – «быстрое»), а во вспышках 3, 4 и 7 – «позднее» протонное возрастание, темп ускорения протонов $<0.2 \text{ МэВ}/\text{с}$ (ускорение электронов до 100 кэВ за сотни миллисекунд – «медленное»).

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ВСПЫШЕК М6.3, М8.6 25 И 28 ФЕВРАЛЯ 2023 ГОДА

В этом разделе рассматриваются кривые блеска радиоизлучения RSTN (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second/>) в случаях 4 и 5, которые выделяются на фоне других событий из табл. 1.

Характеристики радиоизлучения для вспышки М6.3 25 февраля 2023 г., представленные в табл. 1, были взяты из файла (20230225events.txt) и отнесены к выбранному нулевому времени. Это событие выделяется тем, что нет информации по излучению на крайних частотах 245 МГц и 15.4 ГГц в файле событий за этот день. На рис. 5а показаны кривые блеска по данным RSTN (станция Palehua, 25feb23.phf) на частотах с преобладающим гиросинхротронным излучением (сильно зашумленная кривая на 15.4 ГГц не построена). Все кривые на рис. 5а показывают начало роста не позднее нулевого времени (19:23 UT) – начала излучения на 2695 МГц и 1415 МГц, отмеченного в файле (20230225events.txt). Однако начало радиоизлучения на частоте 8.8 ГГц указано там в 19:28 UT (+5 мин), почему была отмечена такая задержка, непонятно.

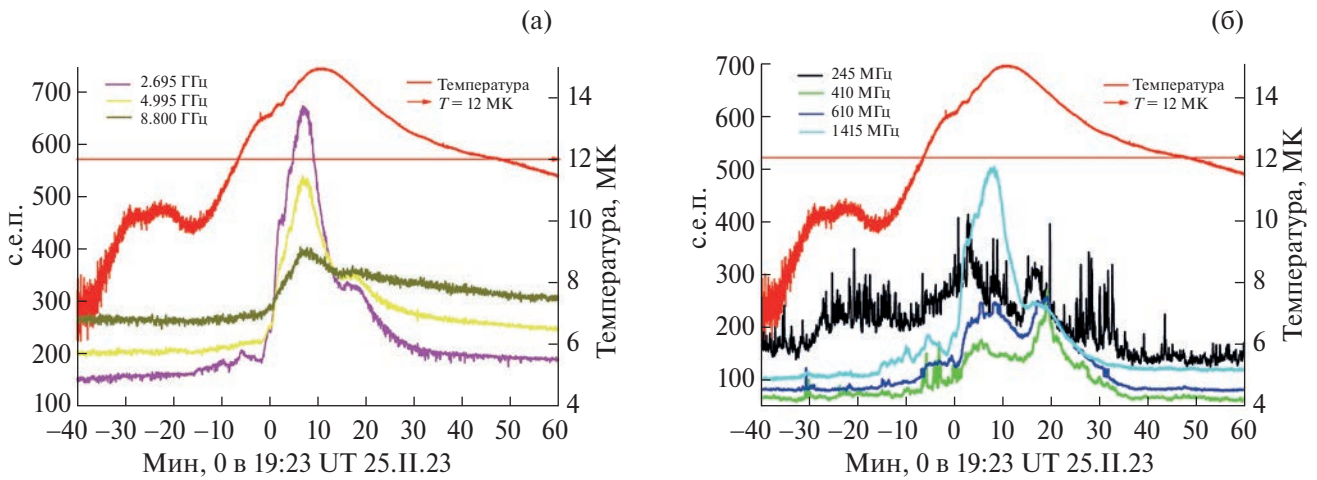


Рис. 5. Вспышка 4 (M6.3) 25 февраля 2023 г.: (а) температура вспышечной плазмы и радиоизлучение 8.8–2695 МГц, (б) температура вспышечной плазмы и радиоизлучение 1415–245 МГц.

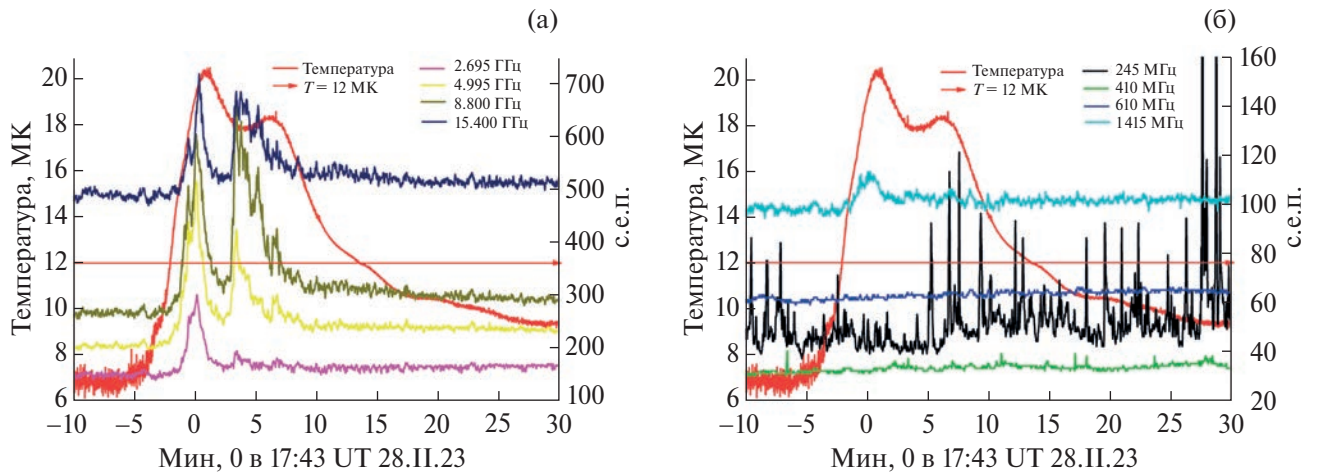


Рис. 6. Вспышка 5 (M8.6) 28 февраля 2023 г.: (а) температура вспышечной плазмы и поток радиоизлучения 15.4–2695 МГц, (б) температура вспышечной плазмы и поток радиоизлучения 1415–245 МГц.

Вспышка M6.3 началась значительно раньше нулевого времени, в 18:40 UT (–43 мин). Ее триггером было, по всей видимости, ускорение электронов высоко в короне, которое проявилось в радиоизлучении VI типа (серия всплесков III типа длительностью более 10 мин). Оно наблюдалось с 18:37 UT (–46 мин) по 20:39 UT (+76 мин). Кривая блеска на 245 МГц (рис. 5б) также свидетельствует о развитии вспышки до нулевого времени в короне с концентрацией плазмы менее $7.4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Кривые блеска на частотах 410, 610 и 1415 МГц (рис. 5б) показывают рост до нулевого времени и свидетельствуют о меняющихся условиях в короне (увеличение плотности за счет «хромосферного испарения»). После нулевого времени вспышка развивалась уже в максимально широком диапазоне плотностей, с учетом плазменных частот (рис. 5б) и радиоизлучения

II типа. Начало всплеска II типа на 0 мин и появление КВМ (+1 мин) в поле зрения LASCO свидетельствуют об ускорении КВМ до начала ускорения электронов $> 100 \text{ кэВ}$.

Характеристики радиоизлучения для вспышки M8.6 28 февраля 2023 г., представленные в табл. 1, были взяты из файла (20230228events.txt) и отнесены к выбранному нулевому времени. Кривые блеска радиоизлучения по данным RSTN (станция Palehua, 28feb23.phf) построены для гиросинхротронных частотах на рис. 6а, а для переходной и плазменных частот – на рис. 6б. Как это уже наблюдалось во многих других событиях 23-го [7] и 24-го солнечных циклов [8, 9], во вспышке M8.6 28 февраля 2023 г. без КВМ и СПС радиоизлучение на частотах менее 1415 МГц отсутствовало. Минимальная

частота радиоизлучения, зарегистрированного RSTN и отмеченного в файле (20230228events.txt), была 2695 МГц.

На панели рис. 6а видно два эпизода нагрева плазмы, которые соответствуют двум эпизодам радиоизлучения. В первом эпизоде присутствует радиоизлучение на крайних частотах 15.4 ГГц (рис. 6а) и 1415 МГц, (рис. 6б), которые не наблюдались во втором эпизоде. Спектр электронов должен был быть жестче, магнитное поле сильнее, а плотность плазмы меньше ($2.6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$), чем во втором эпизоде ($9.0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$). Таким образом, вспышка была ограниченной по высоте и не развивалась вверх в корону. Всплески радиоизлучения на 245 МГц, которые можно видеть на рис. 6б, были генерированы независимо от процессов в нижней атмосфере Солнца, так как всплесков на частотах 410 и 610 МГц не было.

ОБСУЖДЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ПРОГНОЗА «ПРОТОННЫХ» ВСПЫШЕК

Согласно представлениям, изложенным в статье [22], солнечные вспышки происходят через 0.5–2 сут. после обнаружения магнитного потока $>10^{13}$ Вб при скорости его всплытия $>10^9$ Вб/с. Однако время начала вспышек, а также конкретные характеристики их электромагнитного излучения, ускорения частиц и реализации КВМ с большей точностью предсказать невозможно. Далее по наблюдаемым характеристикам солнечной вспышки и КВМ можно оценить вероятность выхода солнечных протонов в гелиосферу. Достаточно полный обзор современного состояния прогностических моделей СПС на 2017 г. можно найти в статье [23].

Патрульные наблюдения *GOES* по SXR-излучению доступны потребителю практически в реальном времени, поэтому они широко используются для краткосрочного прогнозирования СПС и проверки различных статистических моделей предсказания [24–32]. Предложенные в работе [14] наблюдательные критерии прогноза «протонных» вспышек обобщают и дополняют методики предсказания СПС по излучению электронов и плазмы по параметрам SXR [24–27], HXR [33, 34], микроволнового [35], плазменного [7] излучений и радиовсплескам [18].

Авторы работы [36] обратили внимание на наблюдательный факт, что импульсной фазе вспышек с HXR-излучением предшествует горячее SXR-начало (a hot X-ray ‘onset’) с температурой плазмы 10–15 МК. Согласно оценкам в работе [37] эффективное доускорение электронов возможно лишь в случае сравнительно разреженной ($n \lesssim 10^{10} \text{ см}^{-3}$)

и горячей ($T \sim 10^7$ К) фоновой плазмы. В семи рассмотренных случаях, за исключением события ба, SXR-вспышки начались раньше выбранного нулевого времени (строка В, табл. 1). Условие для ускорения протонов (нагрев плазмы до $T > 12$ МК длительностью более 5 мин по данным *GOES*) выполнено для всех выбранных событий кроме события ба (строка Г, табл. 1). Вспышечная плазма в шести случаях из восьми прогрелась до температуры >12 МК не позднее нулевой минуты, исключением является вспышка бб, в которой это произошло на +2 мин. В данной работе оценка температуры плазмы по наблюдениям STIX в случае ба не делалась, но в X-вспышках температура обычно превышает 12 МК.

Свидетельства длительного ускорения электронов >100 кэВ приведены в табл. 1: строка Д – HXR-излучение, строка Е – микроволновое излучение. Так как генерация HXR и микроволн зависит от свойств плазмы, в которой происходит излучение, сравнение интенсивностей излучения без подробного анализа среды взаимодействия не имеет смысла. Важен факт регистрации одного из видов такого излучения (микроволн >2 ГГц или HXR >100 кэВ) длительностью не менее нескольких минут, так как на момент излучения могло не быть приемников, способных его измерить. С этой точки зрения, ускорение электронов >100 кэВ было во всех восьми исследуемых событиях, если учесть наблюдения STIX в событии ба.

Радиовсплески малой интенсивности не считаются значимыми в стандартных методиках предсказания СПС (см. работу [35] и ссылки в ней). Наименьшая длительность ускорения электронов >100 кэВ была в событии 5, так как HXR по данным ACS SPI не было, а микроволновое излучение на 15.4 ГГц длилось 5 мин. То, что вспышка 5 будет без КВМ и СПС, можно было утверждать уже на +5 мин. Радиоизлучение на частотах <2695 МГц так и не появилось, что говорит о вспышке, ограниченной в пространстве. О развитии вспышечного процесса в корону (уменьшение плотности, т.е. плазменной частоты) свидетельствует плазменное излучение (табл. 1): строка Ж – минимальная зарегистрированная частота RSTN; строка З – типы зарегистрированных непрерывных радиовсплесков на частотах <180 МГц; строка И – наличие радиовсплеска II типа на частотах <180 МГц.

Данные табл. 1 показывают, что вспышки, сопровождающиеся СПС, объединяет наличие непрерывных радиовсплесков на частотах <180 МГц (строка З в табл. 1). Выскажем предположение, что непрерывное радиоизлучение на частотах <610 МГц, включая радиовсплески II, IV, V

и СТМ типов, с длительностью более 5 мин является главным свидетельством ускорения протонов на Солнце.

В начале мощных солнечных вспышек, когда ускорение протонов уже произошло, но КВМ и ударная волна еще не сформировались, можно ожидать выход в МП слабых протонных потоков, как это наблюдалось в случае 6б. Радиоизлучения II типа не было в событиях 2, 6а и 7, несмотря на наличие КВМ со средней скоростью >600 км/с. Скорость и направление распространения КВМ можно определить только после регистрации двух его положений в поле зрения коронографа; скважность наблюдений КВМ коронографом LASCO C2 составляет 12 мин, поэтому невозможно использовать параметры КВМ (строка К в табл. 1) для предсказания момента первого прихода солнечных протонов >100 МэВ в реальном времени. Эти параметры важны для оценки условий выхода и распространения протонов из короны в МП, которые определяют время достижения и величину максимума интенсивности. Также продолжающееся ускорение КВМ в поле зрения LASCO свидетельствует о выделении энергии и ускорении частиц на постэруптивной фазе вспышки, которое может внести существенный вклад в формирование временного профиля потока солнечных протонов [38].

ВЫВОДЫ

Проведен анализ пяти протонных событий и HXR-возрастаний темпа счета ASC SPI их родительских вспышек — X1.0 28 октября 2021 г., M3.7 24 февраля и M6.3 25 февраля 2023 г., а также M4.0 16 июля и M5.7 17 июля 2023 г. По времени начала протонного возрастания ASC SPI сделана оценка длительности ускорения протонов и темпа набора энергии протонами.

Во вспышках X1.0 и M4.0 реализовалось «быстрое» ускорение электронов ~ 10 МэВ/с («раннее» протонное возрастание ACS SPI, темп ускорения протонов ~ 2 МэВ/с), а во вспышках M3.7, M6.3 и M5.7 — «медленное» ускорение электронов ~ 1 МэВ/с («позднее» протонное возрастание, темп ускорения протонов <0.2 МэВ/с).

Вспышки, сопровождающиеся СПС, выделяются из всей совокупности солнечных вспышек преодолением порогов по температуре плазмы (>12 МК); энергии ускоренных электронов (>100 кэВ); высоте развития вспышечных процессов.

Слабое протонное возрастание утром 16 июля 2023 г. не могло быть предсказано по предложенным критериям, так как оно было результатом вспышки

X9 на обратной стороне Солнца, зарегистрированной STIX на борту *Solar Orbiter*. Эта вспышка по наблюдениям GOES соответствовала баллу C1.9 и сопровождалась радиоизлучением на частоте 245 МГц, длительным непрерывным радиоизлучением VI и СТМ-типов на частотах 25–180 МГц и ускорением КВМ до 1970 км/с.

Вспышка X2.2 (N25E64) 17 февраля 2023 г. удовлетворяла всем трем критериям «протонности» и могла стать источником мощного СПС вблизи Земли при условии благоприятного расположения на Солнце. Во вспышке M8.6 (N27W29) 28 февраля 2023 г. не был выполнен третий критерий (по высоте развития вспышечного процесса), и она ожидается не привела к СПС (развивалась в плазме с плотностью $>2.5 \cdot 10^{10}$ см⁻³, плазменная частота >1415 МГц).

Таким образом, рассмотренные события 25-го цикла показывают, что для предсказания СПС с энергией протонов >100 МэВ, связанных с солнечными вспышками, необходимо наблюдать в реальном времени: SXR излучение в двух энергетических каналах; микроволновое (>3 ГГц) и/или HXR-излучение; плазменное радиоизлучение на частотах <1415 МГц и непрерывные радиовсплески IV, V и VI типов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны организаторам Первой конференции им. М.И. Панасюка «Проблемы космофизики» 10–13 июля в г. Дубна за предоставленные возможности и гостеприимство, часть статьи, посвященная событиям февраля 2023 г., основана на материалах доклада на этой конференции; А.А. Лутовину за демонстрацию данных монитора радиационной обстановки ART-XC и февральских событий 2023 г. (АБС и АМС); участникам космических экспериментов, создавшим базы данных ART-XC, GOES, ACS SPI, SOHO/EPHIN, SOHO/LASCO, Solar Orbiter/STIX.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа была поддержана субсидиями по темам «Плазма» (АБС и АМС) в Институте космических исследований Российской академии наук и «МАС» (ИЮГ) в Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Papaioannou A., Kouloumvakos A., Mishev A. et al.* The first ground-level enhancement of solar cycle 25 on 28 October 2021 // *Astronomy and Astrophysics*. 2022. V. 660. Art. ID. L5. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142855>
2. *Mishev A.L., Kocharov L.G., Koldobskiy S.A. et al.* High resolution spectral and anisotropy characteristics of solar protons during the GLE № 73 on 28 October 2021 derived with neutron monitor analyses // *Solar Physics*. 2022. V. 298. Iss. 7. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-02026-0>
3. *Klein K.-L., Musset S., Vilmer N. et al.* The relativistic solar particle event on 28 October 2021: Evidence of particle acceleration within and escape from the solar corona // *Astronomy and Astrophysics*. 2022. V. 663. Art. ID. A173. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243903>
4. *Bazilevskaya G.A., Cliver E.W., Kovaltsov G.A. et al.* Solar Cycle in the Heliosphere and Cosmic Rays // *Space Sci. Rev.* 2014. V. 186. P. 409–435. DOI: 10.1007/s11214-014-0084-0
5. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.* Солнечные релятивистские электроны и протоны 28 октября 2021 года (GLE73) // *Изв. РАН. Сер. Физ.* 2023. Т. 87. № 7. С. 1028–1032. <https://doi.org/10.31857/S0367676523701818>
6. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Логачев Ю.И., Садовский А.М.* Корональное распространение солнечных протонов во время и после их стохастического ускорения // *Косм. исслед.* 2023. Т. 61. № 3. С. 230–241. <https://doi.org/10.31857/S0023420622600246>, EDN: BVHXGS
7. *Klein K.-L., Trotter G., Klassen A.* Energetic Particle Acceleration and Propagation in Strong CME-Less Flares // *Solar Physics*. 2010. V. 263. Art. ID. 185. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9540-5>
8. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.* Связь между длительностью и величиной ускорения корональных выбросов массы // *Геомагнетизм и аэронаука*. 2021. Т. 61. № 6. С. 683–693. <https://doi.org/10.31857/S001679402105014X>
9. *Grigor'eva I. Yu., Struminsky A.B.* Flares Unaccompanied by Interplanetary Coronal Mass Ejections and Solar Proton Events. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2021. V. 61. Art. ID. 1263 <https://doi.org/10.1134/S0016793221080090>
10. *Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И. и др.* Солнечные электроны и протоны в событиях 4–10 сентября 2017 года и сопутствующие явления // *Физика Плазмы*. 2020. Т. 46. № 2. С. 139–153. <https://doi.org/10.31857/S0367292120020134>
11. *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. V. 102. Iss. A7. P. 14631–14660. <https://doi.org/10.1029/97JA00976>
12. *Altynsev A.T., Meshalkina N.S., Lysenko A.L. et al.* Rapid Variability in the SOL 2011-08-04 Flare: Implications for Electron Acceleration // *Astrophys. J.* 2019. V. 883. Art. ID. 38. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab380>
13. *Лысенко А.Л., Фредерикс Д.Д., Флейшман Г.Д. и др.* Рентгеновское и гамма-излучение солнечных вспышек // *УФН*. 2020. Т. 190. С. 878–894. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.06.038757>
14. *Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю.* Предсказание протонных событий по солнечным наблюдениям в реальном времени // *Геомагнетизм и Аэронаука*. 2023. (Принято в печать).
15. *Müller-Mellin R., Kunow H., Fleißner V. et al.* COSTEP – Comprehensive suprathermal and energetic particle analyse // *Solar Physics*. 1995. V. 162. Art.ID. 483.
16. *Aschwanden M.J.* The localization of particle acceleration sites in solar flares and CMEs // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 124. P. 361–372.
17. *Струминский А.Б., Садовский А.М., Григорьева И.Ю.* Расширение источника мягкого рентгеновского излучения и «магнитная детонация» в солнечных вспышках // *Письма в АЖ*. 2023. (Принято в печать).
18. *Núñez M., Paul-Pena D.* Predicting >10 MeV SEP Events from Solar Flare and Radio Burst Data // *Universe*. 2020. V. 6. Art.ID. 161. <https://doi.org/10.3390/universe6100161>
19. *Zheleznykov V.V., Zaitsev V.V.* The Origin of Type-V Solar Radio Bursts // *Soviet Astronomy*. 1968. V. 12. Art.ID. 14.
20. *Gopalswamy N., Yashiro G., Michalek, G. et al.* The SOHO/LASCO CME Catalog // *Earth, Moon and Planets*. 2009. V. 104. P. 295–313. <https://doi.org/10.1007/s11038-008-9282-7>
21. *Chertok I.M.* On some features of the solar proton event on 2021 October 28 – GLE73 // *MNRAS*. 2022. V. 517. Iss. 2. P. 2709–2713. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac2843>
22. *Ишков В.Н.* Прогноз солнечных вспышечных явлений: солнечные протонные события // *Изв. РАН Сер. Физ.* 2023. Т. 87. № 7. С. 1010–1013. <https://doi.org/10.31857/S0367676523701788>
23. *Swalwell B., Dalla S., Walsch R.W.* Solar Energetic Particle Forcasting Algorithms and Associated False Alarms // *Solar Physics*. 2017. V. 292. Art.ID. 173. <https://doi.org/10.10007/s11207-017-1196-y>
24. *Garcia H.A.* Forecasting methods for occurrence and magnitude of proton storms with solar soft X rays // *Space Weather*. 2004. V. 2. Art.ID. S02002. <https://doi.org/10.1029/2003SW000001>
25. *Belov A., Kurt V., Mavromichalaki H. et al.* Peak-size distributions of proton fluxes and associated soft X-ray flares // *Solar Physics*. 2007. V. 246. Iss. 2. P. 457–470.
26. *Белов А.В.* Вспышки, выбросы, протонные события // *Геомагнетизм и Аэронаука*. 2017. Т. 57. № 6. С. 783–793. <https://doi.org/10.7868/S0016794017060025>
27. *Alberti L.M., Cliver E.W., Storini M. et al.* Solar Activity from 2006 to 2014 and Short-term Forecasts of Solar Proton Events Using the ESPERTA Model // *Astrophys. J.* 2017. V. 838. Art.ID. 59. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5cb8>

28. *Kahler S.W., White S.M., Ling A.G.* Forecasting $E > 50$ -MeV proton events with the proton prediction system (PPS) // *J. Space Weather Space Clim.* 2017. V. 7. Art. ID. A27. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017025>
29. *Núñez M.* Predicting solar energetic proton events ($E > 10$ MeV) // *Space Weather.* 2011. V. 9. Art.ID. S07003. <https://doi.org/10.1029/2010SW000640>
30. *Núñez M.* Real-time prediction of the occurrence and intensity of the first hours of >100 MeV solar energetic proton events // *Space Weather.* 2015. V. 13. P. 807–819. <https://doi.org/10.1002/2015SW001256>
31. *Núñez M.* Predicting well-connected SEP events from observations of solarsoft X-rays and near-relativistic electrons // *J. Space Weather Space Clim.* 2018. V. 8. Art. ID. A3.
32. *Ling A.G., Kahler S.W.* Peak Temperatures of Large X-Ray Flares and Associated CME Speeds and Widths // *Astrophys. J.* 2020. V. 891. Art.ID. 54. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6f6c>
33. *Kiplinger A.* Comparative studies of hard X-ray spectral evolution in solar flares with high energy proton events observed at Earth // *Astrophys. J.* 1995. V. 453. P. 973–986. DOI: 10.1086/176457.
34. *Kahler S.W.* Solar energetic particle events and the Kiplinger Effect // *Astrophys. J.* 2012. V. 747. Art.ID. 66. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/747/1/66>
35. *Чертюк И.М.* Диагностический анализ солнечных протонных вспышек сентября 2017 г. по их радиовсплескам // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2018. Т. 58. № 4. С. 471–478. DOI: 10.1134/S001679401804003X. Chertok I.M. Diagnostic analysis of the solar proton flares of September, 2017 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. V. 58. P. 457–463.
36. *Hudson H.S., Simões P.J.A., Fletcher L. et al.* Hot X-ray onsets of solar flares // *MNRAS.* 2021. V. 501. Art. ID. 1273. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3664>, arXiv: arXiv:2007.05310 Bibcode: 2021.501.1273H
37. *Цан Ю.Т., Мельников В.Ф.* Температура столкновительной плазмы и бетатронное ускорение квазипереплювых электронов в солнечных вспышках // *Письма в АЖ.* 2023. Т. 49. № 4. С. 289–298. <https://doi.org/10.31857/S0320010823040058>
38. *Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.* Формирование источника солнечных космических лучей в эруптивных вспышках X6.9 9 августа 2011 г. M5.1 и 17 мая 2012 г. // *Астрономический журнал.* 2022. Т. 99. № 6. С. 486–495. <https://doi.org/10.31857/S0004629922060044>

УДК 523.62-726

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ПЕРИОДЫ СОБЫТИЙ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ В ФЕВРАЛЕ – МАРТЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. С. А. Стародубцев, П. Ю. Гололобов, В. Г. Григорьев, А. С. Зверев*

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия

*ZyrevAS@ikfia.ysn.ru

Поступила в редакцию 16.08.2023

После доработки 25.08.2023

Принята к публикации 06.09.2023

Сообщается об изучении МГД-волн в плазме солнечного ветра во время двух геоэффективных событий космической погоды в феврале – марте 2023 г. В это время на Земле наблюдались различные геофизические явления: интенсивные магнитные бури, понижения интенсивности галактических космических лучей, полярные сияния и ряд других проявлений космической погоды. Для изучения ситуации в околоземном космическом пространстве в работе использовались данные прямых измерений параметров межпланетной среды на космических аппаратах *DSCOVR* и *ACE*. Применение методов спектрального анализа к данным прямых измерений параметров солнечного ветра на космическом аппарате *DSCOVR* позволило изучить характеристики и динамику альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн в инерционном диапазоне частот (от ~ 0.0001 до ~ 0.01 Гц) наблюдаемого спектра турбулентности солнечного ветра во время этих событий.

DOI: 10.31857/S0023420624020062, EDN: kzbkev

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия важным направлением исследований в области космической физики стала проблема прогноза космической погоды. Для ее решения привлекаются данные наблюдений, полученные с помощью различных приборов, установленных как на Земле, так и космических аппаратах (КА). При этом важной характеристикой прогноза является его заблаговременность и точность. Для спорадических явлений, которые вызывают наибольшие возмущения космической погоды, заблаговременность прогноза составляет несколько суток. Она определяется временем распространения крупномасштабных возмущений солнечного ветра (СВ) от источника на Солнце до Земли. Одним из возможных подходов к прогнозу космической погоды являются методы, в которых используются данные наземных измерений интенсивности галактических космических лучей (КЛ). Поскольку КЛ являются длиннопробежными заряженными частицами, эффекты временной динамики их потоков могут наблюдаться на значительном удалении от крупномасштабных возмущений СВ, которые инициируют изменение космической погоды на орбите Земли.

При таком подходе заблаговременность прогноза составляет 1–2 сут., что существенно больше времени, чем в прогнозе, использующем прямые измерения момента прихода возмущений СВ на КА, расположенные в точке Лагранжа $L1$ системы Солнце – Земля, которая составляет величину около 1 ч. Такого малого времени явно недостаточно для осуществления практических мероприятий с целью минимизации или предупреждения негативных проявлений космической погоды. Однако он дает существенно более точные оценки времени начала проявлений космической погоды на Земле и может служить для целей верификации прогноза на основе наземных измерений интенсивности КЛ с помощью нейтронных и мюонных детекторов.

При выработке прогноза космической погоды нужно понимать, какое именно проявление космической погоды прогнозируется и какая цель при этом преследуется. С нашей точки зрения, из всех наземных проявлений космической погоды наибольший практический интерес представляют мощные геомагнитные бури. Именно они, становясь причиной весьма больших геомагнитно наведенных токов, несут наибольшую потенциальную опасность аварий

и катастроф на протяженных линейных объектах (линиях электропередач, нефте- и газопроводах), на электростанциях и железных дорогах [1–3]. Это особенно важно для полярных областей Земли, где в силу структуры геомагнитного поля негативные проявления космической погоды носят наиболее выраженный характер, а наземные технические и экологические системы обладают наименьшим запасом устойчивости.

Создание обоснованных методов прогноза невозможно без построения физической картины связи различных процессов и явлений, протекающих в межпланетной среде с наземными проявлениями космической погоды. При использовании измерений КЛ основным модулирующим фактором для них является межпланетное магнитное поле (ММП) и его турбулентная составляющая. К последней относятся различные колебания и волны, которые постоянно присутствуют в СВ, детальные сведения об их свойствах необходимы для понимания протекающих физических процессов как в околоземном космическом пространстве, так и в системе магнитосфера – ионосфера и, возможно, опосредованно в атмосфере Земли.

В связи с этим настоящая работа посвящена экспериментальному изучению свойств турбулентности СВ, точнее ее части – магнитогидродинамических волн (МГД-волн), в околоземном космическом пространстве во время геофизических событий в феврале – марте 2023 г. В это время на Земле вследствие резких изменений космической погоды наблюдались разного типа пульсации магнитного поля, интенсивные магнитные бури, полярные сияния и понижения интенсивности галактических КЛ, изучение которых представляет отдельный и значительный интерес.

ДАнные И МЕТОД

Для изучения и анализа геоэффективных событий в феврале – марте 2023 г. в работе использовались одночасовые данные измерений *Dst*-индекса геомагнитной активности из широко известной базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>), а также сведения о характеристиках межпланетных корональных выбросов массы (КВМ), представленные в каталоге <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>.

В целях изучения свойств турбулентности межпланетной среды использовались одноминутные данные прямых измерений параметров ММП и СВ на находящихся в точке либрации *L1*

КА *DSCOVR* (<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/index.html#/>) и одночасовые данные детектора LEMS120 эксперимента EPAM, проводимого на борту КА *ACE* (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html>). Этот детектор предназначен для регистрации КЛ низких энергий, главным образом протонов в восьми различных неперекрывающихся дифференциальных каналах, охватывающих диапазон энергий от 0.047 до 4.8 МэВ.

Как известно, МГД-волны, наблюдаемые на инерционном участке спектра турбулентности СВ, в области частот от $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{-1}$ Гц, в соответствии с их природой делятся на три типа: альфвеновские (АВ), быстрые (БМЗВ) и медленные магнитозвуковые волны (ММЗВ) [4]. Однако отождествление наблюдаемых в экспериментах флуктуаций параметров межпланетной среды с известными типами МГД-волн является непростой задачей. Трудности идентификации возникают вследствие того, что флуктуации ММП и плазмы СВ, как правило, являются совокупностью волн различных частот и типов, статических колебаний в замороженных в плазму СВ и переносимых вместе с ним, различного рода разрывов среды, а также из-за часто неполного набора измеряемых параметров или недостаточно высокого качества их измерений. Линейная теория МГД-волн в плазме устанавливает их основные свойства, согласно которым высокая степень корреляции между величиной ММП *B* и скоростью СВ *U* свидетельствует о наличии в межпланетной среде определенной доли АВ, между *B* и плотностью СВ *n* – БМЗВ, а между *U* и *n* – ММЗВ [5, 6].

Поскольку, как правило, амплитуды МГД-волн имеют незначительные, относительно средних значений параметров СВ, величины, то для их выделения из данных прямых измерений мы использовали методы спектрального анализа. При этом спектральные оценки мощности флуктуаций напряженности ММП *B*, скорости *U* и плотности *n* СВ производились нами с использованием стандартного метода Блэкмана – Тьюки с применением корреляционного окна Тьюки [7, 8]. Для определения типа МГД-волн, их вклада в наблюдаемый спектр ММП и установления их спектров мощности мы использовали свойства коэффициента когерентности $\Gamma(\nu)$, который является аналогом коэффициента корреляции только не во временной, а частотной области. Важно заметить, что по определению коэффициент когерентности $\Gamma(\nu)$ является положительным значением квадратного корня от функции

когерентности $\Gamma^2(\nu)$ и также, в отличие от коэффициента корреляции, является не просто числом, а функцией от частоты ν . В этом случае для установления спектра определенного типа МГД-волн нужно просто домножить наблюдаемый спектр мощности модуля ММП $P_{|B|}$, в котором содержится информация обо всех колебаниях и типах МГД-волн, на соответствующие значения коэффициента когерентности между указанными выше величинами ММП и СВ — $\Gamma_{BU}(\nu)$, $\Gamma_{Bn}(\nu)$ и $\Gamma_{Un}(\nu)$, которые и определяют вклад в него определенного типа МГД-волн [9, 10]. Отметим также, что используемые в настоящей статье алгоритмы и процедуры для определения спектральных оценок детально описаны в нашей недавней работе [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для начала кратко рассмотрим события в геомагнитном поле в феврале — марте 2023 г.

Первое событие интенсивной геомагнитной бури в конце февраля (рис. 1а) было вызвано прохождением через орбиту Земли КВМ, распространяющегося с большой транзитной скоростью (≈ 1080 км/с), который сопровождался отошедшей от него межпланетной ударной волной (МУВ) и значительными потоками штормовых частиц. На КА *DISCOVER* приход МУВ зарегистрирован в 18:42 UT 26.II.2023 (рис. 2а–в). Максимальное значение модуля ММП на фронте МУВ составило величину $|B| \approx 19.9$ нТл, при этом в турбулентной области за фронтом МУВ минимальное значение $B_z \approx -16.7$ нТл было зарегистрировано в 20:50 UT 26.II.2023.

Затем северо-южная составляющая поля B_z систематически флуктуировала, имея при этом преимущественно отрицательные значения, и в 10:28 UT 27.II.2023 достигла очередного минимума $B_z \approx -17.3$ нТл. В результате прохождения этого крупномасштабного возмущения СВ в 19:00 UT 26.II.2023 на Земле было зарегистрировано внезапное начало интенсивной магнитной бури (рис. 1а), а через 17 ч, на главной фазе бури в 12:00 UT 27.II.2023, минимальное значение Dst -индекса достигло значения -132 нТл. Далее началась обычная фаза восстановления бури. Нужно отметить, что из-за сильных флуктуаций B_z -компоненты ММП эта магнитная буря носила ступенчатый характер (рис. 1а).

Второе событие было также обусловлено прохождением через орбиту Земли КВМ. Но, в отличие от первого события, в нем наблюдалось ярко выраженное магнитное облако (МО) (рис. 2г–е), в котором минимальное значение B_z -компоненты ММП достигало величины -18.6 нТл. Этот КВМ распространялся с довольно низкой относительно фонового СВ средней транзитной скоростью ≈ 560 – 670 км/с, без образования МУВ. В результате на Земле также наблюдалась интенсивная геомагнитная буря (рис. 1б). Она началась около 08:00 UT 23.III.2023 с резкого падения и достигла минимума 02:00 UT 24.III.2023. При этом минимальное значение Dst -индекса составило величину -163 нТл. Нужно отметить, что это событие носило классический двухступенчатый характер, который был обусловлен наличием сильного МО [12–15].

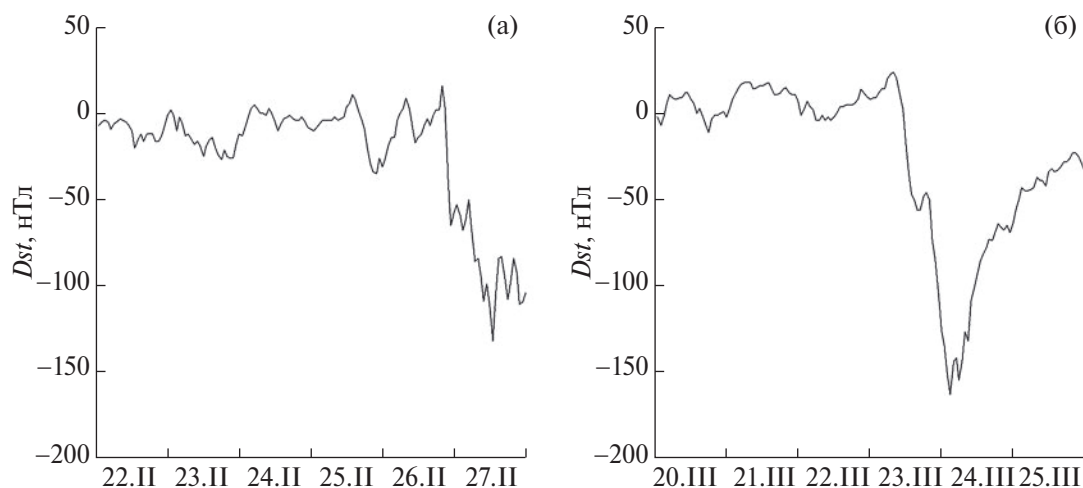


Рис. 1. Зависимость Dst -индекса геомагнитной активности от времени для событий интенсивных геомагнитных бурь в конце 26.II.2023 (а) и начале 23.III.2023 (б).

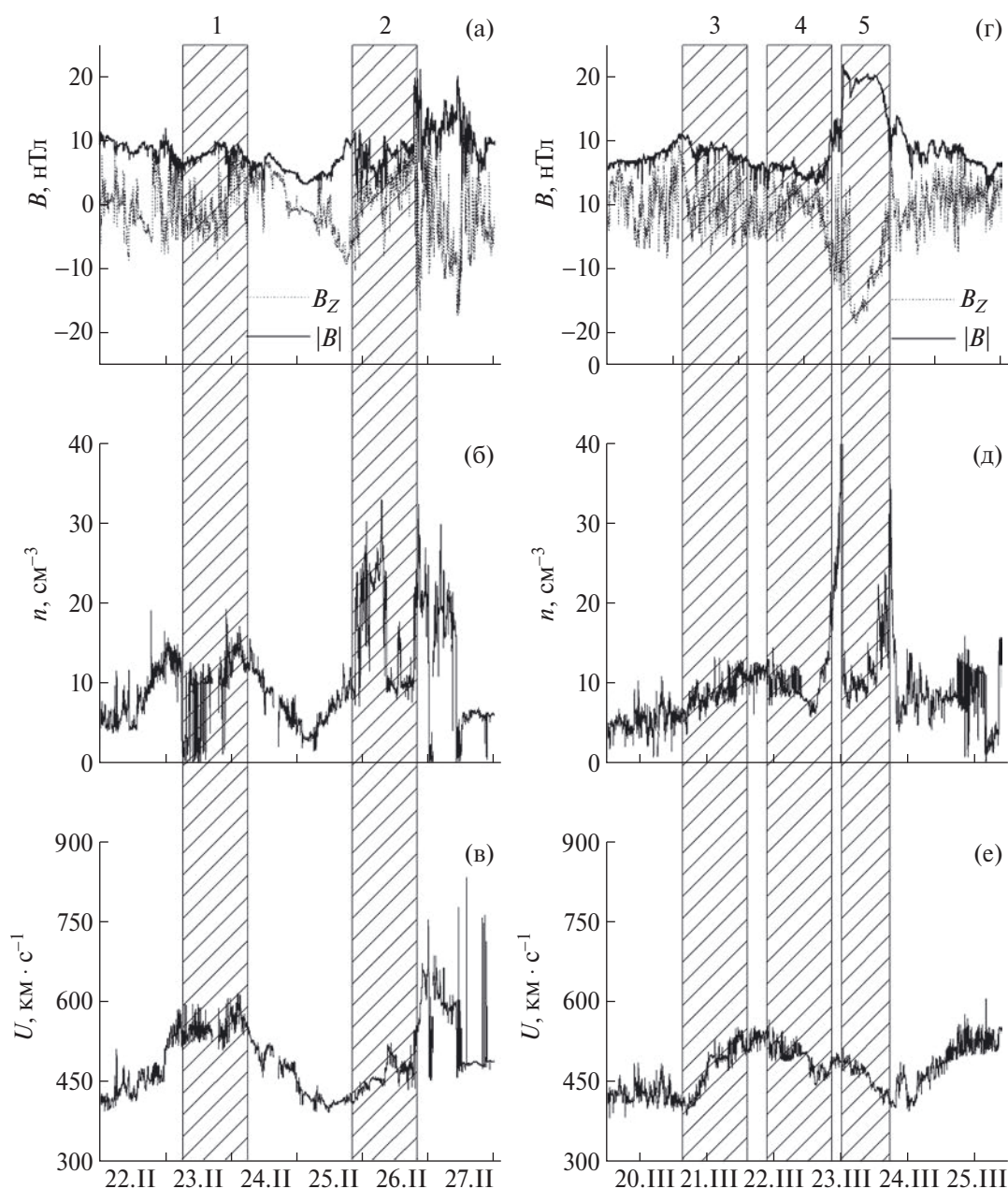


Рис. 2. Зависимость параметров межпланетной среды от времени. На панелях (а–в) показаны модули $|B|$ и B_z -компонента ММП в GSE -системе координат, плотность n и скорость U СВ для периода 22–27.II.2023 и то же самое на панелях (г–е) для 20–25.III.2023 соответственно. Заштрихованными областями и цифрами 1–5 над ними обозначены интервалы времени, для которых на рис. 3, 5 и 6 приводятся параметры МГД-волн.

Перейдем теперь к анализу межпланетной обстановки и определению характеристик турбулентности СВ в это время.

На рис. 2 приведена информация об изменениях модуля $|B|$ и B_z -компоненты ММП в GSE -системе координат (рис. 2а), плотности

n (рис. 2б) и скорости U СВ (рис. 2в) для периода 22–27.II.2023. На рис. 2г–е показаны соответствующие изменения этих же параметров для интервала 20–25.III.2023. На этом рисунке заштрихованными областями и цифрами над ними обозначены области, для которых в качестве примеров ниже будут представлены характеристики

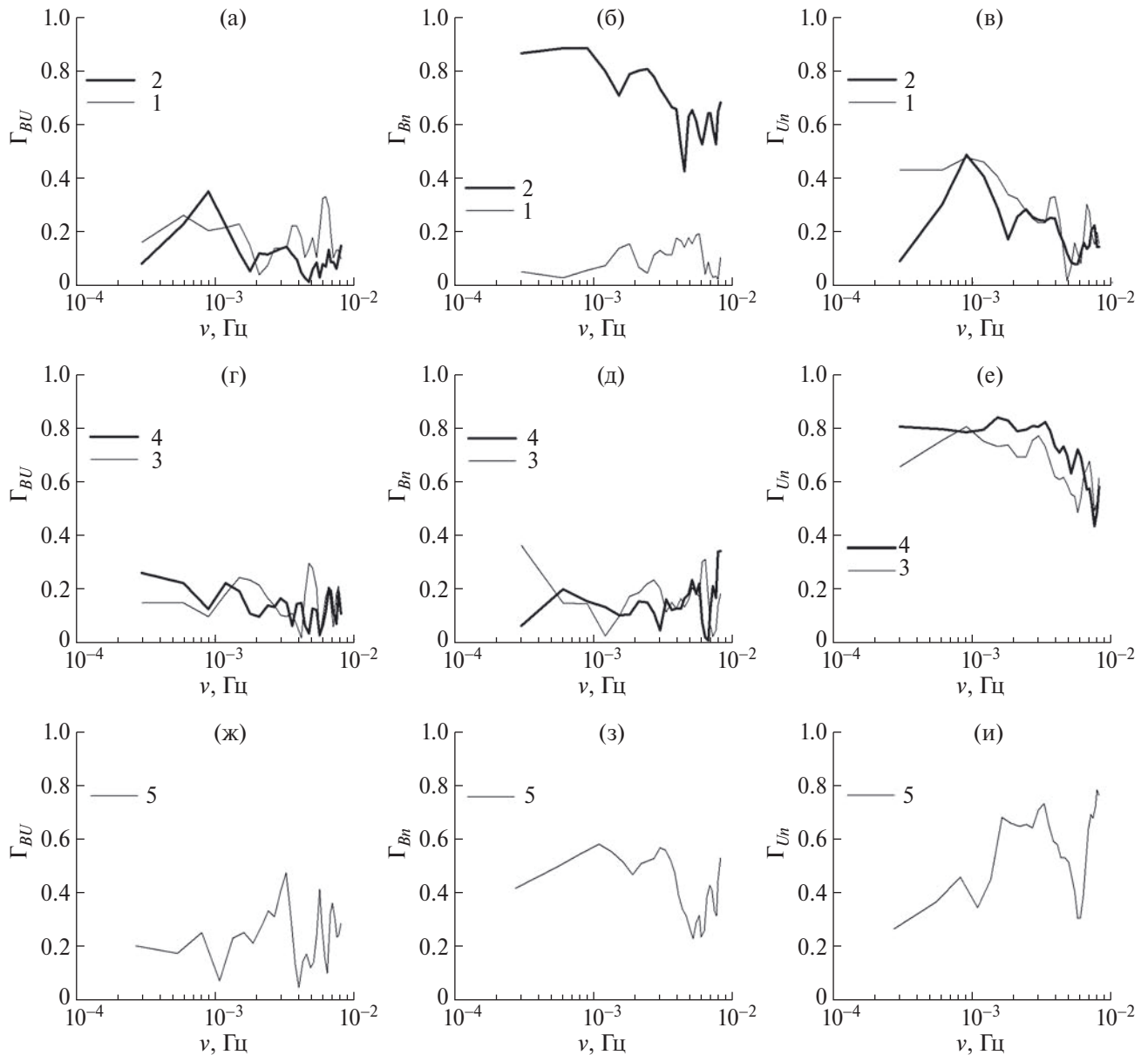


Рис. 3. Зависимость коэффициентов когерентности $\Gamma_{BU}(\nu)$, $\Gamma_{Bn}(\nu)$ и $\Gamma_{Un}(\nu)$ от частоты ν , характеризующих вклад альфвеновских (а, г, ж), быстрых (б, д, з) и медленных (в, е, и) магнитозвуковых волн в наблюдаемые спектры мощности модуля ММП $P_{|B|}$. Легенда для интервалов времени 1–5 приведена.

МГД-турбулентности СВ. На рис. 2 цифры 1 и 3 соответствуют периодам за несколько дней до прихода на орбиту Земли возмущений СВ, ответственных за геомагнитные бури, цифрами 2 и 4 показаны области непосредственно перед КВМ, а цифрой 5 отмечено МО во втором событии.

Из рис. 2 следует, что в рассматриваемое время межпланетная среда была достаточно возмущена, ее параметры превышают хорошо известные средние величины ММП и плазмы СВ для спокойной ситуации в межпланетной среде [6].

На рис. 3 показаны определенные нами коэффициенты когерентности $\Gamma_{BU}(\nu)$, $\Gamma_{Bn}(\nu)$ и $\Gamma_{Un}(\nu)$ как функции частоты ν для интервалов времени 1 и 2 (а, б, в), 3 и 4 (г, д, е), а также 5 (ж, з, и) соответственно. Как было сказано выше, их значения соответствуют вкладу определенного типа МГД-волн в наблюдаемый спектр мощности флуктуаций модуля ММП $|B|$ на определенной частоте ν . Как видно из рис. 3а, г, ж доля АВ во все отмеченные на рис. 2 цифрами интервалы времени не очень велика. Она не превышает 30% в рассматриваемые периоды времени 1,

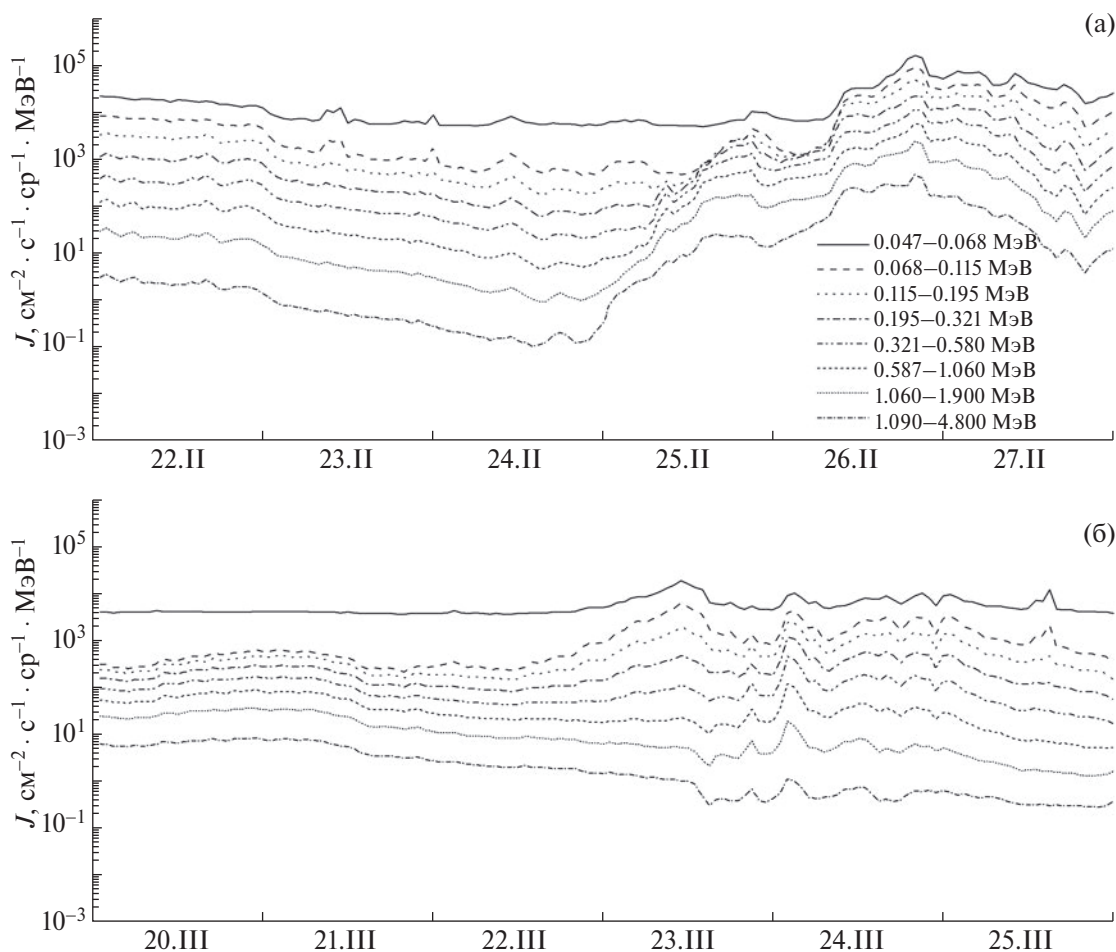


Рис. 4. Зависимость потоков низкоэнергичных КЛ в различных дифференциальных каналах, зарегистрированных на борту КА ACE в эксперименте EPAM детектор LEMS120, от времени для 22–27.И.2023 (а) и 20–25.ИИ.2023 (б). Легенда для восьми дифференциальных энергетических каналов приведена.

3 и 4, однако возрастает до $\approx 40\text{--}50\%$ на разных выделенных частотах для интервалов времени 2 и 5, т.е. непосредственно перед приходом МУВ 26 И.2023 в первом и непосредственно в самом МО во втором событии.

С другой стороны, количество БМЗВ (рис. 3б, д, з) в периоды 1, 3 и 4 также не превышает $\approx 40\%$. Однако, как видно на рис. 3б, их вклад существенно возрастает (до $\approx 60\text{--}90\%$ на разных частотах) в области непосредственно перед МУВ (интервал 2). Такой рост величины $\Gamma_{Bn}(v)$ можно понять исходя из результатов работ [10, 16], в которых показано, что наличие штормовых частиц перед фронтами МУВ, характеризующимися большими потоками и значительными пространственными градиентами, способны генерировать в межпланетной среде БМЗВ значительной амплитуды. Что в этом случае и наблюдалось (рис. 4а). Но причина большой доли (до $\approx 60\%$) БМЗВ внутри МО (интервал 5) остается для нас

неясной (рис. 3з). Отметим, что КЛ низких энергий с указанными выше свойствами в нем не наблюдалось (рис. 4б).

Нужно отметить весьма высокое содержание доли ММЗВ во все отмеченные на рис. 2 интервалы времени. Рис. 3в, е, и дает представление об их количестве во всех пяти интервалах времени.

Здесь нужно заметить, что АВ наблюдаются весьма часто, поскольку хорошо известно, что они имеют незначительные декременты затухания и могут распространяться от источника на Солнце или вблизи него на большие расстояния далеко за орбиту Земли [6], поэтому вполне понятно, что они обнаружены во всех изучаемых нами случаях. Но магнитозвуковые волны, наоборот, характеризуются большими декрементами затухания, поэтому факт их обнаружения означает, что они были генерированы локально, недалеко от орбиты Земли. И если генерацию

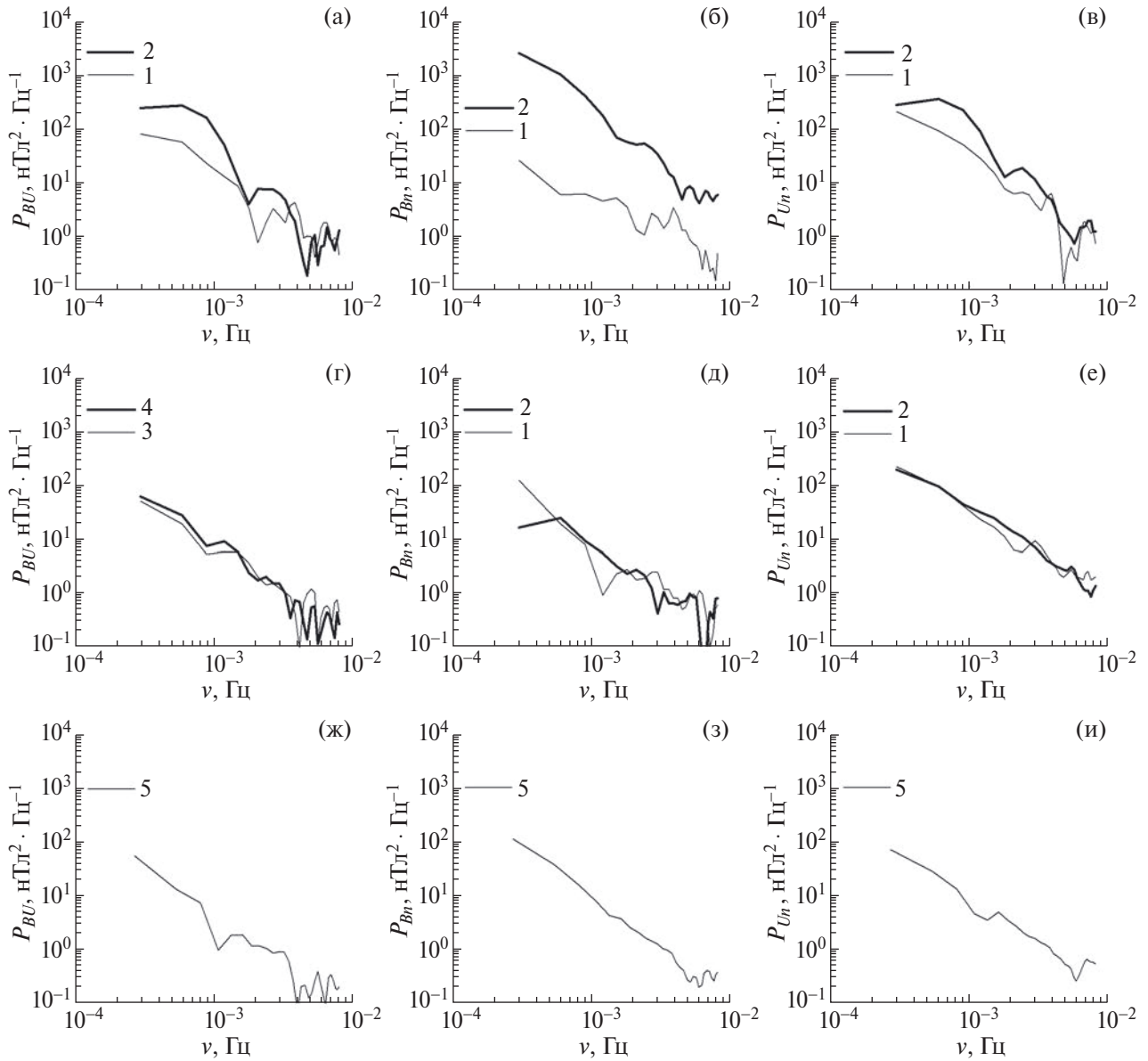


Рис. 5. Спектры мощности $P_{BU}(\nu)$, $P_{Bn}(\nu)$, $P_{Un}(\nu)$ соответственно для альфвеновских (а, г, ж), быстрых (б, д, з) и медленных (в, е, и) магнитозвуковых волн в зависимости от частоты ν . Легенда соответствующих интервалов времени 1–5 приведена.

БМЗВ можно объяснить, например, наличием потоков штормовых частиц [10, 16], то наблюдение достаточно высокой доли ММЗВ в спектрах турбулентности СВ требует своего объяснения, которое для нас остается неясным.

На рис. 5 показаны установленные спектры всех трех типов МГД-волн для всех пяти интервалов времени. На панелях (а, г, ж) приведены спектры мощности АВ, на панелях (б, д, з) — БМЗВ, а на панелях (в, е, и) — ММЗВ. Они получены простым перемножением наблюдаемых в это время спектров мощности модуля ММП

$|B|$ на соответствующие им коэффициенты когерентности [10, 11]. На рис. 5 ясно видны изменения в спектрах мощности трех ветвей МГД-волн со временем. Очевидно, что наибольшие изменения мощности (на один – два порядка величины на разных частотах) происходят в спектрах мощности флуктуаций БМЗВ в области 2, непосредственно примыкающей к фронту МУВ, т.е. там, где согласно работам [10, 16] они должны интенсивно раскачиваться потоками штормовых частиц (рис. 4а). В другие же интервалы времени такого заметного изменения мощности МГД-волн не наблюдается.

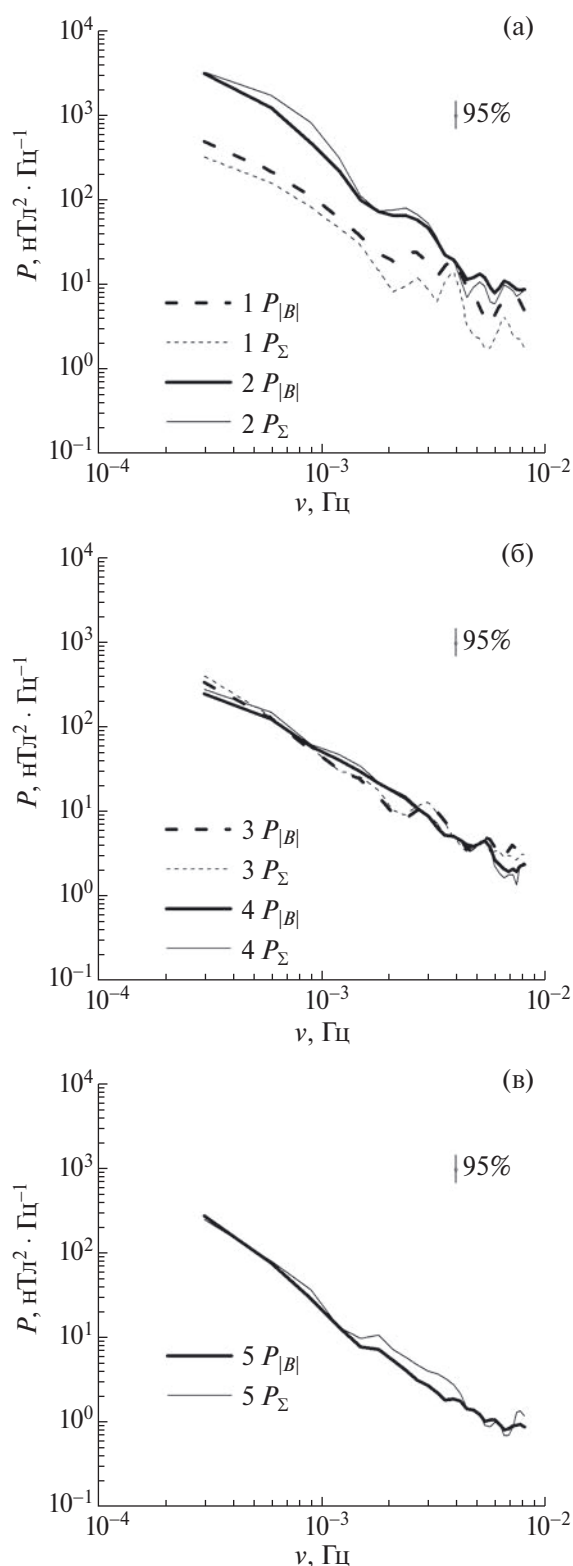


Рис. 6. Наблюдаемые спектры мощности модуля ММП ($P_{|B|}$) и суммы спектров альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн (P_{Σ}) для интервалов времени 1–5. Указаны 95% доверительных интервалов. Легенда приведена.

На рис. 6а, б, в приведены спектры мощности флуктуаций модуля ММП $P_{|B|}$ для всех пяти интервалов времени, а также соответствующие им суммы спектров всех трех типов установленных нами МГД-волн P_{Σ} . Из него видно, что в пределах 95% доверительных интервалов эти значения хорошо согласуются между собой. Незначительные расхождения в оценках спектров мощности можно отнести за счет всегда присутствующих в межпланетной среде разного рода разрывов и статических колебаний, которые вморожены в СВ и переносятся в межпланетной среде вместе с ним. Результаты сравнения спектров турбулентности СВ, представленных на рис. 6, свидетельствуют о правильности применения методов спектрального анализа для выделения определенных типов МГД-волн на основе данных прямых измерений параметров ММП и плазмы СВ на КА *DSCOVR*.

ВЫВОДЫ

Интенсивные геомагнитные бури, начавшиеся в конце 26.II.2023 и начале 23.III.2023, обусловлены прохождением через орбиту Земли двух межпланетных КВМ, характеризующихся значительными отрицательными величинами B_z -компоненты ММП. Характерными свойствами этих КВМ является то, что они распространялись от источника на Солнце до орбиты Земли с различными транзитными скоростями. В результате чего в первом событии перед КВМ была зарегистрирована МУВ, а во втором — нет, однако внутри него содержалось сильное МО.

На основе данных прямых измерений параметров ММП и плазмы СВ на КА *DSCOVR* определен вклад каждой из трех веток (альфвеновской, быстрой и медленной магнитозвуковой) МГД-волн в наблюдаемый спектр модуля ММП в различные периоды во время прохождения через орбиту Земли КВМ с различными свойствами.

Установлены спектры мощности альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых волн, которые существовали в окрестности КВМ во время интенсивных геомагнитных бурь в феврале — марте 2023 г.

Показано, что использование методов спектрального анализа позволяет корректно идентифицировать наличие на инерционном участке спектра турбулентности СВ в диапазоне частот от $\sim 10^{-4}$ до $\sim 10^{-1}$ Гц трех веток МГД-волн: альфвеновских, быстрых и медленных магнитозвуковых.

Причина значительного количества медленных магнитозвуковых волн в околоземном космическом пространстве в изучаемые периоды времени остается неизвестной.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят NOAA, ACE Science Centers и Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism (Kyoto University) за предоставление свободного доступа к данным космических аппаратов DSCOVR и ACE, а также к информации о текущих значениях *Dst*-индекса геомагнитной активности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-20045).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kappenman J.G.* Space Weather and the Vulnerability of Electric Power Grids // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. NATO Science Series II: Mathematics. 2004. V. 176. P. 257–286.
2. *Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Hajra. R.* The physics of space weather/solar-terrestrial physics (STP): what we know now and what the current and future challenges are // Nonlin. Processes Geophys. 2020. V. 27. P. 75–119. <https://doi.org/10.5194/npg-27-75-2020>
3. *Pilipenko V.A., Chernikov A.A., Soloviev A.A. et al.* Influence of Space Weather on the Reliability of the Transport System Functioning at High Latitudes // Russian J. Earth Sciences. 2023. V. 23. Iss. 2. Art.ID. ES2008. (In Russian) <https://doi.org/10.2205/2023ES000824>
4. *Буттенкорт Ж.А.* Основы физики плазмы. Москва: Физматлит, 2009.
5. *Neugebauer M., Wu C.S., Huba J.D.* Plasma fluctuations in the solar wind // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 1027–1034.
6. *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. Москва: Наука, 1983.
7. *Jenkins G.M., Watts D.G.* Spectral Analysis and Its Applications. San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam: Holden-Day, 1968.
8. *Отнес Р., Эноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. Москва: Мир, 1982.
9. *Luttrell A.H., Richter A.K.* A study of MHD fluctuations upstream and downstream of quasi-parallel interplanetary shocks // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 2243–2252.
10. *Бережко Е.Г., Стародубцев С.А.* Природа динамики спектра флуктуаций космических лучей // Изв. АН СССР. Серия физическая. 1988. Т. 52. С. 2361–2363.
11. *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. <https://doi.org/10.12737/szf-92202309>
12. *Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W.* Two-step development of geomagnetic storms // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 6917–6921.
13. *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. P. 529–562.
14. *Parnahaj I., Kudela K.* Forbush Decreases, Geomagnetic Storms, and Interplanetary Structures // WDS'14 Proceedings of Contributed Papers – Physics. 2014. P. 310–315.
15. *Kudela K., Brenkus R.* Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982–2002 // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2004. V. 66. P. 1121–1126. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.007>
16. *Бережко Е.Г.* Неустойчивость в ударной волне, распространяющейся в газе с космическими лучами. // Письма в Астрон. журн. 1986. Т. 12. С. 842–847.

УДК: 514.2, 519.1, 523.9, 537.5

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВЕКТОРНЫХ ГРАФОВ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. Ю. А. Антонов¹, В. И. Захаров¹, И. Н. Мягкова²,
Н. А. Сухарева^{1,2,*}, Ю. С. Шугай²

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*suhareva@phys.msu.ru

Поступила в редакцию 20.08.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принята к публикации 26.10.2023 г.

В работе применены методы теории информации к исследованиям межпланетного магнитного поля и его вариаций в результате солнечной активности. Статистические закономерности проекций векторов межпланетного магнитного поля и скорости потока частиц солнечного ветра не несут информации о порядке реализации доступных состояний исследуемой физической системы. Вместе с тем подобные характеристики могут быть получены из фазовых диаграмм или фазовых портретов, создаваемых на основе экспериментальных выборок на подпространствах фазового пространства, которые отображают как значения векторных величин, так и порядок следования для конкретного временного ряда. В работе предложен метод синтеза векторных графов в фазовом подпространстве межпланетного магнитного поля. Рассмотрены результаты реконструкции и анализа реализуемых графов на основе временных рядов спутникового мониторинга состояния межпланетного магнитного поля, предоставляемые базой данных Центра космических полетов Годдарда (*англ.* NASA Goddard Space Flight Center) за апрель 2023 г. Граф строится на основе экспериментальных выборок для проекций векторов магнитных полей. В узлах графа сходятся и расходятся векторы полей, ребра графа позволяют контролировать анализируемую траекторию системы в фазовом подпространстве и восстанавливать дерево переходов для конкретного векторного поля. Вводится понятие сферической опорной поверхности векторного графа, позволяющей привести сравниваемые реализации графов к единому линейному масштабу и единой кривизне опорной поверхности. Рассмотрены примеры в условиях действия различных внешних факторов, связанных с магнитным полем Солнца и выбросами корональных масс.

DOI: 10.31857/S0023420624020076, EDN: kyrrkh

ВВЕДЕНИЕ

Межпланетное магнитное поле (ММП) является предметом пристального изучения уже более 100 лет, поскольку оно оказывает значительное влияние на проявления космической погоды на Земле, влияет на систему геосфер, оказывает воздействие на хозяйственную деятельность человечества. Еще в начале XX века Кристиан Биркеланд [1] высказывал догадку о непрерывном облучении Земли солнечным веществом. Параметры этого непрерывно истекающего солнечного вещества как потока плазмы со скоростями в несколько сотен километров в секунду практически независимо друг от друга определили в 50-х гг. XX века разные авторы, например Biermann [2]. Магнитное поле Солнца является динамичным и достаточно сложным

по структуре, но в целом оно удачно моделируется во многом в силу того, что мощность силовых линий солнечных пятен на несколько порядков превышает мощность силовых линий фонового магнитного поля. Не вдаваясь в подробности, упомянем лишь историческую модель Паркера [3, 4], одним из первых успешно обосновавшего эту идею с применением математического аппарата, которая успешно развивается по сей день [5, 6].

Солнечный ветер изучается длительное время. Это явление обычно представляется как поток заряженных частиц (плазмы), испускаемых Солнцем. Указанный поток состоит в основном из протонов и электронов и заморожен в солнечное магнитное поле. Части такого потока могут иметь разные скорости, что связано с различными регионами

на поверхности Солнца, из которых вылетает плазма. Во время вращения Солнца вокруг своей оси потоки плазмы, двигаясь в магнитном поле Солнца, которое имеет спиральную форму, накладываются на это магнитное поле. Установлено, что свойства солнечного ветра зависят от солнечной активности, причем внезапные изменения в параметрах ветра (концентрации частиц и их скорости) влияют на форму магнитосферы Земли и могут порождать геомагнитные бури, которые способны вызывать нарушения в наземной связи. Таким образом, солнечный ветер по сути является потоком заряженных частиц различных энергий, которые могут проникать в магнитосферу и даже попасть в верхние слои атмосферы в регионах образования авроральных овалов, порождая полярное сияние.

Итак, ММП представляет собой сложную стохастическую открытую систему, эволюция которой определяется множеством внешних и внутренних факторов, прежде всего потоком частиц солнечного ветра, энергетикой и диаграммой направленности космических лучей. Предметом исследования является тонкая структура ММП, динамика которой обусловлена солнечным ветром. Нестационарность, неоднородность и анизотропия пространственных распределений вероятности для значений компонент магнитного поля и внешних действующих факторов практически исключает применение к описанию подобных систем классического аппарата неравновесной статистической механики. Для открытых нелинейных динамических систем типичны коллективные или групповые процессы, инициируемые неоднородностью и анизотропией пространственного распределения энергии, нестационарностью и неоднородностью концентрации температурных характеристик. Подобную перестройку структуры исследуемой системы иногда допустимо описывать как фазовые переходы второго рода. Формально оба указанных процесса соответствуют формированию долгосрочной или глубокой памяти системы и дальнедействующих характеристик во взаимодействии элементов системы. Создание многопараметрических моделей подобных систем относится к задачам высокого уровня сложности, решаемым в условиях упрощений с принудительной иерархией протекающих в системе процессов [7–10].

В работе описан созданный и развиваемый авторами метод исследования пространственно-временной структуры вектора индукции магнитного поля, регистрируемого векторным магнитометром аппарата *Wind*, расположенного в точке Лагранжа $L1$. В основе метода лежит синтез фазовых траекторий в подпространстве магнитного

поля на основе экспериментально регистрируемых эквидистантных временных рядов с шагом дискретизации в 15 с и шагом квантования в 10^{-2} нТ. Шаг квантования связан с точностью работы датчиков, методикой регистрации и сглаживания значений, аппаратными погрешностями регистратора, логикой защиты от перегрузок. Орты в декартовой системе координат фазового пространства ориентированы согласно GSE (*англ.* Geocentric Solar Ecliptic system), значение времени регистрации соответствует номеру такта опроса. Переход между дискретным и непрерывным описанием возможен с привлечением билинейного преобразования или преобразования Мебиуса. Подпространство состояний магнитной подсистемы определим как однородное и изотропное пространство с совпадающим шагом квантования вдоль ортов. Каждая из ячеек фазового подпространства определяется координатой центра и значением шага квантования. Дискретная квантованная последовательность значений 3D-вектора магнитного поля может быть рассмотрена как 3D-цифровой сигнал:

$$\bar{B}_{ijk}[n],$$

определим кинематическую характеристику первого порядка как разность значений аргумента на текущем такте и предыдущем:

$$\delta \bar{B}_{ijk}[n] = \bar{B}_{ijk}[n] - \bar{B}_{ijk}[n-1].$$

Выполнив отображение зависимости первой кинематической переменной от значения аргумента, текущего значения вектора поля, получим искомого 3D-фазовую траекторию в магнитном подпространстве. Аналогично можно синтезировать фазовые портреты для кинематических характеристик высших порядков, информативных при описании процессов с дальнедействием, глубокой памятью или коллективными степенями свободы.

СТРУКТУРА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Постановка задачи предполагает использование экспериментальных выборок динамических переменных, соответствующих рассматриваемой физической системе. Принципиальной становится реализуемая разрешающая способность, позволяющая надежно регистрировать вариации физических характеристик в собственном масштабе времени системы, не теряя информацию о дальнедействующих процессах и процессах с пролонгированной памятью.

Использованы данные каталога Coordinated Data Analysis Web CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>), получаемые аппаратом *Wind* и представленные с несколькими интервалами

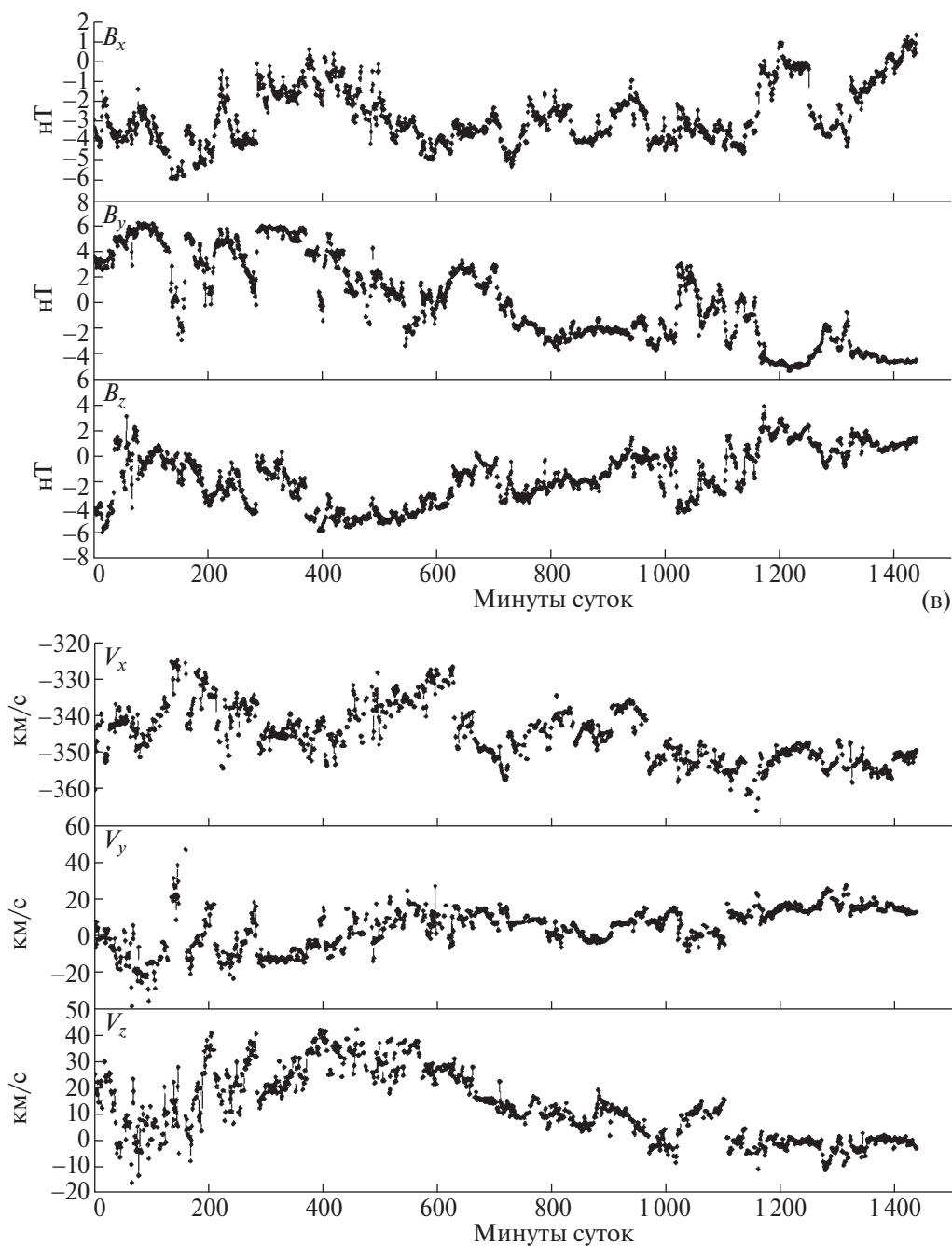


Рис. 1. Временные ряды проекций магнитного поля (три верхних ряда – B_x ; B_y ; B_z) и скорости потока частиц (три нижних ряда – V_x ; V_y ; V_z) в системе GSE 15.IV.2023.

дискретизации. Для синтеза векторных графов используются три шага дискретизации:

- 1 мин для квазисинхронной работы с выборками проекций вектора магнитного поля и проекций вектора скорости потока частиц, предварительного анализа эволюции графов (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/mfi/ascii/1min_ascii/);
- 15 с как основной шаг дискретизации, позволяющий различать вихревые и трансляционные структуры векторных полей (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/mfi/ascii/15sec_ascii/);
- 3 с для уточняющих реконструкций графов вектора ММП, анализа устойчивости синтеза фазовой траектории (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/mfi/ascii/3sec_ascii/).

Развиваемый аппарат векторных графов включает в анализ полную информацию как о значениях, так и порядке следования реализаций.

Для первичного анализа структуры рассмотрим векторный граф, соответствующий невозмущенному межпланетному полю. На рис. 1 представлены временные развертки временных рядов, регистрируемых для компонент магнитного поля и скорости потока частиц с временем дискретизации в 1 мин. Определим начало наблюдения номером такта 0, интервал наблюдения в 24 ч разделим на 8 трехчасовых фрагментов, каждый из которых содержит 3600 отсчетов. Зададим масштабную сетку 3D-фазового подпространства, на котором отображаются графы допустимых состояний ММП. Узел масштабной сетки может быть стоком или истоком в описании разрешенных переходов, ребра, соединяющие пары узлов, в общем случае не ограничены по длине и ориентации. Особенность вводимых векторных графов допускает два направления ребер между любой парой узлов и вырождение узлов, соответствующее наличию множественности стоков и истоков для каждого из узлов [11–15].

ОПОРНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ ВЕКТОРНОГО ГРАФА МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рассматриваемые векторные графы характеризуются не только распределениями реализаций значений по узлам, длинам ребер, но и их ориентацией. Для указания направления исходящего или входящего в узел ребра в отображениях графов используются треугольные указатели в позициях отдельно расположенных узлов. Если узел вырожден, т.е. имеет более одного входящего или исходящего ребра, маркеры ребер могут накладываться друг на друга, затеняя первичную структуру. По этой причине в данной работе мы отказались от отображения ребер и для “многоканальных” узлов используем упрощенные указатели.

Особенность всех рассмотренных графов, независимо от даты и времени экспериментальной выборки, — расположение узлов вблизи сферической поверхности. Для удобства сравнения различных выборок будем контролировать помимо эмпирической поверхности нормированную, радиус-вектор которой соответствует единице в выбранном масштабе проекций магнитного поля. Такой подход позволяет количественно сравнивать реализации графов, описывать эволюцию графа, деформации распределения по узлам. Принадлежность узлов направленного графа сферической оболочки очевидна

при условии сохранения плотности потока энергии магнитного поля, которое определяет профиль нормированных опорных поверхностей:

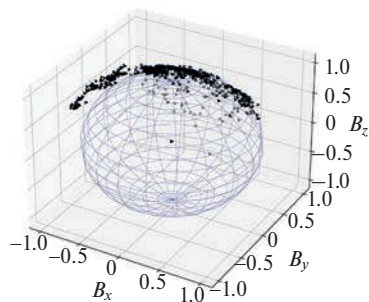
$$B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 = Const.$$

Корректное сравнение нескольких графов возможно при выравнивании пространственных масштабов компонент магнитного поля. Если в процессе анализа плотность энергии магнитного поля уменьшается или увеличивается, происходят деформации геометрии графа. Возрастание плотности энергии поля приводит к отрыву массива узлов от стартовой опорной поверхности, созданию нового слоя узлов и новой опорной поверхности. Убытие плотности энергии магнитного поля сопровождается отщеплением части слоя узлов, порождающим процесс перестройки на новый уровень размещения узлов. Описанные процессы создания и уничтожения как нормированных, так и не нормированных опорных сферических поверхностей позволяют в первом приближении охарактеризовать энергетику состояния ММП.

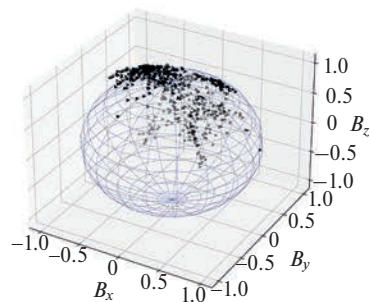
Для суточного интервала 15.IV.2023, соответствующего спокойному магнитному полю, аппарат находился в Θ секторе магнитного поля Солнца [16]. Определение знака сектора было выполнено на основе анализа недельного временного ряда для V_x -компоненты, прошедшего через фильтр низких частот с окном усреднения в 10000 отсчетов при частоте дискретизации в 15 с. На рис. 2 представлена серия из 8 векторных графов, полученных на основе рядов с интервалами опроса 15 с и временем накопления реализаций 3 ч. Анализируемые графы имеют сложную структуру, относятся к циклическим графам, не обладают свойствами деревьев. При анализе пространственных структур, проецируемых на нормированную опорную поверхность можно определить ряд характеристик, общих для отображаемой серии:

- геометрическое место размещения активных узлов векторного графа представляет собой дугу с углом раскрытия до $2/3 \pi$;
- проекция дуги на опорную поверхность совершает вращение, ориентация угловой скорости которого может быть вычислена методами тензорного анализа;
- получаемые значения радиуса кривизны компонент тензора инерции в системе координат, связанной с нормированной опорной поверхностью, значения векторов угловой скорости, частоты прецессии могут рассматриваться как собственные динамические свойства исследуемой системы.

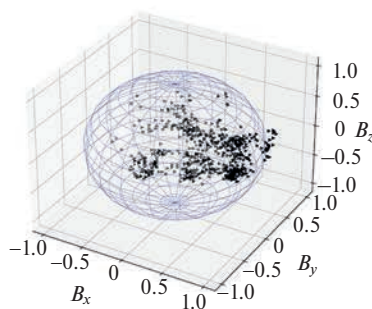
Коэффициент: $x = 0.2268$ $y = 0.1764$ $z = 0.1580$
15.IV.2023 00:00:00–02:59:45



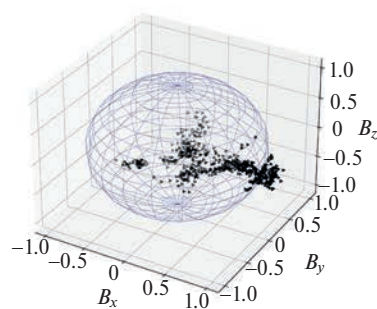
Коэффициент: $x = 0.1912$ $y = 0.1502$ $z = 0.1550$
15.IV.2023 03:00:00–05:59:45



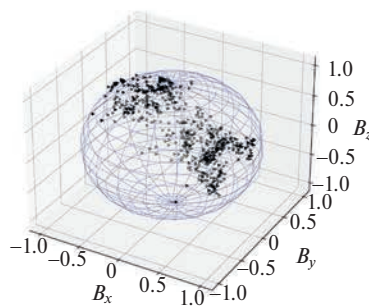
Коэффициент: $x = 0.1916$ $y = 0.1372$ $z = 0.1546$
15.IV.2023 06:00:00–08:59:45



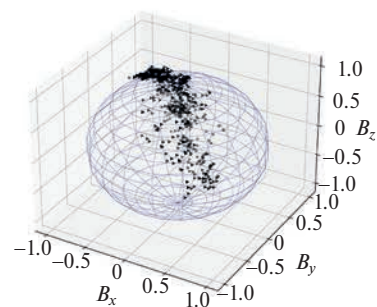
Коэффициент: $x = 0.2053$ $y = 0.1484$ $z = 0.1499$
15.IV.2023 09:00:00–11:59:45



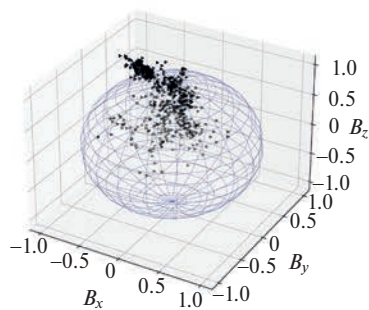
Коэффициент: $x = 0.1522$ $y = 0.1520$ $z = 0.1385$
15.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.1783$ $y = 0.1404$ $z = 0.1453$
15.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.1515$ $y = 0.1437$ $z = 0.1988$
15.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.2070$ $y = 0.1724$ $z = 0.1548$
15.IV.2023 21:00:00–23:59:45

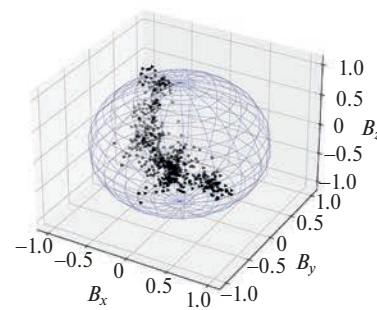


Рис. 2. Графы состояний 15.IV.2023.

СОБЫТИЯ 22–26 АПРЕЛЯ 2023 ГОДА

Рассмотрим серию событий, зарегистрированных в конце апреля 2023 г. и связанных со вспышечной активностью. В течение выбранного пятидневного интервала аппарат находится в \oplus секторе ММП, знак сектора определяется по аналогичному, интервал наблюдения включает 5 сут. (рис. 3), из которых 36 ч до и 48 ч после магнитной бури могут быть отнесены к режиму спокойного поля. Реконструкции векторных графов выполнены на основе

временных рядов с шагом дискретизации 15 с и интервалом накопления 3 ч. Фактически последовательность из 40 реконструкций позволяет визуализировать последовательность пространственного распределения векторов скорости и ориентации ММП, реализуемых на всех фазах развития рассматриваемого события. Для идентификации наблюдаемых событий использованы данные каталога: <https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.html>.

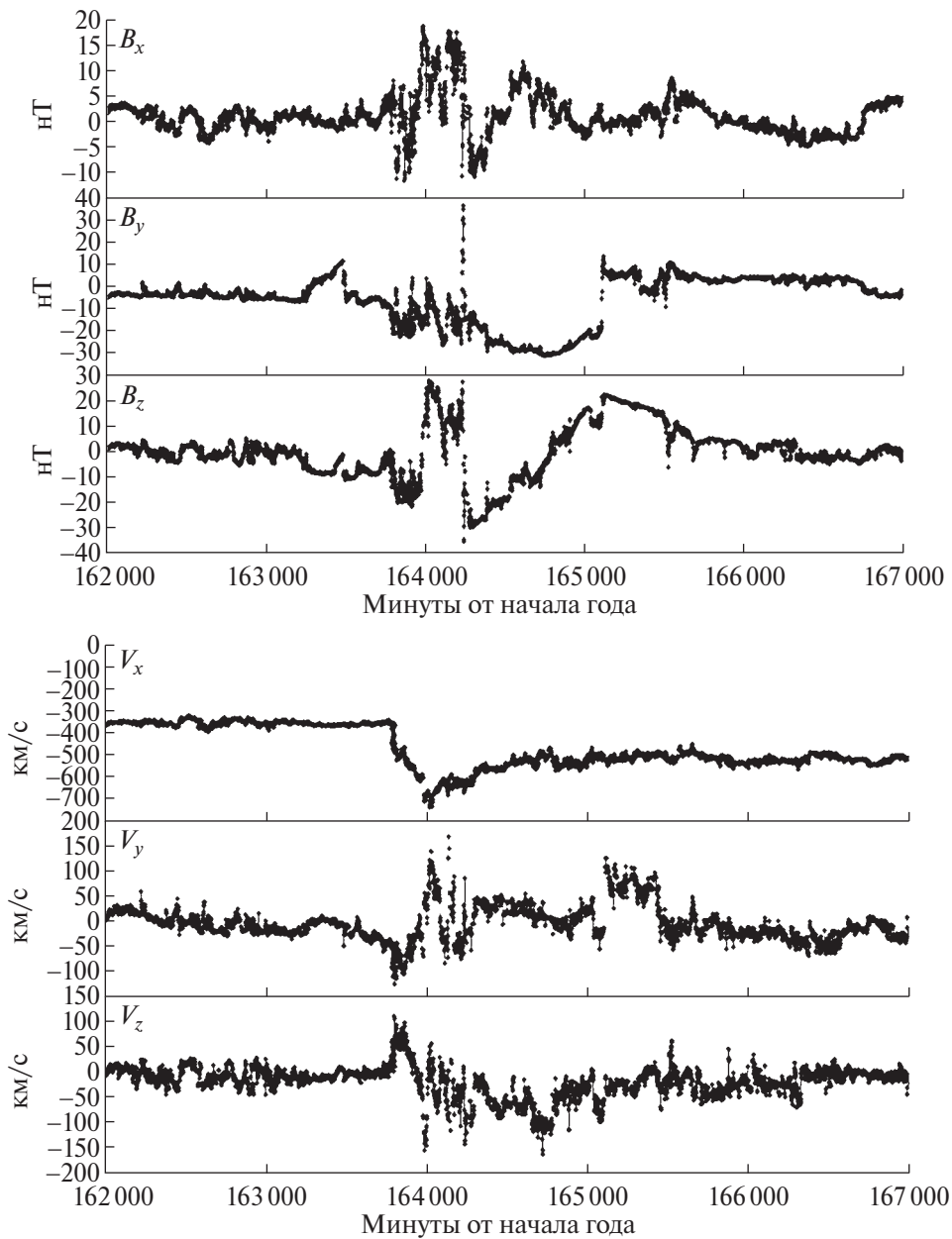


Рис. 3. Временные ряды проекций магнитного поля (три верхних ряда – B_x ; B_y ; B_z) и скорости потока частиц (три нижних ряда – V_x ; V_y ; V_z) в системе GSE22–26.IV.2023.

22 апреля

До 17:38 23.IV.2023 космический аппарат *Wind* регистрировал медленный солнечный ветер, скорость которого составляла меньше 400 км/с. Магнитное поле было спокойным (рис. 4).

23 апреля

Приход ударной волны был зарегистрирован в 17:38 23 апреля, он характеризовался резким ростом скорости и плотности и магнитного поля. Область сжатия – высокие значения магнитных и плазменных параметров – наблюдалась с 17:38 23.IV.2023 до 01:00 24.IV.2023 (рис. 5).

24 апреля

Магнитное облако было зафиксировано с 01:00 24.IV.2023 по 19:00 25.IV.2023: магнитное давление было сильнее плазменного, наблюдались большие значения поля и проекции B_z (рис. 6).

25 апреля

Графы, представленные на рис. 7, показывают, что характер поведения ММП в эти сутки сохранялся тот же, что и в предыдущие: наблюдалось прохождение магнитного облака.

26 апреля

Как видно на рис. 8, 26 апреля к орбите Земли подошел высокоскоростной поток солнечного ветра.

Каждый из перечисленных доминирующих процессов имеет отображение в профиле векторного графа ММП и позволяет частично восстановить параметры плазменных потоков на основе анализируемых векторных графов ММП как детекторов состояния гелиосферы.

ДЕФОРМАЦИЯ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Использование нормированной опорной поверхности для сравнения профилей векторных графов позволяет разделять пространственную модуляцию фигуры графа в масштабе радиуса кривизны поверхности и модуляцию локальных группировок населенности доступных состояний. Такой подход корректен при слабых и умеренных возмущениях магнитного поля, сохраняющих связность графа. При сильных возмущениях как на фазе возрастания, так и убывания поля может возникать глубокая пространственно-временная модуляция, сопровождающаяся разрывами, многослойностью и иными деформациями структуры графа.

Нормирующие коэффициенты для кривизны, обеспечивающие единичные значения всех трех радиусов кривизны опорной поверхности

определяются на начальном этапе анализа динамики графов и в дальнейшем могут синхронно корректироваться для всех трех осей вращения опорной фигуры. На каждом из представленных графов в верхней информационной строке указаны значения коэффициентов кривизны опорной фигуры, относящиеся к времени синхронизации, выполненной на начальной границе исследуемого интервала.

Строгие методы вычисления кривизны поверхности описаны в работах [17–19] и созданы в основном для решения аналитических задач о контактах поверхностей. При определении кривизны используются методы дифференциальной геометрии и соответствующие им количественные меры. Однако большая часть подобных мер не рассчитана на дискретный набор позиций узлов векторного графа. Используя дополнительные условия на сферический профиль опорной поверхности, возможно построить оптимальную аппроксимацию обтекания поверхности узлами векторного графа, ограничивая вычислительный алгоритм определением и сопоставлением экстремальных значений. Одна из эффективных реализаций алгоритма, минимизирующего суммарное отклонение множества узлов графа от сферической опорной поверхности выглядит так:

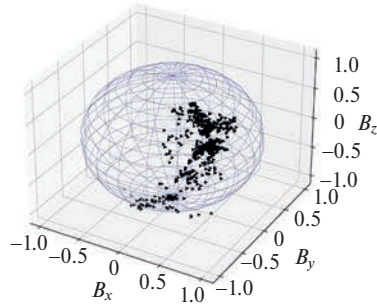
```
def find_max_min(arr):
    if max(arr) > abs(min(arr)):
        koeff = max(arr)
        return arr / max(arr), 1 / koeff
    else:
        koeff = abs(min(arr))
        return arr / abs(min(arr)), 1 / koeff,
```

где arr – столбец значений координат узлов графа. Отметим, что алгоритм работает лишь для графов компонент магнитного поля, другие физические характеристики будут сопровождаться иными инвариантами и методом поиска оптимального обтекания. Еще одно ограничение области применения алгоритма – использование выборок, достаточных для реализации однокомпонентных координатных позиций узлов графа, но недостаточных для потери информации за счет наложения значений отсчета. Для выборок длительностью от 1000 отсчетов это условие выполняется практически всегда.

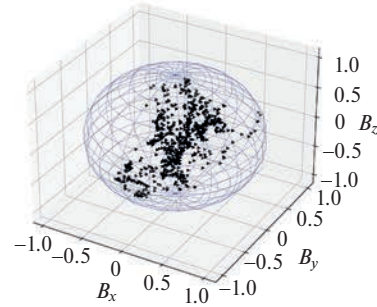
Результаты выполненных исследований позволяют сформулировать основные правила отбора параметров опорной поверхности:

- исследуемый временной интервал должен содержать область калибровки параметров

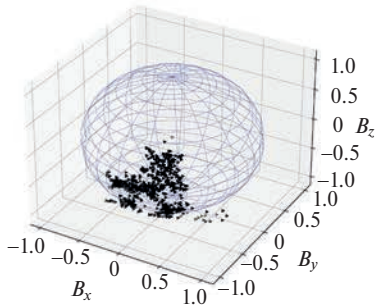
Коэффициент: $x = 0.2545$ $y = 0.1570$ $z = 0.1613$
22.IV.2023 00:00:00–02:59:45



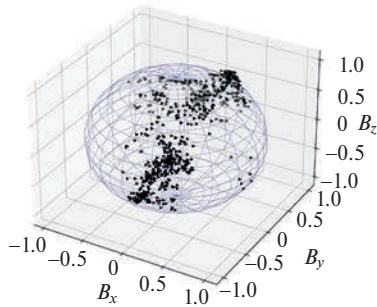
Коэффициент: $x = 0.2439$ $y = 0.1795$ $z = 0.1701$
22.IV.2023 03:00:00–05:59:45



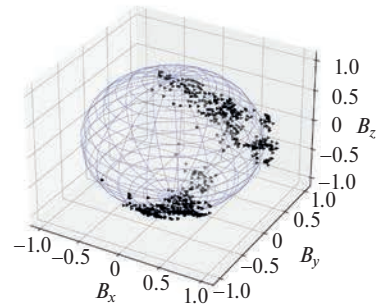
Коэффициент: $x = 0.2415$ $y = 0.1689$ $z = 0.1908$
22.IV.2023 06:00:00–08:59:45



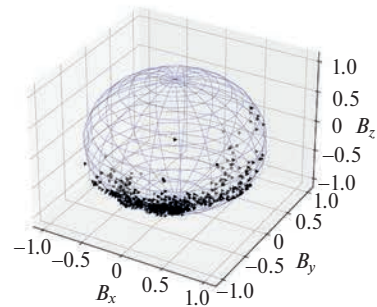
Коэффициент: $x = 0.2247$ $y = 0.1637$ $z = 0.1608$
22.IV.2023 09:00:00–11:59:45



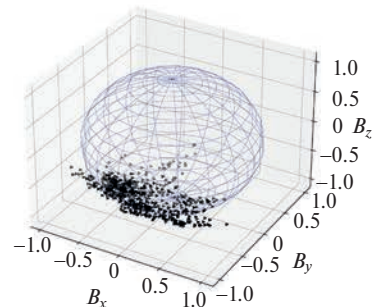
Коэффициент: $x = 0.2577$ $y = 0.1686$ $z = 0.1681$
22.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.1779$ $y = 0.1675$ $z = 0.1553$
22.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2667$ $y = 0.1890$ $z = 0.1495$
22.IV.2023 18:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.1799$ $y = 0.1927$ $z = 0.1504$
22.IV.2023 21:00:00–23:59:45

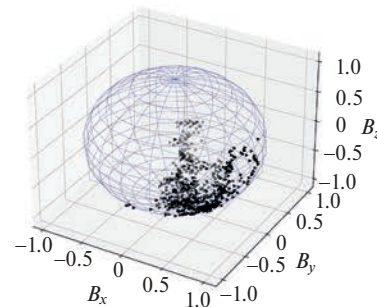
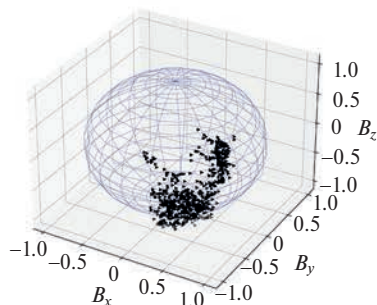
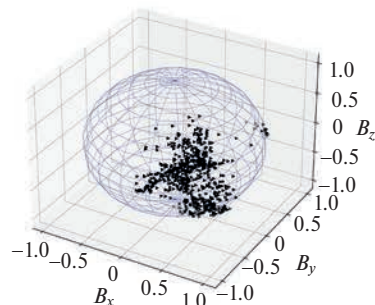


Рис. 4. Графы состояний 22.IV.2023.

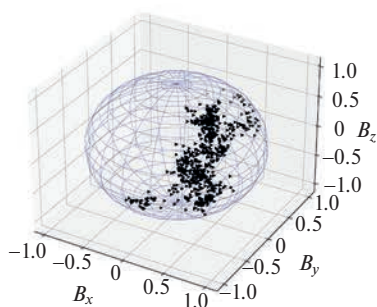
Коэффициент: $x = 0.2342$ $y = 0.1912$ $z = 0.2227$
23.IV.2023 00:00:00–02:59:45



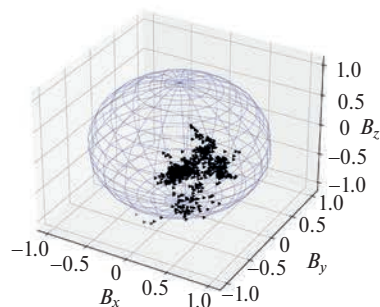
Коэффициент: $x = 0.2110$ $y = 0.1770$ $z = 0.1901$
23.IV.2023 03:00:00–05:59:45



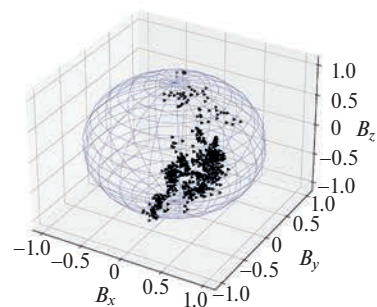
Коэффициент: $x = 0.2058$ $y = 0.1842$ $z = 0.2151$
23.IV.2023 06:00:00–08:59:45



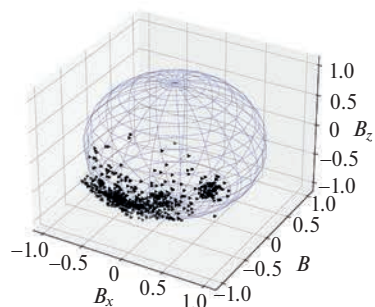
Коэффициент: $x = 0.2268$ $y = 0.1972$ $z = 0.2198$
23.IV.2023 09:00:00–11:59:45



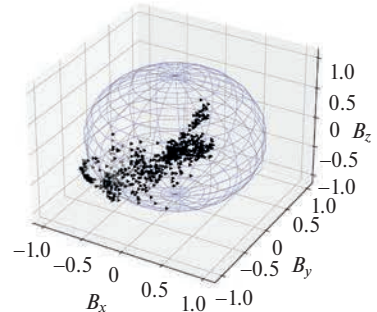
Коэффициент: $x = 0.2611$ $y = 0.2004$ $z = 0.2273$
23.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.3077$ $y = 0.2033$ $z = 0.2179$
23.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2639$ $y = 0.1923$ $z = 0.2123$
23.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.2004$ $y = 0.1792$ $z = 0.2222$
23.IV.2023 21:00:00–23:59:45

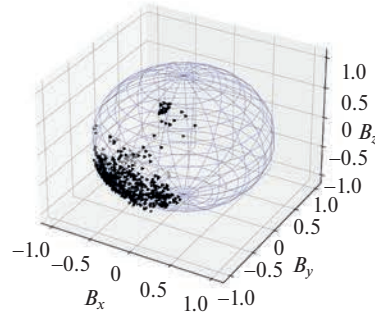
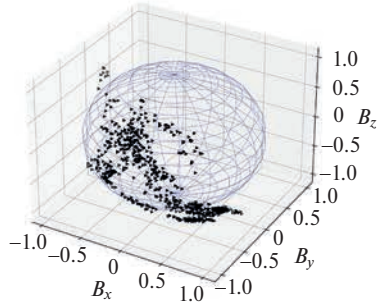
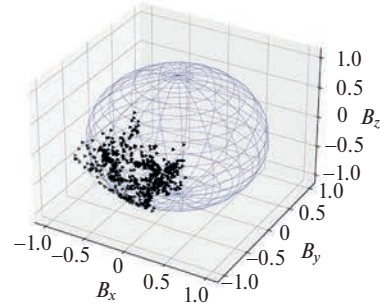


Рис. 5. Графы состояний 23.IV.2023.

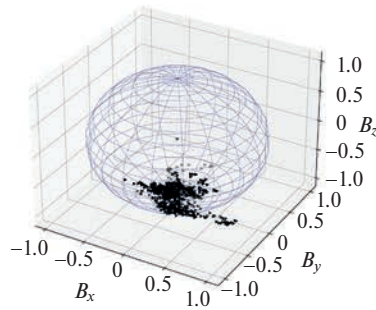
Коэффициент: $x = 0.2778$ $y = 0.1520$ $z = 0.1745$
24.IV.2023 00:00:00–02:59:45



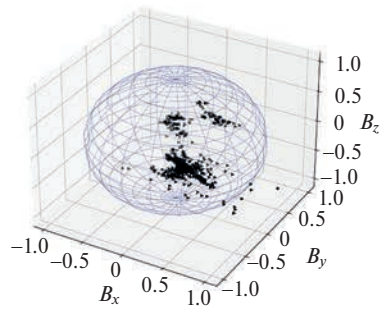
Коэффициент: $x = 0.2469$ $y = 0.1595$ $z = 0.1838$
24.IV.2023 03:00:00–05:59:45



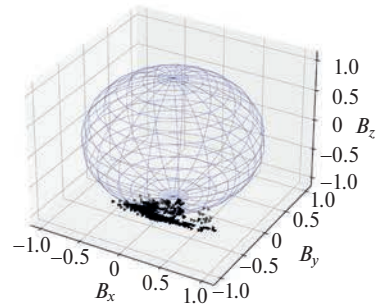
Коэффициент: $x = 0.3344$ $y = 0.1418$ $z = 0.1142$
24.IV.2023 06:00:00–08:59:45



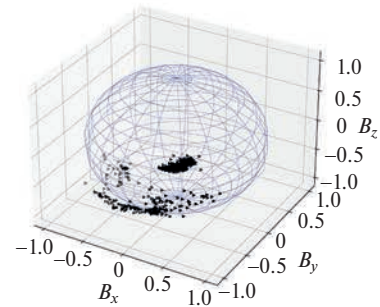
Коэффициент: $x = 0.3040$ $y = 0.0856$ $z = 0.0870$
24.IV.2023 09:00:00–11:59:45



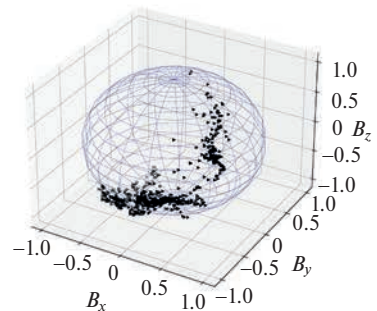
Коэффициент: $x = 0.2288$ $y = 0.1110$ $z = 0.0867$
24.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.0697$ $y = 0.0392$ $z = 0.0431$
24.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.0508$ $y = 0.0419$ $z = 0.0389$
24.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.0512$ $y = 0.0371$ $z = 0.0351$
24.IV.2023 21:00:00–23:59:45

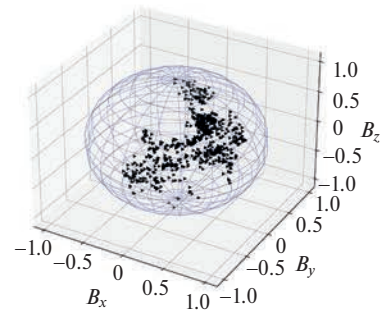
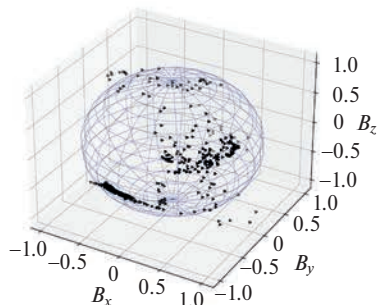
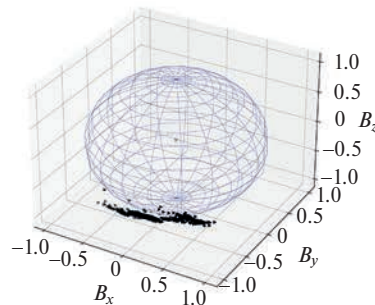


Рис. 6. Графы состояний 24.IV.2023.

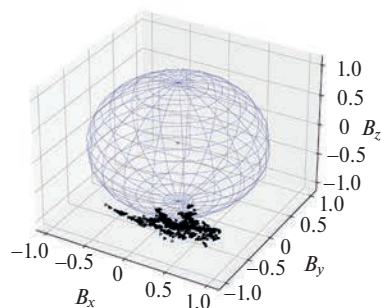
Коэффициент: $x = 0.0621$ $y = 0.0247$ $z = 0.0275$
25.IV.2023 00:00:00–02:59:45



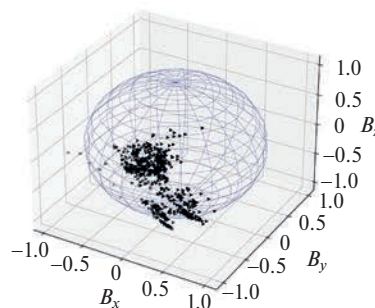
Коэффициент: $x = 0.0950$ $y = 0.0325$ $z = 0.0337$
25.IV.2023 03:00:00–05:59:45



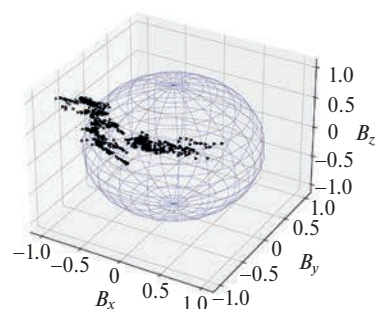
Коэффициент: $x = 0.0748$ $y = 0.0319$ $z = 0.0505$
25.IV.2023 06:00:00–08:59:45



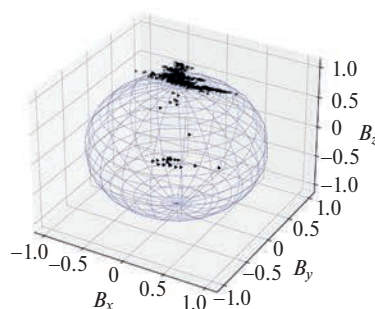
Коэффициент: $x = 0.1176$ $y = 0.0318$ $z = 0.0670$
25.IV.2023 09:00:00–11:59:45



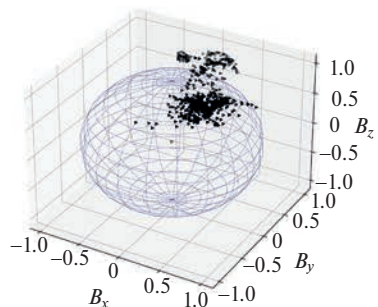
Коэффициент: $x = 0.2551$ $y = 0.0361$ $z = 0.0571$
25.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.2110$ $y = 0.0505$ $z = 0.0429$
25.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2351$ $y = 0.1021$ $z = 0.0533$
25.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.1083$ $y = 0.0917$ $z = 0.1618$
25.IV.2023 21:00:00–23:59:45

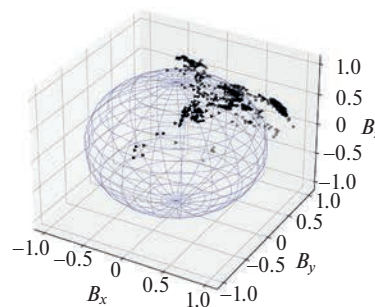
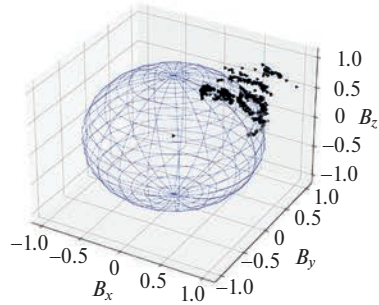
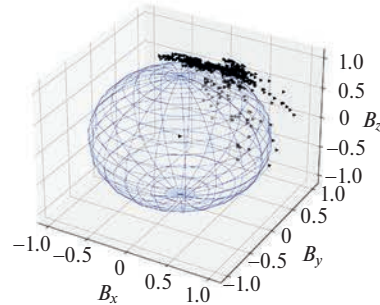


Рис. 7. Графы состояний 25.IV.2023.

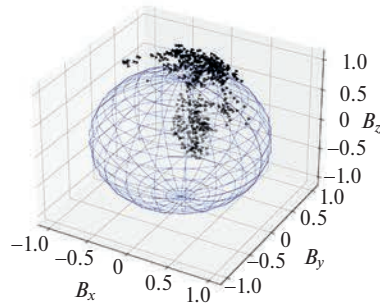
Коэффициент: $x = 0.1517$ $y = 0.1692$ $z = 0.1227$
26.IV.2023 00:00:00–02:59:45



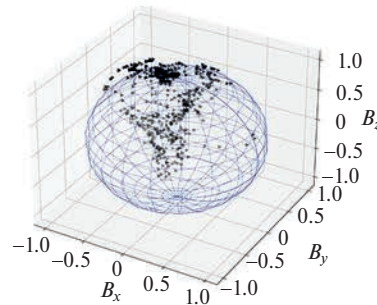
Коэффициент: $x = 0.3390$ $y = 0.2188$ $z = 0.2079$
26.IV.2023 03:00:00–05:59:45



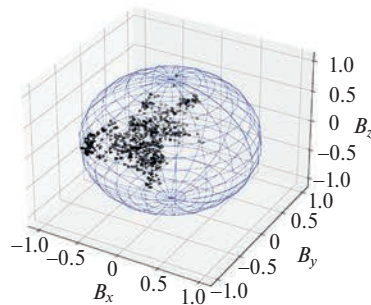
Коэффициент: $x = 0.2660$ $y = 0.2262$ $z = 0.3003$
26.IV.2023 06:00:00–08:59:45



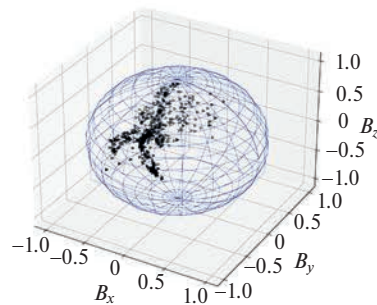
Коэффициент: $x = 0.2000$ $y = 0.1739$ $z = 0.1949$
26.IV.2023 09:00:00–11:59:45



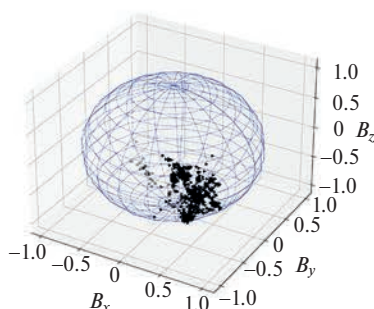
Коэффициент: $x = 0.1992$ $y = 0.1880$ $z = 0.1946$
26.IV.2023 12:00:00–14:59:45



Коэффициент: $x = 0.2283$ $y = 0.02151$ $z = 0.2020$
26.IV.2023 15:00:00–17:59:45



Коэффициент: $x = 0.2037$ $y = 0.2016$ $z = 0.2151$
26.IV.2023 18:00:00–20:59:45



Коэффициент: $x = 0.1890$ $y = 0.1890$ $z = 0.2155$
26.IV.2023 21:00:00–23:59:45

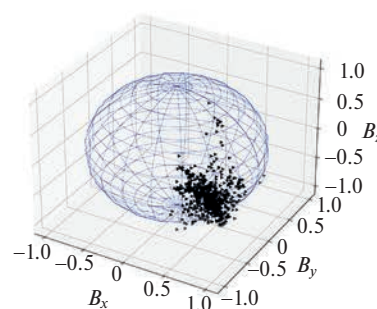


Рис. 8. Графы состояний 26.IV.2023.

опорной поверхности в режиме спокойного или слабо возмущенного магнитного поля,

- протяженность интервала калибровки должна быть достаточной для покрытия узлами векторного графа углового раstra не менее $\pi/4$ по сумме трех ортогональных направлений,
- из результатов анализа выборок следует возможность построения сферической начальной опорной поверхности, дальнейшая модификация кривизны в сторону возрастания сопровождается убыванием радиуса кривизны и уменьшением плотности потока энергии магнитного поля,
- при развитии магнитных возмущений кривизна поверхности наиболее явно меняется вдоль доминирующего направления возмущений. Например, вдоль B_z при развитии магнитной бури и вдоль B_x при прохождении корональных выбросов массы неустойчивость вычисляемых корректирующих значений кривизны возникает при формировании когерентных структур, расщеплении области локализации узлов графа.

Как следует из представленных на рис. 9 зависимостей, в отсутствие значимых внешних возмущений, т.е. при спокойном магнитном поле, опорная поверхность в пределах точности вычислений сохраняет сферическую форму. Изменение внешних условий в зоне наблюдения временных рядов сопровождается вариацией X -параметра кривизны, при событиях, связанных с корональным выбросом массы, и вариацией Z -параметра кривизны при развитии магнитной бури. Детальный анализ пространственно-временной модуляции может дать информацию о тонкой структуре ММП, релаксационных процессах, собственных временах формирования и распада кластеров узлов векторных графов.

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА ВЕКТОРНЫХ ГРАФОВ

Детальный количественный анализ структуры графов разработан и опирается на расчет тензора структуры графа, как тензора второго ранга с последующим определением ориентации главных осей графа, вектора сдвига центра пересечения осей в собственной системе координат графа относительно центра аппроксимирующего эллипсоида. Количественное описание графов матрицами тензоров второго ранга позволяет выполнять детальный сравнительный анализ различных структур, ввести системную функцию, необходимую

для описания эволюции графа, реконструировать на основе системной функции ядро разностного уравнения и определить собственные пространственные функции исследуемого процесса, контролировать значения инвариантов тензоров. Помимо тензорных и ориентационных характеристик графа информативны их картографические проекции и соответствующий им аппарат позиционного анализа.

Предложенный метод динамического анализа эволюции ММП на основе векторных графов, соответствующих 3D-временным рядам проекций поля в системы GSE, по информационной емкости превосходит стандартные линейные и нелинейные методы обработки, исключая кластеризацию и сегментацию элементов временного ряда. Использование синтезированных графов уже на первой фазе анализа позволяет оценить связность структуры, характерные времена релаксации структуры графа к потенциальным метастабильным состояниям, время жизни, наследование структур элементов графа. Метод векторных графов имеет перспективы в задачах прогноза состояния гелиосферы, магнитосфер планет и специальных задач контроля состояния радиационных поясов [20–22].

Топологическая сложность синтезируемых графов требует дополнительных методик в описании и анализе их структур. В рассматриваемом случае предложен метод опорной поверхности, соответствующий режиму поддержания постоянного значения плотности потока энергии поля. Фактически на первой фазе анализа графа реконструируется опорная поверхность, далее отслеживается его динамика. По аналогии с теорией многоканального кодирования сигналов можно определить отдельный векторный граф как сигнальное созвездие, а последовательность векторных графов рассматривать как динамическую сигнально-кодую конструкцию. Продолжение такой аналогии не исключает разделения регистрируемого сигнального потока, как временного 3D-ряда магнитного поля, на две компоненты – информационную и поверочную. Поверочная компонента должна быть основана на инвариантах поля и обеспечивает помехоустойчивость решения задач прогнозирования и компенсации помех, например, на основе алгоритмов с низкой плотностью проверки регистрируемой сигнально-кодую конструкции.

Структура векторных графов с различным кинематическим смещением соответствует структуре фазовых траекторий в заданном подпространстве. Вынужденное ограничение числа рассматриваемых переменных экспериментально наблюдаемыми значениями не позволяет требовать от предлагаемого

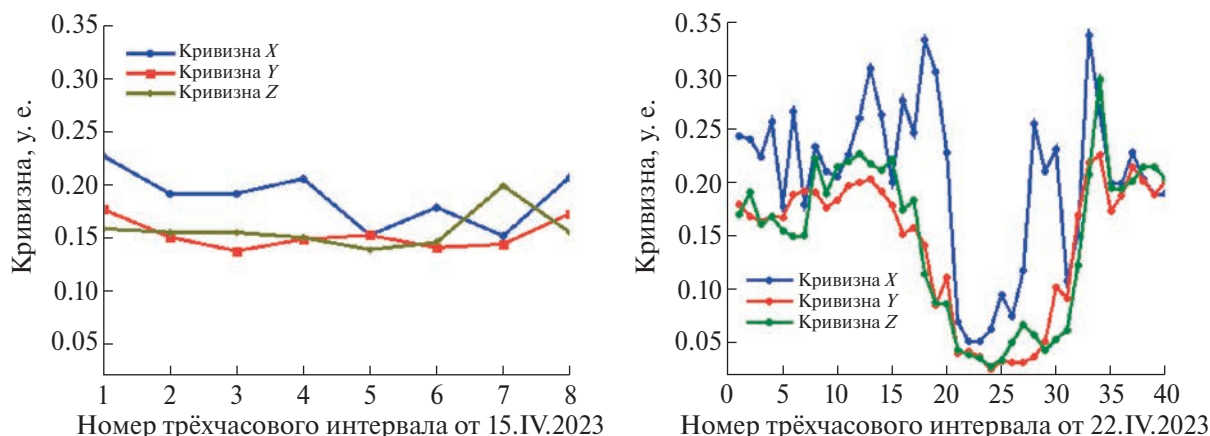


Рис. 9. Вариация нормирующих коэффициентов кривизны со временем: слева – для 15 апреля, справа – для интервала 22–26 апреля 2023 г.

метода реконструкции фазового портрета с соблюдением условия единственности решения соответствующего эволюционного уравнения или отсутствия самопересечения фазовой траектории. Определение на основе геометрии расположения узлов векторного графа вспомогательной топологической характеристики, опорной поверхности, соответствующей закону сохранения плотности потока энергии ММП, позволяет в первом приближении характеризовать структуру магнитного поля, его собственную и индуцированную внешними факторами анизотропию.

Перспективность разработанного подхода для прикладных задач связана с возможностью перейти от прогноза отдельных событий к прогнозу цепочки коллективных событий [23]. Характеристики опорных поверхностей для векторных графов позволяют проводить количественное сравнение коллективных структур как по уединенным, так и смешанным состояниям [24–26]. Отметим, что аналогичный подход разрабатывается для векторных графов скорости солнечного ветра, а также для комбинированных векторных характеристик анализируемой физической системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод векторных графов впервые применен для анализа состояний ММП и переходов между состояниями. Структура и сложность графа зависят от длительности выборки значений компонент векторного поля, что позволяет управлять информационной емкостью графа и менять значение временного разрешения исследуемого процесса. Интерпретация синтезируемого векторного графа как фазовой траектории, а в ряде случаев фазового портрета, позволяет привлекать аппарат

статистической механики, теории дифференциальных уравнений, теории динамических систем [27–30]. Например, если анализируемая система является гамильтоновой, следует ожидать сохранения ее фазового объема. Определение эволюционных уравнений состояния исследуемой системы требует синхронного анализа фазовых траекторий в фазовом подпространстве магнитного поля и фазовом подпространстве векторов потока частиц солнечного ветра. Обсуждение правил объединения фазовых подпространств и построение объединенных траекторий на основе парциальных векторных графов будут рассмотрены в следующих работах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания “Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве” (номер ЦИТИС: 122071200023-6) и госзадания “Волновые пучки и импульсы в случайно-неоднородных и стратифицированных средах” (номер ЦИТИС: 117121890022-8).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Birkeland K.* Are the solar corpuscular rays that penetrate the Earth's Atmosphere Negative or Positive Rays? // I. Mat.-Naturv. Klasse. Videnskapselskapets Skrifter. 1916. Iss. 1. P. 1–27.
2. *Biermann L.F.* Solar corpuscular radiation and the interplanetary gas // A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975. Harvard University Press, 1979. P. 147–148.

3. *Parker E.N.* Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // *Astrophysical J.* 1958. V. 128. Art.ID. 664. <https://doi.org/10.1086/146579>
4. *Parker E.* Dynamical theory of the solar wind // *Space Science Reviews.* 1965. V. 4. Iss. 5–6. P. 666–708.
5. *Réville V., Velli M., Panasenco O. et al.* The role of Alfvén wave dynamics on the large-scale properties of the solar wind: comparing an MHD simulation with Parker Solar Probe E1 data // *Astrophysical J. Supplement Series* 2020. V. 246. Iss. 2. Art.ID. 24. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ac532e>
6. *Svirzhevsky N., Bazilevskaya G., Kalinin M. et al.* Heliospheric magnetic field and the Parker model // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. P. 299–311. <https://doi.org/10.1134/S0016793221030154>
7. *Adhikari L., Khabarova O., Zank G.P. et al.* The role of magnetic reconnection—associated processes in local particle acceleration in the solar wind // *Astrophysical J.* 2019. V. 873. Iss. 1. Art.ID. 72. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab05c6>
8. *Bale S., Badman S., Bonnell J. et al.* Highly structured slow solar wind emerging from an equatorial coronal hole // *Nature.* 2019. V. 576. P. 237–242. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1818-7>
9. *Alberti T., Consolini G., Carbone V. et al.* Multifractal and chaotic properties of solar wind at MHD and kinetic domains: An empirical mode decomposition approach // *Entropy.* 2019. V. 21. Iss. 3. Art.ID. 320. <https://doi.org/10.3390/e21030320>
10. *Prasad P.K., Gowrisankar A., Saha A. et al.* Dynamical properties and fractal patterns of nonlinear waves in solar wind plasma // *Physica Scripta.* 2020. V. 95. Iss. 6. Art.ID. 065603. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab833c>
11. *Godsil C., Royle G.F.* Algebraic graph theory. Graduate Texts in Mathematics Series. V. 207. Springer Science & Business Media, 2001.
12. *Kalofolias V.* How to learn a graph from smooth signals // *Artificial intelligence and statistics.* P. 920–929. PMLR, 2016.
13. *Pal M., Samanta S., Ghorai G.* Modern trends in fuzzy graph theory. Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8803-7>
14. *Cheng S.-W., Cheong O., Lee T. et al.* Fitting a graph to one-dimensional data // *Theoretical Computer Science.* 2021. V. 867. P. 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2021.03.020>
15. *Daitch S.I., Kerner J.A., Spielman D.A.* Fitting a graph to vector data // *Proc. the 26th Annual International Conference on Machine Learning.* Montreal, Canada. 2009. P. 201–208. <https://doi.org/10.1145/1553374.1553400>
16. *Shugay Y., Slemzin V., Veselovsky I.* Magnetic field sector structure and origins of solar wind streams in 2012 // *J. Space Weather and Space Climate.* 2014. V. 4. Art.ID. A24.
17. *Svec A.* Global differential geometry of surfaces. Springer Science & Business Media, 2001.
18. *Abbena E., Salamon S., Gray A.* Modern differential geometry of curves and surfaces with Mathematica. CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315276038>
19. *Banchoff T.F., Lovett S.* Differential geometry of curves and surfaces. CRC Press, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003295341>
20. *Myagkova I., Shiroky V., Dolenko S.* Prediction of geomagnetic indexes with the help of artificial neural networks // *E3S Web of Conferences.* 2017. V. 20. Art.ID. 02011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172002011>
21. *Myagkova I., Shirokii V., Vladimirov R. et al.* Comparative efficiency of prediction of relativistic electron flux in the near-earth space using various machine learning methods // *Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research IV.* Springer, 2021. P. 222–227. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60577-3_25
22. *Bogomolov A.V., Bogomolov V.V., Iyudin A.F. et al.* Space weather effects from observations by moscow university cubesat constellation // *Universe.* 2022. V. 8. Iss. 5. Art.ID. 282. <https://doi.org/10.3390/universe8050282>
23. *Shugay Y.S., Kaportseva K.* Forecast of the quasi-stationary and transient solar wind streams based on solar observations in 2010 // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2021. V. 61. Iss. 2. P. 158–168. <https://doi.org/10.1134/S001679322102016X>
24. *Bhowmik P., Jiang J., Upton L. et al.* Physical models for solar cycle predictions // *Space Science Reviews.* 2023. V. 219. Iss. 5. Art.ID. 40. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00983-x>
25. *Vidotto A.A.* The evolution of the solar wind // *Living reviews in solar physics.* 2021. V. 18. Iss. 1. Art.ID. 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-021-00029-w>
26. *Viall N.M., Borovsky J.E.* Nine outstanding questions of solar wind physics // *J. Geophysical Research: Space Physics.* 2020. V. 125. Iss. 7. Art.ID. e2018JA026005. <https://doi.org/10.1029/2018JA026005>
27. *Sadovnikov B., Inozemtseva N., Perepelkin E.* Generalized phase space and conservative systems // *Doklady Mathematics.* 2013. V. 88. P. 457–459. <https://doi.org/10.1134/S1064562413040285>
28. *Perepelkin E., Sadovnikov B., Inozemtseva N. et al.* Universal density matrix for the phase space. 2019. arXiv preprint arXiv:1904.04950
29. *Perepelkin E., Sadovnikov B., Inozemtseva N. et al.* Exact time-dependent solution of the Schroedinger equation, its generalization to the phase space and relation to the Gibbs distribution,” *Physica Scripta.* 2022. V. 98. Iss. 1. Art.ID. 015221. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acab39>
30. *Perepelkin E., Sadovnikov B., Inozemtseva N. et al.* Dispersion chain of quantum mechanics equations // *J. Physics A: Mathematical and Theoretical.* 2023. V. 56. Iss. 14. Art.ID. 145202.

УДК 523.4-854

ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МАГНИТОПАУЗЫ В ФЕВРАЛЕ – АПРЕЛЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. А. В. Дмитриев*

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*dalex@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 09.09.2023 г.

Принята к публикации 11.09.2023 г.

Проанализированы геостационарные пересечения магнитопаузы, когда геостационарные спутники оказывались в магнитослое, во время магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля 2023 г. Интервалы магнитослоя идентифицированы по магнитным данным GOES-16 и GOES-17. Проведен сравнительный анализ различных моделей магнитопаузы на основе данных о межпланетной среде, полученных с космических аппаратов THEMIS-E и монитора Wind. Сравнительный анализ моделей на основе статистических параметров по определению интервалов магнитослоя показал, что для всех трех событий высокую точность демонстрирует модель, представленная в работе [1]. Для событий с низкой буревой активностью на фоне небольших отрицательных значений B_z -компоненты межпланетного магнитного поля хорошие результаты дает модель, описанная в работе [2]. Для экстремальных событий с очень высокими давлениями и/или очень сильными отрицательными межпланетного магнитного поля B_z хорошую точность показывает модель, показанная в статье [3], а также удовлетворительную точность демонстрируют модели, представленные в работах [4] и [5]. Кроме того, показано, что на точность моделей влияют следующие факторы и эффекты: выбор межпланетного монитора, зависимость модели от давления солнечного ветра, эффект насыщения воздействия B_z , асимметрия магнитопаузы утро – вечер и эффект предыстории.

DOI: 10.31857/S0023420624020083, EDN: kyrkaz

ВВЕДЕНИЕ

Проблема предсказания пересечений магнитопаузой геостационарной орбиты актуальна [6]. Геостационарные пересечения магнитопаузы (ГПМ) вызываются приближением магнитослоя к Земле на геоцентрические расстояния менее 6.6 земного радиуса (R_E), в результате чего геостационарные спутники оказываются в магнитослое и даже в межпланетной среде [7]. Практически это означает выход космического аппарата (КА) за пределы магнитосферы, что сопряжено с потерей ориентации по магнитному полю и воздействию на КА потоков плотной плазмы, а также энергичных частиц солнечного и гелиосферного происхождения, что может привести к повреждению или даже потере геостационарных КА [8–11]. Более того, понимание динамики магнитопаузы при сильно возмущенных межпланетных и геомагнитных условиях, когда наблюдаются ГПМ, позволяет глубже

понять природу взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой.

Создан целый ряд моделей, позволяющих предсказывать ГПМ по условиям в межпланетной среде [2–5, 12, 13]. Эти модели учитывают различные нелинейные эффекты, которые не проявляются в динамике магнитопаузы при невозмущенных условиях. Одним из таких эффектов является так называемое насыщение воздействия отрицательной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), а именно существует порог насыщения воздействия ММП B_z на магнитопаузу, ниже которого магнитопауза больше не реагирует на дальнейшее усиление большого отрицательного B_z [4, 12, 14, 15].

Другим эффектом является асимметрия магнитопаузы утро – вечер [14, 16]. Он состоит в том, что при больших отрицательных ММП B_z магнитопауза сдвигается на вечер, так что для одних и тех же условий ГПМ чаще наблюдаются

в предполуденном секторе. Эффект асимметрии учтен только в некоторых моделях [1–3, 5].

Еще одним эффектом является предыстория [17], т.е. зависимость реакции магнитопаузы не только от текущих, но и предыдущих условий в межпланетной среде. Эффект предыстории был предложен для объяснения ложных предсказаний магнитослоя на начальной фазе магнитных бурь, когда все модели уверенно предсказывали ГПМ, но геостационарные спутники их не видели. Этот эффект учтен в модели [3].

Проводилось несколько исследований по сравнительному анализу различных моделей ГПМ для целого ряда магнитных бурь [17–20]. Эти исследования показали большой разброс в отклонениях предсказания моделей от наблюдений во время различных бурь. В результате было довольно проблематично определить модель, которая бы обладала наилучшей точностью для ГПМ. В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа ряда моделей магнитопаузы по предсказанию ГПМ во время магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля 2023 г.

МЕТОДЫ

Экспериментальные данные

Спутниковые экспериментальные данные о ключевых параметрах космической плазмы и магнитного поля получены из базы данных CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). В работе анализируются события, когда геостационарный спутник наблюдал магнитослой. При этом ГПМ определяется как момент выхода КА из магнитосферы в магнитослой, так и момент возвращения КА из магнитослоя в магнитосферу. Для этого используются магнитные данные геостационарных КА *GOES-16* и *GOES-17* с временным разрешением 0.1 с. Аппараты *GOES-16* и *GOES-17* находились на географических долготах 285° и 255° , таким образом они пересекали локальный полдень соответственно в 17.00 и 19.00 UT. Магнитослой идентифицировался как сильные отклонения магнитного поля, измеряемого на КА *GOES*, от квазистационарного геомагнитного поля. Отклонение считается сильным, если компонента B_z становится отрицательной или напряженность поля B_t становится меньше 100 нТл. При этом B_z на КА *GOES* обязательно должна быть отрицательной, если ММП B_z положительная. В последнем случае выход в магнитослой вызван экстремально сильным давлением солнечного ветра.

Данные о солнечном ветре и ММП были получены с межпланетного монитора *Wind* и КА *THEMIS-E*. Монитор *Wind* находится на расстоянии более $200 R_E$ от Земли в сторону Солнца. Данные с КА *THEMIS-E* использовались, когда он выходил в межпланетную среду перед головной ударной волной. На КА *Wind* магнитные данные с инструмента MFI и плазменные данные с инструмента SWE имеют разрешение ~ 100 с. На КА *THEMIS* данные с инструмента FGM и плазменные данные с инструмента ESA в Reduced Mode имеют разрешение ~ 3 с. Данные КА *ACE* не использовались вследствие сильной деградации его плазменного инструмента.

Для анализа также использовались данные по индексу SYM-H с разрешением 1 мин, полученные из Мирового центра данных в Киото (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>). Индекс SYM-H, как и часовой *Dst*, является мерой интенсивности кольцевого тока, точнее его симметричной части, которая вычисляется с более высоким временным разрешением.

Привязка межпланетных условий к состоянию магнитосферы, т.е. временная задержка для измерений в межпланетной среде определялась в первом приближении по времени прямого распространения солнечного ветра. Однако время задержки может меняться при изменении ориентации межпланетных структур. Уточняющая привязка осуществлялась по двум критериям [21]: основному, по кросс-корреляции давления солнечного ветра с SYM-H, и дополнительному, по корреляции B_z - и B_y -компонент ММП с измерениями в магнитослое на КА *GOES*.

Вследствие сильного разброса временных разрешений, временные ряды различных параметров были приведены к общему разрешению в 1 с. С этой точностью определялись пересечения магнитопаузы. Для низких разрешений проводилась экстраполяция текущего значения до следующего момента измерения. Все векторные величины были представлены в полностью аберрированной системе координат aGSM [22], учитывающей скорость вращения Земли вокруг Солнца и нерадиальность солнечного ветра, которая часто сопровождает ГПМ [21].

Модели магнитопаузы

В работе рассматривается шесть моделей, которые ранее успешно использовались для определения ГПМ [20]: асимметричная модель KS [1], модель Sh [4], нейросетевая модель DS [5], асимметричная модель Ch [13], трехмерная модель Li [2] и предсказательная модель PM

[3]. Модели характеризуются различными зависимостями от разных параметров.

В частности, модели KS, Sh и Ch рассчитывают геоцентрическое расстояние до магнитопаузы R_m как функцию конического угла Ca от оси X , направленной от Земли к Солнцу, а также динамического давления солнечного ветра P_d и компоненты ММП B_z в системе координат GSM:

$$R_m = F(Ca, P_d, B_z).$$

В модели Ch учитывается эффект аберрации магнитосферы из-за вращения Земли вокруг Солнца. В модели KS учтен эффект асимметрии магнитосферы при отрицательной ММП B_z , что приводит к сдвигу магнитопаузы на вечер. Нейросетевая модель DS представляет квазитрехмерную форму магнитопаузы как функцию GSM-широты $GSMLat$ и долготы $GSMLon$, P_d и компонент ММП B_y и B_z в GSM:

$$R_m = F(GSMLat, GSMLon, P_d, B_z, B_y).$$

Трехмерная модель Li представляет магнитопаузу как функцию $GSMLat$, $GSMLon$, P_d , B_z , напряженности ММП B и угла наклона земного диполя ψ :

$$R_m = F(GSMLat, GSMLon, P_d, B_z, B, \psi).$$

Предсказательная модель PM позволяет вычислять полное давление, необходимое для ГПМ в данной точке ($GSMLat$, $GSMLon$), как функцию ММП B_z и Dst вариации:

$$P_{mp} = F(GSMLat, GSMLon, B_z, Dst).$$

Полное давление солнечного ветра P_{sw} вычисляется как:

$$P_{sw} = P_d + P_t + P_m,$$

где динамическое давление P_d учитывает вклад гелия, P_t – тепловое давление плазмы солнечного ветра, P_m – магнитное давление ММП. В случае если $P_{mp} < P_{sw}$, геостационарный КА должен пересечь магнитопаузу и выйти в магнитослой.

Статистический анализ

Точность моделей определяется по статистическим параметрам, которые были предложены ранее в работах [19, 22], а именно по данным наблюдений и показаниям моделей для каждого отдельно взятого события вычисляется статистика (время в секундах) HT , MT , FA , CR , как показано в табл. 1. Например, время HT (Hit) аккумулирует интервалы, когда геостационарный спутник находится в магнитослое, при этом модельное расстояние до магнитопаузы R_m меньше, чем расстояние до спутника R_g . Время MT (Miss) соответствует неспособности модели показать выход спутника в магнитослой. Время FA (False

Таблица 1. Статистическая таблица

	Магнитослой	Магнитосфера
$R_m < R_g$	HT	FA
$R_m \geq R_g$	MT	CR

Alarm) соответствует ошибочному предсказанию моделью магнитослоя. Время CR (Correct Rejection) соответствует правильному предсказанию модели положения спутника внутри магнитосферы. Очевидно, что сумма всех статистик равна полной длительности анализируемого интервала в секундах:

$$N = HT + MT + FA + CR.$$

Для сравнения моделей на основе статистик HT , MT , FA , CR рассчитываются следующие статистические параметры:

$$PCP = \frac{HT + CR}{N}.$$

Параметр PCP (Probability of Correct Prediction) показывает, насколько хорошо модель способна правильно предсказать интервалы, когда КА находился в магнитослое и магнитосфере: $PCP = 0$ – полная неспособность, $PCP = 1$ – идеальное предсказание всех интервалов.

$$POD = \frac{HT}{HT + MT}$$

Параметр POD (Probability of Detection) показывает, насколько хорошо модель способна предсказать интервалы магнитослоя: $POD = 0$ – полная неспособность, $POD = 1$ – идеальное предсказание всех интервалов магнитослоя.

$$FAR = \frac{FA}{HT + FA}$$

Параметр FAR (False Alarm Rate) показывает, как часто модель ошибается при предсказании интервалов магнитослоя: $FAR = 0$ – нет ложных предсказаний магнитослоя, $FAR = 1$ – все предсказания интервалов магнитослоя являются ложными.

$$OUR = \frac{MT - FA}{MT + FA}$$

Параметр OUR (Overestimation Underestimation Ratio) показывает насколько сбалансирована модель. Если модель систематически завышает, т.е. переоценивает, расстояние до магнитопаузы, то OUR приближается к 1. Очевидно, для такой модели FAR будет относительно мал, но и POD будет тоже невелик. Для модели, систематически занижающей расстояние до магнитопаузы, OUR

приближается к -1 . Такая модель будет иметь высокий FAR , но и большой POD . Для сбалансированной модели OUR близко к 0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой половине 2023 г. ГПМ наблюдались на геостационарной орбите КА $GOES-16$ и $GOES-17$ в трех событиях во время главной фазы магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля. Главная фаза этих бурь пришлась на вторую половину дня, что создало условия для наблюдения ГПМ на КА $GOES-16$ и $GOES-17$.

Событие 26.И.2023

Магнитная буря 26.И.2023 была умеренной ($\min Dst = -69$ нТл). Она началась с SSC в 19:23 UT и достигла максимума к 22:30 UT. ГПМ наблюдались КА $GOES-17$ в интервале с 20:44 до 21:10 UT, суммарное время в магнитослое составило 488 с. На рис. 1 показаны моменты пересечений, межпланетные и геомагнитные условия, а также показания моделей для данного интервала. В это время КА $GOES-17$ находился в послеполуночном секторе в районе

14:00 LT. $GOES-16$ находился довольно далеко от полудня, в районе 16:00 LT, поэтому он не наблюдал ГПМ.

Межпланетные условия измерялись КА $Wind$, для которого время задержки составляло около 49 мин. На рис. 1 приведена обобщающая картина. В реальности время задержки изменялось в зависимости от скорости солнечного ветра и ориентации межпланетных структур, поэтому весь интервал был разбит на сектора длительностью 10 мин, и для каждого сектора определялось время задержки.

На рис. 1 видны сильные вариации компонент ММП B_z и B_y , которые сопровождалась высоким давлением солнечного ветра $P_{sw} > 12$ нПа. По классификации, приведенной в работе [23], такая геоэффективная структура характерна для уплотненного межпланетного слоя типа Sheath, формирующегося за межпланетной ударной волной перед телом быстрого магнитного облака, связанного с выбросом корональных масс от Солнца. Таким образом, в данном случае причиной ГПМ было высокое P_{sw} на фоне очень сильной варьирующей ММП B_z в области межпланетной структуры типа Sheath.

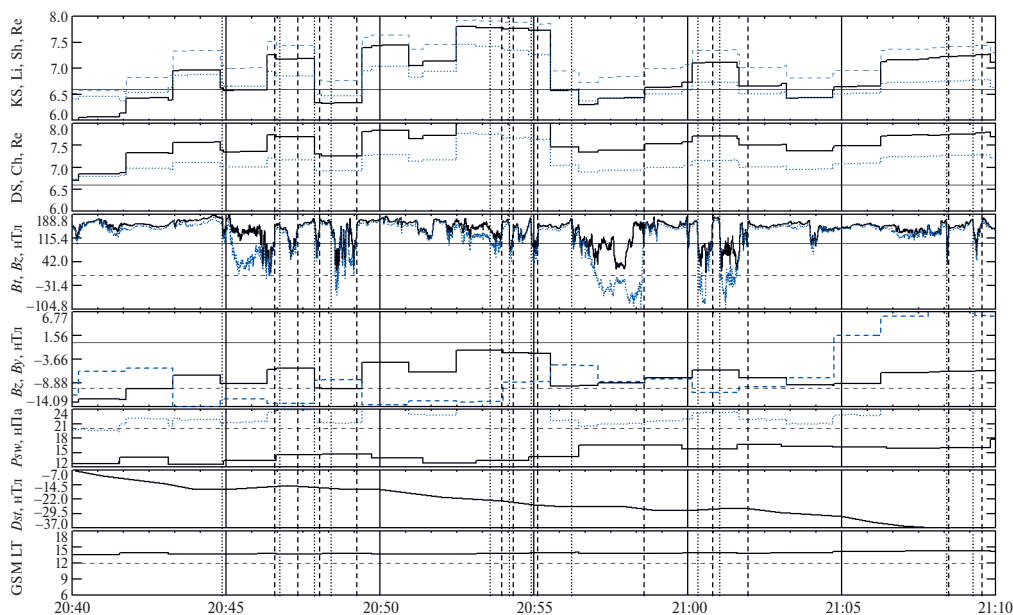


Рис. 1. Пересечения геостационарной орбиты магнитопаузой 26.И.2023 по данным геостационарного $GOES-17$ и для межпланетных условий по данным КА $Wind$ (панели сверху вниз): расстояние до магнитопаузы по моделям KS (сплошная кривая), Li (синяя штриховая кривая), Sh (синяя пунктирная кривая); расстояние до магнитопаузы по моделям DS (сплошная кривая), Ch (синяя штриховая кривая); данные КА $GOES-17$ по полному магнитному полю (сплошная кривая) и GSM B_z -компоненте; компоненты ММП GSM B_z (сплошная кривая) и B_y (синяя пунктирная кривая); полное давление солнечного ветра P_{sw} (сплошная черная кривая) и давление, необходимое для ГПМ по модели PM (синяя штриховая кривая); Dst -вариация геомагнитного поля; местное время $GOES-17$ в аберированных GSM-координатах. Вертикальные штриховые и пунктирные линии обозначают ГМП, соответственно выход в магнитослой и возврат в магнитосферу. Временной сдвиг для данных КА $Wind$ составляет 49 мин.

Таблица 2. Статистические характеристики моделей для 26.И.2023

Модель	<i>OUR</i>	<i>FAR</i>	<i>PCP</i>	<i>POD</i>
KS-Wi	0.114	0.726	0.585	0.507
KS-TH	-0.856	0.646	0.567	0.957
Sh-Wi	0.925	1.000	0.744	0.000
Sh-TH	-0.136	0.608	0.661	0.726
Ch-Wi	1.000	0.000	0.774	0.000
Ch-TH	0.778	0.404	0.786	0.365
DS-Wi	1.000	0.000	0.774	0.000
DS-TH	1.000	0.000	0.774	0.000
Li-Wi	-0.238	0.706	0.553	0.699
Li-TH	-0.991	0.695	0.449	0.997
PM-Wi	1.000	0.000	0.774	0.000
PM-TH	0.995	1.000	0.756	0.000

Как видно на рис. 1, интервалы магнитослоя характеризуются сильными отклонениями магнитного поля, измеряемого на КА *GOES*, от квазистационарного геомагнитного поля. В интервале 20:45–20:55 UT значения *Bz* на КА *GOES* были преимущественно положительными, в то время как ММП *Bz* был отрицательным. Это может быть связано с тем, что КА *Wind* наблюдал другую структуру солнечного ветра, которая не достигла Земли. В целом магнитослой наблюдался, когда давление солнечного ветра *Psw* было высоким и варьировало от 13:5 до 17 нПа, ММП *Bz* варьировала от -10 до -2 нТл и SYM-H индекс от -14 до -37 нТл.

На двух верхних панелях рис. 1 показаны расстояния до магнитопаузы, вычисленные

по различным моделям. Хорошо видно, что модели Sh, Ch и DS систематически переоценивают расстояние до магнитопаузы и поэтому не могут предсказать ГПМ. Аналогичная ситуация с моделью PM, которая систематически завышает давление солнечного ветра, необходимое для ГПМ. Точность различных моделей представлена статистическими параметрами в табл. 2 в первых строчках. Для моделей с систематической переоценкой статистические параметры *OUR* = 1, *FAR* = 0 и *POD* = 0, т.е. в данном случае эти модели вырождаются. Среди остальных наибольшую точность демонстрируют модели KS и Li. Здесь следует отметить интервал 20:40–20:43 UT, когда эти модели недооценивают расстояние

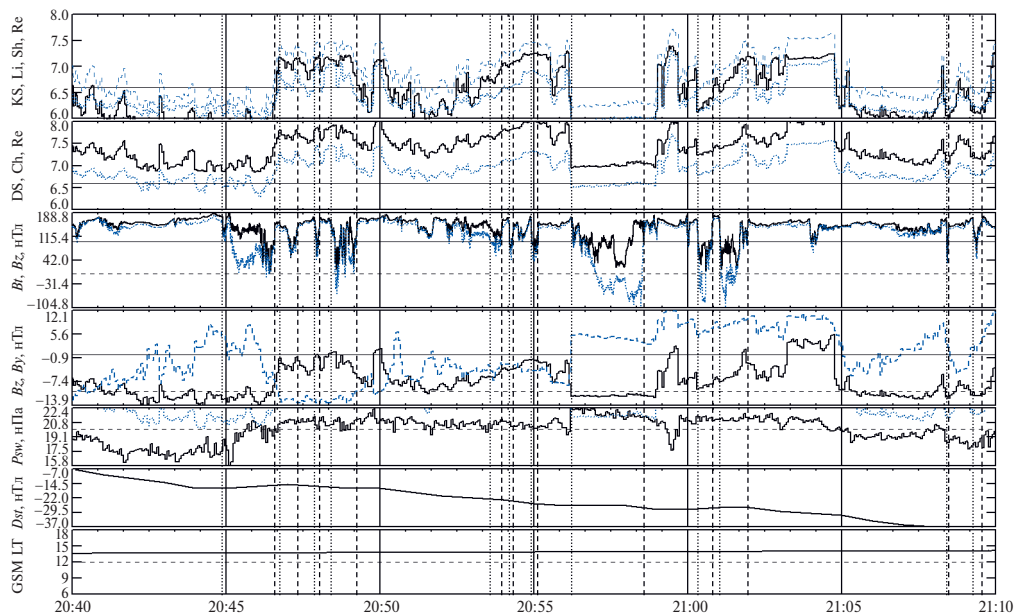


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но межпланетные параметры измерялись на КА *THEMIS-E* с временным сдвигом 1 мин.

до магнитопаузы и показывают ложный интервал магнитослоя. Это может быть связано как с несовершенством моделей, так и другой структурой солнечного ветра, наблюдаемой на КА *Wind*.

Данное предположение можно проверить, используя данные КА *THEMIS-E*, полученные непосредственно перед головной ударной волной, как показано на рис. 2. В этой области наблюдаются несколько иные условия, так что магнитослой наблюдался при давлениях P_{sw} от 15.8 до 22.4 нПа, и ММП B_z варьировала от -13.9 до $+3$ нТл. Более высокое давление и сильное отрицательное ММП B_z в интервале 20:40–20:45 UT вызвало ложные интервалы магнитослоя по моделям KS, Sh, Ch и Li. Таким образом, в данном случае имеет место несовершенство моделей, заключающееся в занижении расстояния до магнитопаузы при сильных отрицательных B_z на ранней стадии развития магнитной бури, когда кольцевой ток еще не развит и Dst вариация мала. Этот эффект учтен в модели PM, которая не показала ложного магнитослоя. Аналогичная ситуация наблюдается в интервалах 20:50–20:55 UT и 21:05–21:03 UT, когда модели KS, Sh, и Li также показывают ложный магнитослой, а модель PM нет. С другой стороны, практически все модели, за исключением DS, хорошо отработали интервал магнитослоя от 20:56 до 20:59 UT, когда давление P_{sw} превысило 22 нПа и B_z упала ниже -10 нТл.

Статистические параметры для различных моделей представлены в табл. 2 во вторых строчках. В данном случае наилучшую точность демонстрирует модель Sh с хорошим балансом (OUR близок к 0) и высоким PCP , хотя ее POD не так невысок, как у моделей KS и Li. Однако эти модели в данном случае сильно недооценивают расстояние до магнитопаузы, что проявляется в большом отрицательном OUR и относительно высоком FAR . Самое высокое $PCP = 0.786$ и низкий $FAR = 0.404$ демонстрирует модель Ch, однако у нее довольно высокий процент переоценки расстояния до магнитопаузы ($OUR = 0.778$), что приводит к слабому предсказанию интервалов магнитослоя с наименьшим $POD = 0.365$. Учитывая все статистические характеристики, можно заключить, что для данного события наилучшими являются модели KS, Sh и Li.

Событие 23.III.2023

Магнитная буря 23.III.2023 была начальной интенсификацией ($\min Dst = -70$ нТл) сильной бури, которая началась с SSC в 06:00 UT и достигла максимума к 14:41 UT. В этот день данные с КА *GOES-17* отсутствуют. ГПМ наблюдались КА *GOES-16* в предполуденном секторе в районе 09:00 LT в коротком интервале с 14:12 до 14:30 UT, с суммарным временем магнитослоя 421 с, как показано на рис. 3. В этот период КА *THEMIS* находился магнитослоем.

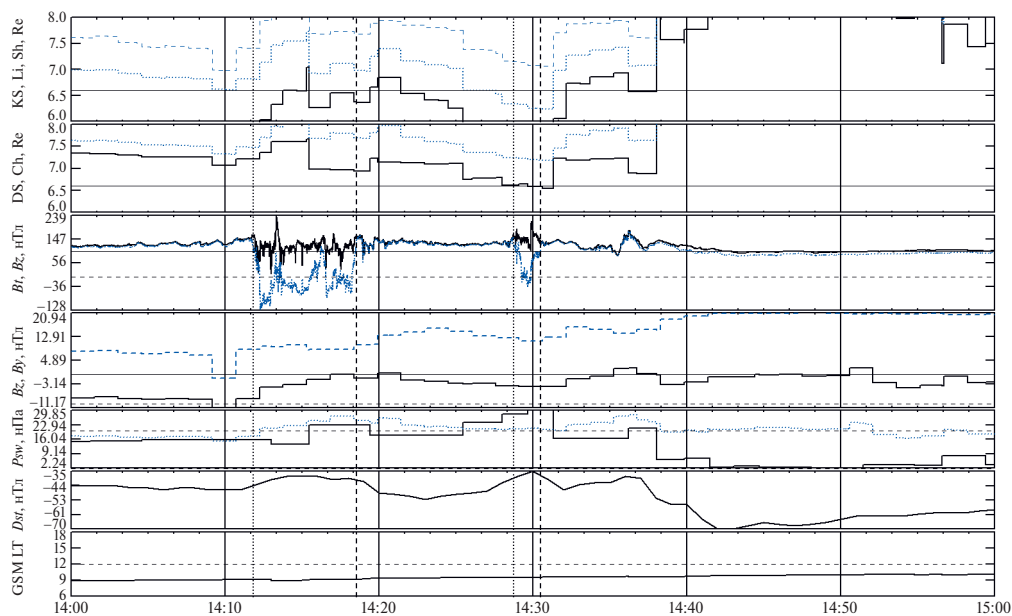


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для 23.III.2023. Временной сдвиг 51 мин.

Таблица 3. Статистические характеристики моделей для 23.III.2023

Модель	<i>OUR</i>	<i>FAR</i>	<i>PCP</i>	<i>POD</i>
KS-Wi	-0.946	0.595	0.436	0.980
Sh-Wi	1.000	0.000	0.571	0.000
Ch-Wi	1.000	0.000	0.571	0.000
DS-Wi	0.839	0.663	0.548	0.080
Li-Wi	0.428	0.702	0.472	0.249
PM-Wi	0.428	0.702	0.472	0.249

Межпланетные условия измерялись КА *Wind*. Время задержки для них составило 49 мин. Как видно на рис. 3, интервалы магнитослоя характеризуются большой отрицательной *Bz*. В целом магнитослой наблюдался, когда давление солнечного ветра *Psw* было очень высоким от 16.5 до 30 нПа, ММП *Bz* варьировала от -8 до 0 нТл, и *Dst* было в районе от -35 до -44 нТл. Интервалы магнитослоя прекратились после 14:32 UT, когда давление солнечного ветра *Psw* упало за 10 мин практически в 15 раз с 30 до 2 нПа. Сильное падение *Psw* на фоне слабого *Bz* проявляется в большой отрицательной бухте в SYM-H индексе с -35 нТл в 14:30 UT до -70 нТл в 14:41 UT, т.е. это не была интенсификация кольцевого тока [7]. Хорошая корреляция *Psw* и SYM-H доказывает правильность выбранного времени задержки. Как и в предыдущем событии, характерная динамика компонент ММП и давления солнечного ветра указывает, что ГПМ связаны с условиями в межпланетной структуре типа Sheath.

На рис. 3 видно, что первый интервал магнитослоя в 14:11:19–14:18:33 UT был предсказан только моделью KS. Второй короткий интервал при очень высоком *Psw* = 30 нПа в 14:28:45–14:30:29 был предсказан моделями KS, Li, DS, PM. Модели Sh, Ch систематически переоценивали расстояние до магнитопаузы и не показали ГПМ. По статистическим параметрам, приведенным в табл. 3, можно заключить, что в данном событии все модели разбалансированы (большой *OUR*). Наилучшую точность для выхода в магнитослой дала модель KS с *POD* = 0.98 и самым низким *FAR*. Разумную точность также продемонстрировали модели Li и PM с относительно высокими *PCP* и *POD*. Таким образом, в данном случае наилучшую точность имеют модели KS, Li, и PM.

Событие 23.IV.2023

Магнитная буря 23.IV.2023 была сильной ($\min Dst = -165$ нТл). Она началась в 09:00 UT и достигла максимума к 22:00 UT. В этот день данные с КА *GOES-17* отсутствуют. ГПМ

наблюдались КА *GOES-16* в полуденном секторе в районе 12:00–13:00 LT в интервале 18:11–19:37 UT. Суммарное время в магнитослое составило 3586 с. Интервалы магнитослоя, межпланетные и геомагнитные условия, а также показания моделей показаны на рис. 4. Межпланетные условия измерялись КА *Wind*. Среднее время задержки составило 37 мин. В реальности оно изменялось в зависимости от скорости солнечного ветра и ориентации межпланетных структур, поэтому весь интервал был разбит на сектора длительностью 15 мин, и для каждого сектора определялось индивидуальное время задержки, которое варьировало от 34 до 41 мин.

Интервалы магнитослоя наблюдались на фоне очень сильной отрицательной ММП *Bz* от -13 до -25 нТл, поэтому они характеризуются большими отрицательными значениями *Bz*, измеряемой на КА *GOES* в магнитослое. При этом давление солнечного ветра *Psw* варьировало от 7.4 до 16.2 нПа, а SYM-H индекс от -69 до -121 нТл. На рис. 4. видно длительное и очень сильное отрицательное ММП *Bz* на фоне относительно невысокого давления солнечного ветра *Psw* порядка 10 нПа, что характерно для межпланетных структур типа магнитного облака [23].

На рис. 4 видно, что модели неплохо предсказывают интервалы магнитослоя. Однако модели также часто показывают ошибочные интервалы магнитослоя, занижая расстояние до магнитопаузы. Особенно сильно недооценивает расстояние модель KS. Статистические параметры моделей сравниваются в первых строках табл. 4. Хорошо видно, что все модели, кроме Sh, слабо сбалансированы, их *OUR* далек от 0. Самые высокие *PCP* > 0.6 и относительно низкие *FAR* демонстрируют модели DS и PM. Самую высокую точность предсказания интервалов магнитослоя с *POD* > 0.8 показывают модели KS, Ch, DS, и Li. При этом необходимо учесть, что высокий *POD* у модели KS вызван сильной недооценкой расстояния до магнитопаузы. По совокупности наилучшие характеристики имеют модели KS, DS и PM.

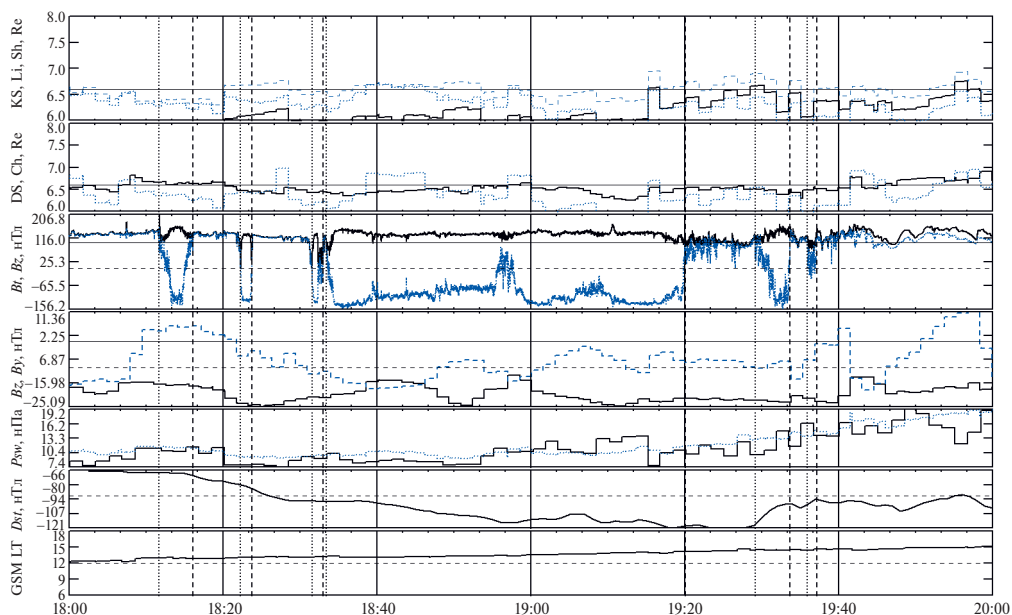


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но 23.IV.2023. Временной сдвиг 37 мин.

Таблица 4. Статистические характеристики моделей для 23.IV.2023

Модель	<i>OUR</i>	<i>FAR</i>	<i>PCP</i>	<i>POD</i>
KS-Wi	-0.957	0.464	0.544	0.979
KS-TH	-0.915	0.430	0.569	0.958
Sh-Wi	-0.162	0.471	0.509	0.586
Sh-TH	-0.733	0.399	0.603	0.883
Ch-Wi	-0.582	0.448	0.555	0.809
Ch-TH	-0.912	0.419	0.586	0.959
DS-Wi	-0.735	0.402	0.630	0.898
DS-TH	-0.969	0.394	0.630	0.987
Li-Wi	-0.733	0.507	0.463	0.851
Li-TH	-0.994	0.433	0.569	0.997
PM-Wi	0.501	0.299	0.600	0.414
PM-TH	-0.532	0.374	0.620	0.809

Интересно сравнить предсказание моделей по данным КА *THEMIS-E*, полученным непосредственно перед головной ударной волной, как показано на рис. 5. В данном случае в этой области наблюдаются более высокие давления P_{sw} от 12 до 19 нПа и более экстремальные ММП B_z от -30 до -13 нТл. Более экстремальные условия в начале и конце интервала в 18:00–18:12 и 19:36–20:00 UT вызвали ложные интервалы магнитослоя по всем моделям. Нужно заметить, что из анализа были исключены два коротких интервала 18:30–18:36 UT и 19:27–19:30 UT, когда КА *THEMIS-E* находился в магнитослое.

Наиболее экстремальные условия в межпланетной среде наблюдались с 18:36 до 19:30 UT, когда КА *GOES-16* находился в магнитослое.

Важно заметить, что при ММП $B_z < 20$ нТл модели KS, Sh, Ch, Li и PM не реагируют на изменения B_z и следуют вариациям давления солнечного ветра P_{sw} . Ярким примером является интервал 18:57–19:00 UT, когда отрицательный B_z упал до максимальных значений -30 нТл, однако модели не показывают уменьшения расстояния до магнитопаузы. Наоборот, они демонстрируют небольшое увеличение расстояния, связанное с провалом в P_{sw} , так что модель Sh даже предсказывает ложный возврат магнитосферы. Такое поведение моделей объясняется тем, что они учитывают эффект насыщения воздействия ММП B_z вблизи -20 нТл.

Для межпланетных данных с КА *THEMIS-E* статистические параметры моделей приведены

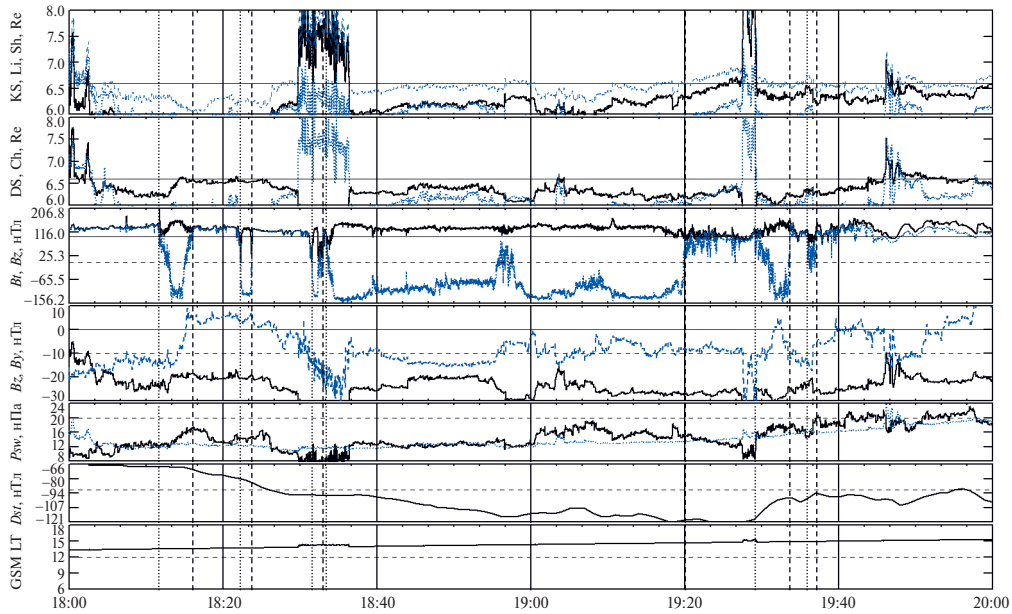


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но 23.IV.2023. Межпланетные параметры измерялись на КА THEMIS-E с временным сдвигом 3 мин. Серыми прямоугольниками заштрихованы интервалы, когда THEMIS-E находился в магнитослое.

во вторых строчках табл. 4. Хорошо видно, что для всех моделей *OUR* ушел в большие отрицательные значения, что связано с более экстремальными межпланетными условиями. Исключением можно считать более-менее сбалансированную модель *PM*, для которой $OUR = 0.5$. Эта модель демонстрирует высокую точность $PCP = 0.62$ и рекордно низкий уровень ложных предсказаний $FAR = 0.374$, хотя предсказание магнитослая у нее не самое лучшее $POD = 0.809$. Высокие $POD > 0.9$ у моделей *KS*, *Ch*, *DS* и *Li*. Однако это сопровождается высоким уровнем ложных предсказаний магнитослая $FAR > 0.4$ и низкой точностью $PCP < 0.6$. Исключением является модель *DS*, у которой $FAR = 0.394$ и самая высокая точность $PCP = 0.63$. Таким образом, по совокупности всех статистических характеристик можно считать, что для межпланетных данных с КА THEMIS-E наилучшими являются модели *DS*, *PM* и *Sh*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 5 для всех трех событий сведены общие характеристики межпланетных и геомагнитных условий, а также указаны наилучшие модели для каждого события и межпланетного монитора. Событие 26.II.2023 характеризуется низкой буревой активностью и средней возмущенностью в солнечном ветре с высокими давлениями P_{sw} и большими отрицательными значениями

ММП B_z . Наилучшую точность в предсказании ГПМ и интервалов магнитослая в этом событии продемонстрировали модели *KS*, *Li* и *Sh*. Событие 23.III.2023 характеризуется очень высокими давлениями солнечного ветра, слабыми отрицательными ММП B_z и невысоким уровнем геомагнитной активности. В этом событии хорошую точность показали модели *KS*, *Li*, *PM*. Можно отметить, что оба события ГПМ были связаны с приходом к Земле межпланетного магнитослая, т.е. структуры типа *Sheath*. В событии 23.IV.2023 интервалы магнитослая наблюдались на фоне сильной буревой активности и очень сильных отрицательных значений ММП B_z , характерных для межпланетной структуры *MC*. В экстремальных условиях наилучшую точность дают модели *PM*, *DS*, а также *KS* и *Sh*.

Таким образом, модель *KS* продемонстрировала достаточно высокую точность в предсказании ГПМ во всех трех событиях. Модель *Li* хорошо предсказывает ГПМ в событиях с низкой буревой активностью на фоне небольших отрицательных ММП B_z . Для экстремальных событий с высокими давлениями и/или очень сильными отрицательными ММП B_z хорошую точность показывает модель *PM*. Модели *Sh* и *DS* хорошо предсказывают ГПМ во время сильной геомагнитной возмущенности на фоне сильных отрицательных ММП B_z и высоких давлений солнечного ветра.

Таблица 5. Общие характеристики событий и моделей ГПМ

Событие	P_{sw} , нПа	B_z , нТл	Dst , нТл	Модели	Структура
26.II.2023 <i>Wind</i>	13.5... 17	-10... -2	-14... -37	KS, Li	Sheath
26.II.2023 <i>THEMIS</i>	15.8... 22.4	-14... 3	-14... -37	KS, Sh, Li	
23.III.2023 <i>Wind</i>	16... 29.9	-8... 0	-35... -44	KS, Li, PM	Sheath
23.IV.2023 <i>Wind</i>	7.4... 16.2	-25... -13	-69... -121	KS, DS, PM	MC
23.IV.2023 <i>THEMIS</i>	12... 19	-30... -17	-69... -121	Sh, DS, PM	

При сравнении моделей по данным различных межпланетных мониторов необходимо учитывать их удаленность от Земли вследствие наличия в солнечном ветре мелкомасштабных структур. Очевидно, данные околоземного монитора более предпочтительны. Кроме того, нужно учитывать деградацию плазменных приборов при расчете давления солнечного ветра. Как видно в табл. 5, современный КА *THEMIS*, запущенный в 2007 г., показывает на $\sim 20\%$ более высокое P_{sw} , чем КА *Wind*, запущенный в 1994 г. Следует заметить, что основная масса ГПМ анализировалась и моделировалась с использованием межпланетных данных мониторов *Wind* и *ACE*. Их плазменные приборы деградировали, особенно на КА *ACE*, поэтому требуется дополнительная калибровка плазменных данных от удаленных межпланетных мониторов с данными околоземных КА типа *THEMIS*.

Способность предсказать ГПМ определяется также качеством модели, ее зависимостью от межпланетных параметров. В частности, показано, что модель Sh имеет тенденцию завышать расстояние до магнитопаузы при ГМП [18], что обеспечивает ей низкий *FAR*, но это также приводит и к низкому уровню предсказаний магнитослоя *POD* и большому положительному *OUR*. При нормальных условиях, наоборот, модель занижает расстояние до магнитопаузы [24]. Это связано с несбалансированной зависимостью модели от давления солнечного ветра.

Другим проблемным моментом является эффект насыщения зависимости расстояния до магнитопаузы от ММП B_z . В модели Sh порог насыщения зависит от давления солнечного ветра [13], в модели PM – от уровня геомагнитной активности [3], а в модели DS он имеет сложную зависимость от P_{sw} и B_y . Однако эта проблема до сих пор слабо исследована, поэтому модели KS, Sh и Li вводят порог как некоторую константу вблизи $B_z = -20$ нТл. В данном случае эффект насыщения хорошо проявился во время экстремальных межпланетных условий в событии 23.IV.2023 (рис. 5), когда модели KS, Sh, Li и PM не реагировали на изменения большой

отрицательной ММП B_z , следуя только вариациям давления солнечного ветра.

Точность моделей также зависит от неучтенных эффектов. Одним из них является асимметрия утро – вечер для ГПМ при больших отрицательных ММП B_z [16]. Этот эффект сильно переоценен в моделях KS и DS, вследствие чего они систематически занижают расстояние до магнитопаузы в утреннем и полуденном секторах при сильных отрицательных ММП B_z . Это приводит к большим отрицательным *OUR* и повышенным *FAR*, хотя и обеспечивает высокий уровень предсказания интервалов магнитослоя *POD*.

Другим проблемным эффектом является предыстория [17]. Хорошо известно, что текущее состояние магнитосферы определяется интегральной динамикой межпланетных условий. В частности *Dst*-вариация является интегральной функцией воздействия индуцированного электрического поля солнечного ветра [25]. В модели PM используется SYM-H как 1-минутный аналог *Dst*-вариации, который можно рассматривать как параметр, зависящий от предыстории. Как видно в табл. 5, учет данного эффекта действительно позволил избежать предсказания ложных интервалов магнитослоя, понизить *FAR* и улучшить точность модели на начальной фазе магнитных бурь.

Подытоживая, можно сказать, что сильный разброс в отклонениях предсказания моделей от наблюдений интервалов магнитослоя, связанных с ГПМ, определяется как внешними, так и внутримодельными факторами. К внешним факторам относится качество определения межпланетных условий, влияющих на магнитопаузу. Внутренними факторами являются модельные зависимости от параметров межпланетной среды и текущего состояния магнитосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По магнитным данным КА *GOES-16* и *GOES-17* были идентифицированы интервалы, когда геостационарные оказывались в магнитослое во время магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля 2023 г. Для этих событий

проведен сравнительный анализ различных моделей магнитопаузы на основе данных о межпланетной среде, полученных с КА *THEMIS-E* и монитора *Wind*. Показано, что монитор *Wind* наблюдает межпланетные условия, которые могут сильно отличаться от тех, что наблюдаются на околоземном КА *THEMIS-E*. Сравнение моделей, основанное на статистических параметрах по определению интервалов магнитослоя, дало следующие результаты:

Для всех трех событий высокую точность демонстрирует асимметричная модель KS [1].

В событиях с низкой буревой активностью на фоне небольших отрицательных ММП B_z хорошие результаты показывает трехмерная модель Li [2].

Для экстремальных событий с очень высокими давлениями и/или очень сильными отрицательными ММП B_z хорошую точность показывает модель PM [3].

При высоких давлениях солнечного ветра на фоне больших отрицательных ММП B_z хорошую точность демонстрируют модели Sh [4] и нейросетевая модель DS [5].

На основе сравнительного анализа показано, что на точность моделей влияют следующие факторы и эффекты:

- зависимость от давления солнечного ветра;
- эффект насыщения воздействия больших отрицательных ММП B_z на магнитопаузу;
- асимметрия магнитопаузы утро – вечер при больших отрицательных ММП B_z ;
- эффект предыстории.

Дальнейшее развитие моделей ГПМ должно базироваться на более аккуратном учете этих ключевых факторов и эффектов с использованием имеющихся и новых экспериментальных данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен NASA/GSFC ISTR (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) за предоставление данных по КА *Wind*, *GOES* и *THEMIS*. Автор также благодарит Мировой центр данных в Киото за предоставление индексов *Dst* и *ASY/SYM* (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kuznetsov S.N., Suvorova A.V.* An empirical model of the magnetopause for broad ranges of solar wind pressure and B_z IMF // *Polar Cap Boundary Phenomena. NATO ASI Ser.* 1998. V. 509. P. 51–61. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5214-3_5
2. *Lin R.L., Zhang X.X., Liu S.Q. et al.* A three-dimensional asymmetric magnetopause model // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. Art.ID. A04207. <https://doi.org/10.1029/2009JA014235>.
3. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K.* A predictive model of geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. Art.ID. A05208. <https://doi.org/10.1029/2010JA016208>
4. *Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al.* Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. Iss.A8. P. 17691–17700. <https://doi.org/10.1029/98JA01103>
5. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V.* Three-dimensional artificial neural network model of the dayside magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 18909–18918. <https://doi.org/10.1029/2000JA900008>
6. *Dredger P.M., Lopez R.E., Collado-Vega Y.M.* Comparing magnetopause predictions from two MHD models during a geomagnetic storm and a quiet period // *Front. Astron. Space Sci.* 2023. V. 10. Art.ID. 1213331. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1213331>
7. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K. et al.* Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2014. V. 119. P. 877–896. <https://doi.org/10.1002/2013JA019534>
8. *Lanzerotti L.J., LaFleur K., MacLennan C.G. et al.* Geosynchronous spacecraft charging in January 1997 // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. Iss. 15. P. 2967–2970. <https://doi.org/10.1029/98GL00987>
9. *Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A.* A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. P. 953–956. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-953-2002>

10. *Odenwald S.F., Green J.L.* Forecasting the impact of an 1859-caliber superstorm on geosynchronous Earth-orbiting satellites: Transponder resources // *Space Weather*. 2007. V. 5. Art.ID. S06002. <https://doi.org/10.1029/2006SW000262>
11. *Choi H.-S., Lee J., Cho K.-S. et al.* Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships // *Space Weather*. 2011. V. 9. Art.ID. S06001. <https://doi.org/10.1029/2010SW000597>
12. *Kuznetsov S.N., Suvorova A.V.* Solar wind control of the magnetopause shape and location. *Radiat. Meas.* 1996. V. 26. Iss. 3. P. 413–416.
13. *Yang Y.-H., Chao J.K., Dmitriev A.V. et al.* Saturation of IMF Bz influence on the position of dayside magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. A3. <https://doi.org/10.1029/2002JA009621>
14. *Кузнецов С.Н., Суворова А.В.* Форма магнитопаузы вблизи геостационарной орбиты. *Геомаг. и аэроном.* 1997. Т. 37. № 3. С. 1–11.
15. *Кузнецов С.Н., Суворова А.В., Дмитриев А.В.* Форма и размеры магнитопаузы: Связь с параметрами межпланетной среды // *Геомаг. и аэроном.* 1998. Т. 38. № 6. С. 7–16.
16. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.K. et al.* Dawn-dusk asymmetry of geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. Art.ID. A05203. <https://doi.org/10.1029/2003JA010171>
17. *Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al.* Toward predicting the position of the magnetopause within geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. Art. ID. 2641. <https://doi.org/10.1029/1999JA900467>
18. *Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al.* Dependence of magnetopause erosion on southward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. Iss. A9. P. 18777–18788. <https://doi.org/10.1029/2001JA900039>
19. *Yang Y.-H., Chao J.K., Lin C.-H. et al.* Comparison of three magnetopause prediction models under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. Iss. A1. <https://doi.org/10.1029/2001JA000079>
20. *Dmitriev A.V., Lin R.L., Liu S.Q. et al.* Model prediction of geosynchronous magnetopause crossings // *Space Weather*. 2016. V. 14. P. 530–543. <https://doi.org/10.1002/2016SW001385>
21. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Chao J.-K. et al.* Necessary conditions for the geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art. ID. A01206. <https://doi.org/10.1029/2003JA010079>
22. *Dmitriev A.V., Chao J.K., Wu D.-J.* Comparative study of bow shock models using Wind and Geotail observations // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. A12. <https://doi.org/10.1029/2003JA010027>
23. *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M. Yu., Nikolaeva N.S. et al.* Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // *Bulg. J. Phys.* 2007. V. 34. P. 128–135.
24. *Case N.A., Wild J.A.* The location of the Earth's magnetopause: A comparison of modeled position and in situ Cluster data // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2013. V. 118. P. 6127–6135. <https://doi.org/10.1002/jgra.50572>
25. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 4204–4214.