



ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ

Проблемы солнечно-земной физики



НАУКА
— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 65, номер 1, 2025

База данных наблюдений Солнца в ближней инфракрасной области, полученных на телескопе БСТ-2 КрАО

О. А. Андреева, В. М. Малащук, А. А. Плотников

3

Механизмы генерации зебра-структур в солнечном радиоизлучении на фоне сложных динамических спектров

Г. П. Чернов, В. В. Фомичев

15

Влияние процессов на Солнце и в межпланетной среде на солнечное протонное событие 30.03.2022 г.

Н. А. Власова, Г. А. Базилевская, Е. А. Гинзбург, Е. И. Дайбог, В. В. Калегаев, К. Б. Капорцева, Ю. И. Логачев, И. Н. Мякова

25

Роль среднемасштабных структур солнечного ветра в развитии турбулентности за головной ударной волной

Л. С. Рахманова, М. О. Рязанцева, А. А. Хохлачев, Ю. И. Ермолаев, Г. Н. Застенкер

40

Индукцированные высыпания протонов из внутреннего радиационного пояса, зарегистрированные в Океании

Е. А. Гинзбург, М. Д. Зинкина, Ю. В. Писанко

52

Статистические исследования связи между амплитудой положительных магнитных бухт на средних широтах, геомагнитной активностью и параметрами солнечного ветра

А. А. Любич, И. В. Дэспирак, Р. Вернер

62

Положение источника дневных высокоширотных магнитных импульсов в магнитосфере по данным спутников DMSP

В. В. Сафаргалеев

75

Динамика аномалии моря Уэдделла и главного ионосферного провала в Южном летнем полушарии

А. Т. Карпачев

92

Особенности ионосферных возмущений, сопровождавших магнитную бурю 14–20 января 2022 г.

В. И. Куркин, Н. А. Золотухина, С. Н. Пономарчук, А. В. Ойнац, К. Г. Ратовский

103

Применение искусственных нейронных сетей для восстановления вектора магнитного поля по однокомпонентным данным

Р. А. Рытов, В. Г. Петров

118

Феррозондовые магнитометры для геофизических и специальных исследований, созданные на базе универсального измерительного модуля (Обзор разработок)

В. В. Любимов

127

УДК 524.3-13

БАЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА В БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ТЕЛЕСКОПЕ БСТ-2 КРАО

© 2025 г. О. А. Андреева^{1,*}, В. М. Малащук^{1,**}, А. А. Плотников^{1,***}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН (КРАО РАН), пос. Научный (Бахчисарайский р-он), Россия

*e-mail: olga@craocrimea.ru

**e-mail: mvm@craocrimea.ru

***e-mail: plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.03.2024 г.

После доработки 05.08.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

Систематические наблюдения в ближней инфракрасной области на Башенном солнечном телескопе БСТ-2 Крымской астрофизической обсерватории начались в 1999 г. и продолжаются до сих пор. За это время накоплен уникальный наблюдательный материал, позволяющий анализировать эволюцию корональных дыр, волокон и активных областей. В связи с тем, что за это время наблюдательный процесс неоднократно модернизировался с разной степенью сложности и вносились изменения в программы обработки, у нас появилось несколько серий спектрогелиограмм разных типов. Последний этап модернизации, в частности, касался создания нового программного обеспечения, с возможностью потоковой обработки результатов наблюдений. Это позволило систематизировать работу по унификации представления наших данных. В этой работе предложена обновленная база данных. Рассмотрена структура базы данных, доступ к ее элементам, приводятся примеры сравнения карт солнечного диска из нашей базы данных с изображениями Солнца в других спектральных линиях и синтезированными различными алгоритмами. Унифицированная база данных представляет собой удобный инструмент для единообразной визуализации наблюдательного материала, полученного более чем за два солнечных цикла. Она может быть полезна для научных исследований в области изучения природы и эволюции корональных дыр и их связи с другими структурами на Солнце.

Ключевые слова: Солнце, базы данных наблюдений Солнца, наблюдения в линии He I $\lambda 10830$ Å

DOI: 10.31857/S0016794025010017, **EDN:** AFFCOF

1. ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасный солнечный спектр содержит множество физических данных о Солнце и исследуется с помощью современных детекторов и технологий наземных солнечных телескопов. Спектроскопические наблюдения в линии He I 10830 Å (He I) дают важную диагностическую информацию о структуре и динамике хромосферы и вышележащей короны.

В то время как элемент гелий был открыт по его желтой линии в видимом спектре во время солнечного затмения [Janssen, 1869], исследования инфракрасной спектральной линии начались только после того, как стала регулярно использоваться пленка. Спектры, полученные в обс. Макмат-Халберт (англ. McMath-Hulbert Observatory)

в Мичигане [Mohler and Goldberg, 1956] показали, что линия имеет большую ширину, соответствующую кинетической температуре $50\,000$ K, и, таким образом, она, вероятно, зарождается в горячих областях солнечной хромосферы. Линия He I согласно Belenko [2001] образуется в верхней хромосфере на высоте ~ 2000 км и возбуждается ультрафиолетовым излучением. Линия поглощения He I находится в пределах диапазона пропускания обычной преломляющей оптики и на длинноволновой границе чувствительности кремниевых ПЗС-детекторов [Penn, 2014]. Для наблюдения этой спектральной особенности использовалось множество комбинаций телескопов, инструментов и детекторов. Открытие линии поглощения He I на диске Солнца было сде-

лано в обс. Маунт-Вилсон (*англ.* Mount Wilson Observatory) с использованием пленки [Babcock and Babcock, 1934], а затем линия наблюдалась там же, но уже с трубкой инфракрасного преобразователя изображения ITT FW-167 [Zirin and Howard, 1966]. Наблюдения полного диска в течение многих лет проводились с помощью кремниевых детекторов на вакуумном телескопе VST [Livingston et al., 1976; Jones et al., 1992] и продолжают инструментами SOLIS VSM и FDP в Национальной солнечной обс. Китт-Пик (*англ.* Kitt Peak National Observatory) [Keller et al., 2003]; инфракрасных матричных детекторов [Penn and Kuhn, 1995; Schad et al., 2013]. Векторные магнитные измерения полного диска с использованием He I проводятся на Солнечном вспышечном телескопе Национальной астрономической обс. Японии (*англ.* National Astronomical Observatory of Japan) примерно с 2010 г. [Hanaoka et al., 2011]. Хотя линия He I доступна с помощью различных телескопов и детекторов, точный спектральный анализ ее является сложной задачей. Линия поглощения обычно очень слабая, достигает глубины всего в несколько процентов от интенсивности континуума спокойного Солнца, но может стать очень темной в волокнах или активных областях (АО) Солнца, где ее поглощение увеличивается в десять раз. Для анализа и научных целей лучше всего наблюдать большую спектральную область, окружающую центр линии [Malanushenko and Jones, 2004]. Сравнивая наблюдения рентгеновского телескопа Скайлэб (*англ.* sky laboratory Skylab) со спектрогелиограммами He I, Harvey et al. [1975] обнаружили, что корональные дыры (КД), видимые в рентгеновских данных, также демонстрируют отсутствие поглощения He I на диске Солнца. Именно в этой линии возможно наблюдать КД с Земли.

2. НАБЛЮДЕНИЯ В ЛИНИИ He I 10830 Å НА ТЕЛЕСКОПЕ БСТ-2 КРАО

Во второй половине 80-х гг. прошлого века в Крымской астрофизической обс. (КраО, *англ.* Crimean Astrophysical observatory (CrAO)) на Башенном Солнечном Телескопе-2 (БСТ-2, *англ.* Tower Solar Telescope-2 (TST-2)) под руководством Н.Н. Степанян были начаты работы по подготовке технических возможностей и программного обеспечения для наблюдений в линии He I. Также под ее руководством была разработана система проведения наблюдений и обработки изображений, организованы ежедневный мониторинг и оперативное представление данных наблюдений в Internet. Это позволило КраО участвовать в национальных и международных про-

граммах наблюдений “Служба Солнца”, “SpaceWeather” и других. Создание полного каталога наблюдений или унифицированной базы данных (БД) также было ее задумкой и нами неоднократно обсуждалось.

Регулярные наблюдения в линии He I в КраО проводятся на телескопе БСТ-2 с дифракционным спектрографом и универсальным спектрофотометром с 1999 г. по настоящее время. За этот период получено свыше 4500 карт полного диска Солнца в линии He I. Однако, в связи с тем, что в течение этого времени процесс наблюдений неоднократно претерпевал модернизацию разной сложности и вносились изменения в программы обработки, мы имели несколько рядов спектрогелиограмм разного вида (рис. 1, левая панель). В связи с этим, возникло желание сформировать единую унифицированную БД, удобную для визуализации и анализа карт диска Солнца.

3. ФОРМИРОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ

Настоящая работа является продолжением серии работ [Андреева и Малащук, 2021; Andreeva and Malaschuk, 2022; Андреева и др., 2023а, б] по формированию унифицированной базы наблюдений Солнца в ближней инфракрасной области, полученных на телескопе БСТ-2 КраО с 1999 г. по настоящее время. Первые две работы положили начало формированию единой базы данных 1999–2018 гг. В работе [Андреева и др., 2023а] представлены технические характеристики телескопа БСТ-2, его оптическая схема, а также рассмотрены этапы модернизации процесса наблюдений в линии He I и программ обработки карт диска Солнца. Их было три, и они подробно описаны в работах [Букач и др., 1990; Степанян и др., 2000; Семёнов и др., 2021]. Последний этап 2019 г. касался системы управления спектрофотометром, было разработано полностью новое программное обеспечение, сопровождающее процесс сканирования, и написана новая программа последующей обработки результатов наблюдений. Модернизация 2019 г. также позволила улучшить качество получаемых изображений Солнца в линии He I, сократила время наблюдений и обработки.

Благодаря тому, что новое программное обеспечение для обработки наблюдений позволяет в достаточно приемлемые сроки обработать в потоке большое количество данных, появилась возможность обработать весь наблюдательный материал по единой методике и привести визуализацию всех наблюдений к единому виду (пример см. рис. 1, правая панель). Это удобно для анали-

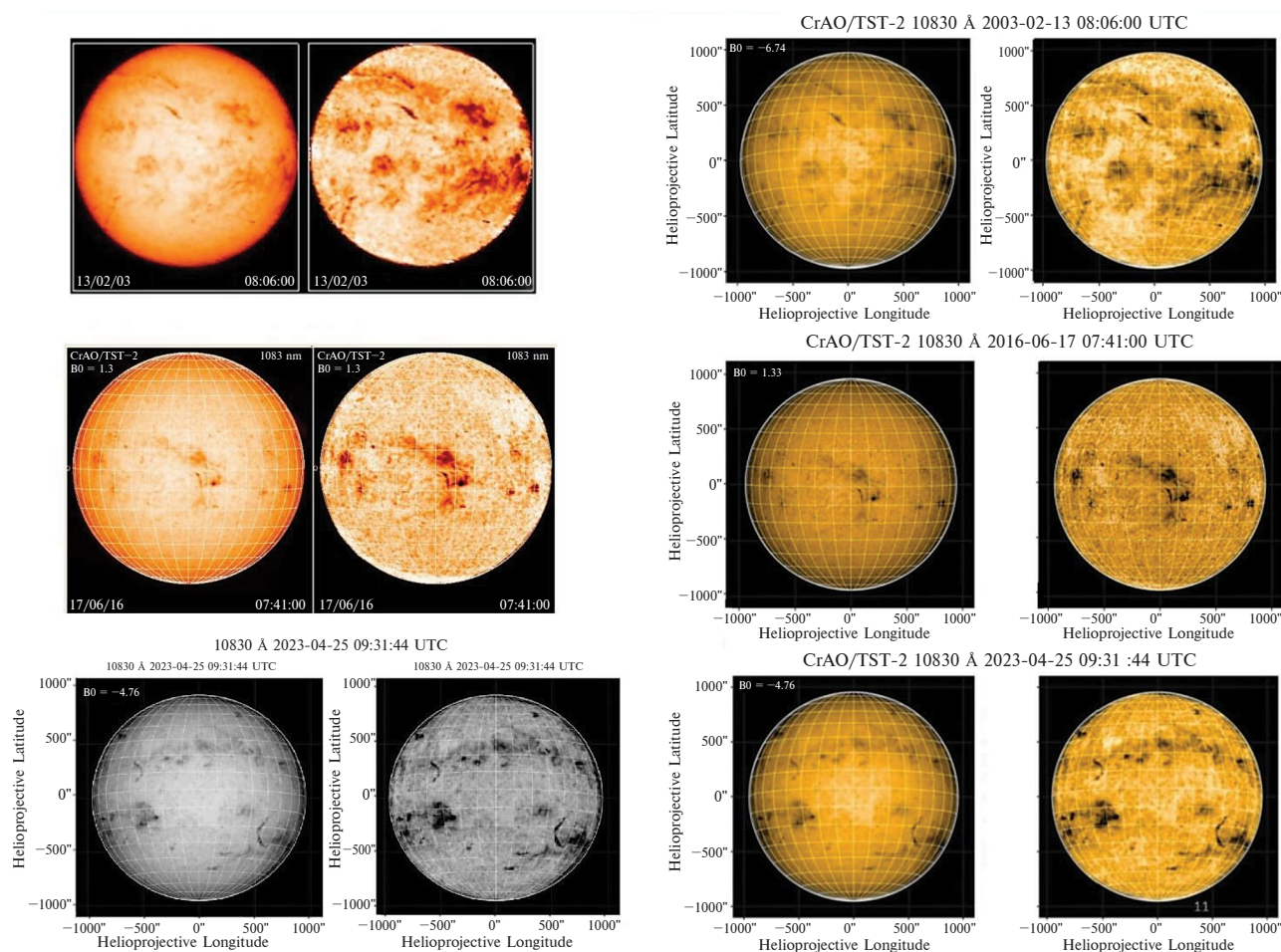


Рис. 1. Изображения Солнца, полученные в линии He I 10830 Å на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2/КраО в разные периоды. Слева — до унификации, справа — карты диска Солнца за те же даты, но обработанные по единой методике.

за, сравнения и просмотра полученных карт Солнца. Ранее публикуемая БД ограничивалась только одним изображением в день, хотя зачастую наблюдений могло быть и больше. Также на сайте были доступны только JPEG-изображения наблюдений, чего недостаточно для компьютерных методов анализа. Мы решили дополнить базу и FITS-файлами. По этим причинам было начато формирование новой базы [Андреева и др., 20236].

В результате работы программы обработки результатов наблюдений данные сохраняются в FITS-формате в двух вариантах: карта интенсивности с потемнением к лимбу и без него. В заголовок FITS-файлов внесена вся информация, регистрируемая во время сканирования изображения: дата и время наблюдения, ширина и высота щели спектрографа, угол наклона целостной установки, размер пикселя в угловых

координатах. Эти данные дают возможность пользователям легко проводить координатные преобразования для желаемого анализа.

Кроме того, для удобства визуального анализа данные сохраняются в формате JPEG-изображений (рис. 2) с добавлением вспомогательной информации. JPEG-файл представляет собой пару карт с изображениями диска Солнца, нормализованных к $3.6'' \times 3.6''$ на один пиксель. Левое изображение — с потемнением к лимбу, правое — без потемнения. На картах указаны данные регистрации изображений — время и соответствующее значение угла B_0 (угла между солнечным экватором и лучом зрения). На оба изображения наложена сетка с шагом в 10° .

При работе с наблюдательными данными требуется учитывать инструментальные эффекты, приводящие к ошибкам в измерениях. Ниже

CrAO/TST-2 10830 Å 2003-12-05 09:33:23 UTC

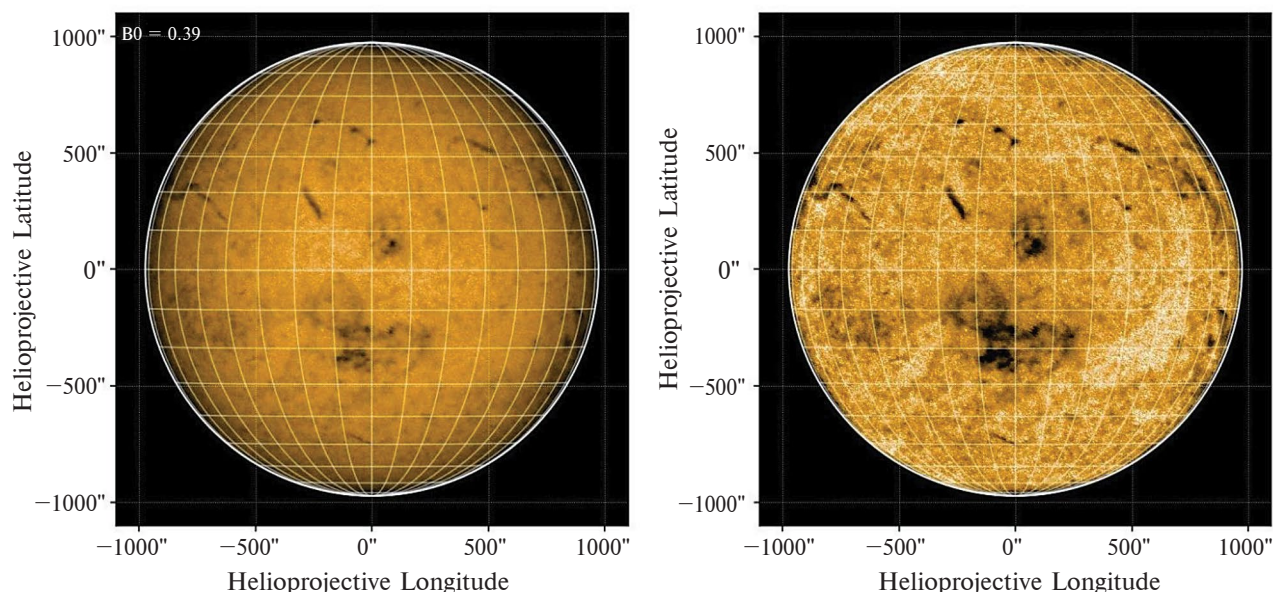


Рис. 2. Изображения Солнца, полученные в линии He I 10830 Å на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2. Слева — необработанное изображение, справа — обработанное, с учетом потемнения к краю и устранения люфта. Корональные дыры в этой линии выглядят как более яркие образования по сравнению с окружающей поверхностью, а волокна и активные области — как очень темные.

опишем индивидуальные особенности, присущие нашим наблюдениям.

Из-за неидеальности часового ведения в некоторые месяцы полученное “сырое” изображение может быть вытянуто в эллипс вдоль одной из осей. При обработке пропорции изображения меняются, чтобы изображение стало близко к форме круга.

Ввиду того, что изображение диска Солнца регистрируется не одномоментно, а попиксельно, атмосферное дрожание и собственные колебания телескопа всегда будут приводить к некоторой деформации изображения, вплоть до того, что лимб полученного изображения местами отходит от окружности (к примеру, северо-западная часть на рис. 2).

Также за время наблюдения (~45 мин для диска размером 701×701 пк) диск Солнца может быть неоднократно перекрыт проходящими облаками. В результате полученное изображение Солнца будет частично перекрыто одной или несколькими темными полосами. Такие изображения вручную отфильтровываются от попадания в финальный каталог, однако могут быть полезными при анализе каких-либо локальных областей, поэтому сохраняются отдельно и могут быть высланы по запросу.

Позиционирование входного окна ФЭУ на спектральной линии проводится вручную. Также не исключен и временной дрейф изображения спектра вдоль направления дисперсии, вызванный собственными колебаниями спектрографа и неидеальностью центрирования его зеркал. Поэтому, вообще говоря, длина волны, на которой проводится сканирование, не будет в точности совпадать от изображения к изображению, что следует учитывать при сравнении численных значений интенсивности между различными картами.

Ниже мы представляем обновленную БД, ее структуру и доступ к ней, остановимся на вопросах первичного анализа изображений и сравним их с изображениями диска Солнца, полученными в других спектральных линиях и синтезированными различными методами.

4. УНИФИРОВАННАЯ БАЗА ДАННЫХ

Обновленная БД находится на сайте нашего отдела в разделе “Наблюдения”, попасть на нее можно по ссылке (<https://sun.crao.ru/observations/hel-1083nm>) (рис. 3).

Вверху страницы находится последнее размещенное изображение в линии He I. Ниже — таб-

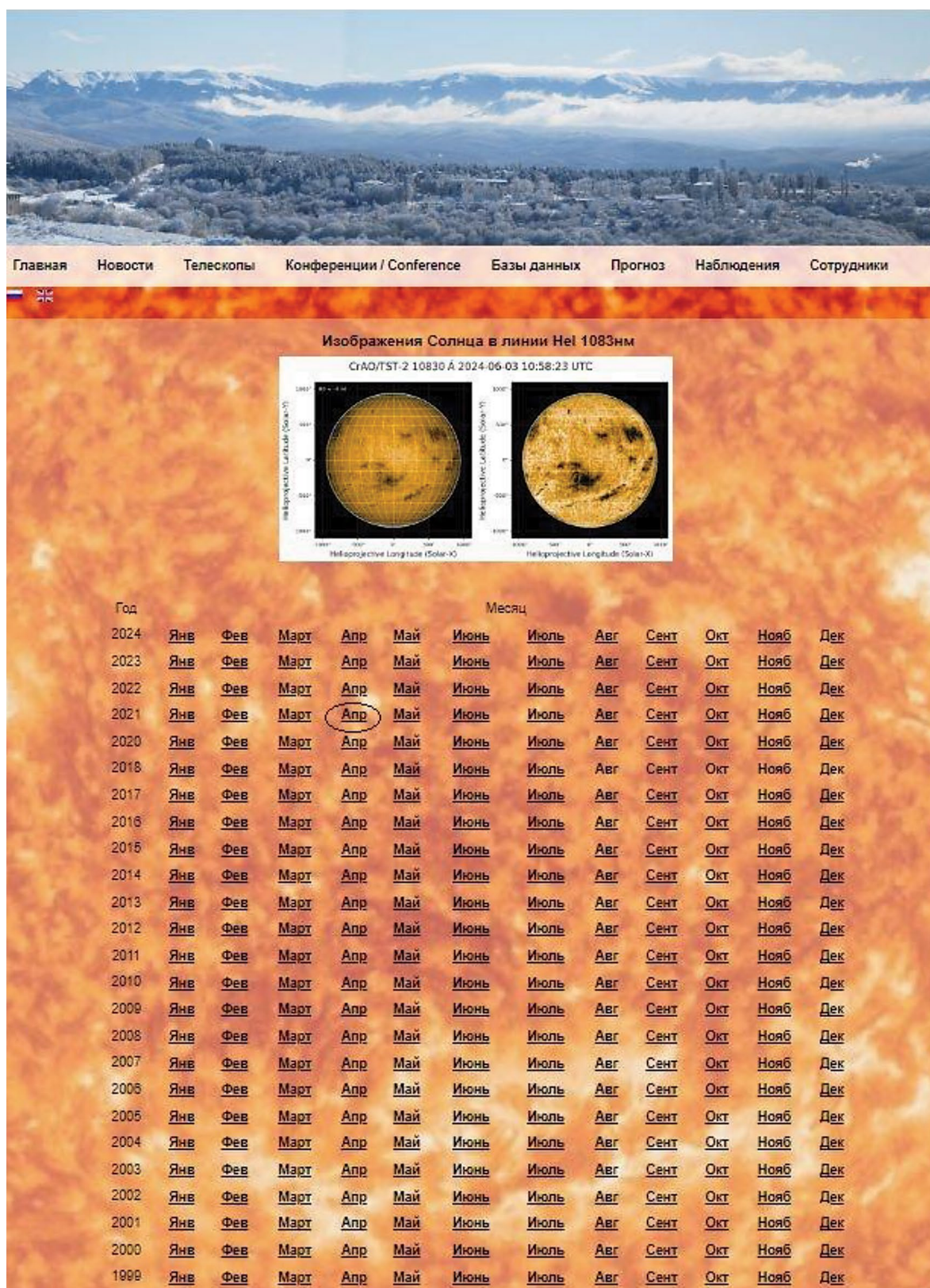


Рис. 3. Унифицированная база данных наблюдений диска Солнца в линии He I 10830 Å, представленная на странице КраО.

лица наблюдений по годам и месяцам со ссылками на соответствующие директории. На рис. 4 показан пример содержимого одной из директорий.

В корне директории за каждый месяц находятся jpg-файлы и 2 папки fits и fits_cor, в которые добавлены карты интенсивности в формате FITS с потемнением к лимбу и без него, соответственно. Названия FITS-файлов совпадают с названиями соответствующих JPEG-изображений.

Ранее на нашей странице космической погоды выставлялось только одно изображение Солнца в линии He I в день наблюдений, несмотря на то, что могло быть получено несколько изображений

в течение дня. В обновленной БД представлены и эти недостающие изображения. Пример нескольких последовательных изображений за один день показан на рис. 5.

Как упоминалось выше, в архиве содержатся и карты, где часть диска закрыта проходящими облаками. Такие изображения не опубликованы на сайте и могут быть высланы по запросу (или будут впоследствии размещены в отдельном каталоге).

Данные можно скачивать через анонимный FTP-сервер. Каталог доступен по ссылке: (ftp://sun.crao.ru/helium/) через Проводник Windows или другими доступными средствами. Кроме того, можно получить интересующие файлы за любой период одним архивом обратившись к А. Плотникову по адресу: plotnikov.andrey.alex@yandex.ru.

Index of /~data/helium/21_04

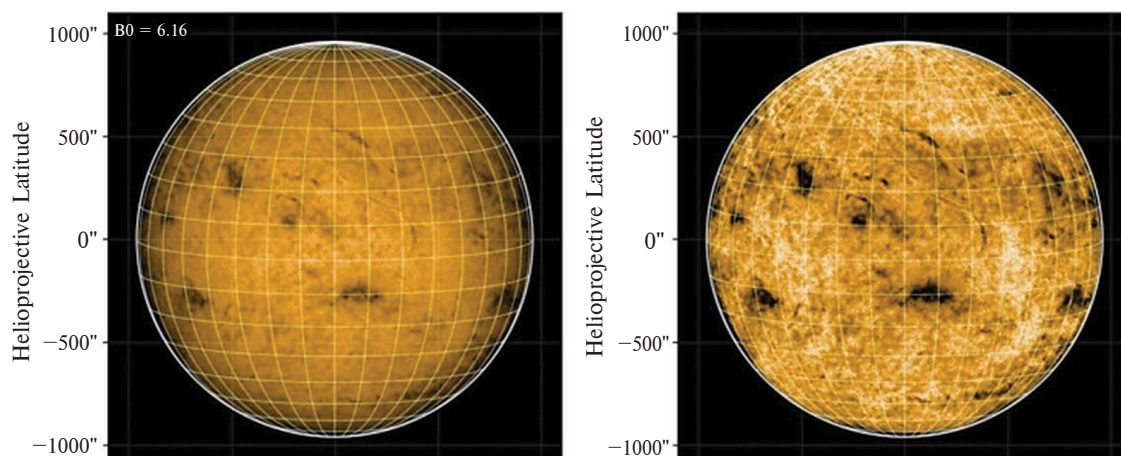
Name	Last modified	Size	Description
<hr/>			
Parent Directory		-	
20210402_0842.jpg	2023-12-29 16:25	179K	
20210402_0942.jpg	2023-12-29 16:25	177K	
20210402_1002.jpg	2023-12-29 16:25	200K	
20210402_1055.jpg	2023-12-29 16:25	201K	
20210402_1148.jpg	2023-12-29 16:25	200K	
20210406_0745.jpg	2023-12-29 16:25	202K	
20210406_0832.jpg	2023-12-29 16:25	199K	
20210406_0935.jpg	2023-12-29 16:25	198K	
20210406_1026.jpg	2023-12-29 16:25	199K	
20210406_1117.jpg	2023-12-29 16:25	204K	
20210424_0749.jpg	2023-12-29 16:25	180K	
20210424_0806.jpg	2023-12-29 16:25	205K	
20210424_0852.jpg	2023-12-29 16:25	204K	
20210426_0722.jpg	2023-12-29 16:25	177K	
20210426_1004.jpg	2023-12-29 16:25	205K	
20210426_1055.jpg	2023-12-29 16:25	205K	
20210426_1141.jpg	2023-12-29 16:25	204K	
20210430_0527.jpg	2023-12-29 16:25	174K	
20210430_0547.jpg	2023-12-29 16:25	205K	
20210430_0637.jpg	2023-12-29 16:25	218K	
20210430_0729.jpg	2023-12-29 16:25	207K	
20210430_0821.jpg	2023-12-29 16:25	206K	
fits/	2024-01-15 10:45	-	
fits_cor/	2024-01-15 10:56	-	

Рис. 4. Структура директории обновленной базы данных. Апрель 2021 г.

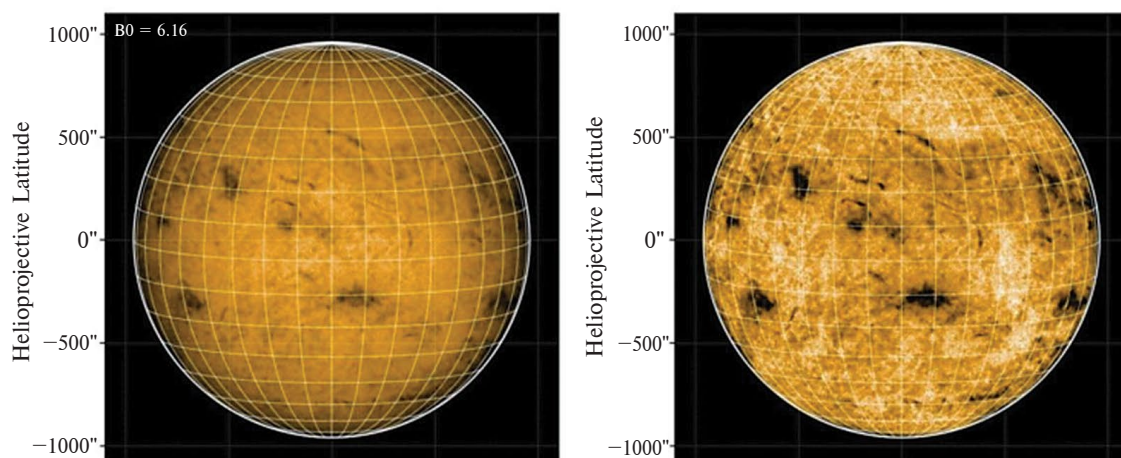
5. ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ НА ДИСКЕ СОЛНЦА

Интересно проанализировать, как согласуются солнечные структуры карт диска Солнца из нашей БД БСТ-2/КраО с изображениями Солнца в других спектральных линиях и синтезированными разными алгоритмами. Для сравнения мы рассмотрели изображения Солнца в спектральных линиях H-alpha, полученные в обс. Канзельхёэ (*англ.* KSO, Kanzelhoehe Solar Observatory), железа Fe XII 195 (EIT/SOHO, Extreme ultraviolet Imaging Telescope on board Solar & Heliospheric Observatory) и 193 Å (AIA/SDO, Atmospheric Imaging Assembly on board Solar Dynamics Observatory). Были использованы имеющиеся в открытом доступе данные за те же даты, близкие по времени. Это не всегда было возможно, поэтому брались те, что были доступны в этот день. Учитывая, что выполнялся первичный анализ на обнаружение солнечных образований, которые меняются не так быстро в течение дня, мы посчитали возможным сделать такое допущение. На изображениях в линии He I КД выглядят как более яркие области, чем окружающая поверхность, активные области и волокна окрашены темным цветом. На изображениях H-alpha волокна — темные, а АО — яркие участки поверхности, в линиях Fe XII 195 и 193 Å КД окрашены глубоким темным цветом, АО — яркие, волокна — темные образования. Также для сравнения использованы ежедневные интерактивные карты солнечной активности (СА) по данным Кисловодской Горной Астрономической Станции (КГАС), представленные на сайте (<https://observethesun.com>) и изображения Солнца с КД, выделенными двумя традиционными популярными алгоритмами SPoCA и CHIMERA.

CrAO/TST-2 10830 Å 2003-10-11 09:17:10 UTC



CrAO/TST-2 10830 Å 2003-10-11 10:03:29 UTC



CrAO/TST-2 10830 Å 2003-10-11 11:05:18 UTC

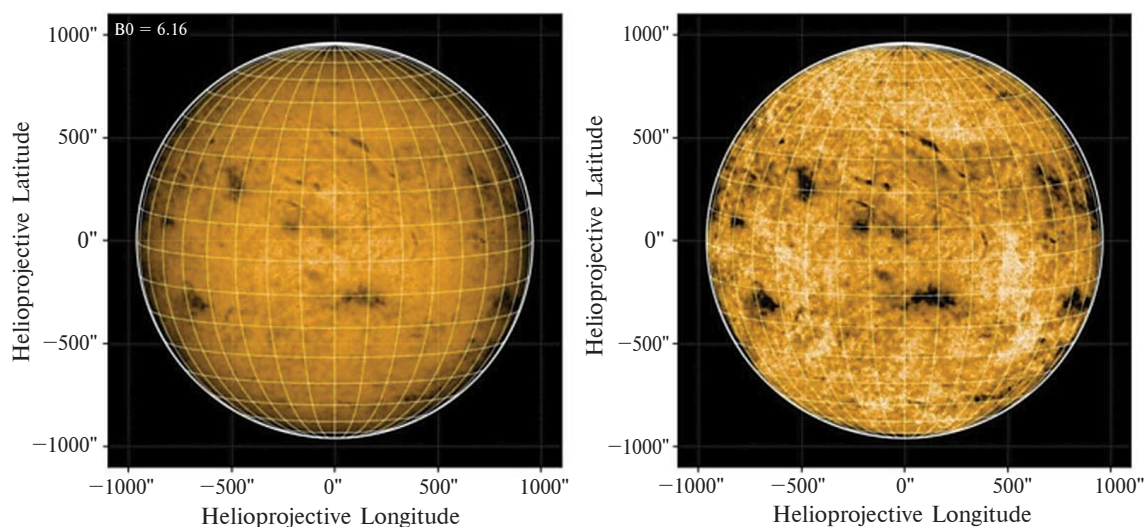


Рис. 5. Карты диска Солнца, полученные в линии He I 10830 Å в один день – 11 октября 2023 г. в 09:17, 10:03 и 11:05. Слева – изображения с потемнением к лимбу, справа – обработанные с учетом потемнения.

Примеры сравнения идентификации солнечных образований на изображениях в линии He I, полученных на телескопе БСТ-2/КрАО

4 июля 2003, 6 августа 2012 и 11 октября 2023 гг. с изображениями других источников приведены на рис. 6–8.

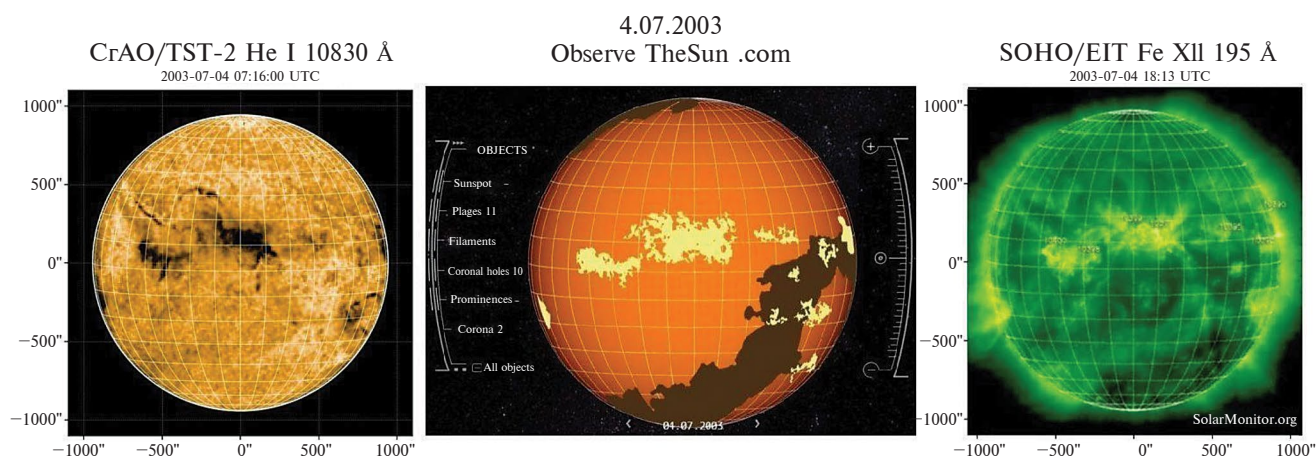


Рис. 6. Изображения Солнца, полученные 4.07.2003 г. в спектральных линиях He I 10830 Å – слева и Fe XII 195 Å – справа, в центре – интерактивные карты СА по данным КГАС с сайта (<https://observethesun.com>).

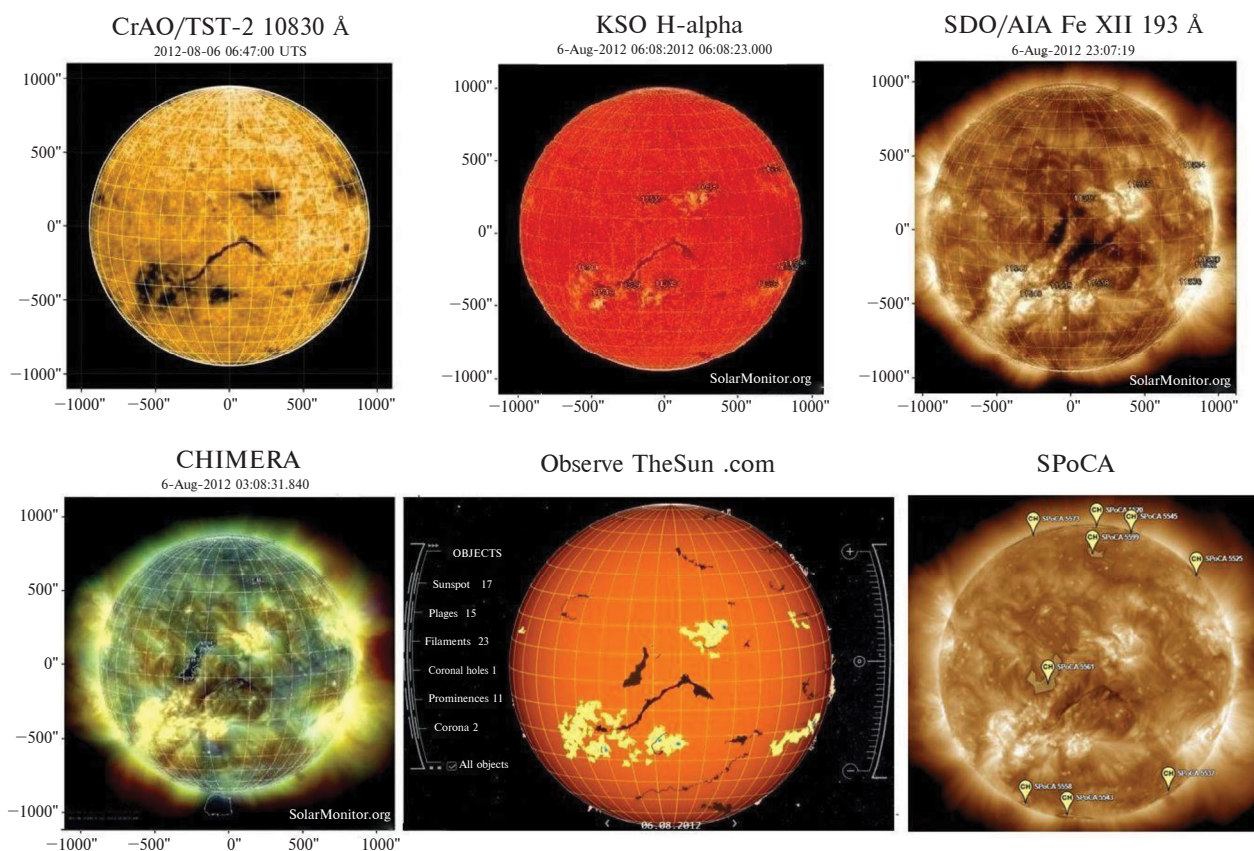


Рис. 7. Изображения Солнца, полученные 6.08.2012 г. в спектральных линиях He I 10830 Å H-alpha и Fe XII 193 Å – верхний ряд слева направо. Нижний ряд: в центре – интерактивные карты СА по данным КГАС с сайта (<https://observethesun.com>). Слева и справа изображения Солнца с КД, отождествленными алгоритмами CHIMERA и SPoCA соответственно.

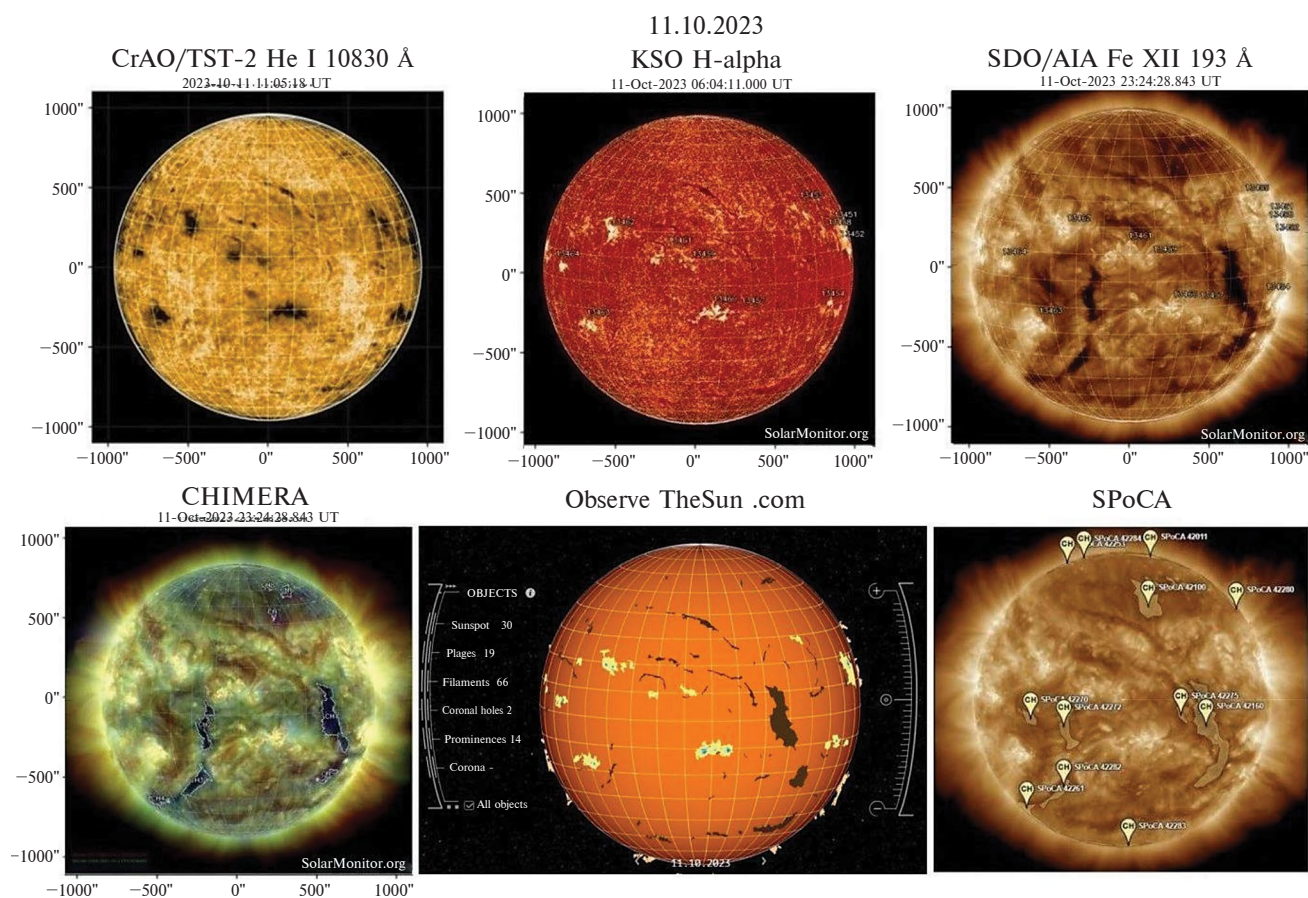


Рис. 8. Изображения Солнца, полученные 11.10.2023 г. в спектральных линиях He I 10830 Å, H-alpha, Fe XII 193 Å – верхний ряд слева направо. Нижний ряд: в центре интерактивные карты СА по данным КГАС с сайта (<https://observethesun.com>). Слева и справа – изображения Солнца с КД, отождествленными алгоритмами CHIMERA и SPoCA соответственно.

На всех трех изображениях рис. 6 хорошо просматриваются все АО, северная полярная и огромная южная КД, простирающаяся от полюса, пересекая экватор, до низких широт Северного полушария. Кроме того, на изображении в линии He I четко видны темные нити волокон в западной части Северного полушария.

В наших прошлых работах по исследованию КД по изображениям Солнца в линии Fe XII 193 Å (AIA/SDO) возникали трудности их отождествления, так как и КД, и волокна в этой линии выглядят как темные образования. В то же время, изображения в линии He I позволяют однозначно их различить. Это хорошо демонстрирует рис. 7. Большое волокно в центре Южного полушария, трудно различимое на изображениях в линии Fe XII 193 Å (AIA/SDO) и отождествленное алгоритмами CHIMERA и SPoCA, уверенно просматривается на изображении в линии He I. Этот

факт также подтверждается картами Солнца H-alpha/KSO и с сайта (<https://observethesun.com>). С другой стороны, слабую КД, расположенную близко к центру в низких широтах Северного полушария на изображении в линии He I, становится возможным различить только после просмотра на изображениях с других источников (нижний ряд рис. 7).

Также известно, что на данный момент не существует единого оптимального алгоритма выделения КД. На рис. 8 приведены интерактивные карты СА по данным КГАС и изображения Солнца с КД, выделенными алгоритмами CHIMERA и SPoCA – нижний ряд. Большинство КД, выделенных этими алгоритмами, видны также на изображениях в линии He I.

Анализ показал, что наблюдается достаточно хорошее согласие в отождествлении солнечных структур на диске Солнца. Использование изо-

бражений Солнца в разных спектральных линиях и выделение солнечных структур различными синтезированными методами — это хороший метод уверенного отождествления солнечных образований на диске Солнца.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате формирования унифицированной базы наблюдений в линии He I 10830 Å, полученных на универсальном спектрофотометре телескопа БСТ-2 КрАО с 1999 г. по настоящее время, мы получили удобную для просмотра, анализа и сравнения единую визуализацию наблюдательного материала. База данных дополнилась недостающими ранее картами полного диска Солнца, стали доступными для пользователей не только JPEG, но и FITS-файлы. Первичный анализ сравнения изображений Солнца из обновленной базы данных с изображениями, полученными другими методами, показал, что это — хороший метод уверенного отождествления солнечных образований на диске Солнца.

Унифицированная БД может быть полезна при проведении научных исследований в области изучения природы и эволюции корональных дыр, их связи с другими структурами на Солнце. Это способствует решению таких важных проблем солнечной физики как исследование структуры, вращения и эволюции крупномасштабного магнитного поля, формирования потоков солнечного ветра.

Надеемся, что эти данные будут востребованы не только нашими сотрудниками, но и специалистами более широкого круга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы высоко ценим вклад Н.Н. Степанян в становление наблюдательного процесса в ближней инфракрасной области в КрАО. Авторы благодарят прошлых и нынешних наблюдателей БСТ-2 (Степанян Н.Н., Маланушенко Е.В., Панамарчук И., Жигалкина Р.К., Штерцер Н.И., Тарашук В.П., Цыбизова О., Малащук В.М., Перебейнос В.А., Андрееву О.А., Ахтемова З.С., Плотникова А.А., Литвишко Д.В. и Шапошникова В.Д.) за продолжительный и кропотливый труд по накоплению наблюдательного материала за более чем 20 лет.

Мы выражаем глубокую благодарность Г.А. Сунице и Д.Г. Семёнову — высококвалифицированным инженерам, за усовершенствование и поддержание в рабочем состоянии всех систем телескопа БСТ-2 на протяжении рассматриваемого периода, а также А.С. Куценко — за проде-

ланную работу по модернизации технических и программных возможностей наблюдений Солнца в линии He I 10830 Å, которая позволила улучшить качество и сократить время наблюдений.

Авторы признательны командам SDO/AIA, SOHO/EIT, КГАС, KSO за возможность иметь доступ к наблюдательным данным для отождествления и сравнения солнечных структур на диске Солнца с результатами наших наблюдений в линии He I.

Благодарим анонимного рецензента за ценные предложения и замечания по статье и по организации базы данных.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания (Тема № 122022400224-7).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов с другими исследователями в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.А., Малащук В.М. Итоги 20-летних наблюдений Солнца в линии He I λ 1083 нм в Крымской астрофизической обсерватории // Изв. Крым. Астрофиз. общ. Т. 117. № 1. С. 62–68. 2021. <https://doi.org/10.31059/izcrao-vol117-iss1-pp62-68>
- Андреева О.А., Плотников А.А., Малащук В.М. Формирование унифицированной базы данных наблюдений Солнца в линии He I 10830 Å, полученных в 1999–2023 гг. на телескопе БСТ-2 КрАО // Изв. Крым. Астрофиз. общ. Т. 119. № 4. С. 35–41. 2023а. <https://doi.org/10.34898/izcrao-vol119-iss4-pp35-41>
- Андреева О.А., Малащук В.М., Плотников А.А. Унифицированная база данных наблюдений Солнца в линии He I 1083 нм, полученных на телескопе БСТ-2/КрАО / Тр. XXVII Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика — 2023”. Санкт-Петербург, ГАО РАН, 9–13 октября 2023 г. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. СПб: ГАО. С. 15–18. 2023б. <https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-15-18>
- Букач А.Б., Дидковский Л.В., Степанян Н.Н., Суница Г.А., Щербакова З.А. Получение спектров и карт Солнца в линии He I λ 10830 Å на базе УВК КАМАК-МЕРА-60 // Изв. Крым. Астрофиз. Обс. Т. 82. С. 172–183. 1990.
- Семёнов Д.Г., Суница Г.А., Куценко А.С. Система управления спектрофотометром телескопа БСТ-2 КрАО РАН // Изв. Крым. Астрофиз. Обс. Т. 117. № 1. С. 15–21. 2021. <https://doi.org/10.31059/izcrao-vol117-iss1-pp15-21>

- Степанян Н.Н., Долгополова Е.В., Елизаров А.И., Маланушенко Е.В., Парчевский К.В., Суница Г.А. Солнечный универсальный спектрофотометр // Изв. Крым. Астрофиз. общ. Т. 96. С. 194–204. 2000.
- Andreeva O., Malaschuk V. The near-infrared observations at the Tower Solar Telescope TST-2 of the Crimean Astrophysical Observatory // Open Astronomy. V. 30. № 1. P. 225–227. 2022. <https://doi.org/10.1515/astro-2021-0030>
- Babcock H.D., Babcock H.W. Some new features of the solar spectrum // Publ. Astron. Soc. Pac. V. 46. № 271. P. 132–133. 1934.
- Belenko I.A. Coronal hole evolution during 1996–1999 // Sol. Phys. V. 199. № 1. P. 23–35. 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010372926629>
- Hanaoka Y., Sakurai T., Shinoda K., Noguchi M., Miyashita M., Fukuda T. Infrared stokes spectropolarimeter at the National Astronomical Observatory of Japan / Proceedings of a conference “Solar polarization 6”. Maui, Hawaii, USA, May 30–June 4. 2010. Eds. Kuhn J.R., Harrington D.M., Lin H., Berdyugina S.V., Trujillo-Bueno J., Keil S.L., Rimmele T.R. / Astr. Soc. P. V. 437. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. P. 371–378. 2011.
- Harvey J., Krieger A.S., Timothy A.F., Vaiana G.S. Comparison of Skylab X-ray and ground-based Helium observations / Proc. Skylab Solar Workshop “Preliminary Results from the S-054 X-Ray Telescope and the Correlated Ground-Based Observations”. Florence, Italy, 21–22 March, 1974. Ed. G. Righini. Florence: Baccini & Chiappi. P. 50–58. 1975.
- Janssen M. The Total solar eclipse of August 1868. Part I // Astronomical Register. V. 7. P. 107–110. 1869.
- Jones H.P., Duvall T.L. Jr., Harvey J.W., Mahaffey C.T., Schwitters J.D., Simmons J.E. The NASA/NSO spectromagnetograph // Sol. Phys. V. 139. № 2. P. 211–232. 1992. <https://doi.org/10.1007/BF00159149>
- Keller C.U., Harvey J.W., Giampapa M.S. (eds.) SOLIS: an innovative suite of synoptic instrument // Proc. SPIE. V. 4853. Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics. 2002. <https://doi.org/10.1117/12.460373>
- Livingston W.C., Harvey J., Pierce A.K., Schrage D., Gillespie B., Simmons J., Slaughter C. Kitt Peak 60-cm vacuum telescope // Appl. Optics. V. 15. № 1. P. 33–39. 1976. <https://doi.org/10.1364/AO.15.000033>
- Malanushenko O.V., Jones H.P. Analysis of He I 1083 nm imaging spectroscopy using a spectral standard // Sol. Phys. V. 222. № 1. P. 43–60. 2004. <https://doi.org/10.1023/B:SOLA.0000036873.75777.33>
- Mohler O.C., Goldberg L. The width of the infrared helium line in the solar spectrum // Astrophys. J. V. 124. P. 13. 1956.
- Penn M.J., Kuhn J.R. Imaging spectropolarimetry of the He I 1083 nanometer line in a flaring solar active region // Astrophys. J. Lett. V. 441. № 1. P. L51–L54. 1995.
- Penn M.J. Infrared solar physics // Living Rev. Sol. Phys. V. 11. № 1. ID 2. 2014. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2014-2>
- Schad T.A., Penn M.J., Lin H. He I vector magnetometry of field-aligned superpenumbral fibrils // Astrophys. J. V. 768. № 2. ID 111. 2013. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/2/111>
- Zirin H., Howard R. The structure of the solar chromosphere. II. Spectroheliograms in λ 10830 Å and their interpretation // Astrophys. J. V. 146. № 2. P. 367–371. 1966.

Database of Near-Infrared Solar Observations Obtained with the TST-2 CrAO Telescope

O. A. Andreeva^{1, *}, V. M. Malashchuk^{1, **}, A. A. Plotnikov^{1, ***}

¹*Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, Russia*

**e-mail: olga@craocrimea.ru*

***e-mail: mvm@craocrimea.ru*

****e-mail: plotnikov.andrey.alex@yandex.ru*

Systematic observations in the near-infrared on the TST-2 solar tower telescope of the Crimean Astrophysical Observatory began in 1999 and continue until now. During this time, unique observational material has been accumulated that allows us to analyze the evolution of coronal holes, filaments and active regions. Due to the fact that during this time the observational process has been repeatedly modernized with varying degrees of complexity, and changes have been made to the processing programs, we have several series of spectroheliograms of different types. The last stage of modernization, in particular, concerned the creation of new software, with the possibility of stream processing of observation results. This allowed us to systematize the work to unify the presentation of our data. In this paper, we present the updated database. The structure of the database, access to its elements, and examples of comparison of solar disk maps from our database with images of the Sun in other spectral lines and synthesized by different algorithms are discussed. The unified database is a convenient tool for uniform visualization of observational material obtained over more than two solar cycles. It can be useful for scientific research in the field of studying the nature and evolution of coronal holes and their connection with other structures on the Sun.

Keywords: Sun, solar observational databases, observations in the He I $\lambda 10830$ Å line

УДК 523.985

МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ ЗЕБРА-СТРУКТУР В СОЛНЕЧНОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ НА ФОНЕ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ

© 2025 г. Г. П. Чернов^{1,*}, В. В. Фомичев^{1,**}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: gchernov@izmiran.ru

** e-mail: fomichev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 01.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Дискуссия о происхождении зебра-структуры продолжается более 50 лет. Во многих работах обычно постулируется, что механизм двойного плазменного резонанса всегда работает, если в магнитной ловушке есть быстрые частицы. По причине ряда трудностей, с которыми сталкивается этот механизм, стали появляться работы по его усовершенствованию, в основном в десятке статей Карлицкого и Яснова, где все обсуждение основывается на изменчивости отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности и допуском некой турбулентности плазмы в источнике. Здесь мы показываем возможности альтернативной модели взаимодействия плазменных волн с вистлерами. Было отобрано несколько явлений, в которых ясно, что отношение масштабов изменения не меняется в магнитной петле как источнике зебра-структуры. Было показано, что все основные детали спорадической зебра-структуры в явлении 1 августа 2010 г. (и во многих других явлениях) удастся объяснить в рамках единой модели зебра-структуры и радиоволокон (fiber bursts) при взаимодействии плазменных волн с вистлерами. Основные изменения полос зебра-структуры вызываются за счет рассеяния быстрых частиц на вистлерах, приводящих к переключению неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный. В конце рассматриваются возможности лабораторных экспериментов и сравнивается солнечная зебра-структура с подобными полосами в декаметровом радиоизлучении Юпитера.

Ключевые слова: вспышки, радиовсплески, тонкая структура, зебра-структура, радиоволокна

DOI: 10.31857/S0016794025010028, **EDN:** AFFCCD

1. ВВЕДЕНИЕ

Понимание природы тонкой структуры радиоизлучения солнечных радиовсплесков является одним из важнейших критериев проверки механизмов радиоизлучения. Зебра-структура (ЗС) принадлежит к наиболее примечательному виду тонкой структуры. На динамических спектрах она появляется в виде регулярных полос в излучении и поглощении. Она описана во множестве статей и монографий, начиная с первой публикации Элгароя [Elgarøy, 1959; Kuijpers, 1975; Slottje, 1981; Chernov, 1976; 2006; 2011].

Дискуссия о происхождении зебра-структуры продолжается более 50 лет [Chernov, 2011]. Чаше всего обсуждается механизм, основанный на

двойном плазменном резонансе (ДПР) [Zheleznykov and Zlotnik, 1975a, b]:

$$\omega_{UH} = \left(\omega_{Pe}^2 + \omega_{Be}^2 \right)^{1/2} = s\omega_{Be}, \quad (1)$$

где ω_{Pe} — электронная плазменная частота, ω_{Be} — электронная гирочастота в условиях, когда $\omega_{Be} \ll \omega_{Pe}$ [Zheleznykov and Zlotnik, 1975a, b; Kuijpers, 1975, 1980; Mollwo, 1983, 1988; Winglee and Dulk, 1986]. В этих работах обычно постулируется, что механизм всегда работает, если в магнитной ловушке есть быстрые частицы. Однако он сталкивается с рядом трудностей при объяснении динамики полос ЗС (резкое изменение частотного дрейфа полос, большое число гармоник, частотное расщепление полос, их сверхтонкая структура в виде

миллисекундных спайков). Поэтому стали появляться работы как по его усовершенствованию [Karlický et al., 2001; LaBelle et al., 2003; Kuznetsov and Tsap, 2007], так и связанные с созданием новых моделей.

В десятке работ Карлицкого и Яснова в рамках ДПР совершенствовался метод оценки числа гармоник, в основном в сторону его увеличения, доводя его до 170–200. При этом никаких сравнений с другими моделями, как правило, не делалось.

Здесь мы отметим некоторые их важные результаты с привлечением их обсуждения в рамках альтернативной модели зебры на вистлерах.

2. СЛОЖНЫЕ СПЕКТРЫ ЗЕБРА-СТРУКТУРЫ

На рис. 1 и рис. 2 приведены спектры зебра-структуры с различными параметрами полос как со временем, так и на разных частотах. Здесь трудно оправдать применение механизма на ДПР даже для отдельных участков спектра, игнорируя прочие.

Почти одновременно с ДПР был предложен альтернативный механизм взаимодействия плазменных волн (I) с вистлерами (w), $I + w \rightarrow t$ [Chernov, 1976, 1990]. В этой модели перечисленные выше тонкие эффекты полос ЗС объясняются квазилинейными эффектами взаимодействия быстрых частиц с вистлерами. Механизм с вистлерами стал его естественным развитием после его применения Койперсом [Kuijpers, 1975] для волокон (fiber bursts), когда в некоторых явлениях наблюдался непрерывный переход полос ЗС в волокна и обратно. Самые важные детали этого механизма представлены в разделе Обсуждение.

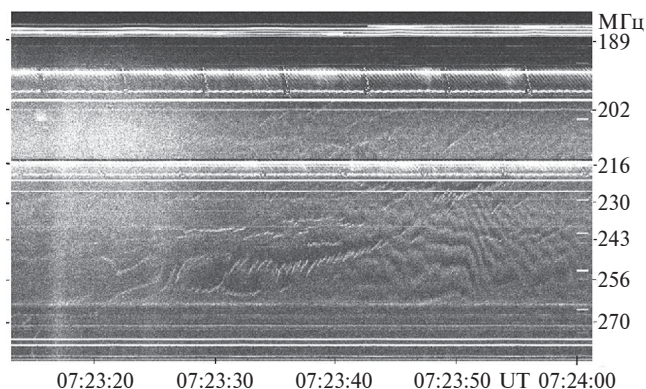


Рис. 1. Сложная зебра-структура по данным спектрографа ИЗМИРАН в диапазоне 180–270 МГц в явлении 18.07.2000 г.

В основополагающей работе по механизму ДПР [Zheleznykov and Zlotnik, 1975a] было показано, что относительная ширина полосы инкремента в гибридной полосе оказывается невероятно узкой $\delta\omega/\omega_{Be} \sim 2.5 \cdot 10^{-4}$. Такая величина получается только при условии, что дисперсия скоростей пучка частиц при оценках вообще отбрасывается как бесконечно малая величина. В работе [Benáček et al., 2017] показано, что учет дисперсии скоростей горячих частиц и температуры холодной плазмы сильно ограничивают эффективность механизма ДПР. Затем Карлицкий и Яснов внесли большой вклад в совершенствование механизма на ДПР в десятке своих работ. В одной из недавних работ [Yasnov and Karlický, 2020] сделали важное обновление в этой деятельности. После статьи [Yasnov and Chernov, 2020] они указали на важность при анализе любого явления учета изменения отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности в источнике зебра-структуры. Например, в работе [Yasnov and Chernov, 2020] это отношение считалось постоянным и было показано преимущество механизма с вистлерами для явления 21.06.2011 г.

Во введении работы [Yasnov and Karlický, 2020] авторы отметили все основные работы по наблюдениям зебра-структуры и теоретическим механизмам для ее объяснения (более 20 статей), что избавляет нас от необходимости повторять их здесь. Они предложили улучшенный метод для определения гирогармоники зебра полос, что

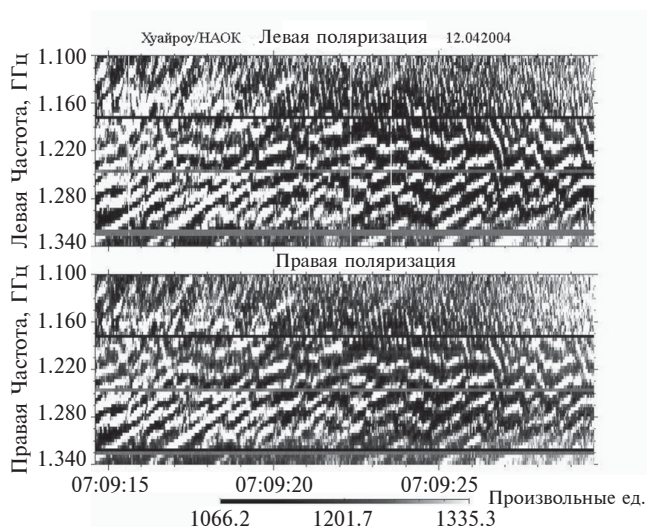


Рис. 2. Сложное событие 01.12.2004 г. с плавным переходом волокон (fiber bursts) в полосы зебра-структуры с пилообразным частотным дрейфом в диапазоне 1.1–1.34 ГГц (ст. Huiyou, Национальной Астрономической Обсерватории Китая (НАОК)) в явлении 01.12.2004 г.

является существенным для определения электронной плотности и напряженности магнитного поля в источнике зебры. В сравнении с прежними методами сделано новое допущение, что отношение $R = L_{bh}/L_{nh}$ (где L_{bh} и L_{nh} – характерные масштабы изменения магнитного поля и плотности) меняются в источнике в более обобщенной форме. Почти свободное манипулирование изменчивости R позволяет получить для явления 21.06.2011 г. новые значения номеров гирочастоты около 115 (вместо 50–60 в работе [Yasnov and Chernov, 2020]), а в других явлениях до 170. При этом не упоминаются предыдущие результаты авторов [Benáček et al., 2017], где показано, что в реальных параметрах амплитуда инкремента конусной неустойчивости существенно падает к 30 гармонике.

Один этот факт свидетельствует о непригодности предлагаемого улучшения модели на ДПР, в частности, для определения номера гармоники полос зебра-структуры, манипулируя непостоянством отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности как в одном явлении, так и в разных.

В предыдущей работе [Karlický, 2014] полагалось, что все частотные вариации полос зебры вызываются некой турбулентностью. В последних статьях все связывается с распространением быстрой магнитозвуковой волны [Karlický, 2022], поскольку там был определен строгий период флуктуаций, совпадающей с классической косинусной функцией. Интересно, что в очередной раз анализируется явление 17 августа 1998 г., после первого рассмотрения в работе [Zlotnik et al., 2009]. Это быстрые пульсации пакетов зебра-структуры (похожих на всплески III типа) на фоне пульсаций в поглощении. [Zlotnik et al., 2009] полагали, что в источнике присутствовали две неравновесные функции распределения: одна с конусным распределением по скоростям, ответственная за излучение континуума, и другая типа Dory, Guest, and Harris, способная вызывать эффект ДПР, вызывая зебра-структуру. [Karlický, 2022] не упоминает об этом. Предполагается работа механизма ДПР и определяется номер гармоники на нижней частоте по разработанному новому методу (упомянутому выше) для 13 моментов зебры на разных частотах от 254 до 287 МГц. Максимальные номера гармоник получены на частоте 270.6 МГц, $s_1 = 177.6$ и на 268.6 МГц $s_1 = 214.6$.

Такие большие маловероятные гармоники стимулируют напомнить об альтернативной интерпретации этого явления. В обзоре [Chernov, 2019] отмечаются некоторые свойства на спектре

с пакетами ЗС, которые нигде не рассматривались, начиная с работы [Zlotnik et al., 2009]. Не все пакеты ЗС имеют отрицательный частотный дрейф (как у всплесков III типа). Можно видеть ряд моментов с положительным дрейфом. ЗС видна и между пакетами, и можно видеть непрерывные полосы зебры на протяжении пяти пакетов с заметным пилообразным частотным дрейфом. Между пакетами ЗС пульсации в поглощении имеют разнообразный частотный дрейф.

Подобные спектры с почти вертикальными пакетами зебры, наблюдались во многих явлениях, начиная с отличного примера на рис. 6 в работе [Slottje, 1972]. В явлении 03 июля 1974 г. подобные пакеты зебры появлялись на протяжении нескольких часов [Slottje, 1972; Chernov, 1976]. Ранее мы уже показали преимущество модели с вистлерами для интерпретации явления 21.06.2011 г. [Yasnov and Chernov, 2020]. Еще ранее для объяснения пилообразного частотного дрейфа полос зебры в известном явлении 25.10.1994 г. применялся механизм с вистлерами на основе рассеяния быстрых частиц на вистлерах [Chernov, 2005]. Вистлеры всегда генерируются одновременно с плазменными волнами на верхней гибридной частоте быстрыми частицами с конусным распределением по скоростям. Процесс рассеяния на вистлерах был использован в работе [Chernov, 1990] и более подробно в работах [Chernov, 1996, 2005]. Там рассмотрено важное свойство процесса: изменение направления частотного дрейфа полос зебры должно коррелировать с изменением направления пространственного дрейфа их источников радиоизлучения (см. рис. 2 в [Chernov, 2019]).

При рассеянии быстрых частиц на вистлерах функция распределения меняется, генерация вистлеров может многократно переключаться с нормального эффекта Доплера на аномальный. В работе [Zlotnik et al., 2003] для явления 25.10.1994 г. используется барометрическая формула для определения температуры и выбора магнитной петли. Однако распределение концентрации по барометрической формуле нельзя применять в магнитных петлях с плазменным $\beta \ll 1$, поскольку эта формула дает распределение плотности в поле силы тяжести при постоянной температуре и без учета магнитного поля.

При рассеянии быстрых частиц на вистлерах функция распределения меняется, генерация вистлеров может многократно переключаться с нормального эффекта Доплера на аномальный (веерная неустойчивость).

Если быстрые частицы взаимодействуют с вистлерами на циклотронном резонансе

$$\omega^w - k_{\parallel} v_{\parallel} - s\omega_{Be} = 0 \quad (2)$$

(на нормальном доплеровском резонансе $s = +1$), волны и частицы противоположно направлены ($k_{\parallel} < 0$ или $\omega/k_{\parallel} < 0$) (k_{\parallel} и v_{\parallel} — компоненты волнового вектора и скорости параллельные магнитному полю), частицы движутся вдоль диффузионных кривых. Когда максимум функции распределения смещается в сторону больших v_{\parallel} , включается аномальный эффект Доплера ($s = -1$ в (1)). В этих случаях групповая скорость вистлеров меняет знак на обратный (плавно или резко в зависимости от параметров быстрых частиц). И в результате частотный дрейф полос синхронно меняется на обратный (детальнее см. в [Chernov, 1996]).

Карлицкий и Яснот обычно анализируют явления с регулярными полосами зебры, но чаще спектры бывают очень сложными с наложением не только быстрых пульсаций, но с волокнами (fiber bursts) с разным частотным дрейфом, которые иногда трудно отличить от ЗС (например, как на рис. 1 и 2).

Все обсуждение основано на изменчивости отношения масштабов изменения магнитного поля и плотности. Уже это указывает на сложности для модели на ДПР. По спектрам ряда явлений становится ясно, что отношение масштабов изменения поля и плотности не может мгновенно меняться в петле.

Причем, они используют ряд известных явлений с большим числом полос, не касаясь многих других эффектов на том же спектре. Например,

игнорируя объяснения пилообразного частотного спектра полос, связь с быстрыми пульсациями, резкие переходы, скачки параметров полос на тех же частотах и прочие моменты.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Применение механизма ДПР просто постулируется. После большого обзора [Zheleznyakov et al., 2016] сейчас нет необходимости детально повторять его описание. Он остается самым цитируемым при анализе зебра-структуры. Он основан на генерации плазменных волн на верхней гибридной частоте ω_{UH} быстрыми электронами с функцией распределения по скоростям с конусом потерь. Последующая их трансформация в электромагнитные волны создает континуальное излучение, которое может резко усиливаться на уровнях ДПР, где ω_{UH} примерно равна целому числу s электронных циклотронных гармоник ($\approx s\omega_{Be}$). Это простое алгебраическое соотношение лежит в основе красивой теории зебра-структуры (ставшей почти классической), представленной в работах [Zheleznyakov and Zlotnik, 1975a, b] и поддержанной затем в работе [Winglee and Dulk, 1986].

Основное условие существования многих уровней ДПР предполагает, что масштаб изменения магнитного поля должен быть много меньше масштаба изменения плотности. Однако это условие показано в перечисленных работах в виде гипотетической схемы без цифровых шкал по осям, показанной на рис. 3а как фрагмент рис. 2 в обзоре [Zheleznyakov et al., 2016].

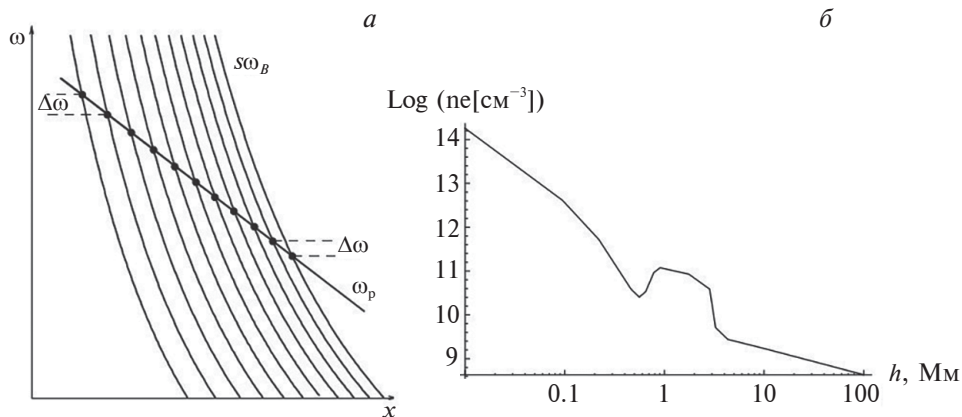


Рис. 3. (а) Гармоники циклотронной частоты $s\omega_{Be}$ и плазменной частоты ω_p как функции от координаты x для характерных масштабов изменения магнитного поля LB и плотности LN при $|LB| < |LN|$ (фрагмент рис. 2 из [Zheleznyakov et al., 2016]); (б) Профиль электронной плотности в зависимости от высоты h в солнечной атмосфере согласно [Selhorst et al., 2008].

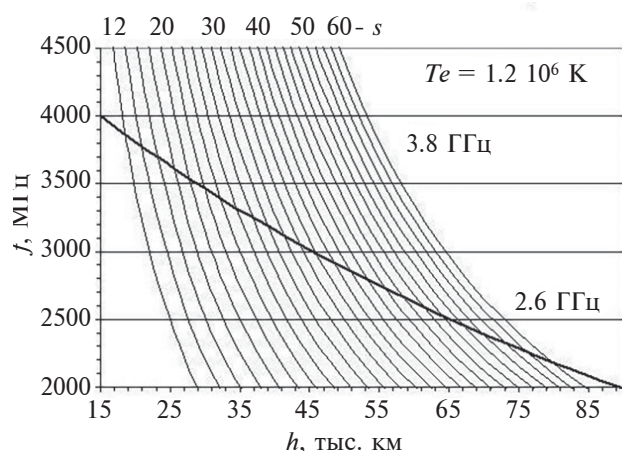


Рис. 4. Высотная зависимость плазменной частоты в соответствии с барометрическим законом (жирная линия) и высотные профили электронных циклотронных гармоник s (тонкие линии) в солнечной короне. Для температуры электронов $T_e = 1.2 \cdot 10^6$ К и начальной частоты $f_{p0} = 3800$ МГц на высоте $h_{p0} = 20\,000$ км, 34 уровня ДПР формируются в короне между плазменными уровнями 2600–3800 МГц (из [Lapuhov and Chernov, 2009]).

Если же мы попытаемся использовать для этого известные аналитические выражения для зависимости плотности и магнитного поля в короне, то никакие известные модели не подтверждают возможности образования многих уровней ДПР в разумных размерах источников зебра-структуры. Для наглядности см. рис. 6 и 7 в книге [Chernov, 2019] на стр. 217, вызывающие сомнения вообще в использовании модели на ДПР для объяснения многочисленных полос зебры, даже не обращая внимания на многие эффекты сложной динамики полос.

На рис. 4 приведен расчет уровней ДПР с использованием обычных (общепринятых) параметров корональной плазмы по барометрической формуле: электронная температура $T_e = 1.2 \cdot 10^6$ К, начальная плазменная частота $f_{p0} = 3800$ МГц на высоте $h_{p0} = 20\,000$ км. Если для циклотронных гармоник использовать дипольную зависимость магнитного поля, то гармоники с $s \geq 50$ уходят на гораздо большие высоты $\geq 100\,000$ км. Таким образом, возбуждение волн одновременно на 34 уровнях ДПР в короне неосуществимо в любых реальных моделях плотности и магнитного поля. В последних работах Карлицкий и Яснот предложили экзотическую модель (рис. 3б) с горбом на плавном спаде плотности [Selhorst et al., 2008], на крутых склонах которого должны вы-

полняться условия ДПР для генерации большого числа гармоник [Yasnov et al., 2016].

На рис. 1 показан спектр длительностью около 45 с со сложной зебра-структурой, но при отсутствии регулярных полос трудно найти момент, где можно было бы применить механизм на ДПР. В зебра-структуру вклинивается широкая полоса в поглощении, на фоне которой развивается цепочка узкополосных (rope-like) волокон [Chernov, 1997, 2008; Chernov et al., 2007].

На рис. 2 структура полос кардинально меняется за 15 с волокна (похожие на fiber bursts), плавно переходят в полосы зебры с волнообразным частотным дрейфом. Очевидно, что отношение масштабов изменения поля и плотности не может заметно меняться за несколько секунд.

Спектры зебры с пилообразным частотным дрейфом полос рассматривались в работе [Karlický, 2014] на примере спектров обс. Ondřejov в дециметровом диапазоне в явления 01.08.2010 г. Не вдаваясь в детали, отметим, что целью работы было показать, что в рамках модели на ДПР источник зебра-структуры находится в турбулентном состоянии на основе анализа Фурье временных профилей интенсивности полос с частотой (а из соотношений $\omega_{UH} \approx \omega_{pe}$ и $n_e \approx \omega_{pe}^2$ и с плотностью плазмы). Профиль колебаний Фурье плотности принимается как расчетный профиль полосы зебры (видимо, полагая, что это не требует доказательств). Спектр мощности колебаний имеет степенной вид с индексом $-5/3$, совпадающий с колмогоровским спектром для турбулентности.

Независимо от этой работы в статье [Chernov et al., 2018] было показано, что все основные детали спорадической зебра-структуры в явлении 1 августа 2010 г. удастся объяснить в рамках единой модели зебра-структуры и радиоволокон при взаимодействии плазменных волн с вистлерами (без сильной турбулентности плазмы в источнике). Основные изменения полос зебра-структуры вызываются за счет рассеяния быстрых частиц на вистлерах, приводящих к переключению неустойчивости вистлеров с нормального эффекта Доплера на аномальный.

3.1. Моделирование полос ЗС

В связи с замечанием выше о невозможности получения многих уровней ДПР ни в каких известных моделях плотности и магнитного поля (см. рис. 4) можно отметить работу [Karlický, 2022] по моделированию солнечной радио зебры. Фактически, это не моделирование (simulation), а подгонка параметров плазмы в источнике, что-

бы получить модельные точки на полосе зебры на спектре, совпадающие с наблюдаемыми, без расчета генерации излучения в рамках механизма на ДПР, просто строится график типа рис. 4. При этом основной вывод в конце подтверждает наш вывод (без ссылки), поскольку выбранные величины поля не совпадают ни с какими известными моделями. Есть и деловой вывод в конце: необходимо продолжить расчеты инкрементов верхних гибридных волн для больших номеров гармоник (в статье $s = 120-124$).

На спектре рис. 2 в его начале виден плавный переход волокон (fiber bursts) в полосы зебры с пилообразным частотным дрейфом. Такой же переход или обратный наблюдался в явлении 01.08.2010 г. Карлицкий [Karlický, 2014] не обсуждает этого эффекта, что, вероятно, связано с тем, что ранее в работе [Karlický, 2013] модель возбуждения волокон на вистлерах [Kuijpers, 1975] отвергается и предлагается новая, или подправленная модель [Treumann et al., 1990], основанная на альвеновских солитонах.

3.2. Взрывная неустойчивость

Предлагаемый в работе [Fomichev et al., 2009] механизм, основанный на стабилизации взрывной неустойчивости при каскадном нарастании ионнозвуковых гармоник, оказывается значительно эффективнее механизма неустойчивости вистлеров на гармониках ионного звука. Он обе-

спечивает большое число гармоник ЗС с частотным разделением, не зависящим от соотношения плазменной и циклотронной частот в источнике и растущим с частотой (в соответствии с наблюдениями). При этом не выдвигается никаких дополнительных жестких условий. Остается прежнее условие ускорения моноскоростных пучков слабoreлятивистских частиц, которое обычно реализуется в любой крупной вспышке.

3.3. Лабораторные эксперименты ([Viktorov et al., 2015])

Для подтверждения эффективности механизма ДПР иногда ссылаются на, возможно, единственную работу по созданию излучения на ДПР в лабораторном плазменном эксперименте [Viktorov et al., 2015]. Хотя сейчас ссылки на нее постепенно затихают [Chernov, 2019], поскольку там демонстрируются неоднозначные результаты (согласно рис. 5): излучение зафиксировано только в виде сложных полос на второй гармонике циклотронной частоты, а эксперимент демонстрировал и третью гармонику (на рис. 2). И если бы это так просто смоделировать, то можно было бы ожидать многократного повторения эксперимента, что и было бы действительно доказательством работы механизма. Однако на слуху были лишь заверения авторов, что они стремятся получить излучение на третьей гармонике.

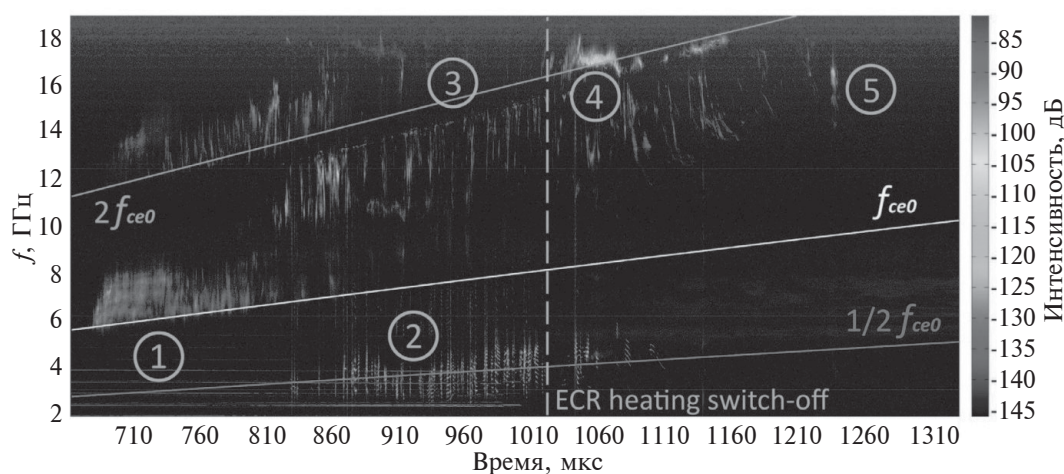


Рис. 5. Динамический спектр излучения плазмы. Выделены типы кинетических неустойчивостей, рассматриваемых в работе: 1) начальная стадия ЭСР-разряда (разреженная плазма); 2) и 3) стадии развитого разряда (плотная плазма); 4) начальная фаза распада плазмы (плотная плазма); 5) распадающаяся плазма (разреженная плазма). Три линии на спектрограмме показывают изменение во времени соответствующих частот $2f_{ce0}$, f_{ce0} и $1/2 f_{ce0}$, где $f_{ce0} \equiv f_{ce}$ — электронная циклотронная частота в центре магнитной ловушки на ее оси. ECR heating switch-off — выключение нагрева электронного циклотронного резонанса. Отметим строгую периодичность генерации вистлеров. Фрагмент рис.2 из [Viktorov et al., 2015].

Примечательно, что Viktorov et al. [2015] показывают в своем эксперименте одновременную генерацию вистлеров на частоте вблизи $0.5f_{ce}$ на рис. 3b и полосы сложной формы вблизи частоты $2f_{ce}$ на рис. с и d, но авторы не включали эти факты в тему своей работы.

3.4. Зебра-структура в декаметровом радиоизлучении Юпитера ([Panchenko et al., 2018])

Наблюдения ЗС, аналогичной в солнечном радиоизлучении, были проведены на большом наземном радиотелескопе УРАН-2 (Полтава, Украина) [Litvinenko et al., 2016]. Полосы ЗС (см. рис. 6) представляют собой сильно поляризованное радиоизлучение с длительностью от 20 до 290 с с плотностью потока $\sim 105\text{--}106$ Ян (нормированной на 1 а.е.), то есть на 1–2 порядка ниже, чем для декаметрового радиоизлучения ее луны Ио. Частотное расщепление между полосами незначительно увеличивается с ростом частоты излучения (в 43 событиях), обычно в пределах 0.5–1.5 МГц. Во всех примерах полосы демонстрируют быстрый волнообразный дрейф частоты, оставаясь квазидистантными друг к другу. Все эти факты аналогичны солнечной ЗС.

В отличие от солнечной короны, плазма Юпитера сильно анизотропна, то есть $f_{pe} \ll f_{ce}$, в большинстве областей магнитосферы. Поэтому механизм ДПР с электронами не может объяснить наши наблюдения, так как для этого требуется чрезвычайно высокая плотность плазмы, что очень маловероятно в магнитосфере Юпитера. [Zlotnik et al., 2016] предложили альтернативный механизм формирования структуры зебры в километровом излучении Юпитера. Модель основана на ДПР на ионных циклотронных гармониках. Механизм включает возбуждение ионных циклотронных волн на нижней гибридной частоте (f_{LH}), а затем нелинейное преобразование этого низкочастотного излучения в вы-

сокочастотную волну за счет процесса слияния с высокочастотной модой.

ДПР с ионами может работать в областях, где $f_{pe} \ll f_{ce}$, что выполняется в большинстве областей магнитосферы Юпитера. Поэтому эффект ДПР на ионных циклотронных гармониках может быть реализован при гораздо меньшей плотности плазмы, чем эффект ДПР на электронных циклотронных гармониках. В этом случае, $f_{LH} \approx f_{pi}$ (f_{pi} — частота ионной плазмы), а условием резонанса является $f_{LH} = sf_{ci}$. Низкочастотные плазменные волны не могут выйти из источника и должны сначала быть преобразованы в высокочастотные электромагнитные волны (f_{em}) в процессе нелинейного слияния с высокочастотной модой (например, с плазменными волнами на верхней гибридной частоте). Слияние этих волн ($f_{em} = sf_{ci} + f_{ce}$) приводит к генерации электромагнитных волн со спектром в виде ЗС. Тем не менее, необходимы дополнительные теоретические исследования для уточнения нелинейной конверсии мод из низкочастотных ионных циклотронных волн в высокочастотные электромагнитные волны.

4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Краткий обзор возможных альтернативных механизмов возбуждения зебра-структуры в связи с отмеченными во Введении трудностями механизма ДПР показывает, что возможными моделями для одновременного возбуждения многих полос зебры могут служить механизм с вистлерами и взрывная неустойчивость (рассеяние нелинейных ионно-звуковых волн на частицах). Они не требуют никаких дополнительных условий (или ограничений) на параметры плазмы.

Радиоисточники волокон (fiber bursts) и ЗС в модели с вистлерами должны иметь движущиеся источники, а пространственный дрейф полос ЗС должен синхронно изменяться с изменением частотного дрейфа на динамическом

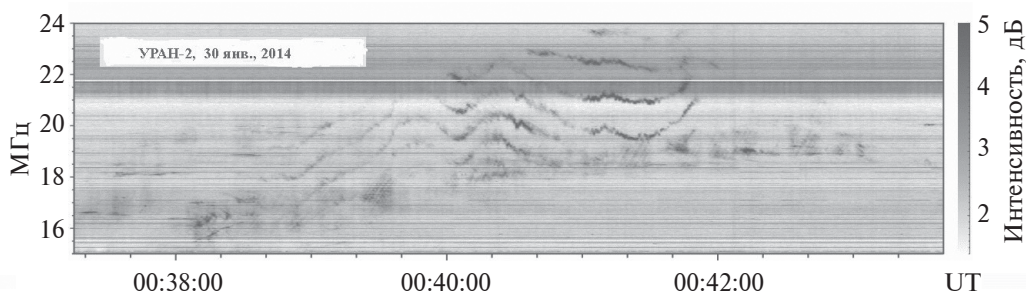


Рис. 6. Пример ЗС в радиоизлучении Юпитера, наблюдавшейся на украинском радиотелескопе УРАН-2, 30 января 2014 г. Фрагмент рис. 1 из работы [Panchenko et al., 2018].

спектре. В модели ДПР источник ЗС должен быть скорее стационарным.

Есть более разработанные теории, но окончательного решения по ним нет. Например, распространение через среду с неоднородностями предполагает их наличие с определенными масштабами [Lapuhov and Chernov, 2006, 2009]. Требуется еще более детальный анализ зебры в радиоизлучении Юпитера.

Мировая сеть радиотелескопов CALLISTO пока не позволяет использовать ее спектры, почти 90% их подвержены местным помехам (interferences), а низкое частотное разрешение чистых спектров не позволяет регистрировать полосы ЗС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны командам КА RHESI, GOES, LASCO за открытый доступ к их данным.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Проекта Министерства образования науки КП19-270.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Benáček J., Karlický M., Yasnov L.V. Temperature dependent growth rates of the upper-hybrid waves and solar radio zebra patterns // *Astron. Astrophys.* V. 598. ID A108. 2017. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629395>
- Chernov G.P. Microstructure in the continuous radiation of type IV meter bursts. Modulation of continuous emission by wave packets of whistlers // *Sov. Astron.* V. 20. № 5. P. 582–589. 1976.
- Chernov G.P. Whistlers in the solar corona and their relevance to fine structures of type IV radio emission // *Sol. Phys.* V. 130. № 1–2. P. 75–82. 1990. <https://doi.org/10.1007/BF00156780>
- Chernov G.P. A manifestation of quasilinear diffusion in whistlers in the fine structure of type IV solar radio bursts // *Astron. Rep.* V. 40. № 4. P. 561–568. 1996.
- Chernov G.P. The relationship between fine structure of the solar radio emission at meter wavelengths and coronal transients // *Astron. Lett.* V. 23. № 6. P. 827–837. 1997.
- Chernov G.P. Solar radio burst with drifting stripes in emission and absorption // *Space Sci. Rev.* V. 127. № 1–4. P. 195–326. 2006. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9141-7>
- Chernov G.P., Stanislavsky A.A., Konvalenko A.A., Abranin E.P., Dorovsky V.V., Rucker H.O. Fine structure of decametric type II radio bursts // *Astron. Lett.* V. 33. № 3. P. 192–202. 2007. <https://doi.org/10.1134/S1063773707030061>
- Chernov G.P. Manifestation of quasilinear diffusion on whistlers in the fine structure radio sources of solar radio bursts // *Plasma Phys. Rep.* V. 31. № 4. P. 314–324. 2005. <https://doi.org/10.1134/1.1904148>
- Chernov G.P. Unusual stripes in emission and absorption in solar radio bursts: Ropes of fibers in the meter wave band // *Astron. Lett.* V. 34. № 7. P. 486–499. 2008. <https://doi.org/10.1134/S1063773708070074>
- Chernov G.P. Fine structure of solar radio bursts. Heidelberg: Springer, 282 p. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20015-1>
- Chernov G.P. Latest data on the fine structure in solar radio emission / LAMBERT Academic Publisher. Riga, Latvia, 284 p. 2019.
- Chernov G.P., Fomichev V.V., Sych R.A. A model of zebra patterns in solar radio emission // *Geomagn. Aeronomy.* V. 58. № 3. P. 394–406. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0016793218030040>
- Elgarøy Ø. Observations of the fine structure of enhanced solar radio radiation with a narrow-band spectrum analyser // *Nature.* V. 184. № 4690. P. 887–888. 1959. <https://doi.org/10.1038/184887a0>
- Fomichev V.V., Fainstein S.M., Chernov G.P. A possible interpretation of the zebra pattern in solar radiation // *Plasma Phys. Rep.* V. 35. № 12. P. 1032–1035. 2009. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09120058>
- Karlický M., Bárta M., Jiříčka K., Meszárosová H., Sawant H.S., Fernandes F.C.R., Cecatto J.R. Radio bursts with rapid frequency variations – lace bursts // *Astron. Astrophys.* V. 375. № 2. P. 638–642. 2001. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20010888>
- Karlický M. Radio continua modulated by waves: Zebra patterns in solar and pulsar radio spectra // *Astron. Astrophys.* V. 552. ID A90. 2013. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321356>
- Karlický M. Frequency variations of solar radio zebras and their power-law spectra // *Astron. Astrophys.* V. 561. ID A34. 2014. <https://doi.org/10.1051/00046361/201322547>
- Karlický M. Simulations of the solar radio zebra // *Astron. Astrophys.* V. 661. ID A56. 2022. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142497>
- Kuijpers J. Collective wave-particle interactions in solar type IV radio sources. Ph.D. Thesis. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University. 72 p. 1975.
- Kuijpers J. Theory of type IV dm Bursts // *Symposium - International Astronomical Union.* V. 86. P. 341–361. 1980. <https://doi.org/10.1017/S0074180900037098>
- Kuznetsov A.A., Tsap Yu.T. Loss-cone instability and formation of zebra patterns in type IV solar radio bursts // *Sol. Phys.* V. 241. P. 127–148. 2007. <https://doi.org/10.1007/S11207-006-0351-7>
- LaBelle J., Treumann R.A., Yoon P.H., Karlický M. A model of zebra emission in solar type IV radio bursts // *Astrophys. J.* V. 593. № 2. P. 1195–11207. 2003. <https://doi.org/10.1086/376732>
- Lapuhov A.I., Chernov G.P. New mechanism for the formation of discrete stripes in the solar radio

- spectrum // *Plasma Phys. Rep.* V. 32. № 10. P. 866–871. 2006. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06100060>
- *Lapuhov A.I., Chernov G.P.* Concerning mechanisms for the zebra pattern formation in the solar radio emission // *Plasma Phys. Rep.* V. 35. № 2. P. 160–168. 2009. <https://doi.org/10.1134/S1063780X09020081>
- *Litvinenko G.V., Shaposhnikov V.E., Konovalenko A.A., Zakharenko V.V., Panchenko M., Dorovsky V.V., Brazhenko A.I., Rucker H.O., Vinogradov V.V., Melnik V.N.* Quasi-similar decameter emission features appearing in the solar and jovian dynamic spectra // *Icarus*. V. 272. P. 80–87. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.02.039>
- *Mollwo L.* Interpretation of patterns of drifting zebra stripes // *Sol. Phys.* V. 83. № 2. P. 305–320. 1983. <https://doi.org/10.1007/BF00157482>
- *Mollwo L.* The magneto-hydrostatic field in the region of Zebra patterns in solar type-IV dm-bursts // *Sol. Phys.* V. 116. № 2. P. 323–348. 1988. <https://doi.org/10.1007/BF00157482>
- *Panchenko M., Rošker S., Rucker H.O. et al.* Zebra pattern in decametric radio emission of Jupiter // *Astron. Astrophys.* V. 610. ID A69. 2018. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731369>
- *Selhorst C.L., Silva-Válio A., Costa J.E.R.* Solar atmospheric model over a highly polarized 17 GHz active region // *Astron. Astrophys.* V. 488. № 3. P. 1079–1084. 2008. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20079217>
- *Slottje C.* Peculiar absorption and emission microstructures in the type IV solar radio outburst of March 2, 1970 // *Sol. Phys.* V. 25. № 1. P. 210–231. 1972. <https://doi.org/10.1007/BF00155758>
- *Slottje C.* Atlas of fine structures of dynamics spectra of solar type IV-dm and some type II radio bursts. Utrecht, The Netherlands: Dwingeloo Observatory, 233 p. 1981.
- *Treumann R.A., Gudel M., Benz A.O.* Alfvén wave solitons and solar intermediate drift bursts // *Astron. Astrophys.* V. 236. № 1. P. 242–249. 1990.
- *Viktorov M., Mansfeld D., Golubev S.* Laboratory study of kinetic instabilities in a nonequilibrium mirror-confined plasma // *Europhys. Lett.* V. 109. № 6. ID 65002. 2015. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/109/65002>
- *Winglee R.M. and Dulk G.A.* The electron-cyclotron maser instability as a source of plasma emission // *Astrophys. J.* V. 307. P. 808–819. 1986. <https://doi.org/10.1086/164467>
- *Yasnov L.V., Chernov G.P.* Alternative models of zebra patterns in the event on June 21, 2011 // *Sol. Phys.* V. 295. № 2. ID 13. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-1585-5>
- *Yasnov L.V., Karlický M., Stupishin A.G.* Physical conditions in the source region of a zebra structure // *Sol. Phys.* V. 291. № 7. P. 2037–2047. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0952-8>
- *Yasnov L.V., Karlický M.* Magnetic field, electron density and their spatial scales in zebra pattern radio sources // *Sol. Phys.* V. 295. № 7. ID 96. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11207-020-01652-w>
- *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Cyclotron wave instability in the corona and origin of solar radio emission with fine structure // *Sol. Phys.* V. 43. № 2. P. 431–451. 1975a. <https://doi.org/10.1007/BF00152366>
- *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya.* Cyclotron wave instability in the corona and origin of solar radio emission with fine structure. III. Origin of zebra pattern // *Sol. Phys.* V. 44. № 2. P. 461–470. 1975b. <https://doi.org/10.1007/BF00153225>
- *Zheleznyakov V.V., Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Shaposhnikov V.E.* Double plasma resonance and its manifestations in radio astronomy // *Phys.-Usp.* V. 59. № 10. P. 997–1120. 2016. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2016.05.037813>
- *Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H., Mann G., Hofmann A.* Solar type IV burst spectral fine structures. II. Source model // *Astron. Astrophys.* V. 410. № 3. P. 1011–1022. 2003. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031250>
- *Zlotnik E.Ya., Zaitsev V.V., Aurass H., Mann G.A.* Special radio spectral fine structure used for plasma diagnostics in coronal magnetic traps // *Sol. Phys.* V. 255. № 2. P. 273–288. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11207-009-9327-8>
- *Zlotnik E.Y., Shaposhnikov V.E., Zaitsev V.V.* Interpretation of the zebra pattern in the Jovian kilometric radiation // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 121. № 6. P. 5307–5318. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022655>

Generation Mechanisms of Zebra Structures in Solar Radio Emission on the Background of Complex Dynamic Spectra

G. P. Chernov^{1, *}, V. V. Fomichev^{1, **}

*¹N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN),
Moscow, Troitsk, Russia*

**e-mail: gchernov@izmiran.ru*

***e-mail: fomichev@izmiran.ru*

The discussion about the origin of the zebra structure has been going on for more than 50 years. In many papers it is usually postulated that the double plasma resonance mechanism always works if there are fast particles in the magnetic trap. Due to a number of difficulties encountered by this mechanism, works on its improvement began to appear, mainly in a dozen papers by Karlitsky and Yasnov, where the whole discussion is based on the variability of the ratio of the magnetic field and density height scales and the assumption of some plasma turbulence in the source. Here we show the possibilities of an alternative model of interaction of plasma waves with whistlers. Several phenomena were selected in which it is clear that the ratio of height scales does not change in the magnetic loop as the source of the zebra structure. It was shown that all the main details of the sporadic zebra structure in the phenomenon of 1 August 2010 (and in many other phenomena) can be explained within the framework of a unified model of zebra structure and radio fibers (fiber bursts) in the interaction of plasma waves with whistlers. The main changes in the zebra structure bands are caused by the scattering of fast particles on whistlers, leading to switching of the whistler instability from the normal Doppler effect to the anomalous one. In the end, the possibilities of laboratory experiments are considered and the solar zebra structure is compared with similar bands in the decametre radio emission of Jupiter.

Keywords: flares, radio-bursts, fine structure, zebra-pattern, fiber-bursts

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ НА СОЛНЕЧНОЕ ПРОТОННОЕ СОБЫТИЕ 30.03.2022 г.

© 2025 г. Н. А. Власова^{1, *}, Г. А. Базилевская², Е. А. Гинзбург³, Е. И. Дайбог¹,
В. В. Калегает^{1, 4}, К. Б. Капорцева^{1, 4}, Ю. И. Логачев¹, И. Н. Мягкова¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва, Россия

³Институт прикладной геофизики им. акад. Е. К. Федорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета),
Москва, Россия

⁴Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ),
Москва, Россия

*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2024 г.

После доработки 01.04.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Представлены результаты сравнительного анализа солнечного протонного события 30.03.2022 г., имеющего необычный временной профиль потоков солнечных протонов, с предыдущим и последующим солнечными протонными событиями: 28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. Возрастания потоков энергичных протонов в межпланетном и в околоземном пространстве ассоциируются с последовательными солнечными вспышками рентгеновских баллов M4.0, X1.3 и M3.9 и тремя корональными выбросами массы типа гало. Работа сделана по экспериментальным данным, полученным с космических аппаратов, расположенных в межпланетном пространстве (ACE, WIND, STEREO A, DSCOVR), на круговой полярной орбите на высоте 850 км (Метеор-M2) и на геостационарной орбите (GOES-16, Электро-Л2). Предложено объяснение особенностей профиля потока энергичных протонов в солнечном протонном событии 30.03.2022 г.: протоны, ускоренные во вспышке 30.03.2022 г., были частично экранированы межпланетным корональным выбросом массы, источником которого стали взрывные процессы на Солнце 28.03.2022 г.; поздняя регистрация максимальных потоков протонов, одновременная для частиц разных энергий, обусловлена приходом потоков частиц внутри межпланетного коронального выброса массы. Пространственное распределение солнечных протонов на околоземной орбите было подобным распределению в точке Лагранжа L1, но с запаздыванием ~50 мин.

Ключевые слова: солнечное протонное событие, солнечная вспышка, корональный выброс массы, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле

DOI: 10.31857/S0016794025010031, **EDN:** AENOID

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные протонные события (СПС), регистрируемые в околоземном пространстве, являются результатом многих физических процессов, происходящих в солнечной короне, в межпланетной среде и даже в магнитосфере Земли. Статистические закономерности, типичные и экстремальные характеристики СПС могут быть определены с помощью каталогов СПС, которые

содержат многолетний однородный ряд экспериментальных данных (например, [Логачев и др., 2022]). Но только результаты исследования конкретного события рисуют истинную картину явлений, происходящих на Солнце и в межпланетной среде. Несмотря на многолетние исследования нет однозначного решения вопроса даже об источнике энергичных солнечных частиц. После открытия солнечных космических лучей именно вспышки считались их источником [Meyer et al.,

1956]. Результаты исследования корональных выбросов массы (КВМ) привели к пониманию, что возможно ускорение частиц и на ударных волнах, предваряющих КВМ [Kahler et al., 1984; Reames, 1995]. В настоящее время предполагается, что солнечные энергичные частицы ускоряются и в области солнечной вспышки, и на ударных волнах, связанных с КВМ (например, [Reames, 2013, 2017; Bazilevskaya, 2017; Klein and Dalla, 2017]). Ускорение на ударных волнах, сопровождающих КВМ, может происходить как во время зарождения КВМ на Солнце, так и в межпланетной среде (например, [Reames, 2013; Базилевская и др., 2023]). В то же время наблюдалось очень небольшое количество СПС, которые были ассоциированы только с КВМ без солнечной вспышки [Marqué et al., 2006]. Созданы модели распространения солнечных энергичных частиц, учитывающие ускорение частиц в короне Солнца и в межпланетной среде [Frassati et al., 2022; Zhang et al., 2023].

Главным фактором, определяющим динамические процессы в межпланетной среде, является межпланетное магнитное поле [Паркер, 1965]. Магнитные неоднородности, вмороженные в плазму солнечного ветра, влияют на движение солнечных энергичных частиц и обуславливают модуляцию их потоков с характерными временами от нескольких минут до нескольких суток. В частности, магнитные структуры солнечного ветра могут образовывать ловушки частиц, захватывая их в замкнутых областях пространства.

Эмпирическая “отражательная модель” предполагает захват и перенос частиц в полупрозрачных магнитных ловушках, образованных силовыми линиями межпланетного магнитного поля (ММП), вытянутыми от Солнца [Любимов, 1988; Любимов и Григоренко, 2007]. В работе [Дайбог и др., 2017] существование вариаций потоков юпитерианских электронов вблизи Земли объясняется, в частности, пребыванием электронов в магнитных ловушках, имеющих форму замкнутых магнитных структур, возникающих при взаимодействии разноскоростных потоков солнечного ветра (*Stream Interaction Region*, SIR). Если разноскоростные потоки существуют длительное время, вращаясь вместе с Солнцем, то возникают коротирующие области взаимодействия (*Corotating Interaction Regions*, CIR), которые могут оказывать влияние на динамику солнечных энергичных частиц (например, [Richardson, 2004, 2018]). В работах [Reames, 2013, 2023] описаны области пространства за распространяющимся ударным фронтом, содержащие захваченные частицы. В работе [Vlasova et al., 2024] для объяснения длительного наблюдения

в гелиосфере потоков солнечных энергичных протонов предложено существование замкнутой области-ловушки, сформированной двумя межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ) и областями взаимодействия высокоскоростных и медленных потоков солнечного ветра.

Известно, что МКВМ оказывают воздействие на поток солнечных энергичных частиц. По данным КА Explorer-12 было обнаружено возрастание потоков энергичных частиц, названных быстрыми штормовыми частицами (*Energetic Storm Particles*), перед “плазменным облаком”, вызвавшим магнитную бурю на Земле [Bryant et al., 1962]. В работе сделан вывод о том, что это — солнечные протоны, захваченные внутрь плазменного облака. Результаты исследования прихода солнечных протонов на КА SOHO, когда КА находился в магнитном облаке, свидетельствуют, что магнитное поле в структуре КВМ обеспечивает “магистральный” путь для распространения потоков протонов [Torsti et al., 2004]. Использование солнечных энергичных частиц в качестве инструмента для исследования топологии магнитного поля двух магнитных облаков показало, что в одном случае по отражению частиц нужно представить магнитную петлю, как бутылку, соединенную с Солнцем, во втором случае отражение происходит от магнитного зеркала, образованного полем сжатия за ударной волной, то есть это — топология открытых силовых линий [Tan et al., 2014]. В работе [Shen et al., 2008] показано, что поток протонов с энергией ≥ 10 МэВ в событии 05.11.2011 был самым большим в 23 цикле солнечной активности вследствие того, что частицы попали в структуру, состоящую из ударной волны и магнитного облака. В то же время для события 14.07.2000 (GLE 59) на профиле потоков протонов с энергией от 1 до 100 МэВ наблюдается двух-этапное быстрое падение интенсивности, связанное с областью сжатия и магнитным облаком [Wu and Quin, 2020]. В работе [Cane et al., 1988] представлены результаты исследования влияния ударной волны, предшествующего КВМ, который находится на пути распространения частиц в межпланетной среде, на временные профили солнечных протонов в зависимости от гелиодолготы их источника. В работе [Kahler and Reames, 1991] делается вывод, что магнитные облака почти прозрачны для солнечных частиц (электронов с $E = 0.2\text{--}2$ МэВ, протонов с $E = 22\text{--}27$ МэВ, КА ISEE-3) и поля магнитных облаков не замкнуты. В работе [Masson et al., 2012] на основе результатов исследования событий GLE по данным нейтронных мониторов показано, что время прибытия первых частиц высоких энергий на Землю во многом определяется

типом ММП, в котором частицы распространяются. Начальное время прихода соответствует ожидаемому в модели Паркера при медленном солнечном ветре и значительно больше в гелиосферных структурах, таких как МКВМ. В работе [Kocharov et al., 2005] делается вывод, что структура КВМ, подобная магнитной ловушке, значительно изменяет профиль интенсивности-времени высокоэнергичных частиц, наблюдавшихся на 1 а.е. Спад потока частиц после максимума происходит медленнее, чем при моделировании по магнитному полю в виде спирали Архимеда, и может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией.

Цель данной работы — объяснить причины формирования сложного временного профиля потоков солнечных энергичных протонов 30–31.03.2022 г., отличающегося от соответствующих профилей в предыдущем и последующем солнечных протонных событиях 28.03.2022 г. и 01.04.2022 г., основываясь на результатах анализа солнечных источников энергичных частиц и высокоскоростных потоков солнечного ветра, а также условий в межпланетной среде, в которых солнечные протоны распространялись от Солнца до орбиты Земли.

2. ИСТОЧНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Исследование временных профилей потоков солнечных протонов 28.03.2022 г., 30.03.2022 г. и 02.04.2022 г. выполнено на основе экспериментальных данных, полученных с космических аппаратов (КА), расположенных в межпланетном пространстве и в магнитосфере Земли (табл. 1).

КА STEREO A в исследуемый период (30.03.2022 г.) был расположен на расстоянии 0.97 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 35.3° восточнее, чем соответствующая область для Земли [Gieseler et al., 2022; <https://solar-mach.github.io/>].

Электронные ресурсы, из которых получена необходимая для исследования информация:

— по солнечным вспышкам и корональным дырам (<https://www.solarmonitor.org/>);

— по корональным выбросам массы с коронографа LASCO/C2 на КА SOHO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/);

— по положению диммингов для определения гелиокоординат КВМ (<https://www.sidc.be/solardemon/>);

Таблица 1. Источники информации о потоках солнечных энергичных протонов и параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля

КА	Орбита	Энергия протонов, МэВ
STEREO A	Гелиоцентрическая орбита, близкая к орбите Земли	40–60
ACE	Точка либрации L1 – 1.5 млн км от Земли к Солнцу	>10 >30
WIND	Точка либрации L1 – 1.5 млн км от Земли к Солнцу	28–72
DSCOVR	Точка либрации L1 – 1.5 млн км от Земли к Солнцу	—
Метеор-M2	Круговая, солнечно-синхронная, утренняя. Наклонение 98.8°, период обращения – 101.4 мин	10–160
GOES-16	Геостационарная орбита: высота ~36000 км; наклонение ~0°; долгота – 75.2° W	>5 >10 >30 >60 >100 >500
Электро-L2	Геостационарная орбита: высота ~36000 км; наклонение ~0°; долгота – 14.5° W	9–20 20–40

— по изображениям Солнца в различных длинах волн с КА SDO (<https://www.spaceweatherlive.com>; <https://www.sidc.be/solardemon/>);

— по синоптическим картам Солнца (<https://gong.nso.edu/>);

— по времени прихода ударных волн КВМ в околоземное космическое пространство (ОКП) (<https://zenodo.org/record/7991430>);

— по результатам моделирования прихода МКВМ в околоземное пространство службы прогноза солнечного ветра и КВМ ММИ им. Эйлера СПбГУ и ЛЭТИ (<https://solarwind.entroforce.ru/>);

— по солнечному ветру и межпланетному магнитному полю с КА ACE и КА DSCOVR (<https://swx.sinp.msu.ru/>);

— по потокам солнечных энергичных протонов с КА STEREO A и КА WIND (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>), с КА ACE и ИСЗ GOES-16, Метеор-М2, Электро-Л2 (<https://swx.sinp.msu.ru/>).

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 в межпланетной среде. Там же представлены электронные интерактивные версии каталогов солнечных протонных событий 24 и 25 циклов солнечной активности и ссылки на печатные варианты каталогов СПС 20–24 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.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенностью обсуждаемого солнечного протонного события 30.03.2022 г. является то, что временные профили потоков частиц имеют более сложную форму по сравнению с профилями предшествующего (28.03.2022 г.) и последующего (02.04.2022 г.) событий (рис. 1б). СПС 28.03.2022 г., 30.03.2022 г. и 02.04.2022 г. ассоциируются с солнечными вспышками рентгеновских баллов (рис. 1а) M4.0 (W09), X1.3 (W31) и M3.9 (W68), соответственно (в скобках указана гелиодолгота вспыш-

ки). Вспышки 28.03.2022 г. и 30.03.2022 г. произошли в одной активной области. Все три вспышки сопровождались КВМ типа гало. Условия в межпланетной среде при распространении частиц трех СПС были различны (рис. 1в, 1г). Каждое событие сопровождалось высокоскоростным потоком солнечного ветра. В последней декаде марта 2022 года через центральный меридиан Солнца проходили две корональные дыры (КД): 22–24.03.2022 г. — приэкваториальная довольно большой площади; 29–31.03.2022 г. — среднеширотная небольшой площади. Высокоскоростные потоки солнечного ветра, через которые прошла Земля 27–28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. (рис. 1в), могли иметь своими источниками именно эти КД, так как скорость потоков составляла ~550 км/с, что соответствует времени распространения от Солнца до Земли — ~3 дня. 28.03.2022 г. на Солнце в активной области AO12975, находившейся вблизи центра диска Солнца, с разницей во времени около 8 часов произошли две вспышки баллов M4.0 и M1.0, сопровождавшиеся корональными выбросами масс типа “гало”. С первой из вспышек ассоциируется СПС 28.03.2022 г., после второй вспышки дополнительного роста потока солнечных протонов зарегистрировано не было. Взаимодействие двух КВМ привело к образованию МКВМ, распространяющегося в сторону Земли. Приход ударной волны, связанной с этим МКВМ, был зафиксирован 31.03.2022 г. в 01:44 UT в точке L1 и в 02:24 UT на орбите Земли (<https://zenodo.org/record/7991430>).

Можно видеть, что во время СПС 30.03.2022 г. наблюдалось наиболее сильное ММП, а также длительное большое отрицательное значение Vx-компоненты ММП (рис. 1г). Временные профили потоков солнечных протонов, представленные на рис. 1б, построены по измерениям внутри магнитосферы Земли на ИСЗ GOES-16. Подобная форма всех трех профилей потоков энергичных протонов наблюдалась и в точке Лагранжа L1 на КА ACE (рис. 2а), и в области полярных шапок Земли на открытых силовых линиях магнитного поля Земли на ИСЗ Метеор-М2 в северной и южной полярных шапках (рис. 2б), и на геостационарной орбите на замкнутых силовых линиях на ИСЗ Электро-Л2 (рис. 2в). Следовательно, можно сказать, что особенности профилей потоков частиц 30.03.2022 г. не связаны с проникновением частиц в магнитосферу Земли.

Для более точной оценки отличий временного профиля потоков солнечных протонов 30–31.03.2022 г. от профилей в СПС 28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. на рис. 3 представлены в едином масштабе профили потоков протонов по данным

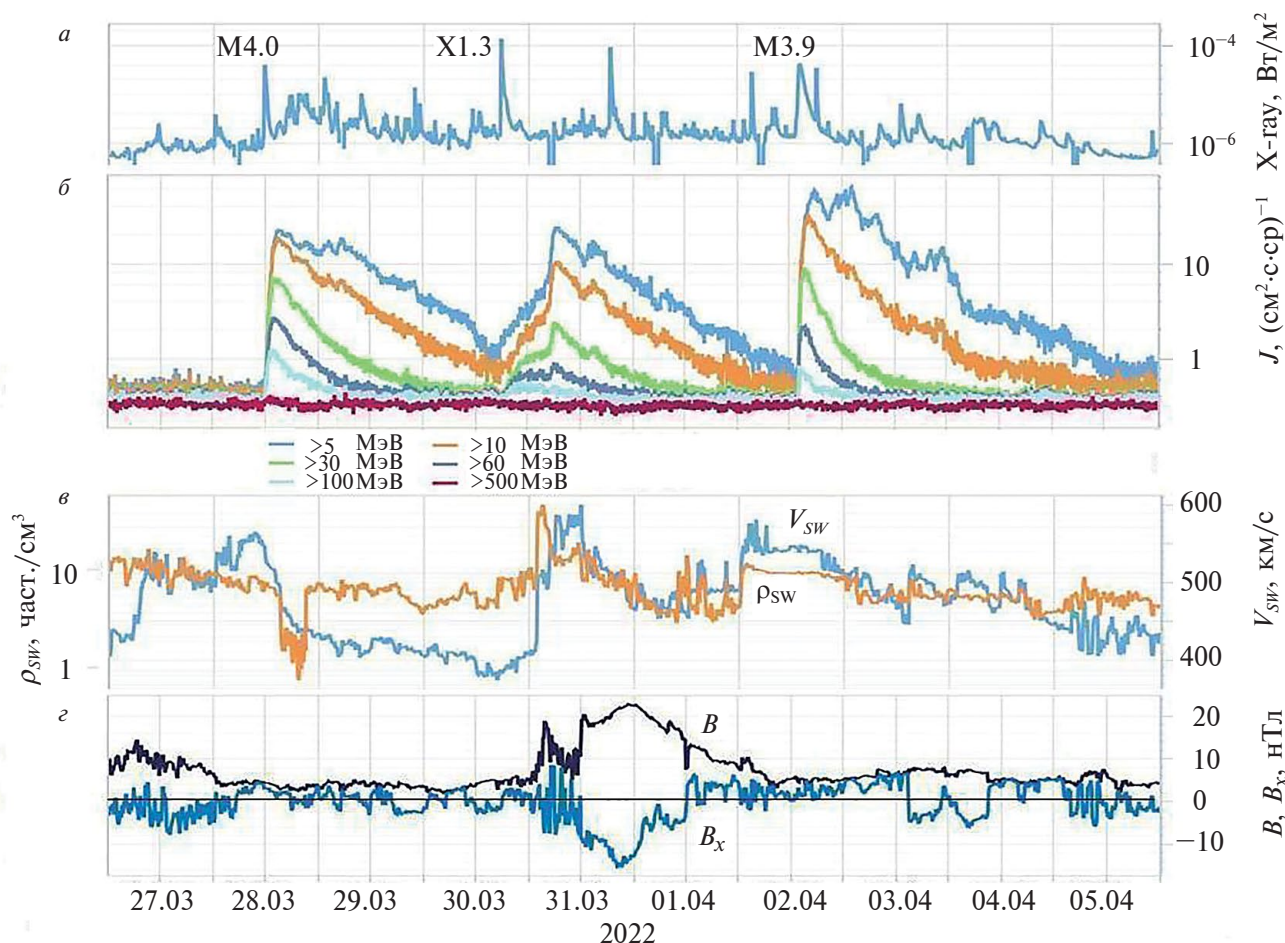


Рис. 1. Временные профили 27.03.2022–05.04.2022 г.: (а) – плотности потока рентгеновского излучения Солнца с длиной волны 0.1–0.8 нм и (б) – потоков солнечных протонов по данным ИСЗ GOES-16, (в) – скорости и плотности солнечного ветра и (г) – модуля и B_x -компоненты ММП по данным КА DSCOVR.

ИСЗ GOES-16 в течение первых суток после солнечных вспышек, с которыми ассоциируются СПС. Можно выделить несколько особенностей профиля 30.03.2022 г. (рис. 3б):

- начало возрастания потоков частиц с энергией >5 МэВ и >10 МэВ происходит раньше времени возрастания потоков более энергичных частиц ($E > 100$ МэВ), что свидетельствует против их происхождения из одного источника;

- интервал времени между началом вспышки и приходом частиц с $E > 100$ МэВ для СПС 30.03.2022 г. составляет 109 мин, что значительно больше, чем для СПС 28.03.2022 г. (47 мин) и СПС 02.04.2022 г. (46 мин), и не коррелирует с расстоянием между долготой вспышки и долготой соединения Земли;

- интервал времени между началом вспышки и наблюдением максимальных за событие значе-

ний потоков протонов с $E > 10$ МэВ для СПС 30.03.2022 г. (~12.6 час) существенно больше, чем для СПС 28.03.2022 г. (~4 час) и СПС 02.04.2022 г. (~3 час); время наблюдения максимума в СПС 28.03.2022 г. и 02.04.2022 г. зависит от энергии протонов, в СПС 30.03.2022 г. максимумы потоков протонов разных энергий наблюдались одновременно;

- максимальный поток протонов, особенно в области больших энергий, в СПС 30.03.2022 г. существенно меньше, чем в двух других событиях, несмотря на то, что балл рентгеновской вспышки 30.03.2022 г. наибольший: X1.3 по сравнению с M4.0 и M3.9;

- форма профиля потока частиц до максимума существенно отличается для события 30.03.2022 г.

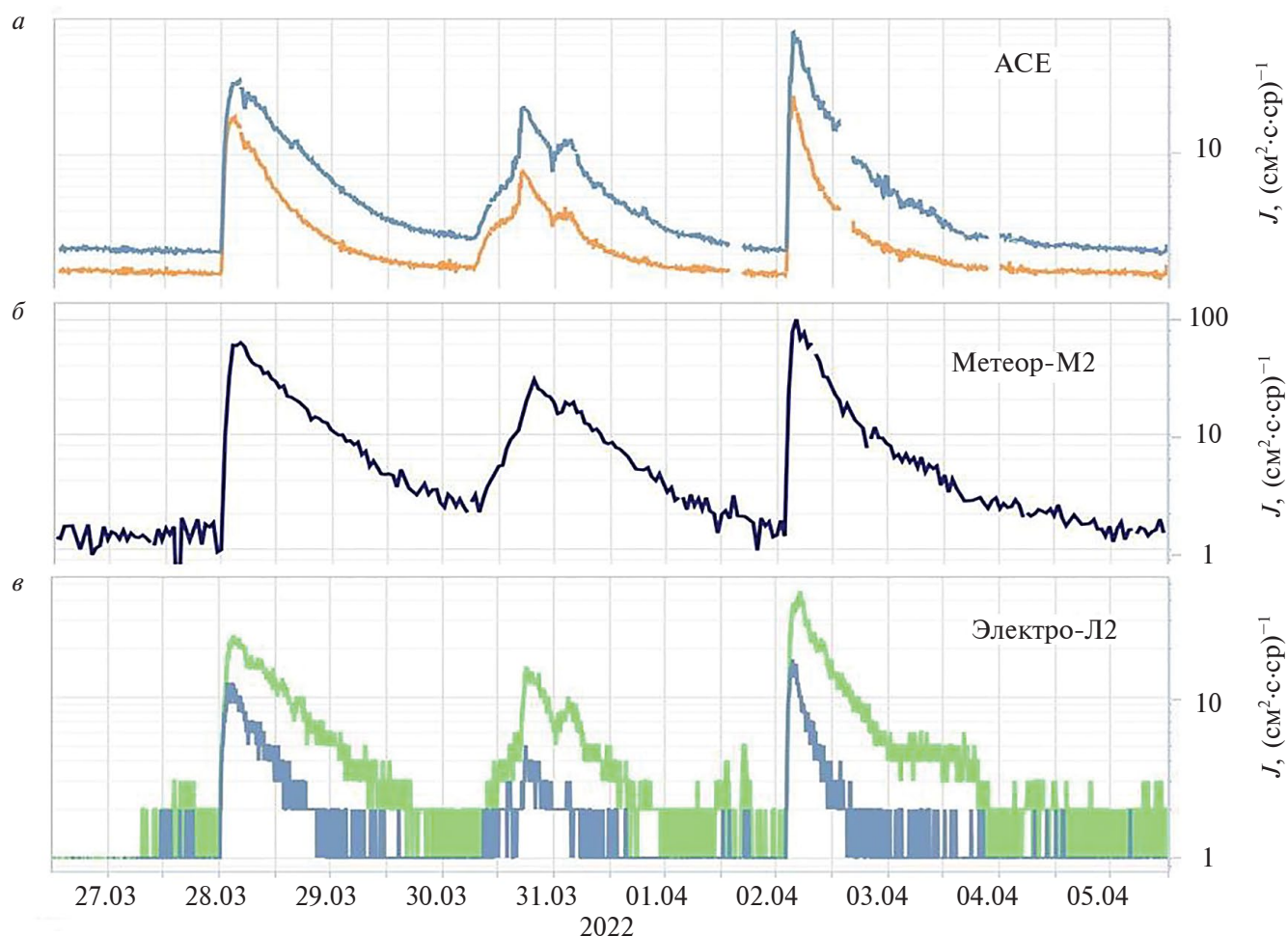


Рис. 2. Временные профили потоков солнечных протонов 27.03.2022–05.04.2022 г.: (а) – с $E > 10$ МэВ и $E > 30$ МэВ по данным КА ACE; (б) – с $E = 10\text{--}160$ МэВ по данным ИСЗ Метеор-М2; (в) – с $E = 9\text{--}20$ МэВ и $E = 20\text{--}40$ МэВ по данным ИСЗ Электро-Л2.

На рис. 4 показаны СПС 28.03.2022 и 30.03.2022 по наблюдениям на КА WIND и на КА STEREO A, который в конце марта 2022 г. находился на расстоянии 0.97 а.е. от Солнца и на 33.5° восточнее Земли. Временные профили потоков солнечных протонов, измеренные в точке либрации $L1$ на КА WIND и на КА STEREO A практически совпадают 28.03.2022 г. В событии 30.03.2022 г. профиль по данным КА STEREO A мало отличается от 28.03.2022 г., в то же время на КА WIND в точке $L1$ наблюдается существенное различие профилей 28.03.2022 г. и 30.03.2022 г.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Сложный временной профиль потоков солнечных энергичных протонов 30–31.03.2022 г. может быть обусловлен особенностями процессов

генерации и ускорения частиц на Солнце и распространения в межпланетной среде.

4.1. Условия на Солнце

Был проведен анализ солнечных источников потоков частиц и возмущенного солнечного ветра за исследуемый период времени по изображениям солнечного диска в ультрафиолетовом свете во времена, предположительно соответствующие наблюдению KBM в нижней короне Солнца (<https://www.spaceweatherlive.com/>), и по изображениям KBM в коронографе (https://www.sidc.be/cactus/catalog/LASCO/2_5_0/ql/2022/03/). Кроме этого изучались разностные изображения (получены последовательным вычитанием кадров из первого кадра для каждого наблюдения) на длине волны 21.1 нм (<https://www.sidc.be/solardemon/>), так называемые “коро-

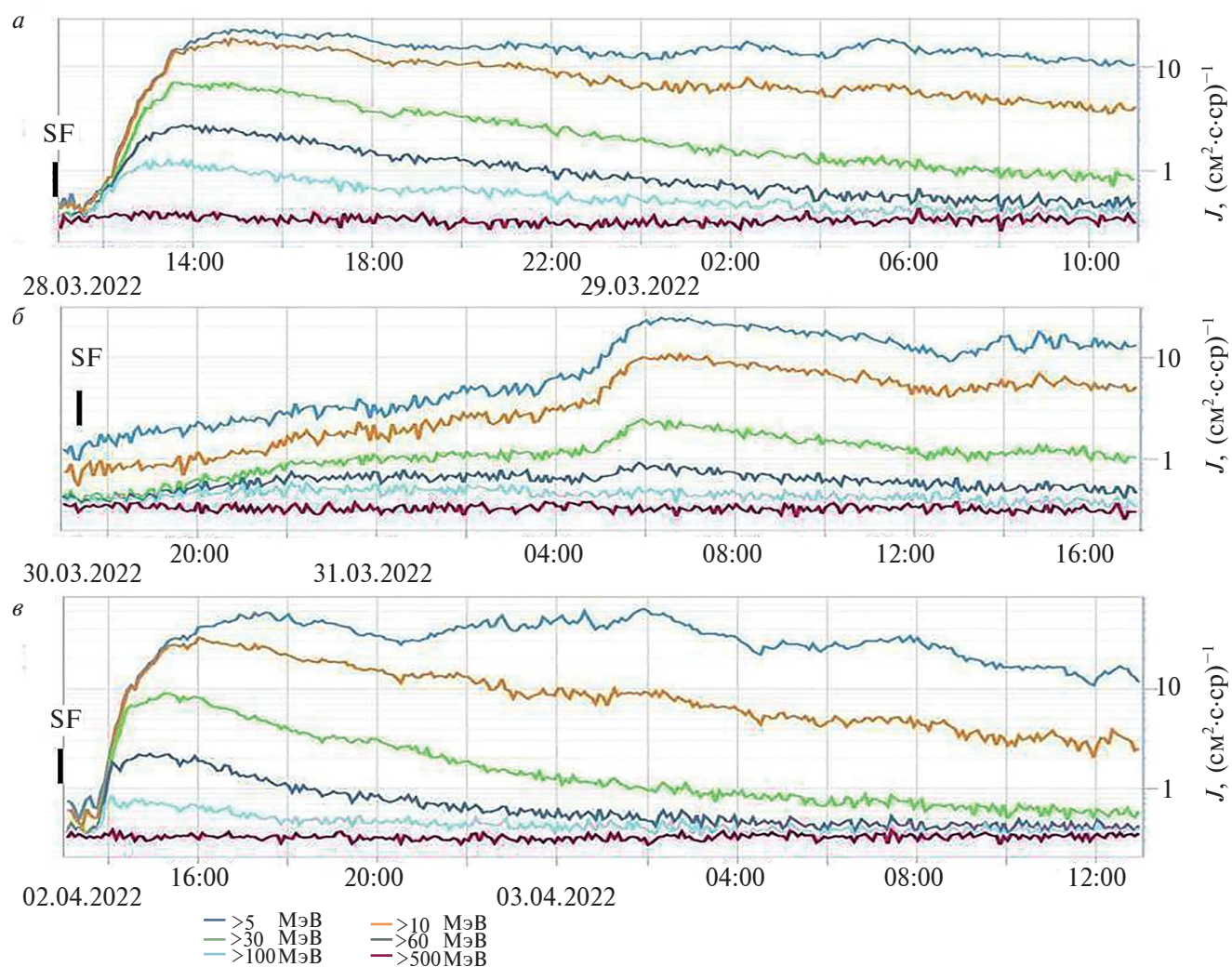


Рис. 3. Временные профили потоков протонов по данным IC3 GOES-16: (а) – с 11:00 UT 28.03.2022 г. до 11:00 UT 29.03.2022 г., (б) – с 17:00 UT 30.03.2022 г. до 17:00 UT 31.03.2022 г., (в) – с 13:00 UT 02.04.2022 г. до 13:00 UT 03.04.2022 г.

нальные димминги” – более темные участки на изображении, обусловленные флуктуациями плотности в солнечной короне (например, [Reinard and Biesecker, 2008]). Корональные димминги могут быть связаны, в том числе, с выходом КВМ из короны. Результаты анализа показали, что расположение диммингов соответствует расположению вспышек и согласуется с направлением распространения КВМ, наблюдаемым в коронографе. Это говорит о том, что вспышки действительно сопровождались наблюдаемыми КВМ и процессы локализовались приблизительно в одной области Солнца, а также позволяет определить временные и пространственные параметры эволюции КВМ на ранних стадиях.

В табл. 2 представлены параметры солнечных вспышек и корональных выбросов массы, актив-

ные области (АО) на Солнце и расчетные величины, полученные по изображениям Солнца и по средней скорости солнечного ветра во время наблюдения СПС.

Во время ранней эволюции КВМ могут повлиять на корональное распространение солнечных протонов (например, [Zhang et al., 2023]). Мы сравнили характеристики соответствующих диммингов, чтобы проверить, могли ли различия СПС, наблюдаемые 28.03.2022 г., 30.03.2022 г. и 02.04.2022 г., быть объяснены отличием распространения протонов в солнечной короне. Мы оценили разницу во времени между вспышкой (по данным рентгеновского излучения) и началом расширения КВМ (по данным разностных изображений Солнца). В случае СПС 30.03.2022 г. это наименьшее время: 9 минут по сравнению

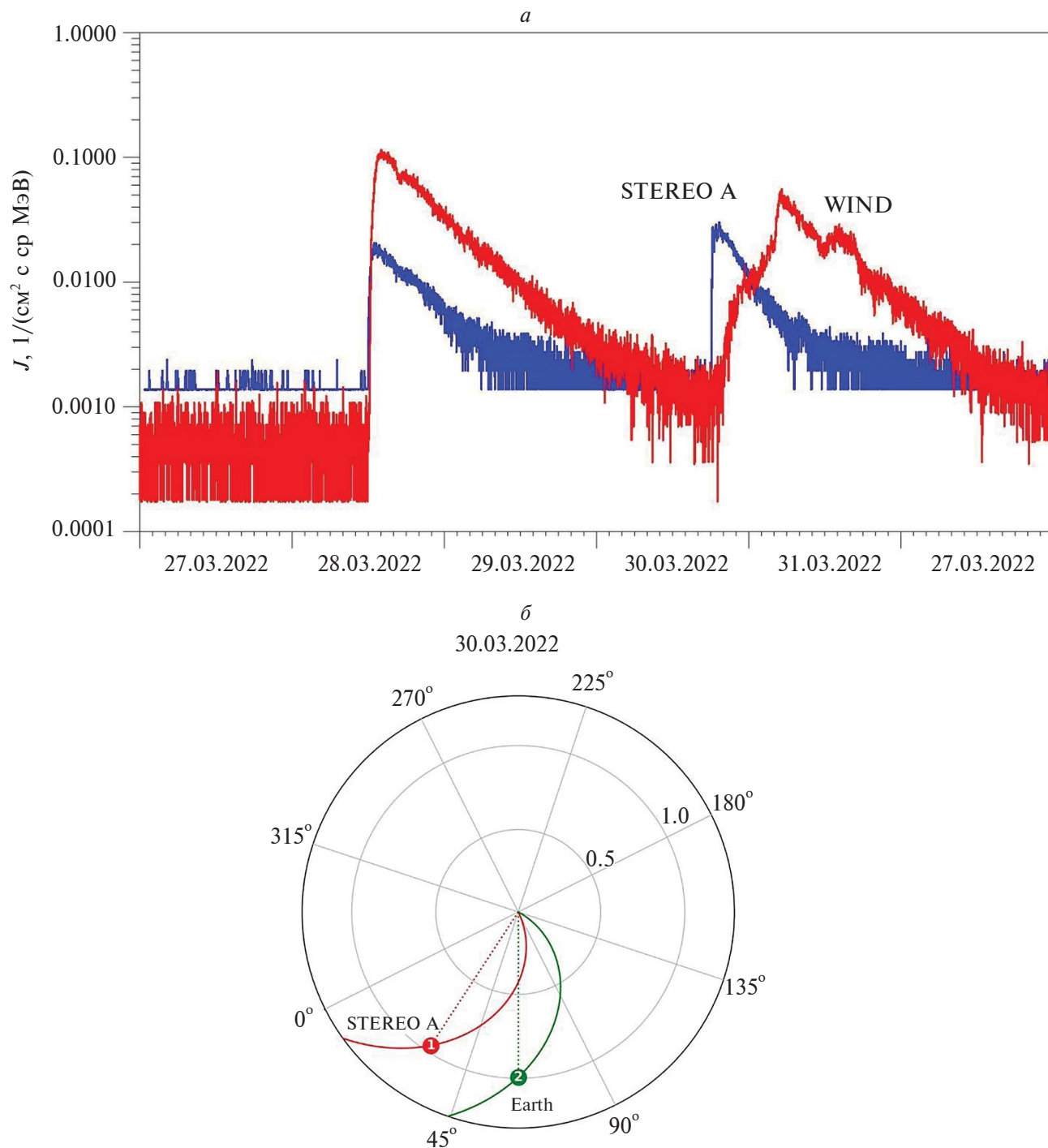


Рис. 4. (а) — Временные профили потоков протонов с $E = 28\text{--}72$ МэВ по данным КА WIND и с $E = 40\text{--}60$ МэВ КА STEREO A с 27.03.2022 г. по 01.04.2022 г. (б) — Схема расположения КА STEREO A и Земли 30.03.2022 г. (<https://solar-mach.github.io/>).

с 22 и 19 минутами. Параметры трех КВМ, полученные по данным коронографа, различаются незначительно (табл. 2), хотя КВМ 30.03.2022 г. менее быстрый, а его позиционный угол наибольший.

По величине средней скорости солнечного ветра во время прихода первых солнечных энергичных протонов в околоземное пространство рассчитана долгота области на Солнце, связанной с Зем-

Таблица 2. Параметры солнечных вспышек и корональных выбросов массы, активные области (АО) на Солнце и расчетные величины

Вспышки: дата, время начала (UT)	28.03.2022 г. 10:58	28.03.2022 г. 19:08	30.03.2022 г. 17:21	02.04.2022 г. 12:56
Координаты вспышек, балл, АО	N12W09 M4.0 12975	N14W07 M1.0 12975	N13W31 X1.3 12975	N12W68 M3.9 12976
Данные по КВМ *	N14W04 11:20 22 мин	N14W12	N13W32 17:30 9 мин	N15W69 13:15 19 мин
КВМ: время появления в поле зрения коронографа (UT)	12:00	20:24	18:00	13:36
КВМ: скорость и параметры раствора**	702 км/с 360° 127°	905 км/с 360° 299°	641 км/с 360° 298°	1433 км/с 360° 263°
V_{sw} $W\phi$ $\Delta\phi^{***}$	520 км/с W43 34°	— — —	400 км/с W58 27°	550 км/с W42 –26°
КВМ: скорость и время коронального расширения	1000 км/с 8 мин	— —	1000 км/с 6 мин	1000 км/с 5 мин
Время прихода протонов с $E > 100$ МэВ (UT), ΔT от вспышки	11:45 47 мин	— —	19:10 109 мин	13:40 мин

Примечание. * Координаты КВМ (димминга), время начала расширения КВМ в короне Солнца (UT) и ΔT от начал вспышек до расширения КВМ.

** Скорость КВМ по коронографу, угловой раствор (угловая ширина) КВМ вблизи Солнца, позиционный угол самого быстрого сегмента переднего края КВМ — МРА (*measurement position angle*).

*** Солнечный ветер и связанная с ним долгота силовой линии от Земли ($W\phi$) и $\Delta\phi$ между ней и долготой вспышки.

лей силовыми линиями межпланетного магнитного поля. Различие между полученной долготой и долготой вспышки соответствует угловому расстоянию коронального распространения протонов. Для СПС 30.03.2022 г. оно практически наименьшее. Результаты анализа, представленные в табл. 2, показывают, что во всех трех случаях разница между долготой источника и геоэффективной долготой не может обеспечить наблюдаемое различие во времени регистрации СПС у орбиты Земли. Также и скорости КВМ, определенные в коронографе, не свидетельствуют о принципиальных отличиях события 30.03.2022 г. от остальных. Если принять скорость коронального расширения ~ 1000 км/с, то время коронального распространения от точки начала возмущения до геоэффективной долготы будет равно 8, 6 и 5 мин для трех последовательных рассматриваемых событий. Таким образом, особенности временного профиля потоков частиц

30.03.2022 г. не были связаны с распространением частиц в короне Солнца.

Анализ синоптических карт Солнца (<https://gong.nso.edu/>) показал, что 28.03.2022 г. вспышка и точка соединения с КА STEREO A находились в области отрицательного магнитного поля, а точка соединения с Землей (с точкой либрации $L1$) — в области положительного поля и отделена от вспышки линией раздела полярностей, но характеры временных профилей потоков частиц на КА STEREO A и в точке $L1$ совпадают (рис. 4а).

В событии 30.03.2022 г. относительное расположение вспышки, КА STEREO A и Земли изменилось мало, тогда как профили начальной фазы возрастания потоков протонов по данным КА STEREO A и КА WIND различаются очень существенно. Следовательно, граница раздела полярностей не оказала влияния на корональное распространение протонов в событии 30.03.2022 г.

Этот вывод согласуется с ранее полученными результатами исследования, свидетельствующими, что пересечения гелиосферного токового слоя не влияют на спад профиля потоков солнечных протонов с энергией 1–5 МэВ [Kecskeméty et al., 2009]. Приведенные выше результаты исследования условий и процессов на Солнце во время трех рассматриваемых событий не дают возможности существенным образом выделить СПС 30.03.2022 г.

4.2. Условия в межпланетной среде

Рассмотрим возможное влияние условий в межпланетной среде на поток солнечных протонов, распространяющихся от Солнца к околоземному пространству. 28.03.2022 г. в АО 12975 зарегистрировано 2 КВМ, причем второй из них, наблюдавшийся на ~8 ч позже, обладал большей скоростью (табл. 2) и ускорением: на 20Rs (Rs — радиус Солнца) первый КВМ имел нулевую скорость, а второй — 1300 км/с. Взаимодействие двух

КВМ привело к образованию МКВМ, ударная волна которого достигла точки L1 31.03.2022 г. в 01:44 UT, а Земли в 02:24 UT (<https://zenodo.org/record/7991430>).

На рис. 5 представлена временная структура МКВМ в точке L1 и потоков протонов в L1 по данным КА ACE и на геостационарной орбите по данным ИСЗ GOES-16. Вертикальные пунктирные линии соответствуют особенностям временного профиля МКВМ и потоков солнечных протонов. Линия 1 показывает время прихода ударного фронта в точку L1, за которым следует турбулентная область (участок между линиями 1 и 3 на этом рисунке) с быстрыми изменениями компонент ММП, характерными для оболочки магнитного облака [Burlaga et al., 1981; Burlaga, 1988]. Внутри этой области между линиями 1 и 2 наблюдалось более сильное ММП, которое сопровождалось ростом потоков солнечных протонов до максимальных значений по данным КА ACE. Структуры ММП перед линией 3, соот-

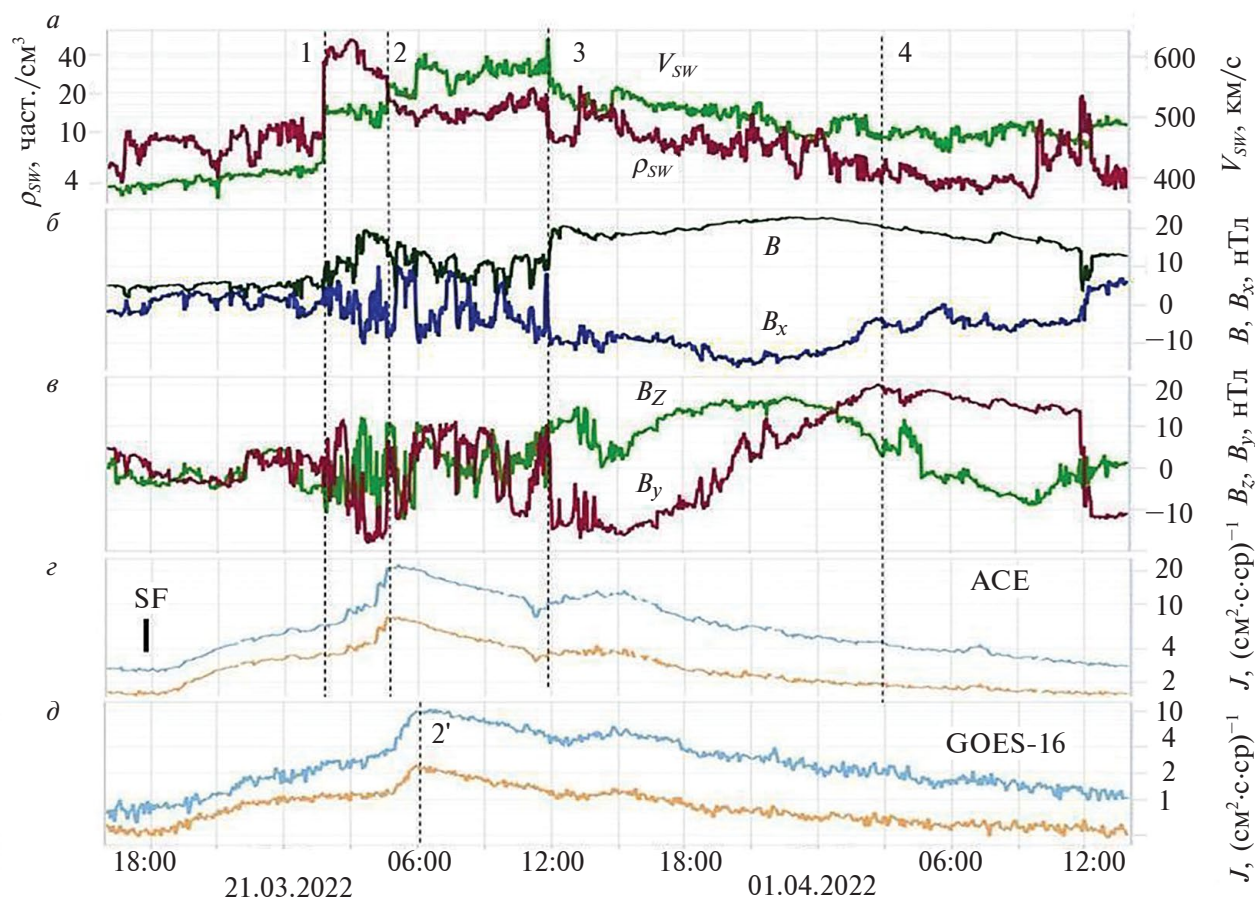


Рис. 5. Временные профили с 16:00 UT 30.03.2022 г. до 14:00 UT 01.04.2022 г.: (а) — скорости и плотности солнечного ветра по данным КА DSCOVR; (б) — модуля B и B_x и (в) — B_y - и B_z -компонент ММП по данным КА DSCOVR; потоков солнечных протонов с энергией >10 и >30 МэВ по данным (г) — КА ACE и (д) ИСЗ GOES-16.

ветствующие внутренней части турбулентной области, сопровождались небольшим локальным спадом потоков частиц на КА ACE. Линия 3 соответствует входу в магнитное облако, с характерными свойствами [Burlaga et al., 1981; Burlaga, 1988; Pal et al., 2020; Vörös et al., 2021]: усиленным магнитным полем, медленными изменениями его направления (признаками вращения вектора поля), практическим отсутствием флуктуаций ММП, низкой плотностью солнечного ветра и низкой температурой плазмы (не показанной на рисунке). В момент 4, по нашему мнению, наблюдается выход из магнитного облака, так как существенно уменьшается скорость изменения направления магнитного поля (B_x - и B_y -компоненты практически перестают изменяться). В каталоге (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) приведена только длительность всего МКВМ (12:00 UT 31.03.2022 г. — 12:00 UT 01.04.2022 г.).

Как видно на рис. 5, между временными профилями потоков протонов, измеренных на КА ACE и на ИСЗ GOES-16, существует временной сдвиг ~50 мин — время, необходимое солнечному ветру для преодоления 1.5 млн км со скоростью солнечного ветра (~500 км/с), которая наблюдается в данный момент в точке $L1$ (рис. 5б). Структура магнитного поля внутри МКВМ поддерживала практически постоянное пространственное распределение потоков частиц внутри него, что может означать распространение протонов с энергиями по крайней мере до 60 МэВ в пространстве вместе с МКВМ. Это явление требует дальнейшего изучения. Таким образом, особенности временного профиля потоков солнечных протонов в событии 30.03.2022 объясняются условиями в межпланетной среде, в частности, ролью МКВМ. Следует отметить, что этот МКВМ миновал КА STEREO A, на котором никаких особенностей временного профиля потоков протонов не наблюдалось.

Можно попытаться оценить радиальный размер гелиосферной структуры, через которую проходит Земля:

- полный радиальный размер МКВМ (по каталогу (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) с 12:00 UT 31.03.2022 г. до 12:00 UT 01.04.2022 г.) при средней скорости солнечного ветра 500 км/с составляет 0.3 а.е.;

- радиальный размер магнитного облака (между пунктирами 3 и 4 на рис. 5) — 0.18 а.е.

Оценка размеров МКВМ 31.03.2022 г. согласуется с ранее полученными результатами: $0.2 \div 0.4$ а.е. [Lepping et al., 1990].

Анализ динамики показателя энергетического спектра потоков протонов, при аппроксимации степенной функцией, $E^{-\gamma}$ дает возможность более точно описать различные части сложного и необычного временного профиля потока частиц 30.03.2022 г. На рис. 6 показаны 5-минутные значения потоков протонов по данным ИСЗ GOES-16 и показатель интегрального энергетического спектра солнечных протонов в степенном представлении ($E > 5$ МэВ $\div E > 100$ МэВ). Для получения спектра вычтен фон — средние потоки протонов до исследуемых событий, в интервале с 00:00 UT 27.03.2022 г. по 11:35 UT 28.03.2022 г. Полученные по 5-минутным данным показатели спектра сглаживались по 13 точкам. Квадратиком отмечено начало солнечной вспышки 30.03.2022, вертикальными отрезками 1 и 2 — начало возрастания потоков протонов в каналах с $E > 10$ МэВ и $E > 60$ МэВ, отрезком 3 — приход ударного фронта.

Можно видеть, что начало роста потоков частиц малых энергией наблюдалось раньше начала возрастания частиц высоких энергий. Эти частицы, скорее всего от предыдущего возрастания, были ускорены приближающимся ударным фронтом, который в момент вспышки 30.03.2022 был на расстоянии ~0.2 а.е. от Земли. Этот фронт привел также к задержке прихода первых частиц от вспышки 30.03.2022 г. в 17:21 UT. С приходом 30.03.2022 г. в ~19:05 UT более энергичных частиц от вспышки 30.03.2022 г. спектр становится более жестким, γ быстро уменьшается. Профили потоков частиц с $E > 60$ МэВ и $E > 100$ МэВ до ударной волны свидетельствуют об их диффузионном рас-

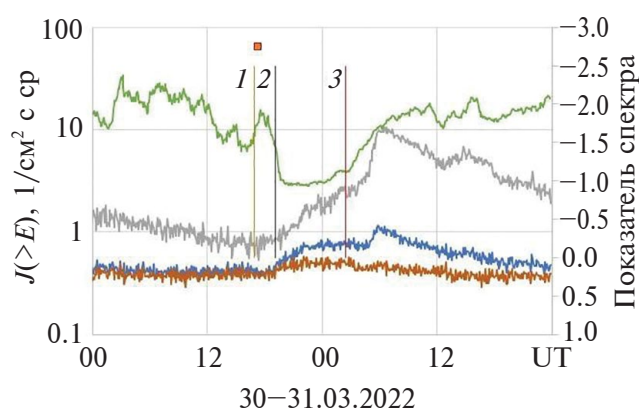


Рис. 6. Временные профили показателя степенного энергетического спектра потоков протонов (верхняя кривая) и потоков протонов с $E > 10$, 60 и 100 МэВ по данным ИСЗ GOES-16 30–31.03.2022 г.: 1 — начало возрастания потока протонов >10 МэВ, 2 — >60 МэВ, 3 — приход ударного фронта.

пространении. Увеличение γ после ударной волны связано с приходом частиц внутри МКВМ. С ~06 UT 31.03.2022 г. до начала 01.04.2022 г. наблюдается практически экспоненциальный спад потока протонов с характерным временем ~ 8 ч. Показатель спектра γ плавно увеличивается. Это можно трактовать как конвективный перенос частиц в расширяющейся гелиосферной структуре и испытывающих адиабатическое охлаждение [Owens, 1979; Дайбог и др., 2004; Kecskeméty et al., 2009].

Представленные в данной работе результаты не первые по наблюдению воздействия МКВМ на поток солнечных энергичных частиц, но ранее полученные результаты были достаточно противоречивы (см. введение). Временные профили солнечных частиц, представленные в работе [Cane et al., 1988] и в более поздней книге [Reames, 2017], не похожи на профиль потока солнечных протонов 30.03.2022–01.04.2022 г. В отражательной модели накопления, переноса и распространения частиц предполагается существование магнитных структур, содержащих полупрозрачные барьеры/зеркала [Любимов и Григоренко, 2007]. В событии 30.03.2022 г. на рис. 5г можно видеть накопление частиц за барьером (момент 3), который сформирован сильным магнитным полем и областью с повышенными плотностью и скоростью солнечного ветра (рис. 5 б–в).

В работах [Reames, 2013, 2023] подробно обсуждаются “резервуары” — обширные области пространства за распространяющимся ударным фронтом, содержащие захваченные частицы. Резервуар располагается между ударным фронтом и Солнцем. Согласно [Reames, 2023] захват частиц в резервуар является результатом взаимодействия ускоренных на ударном фронте частиц с альвеновской 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. Гелиосферную структуру 31.03.2022 г. также можно рассматривать как резервуар, в который попадают частицы, уже ускоренные во время взрывного процесса на Солнце 30.03.2022 г. Частицы распространяются в межпланетной среде от Солнца к Земле внутри МКВМ. Таким образом, можно констатировать, что существует довольно большое разнообразие подходов к объяснению участия структур ММП и связанных с ними ударных волн в формирование наблюдаемых профилей протонов СПС.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов сравнительного анализа солнечного протонного события 30.03.2022 г. (X1.3), имеющего сложный временной профиль потоков солнечных протонов, с предыдущим и последующим солнечными протонными событиями: 28.03.2022 г. (M4.0) и 02.04.2022 г. (M3.9), предложен сценарий развития СПС 30.03.2022 г. в околоземном пространстве:

- 28.03.2022 г. в результате взрывных процессов на Солнце возникают два КВМ. Более поздний, но более быстрый КВМ догоняет более ранний, и формируется МКВМ.

- В момент начала солнечной вспышки в 17:21 UT 30.03.2022 г. ударный фронт МКВМ находился на расстоянии 0.2 а.е. от Земли.

- Солнечное событие 30.03.2022 г. начинается в 17:21 UT, в той же активной области, из которой вышли два КВМ, и через несколько минут протоны настигают МКВМ, величина магнитного поля в котором достигает 20 нТл.

- МКВМ препятствует распространению солнечных протонов к Земле.

- Пространственное распределение потоков протонов внутри МКВМ было подобным в точке L1 и на Земле, но с временным запаздыванием ~50 мин.

- Структура магнитного поля внутри МКВМ поддерживала практически постоянное пространственное распределение потоков частиц внутри него, что может означать распространение протонов с энергиями по крайней мере до 60 МэВ в пространстве вместе с МКВМ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим всех исследователей, представляющих через Интернет свои данные о потоках протонов и параметрах солнечного ветра. Экспериментальные данные получены в Goddard Space Flight Center NASA: по солнечному ветру и межпланетному магнитному 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.gsfc.nasa.gov/>). Информация по солнечным вспышкам и корональным выбросам массы получена в Coordinated Data Analysis Workshops (CDAW) (<https://cdaw.gsfc.nasa.gov/>), SOHO LASCO CME CATALOG (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Времена прихода ударных волн КВМ получены на сайте (<https://zenodo.org/record/7991430>).

Благодарим сотрудников службы прогноза солнечного ветра (ММИ им. Эйлера СПбГУ, ЛЭТИ) (<https://solarwind.entroforce.ru/>), которые специально, по нашей просьбе, визуализировали ситуацию в гелиосфере 28.03.2022–03.04.2022 г.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевская Г.А., Дайбог Е.И., Логачев Ю.И. Изолированные события солнечных космических лучей, обусловленные приходом быстрых штормовых частиц (ESP) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 4. С. 503–510. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600254>
- Дайбог Е.И., Логачев Ю.И., Кейлер С., Кечкемети К. Серии солнечных событий с одинаковыми спадами как инструмент для выделения квазистационарных состояний межпланетного пространства // Космич. исслед. Т. 42. № 4. С. 376–383. 2004.
- Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. 27-дневная периодичность потоков юпитерианских электронов на орбите Земли // Астрон. журн. Т. 94. № 12. С. 1062–1070. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0004629917120027>
- Логачев Ю.И., Базилевская Г.А., Власова Н.А., Гинзбург Е.А., Дайбог Е.И., Ишков В.Н., Лазутин Л.Л., Неуен М.Д., Сурова Г.М., Яковчук О.С. Каталог солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности (2009–2019 гг.). Москва: МЦД, 970 с. 2022. <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-008>
- Любимов Г.П. Отражательная модель движения СКЛ в петлевых ловушках // Астрон. циркуляр АН СССР. № 1531. С. 19–20. 1988.
- Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // Космич. исслед. Т. 45. № 1. С. 12–19. 2007.
- Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде / Под ред. Л.И. Дормана. М.: МИР, 1965.
- Bazilevskaya G.A. Once again about origin of the solar cosmic rays // Journal of Physics: Conf. Series. V. 798. P. 012034. 2017. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/798/1/012034/pdf>
- 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. V. 67. № 13. P. 4983–5000. 1962. <https://doi.org/10.1029/JZ067i013p04983>
- Burlaga L., Sittler E., Mariani F., Schwenn R. Magnetic Loop Behind an Interplanetary Shock: Voyager, Helios, and IMP 8 Observations // J. Geophys. Res. V. 86. № A8. P. 6673–6684. 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06673>
- Burlaga L.F. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha // J. Geophys. Res., Space Physics. V. 93. № A7. P. 7217–7224. 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA07p07217>
- Cane H.V., Reames D.V., von Rosenvinge T.T. The role of interplanetary shocks in the longitude distribution of solar energetic particles // J. Geophys. Res. V. 93. № A9. P. 9555–9567. 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA09p09555>
- Frassati F., Laurenza M., Bemporad A., West M.J., Mancuso S., Susino R., Alberti T., Romano P. Acceleration of Solar Energetic Particles through CME-driven Shock and Streamer Interaction // Astrophysical Journal. V. 926. № 2. P. 227–246. 2022. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac460e>
- Gieseler J., Dresing N., Palmroos C. et al. Solar-MACH: An open-source tool to analyze solar magnetic connection configurations // Front. Astronomy Space Sci. V. 9. 2022. <https://www.frontiersin.org/journals/astronomy-and-space-sciences/articles/10.3389/fspas.2022.1058810/full>
- Kahler S.W., Sheeley Jr. N.R., Howard R.A., Koomen M.J., Michels D.J., McGuire R.E., von Rosenvinge T.T., Reames D.V. Associations between coronal mass ejections and solar energetic proton events // J. Geophys. Res. V. 89. № A11. P. 9683–9693. 1984. <https://doi.org/10.1029/JA089iA11p09683>
- Kahler S.W., Reames D.V. Probing the Magnetic Topologies of Magnetic Clouds by Means of Solar Energetic Particles // J. Geophys. Res. V. 96. № A6. P. 9419–9424. 1991. <https://doi.org/10.1029/91JA00659>
- Kecskeméty K., Daibog E.I., Logachev Y.I., Kóta J. The decay phase of solar energetic particle events // J. Geophys. Res. V. 114. № A6. 2009. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008JA013730>
- Klein K.-L., Dalla S. Acceleration and Propagation of Solar Energetic Particles // Space Sci. Rev. V. 212. P. 1107–1136. 2017. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-017-0382-4>
- Kocharov L., Kovaltsov G.A., Torsti J., Huttunen-Heikinmaa K. Modeling the solar energetic particle events in closed structures of interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 110. № A12. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011082>
- Lepping R.P., Jones J.A., Burlaga L.F. Magnetic Field Structure of Interplanetary Magnetic Clouds at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 95. № A8. P. 11957–11965. 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA08p11957>
- Marqué C., Posner A., Klein K.L. Solar energetic particles and radio-silent fast coronal mass ejections // Astrophys. J. V. 642. P. 1222–1235. 2006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/501157>
- Masson S., Démoulin P., Dasso S., Klein K.-L. The interplanetary magnetic structure that guides solar relativistic particles // Astron. & Astrophys. V. 538. № A32. 2012. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118145>

- Meyer P., Parker E.N., Simson J.A. Solar Cosmic Rays of February, 1956 and Their Propagation through Interplanetary Space // *Phys. Rev.* V. 104. № 3. P. 768–783. 1956. https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.104.768?casa_token=_yHvEACILcEAAAAA%3AN2b4irIb6lxbj2NRvyjzm_9GMXbDKcHv9Y_ecZcJZzI_q0ZDfqSIQOwNxV7QCcsWNn_7OfaXp2VqmgB
- Owens A.J. Interplanetary diffusion of solar cosmic rays—A new approximate analytic solution // *J. Geophys. Res.* V. 84. № A8. P. 4451 – 4456. 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA08p04451>
- Pal S., Dash S., Nandy D. Flux erosion of magnetic clouds by reconnection with the Sun's open flux // *Geophys. Res. Lett.* V. 47. № 8. e2019GL086372. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019GL086372>
- Reames D.V. Solar energetic particles: A paradigm shift // *Rev. Geophys.* V. 33. S1. P. 585–589. 1995. <https://doi.org/10.1029/95RG00188>
- Reames D.V. The two sources of solar energetic particles // *Space Science Reviews.* V. 175. P. 53–92. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9>
- Reames D.V. Solar Energetic Particles. A Modern Primer on Understanding Sources, Acceleration and Propagation / Part of the book series: Lecture Notes in Physics (LNP, volume 932) 2017.
- Reames D.V. How Do Shock Waves Define the Space-Time Structure of Gradual Solar Energetic Particle Events? // *Space Science Reviews.* V. 219. A14. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00959-x>
- Reinard A.A., Biasecker D.A. Coronal mass ejection associated coronal dimmings // *Astrophys. J.* V. 674. P. 576–585. 2008. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/525269>
- Richardson I.G. Energetic particles and corotating interaction regions in the solar wind // *Space Science Reviews.* V. 111. P. 267–376. 2004. <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032689.52830.3e>
- Richardson I.G. Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere // *Living Reviews in Solar Phys.* V. 15. A1. 2018. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0011-z>
- Shen C., Wang Y., Ye P., Wang S. Enhancement of Solar Energetic Particles During a Shock – Magnetic Cloud Interacting Complex Structure // *Solar Phys.* V. 252. P. 409–418. 2008. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-008-9268-7>
- Tan L.C., Malandraki O.E., Reames D.V., Ng C.K., Wang L., Dorrian G. Use of incident and reflected solar particle beams to trace the topology of magnetic clouds // *Astrophys. J.* V. 750. № 2. P. 146–167. 2012. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/750/2/146/meta>
- Torsti J., Riihonen E., Kocharov L. The 1998 May 2–3 magnetic cloud: an interplanetary “highway” for solar energetic particles observed with SOHO/ERNE // *Astrophys. J.* V. 600. P. L83–L86. 2004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/381575>
- Vlasova N.A., Bazilevskaya G.A., Ginzburg E.A., Daibog E.I., Kalegaev V.V., Kaportseva K.B., Logachev Yu.I., Myagkova I.N. Solar Energetic Proton Fluxes in Near-Earth Space on March 13–23, 2023 // *Cosmic Res.* V. 62. № 2. C. 197–209. 2024. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0010952523600282>
- Vörös Z., Varsani A., Yordanova E., Sasunov Y.L., Roberts O.W., Kis A., Nakamura R., Narita Y. Magnetic reconnection within the boundary layer of a magnetic cloud in the solar wind // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* V. 126. № 9. e2021JA029415. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029415>
- Wu S.-S., Qin G. Magnetic Cloud and Sheath in the Ground-level Enhancement Event of 2000 July 14. I. Effects on the Solar Energetic Particles // *Astrophys. J.* V. 904. № 2. P. 151–159. 2020. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc0f2>
- Zhang M., Cheng L., Zhang J., Riley P., Kwon R.Y., Lario D., Balmaceda L., Pogorelov N.V. 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 // *Astrophys. J.: Supplement Series.* V. 266. № 2. P. 35–54. 2023. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/acbb8e>

Influence of Processes on the Sun and in the Interplanetary Medium on the Solar Proton Event on March 30, 2022

**N. A. Vlasova^{1,*}, G. A. Bazilevskaya², E. A. Ginzburg³, E. I. Daibog¹, V. V. Kalegaev^{1,4},
K. B. Kaportseva^{1,4}, Yu. I. Logachev¹, I. N. Myagkova¹**

¹Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

²Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

³Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

⁴Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**e-mail: nav19iv@gmail.com*

The results of a comparative analysis of the solar proton event on March 30, 2022, which has an unusual time profile of solar proton fluxes, with the previous and subsequent solar proton events (March 28, 2022 and April 02, 2022) are presented. Increases in energetic proton fluxes in interplanetary and near-Earth space are associated with successive solar X-ray flares M4.0, X1.3 and M3.9 and three halo-type coronal mass ejections. The work was done based on experimental data obtained from spacecraft located in interplanetary space (ACE, WIND, STEREO A, DSCOVR), in a circular polar orbit at an altitude of 850 km (Meteor-M2) and in geostationary orbit (GOES-16, Electro-L2). An explanation has been proposed for the features of the energetic proton flux profile in the solar proton event on March 30, 2022: protons accelerated in the flare on March 30, 2022 were partially screened by an interplanetary coronal mass ejection, the source of which was the explosive processes on the Sun on March 28, 2022; late registration of maximum proton fluxes, simultaneous for particles of different energies, is due to the arrival of particle fluxes inside an interplanetary coronal mass ejection. The spatial distribution of solar protons in near-Earth orbit was similar to the distribution at the Lagrange point *LL*, but with a delay of ~50 min.

Keywords: solar proton event, solar flare, coronal mass ejection, solar wind, interplanetary magnetic field

УДК 523.62-726

РОЛЬ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАЗВИТИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЗА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

© 2025 г. Л. С. Рахманова^{1, *}, М. О. Рязанцева^{1, **}, А. А. Хохлачев^{1, ***},
Ю. И. Ермолаев^{1, ****}, Г. Н. Застенкер^{1, *****}

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: rakhnud@gmail.com

**e-mail: oream@gmail.com

***e-mail: aleks.xaa@yandex.ru

****e-mail: yermol@iki.rssi.ru

*****e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 08.03.2024 г.

После доработки 16.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

В данной работе проводится оценка вклада среднемасштабных структур — вариаций, регистрируемых спутником за временной период порядка 10 минут, — в развитие турбулентности в переходной области за околоземной ударной волной. Исследование основано на одновременных измерениях параметров плазмы и/или магнитного поля в солнечном ветре, в дневном магнитослое и на флангах. Используются данные спутников Wind, THEMIS, Спектр-Р. Анализируются характеристики спектров флуктуаций модуля магнитного поля и потока ионов в частотном диапазоне 0.01–4 Гц, на котором наблюдается переход от МГД к кинетическим масштабам. Показано, что динамика характеристик турбулентности в переходной области определяется крупномасштабными возмущениями, в то время как при их отсутствии на формирование турбулентного каскада могут оказывать влияние структуры меньших масштабов.

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

DOI: 10.31857/S0016794025010049, **EDN:** AENWMU

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие солнечного ветра (СВ) и магнитосферы Земли является комплексным процессом, важную роль в котором играет переходная область за околоземной ударной волной (ОЗУВ) — магнитослой (МСЛ). Модели отклика магнитосферы на межпланетные возмущения используют в качестве входных параметров измерения в СВ, однако перед магнитопаузой свойства плазмы и магнитного поля, включая характеристики их вариаций, могут сильно отличаться от невозмущенного СВ. Как показывает ряд исследований, в МСЛ происходит модификация плазменных и магнитных структур, пришедших из СВ [Rakhmanova et al., 2016; Turc et al., 2017]. В частности, непосредственно перед магнитопаузой одни из наиболее геоэффективных параметров — знак и модуль B_z -компоненты маг-

нитного поля — могут отличаться от наблюдаемых в СВ [Turc et al., 2017; Пулинец и др., 2014; Šafránková et al., 2009].

Хорошо известно, что крупномасштабные возмущения в солнечном ветре, такие как корональные выбросы массы (ICME) и области сжатия перед высокоскоростными потоками из корональных дыр (CIR) являются наиболее геоэффективными событиями [Yermolaev et al., 2012]. Усиленное влияние на магнитосферу, как правило, обусловлено наличием в таких структурах длительных периодов южной ориентации межпланетного магнитного поля ($B_z < 0$), а также с увеличением динамического давления или величины потока энергии (вектора Пойнтинга) в таких событиях [Yermolaev et al., 2012]. Однако детальный анализ показывает, что может иметь значение и внутренняя структура крупномас-

штабных возмущений СВ. Например, перед ICME может присутствовать область сжатия, перед которой может находиться ударная волна, и такие ICME обладают различной геоэффективностью [Yermolaev et al., 2012]. Внутри области сжатия также формируются различные разрывы, каждый из которых может вызывать отклик магнитосферы [Blum et al., 2021]. Разнообразные возмущения в СВ сопровождаются особенностями в процессах за ОЗУВ, в частности, взаимодействие области сжатия с магнитосферой характеризуется повышенной генерацией джетов (структур с размерами порядка земного радиуса, характеризующихся резким возрастанием плотности плазмы) в МСЛ [LaMoury et al., 2020], которые оказывают дополнительное воздействие на магнитопаузу [Dmitriev et al., 2021]. Внутренняя структура ICME также имеет свою динамику, и пересечение ОЗУВ оказывает влияние на эту динамику. Как показано в работе [Turc et al., 2017], при пересечении ОЗУВ внутри магнитных облаков знак B_z -компоненты магнитного поля может изменяться на противоположный на временных интервалах порядка 30 мин. Таким образом, геоэффективность крупномасштабных возмущений солнечного ветра (имеющих пространственные масштабы порядка 10^7 км) может определяться и вложенными в них структурами меньших масштабов (вариациями с масштабами порядка 10^5 км, регистрируемыми за время порядка единиц-десятков минут, далее по тексту — структуры средних масштабов), а также их модификацией в МСЛ. Такими структурами в СВ, как правило, являются разрывы различного типа [Tsurutani et al., 2010]. В рамках анализа солнечно-земных связей важно иметь представление, каким образом структуры различных масштабов могут изменяться в МСЛ и какие факторы влияют на этот процесс.

Существует несколько подходов к исследованию процессов, протекающих в МСЛ на различных масштабах, например, анализ отдельных структур [Rakhmanova et al., 2016; Рахманова и др., 2018; Turc et al., 2017], анализ усредненных значений вариаций параметров [Nemesek et al., 2000; Shevurev et al., 2003], анализ вклада различных волновых мод [Anderson et al., 1996; Breuillard et al., 2016]. Одним из подходов является анализ спектра турбулентных флуктуаций параметров плазмы и магнитного поля и зависимости его характеристик от внешних факторов. Такой подход позволяет рассматривать совокупность процессов в определенном диапазоне масштабов, а также взаимодействие структур различных масштабов между собой. Спектры дают представление

о процессах, ответственных за перекачку энергии в турбулентном каскаде. Наиболее разносторонне на данный момент исследованы характеристики турбулентности в СВ [Bruno and Carbone, 2013; Alexandrova et al., 2013]. Считается, что на масштабах более 10^6 км происходит поступление энергии в систему за счет крупномасштабных структур, возникающих в солнечной короне, энергия передается на меньшие масштабы посредством нелинейных взаимодействий турбулентных вихрей, формируя инерционную область каскада, и на масштабах порядка гирорадиуса протона ($\sim 10^3$ км) начинается диссипация энергии и происходит нагрев плазмы. Экспериментальные исследования показывают, что на масштабах поступления энергии спектр флуктуаций магнитного поля характеризуется степенной функцией f^1 [Bruno et al., 2009], при переходе к инерционной области каскада (т.н. МГД-масштабы) спектр описывается степенной функцией $f^{5/3}$ (соответствующей классическому Колмогоровскому спектру) [Bruno et al., 2009; Smith et al., 2006] и на субионных (кинетических) масштабах происходит переход к диссипационной области, в которой показатель степени лежит в диапазоне от -2 до -4 [Alexandrova et al., 2012; Smith et al., 2006]. Показатель степени при этом определяется протекающими в плазме процессами диссипации, например, затуханием Ландау, перемежаемостью, а также присутствием плазменных и магнитных структур, таких как тонкие токовые слои или Альвеновские вихри. Кроме того, на характеристики спектров на кинетических масштабах оказывают влияние волновые процессы [Breuillard et al., 2016].

Турбулентность плазмы и магнитного поля в МСЛ изучена в меньшей степени, чем в СВ, в связи с существенно более сложной динамикой процессов в этой области. По сравнению со спокойным СВ, в МСЛ турбулентность постоянно развивается в присутствии границ — ОЗУВ и магнитопаузы. Кроме того, на процессы внутри МСЛ, в т.ч. формирование турбулентного каскада, оказывает существенное влияние направление межпланетного магнитного поля относительно ОЗУВ: при угле $\theta_{BN} < 45^\circ$ между вектором межпланетного магнитного поля и локальной нормалью к ОЗУВ (квази параллельная ОЗУВ) в МСЛ существенно возрастает мощность флуктуаций [Shevurev et al., 2005], в то время как при $\theta_{BN} > 45^\circ$ (квази перпендикулярная ОЗУВ) мощность флуктуаций в МСЛ значительно меньше (порядка 10% от величины параметра), однако наблюдается существенная анизотропия температуры, приводящая к генерации волновых процессов [Schwartz et al., 1996]. Как показывают

экспериментальные исследования, за ОЗУВ спектр флуктуаций на МГД-масштабах существенно отличается от Колмогоровского вида [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017]. Предполагается, что на ОЗУВ происходит смешивание фаз флуктуаций, и в результате в дневном МСЛ не наблюдается инерционной области каскада, а в процессе распространения плазмы к флангам происходит развитие турбулентного каскада и формирование классического Колмогоровского спектра [Huang et al., 2017]. Однако, ряд исследований показывает, что такое изменение наблюдается не всегда [Рахманова и др., 2019] и зависит от параметров набегающего потока СВ [Rakhmanova et al., 2020, 2022]. В частности, показано, что в периоды спокойного течения СВ спектры флуктуаций в МСЛ близки к наблюдаемым в СВ, тогда как в периоды крупномасштабных возмущений в межпланетной среде (ICME, CIR) на ОЗУВ происходит сильное изменение характеристик турбулентности, в том числе отсутствие Колмогоровского скейлинга на МГД-масштабах и укрупнение спектров на кинетических масштабах.

На данный момент существует представление о свойствах турбулентности в различных областях МСЛ [Huang et al., 2017; Rakhmanova et al., 2018; Рахманова и др., 2018; Li et al., 2020], полученные на основе статистического анализа измерений за ОЗУВ. Кроме того, существуют экспериментальные указания на особенности формирования турбулентности за ОЗУВ для различных крупномасштабных типов СВ [Рахманова и др., 2018; Rakhmanova et al., 2022]. Однако, как показано выше, внутри крупномасштабных межпланетных возмущений всегда присутствуют структуры средних масштабов, которые подвержены изменениям на ОЗУВ. Под структурами в данном случае понимаются быстрые изменения параметров магнитного поля (поворот) или плазмы или их вариации. Резкие повороты магнитного поля, сопровождаемые изменениями плазменных параметров, как известно, характерны для таких явлений в СВ, как тангенциальный и вращательный разрывы [Tsurutani et al., 2010]. Влияние таких структур на динамику турбулентного каскада в МСЛ до сих пор не исследовалось, несмотря на упоминаемый в литературе вклад в солнечно-земные связи [Blum et al., 2021].

В настоящей работе на основе нескольких событий анализируется, как структуры средних масштабов могут влиять на процесс модификации турбулентного каскада на ОЗУВ. Рассмотрены события, когда доступны измерения на трех спутниках — в СВ, в дневном МСЛ и на фланге МСЛ. Используются данные спутников Wind,

THEMIS, Спектр-Р. Для того, чтобы оценить разницу между спокойными и возмущенными условиями в СВ, выделяются периоды медленного невозмущенного СВ и ICME, включая области сжатия перед ними. Анализируются характеристики Фурье-спектров флуктуаций модуля магнитного поля и потока ионов в частотном диапазоне 0.01–4 Гц.

2. ДАННЫЕ

В данной работе использовались одновременные измерения на трех спутниках, находящихся в разных областях околоземного пространства, с учетом времени распространения плазмы между спутниками. В СВ использовались данные спутника Wind: характеристики плазмы измерялись с помощью прибора SWE [Ogilvie et al., 1995] с разрешением 92 с или прибора 3DP [Lin et al., 1995] с разрешением 3 с, модуль и компоненты магнитного поля измерялись прибором MFI [Lepping et al., 1995] с временным разрешением 0.092 с. В МСЛ использовались измерения одного из спутников миссии THEMIS, параметры плазмы измерялись прибором ESA [Auster et al., 2008] с разрешением 3–4 с, характеристики магнитного поля измерялись с помощью прибора FGM [McFadden et al., 2008] с разрешением 0.25 с.

Следует отметить, что в случае спутников Wind и THEMIS ключевыми в настоящем анализе являлись измерения магнитного поля с высоким временным разрешением, тогда как плазменные параметры использовались как вспомогательные, в частности, для трассирования плазмы между спутниками.

Кроме того, в МСЛ использовались данные прибора БМСВ [Застенкер и др., 2013; Šafránková et al., 2009] на спутнике Спектр-Р. Были использованы измерения плотности, скорости и температуры плазмы с временным разрешением 3 с и измерения потока ионов с разрешением 0.031 с.

Были отобраны три интервала времени, относящихся к различным дням: 1) спокойный СВ, 2) область сжатия перед ICME, 3) ICME вместе с областью сжатия перед ним. Основным критерием для отбора событий являлось одновременное наличие измерений с максимально доступным временным разрешением на всех трех спутниках, а также длительность интервала не менее 2 ч. При этом рассматривались события, когда на трех спутниках наблюдались схожие временные ряды изменений плотности, что гарантирует рассмотрение одной и той же плазмы в трех точках. Все отобранные события относились к МСЛ за квази перпендикулярной ОЗУВ.

На рис. 1а представлены измерения потока ионов на спутниках Wind (СВ, темно-серая линия), Спектр-Р (дневной МСЛ, светло-серая линия) и THEMIS-C (фланг, черная линия). Расположение спутников в околоземном пространстве приведено на панели (з), ОЗУВ и магнитопауза показаны схематично.

Основной проблемой при анализе многоспутниковых измерений является определение времени распространения плазмы между космическими аппаратами. В данной работе на первом этапе сдвиг вычислялся как расстояние между спутниками, деленное на скорость плазмы СВ. Далее вручную определялись структуры плазмы и/или магнитного поля, которые видны на всех спутниках, и временные ряды данных сдвигались таким образом, чтобы структуры совпадали. Для примера, представленного на рис. 1, временной сдвиг между Wind и Спектр-Р составил 3590 с, между Спектр-Р и THEMIS-C — 1545 с. На рис. 1а ряд

структур хорошо прослеживается на всех трех спутниках (например, возрастания плотности в ~17:50 UT, ~18:10 UT).

На рис. 1 панели б, в приведены измерения магнитного поля на THEMIS-C и Wind, соответственно, сдвинутые на то же время, что и временные ряды плотности плазмы. Измерения магнитного поля на спутнике Спектр-Р отсутствуют. Хорошо видно, что одни и те же структуры магнитного поля (напр., в ~17:50 UT, ~18:45 UT) наблюдаются на паре спутников, несмотря на значительное расстояние между ними. Более подробное описание, особенности и проблемы сопоставления данных с нескольких спутников в СВ и МСЛ приведены в работе [Rakhamnova et al., 2022].

Для анализа влияния структур средних масштабов на характеристики турбулентности из отобранных временных рядов выбирались интервалы, в течение которых указанные структуры

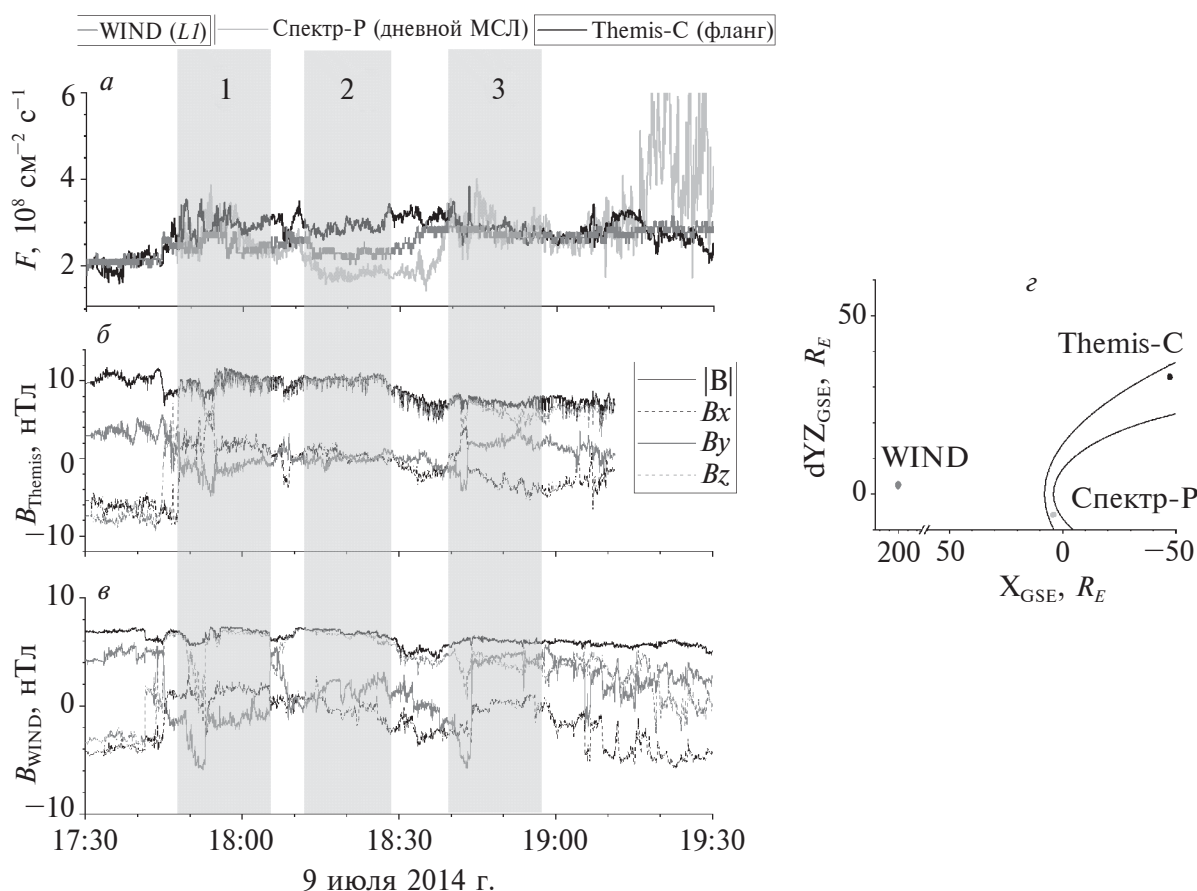


Рис. 1. (а) — Поток ионов в СВ (темно-серая линия), в дневном МСЛ (светло-серая линия) и на фланге (черная линия) для события 9 июля 2014 г.; (б, в) — измерения модуля и компонент магнитного поля на спутниках THEMIS и Wind, соответственно, данные всех спутников сдвинуты на время распространения плазмы; (з) — расположение спутников для рассматриваемого события.

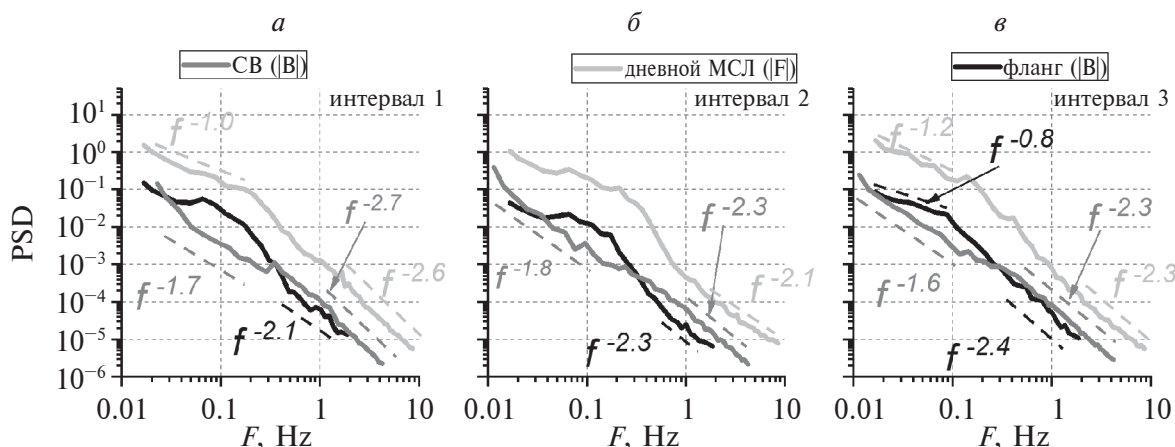


Рис. 2. Сравнение нормированных спектров флуктуаций модуля магнитного поля ($|B|$) и потока ионов ($|F|$) в трех областях околоземного пространства — в СВ (темно-серая линия), в дневной МСЛ (светло-серая линия) и на флангах (черная линия) — для трех интервалов, отмеченных на рис. 1.

регистрировались на всех трех спутниках, а также квази стационарные интервалы, на которых структуры не наблюдались. На рис. 1а–в выделены три отобранных интервала. Длительность интервалов выбиралась таким образом, чтобы обеспечить достаточное количество точек для Фурье-анализа, и составляет ~ 17 мин для данных Спектр-Р и THEMIS и 25 мин для данных Wind. Различие в длительности интервалов обусловлено разным временным разрешением анализируемых данных; при этом середины интервалов данных Wind и THEMIS-C/Спектр-Р совпадают. В течение интервалов 1 и 3 наблюдаются повороты поля (резкое изменение одной из компонент) и изменения плотности плазмы. В течение интервала 2 плазма и магнитное поле на всех трех спутниках квази стационарны.

Следует отметить, что в рамках данной работы в качестве структур средних масштабов рассматриваются структуры с изменениями плотности плазмы, сопровождаемые поворотом магнитного поля. Анализ типа этих структур не проводится.

Для отбираемых представленным образом интервалов вычислялись Фурье-спектры флуктуаций модуля магнитного поля (по данным Wind и THEMIS) и потока ионов (по данным Спектр-Р). Вариации обоих параметров представляют собой вариации сжатия, и их спектры имеют, как правило, одинаковый скейлинг [Chen, 2016; Chen and Boldyrev, 2017; Breuillard et al., 2018]. Для сравнения разных параметров между собой спектры флуктуаций магнитного поля и потока ионов были нормированы на среднее значение параметра за интервал.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример, представленный на рис. 1, относится к периоду медленного невозмущенного СВ (тип *Slow* по каталогу [Ермолаев и др., 2009]). На рис. 2а–в показаны спектры для трех отобранных интервалов, на каждой панели представлены три спектра — в СВ (темно-серая линия, флуктуации модуля магнитного поля $|B|$), в дневной части МСЛ (светло-серая линия, флуктуации потока ионов $|F|$) и на фланге МСЛ (черная линия, флуктуации модуля магнитного поля $|B|$). Штриховыми линиями представлены результаты аппроксимации спектров степенными функциями. В данной работе Фурье-спектры вычисляются по разным параметрам — модуль магнитного поля и поток ионов — в связи с отсутствием на спутнике Спектр-Р измерений магнитного поля. Флуктуации потока ионов представляют собой флуктуации плотности, поскольку величина скорости плазмы варьируется в меньшей степени (непосредственное сравнение спектров флуктуаций потока ионов и плотности плазмы проводилось в работе [Pitňa et al., 2016]). Флуктуации плотности плазмы и модуля магнитного поля представляют собой компрессионную компоненту турбулентного каскада и как правило имеют близкие характеристики. Кроме того, одинаковый скейлинг модуля магнитного поля и плотности был показан по одновременным измерениям на одном спутнике как для МГД [напр., Chen 2016], так и на кинетических масштабах [Chen and Boldyrev, 2017; Breuillard et al., 2018]. Поэтому в настоящей работе предполагается, что сравнение свойств спектров флуктуаций указанных величин оправдан, если рассматривается только скейлинг флуктуаций, а не их мощность.

Интервал 1 характеризуется спектром $\sim f^{1.7 \pm 0.2}$ в СВ на МГД-масштабах и $f^{2.7 \pm 0.1}$ на кинетических масштабах. На МГД-масштабах спектр близок к Колмогоровскому виду, характерному для плазмы СВ. На кинетических масштабах наклон спектра также соответствует средним для СВ значениям и близок к значению $-8/3$, предсказываемому некоторыми теориями [Boldyrev and Perez, 2012]. За ОЗУВ наблюдается существенное уплощение спектра на МГД-масштабах, наклон спектра составляет -1 ± 0.3 , что характерно для турбулентности дневной части магнитослоя [Czaykowska et al., 2001; Huang et al., 2017]. На кинетических масштабах при этом спектр имеет наклон -2.6 ± 0.1 , близкий к $-8/3$ и к наблюдаемому в СВ. На флангах невозможно определить наклон спектра на МГД-масштабах из-за наличия пика на переходных масштабах, вызванного волновыми процессами. При этом на кинетических масштабах спектр имеет наклон -2.1 ± 0.3 , т.е. спектр более плоский, чем в СВ и в дневном МСЛ. Таким образом, в данном событии на ОЗУВ произошло ожидаемое в этой области существенное изменение скейлинга турбулентного каскада на МГД-масштабах и сохранение на кинетических, а при распространении к флангам произошло уплощение кинетической части спектра, которое может быть обусловлено усилением флуктуаций сжатия.

Аналогично проводилось сравнение характеристик турбулентности для других интервалов. Как видно из рис. 2б, для интервала 2, на котором отсутствуют среднемасштабные структуры, в СВ наблюдается наклон -1.8 ± 0.2 на МГД-масштабах, что близко к Колмогоровскому скейлингу, а наклон на кинетических масштабах составляет -2.3 ± 0.1 , что близко к $-7/3$, также часто предсказываемому в теориях [Schekochihin et al., 2009]. В дневном МСЛ усиление волновой активности приводит к появлению широкого пика в спектре на частотах 0.05–0.8 Гц, что делает невозможным определение наклона на МГД-масштабах. В области частот после излома наклон спектра составляет -2.1 ± 0.1 , что наблюдается достаточно редко как в МСЛ, так и в СВ. Таким образом, за ОЗУВ наблюдается незначительное уплощение спектра на кинетических масштабах. При распространении к флангам пик в спектре сохраняется, что свидетельствует о локальности волнового процесса, ответственного за него. На кинетических масштабах наблюдается восстановление наклона спектра -2.3 ± 0.2 , близкого к наблюдаемому в СВ.

Для интервала 3, в течение которого регистрируются среднемасштабные структуры, в СВ наблюдается наклон -1.6 ± 0.1 на МГД-масштабах, т.е. Колмогоровский спектр, и -2.3 ± 0.1 на кинетических.

В дневном МСЛ на МГД-масштабах происходит уплощение спектра до $f^{1.2 \pm 0.3}$, в то время как на кинетических масштабах спектр не изменяется и имеет наклон -2.3 ± 0.1 . На флангах МСЛ на МГД-масштабах спектр характеризуется наклоном -0.8 ± 0.1 , т.е. также отличается от Колмогоровского. На кинетических масштабах наклон спектра составляет -2.4 ± 0.1 , что близко к наблюдениям в СВ и в дневном МСЛ.

Таким образом, при спокойных условиях в СВ при отсутствии среднемасштабных структур (интервал 2) в дневном МСЛ основной вклад в спектры турбулентных флуктуаций на МГД-масштабах вносят волновые процессы, что приводит к доминированию пика в спектре на частотах, близких к излому. На кинетических масштабах спектры незначительно уплощаются за ОЗУВ до показателей степени, которые наблюдаются по статистике достаточно редко. При распространении к флангам пик в спектре сохраняется, что подразумевает, что источник волнового процесса перемещается к флангам вместе с плазмой. На кинетических масштабах наблюдается восстановление скейлинга, характерного для СВ. Следует отметить, что как правило в МСЛ наблюдаются либо ионно-циклотронные альвеновские неустойчивости, либо волны зеркальной моды, которые являются вариациями сжатия. Можно предположить, что общий низкий уровень флуктуаций приводит к тому, что после пересечения ОЗУВ основной вклад в развитие турбулентного каскада дает компрессионная зеркальная мода.

В присутствии структур средних масштабов (интервалы 1, 3) на МГД-масштабах за ОЗУВ пропадает Колмогоровский скейлинг, характерный для турбулентности в СВ, что в среднем характерно для дневного МСЛ [Huang et al., 2017]. При этом на кинетических масштабах наклон спектра сохраняется в дневном МСЛ. Однако при распространении к флангам не наблюдается восстановления Колмогоровского скейлинга, которое, как правило, происходит при удалении плазмы от подсолнечной области МСЛ [Rakhmanova et al., 2022]. Кроме того, на кинетических масштабах может наблюдаться уплощение спектров. Стоит отметить, что в этом случае на частотах излома спектра также присутствовал пик компрессионных флуктуаций.

На рис. 3 (по аналогии с рис. 1) представлено событие, относящееся к области сжатия *Sheath* перед ICME. В самой области ICME необходимы измерения отсутствовали. В дневной части МСЛ находился спутник THEMIS-E (до 00:10 UT) и спутник THEMIS-A (после 00:10 UT). В ходе события можно выделить 4 интервала: в интерва-

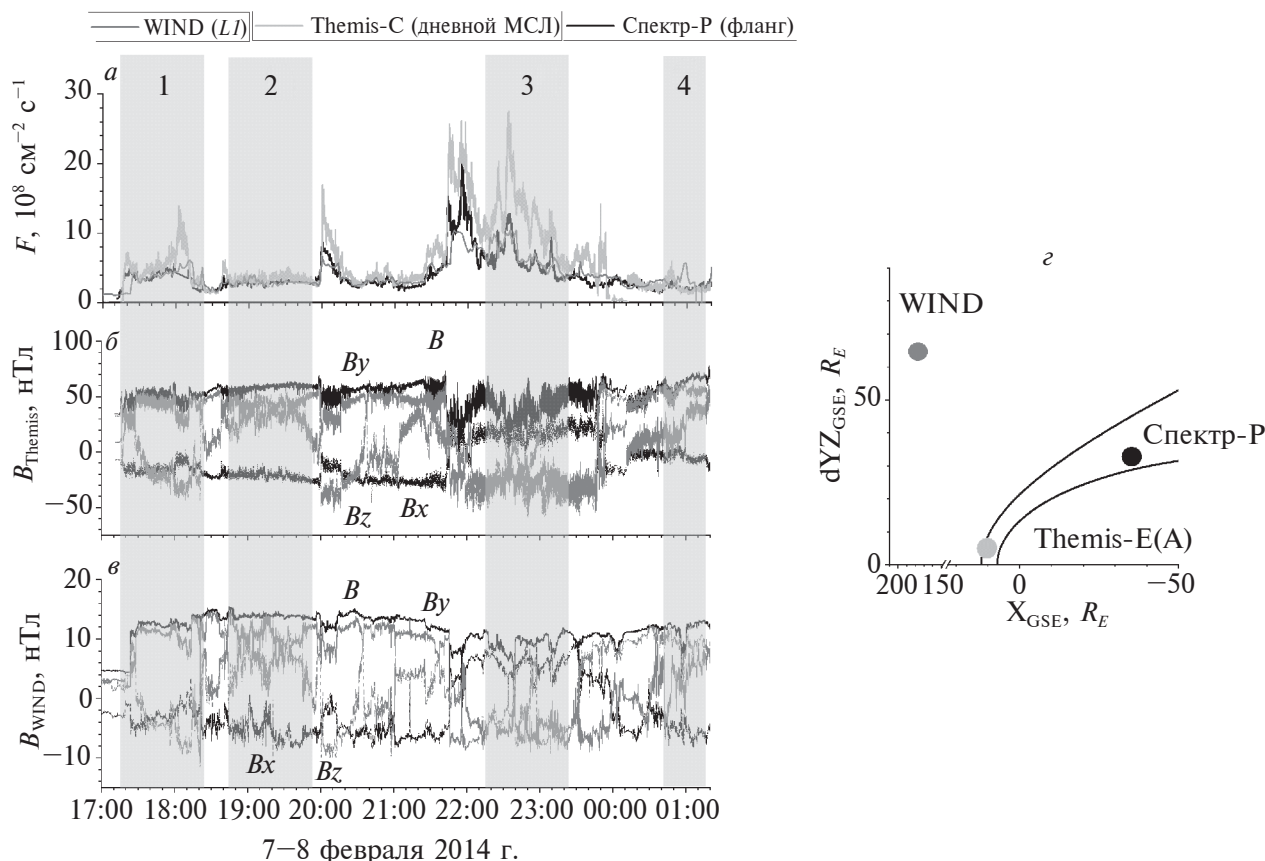


Рис. 3. Аналогично рис. 1 для события 7–8 февраля 2014 г., относящегося к области сжатия *Sheath*.

лах 1 и 3 как в СВ, так и в МСЛ наблюдаются существенные вариации плотности и повороты магнитного поля (сопровожаемые изменением знака B_z -компоненты), в интервалах 2 и 4, несмотря на наличие вариаций всех компонент магнитного поля, характерное для СВ такого типа, не наблюдается изменение знака B_z , а также отсутствуют существенные вариации плотности плазмы. В данном событии интервалы 1 и 3 рассматривались, как интервалы со среднемасштабными структурами, события 2 и 4 — как квазистационарные интервалы без структур.

Аналогично, на рис. 4 представлено событие 16 февраля 2014 г., в котором возможно провести анализ как для области *Sheath*, так и для ICME (магнитного облака, МС), перед которым эта область сформировалась. Интервалы 1 и 3 характеризуются отсутствием структур, интервалы 2 и 4 содержат среднемасштабные структуры. Как видно из рис. 4, временной сдвиг, обеспечивающий совпадение структур в области *Sheath*, приводит к расхождению магнитных структур в области МС (в 05:00–05:30 UT). Это происходит из-за различия в скорости распространения раз-

личных структур СВ. В данном случае для каждого из рассмотренных интервалов сдвиг между временными рядами данных уточнялся отдельно.

Аппроксимация полученных спектров проводилась аналогично случаю спокойного СВ. Характеристики спектров для всех рассмотренных интервалов приведены в табл. 1.

В табл. 1 указаны порядковый номер интервала, дата события, тип СВ и номер интервала на рисунке, наличие среднемасштабных структур внутри интервала, а также приведены значения наклонов спектров в трех областях околоземного пространства как на МГД, так и на кинетических масштабах. В ряде случаев определение наклона на МГД-масштабах невозможно из-за волновых процессов.

Как показывает сравнение наклонов спектров в разных локациях для возмущенного СВ, на МГД-масштабах, как правило, наблюдается сильная волновая активность в дневном МСЛ, мешающая определению скейлинга. Однако, для интервалов 4–7 характерно как сохранение скейлинга на МГД-масштабах при пересечении ОЗУВ,

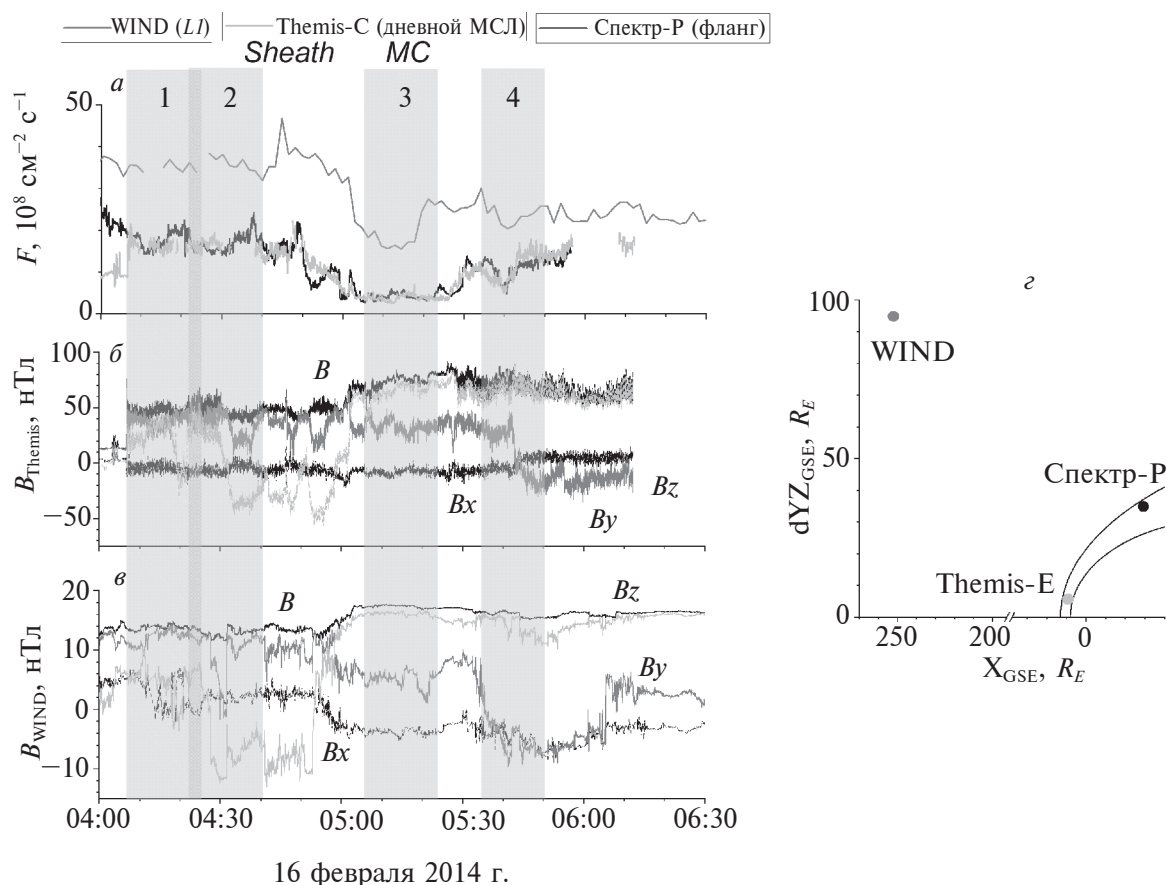


Рис. 4. Аналогично рис. 1 для события 16 февраля 2014 г., относящегося к ICME с областью сжатия *Sheath* перед ним.

так и существенное уплощение спектров, причем уплощение может наблюдаться как на фоне среднemasштабных структур, так и без них. Причем спектры за ОЗУВ характеризуются более существенным уплощением, чем для спокойного СВ. Аналогичные изменения на ОЗУВ были отмечены ранее для возмущенного СВ [Rakhmanova et al., 2022] и являются характерным изменением свойств турбулентности на ОЗУВ.

Для большинства событий на флангах наблюдаются Колмогоровские спектры на МГД-масштабах, что характерно для этой области. Для событий 8 и 11, однако, спектры остаются более плоскими, чем в СВ. Эти события наблюдаются как на фоне квази стационарного СВ, так и в присутствии среднemasштабных структур, т.е. указанные структуры не оказывают влияние на данный процесс.

На кинетических масштабах для большинства событий (кроме 6, 7) наблюдается укрупнение спектров за ОЗУВ вне зависимости от присутствия структур средних масштабов. При этом наиболее крутые спектры в дневном МСЛ (с наклонами до -4.8) наблюдаются в периоды самого

ICME, что хорошо согласуется с прошлыми результатами [Rakhmanova et al., 2022]. Для событий 6 и 7, наблюдаемых в периоды взаимодействия с МСЛ областей сжатия *Sheath*, наблюдаются нетипично крутые спектры в СВ и их уплощение в дневном МСЛ. Интересно, что интервалы 6 и 7 характеризуются наличием и отсутствием структур средних масштабов, соответственно. То есть процессы, ответственные за изменение спектра на ОЗУВ, и в данном случае не связаны с среднemasштабными структурами.

На флангах МСЛ на кинетических масштабах, как правило, формируются спектры с наклонами $-(2.6-3.2)$, характерные для турбулентности МСЛ. При этом не наблюдается связи между значениями наклонов в СВ и на фланге и присутствием среднemasштабных структур. Однако, особенности в спектрах наблюдаются в рассмотренных выше событиях 6 и 7: для них характерно уплощение спектров на флангах до значений $-(2.0-2.2)$. Такое свойство областей компрессии (*Shearh* и *CIR*) отмечалось ранее [Rakhmanova et al., 2022], и, как видно из данных табл. 1, не связано с присутствием структур средних масштабов.

Таблица 1. Наклоны спектров в трех областях околоземного пространства для рассмотренных событий

№	Дата, время	Тип, № интервала	Структуры	Наклон МГД			Наклон кинет.		
				СВ	Дн. МСЛ	Фланг	СВ	Дн. МСЛ	Фланг
1	09.07.14 г., 17:48 UT	<i>Slow</i> , 1	+	-1.7 ± 0.2	-1.0 ± 0.3	—	-2.7 ± 0.1	-2.6 ± 0.1	-2.1 ± 0.3
2	09.07.14 г., 18:13 UT	<i>Slow</i> , 2	—	-1.8 ± 0.2	—	—	-2.3 ± 0.1	-2.0 ± 0.1	-1.7 ± 0.2
3	09.07.14 г., 18:40 UT	<i>Slow</i> , 3	+	-1.6 ± 0.1	-1.2 ± 0.3	-0.8 ± 0.1	-2.3 ± 0.1	-2.3 ± 0.1	-2.4 ± 0.2
4	07.02.14 г., 17:18 UT	<i>Sheath</i> , 1	+	-1.8 ± 0.1	-2 ± 0.3	-1.6 ± 0.1	-2.5 ± 0.1	-3.5 ± 0.1	-3.0 ± 0.1
5	07.02.14 г., 18:45 UT	<i>Sheath</i> , 2	—	-1.6 ± 0.2	-0.6 ± 0.2	-1.5 ± 0.1	-3.2 ± 0.1	-3.5 ± 0.2	-2.8 ± 0.1
6	07.02.14 г., 22:14 UT	<i>Sheath</i> , 3	+	-1.9 ± 0.1	-0.5 ± 0.2	-1.6 ± 0.1	-4.2 ± 0.2	-3.0 ± 0.2	-2.0 ± 0.1
7	08.02.14 г., 00:40	<i>Sheath</i> , 4	—	-1.9 ± 0.1	—	-1.7 ± 0.1	-3.5 ± 0.2	-3.2 ± 0.2	-2.2 ± 0.1
8	16.02.14 г., 04:08 UT	<i>Sheath</i> , 1	—	-1.8 ± 0.1	—	-1.4 ± 0.1	-2.6 ± 0.2	-3.0 ± 0.2	-3.2 ± 0.2
9	16.02.14 г., 04:22 UT	<i>Sheath</i> , 2	+	-1.6 ± 0.1	—	-1.7 ± 0.1	-2.9 ± 0.2	-3.4 ± 0.2	-2.6 ± 0.2
10	16.02.14 г., 05:06 UT	MC, 3	—	-1.9 ± 0.2	—	-1.7 ± 0.1	-2.3 ± 0.1	-4.1 ± 0.2	-2.8 ± 0.1
11	16.02.14 г., 05:35 UT	MC, 4	+	-1.8 ± 0.2	—	-1.3 ± 0.1	-2.2 ± 0.1	-4.8 ± 0.3	-2.6 ± 0.1

Следует отметить, что для рассматриваемых событий в периоды спокойного СВ на фланге анализировались спектры флуктуаций потока ионов, а в периоды возмущенного СВ на фланге рассматривались флуктуации модуля магнитного поля. Однако наклоны спектров, полученные для потока ионов, хорошо согласуются с полученными ранее для флуктуаций модуля магнитного поля в этой же области [Rakhmanova et al., 2022] также для спокойных условий в СВ. Кроме того, сравнение спектров флуктуаций потока ионов и модуля магнитного поля на фланге (на разном удалении в сторону хвоста магнитосферы) со спутников Спектр-Р и THEMIS имеют одинаковый скейлинг. Несмотря на различие измеряемых параметров сжимаемые флуктуации демонстрируют одинаковый скейлинг, так что можно заключить, что выявленные в данной работе различия для спокойного

и возмущенного СВ обусловлены особенностями развития сжимаемой компоненты турбулентного каскада при различных условиях в СВ, а не разницей рассматриваемых параметров.

Таким образом, в периоды возмущенного солнечного ветра основные изменения в турбулентном каскаде (такие, как уплотнение на МГД-масштабах и значительное укрупнение на кинетических масштабах) определяются крупномасштабным типом СВ и не зависят от динамики структур внутри крупномасштабного возмущения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе сопоставления одновременных измерений в трех точках околоземного пространства — в СВ, в дневном МСЛ и на фланге МСЛ — проанализировано, как может влиять

присутствие структур средних масштабов (вариаций, регистрируемых спутником за времена ~10 мин) на динамику турбулентного каскада за ОЗУВ. Показано, что:

– В периоды невозмущенного медленного СВ при отсутствии структур средних масштабов динамика турбулентного каскада в МСЛ определяется волновыми процессами, возникающими за ОЗУВ.

– В периоды невозмущенного медленного СВ в присутствии среднемасштабных структур за ОЗУВ наблюдаются наклоны спектров на МГД-масштабах, близкие к -1, что может быть связано с нарушением условий развитой турбулентности и отсутствием инерционной области в турбулентном каскаде; восстановления спектров, характерных для развитой турбулентности, на флангах МСЛ не происходит.

– В периоды спокойного медленного СВ характеристики турбулентности на кинетических масштабах не изменяются при входе плазмы в МСЛ и распространении к флангам, что свидетельствует об универсальности процессов диссипации энергии перед и за ОЗУВ; в ряде случаев может наблюдаться уплощение спектров при распространении плазмы к флангам, вызванное, вероятно, локальными неустойчивостями.

– Присутствие среднемасштабных структур на фоне крупномасштабных возмущений в СВ не оказывает влияния на модификацию характеристик турбулентности на ОЗУВ: все изменения – отсутствие Колмогоровского скейлинга на МГД-масштабах и укрупнение спектров на кинетических масштабах в дневном МСЛ и восстановление формы, близкой к наблюдаемой в СВ, на флангах – соответствуют представленной ранее статистике как в присутствии, так и в отсутствии структур средних масштабов.

Таким образом, показано, что основной вклад в развитие турбулентного каскада на ОЗУВ вносят крупномасштабные возмущения в солнечном ветре. Динамика структур меньших масштабов (порядка 10 мин) может иметь влияние на турбулентность за ОЗУВ на фоне спокойных условий в солнечном ветре.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00227, <https://rscf.ru/project/22-12-00227/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений сол-

нечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009.

– Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. Т. 51. № 2. С. 88–99. 2013.

– Пулинец М.С., Рязанцева М.О., Антонова Е.Е., Курпичев И.П. Зависимость параметров магнитного поля вблизи подсолнечной точки магнитосферы от межпланетного магнитного поля по данным эксперимента THEMIS // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 6. С. 769–778. 2012.

– Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Веригин М.И., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Влияние параметров межпланетной среды и границ магнитослоя на величину коэффициента корреляции между потоком ионов в солнечном ветре и магнитослое // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 4. С. 463–470. 2018.

– Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Чесалин Л.С. Влияние характеристик турбулентности плазмы солнечного ветра на свойства турбулентного каскада в магнитослое // Космические исслед. Т. 57. № 6. С. 1–8. 2019.

– Alexandrova O., Lacombe C., Mangeney A., Grappin R., Maksimovic M. Solar wind turbulent spectrum at plasma kinetic scales // *Astrophys. J.* V. 760. № 2. P. 121–126. 2012. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/2/121>

– Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorriso-Valvo L., Horbury T.S., Bale S.D. Solar Wind Turbulence and the Role of Ion Instabilities // *Space Sci. Rev.* V. 178. P. 101–139. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-0004-8>

– Anderson B.J., Fuselier S.A., Gary S.P., Denton R.E. Magnetic spectral signatures in the Earth's magnetosheath and plasmadepletion layer // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 5877–5891. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02827>

– Angelopoulos V. The THEMIS mission // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 5–34. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9336-1>

– Auster H.U., Glassmeier K.H., Magnes W., et al. The THEMIS Fluxgate Magnetometer // *Space Sci. Rev.* V. 141. № 1–4. P. 235–264. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9365-9>

– Blum L.W., Koval A., Richardson I.G., Wilson L.B., Malaspina D., Greeley A., Jaynes A.N. Prompt response of the dayside magnetosphere to discrete structures within the sheath region of a coronal mass ejection // *Geophysical Research Letters.* V. 48. e2021GL092700. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021GL092700>

– Boldyrev S., Perez J. C. Spectrum of Kinetic Alfvén Turbulence // *Astrophys. J. Lett.* V. 758. № 2. L44. 2012. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/758/2/L44>

– Borodkova N., Zastenker G., Riazantseva M., Richardson J. Large and sharp solar wind dynamic pressure variations as a source of geomagnetic field disturbances at the geosynchronous orbit // *Planet. Space Sci.* V. 53. P. 25–32. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.025>

- Breuillard H., Matteini L., Argall M. R., et al. New Insights into the Nature of Turbulence in the Earth's Magnetosheath Using Magnetospheric Multi Scale Mission Data // *Astrophys. J.* V. 859. 127. 2018. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabae8>
- Breuillard H., Yordanova E., Vaivads A., Alexandrova O. The effects of kinetic instabilities on small-scale turbulence in Earth's magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 829. 54. 2016. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/54>
- Bruno R., Carbone V., Vörös Z., et al. Coordinated Study on Solar Wind Turbulence During the Venus-Express, ACE and Ulysses Alignment of August 2007 // *Earth Moon Planets.* V. 104. P. 101–104. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11038-008-9272-9>
- Bruno R., Carbone V. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory // *Living Rev. Sol. Phys.* V. 10. № 2. 2013. <https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2>
- Chen C.H.K. Recent progress in astrophysical plasma turbulence from solar wind observations. // *J. Plasma Phys.* V. 82. 535820602. 2016. <https://doi.org/10.1017/S0022377816001124>
- Chen C.H.K., Boldyrev S. Nature of Kinetic Scale Turbulence in the Earth's Magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 842. P. 122–131. 2017. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa74e0>
- Czapkowska A., Bauer T.M., Treumann R.A., and Baumjohann W. Magnetic field fluctuations across the Earth's bow shock // *Ann. Geophys.* V. 19. P. 275–287. 2001. <https://doi.org/10.5194/angeo-19-275-2001>
- Dmitriev A.V., Lalchand B., Ghosh S. Mechanisms and Evolution of Geoeffective Large-Scale Plasma Jets in the Magnetosheath // *Universe.* V. 7. 152. <https://doi.org/10.3390/universe7050152>
- Huang S.Y., Hadid L.Z., Sahraoui F., Yuan Z.G., Deng X.H. On the Existence of the Kolmogorov Inertial Range in the Terrestrial Magnetosheath Turbulence // *Astrophys. J. Lett.* V. 836. L10. 2017. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/836/1/L10>
- Lacombe C., Belmont G. Waves in the Earth's magnetosheath: Observations and interpretations // *Adv. Sp. Res.* V. 15. P. 329–340. 1995. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)00113-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)00113-F)
- LaMoury A.T., Hietala H., Plaschke F., Vuorinen L., Eastwood J.P. Solar wind control of magnetosheath jet formation and propagation to the magnetopause. *J. Geophys. Res. Space Phys.* // V. 126. № 9. e2021JA029592. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021ja029592>
- Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F., et al. The WIND magnetic field investigation // *Space Sci. Rev.* V. 71. № 1–4. P. 207–229. 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00751330>
- Li H., Jiang W., Wang C., Verscharen D., Zeng C., Russell C.T., Giles B., Burch J.L. Evolution of the Earth's Magnetosheath Turbulence: A Statistical Study Based on MMS Observations // *Astrophys. J.* V. 898. L43. 2020. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba531>
- Lin R.P., Anderson K.A., Ashford S., et al. Three-Dimensional Plasma and Energetic Particle Investigation for the Wind Spacecraft // *Space Sci. Rev.* V. 71. P. 125–153. 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00751328>
- McFadden J.P., Carlson C.W., Larson D., Ludlam M., Abiad R., Elliott B., Turin P., Marckwordt M., Angelopoulos V. The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration // *Space Sci. Rev.* V. 141. P. 277–302. 2008. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9440-2>
- Němeček Z., Šafránková J., Zastenker G. N., Pišoft P., Paularena K.I., and Richardson J.D. Observations of the radial magnetosheath profile and a comparison with gasdynamic model 1024 predictions // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. P. 2801–2804. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000GL000063>
- Ogilvie K.W., Chornay D.J., Fritzenreiter R.J., et al. SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft // *Space Sci. Rev.* V. 71. № 1–4. P. 55–77. 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00751326>
- Pitňa A., Šafránková J., Němeček Z., Goncharov O., Němec F., Přech L., Chen C.H.K., Zastenker G. Density fluctuations upstream and downstream of interplanetary shocks // *Astrophys. J.* V. 819. 41–50. 2016. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/819/1/41>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Yermolaev Y., and Lodkina I. Dynamics of Plasma Turbulence at Earth's Bow Shock and through the Magnetosheath // *Astrophys. J.* V. 901. № 30. P. 30–40. 2020. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abae00>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., and Yermolaev Y. Large-Scale Solar Wind Phenomena Affecting the Turbulent Cascade Evolution behind the Quasi-Perpendicular Bow Shock // *Universe.* V. 8. № 12. P. 611. 2022. <https://doi.org/10.3390/universe8120611>
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Verigin M. Kinetic-Scale Ion Flux Fluctuations Behind the Quasi-Parallel and Quasi-Perpendicular Bow Shock. // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* V. 123. P. 5300–5314. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025179>
- Šafránková J., Hayosh M., Gutinska O., Němeček Z., Přech L. Reliability of prediction of the magnetosheath Bz component from the interplanetary magnetic field observations // *J. Geophys. Res.* V. 114. A12213. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014552>
- Šafránková J., Němeček Z., Přech L., et al. Fast solar wind monitor (BMSW): description and first results // *Space Sci. Rev.* V. 175. P. 165–182. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
- Schekochihin A.A., Cowley S., Dorland W., Hammett G., Howes G.G., Quataert E., Tatsuno T. Astrophysical gyrokinetics: kinetic and fluid turbulent cascades in magnetized weakly collisional plasmas // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* V. 182. P. 310–377. 2009. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/182/1/310>
- Schwartz S.J., Burgess D., Moses J.J. Low-frequency waves in the Earth's magnetosheath: present status // *Ann. Geophys.* V. 14. P. 1134–1150. 1996. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-1134-z>

- Shevyrev N.N., Zastenker G.N., Nozdachev M.N., Němeček Z., Šafránková J., and Richardson J.D. High and low frequency large amplitude variations of plasma and magnetic field in the magnetosheath: radial profile and some features // *Adv. Space Res.* V. 31. P. 1389–1394. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00008-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00008-5)
- Shevyrev N.N., Zastenker G.N. Some features of the plasma flow in the magnetosheath behind quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shocks // *Planet. Space Sci.* V. 53. P. 95–102. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.033>
- Smith C., Hamilton K., Vasquez B., Leamon R. Dependence of the dissipation range spectrum of interplanetary magnetic fluctuations on the rate of energy cascade // *Astrophys. J.* V. 645: L85–L88. 2006. <https://doi.org/10.1086/506151>
- Tsurutani B.T., Lakhina G.S., Verkhoglyadova O.P., Gonzalez W.D., Echer E., Guarnieri F.L. A review of interplanetary discontinuities and their geomagnetic effects // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V. 73. № 1. P. 5–19. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.04.001>
- Turc L., Fontaine D., Escoubet C.P., Kilpua E.K.J., Dimmock A.P. Statistical study of the alteration of the magnetic structure of magnetic clouds in the Earth's magnetosheath // *J. Geophys. Res. Sp. Phys.* V. 122. № 3. P. 2956–2972. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016JA023654>
- Verigin M.I., Tatrallyay M., Erdős G., Kotova G.A. Magnetosheath — Interplanetary medium reference frame: Application for a statistical study of mirror type waves in the terrestrial plasma environment // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 515–521. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.03.042>
- Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. Geoeffectiveness and efficiency of CIR, sheath, and ICME in generation of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 117. A00L07. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JA017139>

Role of Middle-Scale Solar Wind Structures in the Turbulence Development Behind the Bow Shock

L. S. Rakhmanova^{1,*}, M. O. Riazantseva^{1,**}, A. A. Khokhlachev^{1,***}, Yu. I. Yermolaev^{1,****},
G. N. Zastenker^{1,*****}

¹*Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: rakhlud@gmail.com

**e-mail: orearm@gmail.com

***e-mail: aleks.xaa@yandex.ru

****e-mail: yermol@iki.rssi.ru

*****e-mail: gzastenk@iki.rssi.ru

Present study estimates contribution of the middle-scale solar wind structures (variations which are registered by a spacecraft during ~10 min intervals) in the turbulence development in the transition region behind the bow shock. The analysis is based on simultaneous measurements of plasma and/or magnetic field parameters in the solar wind, in the dayside magnetosheath and at the flanks. The study adopts measurements by Wind, THEMIS and Spektr-R spacecraft. Properties of magnetic field and ion flux fluctuation spectra are analyzed in the frequency range 0.01–4 Hz, which corresponds to transition from MHD to kinetic scales. The dynamics of turbulence properties in the magnetosheath is governed by large-scale disturbances while structures with smaller scales have effect during absence of large-scale structures.

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

УДК 537.591.5

ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ ПРОТОНОВ ИЗ ВНУТРЕННЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ОКЕАНИИ

© 2025 г. Е. А. Гинзбург^{1, *}, М. Д. Зинкина^{1, **}, Ю. В. Писанко^{1, 2, ***}

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета (ИПГ Росгидромета), Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

Долгопрудный (Московская обл.), Россия

*e-mail: e_ginzburg@mail.ru

**e-mail: marinaantipina20@mail.ru

***e-mail: pisanko@ipg.geospace.ru

Поступила в редакцию 30.01.2024 г.

После доработки 10.04.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Зафиксированы события индуцированных высыпаний протонов из внутреннего радиационного пояса, сопровождавшие примерно половину (11) из 25 аномальных электронных высыпаний, зарегистрированных с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” в 2014–2022 гг. в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях. Предполагается, что такие события могли бы быть спровоцированы попаданием протонов в циклотронный резонанс с низкочастотным излучением, стимулированным в ионосфере плавучим нагревным стендом. Также обсуждаются наблюдаемые эффекты в аномальных электронных высыпаниях, которые можно интерпретировать в рамках концепции плавучего нагревного стенда.

Ключевые слова: внутренний радиационный пояс, протонные и электронные высыпания, плавучий нагревный стенд

DOI: 10.31857/S0016794025010052, **EDN:** AENIQH

1. ВВЕДЕНИЕ

Внутренний радиационный пояс заполнен, в том числе, и энергичными протонами. Он относительно стабилен – среднее время пребывания там таких протонов ~10 лет. Развита теоретическая [Selesnik et al., 2007] и эмпирическая (по данным наблюдений спутников Van-Allen Probes) [Selesnik et al., 2018] модели протонного радиационного пояса.

Тем не менее, время от времени отмечаются протонные высыпания из этого пояса. Низкоширотные зоны протонных высыпаний в энергиях (0.58–35) МэВ наблюдались с борта спутника OHZORA [Nagata et al., 1988]. Сообщалось [Biryakov et al., 1996] о высыпаниях протонов с энергиями до нескольких МэВ из внутреннего радиационного пояса, наблюдавшихся на орбите космической станции “Мир” (~400 км) вблизи экватора. Существование вблизи геомагнитного экватора потоков высыпавшихся протонов с энергиями более 30 МэВ регистрировали из-

мерения с борта ИСЗ “CORONAS-I” [Bashkirev et al., 1999]. Были измерены [Petrov et al., 2008] и смоделированы [Petrov et al., 2009] спектры высыпавшихся протонов с энергиями до 10 МэВ вблизи геомагнитного экватора ($L < 1.15$) на низких (<1000 км) орбитах.

Сильная магнитная буря ноября 2003 г. привела к почти полному высыпанию протонов с энергиями 27–45 МэВ из внутреннего радиационного пояса [Selesnik et al., 2013]: пояс практически опустел. Кроме сильных магнитных бурь в качестве возможной причины событий наблюдаемых высыпаний протонов из внутреннего радиационного пояса обсуждалось [Shao et al., 2009] и выходящее в космос излучение наземных радиопередатчиков.

По данным наблюдений с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” выявлено 25 аномальных возрастных потоков электронов [Гинзбург и др., 2023]. Эти редкие события зарегистрированы в 2014–2022 гг. в Океании в низких широтах, в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных

условиях в энергиях от ~ 100 кэВ до нескольких МэВ. Предполагается, что наблюдались высыпания электронов из внутреннего радиационного пояса: при баунс-колебаниях электроны попадали в циклотронный резонанс с радиоизлучением, инициированным наземными и/или судовыми передатчиками в утренние часы местного времени.

Цель настоящего сообщения – поиск индуцированных высыпаний протонов (20–45 МэВ) из внутреннего радиационного пояса во время вышеназванных 25 электронных событий и возможной взаимосвязи этих протонных и электронных явлений.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРОТОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ

Метеорологический спутник РФ “Метеор-М № 2” запущен 8.07.2014 г. Орбита – солнечно-синхронная, высота в восходящем узле $h = 832$ км, наклонение $i \sim 98.8^\circ$, период обращения $T = 101.3$ мин. Ориентация спутника – трехосная, ось X – по вектору скорости, ось Z – от центра Земли к спутнику, в сторону открытого космоса.

Регистрирующая потоки заряженных частиц аппаратура спутника включала в себя приборы ГАЛС (разработан в ИПГ) и СКЛ (разработан в НИИЯФ МГУ). Прибор ГАЛС имел в своем составе счетчик Черенкова (канал СЧ, угол регистрации 4л) и два газоразрядных счетчика Гейгера (каналы СГ1 и СГ2, углы регистрации 2л). Прибор СКЛ имел в своем составе две телескопические сборки ДАС1. Каждая сборка состояла из полупроводникового (кремниевого) детектора и расположенного за ним на одной продольной оси сцинтилляционного детектора (CsI). В табл. 1

Таблица 1. Энергетические интервалы каналов приборов ГАЛС и СКЛ

Прибор	Канал	Диапазон энергий, МэВ	
		протоны	электроны
ГАЛС			
	СЧ	>600	>8
	СГ1	>15	>0.8
	СГ2	>25	>2.1
СКЛ, ДАС1		протоны	
	Д3	10–160	
	Д4	20–45	

представлены расчетные энергетические характеристики протонных каналов Д3 и Д4, логика которых строилась на одновременных показаниях полупроводникового и сцинтилляционного детекторов; отделение сигналов протонов от сигналов электронов в каналах Д3 и Д4 осуществлялось на основе совпадений и антисовпадений электрических импульсов с обоих детекторов с величиной, пропорциональной выделяемой в них энергии пролетающей частицей. Угловые размеры поля регистрации ДАС – 30° .

Сборки установлены в двух взаимно перпендикулярных направлениях – по оси X и по оси Z . В этой же табл. 1 представлены и энергетические характеристики каналов прибора ГАЛС. Частота опроса всех каналов – 1 с, время накопления – 1 с. В дальнейшем для улучшения статистики (особенно статистики малых потоков) в работе использовались накопленные за 6 с показания. В случае маленьких потоков они использовались непосредственно в виде количества зарегистрированных за 6 с частиц. В случае достаточно больших потоков использовались значения, выраженные в единицах интенсивностей.

В Океании траектория ИСЗ “Метеор-М №2” пролегает почти в направлении геомагнитного поля. Поэтому в качестве наиболее подходящего для исследования индуцированных высыпаний протонов в наблюдавшихся 25 электронных событиях вблизи экватора мы выбрали телескоп ДАС1, установленный по оси X (по вектору скорости). Как и любой сцинтиллятор, CsI чувствителен не только к протонам, но и к электронам. Поток электронов с энергиями более 10 МэВ во внутреннем радиационном поясе очень невелик, а с энергиями более 20 МэВ – исчезающе мал. Поэтому в канале Д4, чувствительном к энергиям 20–45 МэВ, регистрируются только протоны. Канал же Д3 воспринимает, вообще говоря, и электроны с энергией более 10 МэВ.

Для исследования протонных высыпаний мы использовали канал Д4, собрав в одну выборку показания этого канала, зарегистрированные во всех 25 рассматриваемых событиях; общий объем выборки составляет 2578 точек, каждая из которых соответствует количеству протонов, зарегистрированных в канале Д4 в течение 6 с.

На рис. 1 приведена относительная частота встречаемости, построенная по этой выборке. Видно, что почти 90% времени датчик “молчал” – протоны в канале не регистрировались, что связано как с местом наблюдения событий (на противоположной от Южно-Атлантической аномалии стороне Земли, где магнитное поле повышено), так и со спокойными геомагнитными

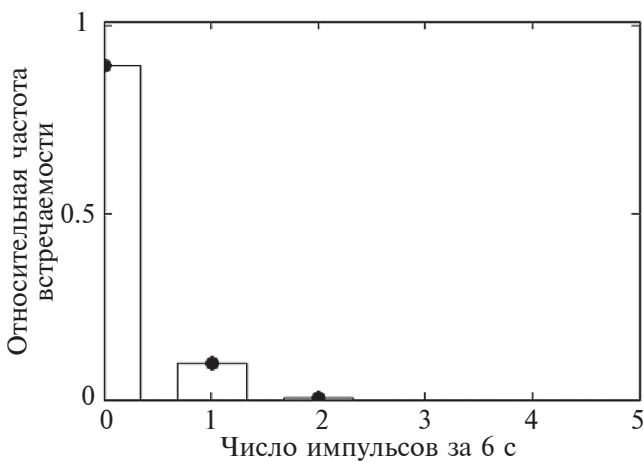


Рис. 1. Относительная частота встречаемости протонов в канале Д4, зарегистрированных в 25 аномальных событиях.

условиями, когда были зафиксированы все события. Форма относительной частоты встречаемости позволяет предположить экспоненциальное распределение скоростей счета, а максимальная зарегистрированная скорость счета (2 протона / 6 с) — оценить параметр экспоненциального распределения λ из условия, что вероятность того, что скорость счета не превысит этого максимума, составляет не менее 0.99995; это дает $\lambda \approx 5$. При экспоненциальном распределении вероятность появления следующего события не возрастает и не убывает с течением времени, отсчитываемого с момента регистрации предыдущего события. Это оправдывает использование такого распределения при описании случайного появления протонов на орбите ИСЗ “Метеор-М № 2” как при распаде нейтронов альbedo, так и в результате редких протонных кулоновских столкновений во внутреннем радиационном поясе.

Мы провели проверку нашей статистической выборки на наличие выбросов с использованием одностороннего порога, предложенного Dovoedo [2011] для экспоненциального распределения в виде: $UF = Q_{50} + K(n)(Q_{75} - Q_{50})$, где UF (upper fence) — порог, $Q_{50} = \ln 2 / \lambda$ — второй квантиль (медиана), $Q_{75} = \ln 4 / \lambda = 2Q_{50}$ — третий квантиль, $K(n)$ — коэффициент, зависящий от объема выборки. Следуя Dovoedo [2011], для нашей выборки мы приняли $K(2578) = 13.212$, так что $UF = \ln 2 / 5 + 13.212 (2 \ln 2 / 5 - \ln 2 / 5) = (1 + 13.212) \ln 2 / 5 = 14.212 \times 0.13869 = 1.97$, и каждое превышение этого порога в данных наблюдений мы считали выбросом. Значения коэффициентов $K(n)$ затабулированы Dovoedo [2011] путем проведения численных экспериментов с заданным в аналитическом виде (с участием,

в том числе, неполной бета-функции) выражением для вероятности того, что одно (или несколько) значений из выборки экспоненциального распределения неверно классифицируются как выбросы.

В табл. 2 собраны 11 из 25 событий, рассмотренных в работе [Гинзбург и др., 2023], в каждом из которых наблюдался, по крайней мере, один выброс, т.е. когда в канале Д4 в течение 6 с регистрировалось 2 или более протонов.

Оказалось, что в 11 событиях, где отмечены выбросы, протоны в канале Д4 регистрируются гораздо чаще, чем в событиях, где выбросы отмечены не были. На рис. 2 в качестве примеров приведены показания канала Д4 в событии 15.08.2016 г. — одном из 11 событий (левая половина рис. 2), где наблюдались выбросы, и (для сравнения) показания канала Д4 в одном (22.11.2019 г.) из остальных 14 событий (правая половина рис. 2), где выбросы не наблюдались. Показания черенковского счетчика приняты признаком событий.

Видно, что на левом из рис. 2 в канале Д4 наблюдалось существенно больше импульсов, в том числе естественно, и импульсы, классифицированные как выбросы из экспоненциального распределения. Это может свидетельствовать в пользу того, что помимо распада нейтронов альbedo и кулоновских столкновений протонов во вну-

Таблица 2. События, в каждом из которых наблюдался, по крайней мере, один выброс в показаниях канала Д4

Дата события	Число выбросов	$L_{\text{начало}}$	$L_{\text{конец}}$
13.08.2015	1	1.14	1.14
11.06.2016	1	1.15	1.98
15.08.2016	2	1.42	1.1
30.09.2016	1	1.19	2.02
07.09.2017	2	1.83	1.18
27.12.2019	2	2.94	1.27
11.02.2020	1	1.09	1.25
02.03.2020	1	1.14	1.1
18.01.2021	1	1.22	1.09
24.05.2021	1	1.08	1.22
18.06.2021	2	1.14	1.17

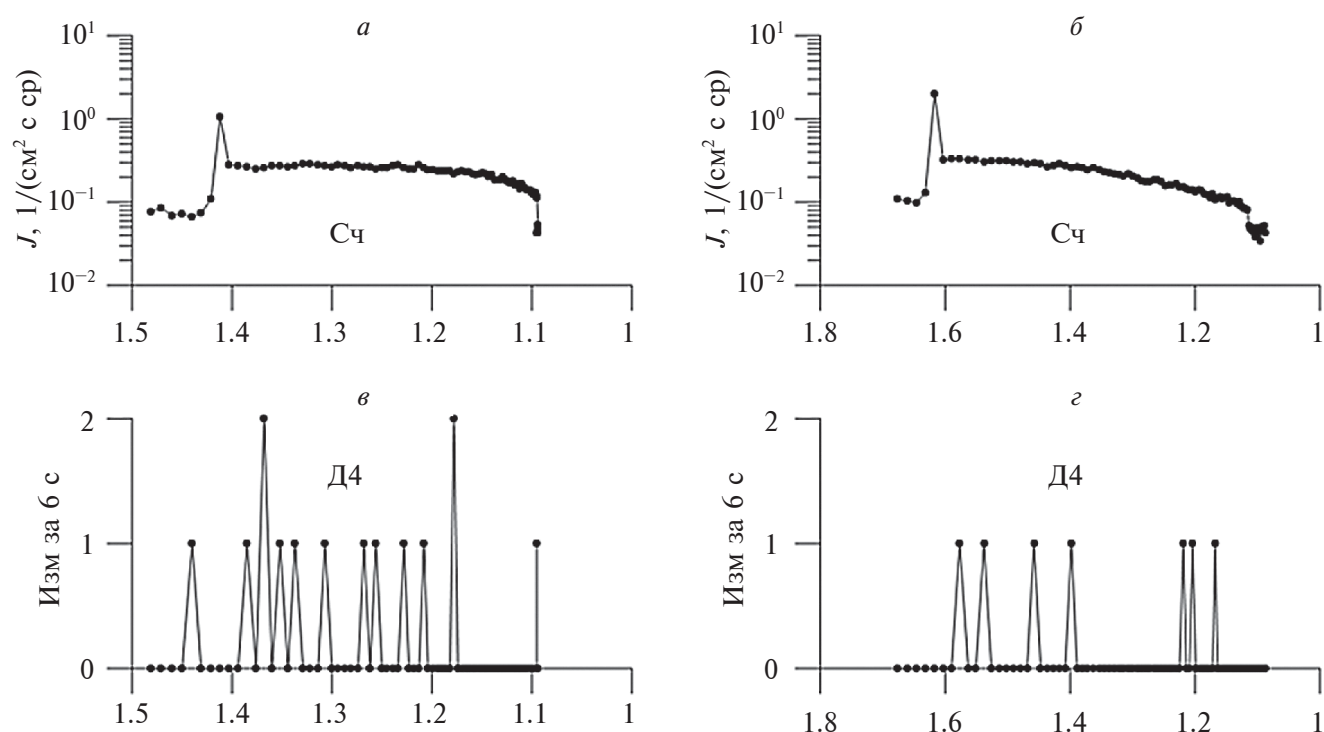


Рис. 2. Примеры событий, когда в показаниях канала Д4 наблюдались выбросы протонов (15.08.2016 г., 20:59:27–21:07:27 UT) (графики (а) и (в)) и когда выбросы не наблюдались (22.11.2019 г., 20:59:45–21:07:03 UT) (графики (б) и (г)). По оси абсцисс на всех графиках отложено значение параметра Мак-Илвейна (L) вдоль траектории ИСЗ “Метеор-М № 2”, по осям ординат на верхних графиках интенсивности потоков, на нижних – число протонов, зарегистрированное в канале Д4 за 6 с. Графики (а) и (б) – это показания черенковского счетчика, принятые в качестве признака события.

треннем поясе, уже учтенных в рамках экспоненциального распределения, более частому появлению протонов на орбите ИСЗ “Метеор-М № 2” в событиях, где отмечены выбросы, способствовало еще что-то.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Протоны с энергиями (20–45) МэВ – нерелятивистские. В Океании, где были зарегистрированы события, напряженность магнитного поля на орбите ИСЗ “Метеор-М № 2” варьируется от 0.25 до 0.29 Гс, что соответствует вариации протонной циклотронной частоты от 381.2 до 442.1 Гц.

Если считать причиной выбросов в канале Д4 циклотронный резонанс протонов, пребывающих вблизи зеркальной точки отражения, с электромагнитными волнами, излучаемыми на частотах ~ 400 Гц, и принять во внимание, что в утренние часы местного времени (~ 8 утра), когда были зарегистрированы все 11 событий, прохождение во внутреннем радиационном поясе сигналов наземных передатчиков с частотами ~ 400 Гц блокируется ионосферой [Meredith et al., 2019], то сле-

дует заключить, что единственный тип наземного и/или судового передатчика, способный местным утром спровоцировать выбросы протонов – это нагревный стэнд, работающий на несущей частоте 5–7 МГц (близкой к критической частоте слоя $F2$ в это время), модулируемой, в частности, частотой ~ 400 Гц. При этом источником радиоволн с частотой ~ 400 Гц во внутреннем радиационном поясе является диамагнитный ток, развивающийся в слое $F2$ ионосферы по границам зоны нагрева, сила которого осциллирует на частоте модуляции ~ 400 Гц.

При широком спектре модуляции осциллирующий ток, возникающий по границам зоны нагрева в слое $F2$ ионосферы, может порождать во внутреннем радиационном поясе волны разных частот. Они способны за счет циклотронного резонанса спровоцировать там не только протонные высыпания, но иpitch-угловую диффузию электронов в конус потерь при баунс-колебаниях. Ларморовский радиус электронов пояса не превосходит нескольких километров, а длина трассы баунс-колебаний таких электронов между точка-

ми отражения вдоль геомагнитной силовой линии составляет тысячи километров, что позволяет геометрически ограничиться приближением ведущего центра. Наименьшая энергия регистрируемых в событиях электронов ~ 100 кэВ предполагает релятивистское рассмотрение. Поскольку частота волны меньше электронной циклотронной частоты (~ 1 МГц), то в резонанс попадают электроны пояса, которые при баунс-колебаниях приближаются к ионосферной области нагрева. В этом случае условие циклотронного резонанса записывается в виде:

$$\frac{eB}{m2\pi}(1-\beta^2)^{1/2} = \Omega(1+\beta\cos\alpha)(1-\beta^2)^{-1/2}.$$

Здесь e — элементарный электрический заряд; m — масса покоя электрона; B — величина геомагнитного поля в точке взаимодействия волны и электрона; α — угол между направлением распространения волны и направлением движения ведущего центра электрона; Ω — частота волны; $\beta = v/c$, v — скорость электрона; c — скорость света. В левой части уравнения (1) записана циклотронная частота электрона (с учетом релятивистского увеличения его массы), а в правой части — частота электромагнитной волны, сдвинутая в соответствии с релятивистским эффектом Доплера (с учетом того, что электрон движется навстречу волне).

Переписывая (1) в виде:

$$\beta^2 + \frac{2\pi m\Omega}{eB}\beta\cos\alpha - 1 + \frac{2\pi m\Omega}{eB} = 0,$$

$$\beta_{1,2} = -\frac{\pi m\Omega}{eB}\cos\alpha \pm \left[\left(\frac{\pi m\Omega}{eB}\cos\alpha \right)^2 + 1 - \frac{2\pi m\Omega}{eB} \right]^{1/2},$$

и учитывая, что $\left(\frac{2\pi m\Omega}{eB}\right) \ll 1$, $0 < \beta < 1$, получаем:

$$\beta = 1 - \frac{\pi m\Omega}{eB}\cos\alpha,$$

$$\Omega = \frac{eB}{\pi m\cos\alpha}(1-\beta).$$

Отсюда следует, что для попадания в циклотронный резонанс электронов с энергией 8 МэВ и выше (черенковский счетчик СЧ) частота модуляции должна составлять ~ 3 кГц и ниже, для электронов с энергией 2.1 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ2) ~ 30 кГц и ниже, и для электронов с энергией 0.8 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ1) ~ 125 кГц и ниже. Это значит, что, помимо циклотронного резонанса электронов на субгармониках несущей частоты (5–7 МГц) [Гин-

збург и др., 2023], предполагаемого во всех 25 событиях, в 11 из 25 событий возможен также циклотронный резонанс на волнах, которые генерируются и на частотах модуляции. Если в каких-либо (из 11 выявленных) событиях несущая частота модулирована помимо ~ 400 Гц и килогерцовыми частотами, то задействуется дополнительный к резонансу на субгармониках механизм стимулирования электронных высыпаний. Следовательно, можно ожидать, что и среднее по этим 11 событиям значение потока высыпавшихся электронов окажется больше среднего по оставшимся 14 событиям значения потока таких электронов. Следует заметить, что в число этих 14 событий вошли 3 события, во время которых протонный канал Д4 отключался. Это события 25.03. 2019 г., 31.03. 2019 г. и 5.04. 2019 г. Мы подсчитали средние значения потоков, зарегистрированных черенковским счетчиком (СЧ) и двумя гейгеровскими счетчиками (СГ1, СГ2), отдельно по 11 событиям, в которых были отмечены выбросы, и по оставшимся 11 событиям (14–3), в которых выбросы отмечены не были. Соответствующие стандартные отклонения мы также подсчитали. Результаты приведены в табл. 3.

Из табл. 3 в каждом из трех каналов ГАЛС просматривается тенденция к повышению среднего по 11 событиям, в которых наблюдались выбросы, потока по сравнению со средним потоком по 11 событиям, в которых выбросы не наблюдались. Эта тенденция может указывать на присутствие среди модулирующих частот помимо сотен герц также единиц и десятков килогерц в том или ином из 11 выявленных событий, в которых наблюдались выбросы. Из табл. 3 видно также, что стандартные отклонения для двух из трех каналов ГАЛС (СГ2 и СЧ) оказались меньше средних значений, а выяснение причины больших стандартных отклонений по каналу СГ1 показало, что это — следствие колоколообразной формы профиля его показаний во время событий в отличие от почти прямоугольных профилей показаний СЧ и СГ2 (см. рис. 1 [Гинзбург и др., 2023]).

Местоположение известных наземных нагревных стенов [Streltsov et al., 2018] исключает их использование в Океании, где ИСЗ “Метеор-М № 2” зарегистрировал 25 аномальных событий высыпаний. В литературе [Papadopoulos, 2015; Esser et al., 2017, 2018; Eliasson and Papadopoulos, 2017, 2018] сообщалось о целесообразности создания мобильного нагревного стенда морского базирования, в том числе, для проведения исследований в районе геомагнитного экватора. Такой стенд мог бы нагревать слой $F2$ ионосферы. Диамагнитный ток на границах зоны нагрева спосо-

Таблица 3. Потоки в каналах прибора ГАЛС

Канал	Средний по 11 событиям поток (1/см ² с стер) (выбросы наблюдались)	Средний по 11 событиям поток (1/см ² с стер) (выбросы не наблюдались)
СГ1	53.58 ± 99.24	14.20 ± 33.25
СГ2	2.77 ± 1.78	2.06 ± 0.82
СЧ	0.26 ± 0.086	0.23 ± 0.07

бен (посредством генерируемого этим осциллирующим током магнитного звука) индуцировать вторичные (осциллирующие на той же частоте) токи в области E [Papadopoulos et al., 2011a, b; Eliasson et al., 2012, 2018; Sharma et al., 2016; Vartanyan et al., 2016; Eliasson and Papadopoulos, 2017]. При работе в районе геомагнитного экватора вторичные осциллирующие токи в E -области индуцируются непосредственно под зоной нагрева слоя $F2$ [Papadopoulos et al., 2011a; Eliasson et al., 2012; Wang et al., 2016; Eliasson and Papadopoulos, 2016]. Вторичные токи запитывают волновод Земля–ионосфера электромагнитными волнами на частоте модуляции, а также генерируют альвеновские волны той же частоты, которые выходят во внутренний радиационный пояс [Shao et al., 2009; Papadopoulos et al., 2011a, b; Eliasson et al., 2012; Wang et al., 2016; Gekelman et al., 2019]. Циклотронный резонанс с альвеновскими волнами на частотах десятки герц, возникающий при движении протонов внутреннего радиационного пояса вдоль геомагнитного поля в направлении зоны нагрева, приведет к их питч-угловой диффузии в конус потерь [Shao et al., 2009]. Возможно, этим резонансом объясняется колоколообразная форма профиля показаний канала СГ1, воспринимающего не только электроны с энергией более 0.8 МэВ, но и протоны с энергией более 15 МэВ (табл. 1), которых во внутреннем поясе примерно на порядок больше, чем протонов с энергией более 25 МэВ, регистрируемых в канале СГ2. Высыпание при баунс-колебаниях протонов может быть спровоцировано плавучим нагревным стендом, если среди модулирующих присутствуют и частоты в десятки герц.

Инженерные проработки макетов специализированных антенной системы [Esser et al., 2017, 2018] и электрической цепи отбора мощности от источника энергии к антенной системе [Narayan, 2020] демонстрируют, что мобильный нагревный стенд вполне возможно разместить на трех стальных морских баржах размером 120×32.2 м каждая. В крайнем случае, даже двух таких барж могло бы

хватить. В этом последнем варианте площадь зоны нагрева стендом в ионосфере оценивается величиной ~2500 км² [Esser et al., 2018].

Осциллирующий диамагнитный ток, протекающий по границам зоны нагрева в слое $F2$, генерирует электромагнитные волны на частотах модуляции, а постоянная составляющая этого диамагнитного тока изменяет магнитное поле околоземного космического пространства во время нагрева ионосферы. Мы смоделировали основные черты такого изменения суперпозицией поля центрального земного диполя и поля соленоида, расположенного на геомагнитном экваторе на высоте 300 км в слое $F2$ и ориентированного вдоль дипольной силовой линии (области, где наблюдались события, по-видимому, имеют вытянутую вдоль геомагнитных силовых линий форму [Гинзбург и др., 2023]). Такой (“вакуумный”) подход уже использовали ранее [Shabansky, 1965] (при моделировании магнитного поля на дневной стороне магнитосферы суперпозицией двух диполей) и [Triskova and Veselovsky, 1992] (при моделировании магнитного поля внешней гелиосферы суперпозицией диполя и постоянного однородного поля). В нашем случае суперпозиция оправдывается тем, что магнитное поле во внутреннем радиационном поясе в спокойных геомагнитных условиях практически потенциально [Тверской, 2004]. Поле вне соленоида мы рассчитывали, следуя Callaghan and Maslen [1960]. Диаметр соленоида мы приняли ~10 км [Streltsov et al., 2018], так что длина соленоида ~250 км определилась, исходя из оценки площади зоны нагрева в ионосфере величиной ~2500 км² [Esser et al., 2018]. Плотность поверхностного диамагнитного тока соленоида мы оценивали из условия баланса полного (теплового плюс магнитного) давления на границе раздела нагретой и не нагретой (фоновой) ионосферной плазмы:

$$\begin{aligned}
 n_{i\phi} k T_{i\phi} + n_{e\phi} k T_{e\phi} + \frac{B_{\phi}^2}{8\pi} = \\
 = n_{in} k T_{in} + n_{en} k T_{en} + \frac{B_n^2}{8\pi}.
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

Здесь k — постоянная Больцмана; $(n_{i\phi}, n_{e\phi}, T_{i\phi}, T_{e\phi}, B_{\phi})$ — ионная и электронная концентрации, ионная и электронная температуры, напряженность магнитного поля на границе раздела со стороны фоновой плазмы; $(n_{in}, n_{en}, T_{in}, T_{en}, B_n)$ — ионная и электронная концентрации, ионная и электронная температуры, напряженность магнитного поля на границе раздела со стороны нагретой плазмы. Считаем ионосферную плазму квазинейтральной; для оценок примем, что при нагреве электронная концентрация увеличивается в среднем на 50%, электронная температура — на ~30%, а ионная температура практически не изменяется [Streltsov et al., 2018].

$$\begin{aligned} n_{i\phi} &= n_{e\phi}; n_{in} = n_{en}; n_{en} = n_{e\phi} + \frac{1}{2}n_{e\phi}; \\ T_{en} &= T_{e\phi} + \frac{1}{3}T_{e\phi}; T_{in} = T_{i\phi}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из соотношений (2) и (3) с учетом $B_{\phi} + B_n \approx 2B_{\phi}$ получаем

$$B_{\phi} - B_n = \frac{4\pi}{B_{\phi}} n_{e\phi} k \left(\frac{1}{2} T_{i\phi} + T_{e\phi} \right).$$

Тогда плотность поверхностного тока на границе раздела нагретой и не нагретой областей (i):

$$i = \frac{c}{4\pi} (B_{\phi} - B_n) = \frac{c}{B_{\phi}} n_{e\phi} k \left(\frac{1}{2} T_{i\phi} + T_{e\phi} \right). \quad (4)$$

Критической частоте слоя $F2$ (5–7) МГц в Океании в утренние часы местного времени (~8 утра) соответствует $n_{e\phi} = 4.5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ при $foF2 = 6 \text{ МГц}$. Принимая $T_{e\phi} = 2500 \text{ К}$, $T_{i\phi} = 1000 \text{ К}$, $B_{\phi} = 0.25 \text{ Гс}$, из (4) находим $i \approx 0.075 \text{ А/м}^2$. Тогда полный ток на единицу длины соленоида в 1 метр составляет $2\pi 750 \text{ А/м}$. На рис. 3 приведены результаты расчета зависимости магнитного поля от магнитной широты для суперпозиции диполя и соленоида (сплошная линия) и диполя (пунктирная линия) для $L = 1.1$. Видно, что наличие соленоида (моделирующего магнитный эффект от плавучего нагревного стенда) изменяет магнитное поле на малых L . Поле повышается в пределах $\sim 3^\circ$ магнитной широты от экватора — места дислокации стенда (в рассматриваемом модельном случае стенд помещался на магнитном экваторе), а далее оно оказывается меньше дипольного вплоть до широты $\sim 10^\circ$.

При регистрации событий речь идет о появлении электронов в точке силовой линии, удаленной от вершины этой линии. В отсутствие электромагнитной волны частицы с условно маленькими баунс-амплитудами группируются вблизи вершины силовой линии. Воздействие волны на эти первоначально удаленные от ИСЗ “Метеор-М № 2”

частицы приводит к изотропизации их питч-углового распределения, или, что то же самое, к увеличению баунс-амплитуды, в том числе и такому, что частицы могут опускаться до высоты орбиты ИСЗ “Метеор-М № 2” и ниже. Часть из них способна достичь атмосферы — это высыпающиеся частицы. Те же, которые не попадут в конус потерь и не станут высыпающимися, окажутся квази-захваченными, регистрируемыми на высоте $\sim 800 \text{ км}$ в зоне работы передатчика. То есть датчики ГАЛС регистрируют и, вообще говоря, не различают две популяции электронов. Во-первых, это квази-захваченные электроны (с такими питч-углами, что их зеркальные точки располагаются ниже орбиты ИСЗ “Метеор-М № 2”), которые после отражения возвращаются назад в радиационный пояс. Во-вторых, это высыпающиеся электроны с питч-углами в конусе потерь, которые позволяют им высыпаться из радиационного пояса в атмосферу. Осциллирующий диамагнитный ток, протекающий по границам зоны нагрева в слое $F2$, приводит к высыпаниям релятивистских электронов за счет циклотронного резонанса на частотах модуляции. Это работает на увеличение числа регистрируемых высыпающихся электронов дополнительно к тем, что высыпаются при циклотронном резонансе на субгармониках несущей частоты (5–7 МГц). С другой стороны, постоянная составляющая ионосферного диамагнитного тока изменяет магнитное поле на малых L в районе дислокации стенда. Изменения магнитного поля поднимают или опускают высоту зеркальных точек по отношению к орбите ИСЗ “Метеор-М № 2”. Изменения высоты зеркальных точек уменьшают или увеличивают число регистрируемых датчиками ГАЛС квази-захваченных электронов. Влияние изменения

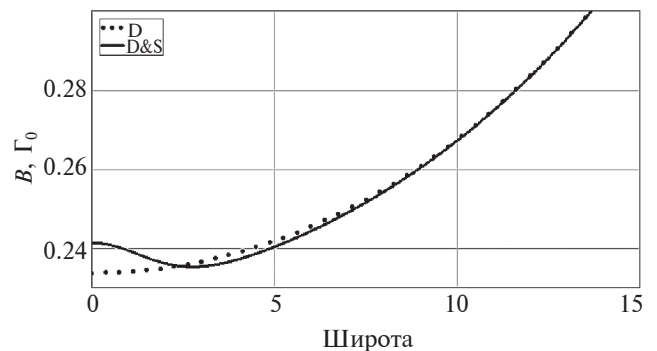


Рис. 3. Результаты модельного расчета зависимости магнитного поля от магнитной широты для суперпозиции диполя и соленоида (сплошная линия) и диполя (пунктирная линия). В рассматриваемом модельном случае стенд помещался на магнитном экваторе.

магнитного поля на показания датчиков ГАЛС иллюстрирует событие 9.07.2017 г. (рис. 4).

Видно, что сразу после типичного резкого (длительностью несколько десятков секунд) всплеска показаний всех датчиков ГАЛС в начале события, связанного с увеличением числа регистрируемых выпадающих электронов, наблюдается провал с последующим постепенным возрастанием скорости счета датчиков. Провал можно интерпретировать как дефицит числа регистрируемых квази-захваченных электронов, связанный с локальным повышением (по сравнению с диполем) магнитного поля вблизи расположения стенда за счет вклада постоянной составляющей осциллирующего диамагнитного тока, протекающего по границам зоны нагрева. Дальнейшее увеличение скорости счета всех датчиков, в свою очередь, может указывать на понижение общего магнитного поля с удалением от стенда (см. рис. 3) и, соответственно, увеличение числа регистрируемых квази-захваченных электронов. Все это происходит на фоне повышенного числа выпадающих электронов в событии.

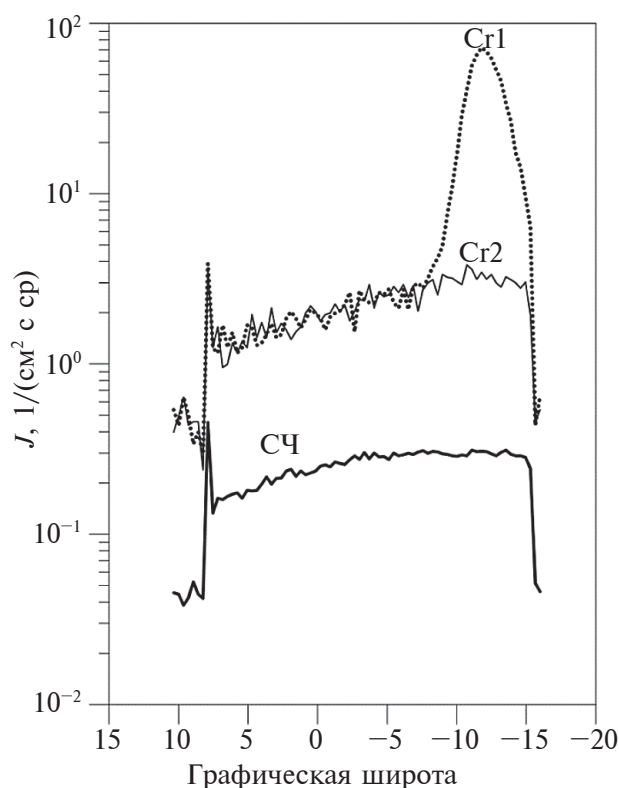


Рис. 4. Показания датчиков ГАЛС для события 9.07.2017 г. По оси абсцисс — географическая широта в градусах, по оси ординат — интенсивности. Магнитный экватор для рассматриваемого события расположен на $\sim 6^\circ$ N.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Примерно половина (11) из 25 аномальных выпадений электронов, зарегистрированных с борта ИСЗ “Метеор-М № 2” в 2014–2022 гг. в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях в энергиях от ~ 100 кэВ до нескольких МэВ, сопровождалась индуцированными выпадениями протонов с энергиями 20–45 МэВ. Если причина явления — резонанс на циклотронной частоте протонов (~ 400 Гц), то (поскольку в утренние часы местного времени прохождение в космос наземных сигналов с частотами ~ 400 Гц блокируется ионосферой) единственный тип наземного и/или судового передатчика, способный местным утром обеспечить присутствие низкочастотного электромагнитного излучения во внутреннем радиационном поясе — это нагревный стенд. Источником радиоволн с частотой ~ 400 Гц во внутреннем радиационном поясе является диамагнитный ток, развивающийся в слое $F2$ ионосферы по границам зоны нагрева, сила которого осциллирует на частоте модуляции ~ 400 Гц. В циклотронный резонанс со стимулированным низкочастотным излучением могут попасть и релятивистские электроны внутреннего радиационного пояса при широком спектре частот модуляции. В частности, для попадания в циклотронный резонанс электронов с энергией 8 МэВ и выше (черенковский счетчик СЧ) частота модуляции должна составлять ~ 3 кГц и ниже, для электронов с энергией 2.1 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ2) ~ 30 кГц и ниже, и для электронов с энергией 0.8 МэВ и выше (гейгеровский счетчик СГ1) ~ 125 кГц и ниже. Постоянная составляющая осциллирующего диамагнитного тока, протекающего по границам зоны нагрева в слое $F2$, может изменять магнитное поле на малых L во время нагрева ионосферы, что подтверждают модельные расчеты; это, в свою очередь, отразится на временных профилях показаний прибора ГАЛС.

В литературе [Papadopoulos, 2015; Eliasson and Papadopoulos, 2016] сообщалось о целесообразности создания мобильного нагревного стенда морского базирования, в том числе, для проведения исследований в районе геомагнитного экватора. Инженерные проработки макетов специализированных антенной системы [Esser et al., 2017, 2018] и электрической цепи отбора мощности от источника энергии к антенной системе [Narayan, 2020] демонстрируют, что мобильный нагревный стенд вполне возможно разместить на трех стальных морских баржах размером 120×32.2 м каждая.

Стало быть, аномальные электронные и протонные высыпания из внутреннего радиационного пояса, зарегистрированные с борта ИСЗ “Метеор-М №2” в 2014–2022 гг. в Океании в низких широтах в утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях, допускают интерпретацию, согласно которой они представляют собой побочные проявления ионосферных экспериментов с использованием плавучего наземного стенда.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны трем анонимным рецензентам за сделанные замечания и высказанные предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гинзбург Е.А., Зинкина М.Д., Писанко Ю.В. Индуцированные высыпания электронов из внутреннего радиационного пояса, зарегистрированные в Океании // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 63. № 6. С. 751–763. 2023.
- Тверской Б.А. Основы теоретической космофизики // Избранные труды. М.: УРСС. С. 376. 2004. ISBN 5-354-00647-3.
- Bashkurov V.F., Denisov Yu.I., Gotselyuk Yu.V., Kuznetsov S.N., Myagkova I.N., Sinyakov A.V. Trapped and quasi-trapped radiation observed by CORONAS-I satellite // Radiation Measurements. V. 30. P. 537–546. 1999.
- Biryakov A.S., Grigoryan O.R., Kuznetsov S.N., Ryaboshapka A.V., Ryabukha S.B. Low-energy charged particles at near equatorial latitudes according to MIR orbital station data // Adv. Space Res. V.10. P.10189. 1996.
- Callaghan E.E., Maslen S.H. The magnetic field of a finite solenoid // NASA Technical Note D-465, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, National Aeronautics and Space Administration, Washington, October 1960.
- Dovoedo Y.H. Contributions to outlet detection methods: some theory and applications // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Department of Information Systems, Statistics, and Management Science in the Graduate School of the University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama. P. 180. 2011. <https://ir-api.ua.edu/api/core/bitstreams/48a91f94-9ee7-4918-8c3c-d1757737ea85/content>
- Eliasson B., Chang C.-L., Papadopoulos K. Generation of ELF and ULF electromagnetic waves by modulated heating of the ionospheric F2 region // J. Geophys. Res. V. 117. P. 10320. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012JA017935>
- Eliasson B., Papadopoulos K. HF wave propagation and induced ionospheric turbulence in the magnetic equatorial region // J. Geophys. Res. Space. V.121. P. 2727–2742. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022323>
- Eliasson B., Papadopoulos K. Pitch angle scattering of relativistic electrons near electromagnetic ion cyclotron resonances in diverging magnetic fields // Plasma Phys. Control. Fusion. V. 59. P. 104003. 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa8100>
- Eliasson B., Milikh G.M., Liu T.C., Shao X., Papadopoulos K. Simulations of the generation of energetic electrons and the formation of descending artificial plasma layers during HF heating at Arecibo // J. Geophys. Res. Space. V. 123. P. 10301–10309. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA026073>
- Esser B., Beeson S.R., Dickens J.C., Mankowski J.J., Antonsen T.M., Neuber A.A. The path to a transportable ionospheric heater – tuning methods // IEEE Trans Plasma Sci. V. 45. P. 1051–1057. 2017. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2699925>
- Esser B., Mauch D., Dickens J., Mankowski J., Neuber A. Tunable, electrically small, inductively coupled antenna for transportable ionospheric heating // Radio Sci. V. 53. P. 496–508. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017RS006484>
- Gekelman W., Pribyl P., Vincena S., Tang S.W., Papadopoulos K. Ferrite based antennae for launching Alfvén waves // Rev. Sci. Instrum. V. 90. P. 083505. 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5103171>
- Meredith N.P., Horne R.B., Clilverd M.A., Ross J.P. An investigation of VLF transmitter wave power in the inner radiation belt and slot region // J. Geophys. Res. Space. V. 124. P. 5246–5259. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JA026715>
- Nagata K., Kohno T., Hasere N., Kikuchi J., Doke T. Electron (0.19–3.2 MeV) and proton (0.58–35 MeV) precipitations observed by OHZORA satellite at low latitude zones L = 1.6–1.8 // Planet. Space Sci. V. 36. P. 591. 1988.
- Narayan A.H. A highly efficient, megawatt class, constant impedance tunable power extraction circuit for mobile ionospheric heaters // Dissertation submitted to the Faculty (Electrical Engineering Department) of the Graduate School of the University of Maryland, College Park in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. P. 81. 2020. <https://doi.org/10.13016/vhln-r6io>
- Papadopoulos K., Chang C.-L., Labenski J., Wallace T. First demonstration of HF-driven ionospheric currents // Geophys. Res. Lett. V. 38. P. 20107. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL049263>
- Papadopoulos K., Gumenov N.A., Shao X., Doxas I., Chang C.L. HF-driven currents in the polar ionosphere // Geophys. Res. Lett. V. 38. P. 12103. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL047368>
- Papadopoulos K. Ionospheric modifications using mobile, high power HF transmitters based on TPM technology // Paper presented at 2015 IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), 24–28 May, Antalya, Turkey. 2015. <https://doi.org/10.1109/PLASMA.2015.7179496>
- Petrov A.N., Grigoryan O.R., Panasyuk M.I. Energy spectrum of proton flux near geomagnetic equator at low altitudes // Adv. Space Res. V. 41. P. 1269–1273. 2008.

- Petrov A.N., Grigoryan O.R., Kuznetsov N.V. Creation of model of quasi-trapped proton fluxes below Earth's radiation belt // *Adv. Space Res.* V. 43. P. 654–658. 2009.
- Selesnick R.S., Looper M.D., Mewaldt R.A. A theoretical model of the inner proton radiation belt // *Space Weather*. V. 5. S04003. 2007. <https://doi.org/10.1029/2006SW000275>
- Selesnick R.S., Hudson M.K., Kress B.T. Direct observation of the CRAND proton radiation belt source // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 118. P. 7532–7537. 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JA019338>
- Selesnick R.S., Baker D.N., Kanekal S.G., Hoxle V.C., Li X. Modeling the proton radiation belt with Van Allen probes relativistic electron-proton telescope data // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 123. P. 685–697. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024661>
- Shabansky V.P. On the first phase of a magnetic storm // *Space Res.* V. 5. P. 125–147. 1965.
- Shao X., Papadopoulos K., Sharma A.S. Control of the energetic proton flux in the inner radiation belt by artificial means // *J. Geophys. Res.* V. 114. A07214. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014066>
- Sharma A.S., Eliasson B., Shao X., Papadopoulos K. Generation of ELF waves during HF heating of the ionosphere at midlatitudes // *Radio Sci.* 51. P. 962–971. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016RS005953>
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, present and future of active radio frequency experiments in space // *Space Sci. Rev.* 214:118. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
- Triskova L., Veselovsky I.S. On the large-scale magnetic field structure in the outer heliosphere / *Solar Wind Seven*. Ed. E. Marsh, R. Schwenn. New York, London, Seoul, Tokio: Pergamon Press. P. 297–300. 1992.
- Vartanyan A., Milikh G.M., Eliasson B., Najmi A.C., Parrot M., Papadopoulos K. Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere // *Radio Sci.* V. 51. P. 1188–1198. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015RS005892>
- Wang Y., Gekelman W., Pribyl P., Van Compernelle B., Papadopoulos K. Generation of shear Alfvén waves by repetitive electron heating // *J. Geophys. Res.—Space*. V. 121. P. 567–577. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022078>

Induced Proton Precipitations from the Inner Radiation Belt Registered in Oceania

E. A. Ginzburg^{1,*}, M. D. Zinkina^{1,**}, Yu. V. Pisanko^{1,2,***}

¹*Fedorov Institute of Applied Geophysics, Roshydromet, Moscow, Russia*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny (Moscow Region), Russia*

*e-mail: e_ginzburg@mail.ru

**e-mail: marinaantipina20@mail.ru

***e-mail: pisanko@ipg.geospace.ru

Detected were induced proton precipitations from the inner radiation belt went with almost a half (11) of 25 anomalous electron events registered onboard “Meteor-M №2” satellite in 2014–2022 in Oceania at low latitudes in the morning hours of local time under quiet geomagnetic conditions. It is surmised that such proton precipitations could be a manifestation of cyclotron resonance between protons and low frequency electromagnetic waves stimulated by a mobile ionospheric heater. Observed effects in anomalous electron events, which could be interpreted in the framework of a mobile ionospheric heater concept, are also discussed.

Keywords: the inner radiation belt, proton and electron precipitation, mobile ionospheric heater

УДК 523.72; 550.385.27

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ АМПЛИТУДОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУХТ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ, ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТЬЮ И ПАРАМЕТРАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2025 г. А. А. Любчик^{1, *}, И. В. Дэспирак^{1, **}, Р. Вернер^{2, ***}

¹Полярный геофизический институт, Апатиты (Мурманская обл.), Россия

²Институт космических исследований и технологий Болгарской Академии Наук, Стара Загора, Болгария

*e-mail: lubchich@pgia.ru

**e-mail: despirak@gmail.com

***e-mail: rolwer52@yahoo.co.uk

Поступила в редакцию 03.03.2024 г.

После доработки 23.06.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Во время взрывной фазы суббури наблюдается скачок сияний к полюсу (брейкап) и расширение авроральной выпуклости. Расширение сопровождается отрицательной магнитной бухтой под полярными сияниями и положительной магнитной бухтой на средних широтах. Величина отрицательной бухты характеризуется авроральным AL -индексом. Для характеристики положительной бухты ранее был предложен MPB -индекс (*Mid-latitude Positive Bay index*). В работе исследована статистическая связь MPB -индекса с геомагнитной активностью на разных широтах и с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Показано, что все экстремально большие значения MPB -индекса (выше $10\,000\text{ нТл}^2$) наблюдаются во время сильных геомагнитных бурь (когда Dst -индекс опускается ниже -100 нТл), все экстремально сильные геомагнитные бури (когда Dst -индекс опускается ниже -250 нТл) сопровождаются экстремально высокими значениями MPB -индекса. Статистически MPB -индекс растет с увеличением геомагнитной активности на любой широте. MPB -индекс, в среднем, растет с увеличением модуля межпланетного магнитного поля и любой из его компонент. Но для B_z -компоненты большие значения MPB -индекса наблюдаются при ее южной ориентации. Для плазменных параметров солнечного ветра MPB -индекс сильнее всего растет с ростом его скорости. Также сильна зависимость от динамического давления и от величины E_y -компоненты электрического поля солнечного ветра. Однако MPB -индекс слабо зависит от плотности и температуры солнечного ветра.

Ключевые слова: геомагнитные индексы, магнитные бури, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, статистический анализ

DOI: 10.31857/S0016794025010069, EDN: AEFWUR

1. ВВЕДЕНИЕ

Скачок сияний к полюсу (брейкап) и расширение авроральной выпуклости являются важными признаками магнитосферной суббури. Расширение авроральной выпуклости сопровождается развитием отрицательных магнитных бухт на авроральных широтах и положительных магнитных бухт на средних широтах. Появление магнитных бухт вызвано развитием токового клина суббури, возникающего из-за частичного разруше-

ния поперечного (утро-вечернего) тока ближнего хвоста магнитосферы, например, за счет пересоединения силовых линий геомагнитного поля. В результате формируется крупномасштабная трехмерная токовая система, в которой участок разрушенного тока хвоста магнитосферы перенаправляется вдоль силовых линий геомагнитного поля в ионосферу, замыкается в авроральных широтах западным электроджетом и возвращается в магнитосферу в вечернем секторе в виде продольного тока, создаваемого высыпающимися

ускоренными электронами. Очень интенсивные суббури, во время которых *SML*-индекс геомагнитной активности опускается ниже -2500 нТл, часто выделяются в отдельный класс – суперсуббури [Tsurutani et al., 2015; Hajra et al., 2016 и др.]. Во время суперсуббурь может формироваться дополнительный токовый клин противоположного направления на вечерней стороне (например, [Fu et al., 2021; Zong et al., 2021; Дэспирак и др., 2022]).

Среднеширотная положительная магнитная бухта в *X*-компоненте магнитного поля на станциях в околополуденном секторе, связанная с развитием токового клина суббури, состоит из короткой, длительностью порядка 20 мин, фазы роста и обычно чуть более медленной фазы спада. В фиксированный момент времени пространственное распределение положительных вариаций в *X*-компоненте представляет собой профиль гауссовой формы, симметричный относительно центра токового клина. Пространственная вариация в *Y*-компоненте похожа на один цикл синусоидальной волны с максимумом в вечернем секторе, на долготе вытекающего тока, и минимумом в утреннем секторе, на долготе втекающего тока (детали показаны, например, на рис. 9 из работы McPherron et al. [1973]). Таким образом, положение экстремумов северной и восточной компонент магнитного поля может быть использовано для характеристики суббурного токового клина.

Используя это обстоятельство, для анализа проявлений суббуровой активности на средних широтах недавно, в 2015 году, был введен в обращение новый одноминутный геомагнитный *MPB*-индекс (*Mid-latitude Positive Bay index*). Методика его вычисления подробно описана в [Chu, 2015; McPherron and Chu, 2017, 2018]. Индекс характеризует мощность возмущений горизонтальной компоненты магнитного поля на среднеширотных станциях во время развития токового клина суббури. Он определяется суммой квадратов возмущений северной и восточной компонент магнитного поля.

Авторами индекса (McPherron and Chu) были предложены две отличающиеся в деталях методики расчета, что привело к созданию двух похожих, но все же немного разных, наборов значений *MPB*-индекса. Описание отличий в методиках расчета можно найти, например, в работе McPherron and Chu [2017]. Одно из отличий состоит в том, что первый набор (назовем его списком McPherron) получен по данным 35 станций с геомагнитной широтой λ_{mag} между -45° и 45° , тогда как второй набор (список Chu) составлен по данным 41 станции Северного и Южного полушарий с $20^\circ < |\lambda_{\text{mag}}| < 52^\circ$.

Первый список можно найти в дополнительной информации к интернет-версии статьи McPherron and Chu [2018]. Он включает одноминутные значения полной мощности горизонтальных вариаций магнитного поля, то есть $\Delta X^2 + \Delta Y^2$, за период с февраля 1980 г. по конец 2012 г. (до конца 1984 года данные являются эпизодическими, нерегулярными). Список Chu, в момент его представления, включал отдельно одноминутные вариации ΔX^2 (обозначим их как *MPB-X*), ΔY^2 (*MPB-Y*), а также их сумму с начала 1991 г. по конец 2019 г. Его и будем использовать в нашей работе. Поэтому опишем кратко алгоритм получения *MPB*-индекса по методике Chu. Сначала из исходных данных измерений магнитного поля на 41-ой станции удаляются вековые вариации и солнечно-суточные *Sq*-вариации. Первые удаляются с помощью линейного тренда, вторые – с помощью метода наложения эпох за 21 день. Затем удаляются оставшиеся низкочастотные вариации с помощью фильтра верхних частот с частотой среза на 12 часах. Далее оставляются только данные станций, находящихся в данный момент в ночном секторе, ± 5 ч от 23.5 ч местного времени. Эти данные возводятся в квадрат и усредняются по всем “ночным” станциям. В итоге получаются значения *MPB-X* и *MPB-Y*. Их сумма дает полный *MPB*-индекс в данный момент времени.

Иногда представляет интерес анализ вариаций магнитного поля на конкретной магнитной станции на средних широтах. Такая возможность описана в [Werner et al., 2021], где была предложена усовершенствованная методика вычисления *MPB*-индекса. В частности, были учтены данные болгарской ст. Панагюриште (Panagjurishte (PAG), 42.5° N, 24.2° E; $\lambda_{\text{mag}} \approx 37^\circ$).

Отметим, что иногда анализируются вариации не самого *MPB*-индекса, а квадратного корня из него (например, [Sergeev et al., 2020; Tsyganenko et al., 2021]).

В работе проведен статистический анализ *MPB*-индекса, а также исследована его связь как с геомагнитной активностью на разных широтах, так и с параметрами солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП).

2. ДАННЫЕ

Для анализа взяты одноминутные значения *MPB*-индекса за период с 1991 по 2019 год. За этот же период были взяты одноминутные значения других геомагнитных индексов, характеризующих магнитную активность на разных широтах. Перечислим их, двигаясь от полюса к экватору.

— Для характеристики возмущенности в северной полярной шапке будем использовать $PC(N)$ -индекс [Troshichev and Andrezen, 1985; Troshichev et al., 1988; Трошичев, 2010]. Значения индекса доступны в базе данных OMNI на сайте (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Как известно, PC -индекс вычисляется по данным одной станции, расположенной около геомагнитного полюса. В Северном полушарии, для индекса $PC(N)$, — это ст. Каанаак (Туле) (Qaanaaq (Thule) (THL), 77.5° N , 290.8° E ; $\lambda_{\text{mag}} \approx 86.7^\circ$), в южном полушарии, для $PC(S)$, — это станция Восток. PC -индекс пропорционален геоэффективному межпланетному электрическому полю и является индикатором количества энергии, поступающей в магнитосферу Земли [Troshichev and Andrezen, 1985; Troshichev et al., 1988; Трошичев, 2010].

— Возмущения в авроральной зоне характеризуются индексами семейства AE (AE , AL , AO , AU), определяемыми по данным 12-ти авроральных станций. Индексы AL и AU определяют максимальным для этих станций отрицательным и положительным отклонением H -составляющей геомагнитного поля от спокойного уровня и зависят от интенсивности западного и восточного тока аврорального электроджета. Индекс AE определяет суммарный размах отклонений H -компоненты геомагнитного поля, то есть, он равен сумме модулей AL - и AU -индексов. AO -индекс равен полусумме AL - и AU -индексов. Индексы размещены на сайте (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>).

— Индексы SML и SMU определяются аналогично AL и AU индексам, но по данным всех магнитных станций проекта SuperMAG с геомагнитными широтами от $+40$ до $+80^\circ$. Индексы доступны на сайте (<http://supermag.jhuapl.edu/indices/>). Они лучше описывают процессы в авроральном овале в сильно возмущенных условиях, например, во время магнитных бурь, когда авроральный овал может сильно отклоняться к экватору от своего положения в спокойных условиях. При таких отклонениях станции, используемые при вычислении индексов семейства AE , могут оказаться вне области аврорального овала; как следствие, AE -индекс перестанет отражать интенсивность электроджетов [Feldstein, 1992].

— Индексы $ASY-H$, $ASY-D$ и $SYM-H$, $SYM-D$ размещены на сайте (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>). Процедура вычисления и анализ индексов, например, за 1992 год, один из первых анализируемых в этой работе годов, подробно описаны в [Iyemori et al., 1994]. Используются данные девяти геомагнитных станций, расположенных на средних и низких широтах,

включая три станции, используемые для вычисления Dst -индекса. Ежемесячно индексы рассчитываются по шести станциям из девяти, в разные месяцы выбор шести станций может быть разным. $SYM-H$ является, по сути, усредненным отклонением H -компоненты геомагнитного поля от спокойного уровня на выбранных станциях с поправкой на их геомагнитные широты, аналогично процедуре вычисления Dst -индекса. $SYM-D$ вычисляется по усредненным отклонениям D -компоненты геомагнитного поля, но без внесения поправки на широты станций. Индексы $SYM-H$ и $SYM-D$ характеризуют долготно-симметричную часть кольцевого тока. Индексы $ASY-H$ и $ASY-D$ определяют диапазон между максимальными и минимальными значениями H - и D -компонент геомагнитного поля на шести станциях после вычитания из поля возмущений соответствующих симметричных частей и, таким образом, характеризуют долготно-асимметричную часть кольцевого тока. Будем относить $ASY-H$ и $ASY-D$ к среднеширотным индексам, поскольку при их вычислении используются в том числе данные среднеширотных станций. Wanliss and Showalter [2006] пришли к выводу, что, как правило, индекс $SYM-H$ мало отличается от низкоширотного Dst -индекса, и его можно использовать в качестве Dst -индекса с высоким (одноминутным) разрешением. На этом основании мы отнесем $SYM-H$ и $SYM-D$ к низкоширотным индексам.

— Среднечасовые значения Dst -индекса — с сайта (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html).

Одноминутные значения модуля ММП B_T и его компонент B_x , B_y , B_z (в системах GSE и GSM) и данные по СВ (величина скорости и ее компоненты, плотность, температура, динамическое давление, а также E_y -компонента электрического поля и отношение плазменного давления к магнитному β) взяты из базы данных OMNI с сайта (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Случаи наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса

Большинство возрастаний MPB -индекса связаны с суббуревой активностью. Критерием определения момента суббури по вариациям MPB -индекса является превышение пиковым значением MPB -индекса 25 нТл^2 [McPherron and Chu, 2017, 2018]. Но иногда MPB -индекс достигает очень больших значений. Нами были отобраны все слу-

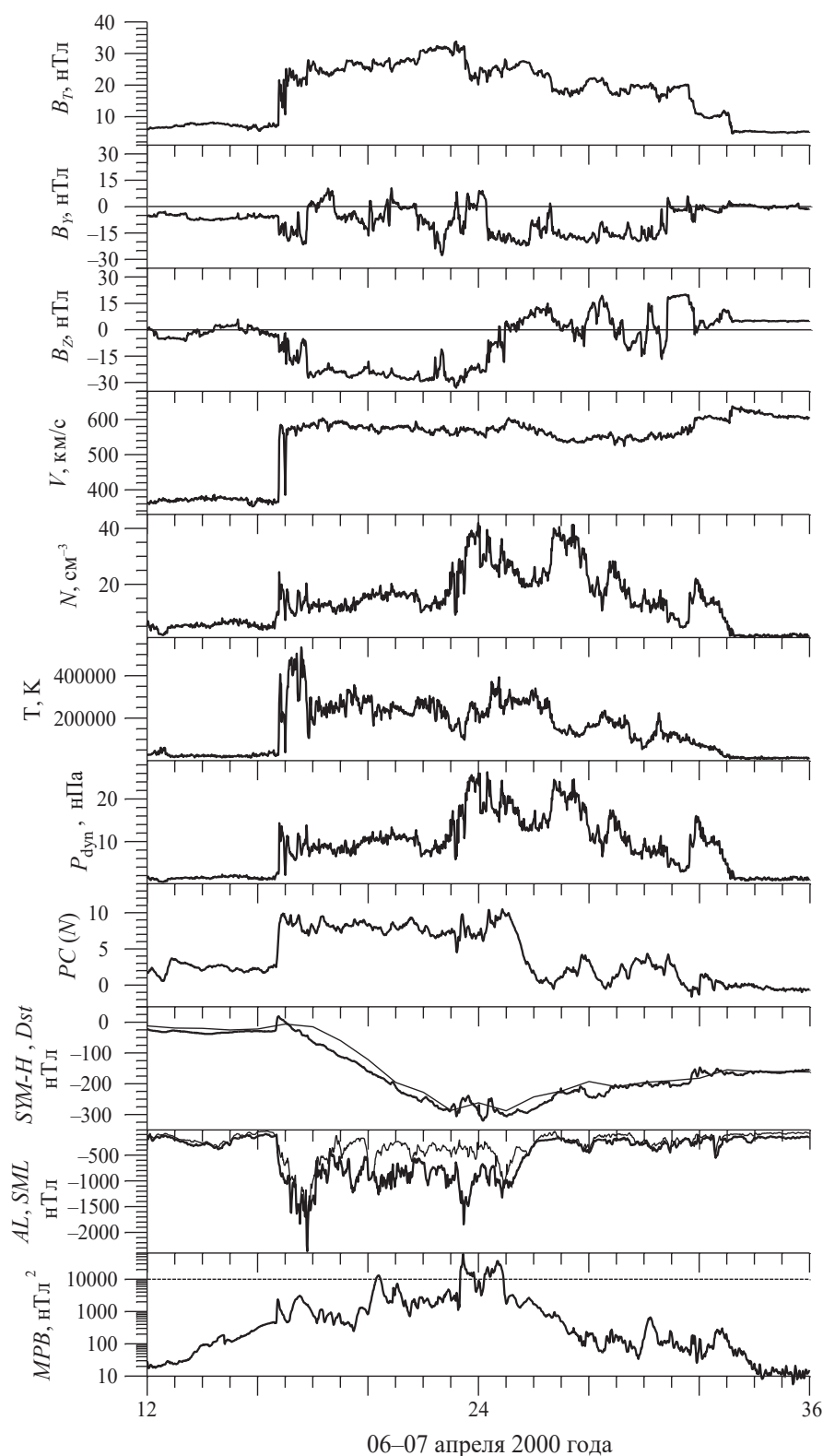


Рис. 1. Пример наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса в течение суток начиная с 12:00 UT 06.04.2000 г. Сверху вниз показано поведение модуля MMI , B_y - и B_z -компонент MMI в координатной системе GSM , скорости, плотности, температуры и динамического давления солнечного ветра, а также геомагнитных индексов $PC(N)$, $SYM-H$ и Dst , AL и SML , MPB .

чаи превышения $MPB-X$ 10 000 нТл² (то есть, когда вариация ΔX превышала 100 нТл).

Пример такого события представлен на рис. 1, где показаны значения модуля и двух компонент ММП, нескольких величин СВ и геомагнитных индексов за 24 ч начиная с 12:00 UT 06.04.2000 г. Видно, что MPB -индекс превышает 10 000 нТл² (это значение показано на графике пунктирной линией), достигая ~60 000 нТл² во время главной фазы магнитной бури с $Dst_{min} = -288$ нТл. Часто магнитные бури делят на группы по величине Dst_{min} . К сильным (*intense*) магнитным бурям принято относить бури с $Dst_{min} < -100$ нТл [например, Gonzalez and Tsurutani, 1987]. Tsurutani et al. [1992] рассмотрели пять очень интенсивных (*great*) маг-

нитных бурь с Dst_{min} от -249 нТл и ниже. Мас-
Mahon and Gonzalez [1997] назвали такие очень интенсивные магнитные бури супербуриями, используя критерий $Dst_{min} < -240$ нТл. Позже, в работах [Gonzalez et al., 1999, 2002], был уточнен численный критерий для очень интенсивных магнитных бурь: $Dst_{min} < -250$ нТл. Этим уточненным критерием мы и будем пользоваться в дальнейшем. Согласно этому критерию, экстремально высокие значения MPB -индекса, показанные на рис. 1, наблюдались во время супербури. На рис. 1 видно, что различия между индексами $SYM-H$ и Dst , если не учитывать их разное разрешение по времени, незначительны, что оправдывает отнесение $SYM-H$ к низкоширотным индексам. Также

Таблица 1. Список супербурь, зарегистрированных с 1991 по 2019 гг. включительно, ранжированный по величине минимального значения Dst -индекса

Dst_{min} time (dd.mm.yyyy UT)	Dst_{min} (nT)	$SYM-H_{min}$ /time (nT)/(dd.mm UT)	SI^+ /time (nT)/(dd.mm UT)	Interplanetary Case	MPB /time (nT ²)/(dd.mm UT)
20.11.2003 20:30	-422	-490/20.11 18:17	49/20.11 08:06	Sheath+MC Bxz -	~69 000/20.11 17:03
31.03.2001 08:30	-387	-437/31.03 08:06	129/31.03 01:00	Sheath+MC Bxz c-	~26 000/31.03 06:09 ~21 000/31.03 15:53
30.10.2003 22:30	-383	-432/30.10 22:55	76/30.10 20:08	Sheath	~46 000/30.10 21:35
08.11.2004 06:30	-374	-394/08.11 05:55	92/07.11 19:20	Sheath+MC Bxz -	~27 000/08.11 01:19 [MPB X~9 300]
09.11.1991 01:30	-354	-402/09.11 01:32	49/08.11 13:15	Unknown	~575 000/08.11 22:20
30.10.2003 00:30	-353	-391/30.10 01:48	81/29.10 06:14	Sheath+MC Bxz -	~69 000/29.10 19:56
16.07.2000 00:30	-301	-347/15.07 21:54	93/15.07 15:04	MC Bxz -	~23 000/15.07 21:48
25.03.1991 00:30	-298	-337/25.03 03:41	118/24.03 03:55	Unknown	~105 000/24.03 21:33 ~24 000/24.03 04:06
06.11.2001 00:30	-292	-320/06.11 04:06	88/06.11 01:54	PICME+sheath	~11 000/06.11 02:05 [MPB X~6 300]
10.05.1992 14:30	-288	-363/10.05 14:15	81/09.05 20:02	Likely sheath+MC	~28 000/10.05 18:29
07.04.2000 00:30	-288	-320/07.04 00:09	46/06.04 16:45	Sheath	~60 000/06.04 23:27
11.04.2001 23:30	-271	-280/11.04 23:57	26/11.04 15:53	Sheath	~24 000/11.04 21:37 ~23 000/12.04 00:16
10.11.2004 10:30	-263	-282/10.11 09:31	46/09.11 18:51	Sheath+MC Bxz +	~31 000/09.11 20:32
29.10.1991 07:30	-254	-284/29.10 08:02	51/28.10 11:03	Sheath+MC Bxz +	~223 000/28.10 16:06

Примечание. Первые пять столбцов взяты из табл. 1 в статье Meng et al. [2019]. В них последовательно время регистрации Dst_{min} (1); его величина (2); величина и время регистрации $SYM-H_{min}$ (3); величина и время регистрации внезапного импульса SI^+ (4); структура в солнечном ветре, вызвавшая магнитную бурю (5). В последнем столбце величина и время регистрации экстремального значения MPB -индекса (6).

Таблица 2. Сильные бури, ранжированные по величине Dst_{\min} , во время которых наблюдались экстремально большие значения MPB -индекса

Dst_{\min} time (dd.mm.yyyy UT)	Dst_{\min} (nT)	$SYM-H_{\min}$ /time (nT)/(dd.mm UT)	MPB /time (nT ²)/(dd.mm UT)
15.05.2005 08:30	–247	–305/15.05 08:20	~38 000/15.05 08:50
05.06.1991 19:30	–223	–238/05.06 16:56	~50 000/05.06 17:14
24.11.2001 16:30	–221	–234/24.11 12:37	~49 000/24.11 07:15
01.11.1991 23:30	–196	–200/01.11 19:37 20:22	~36 000/01.11 20:30
13.07.1991 15:30	–183	–238/13.07 15:42	~42 000/13.07 16:20
01.10.2002 16:30	–176	–154/01.10 12:53	~18 000/01.10 16:28
26.08.2018 06:30	–175	–206/26.08 07:11	~18 000/26.08 07:44
26.02.1992 22:00	–174	–167/26.02 22:31	~61 000/26.02 19:44
08.02.1992 16:30	–114	–126/08.02 15:18	~41 000/08.02 15:35

Примечание. В столбцах последовательно время регистрации Dst_{\min} (1); его величина (2); величина и время регистрации $SYM-H_{\min}$ (3); величина и время регистрации экстремального значения MPB -индекса (4).

видно, что в главную фазу бури разница между индексами SML и AL действительно может быть значительной — индексы могут различаться по величине в два раза и более.

Супербури являются редким явлением, с 1957 по 2018 гг. было зафиксировано всего 39 событий, список которых приведен в работе [Meng et al., 2019], из них только 14 наблюдались с 1991 года, когда есть данные по величине MPB -индекса в используемом нами списке Chu. Анализ показал, что во время всех 14 событий были наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса. Это видно из табл. 1, в которой супербури, зарегистрированные с 1991 г., ранжированы по величине минимального значения Dst -индекса. Первые пять столбцов взяты из табл. 1 в статье Meng et al. [2019]. В последнем столбце приведены величина и время регистрации экстремального значения MPB -индекса.

Отметим, что во время двух бурь — 08.11.2004 г. и 06.11.2001 г. — $MPB-X$ оказался ниже заданного порогового значения, тем не менее полный MPB -индекс превышал 10 000 нТл².

Как правило максимальные значения MPB -индекса регистрировались недалеко от момента минимума Dst , средняя разница по времени между этими событиями оказалась ~3 ч. Но в двух последних супербурях (10.11.2004 г. и 29.10.1991 г.) момент максимума MPB -индекса

оказался ближе к моменту наблюдения внезапного импульса SI^+ .

Оставшиеся события с экстремально большими значениями MPB -индекса ($MPB-X > 10\,000$ нТл²) были во время сильных магнитных бурь ($Dst_{\min} < -100$ нТл). Соответствующие результаты приведены в табл. 2. Так как Dst -индекс имеет часовое разрешение, время во втором столбце оказывается кратным 30 мин — середине часа или, для бури 26.02.1992 г., середине двухчасового интервала с минимальным значением Dst -индекса. Первую в таблице бурю с $Dst_{\min} = -247$ нТл иногда также относят к супербурям (например, [Gonzalez et al., 2011]). В большинстве случаев экстремальные значения MPB -индекса наблюдались вблизи момента регистрации минимального значения индекса $SYM-H$.

Отметим, что еще девять супербурь были зарегистрированы с 1980 по 1990 гг., когда есть данные по MPB -индексу из первого списка [McPherron and Chu, 2018]. Во время всех этих супербурь также регистрировались аномально высокие значения MPB -индекса ($> 10\,000$ нТл²).

3.2. Статистическая связь MPB -индекса с геомагнитными индексами

Были взяты все одномоментные данные по MPB -индексу за весь анализируемый интервал с 1991 по 2019 года, при этом дополнительный

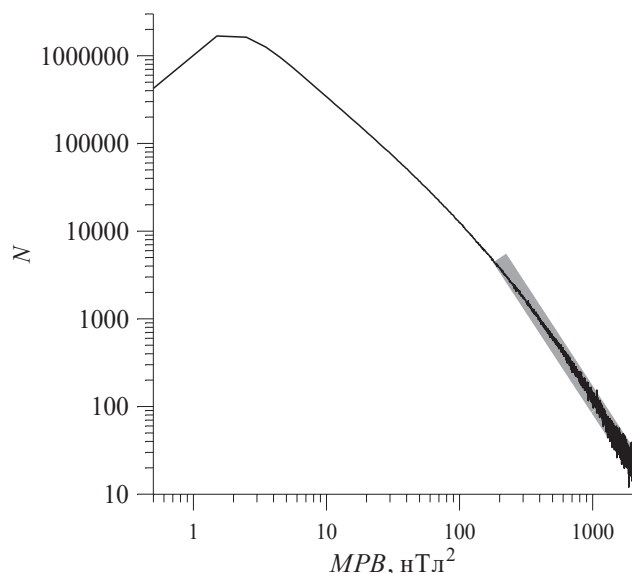


Рис. 2. Распределение MPB -индекса по значениям, построенное в двойном логарифмическом масштабе. Шаг по горизонтальной оси — 1 нТл^2 . Широкой серой линией показана линейная аппроксимация хвоста распределения (выше 200 нТл^2) в билогарифмической системе координат.

анализ, сопровождались ли наблюдаемые вариации развитием суббури или нет, не проводился.

Распределение MPB -индекса по значениям показано на рис. 2. Хвост распределения в двойном логарифмическом масштабе хорошо аппроксимируется прямой линией с отрицательным наклоном ~ -2.3 (широкая серая линия на графике), то есть имеет степенной вид: $N \approx b \times MPB^{-2.3}$. График построен с шагом по значениям MPB -индекса 1 нТл^2 , в том числе хорошо описывающим область малых значений индекса, до суббурового поро-

вого значения 25 нТл^2 . График с шагом в 100 нТл^2 , описывающий область выше порогового значения, приведен в [Любич и др., 2023]. Он хорошо описывается степенным законом во всей области значений с близким показателем степени: -2.5 .

Такое степенное распределение можно рассматривать как частный случай распределения Парето (например, [Arnold, 2015]). Степенные распределения спадают медленнее экспоненциальных, в силу чего часто используются для анализа распределения экстремальных значений. Например, [Tsubouchi and Omura, 2007] использовали распределение Парето для анализа вероятности возникновения сильных магнитных бурь. Они показали, что распределение бурь по интенсивности становится степенным при $Dst < -280 \text{ нТл}$. Это пороговое значение близко к критерию супербури, что подтверждает статистическую обоснованность введения этого отдельного класса бурь. [Nakamura et al., 2015] с помощью распределения Парето анализировали распределение AL -, AU - и AE -индексов и пришли к выводу, что должны существовать предельные значения индексов: $AL \sim -4200 \text{ нТл}$ и $AU \sim 2000 \text{ нТл}$, то есть в западном и восточном электроджете ток должен иметь предельное значение. Они анализировали период с 1996 г. по 2012 г. В нашей работе рассматривается интервал 1991–2019 гг. Самое низкое значение AL -индекса за наш интервал оказалось равно -4141 нТл и пришлось на главную фазу самой мощной магнитной бури (20.11.2003, $Dst_{\min} = -422 \text{ нТл}$).

Примером другого типа распределений, используемых, в том числе, в теории экстремальных значений, является распределение Вейбулла [Weibull, 1951; Coles, 2001]. Вернер и др. [2023] показали, что распределение числа событий с положительной бухтой на средних широтах

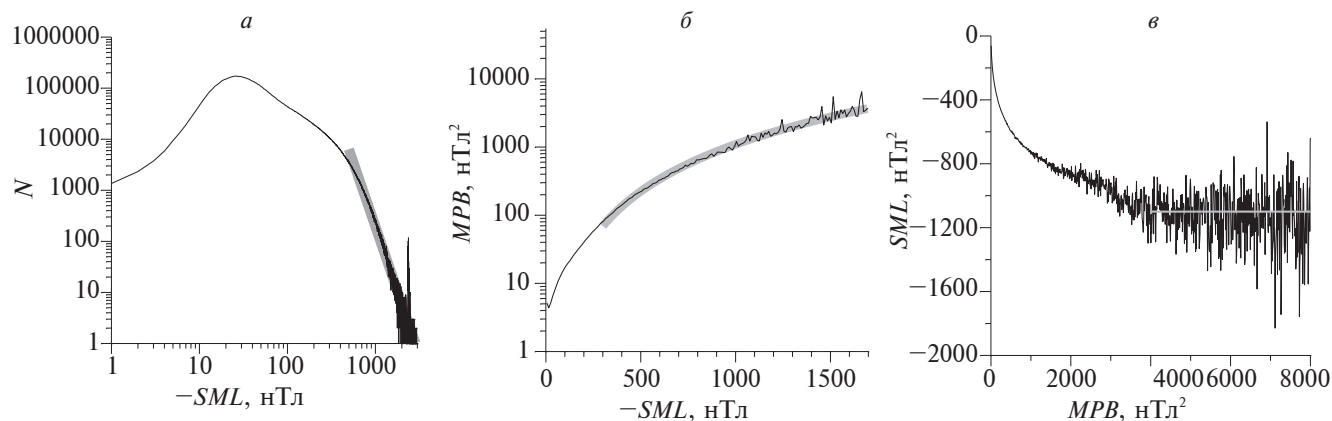


Рис. 3. Распределение $-SML$ -индекса по значениям в двойном логарифмическом масштабе (а), линии регрессии $MPB(SML)$ (б) и $SML(MPB)$ (в). Серыми линиями показаны аппроксимационные зависимости.

в зависимости от локального AL -индекса, определяемого по выбранным станциям сети магнетометров IMAGE (*International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects*) (IL -индекс — IMAGE *electrojet Lower index*), хорошо описываются распределением Вейбулла. В частности, была оценена повторяемость событий с заданными экстремальными значениями IL -индекса.

Мы проанализировали статистическую связь MPB -индекса с другими одноминутными геомагнитными индексами. Для этого были построены линии регрессии MPB -индекса относительно упомянутых в Разделе 2 индексов. Зависимость какой-либо величины Y от величины X проявляется в изменении средних значений Y при изменении X . Для определения этой зависимости массив X разбивался на равномерные отрезки X_i , и на каждом отрезке вычислялось среднее значение Y_i . Аналогично можно определить и зависимость X от Y . Как известно, если прямая функциональная связь отсутствует, то зависимости $Y(X)$ и $X(Y)$ не будут совпадать.

Связь MPB -индекса с индексом SML показывает рис. 3. На рис. 3а показано распределение индекса SML по значениям. По аналогии с рис. 2 график построен в двойном логарифмическом

масштабе, поэтому был взят модуль SML . Хвост распределения в двойном логарифмическом масштабе аппроксимирован прямой линией с наклоном ~ -5.2 (широкая серая полоса на графике). Как видно из рис. 3б, MPB -индекс монотонно растет с увеличением авроральной активности, индикатором которой является индекс SML . Зависимость MPB от модуля SML близка к степенной — аппроксимация показана на рис. 3б для значений $SML < -300$ нТл, показатель степени ~ 2.3 . Обратная зависимость, показанная на рис. 3в, имеет другой вид: SML -индекс сначала уменьшается (растет по модулю) с ростом MPB , затем, при достижении $MPB \sim 4000$ нТл², выходит на горизонтальную асимптоту, равную примерно -1100 нТл (горизонтальный отрезок на графике).

Рис. 4 демонстрирует статистическую зависимость MPB -индекса от геомагнитных индексов, характеризующих возмущения в полярной шапке (рис. 4а, $PC(N)$ -индекс), на средних (рис. 4б, индекс $ASY-H$) и низких (рис. 4в, индекс $SYM-H$) широтах. MPB -индекс сильнее зависит от положительных величин $PC(N)$ -индекса, монотонно увеличиваясь с их ростом. При $PC(N) > 2$ возрастание близко к степенному с показателем степени немного выше двойки (2.35) (показано серой по-

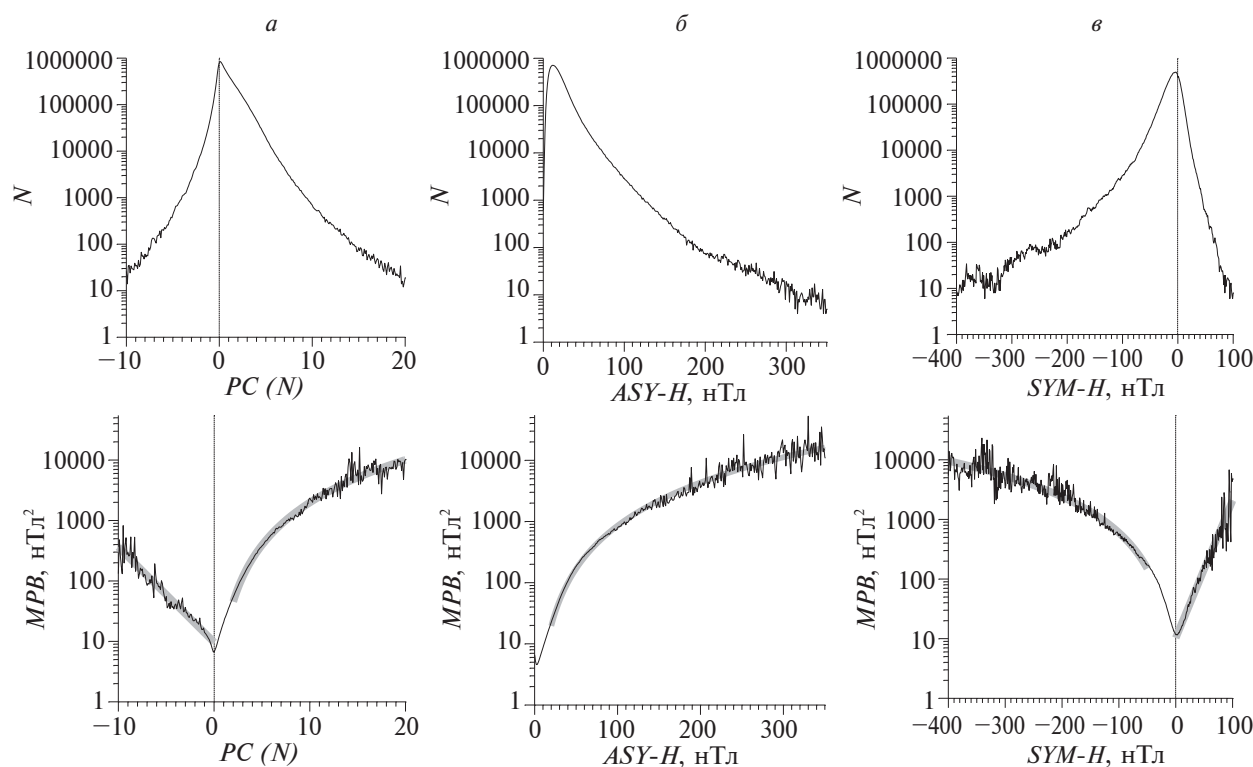


Рис. 4. Распределение индексов по значениям (вверху) и зависимость от них индекса MPB (внизу). Слева (а) для индекса $PC(N)$, в центре (б) для индекса $ASY-H$ и справа (в) для индекса $SYM-H$. Широкие серые линии показаны аппроксимационные зависимости.

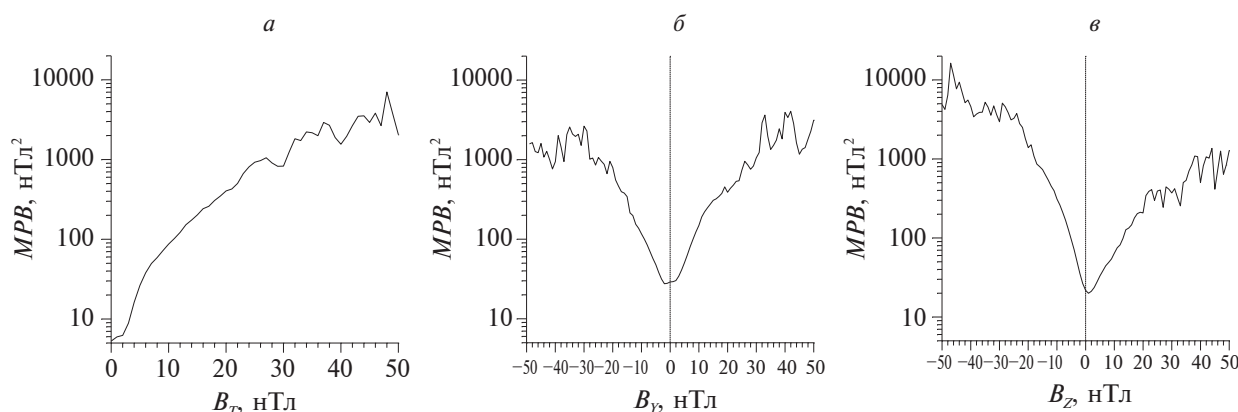


Рис. 5. Зависимость MPV -индекса от модуля ММП (а) и от B_y (б) и B_z (в) компонент ММП в координатной системе GSM .

лосой на правой части рис. 4а). Как известно, положительный $PC(N)$ -индекс характеризует воздействие геоэффективного межпланетного электрического поля; суббури и магнитные бури начинаются, когда PC -индекс превышает пороговое значение ~ 2 мВ/м [Трошичев, 2010]. А отрицательные значения PC -индекса связаны с воздействием на магнитосферу северной компоненты ММП. В этой области рост MPV -индекса близок к экспоненциальному (серая широкая прямая в левой части рис. 4а, для $PC(N) < 0$). MPV -индекс монотонно растет с ростом индекса $ASY-H$, при $ASY-H > 20$ нТл зависимость является степенной (показана серой линией на рис. 4б), причем показатель степени оказался таким же, как при $PC(N) > 2$. MPV -индекс монотонно растет и с ростом модуля индекса $SYM-H$, сильнее завися от его отрицательных значений. При $SYM-H < -50$ нТл рост является степенным, квадратичным, то есть $|SYM - H| \sim \sqrt{MPV}$. При положи-

тельных значениях рост MPV -индекса близок к экспоненциальному. Обе зависимости показаны серыми линиями на рис. 4в.

3.3. Корреляция MPV -индекса с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля

Для анализа будем использовать минутные данные из базы OMNI: магнитуда ММП и величина его компонент в двух декартовых системах координат — GSE и GSM , величина и направление скорости СВ, его плотность, температура и динамическое давление, а также геоэффективная компонента электрического поля и параметр β , равный отношению теплового давления плазмы к магнитному давлению.

Зависимость MPV -индекса от характеристик межпланетного магнитного поля показана на рис. 5. Как видно из рис. 5а, MPV -индекс моно-

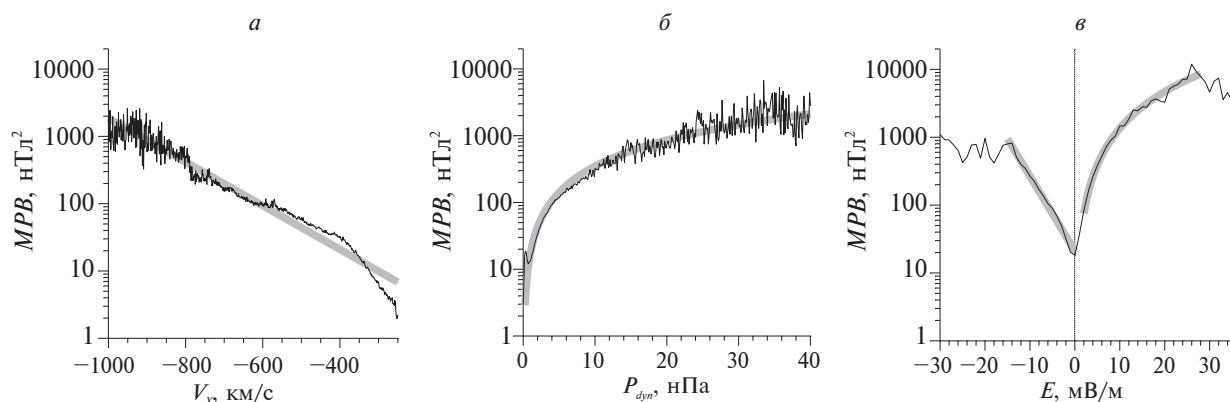


Рис. 6. Зависимость MPV -индекса: (а) от V_x -компоненты скорости СВ, (б) от динамического давления СВ и (в) от геоэффективной компоненты электрического поля E_{YGSM} солнечного ветра. Серыми линиями показаны аппроксимационные зависимости.

тонно растет с ростом модуля ММП B_T , приближаясь к экстремальным значениям при очень больших значениях B_T . Линия регрессии по B_y -компоненте ММП слабо зависит от знака компоненты, то есть график почти симметричен относительно нулевого значения B_y (рис. 5б). MPB -индекс растет с увеличением модуля B_z -компоненты ММП (рис. 5в), но он намного выше при отрицательных значениях B_z — например, MPB в ~ 10 раз больше при $B_z = -30$ нТл, чем при $B_z = +30$ нТл. Рисунок 5 построен в GSM координатной системе. Соответствующие зависимости для компонент ММП в системе GSE приведены в [Любич и др., 2023].

Наиболее влияющими на MPB -индекс плазменными параметрами солнечного ветра являются его скорость V (и радиальная компонента V_x), а также динамическое давление P_{dyn} . Зависимость MPB -индекса от V_x близка к экспоненциальной (аппроксимация показана на рис. 6а серой линией). При изменении скорости в четыре раза, от 250 до 1000 км/с, MPB -индекс меняется почти от нуля до $\sim 2\,000$ нТл². Зависимость MPB -индекса от динамического давления солнечного ветра для значений $P_{dyn} \leq 40$ нПа близка к степенной, с показателем степени 1.3 (серая линия на рис. 6б). MPB -индекс меняется примерно в тех же пределах, что и на рис. 6а. MPB -индекс растет почти линейно с ростом плотности солнечного ветра, но диапазон изменений индекса относительно небольшой — от ~ 30 до ~ 300 нТл², поэтому зависимость MPB -индекса от плотности СВ можно считать слабой. В силу этого при очень больших значениях динамического давления СВ ($P_{dyn} > 40$ нПа), наблюдаемых обычно при высокой плотности и не очень высокой скорости солнечного ветра, зависимость MPB -индекса от P_{dyn} достигает насыщения ($MPB \sim 2\,000$ нТл²) или даже начинается небольшое уменьшение значений MPB -индекса при дальнейшем росте динамического давления солнечного ветра. Однако, этот результат является статистически ненадежным ввиду малого числа таких экстремальных событий. При температуре СВ до 10 000 К имеем $MPB \approx 40$ нТл², затем значение MPB уменьшается почти в два раза, достигая своего минимального значения при $T \approx 14\,000$ К, а затем начинает монотонно, почти линейно, расти, достигая 700 нТл² при температуре миллион градусов Кельвина. MPB -индекс сильно зависит от геоэффективной компоненты электрического поля солнечного ветра ($E_{Y\,GSM}$). Зависимость MPB -индекса от $E_{Y\,GSM}$ (рис. 6в) подобна зависимости от $PC(N)$ -индекса (рис. 4а). По аналогии с рис. 4а в левой части рис. 6в, для $E_{Y\,GSM}$ от -15 мВ/м до 0, показана экспоненциальная ап-

проксимация, а в правой, для $E_{Y\,GSM}$ от 2 до 30 мВ/м — степенная. MPB -индекс практически не зависит от величины плазменной β .

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В разделе 3.1. было показано, что все случаи наблюдения экстремально больших значений MPB -индекса были во время развития сильных (-250 нТл $< Dst_{min} \leq -100$ нТл) и очень сильных ($Dst_{min} \leq -250$ нТл) магнитных бурь (супербурь). Во время магнитных бурь происходит расширение и смещение овала полярных сияний к экватору. В это время средние широты, где расположены магнитные станции, используемые для вычисления MPB -индекса, по своим свойствам становятся авроральными или близкими к ним, что и объясняет обнаруженную зависимость.

Во время двух сильных магнитных бурь, приведенных в табл. 2 (01.10.2002 г. и 26.02.1992 г.), даже минимальные одномоментные значения индекса $SYM-H$ оказывались больше среднечасового значения Dst_{min} . Можно предположить, что это связано с различиями в списке используемых станций, в методике определения базовых линий и так далее. Сопоставление Dst и $SYM-H$ индексов проводится, например, в [Wanliss and Showalter, 2006].

Найденная в разделе 3.2. корреляционная связь MPB -индекса, введенного для анализа проявлений суббуревой активности на средних широтах, с возрастанием отклонения от спокойного уровня других геомагнитных индексов может быть объяснена следующим образом. Размеры овала полярных сияний зависят от магнитной активности. В спокойных условиях он похож на кольцо шириной $\sim 2^\circ$. При увеличении магнитной активности размеры овала увеличиваются, причем наиболее значительно это наблюдается на ночной стороне, где расширение идет как к полюсу, так и к экватору. При больших возмущениях ширина овала может превышать 10° [Старков, 2000], что может оказать влияние на магнитные измерения на разных широтах. Были определены линии регрессии индексов $PC(N)$, AL , \sqrt{MPB} , $ASY-H$ и $SYM-H$ по отношению к SML -индексу. Полученные зависимости оказались близки к линейным. Для корня из MPB имеем: $\sqrt{MPB} \approx -0.029 \times SML - 1.09$, для остальных индексов соответствующие выражения приведены в [Любич и др., 2023]. Коэффициент корреляции R между \sqrt{MPB} и SML равен -0.79 . Отметим, что модуль коэффициента корреляции максимален между индексами AL и SML ($R \approx 0.95$), а минимален — между индексами $SYM-H$ и SML ($R \approx 0.60$). Чем ближе модуль коэффициента корреляции к единице, тем ближе

зависимость к линейной. С этим результатом, близостью зависимостей к линейным, согласуется полученная выше степенная, почти квадратичная, аппроксимационная зависимость индекса *MPB* от индексов *PC(N) > 2* (показатель степени ~ 2.4), *SML* (2.3), *ASY-H* (2.3) и *SYM-H* (2.0). Разница в динамике индексов *ASY-H* и *SYM-H* во время магнитных бурь обсуждается в [Дремухина и др., 2020].

Экстремально большие значения межпланетного магнитного поля, как правило, связаны с крупномасштабными геоэффективными структурами солнечного ветра — например, с магнитными облаками или, как в примере на рис. 1, с распространением по невозмущенному солнечному ветру коронального выброса массы. Воздействие таких структур на магнитосферу Земли может вызвать развитие геомагнитных бурь, которые, в свою очередь, могут вызвать появление очень больших значений *MPB*-индекса (см. Раздел 3.1.).

Более слабую (степенную) зависимость *MPB*-индекса от динамического давления солнечного ветра (рис. 6б) по сравнению с экспоненциальной зависимостью от его скорости (рис. 6а), несмотря на пропорциональность динамического давления квадрату скорости СВ, можно объяснить тем, что статистически величина динамического давления солнечного ветра слабо растет с увеличением его скорости. При высокой скорости солнечного ветра он, как правило, имеет низкую плотность. Для периода минимума 11-летнего цикла солнечной активности слабая зависимость динамического давления от скорости солнечного ветра была показана, например, в работе Любич и др. [2004].

5. ВЫВОДЫ

Проанализирована связь среднеширотного индекса *MPB* (*Mid-latitude Positive Bays*) с геомагнитной активностью и параметрами солнечного ветра. Получены следующие результаты:

- Все экстремально большие значения *MPB*-индекса наблюдаются во время сильных и очень сильных ($Dst_{min} < -100$ нТл) геомагнитных бурь. Все экстремально сильные ($Dst_{min} < -250$ нТл) геомагнитные бури (супербури) сопровождаются экстремально высокими значениями *MPB*-индекса.

- *MPB*-индекс статистически возрастает с увеличением геомагнитной активности на любой широте, поскольку существует корреляция между геомагнитной активностью на разных широтах.

- *MPB*-индекс статистически возрастает с ростом как магнитуды межпланетного магнитного

поля, так и модуля любой из его компонент. Для *Bz*-компоненты ММП сильнее является зависимость от ее южной составляющей.

- Сильнее проявляется зависимость *MPB*-индекса от скорости солнечного ветра. Также сильна зависимость от динамического давления и от величины геоэффективной компоненты электрического поля СВ. Зависимость *MPB*-индекса от плотности и температуры солнечного ветра является слабой.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность создателям баз данных IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>), SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), INTERMAGNET (<https://intermagnet.github.io/>) за возможность их использования в работе. Мы благодарны коллективам, создавшим и поддерживающим работу баз данных World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>) и OMNI (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) и обеспечивающим свободный доступ к данным. Мы также благодарим за возможность использования индексов *SMU* и *SML*.

Авторы выражают признательность Xiangning Chu за любезно предоставленную возможность использовать значения *MPB*-индекса.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа Дэспирак Ирины Вадимовны и Любича Андриаса Алексеевича выполнена в рамках Государственного задания ПГИ по теме «Динамические процессы в системе “солнечный ветер — магнитосфера — ионосфера” и их влияние на высокоширотную ионосферу» (FMES-2022-002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вернер Р., Гинева В., Дэспирак И.В., Любич А.А., Сецко П.В., Атанасов А., Божилова Р., Райкова Л., Валева Д. Статистические исследования авроральной активности и возмущений геомагнитного поля на средних широтах // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 63. № 4. С. 520–533. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600727>
- Werner R., Guineva V., Despirak I.V., Lubchich A.A., Setsko P.V., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D. Statistical Studies of Auroral Activity and Perturbations of the Geomagnetic Field at Middle Latitudes // Geomagnetism and Aeronomy. V. 63. № 4. P. 473–485. 2023. <https://doi.org/10.1134/S0016793223600303>
- Дремухина Л.А., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Различия в динамике асимметричной части магнитного возмущения в периоды магнитных бурь, индуцированных разными межпланетными источниками // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 60. № 6. С. 727–739. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020060036>

- *Dremukhina L.A., Yermolaev Y.I., Lodkina I.G.* Differences in the dynamics of the asymmetrical part of the magnetic disturbance during the periods of magnetic storms induced by different interplanetary sources // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 60. № 6. P. 714–726. 2020. <https://doi.org/10.1134/S0016793220060031>
- *Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Любчик А.А., Сецко П.В., Громова Л.И., Вернер Р.* Глобальное развитие суперсуббури 28 мая 2011 года // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 62. № 3. С. 325–335. 2022. doi 10.31857/S0016794022030063
- *Despirak I.V., Kleimenova N.G., Lyubchich A.A., Setsko P.V., Gromova L.I., Werner R.* Global Development of the Supersubstorm of May 28, 2011 // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 62. № 3. P. 199–208. 2022. <https://doi.org/10.1134/S0016793222030069>
- *Любчик А.А., Дэспирак И.В., Вернер Р.* Зависимость МРВ-индекса от геомагнитной активности и характеристик солнечного ветра // *Proc. XLVI Annual Seminar. Apatity*. P. 42–47. 2023. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2023.46.009>
- *Любчик А.А., Дэспирак И.В., Яхнин А.Г.* Связь давления и скорости солнечного ветра в минимуме одиннадцатилетнего цикла // *Геомагнетизм и аэрoномия*. Т. 44. № 2. С. 143–148. 2004.
- *Lyubchich A.A., Despirak I.V., Yakhnin A.G.* Correlation between the solar wind pressure and velocity at a minimum of the 11-year cycle // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 44. № 2. P. 143–148. 2004.
- *Старков Г.В.* Планетарная динамика аврорального свечения / *Физика околоземного космического пространства*. Глава 3, 4. С. 409–499. Апатиты: изд. КНЦ РАН, 706 с. 2000.
- *Трошичев О.А.* РС-индекс – наземный индикатор поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра // *Проблемы Арктики и Антарктики*. № 2 (85). С. 102–116. 2010.
- *Arnold B.C.* Pareto Distribution / In *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online* (eds N. Balakrishnan, T. Colton, B. Everitt, W. Piegorisch, F. Ruggeri and J.L. Teugels). 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat01100.pub2>
- *Chu X.* Configuration and generation of substorm current wedge. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 2015. (A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Geophysics and Space Physics).
- *Coles S.* An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values / Springer, London. 2001.
- *Feldstein Y.I.* Modelling of the magnetic field of magnetospheric ring current as a function of interplanetary medium parameters // *Space Sci. Rev.* V. 59. P. 83–165. 1992. <https://doi.org/10.1007/BF01262538>
- *Fu H., Yue C., Zong Q.-G., Zhou X.-Z., Fu S.* Statistical characteristics of substorms with different intensity // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 126. e2021JA029318. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- *Gonzalez W.D., Echer E., Tsurutani B.T., de Gonzalez A.L.C., Dal Lago A.* Interplanetary origin of intense, superintense and extreme geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 158. № 1. P. 69–89. 2011. <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9715-2>
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T.* Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($Dst < -100$ nT) // *Planetary and Space Science*. V. 35. № 9. P. 1101–1109. 1987. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90015-8)
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clúa de Gonzalez A.L.* Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* V. 88. № 3–4. P. 529–562. 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005160129098>
- *Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lepping R.P., Schwenn R.* Interplanetary phenomena associated with very intense geomagnetic storms // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V. 64. № 2. P. 173–181. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00082-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00082-7)
- *Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D., Gierloev J.W.* Supersubstorms ($SML < -2500$ nT): Magnetic storm and solar cycle dependences // *J. Geophys. Res.* V. 121. P. 7805–7816. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA021835>
- *Iyemori T., Araki T., Kamei T., Takeda M.* Mid-latitude Geomagnetic Indices “ASY” and “SYM” (Provisional). № 3. 1992 // *Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism Faculty of Science Kyoto University*, ISSN 0918-5763, 1994.
- *Mac-Mahon R.M., Gonzalez W.D.* Energetics during the main phase of geomagnetic superstorms // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14199–14207. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA01151>
- *McPherron L.R., Chu X.* The Mid-Latitude Positive Bay and the MPB Index of Substorm Activity // *Space Sci. Rev.* V. 206. P. 91–122. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0316-6>
- *McPherron L.R., Chu X.* The midlatitude positive bay index and the statistics of substorm occurrence // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 123. № 4. P. 2831–2850. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024766>
- *McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P.* Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968: 9. Phenomenological model for substorms // *J. Geophys. Res.* V. 78. № 16. P. 3131–3149. 1973. <https://doi.org/10.1029/JA078i016p03131>
- *Meng X., Tsurutani B.T., Mannucci A.J.* The Solar and Interplanetary Causes of Superstorms (Minimum $Dst \leq -250$ nT) During the Space Age // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 124. № 6. P. 3926–3948. 2019. <https://doi.org/10.1029/2018JA026425>
- *Nakamura M., Yoneda A., Oda M., Tsubouchi K.* Statistical analysis of extreme auroral electrojet indices // *Earth, Planets and Space*. V. 67. Art. 153. 2015. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0321-0>
- *Sergeev V.A., Shukhtina M.A., Stepanov N.A., Rogov D.D., Nikolaev A.V., Spanswick E., Donovan E., Raita T., Kero A.* Toward the reconstruction of substorm-related dynamical

- pattern of the radiowave auroral absorption // *Space Weather*. V. 18. № 3. e2019SW002385. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019SW002385>
- Troshichev O.A., Andrezen V.G. The relationship between interplanetary quantities and magnetic activity in the southern polar cap // *Planet. Space Sci.* V. 33. № 4. P. 415–419. 1985. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(85\)90086-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(85)90086-8)
- Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerström S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index // *Planet. Space Sci.* V. 36. № 11. P. 1095–1102. 1988. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3)
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Lee Y.T. Great geomagnetic storms // *Geophysical Research Letters*. V. 19. № 1. P. 73–76. 1992. <https://doi.org/10.1029/91GL02783>
- Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. Extremely intense ($SML \leq -2500$ nT) substorms: isolated events that are externally triggered? // *Annales Geophysicae*. V. 33. P. 519–524. 2015. <https://doi.org/10.5194/angeo-33-519-2015>
- Tsubouchi K., Omura Y. Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events // *Space Weather*. V. 5. № 12. S12003. 2007. <https://doi.org/10.1029/2007SW000329>
- Tsyganenko N.A., Andreeva V.A., Sitnov M.I., Stephens G.K., Gjerloev J.W., Chu X., Troshichev O.A. Reconstructing Substorms via Historical Data Mining: Is It Really Feasible? // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. V. 126. № 10. e2021JA029604. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029604>
- Wanliss J.A., Showalter K.M. High-resolution global storm index: *Dst* versus *SYM-H* // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A2. A02202. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011034>
- Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.-Trans. ASME*. V. 18. № 3. P. 293–297. 1951. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>
- Werner R., Guineva V., Atanassov A., Bojilova R., Raykova L., Valev D., Lubchich A., Despirak I. Calculation of the horizontal power perturbations of the Earth surface magnetic field / *Proceedings of the Thirteenth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”*, September, 2021, Book of Proceedings, <https://doi.org/10.31401/WS.2021.proc>, p. 159–165.
- Zong Q.-G., Yue C., Fu S.-Y. Shock induced strong substorms and super substorms: Preconditions and associated oxygen ion dynamics // *Space Sci. Rev.* V. 217. № 33. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00806-x>

Statistical Studies of the Relationship Between the Amplitude of Positive Magnetic Bays at Mid Latitudes, Geomagnetic Activity and Solar Wind Parameters

A. A. Lubchich^{1,*}, I. V. Despirak^{1,**}, R. Werner^{2,***}

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora, Bulgaria*

*e-mail: lubchich@pgia.ru

**e-mail: despirak@gmail.com

***e-mail: rolwer52@yahoo.co.uk

During the expansion phase of the substorm, the poleward jump of the aurora (breakup) and the expansion of the auroral bulge are observed. The expansion is accompanied by a negative magnetic bay under the aurora and a positive magnetic bay at the middle latitudes. The amplitude of the negative bay is characterized by the auroral *AL*-index. To characterize the positive bay, the *MPB*-index (*Mid-latitude Positive Bay index*) was previously proposed. The paper examines the statistical relationship of the *MPB*-index with the geomagnetic activity at different latitudes and with the parameters of the solar wind and the interplanetary magnetic field. It is shown that all extremely large values of the *MPB*-index (above 10.000 nT²) are observed during strong geomagnetic storms (when the *Dst*-index drops below –100 nT), and all extremely strong geomagnetic storms (when the *Dst*-index drops below –250 nT) accompanied by extremely high *MPB*-index values. Statistically, the *MPB*-index increases with the increasing of geomagnetic activity at any latitudes. The *MPB*-index, on average, increases with the increasing of the magnitude of the interplanetary magnetic field and any of its components. But for the *B_z*-component, large values of the *MPB*-index are observed by its southward direction. For plasma parameters of the solar wind, the *MPB*-index increases most strongly with the increasing of the solar wind speed. There is also the strong dependence on the dynamic pressure and on the magnitude of the *E_y*-component of the solar wind electric field. However, the *MPB*-index weakly depends on solar wind density and temperature.

Keywords: geomagnetic indices, magnetic storms, solar wind, interplanetary magnetic field, statistical analysis

УДК 550.384

ПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА ДНЕВНЫХ ВЫСОКОШИРОТНЫХ МАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ DMSP

© 2025 г. В. В. Сафаргалеев*

Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (С-Пб ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: Vladimir.safargaleev@pgia.ru

Поступила в редакцию 21.03.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Дневные высокоширотные геофизические явления несут наземному наблюдателю информацию о процессах на дневной магнитопаузе и/или в примыкающих к ней магнитосферных доменах. Предполагается, что эти явления инициируются изменением параметров межпланетной среды и поэтому могут использоваться как инструмент для исследования способов проникновения энергии солнечного ветра через магнитопаузу. К таким явлениям относятся магнитные импульсы, представляющие собой изолированный пик затухающих колебаний из 2–3 всплесков с периодом следования 8–12 минут. По данным скандинавской сети магнитометров IMAGE исследовано восемь событий магнитных импульсов, для которых спутники DMSP пролетали над областью наблюдений во время, незадолго до и сразу после импульса, пересекая при этом границы нескольких доменов. По наземным данным и данным спутников DMSP показано, что ассоциируемый с импульсами втекающий продольный ток располагается вдали от магнитопаузы. Это означает, что импульс не может рассматриваться как ионосферный след пересоединившейся силовой трубки (*flux transfer event*, FTE) и/или как *travelling convection vortices*, TCV. На большей статистике установлено, что импульсу предшествуют заметные изменения B_y - и B_z -компонент ММП, в то время как вклад в генерацию магнитного импульса быстрого изменения давления и скорости солнечного ветра, а также B_x -компоненты ММП, не очевиден. Обсуждается возможный сценарий инициации магнитного импульса вариациями ММП.

Ключевые слова: магнитные импульсы, магнитосферные домены, эквивалентные ионосферные токи

DOI: 10.31857/S0016794025010072, **EDN:** ADXGUN

1. ВВЕДЕНИЕ

Ключевым звеном формирования космической погоды является поступление энергии и вещества из солнечного ветра внутрь магнитосферы. Широко распространена точка зрения о том, что проникновение энергии и вещества происходит преимущественно через ту часть дневной магнитопаузы, которая подошвами формирующих ее силовых линий геомагнитного поля “опирается” на высокоширотную ионосферу в окрестности полуденного меридиана. Это делает мониторинг процессов в каспе и в примыкающих к магнитопаузе магнитосферных доменах — низкоширотном плазменном слое (*llbl*), пограничном плазменном слое (*bps*) и централь-

ном плазменном слое (*cps*) важным элементом исследования механизмов реализации солнечно-земных связей. Сопряженность этих областей с высокоширотной ионосферой позволяет исследовать процесс взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой через ряд дневных явлений, наблюдаемых с земной поверхности. Основываясь на данных спутников DMSP [Newell and Meng, 1992], можно утверждать, что в дневные часы и при разных уровнях геомагнитной активности под проекцией всех вышеупомянутых магнитосферных образований “проходят” магнитные станции сети IMAGE, расположенные на арх. Шпицберген, у его южного побережья и на Медвежьем острове.

Начиная с 80-х годов прошлого века, в качестве одного из таких наземных явлений рассматриваются магнитные импульсы (*magnetic impulse events*, MIEs). MIEs представляют собой изолированные затухающие всплескообразные возмущения магнитного поля, регистрируемые наземными магнитометрами на широте каспа (см., например, [Lanzerotti et al., 1986]). На начальном этапе исследований интерес к этому явлению был продиктован тем, что MIEs интерпретировались как наземный признак спорадического пересоединения на дневной магнитопаузе — так называемые события переноса потока, FTE ([Goertz et al., 1985], [Lanzerotti et al., 1986] и ссылки в них). Как альтернативу пересоединению, Sibeck [1992] предложил поверхностные волны на дневной магнитопаузе, генерируемые в результате воздействия на магнитосферу фронта медленной ударной волны, на котором плазменное давление быстро меняется (*sudden impulses*, SI).

В дневные часы в европейской части восточного полушария магнитопауза (граница между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями) статистически проектируется в северную часть Шпицбергена [Newell and Meng, 1992], где нет густой сети наблюдений. Случаи, когда граница спускается настолько низко, что попадает, например, в поле зрения радара STARE над северным побережьем Норвегии [Goertz et al., 1985], являются экзотическими. Магнитные импульсы являются редкими, но не экзотическим явлением. Поэтому более приближенной к реальности представляется гипотеза Sibeck et al. [2003] о том, что магнитные импульсы отражают в ионосфере развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на границе обращения конвекции, которую считают внутренней границе *llbl*. Отметим, что работа Clauer et al. [1997], на которую ссылается Sibeck et al. [2003], была посвящена генерации пульсаций с периодом, близким к периоду следования всплесков в магнитном импульсе. Однако, на примере двух случаев Yahnin et al. [1997] показали, что связанный с MIEs продольный ток находится глубже в магнитосфере, чем внутренняя граница *llbl*, а именно, внутри центрального плазменного слоя, *cps*. Используя иную терминологию для обозначения областей высыпаний, Воробьев [2004] пришел к заключению, что распространяющиеся конвективные вихри (TCV), которые относят к категории “магнитные импульсы”, генерируются в приполюсной части диффузной авроральной зоны, то есть так же глубоко в магнитосфере. Вопрос, в каких магнитосферных доменах расположен источник MIEs, и сегодня остается дискуссионным.

Вероятность обнаружения магнитных импульсов имеет максимум в интервале 08–10 MLT (05–07 UT для высокоширотных станций сети IMAGE), и, как отмечалось в работе [Воробьев и др., 1993], их появление не связано с поворотом *Bz*-компоненты ММП к югу. В большинстве исследованных в этой работе случаев магнитные импульсы наблюдались также в средних и низких широтах, что, по мнению авторов, указывает деформацию дневной магнитосферы как причину генерации MIEs. К такому же заключению пришли в работе [Yahnin et al., 1995] на основе анализа серии из нескольких событий, наблюдавшихся в течение одного трехчасового интервала. Четыре случая, когда инициируемые SI явления TCV можно было связать с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца на внутренней границе *llbl* представлены в работе [Sibeck et al., 2003].

Один случай TCV, причиной которого был внезапный импульс, всесторонне исследован в недавней работе Kim et al. [2017]. Как отмечалось выше, TCV относят к категории магнитных импульсов. TCV и сопутствующие ему явления наблюдались большим количеством инструментов как на земной поверхности (магнитометр, радары, камера и сканирующий интерферометр полного обзора неба SCANDI), так и на спутниках (NOAA и DMSP). Было показано, что импульс сопровождается усилением высыпаний, увеличением температуры плазмы в ионосфере, всплеском магнитной активности в герцовом диапазоне. Авторам удалось также выделить его эффект в термосфере. Отмечается, что центр конвективного вихря располагался вблизи каспа. Однако интерпретация яркого пятна посреди других форм сияний как результат высыпаний из каспа представляется малообоснованным.

Интерпретация магнитных импульсов в рамках SI не согласуется с результатами работы Bering et al. [1990], согласно которым магнитные импульсы связаны с сильными изменениями направления ММП на фоне почти постоянного давления солнечного ветра. Согласно статистическим исследованиям Konik et al. [1994], 50–70% событий магнитных импульсов связано с вариациями *Vu*- и *Bz*-компонент ММП, в то время как лишь 15–30% событий следовали за изменением давления солнечного ветра.

Позже Moretto et al. [2004] отметили, что импульсы чаще появляются при высокоскоростном потоке солнечного ветра, но в целом генерация импульсов определяется широким диапазоном условий в межпланетной среде.

Известно, что в переходной области в результате набегания солнечного ветра на магнитопаузу

зу образуется магнитный барьер, в котором магнитное поле и концентрация (плазменное давление) взаимосвязаны. Вариации ММП порождают вариации плазменного давления, которые, подобно SC или SI, и воздействуют на магнитопаузу. В результате магнитопауза становится источником вторичных волн магнитозвукового типа. Такое качественное рассуждение подтверждается результатами численного моделирования [Lin et al., 1996]. Авторы предлагают рассматривать эти вторичные волны как причину высокоширотных магнитных импульсов. Аналогичное предположение было сделано в работе [Vorobjev et al., 1999].

Пик исследований MIEs приходится на конец 20 – начало 21 столетий. Однако вопрос о природе магнитных импульсов (или TCV как одной из форм магнитного импульса) остается дискуссионным и сегодня. Цель работы – предложить ответы на следующие два принципиально важных для понимания природы MIEs вопроса. Первый вопрос, который возникает при попытке связать события магнитных импульсов с процессами взаимодействия солнечного ветра с магнитопаузой, это в каком магнитосферном домене находится их источник. Ответ на него покажет, насколько далеко от магнитопаузы находится источник магнитного импульса. Второй вопрос – вариации каких параметров межпланетной среды можно связать с запуском магнитного импульса, и каким образом эти вариации приводят к появлению источника магнитных импульсов в отдаленных от магнитопаузы областях магнитосферы.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Поиск магнитных импульсов осуществлялся по данным сети магнитометров IMAGE. Список используемых для этого станций (а также трех низкоширотных станций) с указанием кода, географических и геомагнитных координат приводится в табл. 1. Временной интервал поиска составлял 06:00–12:00 UT, что для указанных в табл. 1 станций IMAGE соответствует интервалу ~08:30–14:30 MLT. Упомянутый выше интервал наиболее вероятного обнаружения MIEs лежит внутри интервала поиска.

Спутники серии DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) летают на высоте 840 км от поверхности Земли по околополярным орбитам с периодом обращения 101 минута, что дает значение скорости спутника примерно 7.5 км/с. При такой скорости спутники пролетают над Шпицбергом в течение ~2 мин. При длительности импульса от 5 до 25 мин, есть ненулевая вероятность найти события, когда спутник летит над станциями во время импульса, а не только до или

после него. Спутники оснащены, в частности, направленным в зенит детектором частиц (десятиканальный спектрометр SSJ/4), проводящим измерения высыпавшихся частиц в диапазоне энергий от 30 эВ до 30 кэВ с временным разрешением 1 с. Для определения границ авроральных вторжений использовался автоматический алгоритм, предложенный в работе [Newell et al., 1991]. Алгоритм был апробирован в ряде исследований для предполуденных высыпаний (см., например, [de la Beaujardiere et al., 1993]). В частности, отмечается хорошее согласие автоматического и визуального (по спектрограммам) способа определения границы *bps/cps*. Отметим также, что согласно статистическим исследованиям (см. рис. 2 в работе [Newell and Meng, 1992]), в интервале 9–12 MLT границы магнитосферных доменов ориентированы преимущественно вдоль геомагнитной широты. К этому MLT-интервалу относятся анализируемые в работе события магнитных импульсов.

Данные DMSP в виде спектрограмм с указанием границ доменов получены в *on-line* режиме на сайте университета Дж. Хопкинса (адрес в Интернете <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/spectrogram/index.html>). На спектрограммах приводятся координаты подспутниковой точки (см., например, рис. 2a), по которым при известной высоте спутника рассчитывалась проекция спутника вдоль силовой линии на высоту *E*-слоя ионосферы. Для таких высот при проектировании достаточно пользоваться только IGRF-моделью силовой линии. Далее на всех рисунках приводится проекция траектории спутника на высоту 100 км. В начале исследования спектрограммы были доступны до 2015 года.

Для уточнения положения “подошвы” продольного тока, с появлением которого мы связываем магнитные импульсы (см. далее раздел 3), рассчитывалось 1-D и 2-D распределение интенсивности ионосферного эквивалентного тока над сетью IMAGE. Расчет проводился в *on-line* режиме на сайте сети по программе ECLAT. В качестве базовой линии бралось значение геомагнитного поля в интервале непосредственно перед началом магнитного импульса. При таком подходе распределение эквивалентного тока отражает возмущение тока, магнитный эффект которого и есть магнитный импульс. Для минимизации влияния не связанных с магнитными импульсами возмущений, анализировались преимущественно изолированные события, то есть события с относительно спокойной геомагнитной предисторией. И даже в этих случаях, из-за неотчетливого начала магнитного импульса, погрешность в его опре-

Таблица 1. Координаты магнитных станций

Код	Обсерватория	Географические координаты		Геомагнитная широта, ° N	MLT, ч
		широта, ° N	долгота, ° E		
NAL	Ny Ålesund	78.92	11.95	75.25	UT+2.7
LYR	Longyerbyen	78.20	15.82	75.12	UT+2.8
HOR	Hornsund	77.00	15.60	74.13	UT+2.6
HOP	Hopen Island	76.51	25.01	73.06	UT+2.9
BJN	Bear Island	74.50	19.20	71.83	UT+2.7
SOR	Sørøya	70.54	22.22	67.70	UT+2.7
SOD	Sodankylä	67.37	26.63	63.92	UT+2.3
NUR	Nurmijärvi	60.50	24.65	56.89	UT+1.8
ABG	Alibag	18.64	72.87	10.69	
AAE	Addis Ababa	9.03	38.77	5.4	
HER	Hermanus	-34.42	19.23	34.03	

делении составляла ± 2 минуты. Как следствие, при дальнейшем сопоставлении импульса с вариациями параметров межпланетной среды у лобовой точки фронта ударной волны мы не смогли получить надежную статистику по такому важному параметру, как время задержки отклика магнитосферы в форме MIEs на изменения ММП.

Для анализа ситуации в межпланетной среде мы использовали данные спутников WIND и ACE, осуществляющих мониторинг солнечного ветра на большом удалении от Земли, а также спутников THEMIS (*Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms*) в интервалы, когда спутники находились за пределами магнитосферы со стороны Солнца. При сопоставлении с магнитными импульсами учитывалось время распространения возмущения от спутника до лобовой точки на фронте ударной волны. Координаты спутников, а также их расстояние до фронта ударной волны, оценивались при помощи сервиса *4D Orbit Viewer* (<https://sscweb.gsfc.nasa.gov/tipsod/>).

В ряде случаев пришлось прибегнуть к помощи сервиса OMNI (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>), осуществляющего пересчет возмущения в солнечном ветре на лобовую точку ударной волны в режиме онлайн. Имея в виду статистические исследования Ridley [2000], показавшие, что неопределенность пересчета сервисом OMNI может составлять 8–25 мин, пред-

почтение отдавалось анализу непосредственных спутниковых измерений.

Магнитные импульсы не являются исключительным явлением. Согласно [Воробьев и др., 1993], в среднем за день обнаруживается 0.5 импульса. Опыт работы над статьей дает меньшую цифру: 2–4 события в месяц. Жесткие критерии отбора (удачные пролеты спутников DMSP и спокойная геомагнитная предистория импульса) привели к тому, что за период 2010–2014 гг. совместно со спутниковыми измерениями анализу были подвергнуты только 8 случаев. В разделе 3 дано подробное описание двух случаев. Для анализа магнитных импульсов в контексте ситуации в межпланетной среде база данных составила 22 случая. Результаты этого анализа приводятся в разделе 4.

3. ПОЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА МАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА ОТНОСИТЕЛЬНО ГРАНИЦ МАГНИТОСФЕРНЫХ ДОМЕНОВ

В этом разделе приводится подробный анализ двух из восьми событий, для которых имеются данные о характере высыпаний над областью наблюдения. Привлечение спутниковых данных позволило приблизительно оценить положение станций IMAGE и предполагаемого источника импульса относительно границ магнитосферных доменов.

3.1. Магнитный импульс 05.03.2013 г.

Источник в виде токового слоя
на границе bps/cps

Импульс зарегистрирован на меридиональной цепочке станций NAL-SOD сети IMAGE около 06:09 UT 5 марта 2013 г. Изменение формы импульса прослеживается на рис. 1а. На трех верхних магнитограммах станций, расположенных на Шпицбергене, а также на станции HOR южнее Шпицбергена, импульс начинается с увеличения X -компоненты геомагнитного поля. Далее будем называть такие отклонения положительной вариацией имея в виду, что отклонение положительное по отношению к полю перед началом импульса. Положительная вариация вызвана усилением эквивалентного ионосферного тока восточного на-

правления. На магнитограммах станций, расположенных южнее Шпицбергена (BJN, SOR и SOD), импульс начинается как экскурс X -компоненты в сторону уменьшения (отрицательная вариация), что соответствует усилению западного электроджета. Далее для краткости мы будем опускать характеристику “возмущенный” применительно к магнитному полю, ионосферному и продольному токам, имея в виду, что речь идет не об абсолютных, а возмущенных значениях этих параметров.

Распределение ионосферных эквивалентных токов, соответствующее магнитному импульсу, представлено на рис. 1б и в. (Цветные рисунки доступны в электронной версии статьи.) Напомним, что эквивалентные токи текут только в пло-

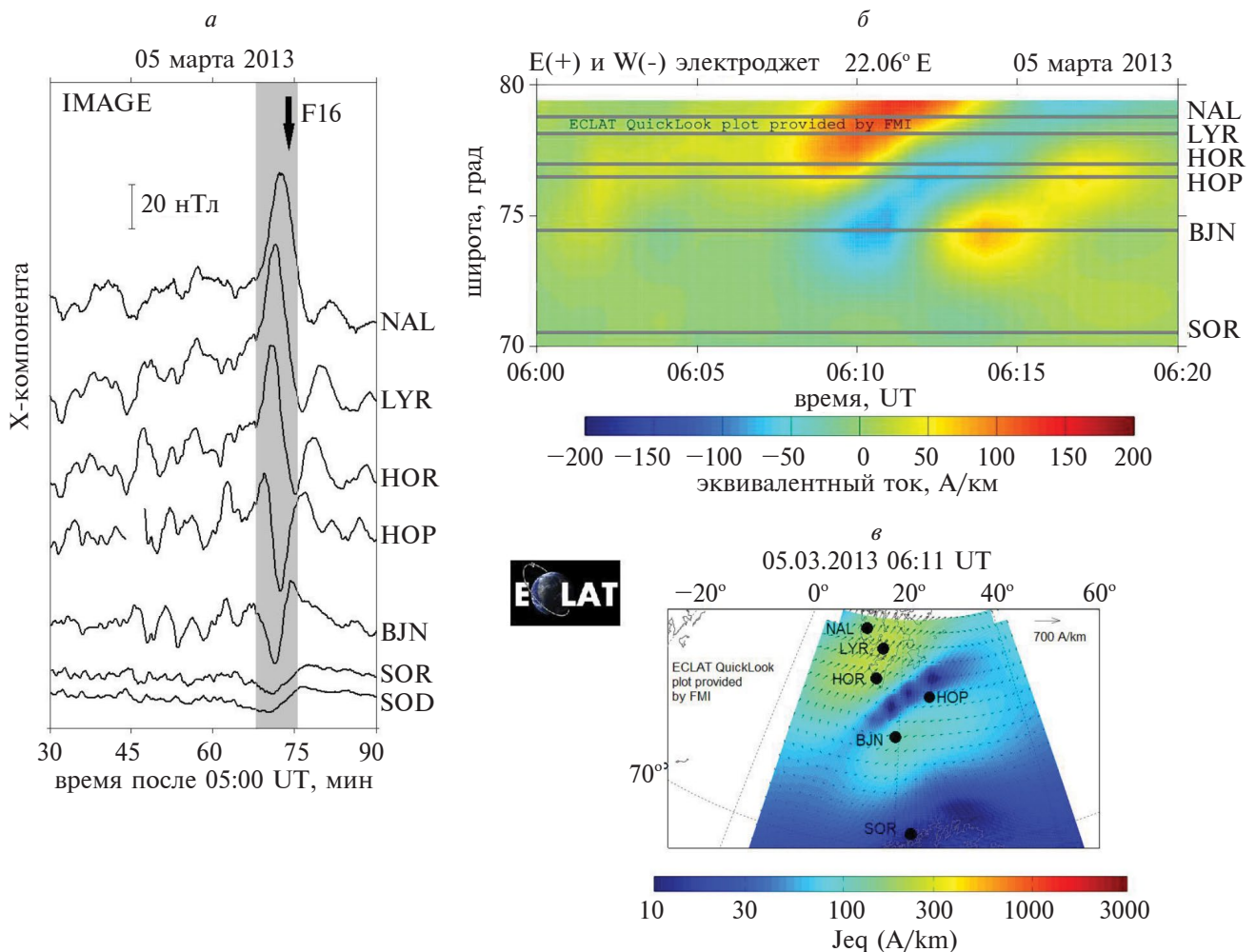


Рис. 1. (а) – Магнитный импульс на цепочке станций IMAGE (выделен серым). Момент пролета спутника F16 показан стрелкой. (б) – 1D распределение эквивалентного ионосферного тока, показывающее динамику восточного (+) и западного (-) токов магнитного импульса на меридиане 22° E. (в) – Вихревой характер распределения эквивалентного тока. Направление тока показано стрелками.

скости ионосферы (предположительно на высоте 100 км) и создают на земной поверхности то же магнитное поле, что и реальная система ионосферных токов. Система эквивалентных токов не является реальной токовой системой, поскольку не включает в себя продольные токи.

На диаграмме на рис. 1б каждый вертикальный профиль отражает распределение тока вдоль меридиана, усредненное за 10-ти секундный интервал. Положительные значения соответствуют току восточного направления. На цветном рисунке в электронной версии статьи интенсивность восточного электроджета передается цветом в диапазоне от зеленого до коричневого. В момент начала импульса в 06:09 UT область перехода от западного к восточному электроджету располагалась между станциями НОР и ВJN (рис. 1б). На цветном рисунке место, где происходит обращение направления тока с восточного на западное, хорошо видно как переход от красных цветов к синим через зеленый. Серыми горизонтальными линиями показаны широты станций.

На карте 2D-распределения эквивалентного тока программа ECLAT определяет три фокуса вихря, закрученного по часовой стрелке (рис. 1в). Направление и величина токов показано векторами. Из-за слабого пространственного разрешения стрелки на концах некоторых векторов выглядят как утолщения. Результатам расчета 2-D распределения токов в области от материка (станция SOR) к полюсу не следует доверять безоговорочно, так как в этих широтах сеть магнитометров менее плотная, чем на материке. Тем не менее, положение центра вихря согласуется с местом смены полярности магнитного импульса на магнитограммах и диаграмме (рис. 1а, б), а на вихревой характер связанных с магнитными импульсами ионосферных токов обращалось внимание уже на начальной стадии исследования этих явлений (см., например, работу [Friis-Christensen et al., 1988]).

Согласно, например, [Ляцкий и Мальцев, 1983], в области, где ионосферный ток меняет направление с восточного на западное, должна располагаться подошва втекающего в ионосферу продольного тока (*field-aligned current*, FAC). На 2D-картах эквивалентного ионосферного тока, рассчитанных по программе ECLAT, след локализованного втекающего в ионосферу продольного тока часто ассоциируют с центром токового вихря, закрученного по часовой стрелке (например, [Amm et al., 2002] и [Palin et al., 2016]), что имеет место и в рассматриваемом случае. Формально магнитный импульс есть продукт приблизительно одновременной интенсификации восточного и западного джетов. Мы предлагаем в ка-

честве “источника” рассматривать не восточный и западный джеты по-отдельности, а продольный ток, порождающий их в совокупности. Таким образом, определение местоположения источника импульса в магнитосфере сводится к определению областей высыпаний (магнитосферных доменов), внутри или на границе которых находится область обращения токов и/или центр токового вихря.

На рис. 2а приводится спектрограмма электронных и ионных высыпаний, зарегистрированных спутником DMSP F16 во время его пролета над областью наблюдений сразу после того, как амплитуда магнитного импульса достигла максимального значения (стрелка на рис. 1а). Во время пролета спутник дважды пересек границу между высыпаниями из *cps* и *bps*. Отметим, что спутник проводил измерения около 09:00 MLT, так что, согласно работе [de la Beaujardiere et al., 1993], автоматическому алгоритму определения границ можно доверять.

На рис. 2б траектория спутника спроектирована (вдоль силовой линии геомагнитного поля) в ионосферу на высоту 100 км. На этой высоте программа ECLAT рассчитывает эквивалентные токи. Места пересечения *bps* отмечены серыми крестиками. Проходящие через крестики штриховые линии — геомагнитная широта. В разделе 2 отмечалось, что в этом MLT-секторе границы *bps* ориентированы вдоль геомагнитной широты. Таким образом, штриховые линии показывают границы *bps* за пределами траектории спутника.

Квадратиком на рис. 2б отмечено положение центра вихря, расположенного на меридиане 22°E, вдоль которого строилась диаграмма на рис. 1б. Этот и другие центры располагаются вдоль экваториальной границы *bps/cps*. Можно предположить, что в рассматриваемом случае продольный ток имел форму полосы и протекал на границе *bps/cps* или рядом с ней. Таким образом, источник магнитного импульса располагался внутри магнитосферы, на удалении от магнитопаузы и *llbl*, что не позволяет связать магнитный импульс с событиями пересоединения на магнитопаузе или с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца в области обращения конвекции [Clauer et al., 1997].

3.2. Магнитный импульс 21.04.2010 г.

Пролет спутника вдоль токового слоя

Магнитный импульс был зарегистрирован в 06:45 UT (рис. 3а). Анализ проводился по той же схеме, что и в предыдущем случае. Мы приводим это событие в статье по следующей причине.

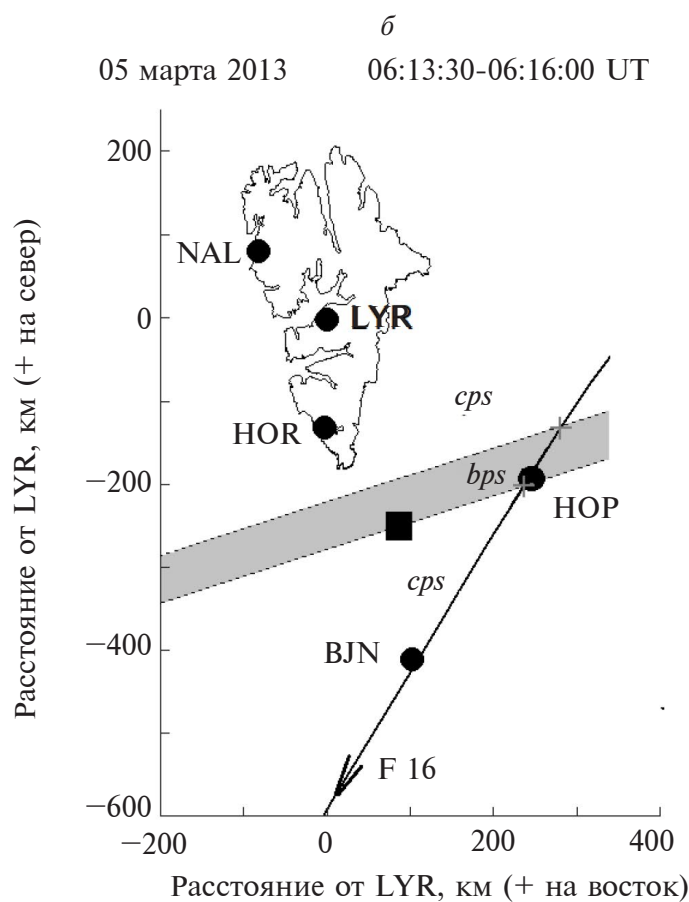
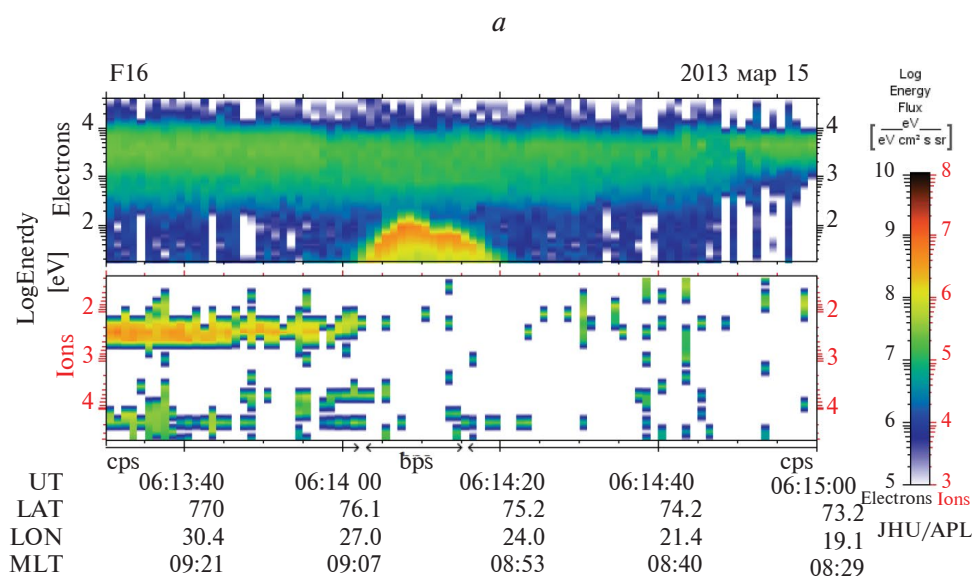


Рис. 2. (*a*) – Характер высыпаний вдоль траектории спутника с указанием магнитосферных доменов спустя три минуты после начала импульса. (*б*) – Фрагмент траектории F16. Положение границ *cps*/*bps* показано крестиками. Область высыпаний из *bps* закрашена серым. Штриховая линия – геомагнитная широта (границы доменов вне траектории). Квадратик – центр вихря на меридиане 22°Е, вдоль которого рассчитывалось 1D распределение эквивалентного тока на рис. 1б.

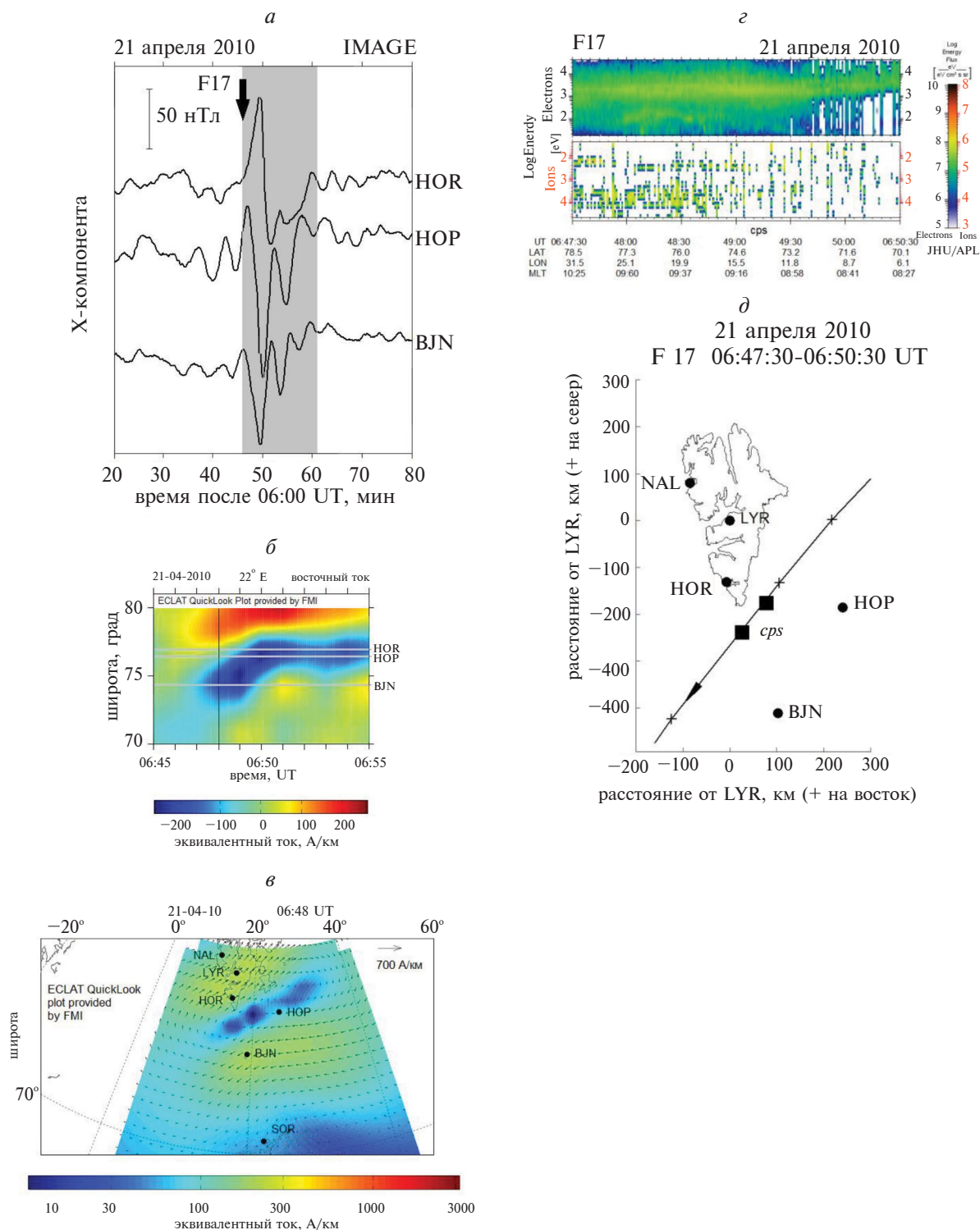


Рис. 3. (а) — Противофазный характер изменения магнитного поля. Стрелкой показан момент пролета спутника F17 над сетью IMAGE. (б) — Динамика восточного (+) и западного (-) токов магнитного импульса на меридиане 22° E. Тонкая вертикальная линия — момент времени, для которого рассчитывалась карта эквивалентного тока. (в) — Вихреобразная структура с несколькими центрами на карте эквивалентного тока магнитного импульса. Направление тока показано стрелками. (г) — Характер высыпаний над областью наблюдений по данным DMSP F17. (д) — Фрагмент траектории F17. Крестики — реперные точки для построения траектории. Квадратики — положение центра вихря.

На карте 2D-распределения токов (рис. 3в) программа ECLAT показывает наличие у вихря тонкой структуры в виде нескольких фокусов. Самый западный фокус располагается примерно там же, где на диаграмме (рис. 3б) имеет место обращение направления тока. Тонкую структуру имел центр вихря и в предыдущем случае (рис. 1в). Однако тогда траектория спутника проходила в стороне от центра. В рассматриваемом же случае спутник пролетал прямо над серией фокусов (квадратики на рис. 3д), находясь при этом в области высыпаний из *cps* (рис. 3г).

Нижняя панель спектрограммы на рис. 3г показывает, что ионные высыпания над центрами вихрей имели спорадический характер. Как и в предыдущем случае, вихрь был закручен по часовой стрелке, что указывает на наличие в его центре втекающего (ионы движутся в ионосферу) продольного тока. В свете этого, мы трактуем спорадичность ионных высыпаний как признак нескольких волокон у продольного тока, порождающих тонкую структуру в центре вихря.

По такой схеме нами было проанализировано 8 событий. В четырех случаях источник (точнее, центр вихря эквивалентных ионосферных токов) находился внутри центрального плазменного слоя (*cps*), в одном случае — внутри пограничного плазменного слоя (*bps*) и в трех случаях — вблизи границы между *bps* и *cps*. Анализ указывает на то, что MIEs не являются ни событием переноса потока на магнитопаузу вследствие пересоединения (события *FTE*), ни развивающейся на внутренней границе *llbl* неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, порождающей в ионосфере распространяющиеся вихри конвекции (события *TCV*). В следующем разделе появление магнитных импульсов рассматривается в контексте изменений в межпланетной среде. В разделе Дискуссия, опираясь на результаты разделов 3 и 4, будет предложен возможный механизм генерации магнитного импульса.

4. МАГНИТНЫЕ ИМПУЛЬСЫ В КОНТЕКСТЕ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИИ В МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЕ

Статистика по этому вопросу является более обширной, так как для отбора событий не нужно было ограничиваться удачными пролетами низкоорбитальных спутников DMSP.

Результаты анализа приведены в табл. 2. В первых трех столбцах указаны номер, дата и время магнитного импульса. В четвертом столбце приводится амплитуда вариации давления солнечного ветра. В столбце 5 — амплитуда вариации X-компоненты геомагнитного поля на низкоши-

ротных обсерваториях. Вариация в виде ступени на экваториальных станциях традиционно считается признаком сжатия дневной магнитосферы во время SI. В столбце 6 — относительные изменения X-компоненты скорости солнечного ветра. Знак + означает, что скорость увеличилась. Изменения классифицируются нами как нулевые, если скорость менялась менее чем на 5 км/с. В столбцах 7–9 приведены значения компонент ММП. Символ 0.5/3.3 означает, что данная компонента увеличилась с +0.5 до +3.3 нТл. Символ X использован в тех случаях, когда компонента не менялась или менялась на уровне флуктуаций (менее чем на 0.5 нТл).

Для восьми событий удачного пролета спутников DMSP, в столбце 10 указывается название магнитосферного домена, где, по нашему мнению, располагался источник магнитного импульса. Например, символ *bps/cps* означает, что источник располагается вблизи границы между этими доменами. Эти события помещены в начале табл. 2.

Во Введении было отмечено, что генерация магнитных импульсов определяется не единственным фактором, а широким спектром условий в межпланетной среде [Moretto et al., 2004]. К такому же выводу мы пришли по результатам наших исследований. Сказанное демонстрирует рис. 4. Здесь магнитный импульс рассматривается в контексте измерений на спутнике THV. Спутник находился на линии Солнце-Земля на относительно небольшом (по сравнению со спутниками ACE и WIND) расстоянии от фронта ударной волны (~642000 км, как дает сервис *4D Orbit Viewer*). При скорости солнечного ветра 340 км/с, время распространения неоднородности солнечного ветра от спутника до ударной волны составляет 31 мин. Это время принималось во внимание при сравнении спутниковых и наземных данных.

На рис. 4 вариации ММП, скорости и давления солнечного ветра на спутниках THV и WIND приведены в перерасчете на фронт ударной волны. Серым выделен интервал, когда на сети IMAGE наблюдался магнитный импульс (см. рис. 3а для этого события). Примерно за 4–5 мин до начала импульса, B_x - и B_z -компоненты ММП быстро меняются в сторону отрицательных значений. Также быстро в ту же сторону, но на меньшую величину, меняется B_y -компонента. Изменения ММП сопровождаются быстрым увеличением скорости солнечного ветра на $\Delta V_x \sim 20$ км/с (6%).

В отличие от магнитного поля и скорости, давление солнечного ветра не демонстрирует ступенчатого изменения на спутниках ни вблизи фронта ударной волны, ни на значительном от

Таблица 2. Магнитные импульсы и параметры межпланетной среды

№	дд/мм/гггг	UT	ΔP , нПа	ΔX , нТл	ΔV_X , %	ММП			домен
						B_x	B_y	B_z	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	21/04/2010	06:46	~0	4	+8*	5/2	-2.6/-4	0/-4	<i>cps</i>
2	24/04/2010	08:45	~0	1.5	+8	-4/1	0.5/4.5	-1/1	<i>cps</i>
3	10/01/2011	08:16	~0	~1	-3	-2/2	0/-2	-3/3	<i>cps</i>
4	20/01/2011	08:42	0.35	3.5	+4*	-3/1*	2/0	-1/1.7	<i>bps/cps</i>
5	15/02/2011	06:54	~0	~7	+9	-5/1	3/1	2/6	<i>bps/cps</i>
6	04/06/2011	07:51	0.4	~5	~0	2/3	0.5/-2.5	-3/1	<i>cps</i>
7	05/03/2013	06:09	~0	2	+3	3/-1*	-0.5/-2	1/-1	<i>bps/cps</i>
8	18/10/2014	07:37	—	~2	-2*	0/-2.5*	4/1	2/0	<i>bps</i>
9	06/01/2010	06:07	0.25	13**	-5	0/2.5	X	4/-2	
10	29/01/2010	05:05	1.1	13	~0	-1/2.5	2.2/4	3/0	
11	17/01/2011	08:38	0.5	~2	+6*	-4.5/-3	0/2.5	-1/0	
12	26/08/2011	06:31	~0	~1	-7	0/4	-4/0	-1/1	
13	07/11/2011	06:07	0.8	0	~0	0/1	0/-3	1/3	
14	08/02/2012	06:05	~0	~1	-3	-3/1	0/-3	1.5/4	
15	29/02/2012	07:22	1.5	~8	+3	-5/1	2/4	2/-4	
16	16/02/2013	07:42	0.2	0	~0	-2.5/-2	X	0/-2	
17	03/03/2013	08:37	~0	10	+9*	4.5/2.5	0/-4	-2/1	
18	16/10/2013	08:45	0.4	3	+3	-3/-1.5	-1.2	-1.5/1	
19	18/10/2013	06:05	~0	~0	+4	-3.5/-2	-1/3	1/0	
20	28/10/2013	09:11	0.4	10	~0	0.5/1.2	-0/-4.7	4.5/0	
21	20/04/2014	07:28	0.5	~0	-2	-5/-2	1/0	1/4	
22	06/10/2014	06:33	—	2	+2.5	3/4	-3/0	0.5/2.5	

Примечание. Символ * относится к параметру, начало вариации которого не согласуется с началом магнитного импульса. Символом ** обозначено изменение давления в эВ/см³.

него удалении (сплошная и штриховая линии на рис. 4, соответственно), характерного для явления, известного в литературе как внезапный импульс (SI). Тем не менее, вариация X-компоненты на экваториальной станции ААЕ, ΔX , по форме (но не по величине) напоминает отклик магнитосферы на SI (рис. 4, нижняя панель). Согласно, например, [Safargaleev et al., 2002], типичная величина геомагнитного отклика на SI на экваториаль-

ных станциях составляет $\Delta X \sim 40$ нТл, то есть в 10 раз больше. При временном разрешении данных ААЕ 1 минута, момент начала возмущения на ААЕ с точностью до 1–2 мин совпадает с началом магнитного импульса на высокоширотных станциях. Если предположить, что ΔX каким-либо образом обусловлено изменениями ММП, получим оценку времени распространения вариации в соответствующей компоненте ММП в переходном

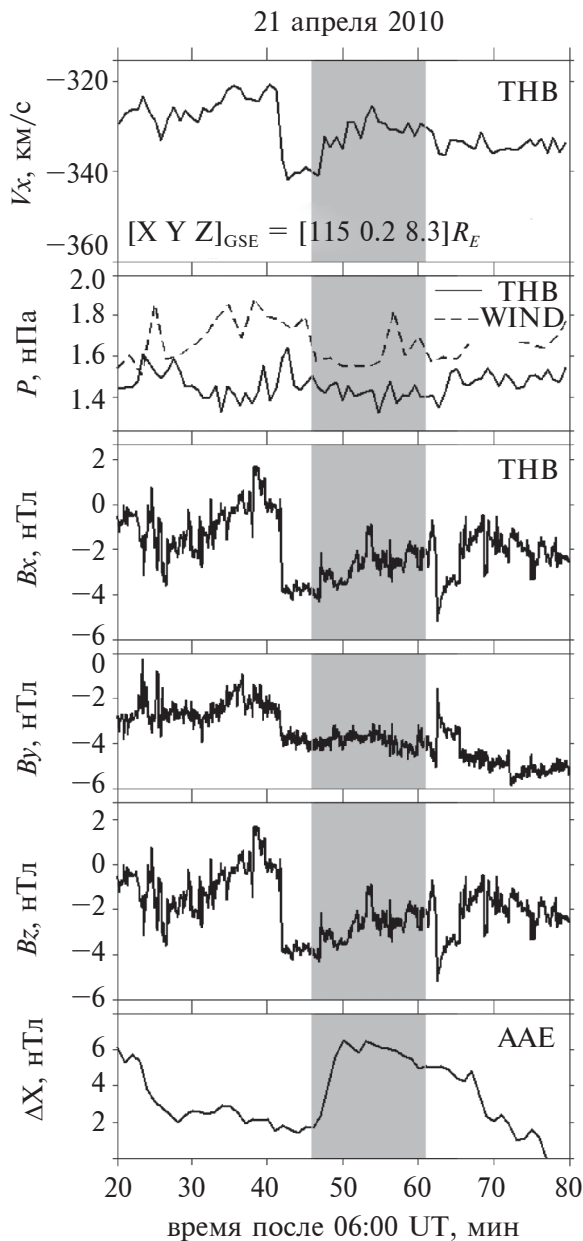


Рис. 4. Вариации параметров межпланетной среды у лобовой точки ударной волны за промежуток времени, включающий интервал наблюдения магнитного импульса (выделен серым цветом, см. также рис. 3а). Сверху вниз: скорость и давление солнечного ветра, три компоненты ММП. Нижняя панель — ступенеобразное увеличение X-компоненты геомагнитного поля на экваториальной станции ААЕ.

слое ~4–5 мин, что согласуется с результатами численного моделирования Samsonov et al. [2006].

Из рис. 4 следует, что вариация любого из представленных параметров (за исключением давления солнечного ветра) может рассматри-

ваться как потенциальный кандидат на триггер магнитного импульса.

Дальнейшие исследования показали, что быть причиной магнитного импульса могут не все параметры межпланетной среды.

4.1. Роль параметров межпланетной среды в запуске магнитных импульсов

Импульс давления солнечного ветра. Остановимся на этом параметре подробнее, так как ряд авторов считает, что к генерации импульсов приводит внезапное сжатие дневной магнитосферы ([Friis-Christensen et al., 1988]; [Sibeck, 1990]; [Боробьев и др., 1993]; [Yahnin et al., 1995]; [Kim et al., 2017]). В работе [Yahnin et al., 1995] отмечается, в частности, что иногда магнитные импульсы наблюдаются и без глобальных признаков SI. К этим признакам авторы относят усиление высыпаний, изменения ионосферной проводимости, всплески геомагнитной активности в КНЧ- и УНЧ-диапазонах. В процитированной работе наличие/отсутствие признаков глобальности не исследовалось. Признаки глобальности имеют случай, детально описанный в работе [Kim et al., 2017]. Реакция магнитосфер на SI была многосторонней и проявилась в высыпаниях и волновой активности в герцовом диапазоне. Авторы также обнаружили отклик на SI на высоте термосферы.

Для каждого события нами были проанализированы магнитограммы низкоширотных станций Addis Ababa (AAE), Alibag (ABG) и Hermanus (HER). На этих широтах импульс давления солнечного ветра проявляется как ступенеобразное увеличение геомагнитной X-компоненты с типичной величиной ~40 нТл (см., например, [Safargaleev et al., 2002]). Этот показатель мы рассматриваем как необходимый признак глобальности SI. Появление признаков, перечисленных в работе [Yahnin et al., 1995], в значительной степени определяется состоянием внутренней магнитосферы (в литературе — “подготовленностью” магнитосферы).

В авроральной зоне отклик X-компоненты на SI также имеет форму ступеньки, отражая сжатие магнитного поля, но на ступеньку дополнительно накладываются пульсации диапазона Pc5 (в литературе — $P_{sc}5$). Несмотря на то, что периодичность в близком диапазоне обнаруживается и в магнитном импульсе, сколь либо значительных признаков SI или SC на экваториальных станциях выявить не удалось. Если в ситуациях, когда увеличение X-компоненты было различимо на фоне флуктуаций, то это увеличение составляло не более 15 нТл (см. пример на рис. 5а).

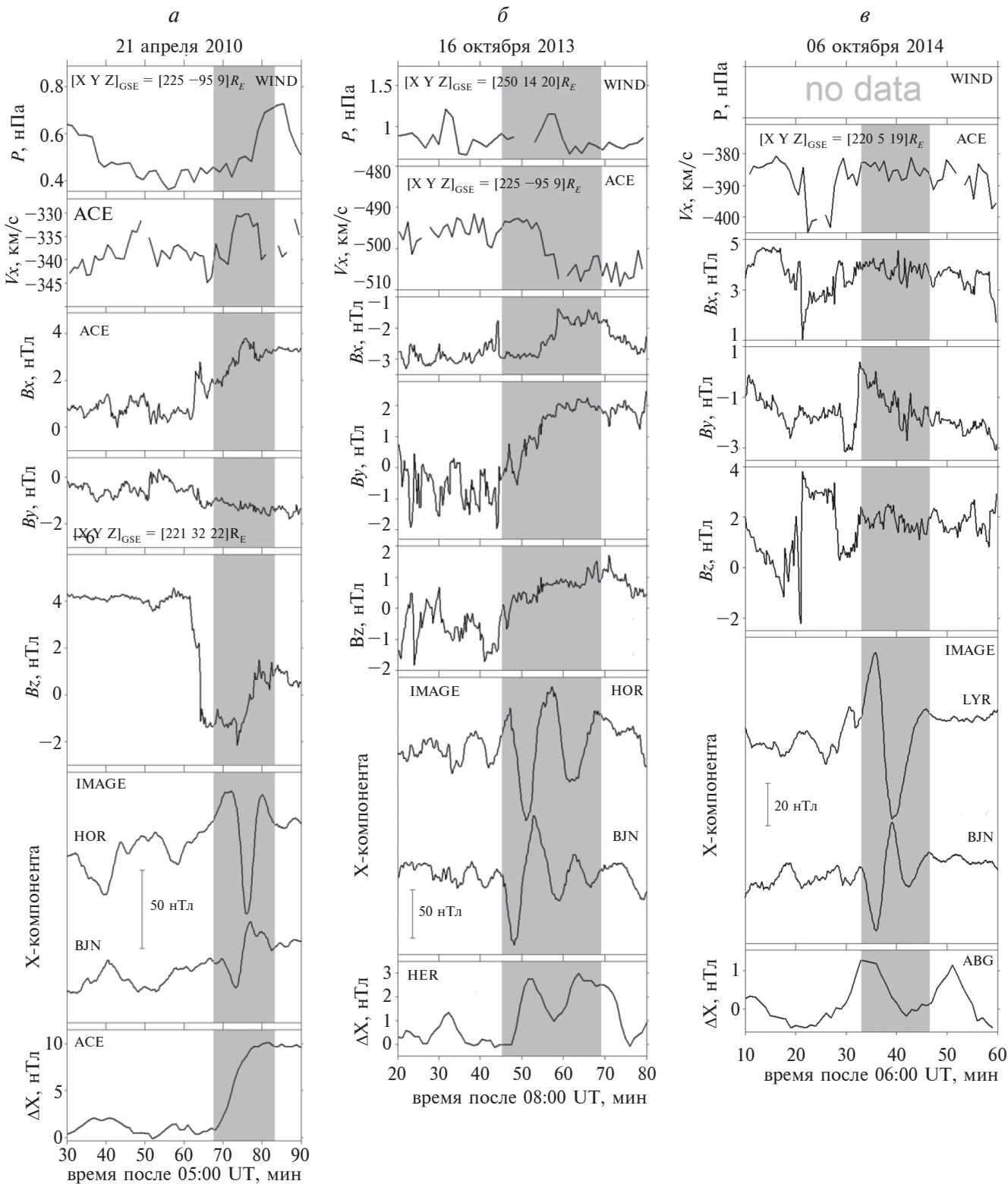


Рис. 5. Три примера магнитных импульсов (интервалы выделены серым цветом) в контексте изменения параметров межпланетной среды на лобовой точке фронта ударной волны. Сверху вниз: вариации давления и скорости солнечного ветра, вариации ММП, магнитограммы станций сети IMAGE, демонстрирующие противофазный характер магнитного импульса, вариации геомагнитного поля на экваториальных станциях.

Как следует из табл. 2 (столбец 4), незначительные, но обнаруживаемые невооруженным глазом ступенеобразные изменения давления иногда имели место на спутнике WIND. Однако часть из них, будучи, пересчитанными на фронт ударной волны, не предшествовали импульсу, а наблюдались после его начала. Примеры таких событий приведены на верхних панелях рис. 5а, б.

Результат не согласуется с результатами большого количества ранних работ (см., например, [Yahnin et al., 1995] и ссылки в ней), где было показано, что SI являются наиболее вероятными триггерами MIEs. В связи с этим упомянем работу Konik et al. [1994], где было показано, что подавляющее большинство магнитных импульсов происходит на фоне быстрых изменений компонент ММП. Результат не исключает безоговорочно SI как триггер импульсов, поскольку в работе [Moretto et al., 1997] было указано на существование по крайней мере двух разных классов TCV, различающихся механизмами генерации.

Изменение V_x -компоненты скорости солнечного ветра и V_x -компоненты ММП. Информация о характере изменения этих параметров приведена в табл. 2 (столбцы 6 и 7). Видно, что в ~23% случаев V_x практически не меняется (точнее, меняется на уровне флуктуаций), в ~47% случаев V_x увеличивается, а в ~30% случаев уменьшается. Аргументом для исключения этого параметра из списка возможных кандидатов на запуск магнитного импульса является не разноплановый характер вариации (усиление или уменьшение скорости), а запаздывание относительно начала импульса. В столбце 6 такие события отмечены символом * и составляют ~23% от всех событий. Сказанное демонстрируется также примером на рис. 5а, б (вторая панель сверху).

V_x -компонента ММП меняется более систематически — в 19 случаях из 22 V_x растет в область положительных значений. При этом в 11 случаях (50%) V_x проходит через нулевые значения. В остальных случаях V_x при изменении остается в зоне либо отрицательных, либо положительных значений. Как и для V_x , аргументом подвергнуть сомнению роль V_x в запуске магнитного импульса является несоответствие времени начала импульса с моментом начала вариации V_x в лобовой точке фронта ударной волны (события №№4, 7 и 8 в табл. 2, рис. 5а, б).

Объяснить запаздывания V_x и V_x неточностью расчета времени распространения от спутника до фронта ударной волны мы не можем, так как две другие компоненты ММП, вариации которых начинаются до магнитного импульса, измерялись на том же спутнике.

Вариации V_y - и V_z -компонент ММП, как наиболее вероятный триггер магнитных импульсов. Выше из списка кандидатов на запуск магнитного импульса были исключены давление и скорость солнечного ветра, а также V_x -компонента ММП. Причина — вариация этих параметров, с которой можно было бы связать магнитный импульс, начиналась после того, как импульс уже начался. Информация о характере изменения оставшихся двух параметров приведена в табл. 2 (столбцы 8 и 9).

Во всех рассмотренных случаях V_z -компонента менялась. Вариации имели разную амплитуду и разный знак, но, в отличие от V_x и V_x , вариации в V_z -компоненте начинались за несколько минут до начала магнитного импульса (см. примеры на рис. 5, третья панель снизу). Примерно таким же образом вел себя V_y -компонент. Исключение представляют два случая (№№ 9 и 16 в табл. 2), когда магнитный импульс начинался на фоне плавно убывающей V_y . Поскольку при этом перед импульсом имели место отчетливые вариации V_z -компоненты, обе эти компоненты остаются в списке кандидатов на триггер. Сказанное иллюстрируется примером на рис. 5а (четвертая панель сверху).

Результат согласуется с результатами статистического исследования Konik et al. [1994], показавшими, что 50–70% событий магнитных импульсов связано с вариациями V_y - и V_z -компонент ММП. Ранее Friis-Christensen et al. [1988] также связывали генерацию магнитных импульсов (в виде TCV) с изменением этих двух компонент.

5. ДИСКУССИЯ

5.1. Ионосферные и продольные токи магнитного импульса. Обобщение

Во всех исследуемых ситуациях магнитный импульс в высоких широтах начинался как положительное отклонение, в то время как на более низких широтах начальное отклонение было отрицательным. То есть, в высоких широтах импульс вызывался усилением тока восточного направления, а ниже — западного. В области, где эквивалентный ионосферный ток меняет направление с восточного на западное, должна располагаться подошва втекающего в ионосферу продольного тока. На 2D-картах эквивалентного ионосферного тока, рассчитанных по программе ECLAT, след локализованного втекающего в ионосферу продольного тока ассоциируют с центром токового вихря, закрученного по часовой стрелке.

Мы предполагаем, что магнитный импульс есть продукт приблизительно одновременной интенсификации восточного и западного джетов, вызванной усилением или появлением локализованного втекающего продольного тока. Во всех представленных в работе событиях возмущение продольного тока происходило в глубине магнитосферы. Результат может означать, что магнитный импульс не есть следствие прямого взаимодействия неоднородности солнечного ветра с магнитопаузой типа пересоединения или разрыва неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на внутренней границе *lbl*.

5.2. Сценарий генерации магнитного импульса

Основываясь на общепринятой точке зрения, что альвеновская волна есть волна продольного тока (см., например, [Ляцкий и Мальцев, 1983]), мы полагаем, что появление продольного тока, являющегося опосредованным источником магнитного импульса, связано с генерацией альвеновской волны. Ниже представлен возможный поэтапный сценарий, по которому внутри магнитосферы в локальной области генерируется альвеновская волна в отклик на изменения ММП. Основой сценария являются три теоретических результата, полученные ранее другими авторами.

На первом этапе, попадая в переходную область между ударной волной и магнитопаузой, вариации ММП трансформируются в вариации плазменного давления. Это может происходить в области магнитного барьера, где вариации магнитного поля и концентрации плазмы (плазменного давления) взаимосвязаны. Такое качественное рассуждение подтверждается результатами численного моделирования [Lin et al., 1996]. Отметим также работу Eastwood et al. [2008], где возможной причиной появления вариаций давления в переходной области при отсутствии таковых в солнечном ветре рассматривается явление, известное в литературе как аномальные горячие потоки (*hot flow anomalies*, HFA). С этими вариациями авторы предлагают связать кратковременную отрицательную вариацию магнитного поля на наземной сети обсерваторий проекта THEMIS (рис. 5 в цитируемой работе), называя ее магнитным импульсом. Рассматриваемые в нашем исследовании магнитные импульсы имеют иную форму, и, в отличие от работы Eastwood et al. [2008], исследование не носит характер case study.

На втором этапе вариации давления, подобно SI, воздействуют на магнитопаузу, в результате чего магнитопауза становится источником вторичных волн магнитозвукового типа сложной структуры, но малой амплитуды.

На третьем этапе в процесс “включается” форма магнитопаузы. Согласно Leonovich and Kozlov [2020], магнитопауза, благодаря своей форме, может действовать как собирающая линза, усиливая вторичные волны или их эффект в “фокусе”, находящемся внутри дневной магнитосферы. Под воздействием внешней среды форма магнитопаузы меняется, меняются положение и размеры фокуса.

На четвертом этапе сложная волна (сцепка магнитозвуковой и альвеновской мод) распространяется внутри магнитосферы. Согласно представлениям теории магнитосферного альвеновского резонатора, МГД-возмущения из внешних областей в процессе распространения в глубь магнитосферы трансформируются в альвеновские колебания. Наиболее эффективен процесс трансформации колебаний на геомагнитной широте, где частота внешнего источника совпадает с локальной частотой собственных колебаний геомагнитной силовой линии (см., например, [Пилипенко, 2006] и ссылки в ней). В работе Leonovich and Mazur [1989] трансформация магнитозвуковой волны в альвеновскую исследована применительно к событиям SI. Трансформация происходит как при монохроматической, так и широкополосной форме внешнего возбудителя.

Этот теоретический результат о трансформации магнитозвуковой волны в альвеновскую привлекался авторами для объяснения пульсаций $P_{sr}5$, являющимися откликом магнитосферы на SI. Если область трансформации находится в “фокусе” магнитопаузы, эффект перекачки будет заметен.

В модели Lühr et al. (1996) трансформация моды быстрой волны сжатия в альвеновскую волну происходит на градиенте плотности, который, как предполагается, существует в *lbl*. Согласно проведенному нами исследованию, источник MIEs находится глубже в магнитосфере, чем *lbl*.

С предложенным нами сценарием хорошо согласуются результаты работы [Pilipenko et al., 2021]. Наблюдения в сопряженных точках показали, что TCV возбуждается магнитосферным генератором тока. Режим генератора тока соответствует резонансным колебаниям в магнитосферном альвеновском резонаторе. Такой резонансный отклик на магнитозвуковой импульс действительно может возникать в глубине магнитосферы и наблюдается как MIEs/TCV.

Отметим, что исследованные в работе явления не являются импульсами в традиционном понимании этого слова, а представляют цуг затухающих колебаний. На биполярный характер магнитных импульсов обращалось внимание, в част-

ности, в работе Воробьев и др. [1997]. Авторы объяснили эту особенность движением токовых вихрей. Несмотря на то, что для данного исследования отбирались изолированные события, они не характеризовались отчетливым началом, что в совокупности с относительно небольшим временным разрешением магнитных данных и отсутствием достаточного количества станций на широте, где располагался центр вихря, затруднило исследование вопроса о его движении. Мы полагаем, что пульсационная форма импульса могла быть обусловлена баунсировкой альвеновской волны между сопряженными ионосферами.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные импульсы (МИ или *magnetic impulse events*, MIEs) — дневное высокоширотное явление в виде изолированного цуга затухающих пульсаций в X-компоненте геомагнитного поля, состоящего из 1–3 всплесков с периодом следования 8–12 мин. Нами рассмотрено 22 случая магнитных импульсов, токовая система которых состояла из разнонаправленных ионосферных токов — восточного направления в высокоширотной части скандинавской сети магнитометров IMAGE и западного направления на станциях, расположенных южнее. На двумерных картах распределения эквивалентных ионосферных токов, токовая система имела форму закрученного по часовой стрелке вихря, в полюсной части которого ионосферные токи текли преимущественно на восток, а в южной — на запад.

Для 8 случаев имелись данные по высыпавшимся частицам спутников DMSP, пролетающих над высокоширотной частью сети IMAGE во время, непосредственно перед или сразу после магнитного импульса. По этим данным было определено приблизительное положение центра вихря относительно границ магнитосферных доменов. Считая втекающий в центр вихря продольный ток опосредованным источником магнитного импульса, показано, что источник магнитного импульса находится либо в центральном плазменном слое, *cps*, либо в пограничном плазменном слое, *bps*. Это означает, что предложенные ранее объяснения магнитных импульсов спорадическим пересоединением, поверхностными волнами на магнитопаузе или неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца на внутренней границе низкоширотного пограничного слоя, *llbl*, не согласуются с наблюдениями. Полученный результат согласуется с результатами некоторых исследований формата *case study* (см., например, [Yahnin et al., 1997]), тем самым расширяя статистику по данному вопросу.

Все 22 случая MIEs были проанализированы в контексте ситуации в межпланетной среде. По результатам анализа из списка возможных кандидатов на запуск MIEs были исключены внезапные импульсы (SI), вариации скорости солнечного ветра и *Bx*-компоненты ММП. Полученный результат, исключающий SI и указывающий на вариации *B_y*- и *B_z*-компонент как наиболее вероятный триггер MIEs, согласуется с результатами других исследований (см., например, Konik et al. [1994]), также расширяя тем самым статистику по данному вопросу.

Предложен поэтапный сценарий генерации магнитного импульса продольным током альвеновской волны. Согласно сценарию, вариации ММП, проходя через область между ударной волной и магнитопаузой, порождают вариации плазменного давления. Вариации давления воздействуют на магнитопаузу подобно явлениям SI, в результате чего магнитопауза становится источником слабых вторичных волн смешанного типа. Форма магнитопаузы напоминает собирающую линзу, в фокусе которой вторичные волны усиливаются. Если в фокусе оказывается участок магнитосферы, где энергия смешанной волны “перекачивается” в альвеновскую моду (ранее возможность трансформации магнитозвучковой волны в альвеновскую обсуждалась применительно к генерации пульсаций P_{sr5}), трансформация приведет к появлению продольного тока. Обусловленный появлением продольного тока вихрь ионосферного эквивалентного тока создаст на земной поверхности цуг затухающих пульсаций — магнитный импульс.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит Ньюела П.Т. (Newell P.T., Johns Hopkins University, APL, Laurel, Maryland, US) за подготовку и размещение на страницах Интернет информации о положении границ авроральных высыпаний по наблюдениям спутников серии DMSP. Данные сети IMAGE доступны на сайте (<https://space.fmi.fi/MIRACLE>). Данные низкоширотных станций AAE, ABG и HER, взяты из мировой базы данных INTERMAGNET (https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1). Положение спутников определялось при помощи он-лайн процедуры *SSC 4D Orbit Viewer* (<https://sscweb.gsfc.nasa.gov>). Геомагнитная широта и местное время рассчитывались он-лайн программой *VITMO Model* (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания (номер госрегистрации 1021100714196-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев В.Г., Зверев В.Л., Старков Г.В. Геомагнитные импульсы в дневной высокоширотной области: основные морфологические характеристики и связь с динамикой дневных сияний // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. 69–79. 1993.
- Воробьев В.Г., Зверев В.Л. Морфологические особенности перемещающихся токовых вихрей. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 5. С. 35–43. 1997
- Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 192 с. 1983.
- Пилипенко В.А. Резонансные эффекты ультра-низкочастотных волновых полей в околоземном пространстве // Автореф. дис. док. физ.-мат. наук. М.: изд-во ИФЗ РАН, 33 с. 2006.
- Amm O., Engebretson M.J., Hughes T., Newitt L., Viljanen A., Watermann J. A traveling convection vortex event study: Instantaneous ionospheric equivalent currents, estimation of fieldaligned currents, and the role of induced currents // J. Geophys. Res. V. 107. 1334. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009472>.
- Beaujardiere O. de la, Watermann J., Newell P., Rich F. Relationship between Birkeland current regions, particle precipitation, and electric field // J. Geophys. Res. V. 98. P. 711–7720. 1993. <https://doi.org/10.1029/92JA02005>.
- Bering III E.A., Lanzerotti L.J., Benbrook J.R., Lin Z.-M. Solar wind properties observed during high-latitude impulsive perturbation events // Geophys. Res. Lett. V. 17. P. 579–582. 1990. <https://doi.org/10.1029/GL017i005p00579>.
- Clauer C.R., Ridley A.J., Sitar R.J., Singer H.J., Rodger A.S., Friis-Christensen E., Papitashvili V.O. Field line resonant pulsations associated with a strong dayside ionospheric shear convection flow reversal // J. Geophys. Res. V. 102. P. 4585 – 4596. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA02929>.
- Eastwood J.P., Sibeck D.G., Angelopoulos V., Phan T.D., Bale S.D., McFadden J.P., et al. THEMIS observations of a hot flow anomaly: Solar wind, magnetosheath, and ground-based measurements // Geophys. Res. Lett. V. 35. № 17. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008GL033475>.
- Friis-Christensen E., McHenry M.A., Clauer C.R., Vennerstrøm S. Ionospheric traveling convection vortices observed near the polar cleft: A triggered response to sudden changes in the solar wind // Geophys. Res. Lett. V. 15. P. 253–256. 1998. <https://doi.org/10.1029/GL015i003p00253>.
- Goertz C.K., Nielsen E., Korth A., Glassmeier K.H., Haldoupis C., Hoeg P., Hayward D. Observations of a possible ground signature of flux transfer events // J. Geophys. Res. V. 90. P. 4069–4078. 1985. <https://doi.org/10.1029/JA090iA05p04069>.
- Kim H., Lessard M.R., Jones S.L., et al. Simultaneous observations of traveling convection vortices: Ionosphere-thermosphere coupling // J. Geophys. Res. V. 122. P. 4943–4959. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA023904>.
- Konik R.M., Lanzerotti L.J., Wolfe A., Maclellan C.G., Venkatesan D. Cusp latitude magnetic impulse events, 2, Interplanetary magnetic field and solar wind conditions // J. Geophys. Res. V. 99. P. 14831–14853. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA03241>.
- Lanzerotti L.J., Lee L.C., Maclellan C.G., Wolfe A., and Medford L.V. Possible evidence of flux transfer events in the polar ionosphere // Geophys. Res. Lett. 13. P. 1089–1092. 1986. <https://doi.org/10.1029/GL013i011p01089>.
- Leonovich A.S., Mazur V.A. Resonance excitation of standing Alfvén waves in an axisymmetric magnetosphere (nonstationary oscillations) // Planet. Space Sci. V. 37. P. 1109–1116. 1989. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(89\)90082-2](https://doi.org/10.1016/0032-0633(89)90082-2).
- Leonovich A.S., Kozlov D.A. Focusing of fast magnetosonic waves in the dayside magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 125. e2020JA027925. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA027925>.
- Lin Y., Swift D.W., Lee L.C. Simulation of pressure pulses in the bow shock and magnetosheath driven by variations in interplanetary magnetic field direction // J. Geophys. Res. V. 101. P. 2725–27269. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA02733>.
- Lühr H., Lockwood M., Sandholt P.E., Hansen T.L., Moretto T. Multi-instrument ground-based observations of a travelling convection vortices event // Ann. Geophys. V. 1. P. 162–181. 1996. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-0162-z>.
- Moretto T., Friis-Christensen E., Lühr H., Zesta E. Global perspective of ionospheric traveling convection vortices: Case studies of two Geospace Environmental Modeling events // J. Geophys. Res. V. 102. P. 11597–11610. 1997. <https://doi.org/10.1029/97JA00324>.
- Moretto T., Sibeck D., Watermann J. Occurrence statistics of magnetic impulsive events // Annales Geophysicae. V. 22. P. 585–602. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-585-2004>.
- Newell P.T., Wing S., Meng C.-I., Sigilitto V. The auroral oval position, structure and intensity of precipitation from 1984 onward: an automated on-line base // J. Geophys. Res. V. 96. P. 5877–5882. 1991. <https://doi.org/10.1029/90JA02450>.
- Newell P.T., Meng C.-I. Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics // Geophys. Res. Lett. V. 19. P. 609–612. 1992. <https://doi.org/10.1029/92GL00404>.
- Palin L., Opgenoorth H.J., Årgen J., et al. Modulation of the substorm current wedge by bursty bulk flows: 8 September 2002 – Revisited // J. Geophys. Res. V. 121. P. 4466–4482. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022262>.
- Piliipenko V.A., Engebretson M.J., Hartinger M.D., Fedorov E.N., Coyle S. Electromagnetic fields of magnetospheric disturbances in the conjugate ionospheres: Current/voltage dichotomy / Cross-Scale Coupling and Energy Transfer in the Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere System, ed. by T. Nishimura, O. Verkhoglyadova, and Y. Deng,

- Elsevier B.V. Amsterdam. 357–440. 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821366-7.00005-6>.
- Ridley A.J. Estimations of the uncertainty in timing the relationship between magnetospheric and solar wind processes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 62. P. 757–771. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00057-2).
- Safargaleev V., Kangas J., Kozlovsky A., Vasilyev A. Burst of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure // *Ann. Geophys.* V. 20. P. 1751–1761. 2002. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-1751-2002>.
- Samsonov A.A., Nemeček Z., Šafránková J. Numerical MHD modeling of propagation of interplanetary shock through the magnetosheath // *J. Geophys. Res.* V. 111. A08210. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011537>.
- Sibeck D.G. A model for the transient magnetospheric response to sudden solar wind dynamic pressure variations // *J. Geophys. Res.* V. 95. P. 3755–3771. 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA04p03755>.
- Sibeck D.G. Transient events in the outer magnetosphere: Boundary waves or flux transfer events? // *J. Geophys. Res.* V. 97. 4009–4026. 1992. <https://doi.org/10.1029/91JA03017>.
- Sibeck D.G., Trivedi N.B., Zesta E., Decker R.B., Singer H.J., Szabo A., Tachihara H., Watermann J. Pressure pulse interaction with the magnetosphere and ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 108. 1095. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009675>.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., and Zverev V.L. Morphological features of bipolar magnetic impulsive events and associated interplanetary medium signatures. // *J. Geophys. Res.* V. 104. P. 4595–4608. 1999. <https://doi.org/10.1029/1998JA900042>.
- Yahnin A., Titova E., Lubchich A., Böisinger T., Manninen J., Turunen T., Hansen T., Troshichev O., Kotikov A. Dayside high latitude magnetic impulsive events: their characteristics and relationship to sudden impulses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 57. P. 1569–1582. 1995. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00090-O](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00090-O).
- Yahnin A.G., Vorobjev V.G., Böisinger T., Rasinkangas R., Sibeck D.G., Newell P.T. On the source region of traveling convection vortices // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. P. 237–240. 1997. <https://doi.org/10.1029/96GL03969>.

Position of the Source of Daylight High-Latitude Magnetic Pulses in the Magnetosphere According to DMSP Satellite Data

V. V. Safargaleev*

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

**e-mail: Vladimir.safargaleev@pgia.ru*

Daytime high-latitude geophysical phenomena provide a ground-based observer with information about processes at the daytime magnetopause and/or in adjacent magnetospheric domains. It is assumed that these phenomena are initiated by changes in the parameters of the interplanetary medium and therefore can be used as a tool for studying the ways in which solar wind energy penetrates through the magnetopause. Such phenomena include magnetic impulses, which are an isolated train of damped oscillations of 2–3 bursts with a repetition period of 8–12 minutes. Using data from the Scandinavian network of magnetometers IMAGE, eight magnetic impulse events were studied for which DMSP satellites flew over the observation area during, shortly before and immediately after the pulse, crossing the boundaries of several domains. Based on ground-based and satellite data, it has been shown that the downward field-aligned current associated with the impulses is located away from the magnetopause. This means that the impulse cannot be considered as an ionospheric trace of a reconnected magnetic flux tube (flux transfer event, FTE) and/or as a traveling convection vortex (TCV). Using more statistics, it has been established that the pulse is preceded by noticeable changes in the B_y and B_z components of the IMF, while the contribution to the generation of the impulse from the pressure jump and solar wind speed, as well as the B_x component of the IMF, is not obvious. A possible scenario for the initiation of a magnetic pulse by IMF variations is discussed.

Keywords: magnetic impulses, magnetospheric domains, equivalent ionospheric currents

УДК 550.388.2

ДИНАМИКА АНОМАЛИИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА И ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА В ЮЖНОМ ЛЕТНЕМ ПОЛУШАРИИ

© 2025 г. А. Т. Карпачев*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

**e-mail: karp@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 31.05.2024 г.

После доработки 16.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Исследовано влияние аномалии моря Уэдделла на структуру ночной ионосферы в Южном летнем полушарии. Для этого использованы данные спутника CHAMP за январь 2003 г. при высокой солнечной активности и за январь 2008 г. при низкой солнечной активности. Данные относятся к интервалу местного времени 02–04 LT, когда происходит наиболее сильное увеличение электронной концентрации вследствие образования аномалии. На долготах 60–180° Е при высокой солнечной активности и 0–225° Е при низкой солнечной активности, где аномалия отсутствует, наблюдается главный ионосферный провал. Плазменный пик в ночной ионосфере, связанный с образованием аномалии моря Уэдделла, достигает 6 МГц при низкой и 10 МГц при высокой солнечной активности. Сильно развитый при высокой солнечной активности плазменный пик резко спадает к высоким широтам на экваториальной границе авроральных диффузных высыпаний, которая соответствует плазмопаузе. При слабо развитой аномалии становится заметным вклад диффузных высыпаний, поэтому плазменный пик расширяется к полюсу за счет этих высыпаний. Полярнее аномалии, на широтах аврорального овала, как правило, наблюдается высокоширотный провал. Экваториальнее аномалии часто образуется хорошо выраженный минимум электронной концентрации, который можно определить как субпровал. Показано, что в некоторых случаях субпровал связан с выносом ионосферной плазмы из летнего полушария в зимнее. Тогда в зимнем полушарии на сопряженных широтах образуется максимум концентрации. Субпровал гораздо чаще наблюдается при низкой солнечной активности, чем при высокой.

Ключевые слова: аномалия моря Уэдделла, провал ионизации, субпровал, авроральные диффузные высыпания

DOI: 10.31857/S0016794025010085, **EDN:** ADUWBP

1. ВВЕДЕНИЕ

На ионосферных станциях Halley Bay (75.6° S, 333.4° E, 65.8° GMLat) и Argentine Island (65.3° S, 295.7° E, 53.8° GMLat) впервые было обнаружено аномальное поведение f_oF_2 : во время декабрьского солнцестояния ночные значения сильно превышают дневные [Bellchambers and Piggott, 1958; Penndorf, 1965; Dudeney and Piggott, 1978]. По названию ближайшего моря этот эффект был назван “аномалия моря Уэдделла” (Weddell Sea Anomaly, WSA). Исследования характеристик WSA были позднее продолжены по данным эксперимента TOPEX/Poseidon для всех уровней солнечной активности и всех сезонов [Horvath and Essex, 2003; Horvath, 2006; Jee et al., 2009], по данным прямых измерений концентрации ионов

Ni на высоте спутника DMSP 850 км [Horvath and Lovell, 2009] и концентрации электронов Ne на высоте спутника CHAMP 400 км [Liu et al., 2010], а также по данным радиозатменных измерений в эксперименте COSMIC/Formosat [Burns et al., 2008; He et al., 2009; Lin et al., 2009]. Область аномалии была четко очерчена по данным спутников Интеркосмос-19 и CHAMP в работах [Карпачев и др., 2011 и Klimenko et al., 2015]. Во всех процитированных работах обсуждались и причины образования аномалий. Детальное исследование механизма образования аномалии по данным наземных станций и модели FLIP было проведено в недавней работе [Richards et al., 2018]. Главной причиной сильного повышения электронной концентрации ночью на широтах аномалии яв-

ляется действие нейтрального ветра при наличии высокой остаточной ионизации после “выключения” солнечного излучения.

Главный ионосферный провал (ГИП) был обнаружен и описан в пионерской работе Muldrew [1965]. В дополнение к ГИП Muldrew наблюдал еще один провал на более высоких широтах, который им был определен как высокоширотный ионосферный провал (ВИП). Оба провала многократно исследовались, результаты представлены в обзорах [Ahmed et al., 1979; Moffett and Quegan, 1983; Grebowsky et al., 1983; Williams and Jain, 1986; Rodger et al., 1992; Nilsson et al., 2005]. По мере исследования обоих провалов было обнаружено, что ВИП находится в пределах аврорального овала высыпаний [Grebowsky et al., 1983], а ГИП преимущественно располагается экваториальнее овала [Ahmed et al., 1979]. Однако ВИП, расположенный на максимально низкой широте, можно спутать с ГИП, который находится максимально высоко по широте. Поэтому для разделения ВИП и ГИП был предложен специальный метод, использующий модель аврорального овала [Vorobjev et al., 2013]. Эта модель была разработана с использованием данных спутников DMSP в Полярном геофизическом институте в Мурманске и доступна на веб-сайте (<http://arpm.pgia.ru>). Модель описывает зону I авроральных диффузных высыпаний на экваториальном крае аврорального овала и зону II диффузных высыпаний на его полярном крае. Было показано, что зона I обычно формирует полярную стенку ГИП, в то время как зона II формирует полярную стенку ВИП. Это ключевой фактор, позволяющий отличить ГИП от ВИП. Анализ наиболее эффективно проводить в рамках долготного эффекта, поскольку положение всех структур ионосферы зависит от долготы. Положение аврорального овала также зависит от долготы и определяется углом наклона диполя Земли [Карпачев, 2023]. Амплитуда долготных вариаций аврорального овала высыпаний составляет $\sim 2.5^\circ$.

ГИП наиболее ярко выражен в зимних ночных условиях. Однако ночью он достаточно хорошо проявляется и летом. В летнем Южном полушарии на динамике провала должна сильно сказаться аномалия моря Уэдделла. Проверить это предположение и является целью данного исследования.

2. ДАННЫЕ

В работе были использованы данные прямых измерений электронной концентрации N_e на спутнике CHAMP [Rother and Michaelis, 2019]. Данные были отобраны для 5–11 января 2003 г. при высокой солнечной активности ($F_{10.7} \sim 160$ sfu) и для 3–13 января 2008 г. при низкой солнечной актив-

ности ($F_{10.7} \sim 80$ sfu). Данные относятся к относительно спокойным периодам времени с $Kp \leq 4$. Спутник обращался практически на полярной орбите с наклоном 87° , высота орбиты составляла ~ 520 км в январе 2003 г. и ~ 360 км в январе 2008 г. Вариации N_e ниже представлены в терминах плазменной частоты f_p . Измерения проводились через $\sim 1^\circ$ по широте, что позволяет достаточно точно определять положения всех структур ионосферы. Данные спутника CHAMP находятся в свободном доступе на сайте (<https://isdc.gfz-potsdam.de/champ-isdc/>).

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ

На рис. 1 приведено распределение f_p в Южном полушарии для 02–04 LT, полученное по данным CHAMP для высокой солнечной активности (ВСА) и низкой активности (НСА). Карты получены по данным для нескольких спокойных дней в январе 2003 г. и январе 2008 г. соответственно. Значения f_p намного выше при ВСА, чем при НСА, хотя при низкой активности спутник был ближе к максимуму слоя F_2 . Однако по структуре оба распределения похожи. В обоих случаях наблюдается сильное повышение электронной концентрации, связанное с образованием WSA: на долготах от 180° W до 70° E при ВСА и от 150° W до 70° E при НСА. Аномалия намного сильнее развита при ВСА. Штриховой кривой показано положение ГИП, определенное для 04 LT, но в зимних условиях. Вследствие усреднения данных летний ГИП четко проявляется на картах только на долготах 90° – 150° E при ВСА и на долготах 60° – 210° E при НСА. ВИП четко проявился только при ВСА на долготах 120° – 180° E. Таким образом, сравнение распределений электронной концентрации для высокой и низкой солнечной активности позволяет выявить и сходство, и разницу между ними. Более тонкие различия будут выявляться и обсуждаться ниже при детальном анализе.

4. ВАРИАЦИИ РАЗНЫХ СТРУКТУР В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ ПРИ ВЫСОКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

На рис. 2 приведены долготные вариации разных структур летней ночной ионосферы в Южном полушарии. Были использованы данные спутника CHAMP для ВСА, полученные 6–10 января 2003 г. На рис. 3 приведены широтные профили f_p , полученные на разных долготах 7 января 2003 г. для спокойных геомагнитных условий (Kp изменялся от 1+ до 3-). Данные в области средних и высоких широт относятся к послепо-

луночной ионосфере в интервале 02–04 LT. Зоны авроральных диффузных высыпаний на рис. 2 заштрихованы.

Звездочками на рис. 2 показано положение пика N_e , связанного с WSA. Вертикальные линии показывают ширину этого пика, но только для

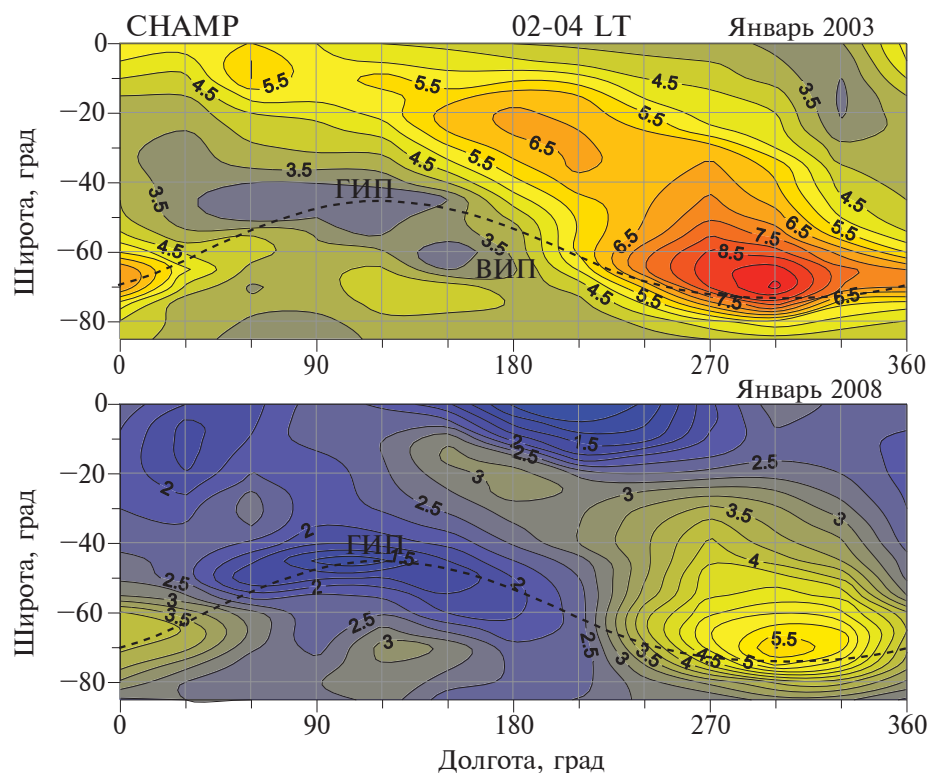


Рис. 1. Распределение плазменной частоты f_p по данным спутника CHAMP в Южном летнем полушарии в январе 2003 г. и январе 2008 г. Местное время 02–04 ч. Штриховой кривой показано положение минимума ГИП для 04 LT в зимних условиях.

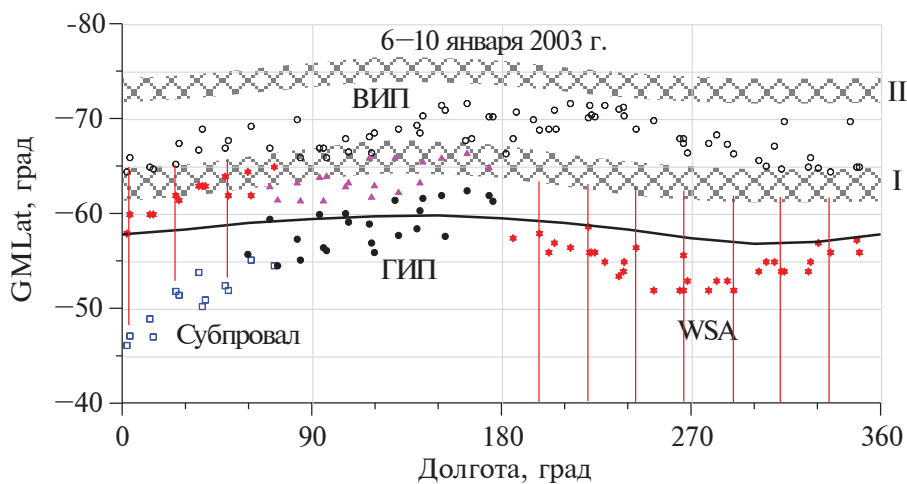


Рис. 2. Долготные вариации по данным CHAMP для высокой солнечной активности в январе 2003 г. положения ВИП (пустые кружки), ГИП (заполненные кружки), полярной стенки ГИП (треугольники), субпровала (квадраты), пика WSA (звездочки). Заштрихованы зоны I и II авроральных диффузных высыпаний согласно модели [Vogobjev et al., 2013]. Вертикальные линии представляют WSA для 7 января. Местное время 02–04 ч. Толстая кривая показывает положение ГИП для 04 LT, но в зимних условиях.

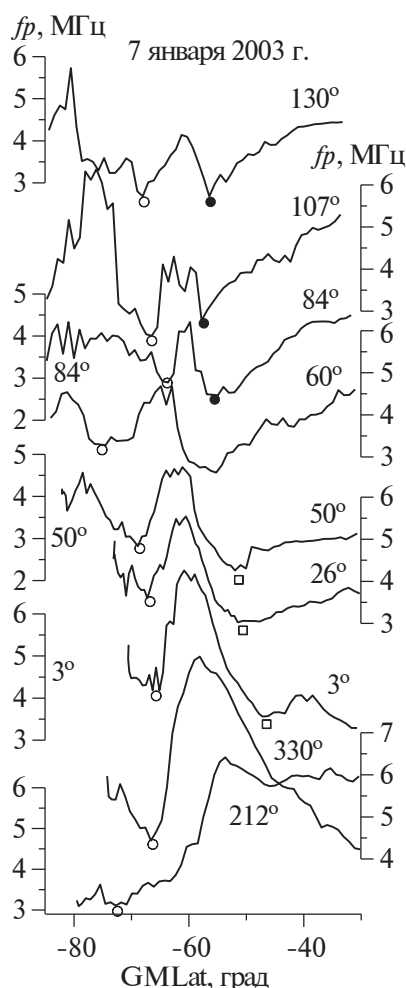


Рис. 3. Широтные разрезы f_p в разных долготных секторах, полученные по данным CHAMP 7 января 2003 г. Заполненные кружки – положение ГИП, пустые кружки – положение ВИП, квадраты – положение субпровала. Для удобства для трех осей Y слева указаны соответствующие долготные сектора.

7 января, чтобы не загромождать график. Заполненными кружками на рис. 2 обозначено положение ГИП. Под ГИП понимается структура, соответствующая классическому главному ионосферному провалу, т.е. достаточно глубокий минимум электронной концентрации на типичных широтах ГИП и полярная стенка на широтах высыпаний в зоне I. Полярная стенка ГИП обозначена треугольниками. Полярнее ГИП часто наблюдается высокоширотный провал, он обозначен пустыми кружками. ВИП как правило наблюдается внутри аврорального овала, его полярная стенка формируется диффузными высыпаниями в зоне II. Из рис. 2 видно, что классический ГИП зажат WSA по долготе с обеих сторон,

так что он наблюдается только в интервале долгот 60–180° E. Собственно говоря, это и есть главная особенность ночной летней ионосферы Южного полушария. Толстая кривая показывает положение зимнего ГИП также для 04 LT [Karpachev et al., 2019]. Видно, что положения летнего и зимнего провалов не сильно различаются. На малых долготах ГИП переходит в структуру, которая похожа на провал, но ее минимум расположен гораздо ниже по широте классического ГИП и соответственно экваториальной кромки аврорального овала. Определим эту структуру как субпровал. Субпровалы обозначены на рис. 2 квадратами. Они наблюдаются на рис. 3 на витках, которые соответствуют долготе 50, 26 и 3° E. Переход ГИП в субпровал происходит настолько незаметно, что его легко пропустить при анализе. Например, структуру на долготе 60° E на рис. 3 можно интерпретировать двояко, и как ГИП, и как субпровал. При этом переход полярная стенка ГИП как на долготе 84° E также незаметно переходит в плазменный пик на долготе 50° E, уже явно связанный с WSA. Из сказанного следует, что структуру ГИП/субпровал однозначно идентифицировать можно только в динамике, рассматривая всю картину в целом, как на рис. 2.

WSA начинает развиваться на долготах менее 60° E. На экваториальном крае аномалии как правило формируется субпровал. При дальнейшем уменьшении долготы наблюдений он становится все менее заметным и при переходе в Западное полушарие исчезает. WSA в Западном полушарии является доминирующей структурой, на рис. 2 она ограничена широтой –40°, на самом деле она простирается дальше к экватору, но в данном случае это не принципиально. Высокоширотный край WSA в Западном полушарии на удивление точно совпадает с экваториальной границей зоны I. Однако это вполне закономерно, поскольку граница высыпаний практически совпадает с плазмопаузой. Полярный ветер за пределами плазмопаузы выносит ионосферную плазму по силовым линиям геомагнитного поля вверх и далее в магнитосферу. Поэтому полярная граница WSA очень резкая. Затем электронная концентрация падает медленно и образует минимум ВИП. Его полярная стенка формируется высыпаниями в зоне II. На малых долготах в Восточном полушарии WSA ограничена не экваториальной, а полярной границей зоны I. Это объясняется тем, что на этих долготах WSA только начинает формироваться, так что на низком фоне уровня становится заметным эффект высыпаний. Иначе говоря, в данном случае полярный край плазменного пика формируется диффузными высыпаниями.

ВИП очень изменчивая структура, и по форме, и по положению, поэтому он практически не воспроизводится при усреднении данных и отражается на карте только в интервале долгот 120–180° Е. Точно так же субпровал отражается на карте вместе с ГИП только в интервале долгот 30–75° Е.

Динамика провалов и WSA в летнем Южном полушарии настолько сложная, что это приводит к противоречивым результатам при ее исследовании. Так, например, в работе [Aa et al., 2020] статистическая обработка данных спутника Swarm показала, что летний провал в Южном полушарии в среднем расположен на 1.4° экваториальнее зимнего. В работе [Yang et al., 2018] летний ГИП был выделен, как и следовало ожидать, только в интервале долгот 60–90° Е, но он оказался в среднем на 3° экваториальнее зимнего провала. Это очевидно связано с тем, что в обоих случаях в массиве данных оказался и субпровал, который занижил среднее положение ГИП. В работе [Lee et al., 2011] данные эксперимента COSMIC/Formosat рассматривались только вне зоны WSA, но среднее положение провала в 04 LT оказалось гораздо полярнее зимнего ГИП, на широтах 64–65°. Нетрудно определить на рис. 2, что это соответствует ВИП, а не ГИП.

На рис. 3 приведены широтные профили f_p , полученные на разных долготах 7 января 2003 г. Они практически обсуждались в процессе описания рис. 2. Отметим еще раз, насколько плавно плазменный пик, формирующий полярную стенку ГИП, поглощается плазменным пиком при образовании WSA. Отметим еще одну особенность на рис. 3. На самом нижнем профиле f_p , полученном на долготе 212° Е, электронная концентрация медленно спадает к высоким широтам, образуя неглубокий ВИП с очень низкой полярной стенкой. Такие широтные профили являются типичными в интервале долгот 150–250° Е. ВИП в этом интервале долгот максимально удален к полюсу. Это вероятно связано со спецификой высыпаний в зоне II в этом интервале долгот.

Для более полного понимания морфологии и причин формирования ночной летней ионосферы Южного полушария рассмотрим наиболее характерные широтные разрезы f_p — рис. 4. На рис. 4а приведены в сравнении два разреза — в нормальной и аномальной ионосфере. Разрезы были получены 9 января 2003 г. в долготных секторах 105° Е и 335° Е. На долготе 105° Е в нормальной ионосфере наблюдается классический ГИП, полярная стенка которого формируется высыпаниями в зоне I. ГИП сопровождается также четко выраженным ВИП, полярная стенка которого соответственно формируется высыпа-

ниями в зоне II. Положения зон высыпаний соответствуют долготе наблюдений и Kp -индексу. В аномальной ионосфере наблюдается чрезвычайно сильно выраженное повышение электронной концентрации, связанное с образованием WSA. Это повышение в максимуме достигает 9–10 МГц. Плазменный пик резко обрывается на широте плазмопаузы, несколько полярнее наблюдается минимум ВИП и еще дальше по широте расположена его полярная стенка. Таким образом, WSA полностью поглощает ГИП, но не влияет на ВИП, по крайней мере, сильно.

На рис. 4б приведен крайне характерный широтный профиль f_p , полученный 13 января 2003 г. на долготе 22° Е и сопряженный с ним профиль f_p , записанный в Северном полушарии практически для тех же самых условий (штриховая кривая). В Северном полушарии наблюдается классический ГИП с минимумом на широте 62°. В Южном полушарии на широтах провала, на этой же долготе 22° Е, начинает формироваться плазменный пик, связанный с WSA. Этот пик не настолько мощный, чтобы полностью поглотить ГИП, но он сдвигает минимум ГИП к полюсу. Этот минимум отмечен на рисунке 4 кружком. А экваториальнее WSA образуется субпровал на широте –50.5°, который отмечен квадратом. Отметим, что никакой специфический механизм для образования субпровала не был задействован — минимум электронной концентрации образуется просто потому, что концентрация растет и к экватору, и к полюсу.

На рис. 4в также приведены профили f_p в Южном и сопряженном Северном полушарии. В Северном полушарии ГИП расположен на широте 58°, которая соответствует долготе и Kp . В Южном полушарии на долготе 47° Е начинает формироваться аномалия, которая заполняет минимум ГИП. Вместо него образуется неглубокий минимум, отмеченный квадратом. Этот минимум расположен на широте –52°, что слишком низко для ГИП, поэтому он является субпровалом. В сопряженном Северном полушарии на этих широтах наблюдается небольшой пик электронной концентрации. Механизм образования такой сопряженной структуры хорошо известен — из летнего полушария с повышенным уровнем ионизации плазма вдоль магнитной силовой трубки перетекает в зимнее полушарие за счет диффузии [Кринберг и Тащилин, 1984]. Этот механизм наиболее эффективен для средних широт, где объем силовых трубок максимально способствует процессу перетекания ионосферной плазмы.

На рис. 4г также приведены сопряженные профили f_p , полученные 8 января 2003 г. в долготном секторе ~35° Е. В Северном полушарии наблюда-

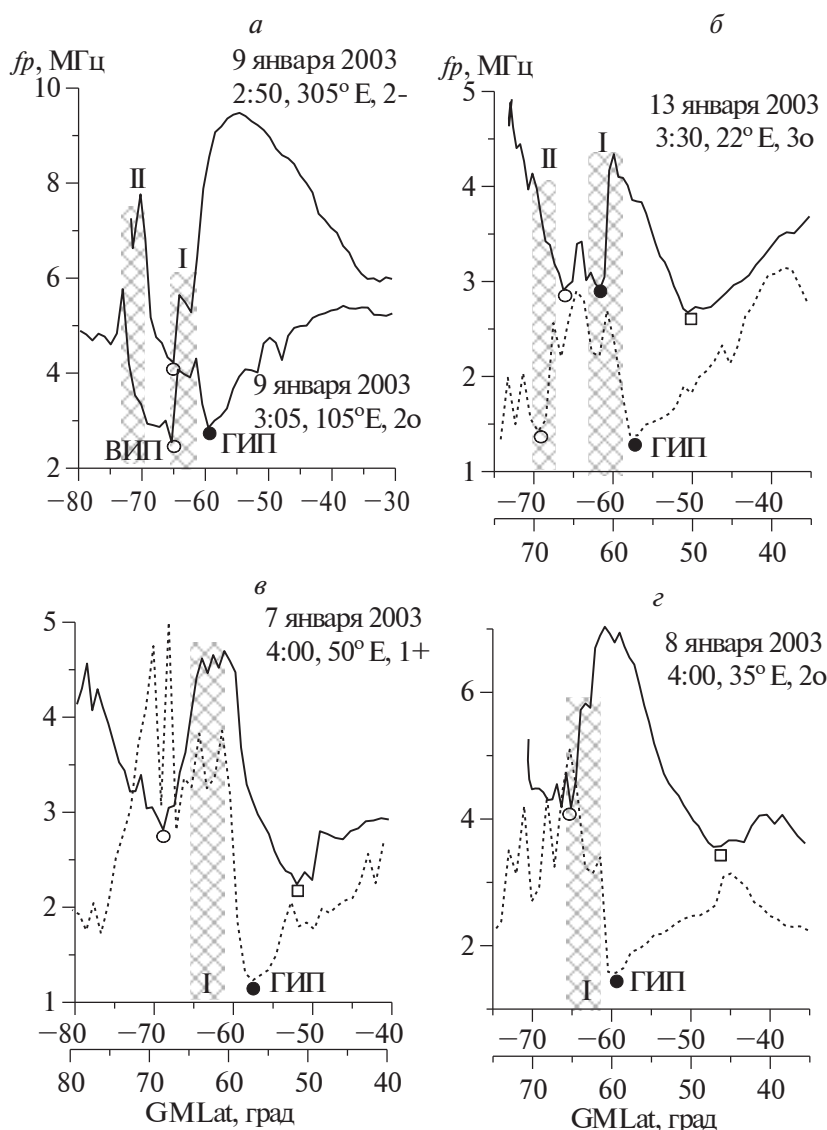


Рис. 4. Характерные широтные разрезы f_p для разных условий в Южном и Северном полушариях. Для каждого случая указаны дата, местное время, долгота и K_p -индекс. Штриховые кривые относятся к Северному полушарию. Положение ГИП отмечено заполненным кружком, ВИП – пустым кружком, субпровала – квадратом.

ется хорошо выраженный ГИП. В Южном полушарии WSA полностью заполняет ГИП. А на очень низких широтах $-(43-47^\circ)$ наблюдается минимум, снова сопряженный с плазменным пиком в Северном зимнем полушарии.

Таким образом, можно выделить две причины образования субпровала, который довольно регулярно наблюдается в интервале долгот $0-60^\circ$ E. Одна из них связана с перекачкой плазмы из летнего полушария в зимнее под действием диффузии. Вторая причина обусловлена резким ростом электронной концентрации к полюсу при образовании WSA и при наличии роста концентрации

к экватору. В свою очередь рост концентрации к экватору связан либо с гребнем экваториальной аномалии, либо с локальным максимумом N_e на низких широтах, который обычно наблюдается и после распада экваториальной аномалии [Карпачев, 2021].

5. ВАРИАЦИИ РАЗНЫХ СТРУКТУР В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ ПРИ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Рассмотрим ситуацию в Южном полушарии при низкой солнечной активности и выделим ее отличия от высокой солнечной активности. На

рис. 5 приведены долготные вариации структур Южного полушария, выделенные за период 3–11 января 2008 г. для НСА и спокойных геомагнитных условий. Данные относятся практически к такому же, как и на рис. 2, интервалу местного времени (03–04 LT). На рис. 6 показаны характерные для НСА широтные профили f_p . Рисунок 6а, аналогично рис. 4а, показывает широтные профили в нормальной и аномальной ионосфере. При НСА увеличение электронной концентрации ночью в области WSA достигает всего 6 МГц по сравнению с 10 МГц при ВСА. ГИП, наоборот, при НСА более ярко проявляется. Поэтому область существования классического ГИП при НСА шире, чем при ВСА и занимает интервал долгот 0–225° Е, как видно на рис. 5. Более слабое развитие WSA сказывается и на том, что полярная граница всех плазменных пиков на рис. 5 определяется диффузными высыпаниями, а не только на малых долготах, как при ВСА (рис. 2). Это связано с тем, что эффект высыпаний становится более заметным на низком фоновом уровне.

Однако главное отличие от ВСА состоит в наличии субпровалов в Западном полушарии. Причем субпровалы наблюдаются на гораздо более низких широтах, чем при ВСА. Два примера субпровала приведены на рис. 6б. Субпровал, зарегистрированный 11 января 2008 г. в долготном секторе 25° Е на широте –52°, подобен субпровалам, которые наблюдаются на малых долготах при ВСА. Субпровал, зарегистрированный в долготном секторе 323° Е, находится на очень низкой

широте –37°. Однако он достаточно четко выделяется, так что его невозможно не заметить при обработке данных. Тем более, если речь идет об автоматическом выделении провалов. Такая методика все чаще применяется в последнее время. Отметим, что субпровалов в Западном полушарии при ВСА нет по простой причине – они заполняются за счет более интенсивной солнечной ионизации. Но даже и при НСА субпровалы в Западном полушарии выражены не очень ярко.

Треугольниками на рис. 5 отмечено положение полярной стенки ГИП, сформированной в виде отдельного пика. Полярная стенка ГИП, как и обычно, связана с диффузными высыпаниями в зоне I. В интервале долгот 120–210° Е полярная стенка по-прежнему крутая, но на ее вершине наблюдается множество плазменных пиков, что затрудняет определение ее положения, и оно не отмечено на рис. 5.

Рисунок 6в полностью аналогичен рис. 4б. На рис. 6в приведен характерный широтный профиль f_p , полученный 5 января 2006 г. на долготе 22° Е и сопряженный с ним профиль f_p , записанный в Северном полушарии практически для тех же самых условий. В Северном полушарии наблюдается классический ГИП с минимумом на широте 62°. В Южном полушарии на этих широтах, наоборот, наблюдается плазменный пик, связанный с образованием WSA. Поскольку данные относятся к полуночным часам местного времени, WSA еще не сильно развита и плазменный пик не полностью поглощает ГИП. Однако этот

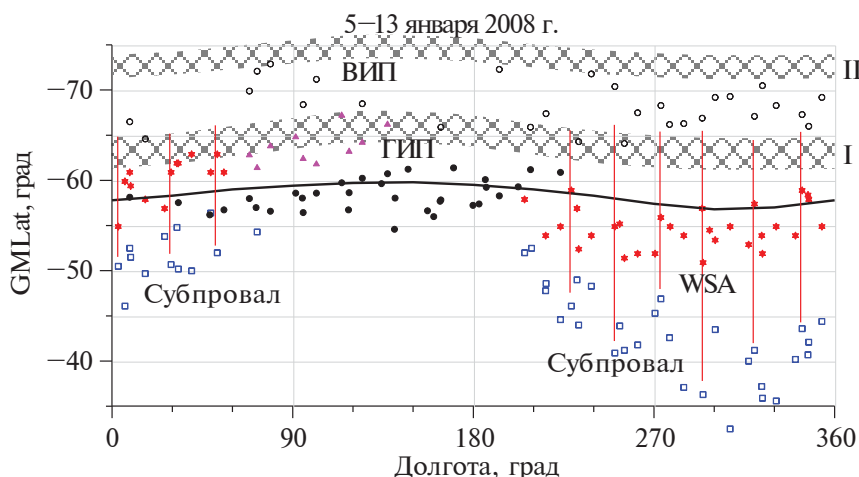


Рис. 5. Долготные вариации по данным CHAMP для низкой солнечной активности в январе 2008 г. положения ВИП (пустые кружки), ГИП (заполненные кружки), полярной стенки ГИП (треугольники), субпровала (квадраты), пика WSA (звездочки). Вертикальные линии представляют WSA для 10 января. Заштрихованы зоны I и II авроральных диффузных высыпаний согласно модели [Vorobjev et al., 2013]. Местное время 03–04 ч. Толстая кривая показывает положение ГИП для 04 LT, но в зимних условиях.

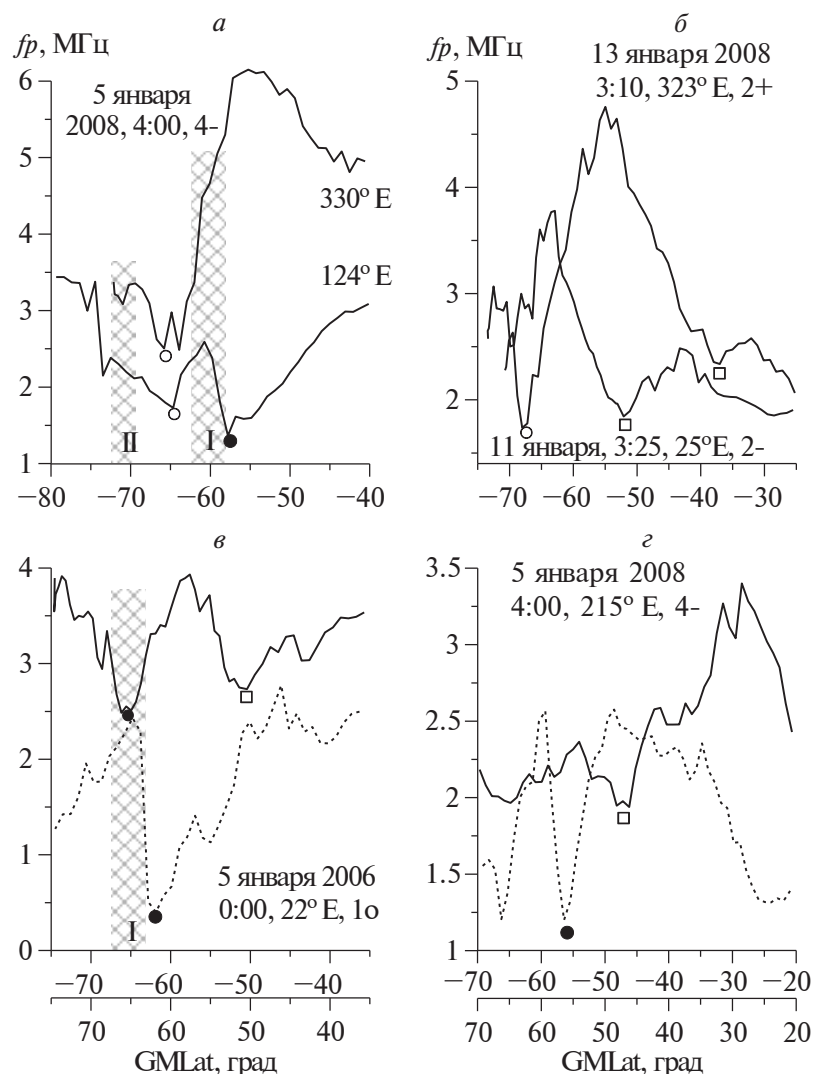


Рис. 6. Характерные широтные разрезы f_p для разных условий в Южном и Северном полушариях. Для каждого случая указаны дата, местное время, долгота и K_p -индекс. Штриховые кривые относятся к Северному полушарию. Положение ГИП отмечено заполненным кружком, ВИП – пустым кружком, субпровала – квадратом.

пик сдвигает минимум ГИП к полюсу, а также образует субпровал на широте -50.5° .

На рис. 6г приведены широтные профили f_p , полученные 5 января 2008 г. в долготном секторе 215° E. В Южном полушарии наблюдается четко выраженный субпровал на широте -47° . На этой же примерно широте в Северном полушарии наблюдается плазменный пик. Таким образом, механизм перекачки плазмы из летнего полушария в зимнее вполне эффективно работает и при низкой солнечной активности.

В работе [Horwath and Lowell, 2009] проводилось исследование провала и WSA по данным

спутника DMSP F15 для зимы 1996–1997, т.е. также для НСА. Полученные результаты можно сравнить с нашими. Плазменная пауза, ГИП, пик WSA и субпровал по данным DMSP находились на широтах -62.5 , -57.5 , -56.2 и -42.5° соответственно. Это очень близко к тому, что наблюдается на рис. 5. Образование субпровала авторы связывали со стагнацией плазмы и влиянием Южно-атлантической магнитной аномалии. И отображали на рис. 6 своей статьи ГИП и субпровал единой ветвью, т.е. объединяли совершенно разные структуры в одно целое. Однако высокоширотный край магнитной аномалии едва достигает -35° GMLat, поэтому трудно согласиться с ее

участием в формировании субпровалов. Что касается стагнации ионосферной плазмы, то она имеет место на всех широтах и долготах в ночной ионосфере при отсутствии солнечной ионизации.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Противоречивые результаты, полученные по провалу ионизации в Южном летнем полушарии, свидетельствуют о непростой для анализа ситуации. Детальное рассмотрение структуры летней ночной (02–04 LT) ионосферы в Южном полушарии полностью подтвердило это предположение. Сложное поведение ионосферы в этих условиях определяется аномалией моря Уэдделла. Выделим основные положения проведенного анализа.

– Плазменный пик, связанный с образованием WSA, в 02–04 LT достигает 6 МГц при НСА и 10 МГц при ВСА.

– На долготах WSA этот пик полностью заполняет главный ионосферный провал. Поэтому ГИП наблюдается только вне WSA, на долготах 60–180° Е при ВСА и 0–210° Е при НСА.

– При ВСА хорошо развитый плазменный пик, связанный с WSA, резко спадает к полюсу на широте плазмопаузы. Эта широта практически совпадает с экваториальной границей авроральных диффузных высыпаний. При НСА плазменный пик, связанный с WSA, менее сильно развит, поэтому он расширяется к полюсу за счет диффузных высыпаний в зоне I. В результате объединенный пик оказывается ограниченным широтой полярной границы диффузных высыпаний в зоне I. Иначе говоря, полярная граница объединенного пика определяется степенью развития WSA. Границы авроральных диффузных высыпаний были определены по модели аврорального овала [Vorobjev et al., 2013].

– На экваториальной границе плазменного пика WSA часто образуется субпровал на широтах гораздо экваториальнее классического ГИП, вплоть до ~35° GMLat. При ВСА этот субпровал наблюдается только на долготах Восточного полушария 0–60° Е, а при НСА и в Западном полушарии. Субпровал, особенно в Западном полушарии, слабо выражен, находится гораздо экваториальнее ГИП, и, тем не менее, в некоторых работах его путают с ГИП. Поэтому его нельзя исключить из анализа.

– Причин образования субпровала, по-видимому, две. Первая и самая простая – минимум субпровала образуется при резком росте электронной концентрации к полюсу при формировании WSA, и к экватору – при наличии гребня экваториальной аномалии или его остатков. Вто-

рая причина связана с переносом электронной концентрации из летнего полушария в зимнее. Этот механизм хорошо известен.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит за предоставленные данные разработчиков и операторов эксперимента CHAMP (Deutsches GeoForschungs Zentrum (GFZ)) и German Aerospace Center (DLR). Данные CHAMP взяты на сайте (<https://isdc.gfz-potsdam.de/champ-isdc/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- Карпачев А.Т., Гасилов Н.А., Карпачев О.А. Морфология и причины аномалии моря Уэдделла // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 6. С. 828–840. 2011.
- Карпачев А.Т. Суточные и долготные вариации экваториальной аномалии для зимнего солнцестояния по данным ИСЗ Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 1. С. 20–34. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010065>
- Карпачев А.Т. Особенности структуры зимней утренней ионосферы высоких и средних широт // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 6. С. 788–797. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600370>
- Aa E., Zou S., Erickson P.J., Zhang S.-R., Liu S. Statistical analysis of the main ionospheric trough using Swarm in situ measurements // J. Geophys. Res. – Space. V. 125. № 3. ID e2019JA027583. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JA027583>
- Ahmed M., Sagalyn R.C., Wildman P.J.L., Burke W.J. Topside ionospheric trough morphology: occurrence frequency and diurnal, seasonal and altitude variations // J. Geophys. Res. – Space. V. 84. № 2. P. 489–498. 1979. <https://doi.org/10.1029/JA084iA02p00489>
- Bellchambers W.H., Piggott W.R. Ionospheric measurements made at Halley Bay // Nature. V. 182. № 4649. P. 1596–1597. 1958. <https://doi.org/10.1038/1821596a0>
- Burns A.G., Zeng Z., Wang W., Lei J., Solomon S.C., Richmond A.D., Killeen T.L., Kuo Y.-H. The behavior of the F2 peak ionosphere over the South Pacific at dusk during quiet summer conditions from COSMIC data // J. Geophys. Res. – Space. V. 113. № 12. ID A12305. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013308>
- Dudeney J.R., Piggott W.R. Antarctic ionospheric research / Upper Atmosphere Research in Antarctica / Antarctic Research Ser., 29. Eds. L.J. Lanzerotti, C.G. Park. Washington, DC: American Geophysical Union. P. 200–235. 1978. <https://doi.org/10.1029/AR029p0200>
- Grebowksy J.M., Tailor H.A., Lindsay J.M. Location and source of ionospheric high latitude troughs // Planet. Space Sci. V. 31. № 1. P. 99–105. 1983. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(83\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(83)90034-X)

- He M., Liu L., Wan W., Ning B., Zhao B., Wen J., Yue X., Le H. A study of the Weddell Sea Anomaly observed by FORMOSAT-3/COSMIC // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 12 ID A12309. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014175>
- Horvath I., Essex E.A. The Weddell Sea Anomaly observed with the TOPEX satellite data // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 65. № 6. P. 693–706. 2003. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(03\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(03)00083-X).
- Horvath I. A total electron content space weather study of the nighttime Weddell Sea Anomaly of 1996/1997 southern summer with TOPEX/Poseidon radar altimetry // J. Geophys. Res. – Space. V. 111. № 12. ID A12317. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006JA011679>
- Horvath I., Lovell B.C. Investigating the relationships among the South Atlantic Magnetic Anomaly, southern nighttime midlatitude trough, and nighttime Weddell Sea Anomaly during southern summer // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 2. ID A02306. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013719>
- Jee G., Burns A.G., Kim Y.-H., Wang W. Seasonal and solar activity variations of the Weddell Sea Anomaly observed in the TOPEX total electron content measurements // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 4. ID A04307. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013801>
- Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V. Longitudinal variations of the ionospheric trough position // Adv. Space Res. V. 63. № 2. P. 950–966. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.09.038>
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Rastovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // Adv. Space Res. V. 55. № 8. P. 2020–2032. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.032>
- Lee I.T., Wang W., Liu J.Y., Chen C.Y., Lin C.H. The ionospheric midlatitude trough observed by FORMOSAT-3/COSMIC during solar minimum // J. Geophys. Res. – Space. V. 116. № 6. ID A06311. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA015544>
- Liu H., Thampi S.V., Yamamoto M. Phase reversal of the diurnal cycle in the midlatitude ionosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 115. № 1. ID A01305. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014689>
- Lin C.H., Liu J.Y., Cheng C.Z., Chen C.H., Liu C.H., Wang W., Burns A.G., Lei J. Three-dimensional ionospheric electron density structure of the Weddell Sea Anomaly // J. Geophys. Res. – Space. V. 114. № 2. ID A02312. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013455>
- Moffett R.J., Quegan S. The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionospheric F-layer: A review of observations and modeling // J. Atmos. Terr. Phys. V. 45. № 5. P. 315–343. 1983. [https://doi.org/10.1016/S0021-9169\(83\)80038-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9169(83)80038-5)
- Muldrew D.B. F-layer ionization troughs deduced from Alouette data // J. Geophys. Res. V. 70. № 11. P. 2635–2650. 1965. <https://doi.org/10.1029/JZ070i011p02635>
- Nilsson H., Sergienko T.I., Ebihara Y., Yamauchi M. Quiet-time mid-latitude trough: influence of convection, field-aligned currents and proton precipitation // Ann. Geophys. V. 23. № 10. P. 3277–3288. 2005. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3277-2005>
- Penndorft R. The average ionospheric conditions over the Antarctic / Geomagnetism and Aeronomy: Studies in the Ionosphere, Geomagnetism and Atmospheric Radio Noise / Antarctic Research Ser., 4. Ed. A.H.Waynick. Washington, DC: American Geophysical Union. P. 1–45. 1965. <https://doi.org/10.1029/AR004p0001>
- Richards P.G., Meier R.R., Chen S., Dandenault P. Investigation of the causes of the longitudinal and solar cycle variation of the electron density in the Bering Sea and Weddell Sea anomalies // J. Geophys. Res. – Space. V. 123. № 9. P. 7825–7842. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025413>
- Rodger A.S., Moffett R.J., Quegan S. The role of ion drift in the formation of ionisation troughs in the mid- and high-latitude ionosphere – a review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 54. № 1. P. 1–30. 1992. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90082-V](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90082-V)
- Rother M., Michaelis I. CH-ME-2-PLPT - CHAMP Electron density and temperature time series in low time resolution (Level 2). GFZ Data Services. 2019. <https://doi.org/10.5880/GFZ.2.3.2019.007>
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V. Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 102. P. 157–171. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>
- Williams P.J.S., Jain A.R. Observations of the high latitude trough using EISCAT // J. Atmos. Terr. Phys. V. 48. № 5. P. 423–434. 1986. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(86\)90119-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(86)90119-4)
- Yang N., Le H., Liu L., Zhang R. Statistical behavior of the longitudinal variations of the evening topside mid-latitude trough position in both northern and southern hemispheres // J. Geophys. Res. – Space. V. 123. № 5. P. 3983–3997. 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JA025048>

Dynamics of the Weddell Sea Anomaly and Main Ionospheric Trough in the Southern Summer Hemisphere

A. T. Karpachev*

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

**e-mail: karp@izmiran.ru*

The impact of the Weddell Sea Anomaly on the structure of the nighttime ionosphere in the Southern summer hemisphere is considered in detail. For this purpose, data from the CHAMP satellite were used in January 2003 under high solar activity and in January 2008 under low solar activity. The data relate to the local time interval 02–04 LT, when the increase in electron density due to the formation of an anomaly is the strongest. At longitudes of 60–180° E under high solar activity and 0–210° E at low solar activity, where there is no anomaly, the main ionospheric trough is observed. The plasma peak in the nighttime ionosphere associated with the anomaly formation reaches 6 MHz under low solar activity, and 10 MHz under high solar activity. The strongly developed plasma peak decreases sharply to high latitudes at the equatorward border of auroral diffuse precipitation, which corresponds to the plasmopause. When the anomaly is weakly developed, the contribution of diffuse precipitation becomes noticeable, so that the plasma peak expands towards the pole due to this precipitation. Poleward of anomaly, the high-latitude trough is usually observed at latitudes of the auroral oval. A well-defined minimum of the electron density is often formed equatorward of Weddell Sea Anomaly, which can be defined as a sub-trough. Sometimes the sub-trough is created by the escape of ionospheric plasma from the summer hemisphere to the winter hemisphere. Then a density maximum is formed in the winter hemisphere at conjugate latitudes. Sub-trough is much more common under low solar activity than under high activity.

Keywords: Weddell Sea Anomaly, ionization trough, sub-trough, auroral diffuse precipitation

УДК 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОПРОВОЖДАВШИХ МАГНИТНУЮ БУРЮ 14–20 ЯНВАРЯ 2022 г.

© 2025 г. В. И. Куркин^{1, *}, Н. А. Золотухина^{1, **}, С. Н. Пономарчук^{1, ***},
А. В. Ойнац^{1, ****}, К. Г. Ратовский^{1, *****}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), Иркутск, Россия

*e-mail: vikurkin@yandex.ru

**e-mail: zolot@iszf.irk.ru

***e-mail: spon@iszf.irk.ru

****e-mail: oinats@iszf.irk.ru

*****e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 06.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Проведен анализ ионосферных возмущений, сопровождавших умеренную магнитную бурю 14–20 января 2022 г. Работа основана на данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы, полученных в Северо-Восточном регионе России, дополненных наблюдениями КВ-радаров и магнитных обсерваторий. Выявлено, что амплитуды положительных и отрицательных ионосферных возмущений, сопровождавших данную бурю, сравнимы с возмущениями, которые наблюдались в другие дни января во время слабых магнитных бурь и возмущений. Специфическими особенностями возмущений, наблюдавшимися только в ходе исследуемой бури, являются: (1) полуночно-утреннее увеличение максимальной наблюдаемой частоты односкачкового мода распространения КВ-радиоволн на трассах Норильск–Торы и Магадан–Торы 14 января; (2) ночные усиления флуктуаций критической частоты F_2 -слоя в Иркутске и максимальной наблюдаемой частоты односкачкового мода на трассе Магадан–Торы 15 января; (3) утренне-полуденные E_s -слои с предельными частотами, достигавшими 7 МГц, наблюдавшиеся на средних широтах в конце первого и начале второго дня восстановительной фазы бури.

Ключевые слова: магнитная буря, зондирование ионосферы, ионосферные возмущения, распространение радиоволн, максимальная наблюдаемая частота, критическая частота F_2 -слоя, главный ионосферный провал, диффузные высыпания электронов

DOI: 10.31857/S0016794025010092, EDN: ADQVRU

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния солнечной и геомагнитной активности на условия распространения радиоволн, начатые в конце 20-х годов прошлого века [Pickard, 1927; Anderson, 1928], позволили установить тесную связь между геомагнитными возмущениями и значительными изменениями структуры ионосферы. По результатам этих исследований был введен термин “ионосферная буря”, под которым понимают совокупность ионосферных возмущений, сопровождающих геомагнитные бури. В настоящее время исследование ионосферных бурь развивается очень интенсивно как по наблюдательным, так и по теоретическим направлениям. Интерес к данному явлению обусловлен

тем, что ионосферные возмущения часто нарушают работу систем ионосферной радиосвязи, вызывая помехи, а в экстремальных случаях отсутствие прохождения радиоволн между приемо-передающими устройствами, а также энергетических систем, приводя к частичному или полному отключению электроэнергии, сбоям в работе железнодорожной автоматики и т.д. [Goodman et al., 2006; Кузнецов, 2014; Пилипенко, 2021].

Для изучения пространственно-временной динамики ионосферной бури принято использовать разность между текущими и фоновыми значениями критической частоты F_2 -слоя ионосферы (foF_2) или определяемой по ней максималь-

ной электронной концентрации ионосферы $NmF2 = 1.24 \times 10^4 (foF2)^2$, а также между текущими и фоновыми значениями полного электронного содержания (ПЭС). По знаку указанной разности ионосферные возмущения разделяют на положительные и отрицательные, считающиеся основными элементами ионосферной бури. В качестве фоновых обычно используют средние значения $foF2/\text{ПЭС}$, измеренные в ближайшие к началу бури магнитоспокойные дни (q -дни), или их месячные медианные значения [Данилов, 2013; Mikhailov et al., 2004]. Однако значительные изменения ионосферных параметров, сравнимые с изменениями, происходящими во время бурь, наблюдаются даже в q -дни, что требует проверки правомерности использования этих дней для определения фона в каждом конкретном случае [Perrone et al., 2020]. Второй способ более приемлем тогда, когда значения $foF2/\text{ПЭС}$, измеренные в магнитоспокойные дни, значительно отличаются от их месячных медианных величин. Кроме положительных и отрицательных возмущений различной амплитуды и длительности, ионосферная буря включает в себя усиленное образование спорадических и диффузных ионосферных слоев.

Пространственно-временные масштабы и интенсивность ионосферных возмущений, также как и уровень геомагнитной активности, увеличиваются с ростом корпускулярной и электромагнитной энергии, поступающей из межпланетной среды первоначально в высокоширотную часть магнитосферно-ионосферной системы, а затем в другие области внешних геосфер [Prölss, 2006]. Наиболее сильные магнитосферно-ионосферные возмущения приходятся на годы максимума солнечной активности.

Обобщенная пространственно-временная картина развития ионосферной бури основана, главным образом, на данных, полученных во время изолированных сильных и умеренных магнитных бурь, имеющих явно выраженные главную, восстановительную, а в некоторых случаях, начальную фазу [Prölss, 1997; Fuller-Rowell et al., 1997; Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Данилов, 2013]. Установлено, что проявления ионосферной бури, регистрируемые конкретным ионозондом, зависят не только от межпланетных, магнитосферных и термосферных процессов, но также и от местоположения наблюдательного пункта и его местного времени [Жеребцов и Пирог, 2008; Kurkin et al., 2008].

Гораздо меньше информации собрано к настоящему времени об ионосферных возмущениях, сопровождающих слабые магнитные бури,

которые на средних широтах могут быть сопоставимы с изменениями во время сильных магнитных бурь [Buresova et al., 2014]. Уменьшение максимальных наблюдаемых частот односкачкового мода распространения КВ-радиоволн ($MUF(3000)F2$) во время слабых магнитных бурь может составлять 25–50% [Kurkin et al., 2022; Куркин и др., 2022]. В работе [Ratovsky et al., 2022] показано, что около половины из 25 наблюдавшихся в Иркутске в 2003–2016 гг. экстремальных повышений максимальной электронной концентрации в $F2$ -слое ионосферы, при которых нормированные отклонения $NmF2$ от месячных медианных значений были больше 150%, наблюдалось во время слабых геомагнитных возмущений с минимумом $Dst > -30$ нТл. Согласно критерию, указанному в работе [Gonzalez et al., 1994], возмущения с индексом $Dst > -30$ нТл не являются геомагнитными бурями.

Попытка статистического исследования реакции ионосферы на “более слабую” (“weaker”) геомагнитную активность предпринята в публикации [Chen et al., 2022]. Для отбора “weaker” событий авторы использовали критерий $Ap < 60$. В результате применения этого критерия в анализируемую в работе [Chen et al., 2022] выборку вошли сильные и умеренные магнитные бури, что ставит под сомнение правомерность сделанных в этой работе выводов о тенденциях изменения ионосферного отклика на слабые магнитные возмущения. Еще одним существенным недостатком работы [Chen et al., 2022], ставящим под сомнение ее выводы, является неоднородность экспериментальных данных, на которых она основана.

В данной работе продолжены исследования отклика ионосферы на слабые магнитные бури, начатые в работе [Kurkin et al., 2022; Куркин и др., 2022], где показано, что отклик ионосферы на воздействие высокоскоростного потока солнечного ветра, вызывающего бурю, зависит как от геоэффективных параметров потока, так и от продолжительности его воздействия на магнитосферно-ионосферную систему и ее исходного состояния.

2. ОБЪЕКТ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования выбраны ионосферные данные, полученные в январе 2022 г. на фазе роста 25-го цикла солнечной активности. Анализ геомагнитной обстановки основан на рядах значений Kp , Dst , ap [URL OMNI2] и SME [URL SME] индексов. Характеристики межпланетных источников, вызвавших геомагнитные возмущения, представленных в работе параметрами плазмы солнечного ветра (SW) и межпланетного магнитного поля (IMF) [URL OMNI2]. По параметрам SW

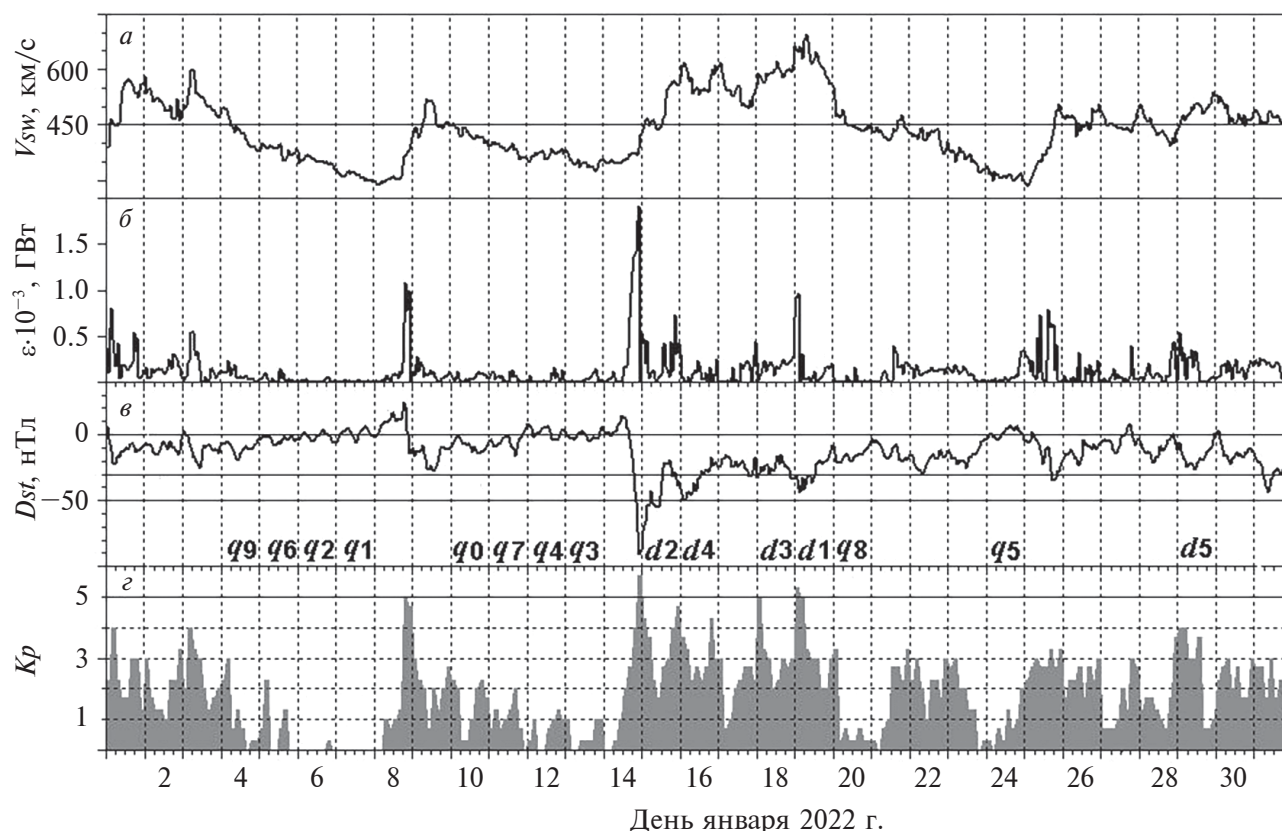


Рис. 1. Вариации скорости солнечного ветра V_{sw} (а); параметра Акасофу ϵ (б); Dst - (в) и Kp - (z) индексов в январе 2022 г. Горизонтальные линии отмечают на панели (а) — значение $V_{sw} = 450$ км/с, используемое для выделения высокоскоростных потоков [Borovsky and Denton, 2010]; на панели (в) — уровни $Dst = -30$ и -50 нТл, являющиеся верхними пороговыми значениями для слабых и умеренных магнитных бурь соответственно [Loewe and Prolss, 1997]; на панели (z) — уровень $Kp = 5$, используемый как нижний порог при идентификации магнитных бурь. Символами q и d с цифрами отмечены магнитоспокойные и магнитовозмущенные дни в соответствии с их обозначениями на [URL qd].

и IMF вычислен параметр Акасофу ϵ (поток энергии, падающий из межпланетной среды на подсолнечную магнитосферу [Akasofu, 1981]).

На рис. 1 показано, что в течение выбранного месяца магнитосферно-ионосферная система подвергалась воздействию 4 высокоскоростных потоков солнечного ветра, пиковые скорости которых были больше 450 км/с. Первый поток вызвал слабые возмущения 1–4 января с минимумом $Dst = -25$ нТл и максимумом $Kp = 4$; второй, более медленный поток 8–11 января, — слабую бурю 8–11 января с повышением Kp до бурового уровня $Kp = 5$ и понижением Dst до -27 нТл.

Возмущения 14–20 января являются умеренной магнитной бурей (минимум $Dst = -91$ нТл, максимум $Kp = 6$). Она была вызвана комплексной межпланетной неоднородностью, сформированной межпланетным выбросом корональной массы, набегавшим на него высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры

SH1054 и еще двумя корональными выбросами. Скорость ветра немонотонно нарастала от 360 км/с в лидирующей части неоднородности до 700 км/с в предпоследний день бури. На переднем фронте неоднородности направленная к югу вертикальная компонента межпланетного магнитного поля (B_z ММП) усилилась до -17 нТл (на рисунке не показана). На панели (б) видно, что мощность внешнего источника бури 14–20 января, оцениваемая с помощью параметра Акасофу (ϵ), была в ~ 2 раза больше, чем мощность межпланетных источников других возмущений. Следует ожидать, что эту бурю сопровождали более сильные, чем наблюдавшиеся во время других событий, ионосферные возмущения.

Серии слабых возмущений 22–23 и 25–31 января характеризовались множественными понижениями Dst , из которых только 2 могут быть отнесены по минимумам $Dst = -34$ и -44 нТл (25 и 31 января соответственно) к слабым магнитным бурям.

Отметим, что в январе 2022 г. внезапного стратосферного потепления, оказывающего, согласно Mikhailov et al. [2021], заметное влияние на развитие ионосферных возмущений не было [Vargin et al., 2022]. Зато в ~04:15 UT 15 января произошло мощное извержение вулкана Tonga, вызвавшее генерацию перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с основными периодами ~10–30 мин, распространявшихся вдоль большого круга со скоростью 300–350 м/с [Zhang et al., 2022].

Конкретная цель нашей работы – сравнить ионосферные возмущения, развивавшиеся во время умеренной бури 14–20 января, с теми возмущениями, которые наблюдались в другие дни января 2022 г., в том числе в дни слабых бурь и в q -дни.

3. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследование основано на рядах месячных значений критической частоты и высоты пика $F2$ -слоя ($foF2$ и $hmF2$), предельной частоты

Es -слоя ($foEs$), а также измерений $MUF_{3000}F2$, полученных на трассах наклонного зондирования (НЗ) ионосферы.

Значения $foF2$, $hmF2$, $foEs$ были измерены с помощью ионозонда $DPS-4$ и ЛЧМ-ионозонда, расположенных в Иркутске (52.5° N , 104° E , $\Phi = 48.4^\circ$) с $\Delta t = 15$ мин и в Торах, р. Бурятия (52° N , 103° E , $\Phi = 48^\circ$) со скважностью $\Delta t = 1$ мин. Здесь Φ – исправленная геомагнитная широта. Дополнительно используются наблюдения аврального эха в Екатеринбурге (EKB) и Магадане (MGW) на КВ-радарх, ряды значений горизонтальной (H) составляющей геомагнитного поля, измеренной на обсерваториях Иркутск, Якутск (62° N , 129.7° E , $\Phi = 56.8^\circ$) [URL Intermag] и оригинальные данные магнитной обсерватории Норильск (69.4° N , 88.1° E , $\Phi = 65.3^\circ$), а также координаты полярной и экваториальной границ аврального овала, взятые на сайте [URL Oval]. Карта размещения наблюдательных средств показана на рис. 2.

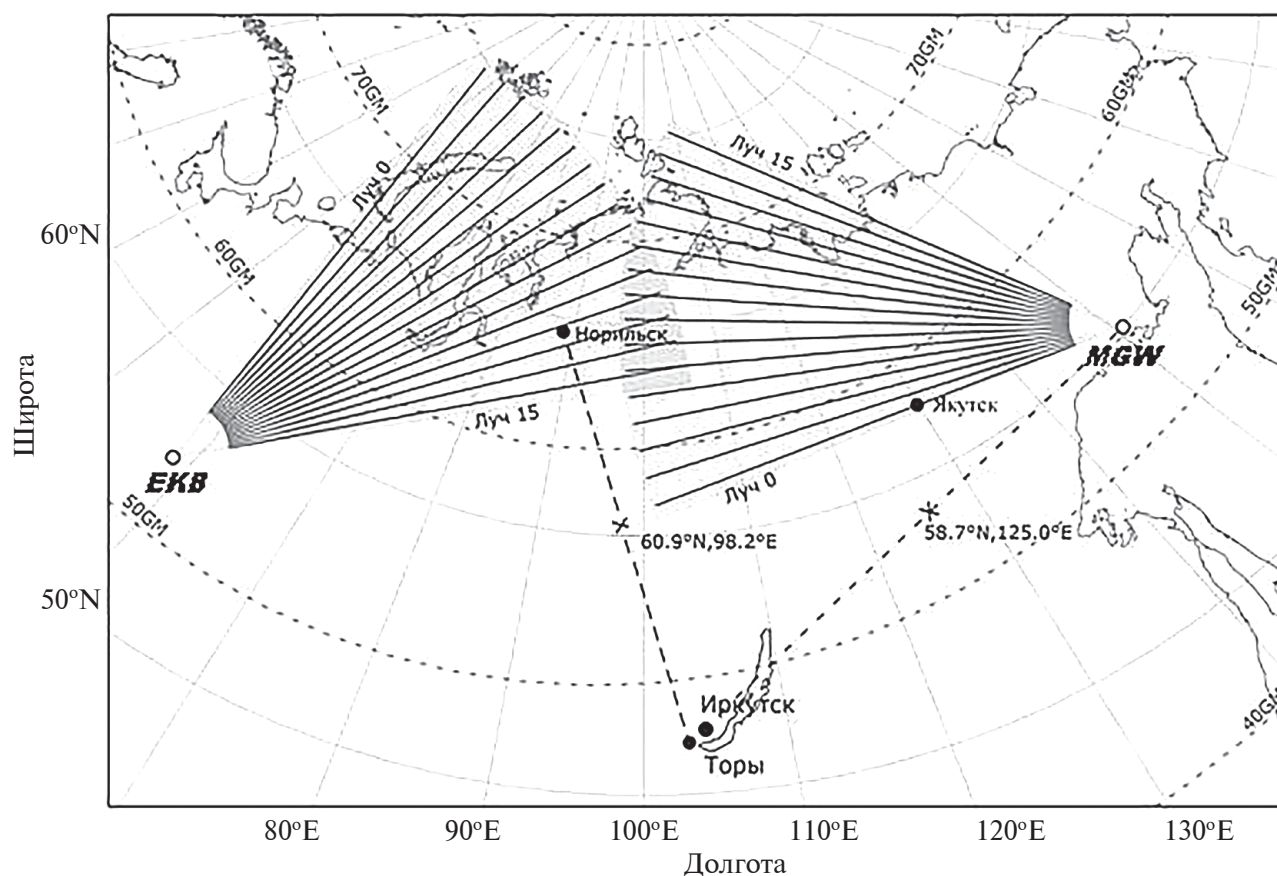


Рис. 2. Карта расположения средств зондирования ионосферы и магнитных обсерваторий. Точками показаны ионосферные станции и магнитные обсерватории; штриховыми и сплошными линиями – радиотрассы и лучи радаров соответственно, крестиками – средние точки радиотрасс.

Измерения МНЧ1F2 проводились со скважностью $\Delta t = 5$ мин на трассах Норильск–Торы и Магадан–Торы (координаты средних точек трасс 60.9° N , 98° E , $\Phi = 57^\circ$ и 58.5° N , 125.8° E , $\Phi = 53.7^\circ$ соответственно).

Непрерывный мониторинг на указанных трассах проводился с использованием аппаратуры многофункционального ЛЧМ-ионозонда “Ионозонд-МС” [Подлесный и др., 2013]. Северный участок первой трассы расположен в субавроральных широтах. Трасса Магадан–Торы относится к среднеширотным, но во время сильных магнитных возмущений ее северный участок, включая среднюю точку, может находиться в области главного ионосферного провала (ГИП) [Полех и др., 2016]. В нашей работе исправленная геомагнитная широта (Φ) дна ГИП определена по модели, представленной в работе [Демин и Шубин, 2018]. В ней широта дна ГИП вычисляется по значениям ap -индекса в текущем и нескольких (в нашем случае в 4) предшествующих 3-часовых интервалах.

4. ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 14–20 ЯНВАРЯ 2022 Г.

На трех нижних панелях рис. 3 приведены графики изменений МНЧ1F2 на двух трассах и f_oF2 , f_oEs над Иркутском, построенные по оригинальным данным, полученным в течение 4 дней, предшествующих умеренной буре 14–20 января, и во время бури. Для удобства сравнения, на верхней панели приведен график изменения Dst -индекса.

Магнитная буря началась около 16 UT 14 января с главной фазы и продолжалась до конца 20 января. В предшествующие буре магнитоспокойные дни 10–13 января на трассе Магадан–Торы и в Иркутске были зарегистрированы ночные положительные ионосферные возмущения. В это время значения МНЧ1F2 были на ~ 2 МГц, а f_oF2 на ~ 1.5 МГц больше месячных медианных значений (показаны на рисунке серой линией). Авторы работы [Mikhailov et al., 2004] называют такие события “Q disturbances” и полагают, что они генетически связаны с планетарными волнами. Из-за наличия ночных Q-возмущений мы

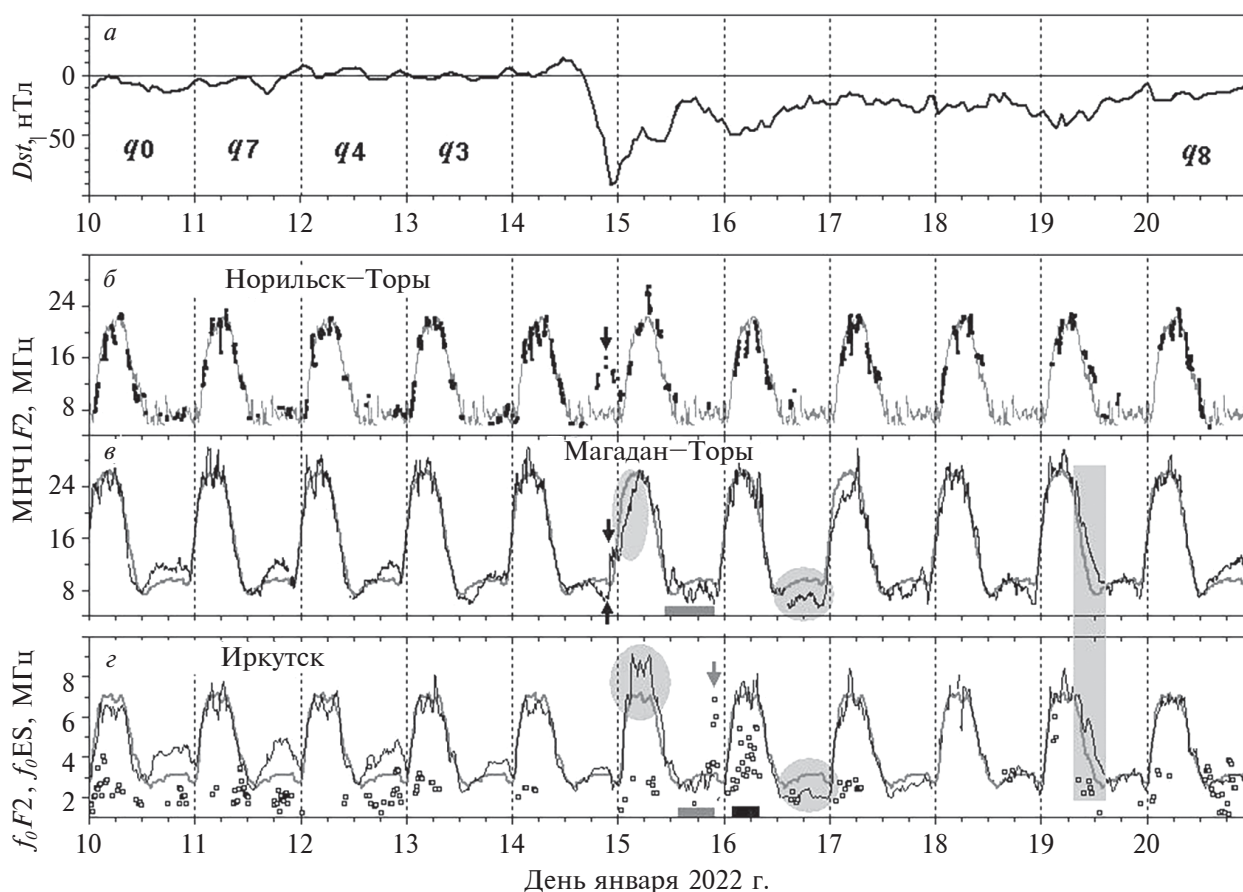


Рис. 3. Вариации Dst индекса (а); МНЧ1F2 на трассах Норильск–Торы (б) и Магадан–Торы (в); f_oF2 и f_oEs в Иркутске (з). Текущие/фоновые значения МНЧ1F2 и f_oF2 показаны черными/серыми линиями, значения f_oEs — квадратами.

выбрали в качестве фоновых месячные медианные значения ионосферных параметров.

Графики, приведенные на рис. 3, показывают, что в рассматриваемом нами долготном секторе ионосферная буря началась перед 19:00 UT 14 января, примерно через 3 ч после начала главной фазы магнитной бури, и закончилась через 5 дней (около 14:00 UT 19 января в предпоследний день поздней восстановительной фазы бури). Укажем отчетливо видные на графиках возмущения, которые могут быть проявлениями ионосферной бури.

4.1. Положительное ионосферное возмущение, наблюдавшееся на трассе Норильск—Торы в 18:53–23:53 UT 14 января после 200-минутного блэкаута, и резкое увеличение $MNCH1F2$ от 8 до 13.6 МГц, зарегистрированное на трассе Магадан—Торы в 22:00–22:05 UT 14 января (между двумя сеансами зондирования) после отрицательного возмущения. На рис. 3 эти элементы отмечены черными стрелками. На трассе Норильск—Торы возмущение было максимальным в 20:58–21:13 UT 14 января.

4.2. Выделенные овалами дневное отрицательное возмущение, зарегистрированное на трассе Магадан—Торы в 23:45–04:50 UT 14–15 января, и частично перекрывающееся с ним по времени продолжительное дневное положительное возмущение, развивавшееся над Иркутском в 02:00–09:00 UT 15 января.

4.3. Усиление короткопериодных вариаций $MNCH1F2$ и $foF2$ в ночные часы 15 января на трассе Магадан—Торы (в 10–21 UT; 18.5–05.5 LT) и над Иркутском (в 13–22 UT; 20–05 LT). На рис. 3 указанные интервалы отмечены серыми прямоугольниками на оси абсцисс панелей *в*, *г*. Средний период вариаций $T \approx 110$ –120 мин.

4.4. Наблюдавшаяся в Иркутске и Торах интенсификация диффузных утренних (серая стрелка на панели *г*) и дневных (черный прямоугольник на оси абсцисс панели *г*) плоских спорадических слоев с большими предельными частотами, максимальные значения которых равны соответственно 7 и 5.5 МГц.

4.5. Отмеченные овалами ночные отрицательные возмущения, наблюдавшиеся в Иркутске и на трассе Магадан—Торы 16 января в близких временных интервалах. На трассе Магадан—Торы ночное отрицательное возмущение перешло в более слабое дневное отрицательное возмущение, продолжавшееся до 05:00 UT 17 января.

4.6. Последнее заметное ионосферное возмущение (выделено серым прямоугольником) наблюдалось одновременно на трассе Магадан—

Торы и в Иркутске в 09:30–13:00 UT (вечерние часы) 19 января. В максимуме возмущения текущие значения $MNCH1F2$ и $foF2$ были соответственно на 60 и 40% больше фоновых.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставления указанных в разделе 4 элементов ионосферной бури 14–20 января 2022 г. с ионосферными возмущениями, наблюдавшимися в другие дни этого месяца, мы выделили из исходных рядов данных короткопериодные (периоды $0.5 < T \leq 3.5$ ч, диапазон крупномасштабных и среднемасштабных ПИВ [Hunsucker, 1982]) и продолжительные ($36 > T > 3.5$ ч) возмущения. Для проведения этой процедуры был использован полосовой фильтр, не дающий фазовых сдвигов [Marmet, 1979]. Изменения нормированных отклонений продолжительных возмущений $MNCH1F2$ и $foF2$ ($\Delta MNCH1F2$ и $\Delta foF2$), наблюдавшихся в течение месяца, от их фоновых значений (определены для тех же периодов) показаны на рис. 4.

Укажем те специфические элементы ионосферной бури 14–20 января 2022 г., которые значительно отличаются от возмущений, происходивших в другие дни.

5.1. Прежде всего, это указанное в п. 4.1. единственное явное ионосферное возмущение, наблюдавшееся в январе 2022 г. на трассе Норильск—Торы. Оно развивалось в виде увеличения $MNCH1F2$, начавшегося в главную фазу бури около 19 UT 14 января и достигшего в максимуме значения $\Delta foF2 \sim 140\%$ в 3–6 раз большего, чем положительные возмущения, наблюдавшиеся в другие дни. На левых панелях рис. 5 видно, что рост $MNCH1F2$ начался после смещения дна ГИП до широты меньшей, чем Φ средней точки трассы. Отмеченный вместе с ним в п. 4.1. скачкообразный рост $MNCH1F2$ на трассе Магадан—Торы в 22:00–22:05 UT тоже произошел после перехода средней точки трассы с экваториальной на полярную стенку ГИП. Анализ ионограмм НЗ показал, что рост $MNCH1F2$ в этот период времени обусловлен многолучевым распространением мода $1F2$, так как полярная стенка ГИП близко подходит к средней отражающей области ионосферы радиотрассы Магадан—Торы. Кроме того, дополнительный вклад в увеличение $MNCH1F2$ могли внести авроральные высыпания во время суббури, проявления которой в геомагнитных вариациях показаны на рис. 5 справа.

На субавроральной ст. Якутск быстрое понижение H -компоненты магнитного поля, характерное для взрывной фазы суббури, совпало по времени с увеличением SME -индекса на ~ 400 нТл [URL *SME*]. Оно началось примерно

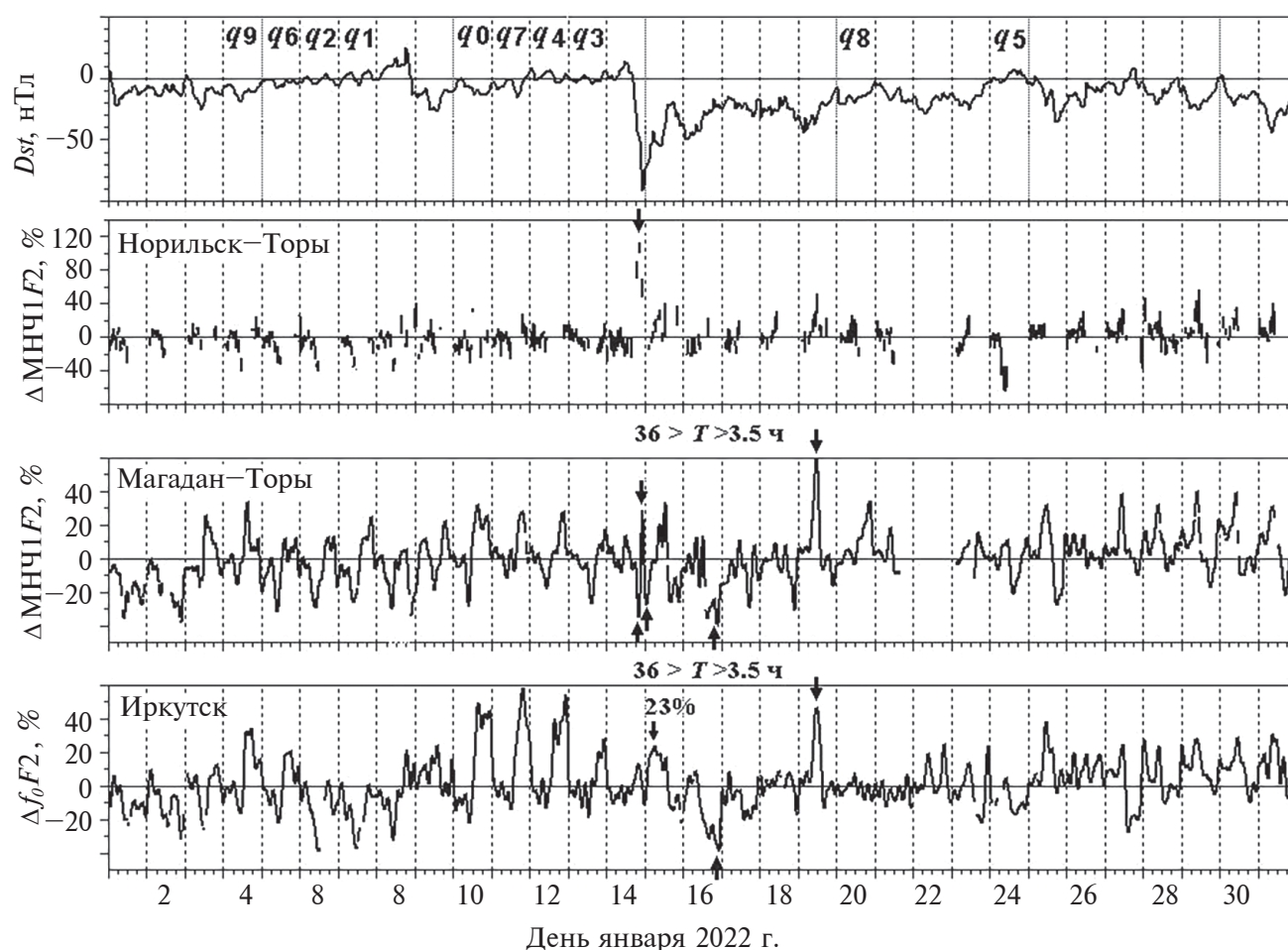


Рис. 4. На верхней панели показаны вариации Dst -индекса; ниже — $\Delta MUF2$ на трассах Норильск–Торы, Магадан–Торы и $\Delta foF2$ над Иркутском. Черными стрелками отмечены элементы ионосферной бури, представленные в пунктах 4.1, 4.2, 4.5 и 4.6 раздела 4 (см. текст).

через 5 мин после резкого увеличения $MUF2$ на трассе Магадан–Торы. На авроральной обс. Норильск и среднеширотной обс. Иркутск отрицательное и положительное возмущения H соответственно начались на ~40 мин позднее, что указывает на продвижение суббуревых явлений в сторону запада. По данным MGW-радара развитие суббури сопровождалось увеличением доплеровских скоростей аврорального эха до максимальных для данной бури значений ± 400 м/с. Сигналы эха приходили из сектора, включающего меридиан Якутска, а их источники были расположены в окрестности экваториальной границы аврорального овала (см. рис. 6). При этом севернее этой границы скорости были направлены на запад; южнее нее — на восток, в сторону радара, что соответствует области усиленного западного электроджета.

5.2. Вторым специфическим элементом рассматриваемой ионосферной бури является активизация короткопериодных вариаций $MUF2$ и $foF2$ в ночные часы 15 января, отмеченная в п. 4.3. На рис. 7 показано, что на трассе Магадан–Торы усиление короткопериодных вариаций $MUF2$ (отмечено стрелкой с ломаной линией) наблюдалось в 10–21 UT (18.5–05.5 LT) 15 января. В этом интервале среднеквадратическое отклонение $MUF2$ составляло 0.8 МГц, а в эти же часы в другие дни — в 2 раза меньше, всего лишь 0.4 МГц. Над Иркутском активизация короткопериодных вариаций $foF2$ (отмечена стрелкой) произошла примерно на час позже — в 13–22 UT (20–05 LT). Она характеризовалась среднеквадратическим отклонением $S = 0.24$ МГц в ~2.5 раза большим, чем в другие дни ($S = 0.1$ МГц). Менее значительное (примерно в 1.5 раза, до $S = 0.6$ МГц) усиление короткопериодных вариаций $MUF2$

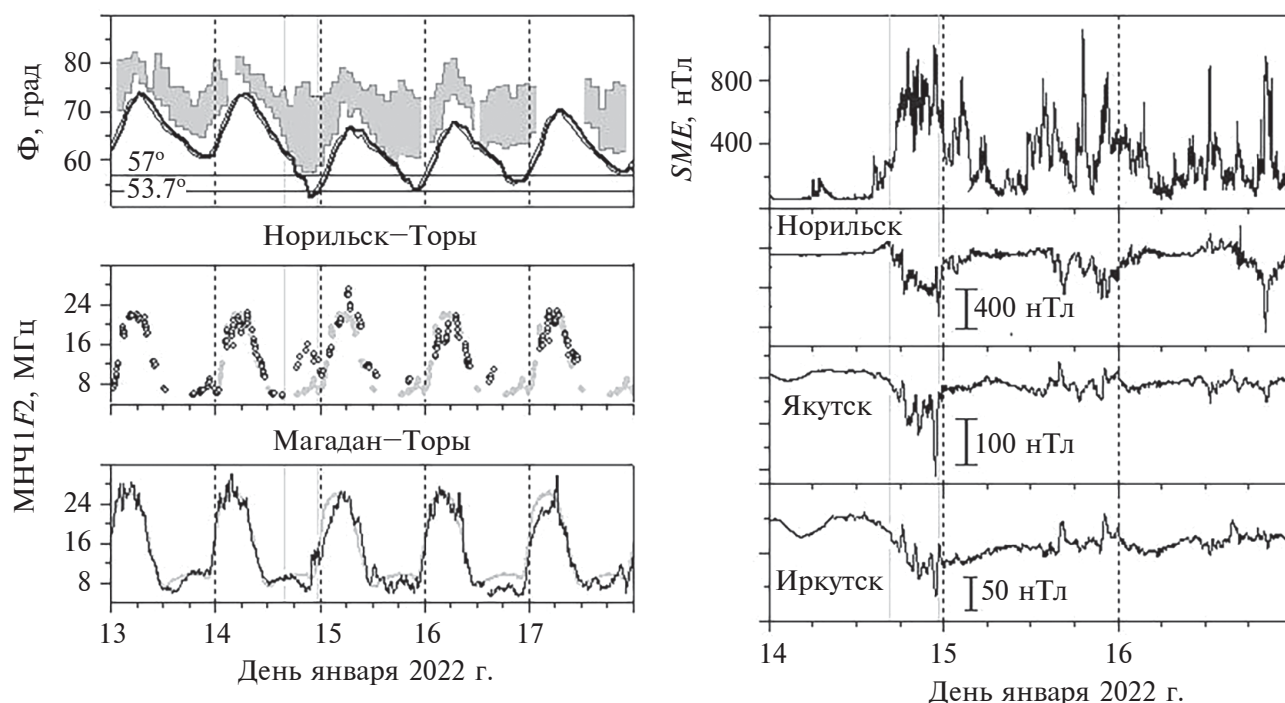


Рис. 5. Слева сверху вниз показаны изменения исправленной геомагнитной широты аврорального овала (серая фигура) и дна ГИП на долготах 105° и 120° Е (линии), МНЧ1F2 на трассах Норильск–Торы и Магадан–Торы; справа — график SME -индекса и вариации H -компоненты геомагнитного поля, зарегистрированные тремя обсерваториями, размещенными в рассматриваемом долготном секторе. Динамика дна ГИП рассчитана по модели [Демин и Шубин, 2018]. Границы овала построены по данным, приведенным на [URL Oval].

наблюдалось также в 10–21 UT 9 января только на трассе Магадан–Торы. Этот интервал тоже отмечен стрелкой с ломаной линией. Сравнивая графики, видим, что в обоих случаях ночные активизации короткопериодных составляющих вариаций МНЧ1F2 произошли на фазе восстановления умеренной и слабой магнитных бурь примерно через сутки после того, как дно ГИП сместилось до средней точки трассы.

Амплитуды короткопериодных вариаций МНЧ1F2 и $foF2$, наблюдавшихся в дневные часы января 2022 г. (на рисунке не показаны), были в 3 раза больше ($S = 1.02$ и 0.32 МГц соответственно) амплитуд ночных вариаций. Они слабо менялись день ото дня, в том числе при переходе от магнитоспокойных дней 10–13 января к магнитовозмущенному дню 15 января. Средний период наблюдавшихся вариаций $T \approx 110$ –120 мин. Он близок к периоду ПИВ $T = 1.8$ ч, связанных с геомагнитными бурями [Ding et al., 2008]. Однако перманентный характер короткопериодных вариаций МНЧ1F2 и $foF2$, представленных в статье, не позволяет отождествить их с ПИВ, эпизодически возникающими в высоких широтах во время геомагнитных возмущений [Hunsucker, 1982].

5.3. К особым элементам ионосферной бури мы отнесли также указанную в п. 4.4. активизацию плоских среднеширотных спорадических слоев в утренние и дневные часы 15–16 января. На верхней левой панели рис. 8 показано, что спорадические слои с $foEs$ от 1 до 7 МГц наблюдались ежедневно. Число сеансов, в которых их предельные частоты были больше 3.1 МГц (верхней квартили месячного ряда значений $foEs$), менялось ото дня ко дню от 1 до 17. Максимальное число ионограмм с $foEs > 3.1$ МГц было получено в 17 из 18 сеансов, проведенных в 03:30–07:45 UT (10:30–14:30 LT) 16 января. На нижней левой панели рис. 8 видно, что в эти часы активизация спорадических слоев наблюдалась только 16 января. К особенностям данной ионосферной бури можно отнести также активизацию утренних спорадических слоев в 20:45–22:45 UT (03:45–05:45 LT) 15 января, во время которой в трех последовательных сеансах были зарегистрированы наибольшие для января 2022 г. предельные частоты 5.6, 6.9 и 6.6 МГц. В утренние часы значение $foEs = 6.6$ МГц, близкое к наблюдавшемуся 15 января, было зарегистрировано только 2 января в 1 из 96 проведенных в этот день сеансов. В работе [Tang et al., 2022]

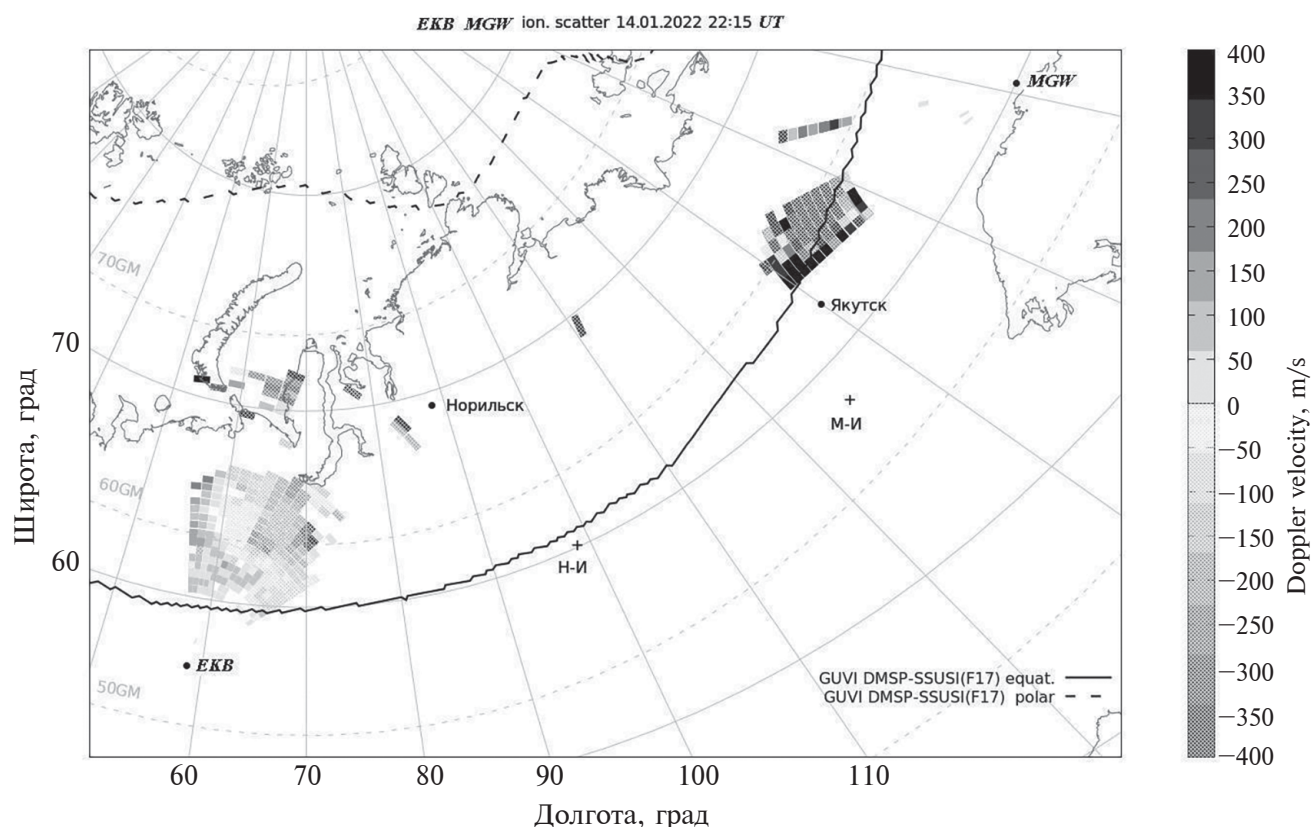


Рис. 6. Карта источников аврорального эха, зарегистрированных двумя КВ-радарми в 22:15 UT 14.01.2022 г. Штриховая/сплошная линии показывают положение северной/южной границы овала (построены по данным [URL Oval]).

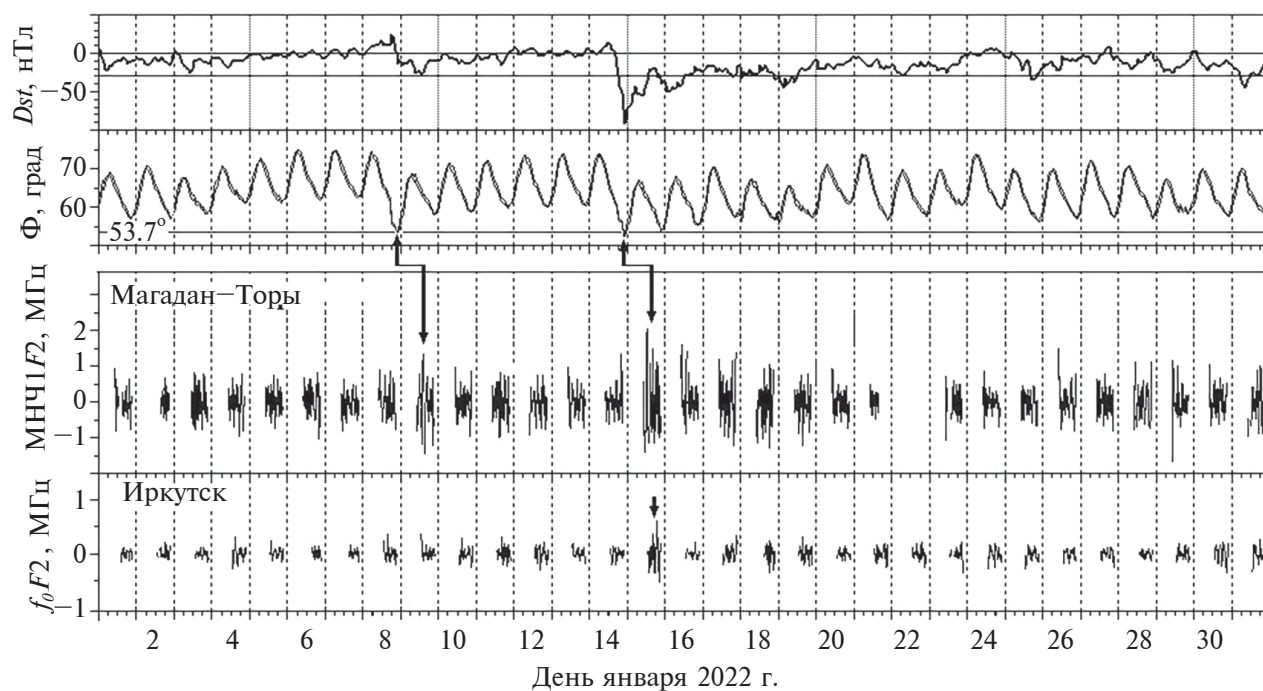


Рис. 7. Вариации Dst -индекса, широты ГИП и короткопериодных составляющих МНЧ1F2 на трассе Магадан—Торы и f_0F2 в Иркутске в ночное время суток.

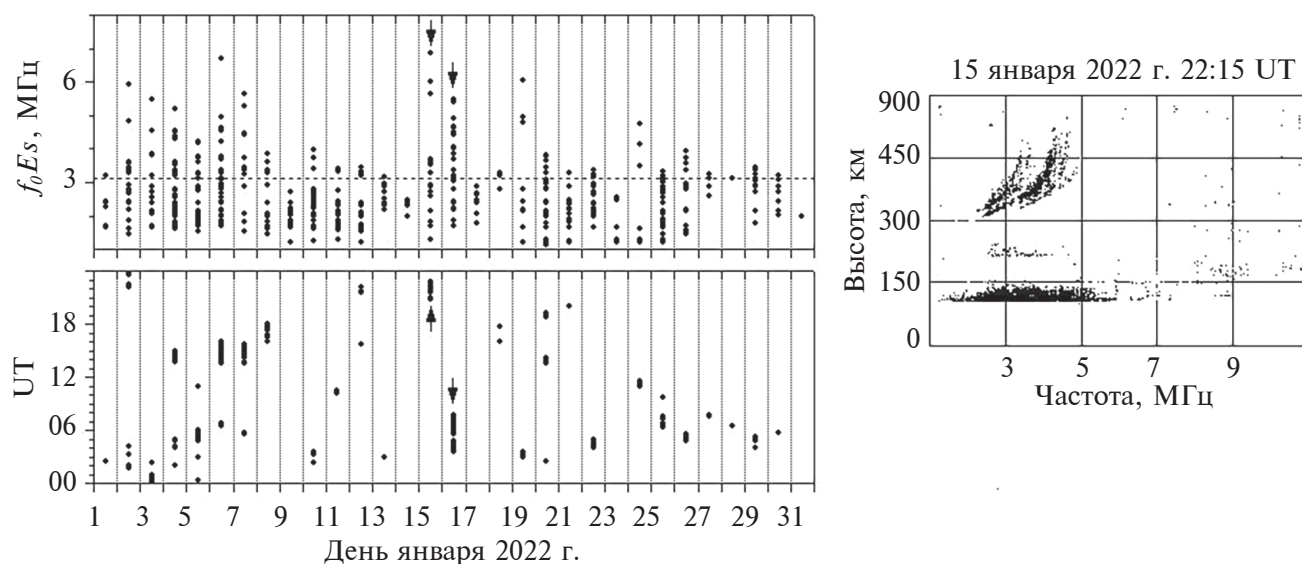


Рис. 8. Слева сверху показаны значения f_oEs , измеренные в Иркутске в течение каждого дня января 2022 г.; внизу — время регистрации f_oEs , больших чем 3.1 МГц. Здесь 3.1 МГц — верхняя квартиль месячного ряда значений f_oEs , отмеченная на рисунке горизонтальной пунктирной линией. Справа представлена ионограмма, содержащая отражения от спорадического диффузного слоя. Она получена в Торах с помощью ЛЧМ-ионозонда.

показано, что образование плотных Es -слоев на средних широтах во время геомагнитных бурь может быть связано с усилением ветра в мезосфере и нижней термосфере.

5.4. О специфике положительных и отрицательных ионосферных возмущений, отмеченных в пунктах 4.2., 4.5. и 4.6., можно судить по графикам, приведенным на рисунках 4, 5, 9 и 10.

На рис. 9 для каждого дня января 2022 г. представлены отдельно положительные (панель *a*) и отрицательные (панель *b*) значения ΔMUF_{3000} на трассе Магадан—Торы. Под ними показано время регистрации положительных значений ΔMUF_{3000} , лежащих над верхней квартилью, и отрицательных, лежащих под нижней квартилью, месячных рядов этих параметров. В таком же формате на панелях (*e*) и (*g*) рис. 9 представлены положительные и отрицательные значения Δf_oF_2 , полученные в Иркутске.

5.4.1. Видно, что относительно слабое дневное положительное возмущение с $\Delta f_oF_2 \leq 23\%$, зарегистрированное в Иркутске в 02–09 UT (09–16 LT) 15 января (см. п. 4.2.) было более ранним, чем превышающие его по величине вечернее положительное возмущение с $\Delta f_oF_2 \sim 40\%$ 19 января (см. п. 4.6.) и менее значительные вечерние положительные возмущения с $\Delta f_oF_2 \sim 25–38\%$, наблюдавшиеся в Иркутске в 08–13 UT (15–20 LT) 25 и 27–31 января.

Второй особенностью положительного возмущения f_oF_2 15 января является то, что ему соответствует понижение MUF_{3000} на трассе Магадан—Торы. В отличие от этого, вечерние положительные возмущения f_oF_2 19, 25 и 27 января наблюдаются почти одновременно с вечерними положительными возмущениями MUF_{3000} на трассе Магадан—Торы. Особенно ярко это проявилось в вечерние часы 19 января во время усиления поля кольцевого тока и 25 января во время слабой магнитной бури (см. рис. 1 и рис. 4). Судя по морфологическим признакам, вечерние положительные возмущения являются проявлениями сумеречного эффекта (“Dusk Effect”) [Buonsanto, 1999]. Возвращаясь к рис. 5, видим, что понижение MUF_{3000} на трассе Магадан—Торы в первые часы 15 января последовало за пересечением дна ГИП средней точки трассы.

Третье отличие дневного положительного возмущения 15 января от сумеречных эффектов показано на верхних панелях рис. 10. Видно, что значения f_oF_2 растут во время увеличения пиковой высоты F_2 -слоя (панель *a*), в то время как в случаях сумеречных эффектов (панели *b*, *e*) происходит понижение hmF_2 .

Отметим, что дневные положительные возмущения NmF_2 характерны для средних широт в зимние месяцы [Buonsanto, 1999]. В работе [Paznukhov et al., 2009] показано, что на средних широтах положительные ионосферные воз-

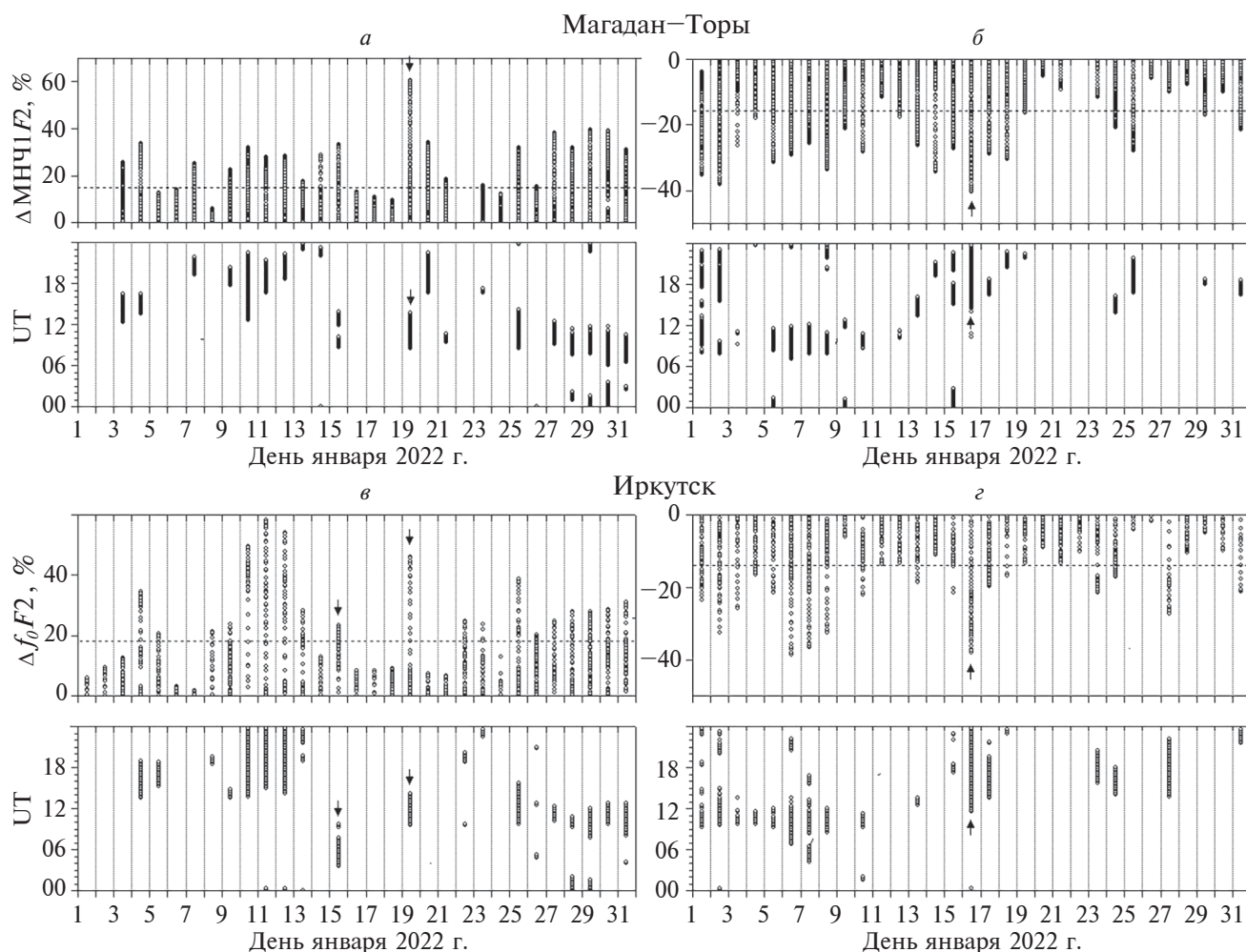


Рис. 9. (а) — Значения положительных ΔmUF_2 , наблюдавшиеся на трассе Магадан–Торы в течение каждого дня января 2022 г. (вверху), и время регистрации тех из них, которые лежат выше верхних квартилей месячных рядов положительных ΔmUF_2 (внизу); (б) — это же для отрицательных ΔmUF_2 и тех из них, которые лежат ниже нижних квартилей отрицательных ΔmUF_2 . На панелях (в) и (г) показаны аналогичные графики, построенные для положительных и отрицательных ΔfoF_2 . Горизонтальные штриховые линии отмечают верхние квартили для положительных и нижние квартили для отрицательных возмущений.

мушения, наблюдаемые во время геомагнитных бурь, запаздывают относительно повышения пиковой высоты F_2 -слоя. При этом величина задержки между увеличением hmF_2 и foF_2 составляет 1–2 ч. В нашем случае она составляет около $\Delta t \approx 1.5$ ч. Время начала положительной фазы ионосферной бури зависит от местного времени наблюдательного пункта в момент начала геомагнитной бури. Используя график, приведенный на рис. 10 в работе [Paznukhov et al., 2009], мы получили, что положительное ионосферное возмущение могло начаться в Иркутске через 8–9 ч после начала бури, то есть в 00–01 UT, что соответствует, также как величина Δt , полученным нами результатам анализа экспериментальных данных.

В совокупности, перечисленные отличия указывают на то, что в дневные часы 15.01.2022 г. в рассматриваемом долготном секторе на средних широтах преобладало влияние ветра, направленного к экватору, а в субавроральных — перемещения ГИП и, возможно, изменение состава атмосферы.

5.4.2. В п. 4.5. предыдущего раздела мы отметили, что 16.01.2022 г. ночное отрицательное ионосферное возмущение наблюдалось почти одновременно на трассе Магадан–Торы и в Иркутске. Это отчетливо видно на рис. 3, а также на рис. 9 (панели б, г), на котором это возмущение отмечено стрелками. На этих же панелях видно, что отрицательные возмущения, сравнимые по глубине и времени появления с отрицательным

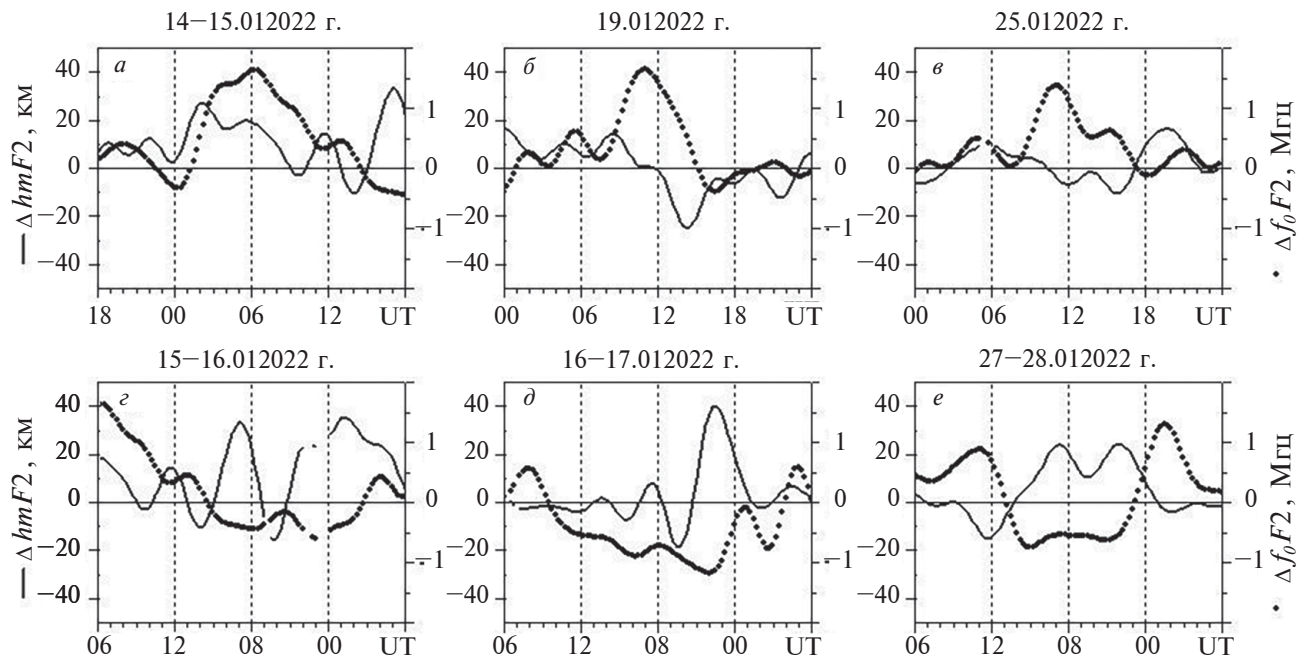


Рис. 10. Для положительных (а–в) и отрицательных (г–е) возмущений, наблюдавшихся в Иркутске в январе 2022 г., показаны изменения абсолютных отклонений $foF2$ и $hmF2$ от их фоновых значений.

возмущением 16 января, наблюдались на трассе Магадан–Торы во время слабых геомагнитных возмущений 1 и 2 января. В Иркутске наиболее близкие к нему по глубине отрицательные возмущения ($\Delta foF2 \approx -40\%$) наблюдались в магнитоспокойные дни 6 и 7 января, а по времени появления 27.01.2022 г., – в восстановительную фазу слабой магнитной бури. Однако 6, 7 января понижения $foF2$ наблюдались не в ночные, а в полуденно-вечерние часы, а возмущение 27 января имело гораздо меньшую глубину $\Delta foF2 \approx -30\%$.

Приведенные на рис. 10 (панели г–е) графики демонстрируют тенденцию увеличения $hmF2$ во время отрицательных ионосферных возмущений, развивавшихся над Северо-Восточным регионом России в январе 2022 г.

6. ВЫВОДЫ

Анализ данных вертикального и наклонного зондирования, полученных в Северо-Восточном регионе России в январе 2022 г., показал, что ионосферная буря, сопровождавшая магнитную бурю 14–20 января 2022 г., содержала следующие, не наблюдавшиеся в другие дни этого месяца, элементы.

1. Продолжительное увеличение МНЧ1F2 на трассе Норильск–Торы, начавшееся 14 января через 3 ч после начала главной фазы с повышения МНЧ1F2 относительно фона на 100% и, спустя 2 ч, на $\Delta \text{МНЧ1F2} = 120\%$.

2. Резкий, произошедший между 2 сеансами зондирования на трассе Магадан–Торы, рост МНЧ1F2 на 5.6 МГц (на $\sim 70\%$). Он был зарегистрирован 14 января через 6 ч после начала главной фазы.

3. Активизация возмущений $foF2$ и МНЧ1F2 с периодами 0.5–3.5 ч, наблюдавшаяся над Иркутском и на трассе Магадан–Торы в ночные часы 15 января (первый день восстановительной фазы бури).

4. Спорадические слои с большими предельными частотами, непрерывно регистрировавшиеся в Иркутске в течение 4 дневных часов 16 января (второй день восстановительной фазы бури).

События 1 и 2 могли быть связаны с положением средних точек радиотрасс относительно полярной и экваториальной “стенок” ГИП. На полярной стенке ГИП, т.е. в зоне диффузных высыпаний, во время геомагнитных возмущений концентрация электронов увеличена. Резкое увеличение МНЧ1F2 на трассе Магадан–Торы могло быть связано с суббурей, внесшей дополнительный вклад в поток высыпавшихся электронов. Суббуря была зарегистрирована на субавроральной обс. Якутск, расположенной вблизи средней точки трассы Магадан–Торы.

Причины усиления флуктуаций МНЧ1F2 и $foF2$ 15 января и образования среднеширотных спорадических слоев 15–16 января не совсем

ясны. Основываясь на спутниковых данных, полученных вблизи точки либрации L1, мы полагаем, что активизация ночных возмущений с периодами 0.5–3.5 ч в восстановительную фазу бури могла быть связана с усилением термосферного ветра и воздействием флуктуаций давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на находящуюся в метастабильном состоянии магнитосферно-ионосферную систему.

Длительное положительное возмущение, наблюдавшееся в Иркутске в дневные часы 15 января, развивалось на фоне увеличения высоты максимума F2-слоя и отрицательного ионосферного возмущения на трассе Магадан–Торы. В совокупности это указывает на то, что в дневные часы 15.01.2022 г. в рассматриваемом долготном секторе на средних широтах преобладало влияние ветра, направленного к экватору, а в субавроральных – смещение дна ГИП до широты средней точки трассы Магадан–Торы и изменение состава атмосферы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>). Мы благодарим менеджеров сайтов (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>), (<https://intermagnet.org>), (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public), (https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs) и коллаборации SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/indices/>) за возможность использования информации, размещенной на их сайтах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования науки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 5. С. 1–33. 2013. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=189>
- Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 3. С. 366–373. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030070>
- Жеребцов Г.А., Пирог О.М. Динамика и макроструктура ионосферной плазмы / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Том I–3. Ионосферная

плазма. Часть 1. Ред. В.Д. Кузнецов, Ю.Я. Ружин. М: Янус-К. С. 363–380. 2008.

– Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. № 3 (6). С. 3–13. 2014.

<https://sciup.org/kosmicheskaja-pogoda-i-riski-kosmicheskoy-deyatelnosti-14343447>

– Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Ионосферные эффекты слабых геомагнитных бурь в минимуме солнечной активности: весеннее равноденствие / Материалы всероссийской открытой научной конференции Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн [Электронный ресурс]. С. 105–114. 2022.

<https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-105-114>

– Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. Т. 7. № 3. С. 72–109. 2021.

<https://doi.org/10.12737/szf-73202106>

– Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселёв А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. Вып. 4. С. 24–31. 2013.

<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=166>

– Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 56. № 5. С. 591–605. 2016.

– Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // Space Sci. Rev. V. 28. № 2. P. 121–190. 1981.

<https://doi.org/10.1007/BF00218810>

– Anderson C.N. Correlation of long wave transatlantic radio transmission with other factors affected by solar activity // Proc. Inst. Radio Eng. V. 16. № 2. P. 297–347. 1928. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221400>

– Borovsky J.E., Denton M.H. Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 115. № A10101. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014966>

– Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev. V. 88. № 3–4. P. 563–601. 1999.

<https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>

– Buresova D., Lastovicka J., Hejda P., Bochnicek J. Ionospheric disturbances under low solar activity conditions // Adv. Space Res. V. 54. P. 185–196. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.007>

– Chen Y., Liu L., Le H., Zhang H., Zhang R. Responding trends of ionospheric F₂-layer to weaker geomagnetic activities // J. Space Weather Space Clim. V. 12. № 6. 12 pp. 2022. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022005>

– Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during

- major magnetic storms over the years 2003–2005 // *J. Geophys. Res.* V.113. № A00A01. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013037>
- Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Roble R.G., Richmond A.D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? / *Magnetic Storms / AGU Geophysical Monograph Series*. V. 98. Eds. B. T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, Y. Kamide, J.K. Arballo. American Geophysical Union, Washington, D.C. P. 203–225. 1997.
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.* V. 99. Iss. A4. P. 5771–5792. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Goodman J.M., Ballard J.W., Patterson J.D., Gaffney B. Practical measures for combating communication system impairments caused by large magnetic storms // *Radio Sci.* V. 41. № 6. RS6S41. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005RS003404>
- Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // *J. Geophys. Res.* V. 20. № 2. P. 293–315. 1982.
- Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M., Mikhalev A.V., Poddelsky I.N., Stepanov A.E. Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 70. № 18. P. 2346–2357. 2008.
- Kurkin V.I., Polekh N.M., Zolotukhina N.A. Effect of weak magnetic storms on the propagation of hf radio waves // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 62. № 1–2. C. 104–115. 2022. <https://doi.org/10.1134/S0016793222020116>
- Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14209–14213. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA04020>
- Marmet P. New digital filter for the analysis of experimental data // *Rev. Sci. Instrum.* V. 50. № 1. P. 79–83. 1979. <https://doi.org/10.1063/1.1135673>
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* V. 44. RG4001. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005RG000193>
- Mikhailov A.V., Depueva A.Kh., Leschinskaya T.Yu. Morphology of quiet time F2-layer disturbances: high and lower latitudes // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 5. № 1. GI1006. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003GI000058>
- Mikhailov A.V., Perrone L., Nusinov A.A. Mid-latitude daytime F2-layer disturbance mechanism under extremely low solar and geomagnetic activity in 2008–2009 // *Remote Sens.* 13. 1514. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13081514>
- Paznukhov V.V., Altadill D., Reinisch B.W. Experimental evidence for the role of the neutral wind in the development of ionospheric storms in midlatitudes // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A12319. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014479>
- Perrone L., Mikhailov A.V., Nusinov A.A. Daytime mid-latitude F2-layer Q-disturbances: A formation mechanism // *Sci Rep.* V. 10. 9997. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66134-2>
- Pickard G.W. The correlation of radio reception with solar activity and terrestrial magnetism // *Proc. Inst. Radio Eng.* V. 15. № 2. P. 83–97. 1927. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1927.221165>
- Prolss G.W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere / *Magnetic Storms / AGU Geophysical Monograph Series*. V. 98. Eds. B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, Y. Kamide, J.K. Arballo. American Geophysical Union, Washington, D.C. P. 227–241. 1997.
- Prolss G.W. Ionospheric F-region storms: Unsolved problems / *Characterizing the Ionosphere. Meeting Proc. RTO-MP-IST-056*. Fairbanks, United States, 12–16 June 2006. Neuilly-sur-Seine, France. V. 10. P. 10-1–10-20. 2006.
- Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Dmitriev A.V., Medvedeva I.V. Relation of extreme ionospheric events with geomagnetic and meteorological activity // *Atmosphere.* V. 13. № 1. P. 146. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010146>
- Tang Q., Sun H., Du Z., Zhao J., Liu Y., Zhao Z., Feng X. Unusual enhancement of midlatitude sporadic-E layers in response to a minor geomagnetic storm // *Atmosphere.* V. 13. № 5. P. 816. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13050816>
- Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic stratosphere dynamical processes in the winter 2021–2022 // *Atmosphere.* V. 13. № 10. P.1550. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13101550>
- Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E. et al. Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb Waves // *Front. Astron. Space Sci.* 9:871275. 2022. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>
- URL Intermag: <https://intermag.net.org/>
- URL qd: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>
- URL OMNI2: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/
- URL Oval: https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs
- URL SME: <https://supermag.jhuapl.edu/indices/>

Specific Features of Ionospheric Disturbances Accompanying the 14–20 January 2022 Magnetic Storm

V. I. Kurkin^{1, *}, N. A. Zolotukhina^{1, **}, S. N. Ponomarchuk^{1, ***}, A. V. Oinats^{1, ****},
K. G. Ratovsky^{1, *****}

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS),
Irkutsk, 664033, Russia*

**e-mail: vikurkin@yandex.ru*

***e-mail: zolot@iszf.irk.ru*

****e-mail: spon@iszf.irk.ru*

*****e-mail: oinats@iszf.irk.ru*

******e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru*

We conducted the analysis of ionospheric disturbances that occurred during the moderate magnetic storm of 14–20 January 2022. The study is based on data of vertical and oblique ionospheric sounding obtained in the Northeastern region of Russia, and supplemented by observations at HF radars and magnetic observatories. It has been revealed that the amplitudes of positive and negative ionospheric disturbances accompanying this storm are comparable to those observed on other days of January during weak magnetic storms and disturbances. Specific features of the disturbances observed only during the storm in question are as follows: (1) a midnight–morning increase of the maximum observed frequency of one-hop mode of HF radio wave propagation on the paths Norilsk — Tory and Magadan — Tory on 14 January; (2) enhanced nighttime fluctuations in F_2 -layer critical frequency in Irkutsk and the maximum observed frequency of one-hop mode on the path Magadan — Tory on 15 January; (3) Morning–midday E_s layers with limiting frequencies reaching 7 MHz that were observed in mid-latitudes at the end of the first and beginning of the second day of the storm recovery phase.

Keywords: magnetic storm, ionospheric sounding, ionospheric disturbances, radio wave propagation, maximal observed frequency, F_2 -layer critical frequency, main ionospheric trough, diffuse electron precipitation

УДК 550.382

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВЕКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ОДНОКОМПОНЕНТНЫМ ДАННЫМ

© 2025 г. Р. А. Рыгов¹, *, В. Г. Петров¹, **

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: ruslan.rytov2017@ya.ru

**e-mail: vgpetrov2018@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2024 г.

После доработки 29.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

В данной работе с помощью искусственных нейронных сетей была решена задача о восстановлении векторного аномального магнитного поля по однокомпонентным данным. Для обучения искусственной нейронной сети была создана база данных компонент аномального магнитного поля B_x , B_y , B_z с помощью набора точечных магнитных диполей, залегающих под плоскостью измерения поля. На синтетическом примере была показана работа обученной нейронной сети в сравнении с известным численным алгоритмом восстановления векторного поля по данным одной компоненты. Далее, по данным вертикальной компоненты аномального геомагнитного поля с помощью искусственных нейронных сетей были восстановлены горизонтальные компоненты аномального геомагнитного поля на территории 58–85° Е, 52°–74° N с шагом сетки 2 угловых минуты.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, аномальное магнитное поле, векторное магнитное поле, компьютерное моделирование.

DOI: 10.31857/S0016794025010109, EDN: ADKBHQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Модели векторного аномального магнитного поля широко используются для задач геофизики, навигации и направленного бурения [Buchanan et al., 2013; Kaji et al., 2019]. Однако, количество модульных данных аномального поля превышает число векторных измерений. Поэтому, чтобы получить высокоточную модель векторного магнитного поля, с помощью специальных методов по данным известного однокомпонентного аномального магнитного поля рассчитывают векторное аномальное магнитное поле.

Примерами таких методов являются метод магнитного потенциала [Lourenco and Morrison, 1973; Колесова и Черкаева, 1987] и метод магнитных диполей [Montesinos et al., 2016; Kaftan, 2017]. В методе магнитного потенциала компоненты поля описываются двойными рядами Фурье, коэффициенты которых связаны через потенциал аномального магнитного поля. Однако

данный метод требует, чтобы магнитная аномалия полностью находилась в области измерений [Lourenco and Morrison, 1973; Колесова и Черкаева, 1987]. С помощью метода диполей искомое векторное поле рассчитывается, опираясь на известную компоненту аномального поля, с помощью набора фиктивных точечных диполей, положения которых подбираются методом проб и ошибок под плоскостью сканирования аномального поля. Однако время работы метода диполей быстро возрастает с увеличением числа диполей и точек измерения аномального магнитного поля.

Для быстрой обработки большого объема цифровых изображений эффективно применение искусственных нейронных сетей. Искусственные нейронные сети широко используются для приложений в компьютерном зрении и классификации изображений [Krizhevsky et al., 2012]. Нейронные сети, обученные на данных о физи-

ческих процессах, применялись для моделирования магнитных полей, а также для интерполяции и продления магнитных полей, измеренных на редкой сетке [Coskun et al., 2022; Pollok et al., 2021; Pollok et al., 2023]. В некоторых случаях обученная нейронная сеть показывает более высокую точность в сравнении с традиционными численными алгоритмами [Coskun et al., 2022; Pollok et al., 2021].

В данной работе предложен новый метод восстановления векторного магнитного поля с помощью искусственных нейронных сетей. Нейронная сеть принимает на вход данные вертикальной B_z -компоненты аномального поля размерностью 40×40 пикселей, а затем восстанавливает компоненты в плоскости B_x и B_y . Для обучения разработанной нейронной сети была создана база данных, содержащая 50000 случайных аномальных магнитных полей, которые были получены с помощью суммарного поля точечных магнитных диполей. Было проведено сравнение разработанной нейронной сети с известным численным методом восстановления векторного поля [Lourenco and Morrison, 1973; Колесова и Черкаева, 1987]. Работа нейронной сети также была проверена с помощью данных вертикальной компоненты аномального поля, полученного

с помощью моделей IGRF-13 [Alken et al., 2021] и EMM2017 [Maus, 2010; The National Centers for Environmental Information, 2018] на территории $58-85^\circ$ E, $52-74^\circ$ N с шагом сетки 2 угловых минуты.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

2.1. Архитектура нейронной сети

Схема разработанной искусственной нейронной сети показана на рис. 1. Известное распределение вертикальной компоненты аномального поля B_z размерностью 40×40 пикселей поступает на вход нейронной сети. Для предварительного грубого расчета используется плотная нейронная сеть, содержащая входной слой, внутренний слой и выходной слой размерностью 40×40 нейронов. Далее результаты грубого расчета компонент аномального поля поступают на вход уточняющей нейронной сети. Уточнение происходит с помощью сверточной нейронной сети с входным слоем, выходным слоем и двумя внутренними слоями, содержащими 40×40 нейронов. В разработанной модели использовалась линейная функция активации нейронов.

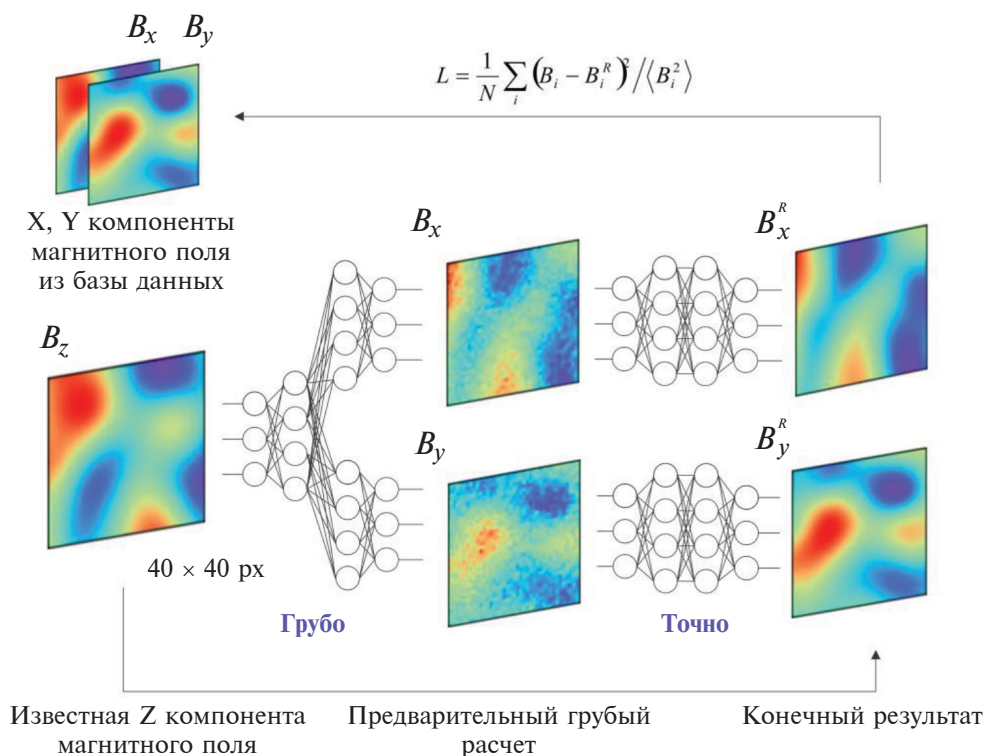


Рис. 1. Схематичное изображение архитектуры искусственной нейронной сети для восстановления B_x - и B_y -компонент аномального магнитного поля по известной вертикальной B_z -компоненте.

Нейронная сеть была реализована с помощью библиотеки *tensorflow* [Abadi et al., 2016]. Выбор библиотеки *tensorflow* обоснован высокой производительностью, гибкостью и удобством разработки нейронной сети. Для обучения нейронной сети использовался алгоритм стохастического градиентного спуска *Adam* [Kingma et al., 2014].

Для обучения нейронной сети и дальнейшей оценки точности восстановления магнитного поля необходимо задать функцию невязки. Существует множество известных функций невязки, некоторые из которых реализованы в пакете *tensorflow*, например, средний квадрат отклонения, средний модуль отклонения и т.д. Существуют и более совершенные функции, например, РЕ-функция [Barkhatov et al., 2017]. Выбор конкретной функции невязки для обучения нейронной сети зависит от типа входных данных и может подбираться экспериментально. В данной работе для простоты была выбрана функция среднеквадратичной ошибки вида

$$L = \frac{1}{N} \sum_i \frac{(B_i - B_i^R)^2}{\langle B^2 \rangle}, \quad (1)$$

где B_i — известное поле в точке i , B_i^R — восстановленное поле в точке i , $\langle B^2 \rangle$ — средний квадрат известного аномального поля, N — общее число точек измерения.

Обучающая база данных состоит из 50000 случайных компонент аномального магнитного поля B_x, B_y, B_z , из неё 45000 компонент использовались для обучения искусственной нейронной сети, 5000 компонент использовались для валидации процесса обучения нейронной сети. В процессе обучения невязка достигла значений $L < 4 \cdot 10^{-3}$.

2.2. Прямое моделирование аномального поля

Для моделирования аномального магнитного поля использовались точечные диполи, так как магнитное поле намагниченного тела на расстояниях, превышающих его размеры, эквивалентно полю точечного диполя. Поле точечного магнитного диполя определяется известной формулой [Яновский, 1978]

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{3\vec{r}(\vec{m}, \vec{r})}{|\vec{r}|^5} - \frac{\vec{m}}{|\vec{r}|^3}, \quad (2)$$

где \vec{r} — вектор из точки нахождения диполя в точку измерения, \vec{m} — магнитный момент диполя в декартовой системе координат. Аномальное магнитное поле моделируется с помощью случай-

ного распределения 1–400 точечных магнитных диполей. Компоненты аномального магнитного поля затем вычисляются в плоскости на некоторой высоте над точечными диполями и заносятся в базу данных. Численные значения компонент аномального поля нормируются таким образом, чтобы они лежали в диапазоне $[-1, 1]$.

2.3. Обучение нейронной сети

Обучение разработанной нейронной сети проводилось на персональном компьютере с процессором *Intel Core i7-9700* и видеокартой *NVIDIA GeForce GTX 950*. Для того чтобы 2 Gb свободной памяти видеокарты были задействованы, входные данные для обучения, общим размером чуть более 2 Gb, разбивались на равные части по 1 Gb. Далее обучение проводилось на каждой серии данных до момента, когда невязка на валидирующей выборке станет больше невязки обучающей выборки. Пример графика динамики функции невязки в процессе обучения в логарифмическом масштабе показан на рис. 2.

На рис. 2 показан процесс уменьшения значения функции невязки для обучающих данных и для валидирующих данных. Для того чтобы избежать переобучения нейронной сети, процесс обучения останавливался, если невязка валидирующей выборки начинала возрастать относительно невязки обучающей выборки [Ying, 2019]. Данный момент показан на рис. 2 стрелочкой, ему соответствует примерно 80 номер эпохи.

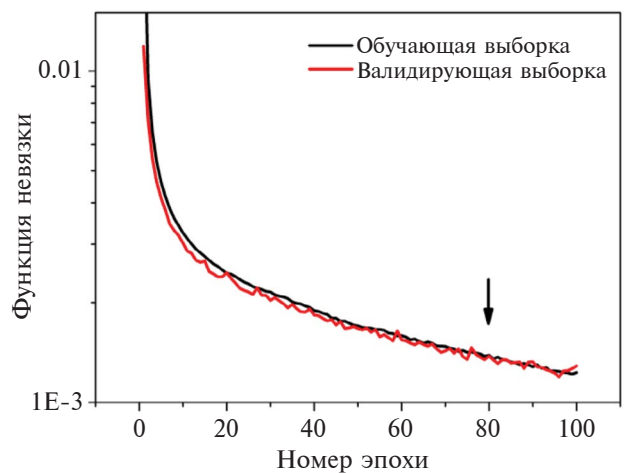


Рис. 2. Значение функции невязки для обучающей серии данных и валидирующей серии данных как функция номера эпохи в процессе обучения искусственной нейронной сети

3. СИНТЕТИЧЕСКИЙ ПРИМЕР

Обученная нейронная сеть была проверена с помощью тестовых аномальных магнитных полей, которые не входили в общую базу данных в процессе обучения. На рис. 3 для конкретного примера показан результат работы обученной нейронной сети в сравнении с численным алгоритмом восстановления горизонтальных компонент аномального магнитного поля, который подробно описан в работе [Lourenco and Morrison, 1973].

На рис. 3а, 3б показаны результаты восстановления горизонтальных компонент B_x и B_y аномального поля по данным вертикальной B_z -компоненты с помощью численного алгоритма. Рисунки 3в, 3г демонстрируют результаты работы обученной нейронной сети для тех же входных данных. Серии на рис. 3 показывают исходные компоненты B_x и B_y , восстановленные компоненты $B_x^{\text{восст.}}$ и $B_y^{\text{восст.}}$, а также разность между исходными и восстановленными компонентами магнитного поля, полученными с помощью численного алгоритма и искусственной нейронной сети.

Рисунок 3 показывает, что в случае работы численного алгоритма невязка, рассчитанная по формуле (1), принимает значения $L = 0.1067$ и $L = 0.1606$ для компонент B_x и B_y соответственно. Для результатов работы нейронной сети ошибка принимает значения $L = 0.0031$ и $L = 0.0018$ для компонент B_x и B_y соответственно. Рисунок 3а, 3б показывают, что в случае работы численного алгоритма основной вклад

в ошибку вносят краевые эффекты, которые отсутствуют в результатах работы нейронной сети, как показывают рис. 3в, 3г. Краевые эффекты возникают, когда магнитная аномалия не входит целиком в изучаемую область [Lourenco and Morrison, 1973; Колесова и Черкаева, 1987].

Чтобы снизить общую невязку, краевые 10 px каждого изображения удаляются, а невязка вычисляется в области 20×20 px, показанной на рис. 3. В данном случае для численного алгоритма невязка принимает значения $L = 0.0082$ и $L = 0.0112$ для компонент B_x и B_y соответственно, а в случае применения обученной нейронной сети невязка $L = 4.2 \cdot 10^{-4}$ и $L = 2.7 \cdot 10^{-4}$ для компонент B_x и B_y соответственно.

Далее было проведено сравнение средней невязки результатов работы численного алгоритма и обученной нейронной сети на 1000 случайных распределений аномального магнитного поля, которые не входили в базу данных при обучении нейронной сети. В выборку включались также случаи, когда магнитная аномалия не входит целиком в рассматриваемую область. Невязка рассчитывалась как для целого изображения 40×40 px, так и для изображений без краевых пикселей, 20×20 px. Результаты проведенного сравнения показаны в табл. 1.

Результаты, приведенные в табл. 1, показывают, что искусственная нейронная сеть в среднем имеет лучшую точность в смысле функции невязки (1) в сравнении с известным численным алго-

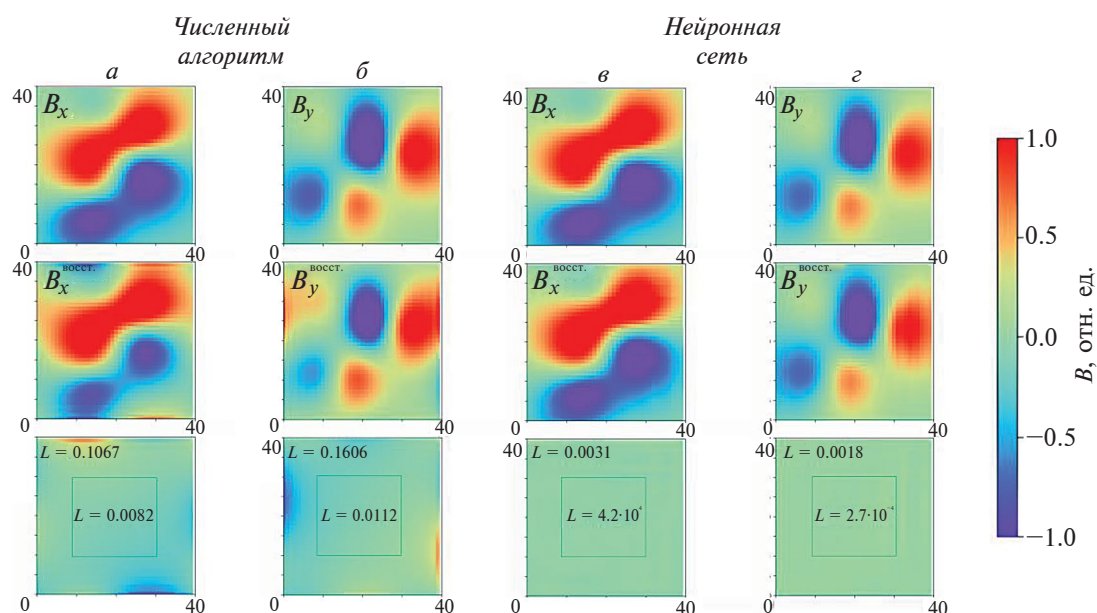


Рис. 3. Результаты восстановления горизонтальных компонент B_x и B_y (а–б) с помощью численного алгоритма и (в–г) с помощью обученной искусственной нейронной сети.

Таблица 1. Средняя невязка для восстановленных компонент аномального магнитного поля в плоскости с помощью численного алгоритма и обученной искусственной нейронной сети

Размер изображения на выходе	B_x (числ. алгоритм)	B_y (числ. алгоритм)	B_x (нейрон. сеть)	B_y (нейрон. сеть)
40×40 px	$L = 0.1068$	$L = 0.1058$	$L = 0.0271$	$L = 0.0269$
20×20 px	$L = 0.0125$	$L = 0.0125$	$L = 0.0069$	$L = 0.0071$

ритмом. Если также учесть влияние краевых эффектов и отбросить по 10 пикселей с каждого края изображения, то точность восстановления векторного поля возрастает существенно для обоих методов, но и в этом случае нейронная сеть показывает несколько лучшие результаты.

3.1. Влияние шума

Далее работа искусственной нейронной сети была проверена на зашумленных данных. Результаты проверки показаны на рис. 4.

Для моделирования белого шума случайное число в диапазоне $[-0.5, 0.5]$ было добавлено к значению каждого пикселя вертикальной компоненты B_z , как показывает рис. 4а. Здесь также показаны истинные компоненты в плоскости, B_x и B_y . По заданной зашумленной компоненте B_z были восстановлены компоненты в плоскости B_x и B_y с помощью искусственной нейронной сети, рис. 4б, и с помощью численного алгоритма, рис. 4в.

Разница между истинными компонентами и восстановленными показана на рис. 4б для искусственной нейронной сети и на рис. 4в для чис-

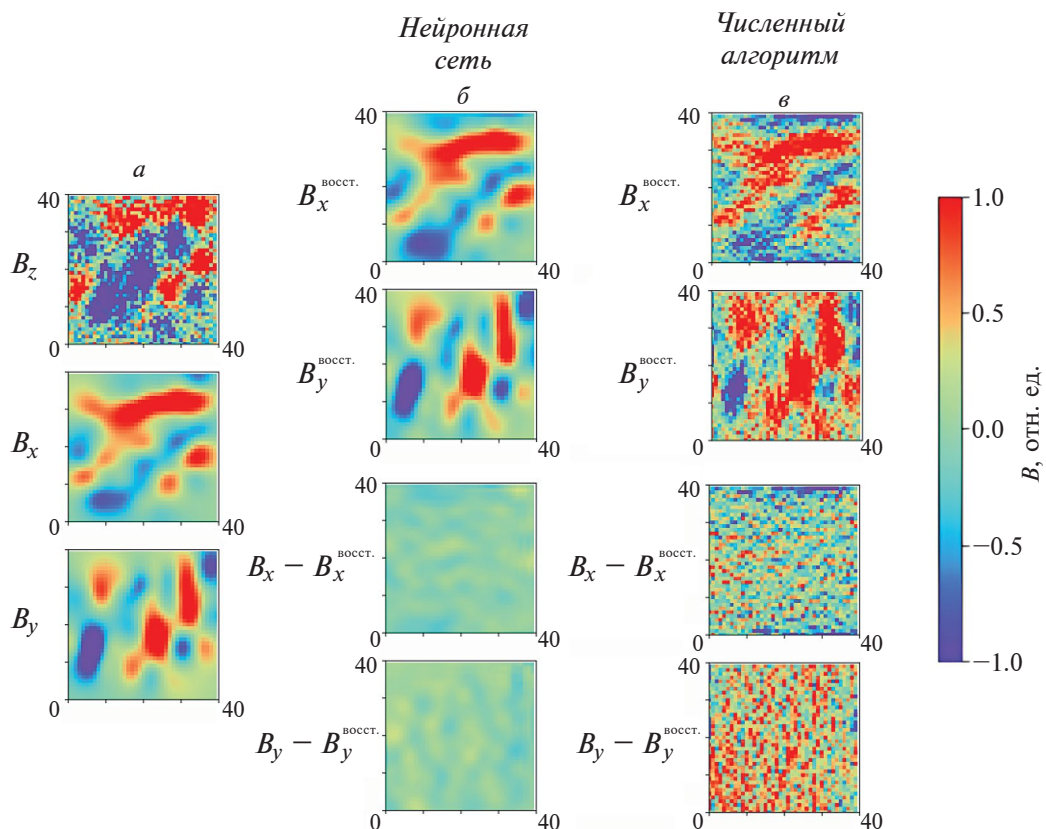


Рис. 4. Результаты восстановления горизонтальных компонент B_x и B_y (а) по зашумленным данным компоненты B_z , (б) с помощью обученной искусственной нейронной сети и (в) с помощью численного алгоритма.

Таблица 2. Средняя невязка для восстановленных компонент аномального магнитного поля в плоскости по зашумленным данным с помощью численного алгоритма и обученной искусственной нейронной сети

Размер изображения на выходе	B_x (числ. алгоритм)	B_y (числ. алгоритм)	B_x (нейрон. сеть)	B_y (нейрон. сеть)
40 × 40 px	$L = 0.7493$	$L = 0.8122$	$L = 0.0733$	$L = 0.0680$
20 × 20 px	$L = 0.1496$	$L = 0.1895$	$L = 0.0122$	$L = 0.0126$

ленного алгоритма. В случае нейронной сети невязка принимает значения $L = 0.0578$ для B_x -компоненты и $L = 0.0464$ для B_y -компоненты. Для численного алгоритма невязка принимает значения $L = 0.4613$ для B_x -компоненты и $L = 0.6579$ для B_y -компоненты.

Далее, как и в предыдущей секции, было проведено сравнение средней невязки результатов работы численного алгоритма и обученной нейронной сети на 1000 случайных зашумленных распределений вертикальной компоненты аномального магнитного поля. Невязка так же рассчитывалась как для целого изображения 40 × 40 px, так и для изображений без краевых пикселей, 20 × 20 px. Результаты такого сравнения показаны в табл. 2.

Результаты, приведенные в табл. 2, показывают, что искусственная нейронная сеть в среднем показывает лучшую устойчивость к шумам во входных данных. Так, в случае численного алгоритма, средняя невязка для B_x - и B_y -компонент аномального поля составляет $L = 0.7493$ и $L = 0.8122$ соответственно. Для искусственной нейронной сети, средняя невязка для B_x - и B_y -компонент аномального поля составляет $L = 0.0733$ и $L = 0.0680$ соответственно. Если же отбросить краевые пиксели, то для численного алгоритма невязка принимает значения $L = 0.1496$ и $L = 0.1895$ для компонент B_x и B_y соответственно, а для искусственной нейронной сети невязка принимает значения $L = 0.0122$ и $L = 0.0126$ для компонент B_x и B_y соответственно.

4. РАССЧЕТ КОМПОНЕНТ АНОМАЛЬНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ

Искусственная нейронная сеть была протестирована на большом объеме данных аномального геомагнитного поля. С помощью моделей IGRF-13 и EMM2017 на высоте 4 км были получены данные вертикальной компоненты аномального поля над областью 58–85° Е, 52–74° N с шагом сетки 2 угловых минуты, как показано на рис. 5.

Данные главного геомагнитного поля, создаваемого токами в ядре Земли, были получены из модели IGRF-13. Данные полного геомагнитного поля были получены из модели EMM2017. Модель EMM2017 позволяет получить с точностью до 51 км как главное магнитное поле, так и поле магнитных аномалий, которые создаются породами в земной коре [The National Centers for Environmental Information, 2018]. Для получения именно аномального магнитного поля, рассчитывалась разность между данными модели полного поля EMM2017 и главного поля IGRF-13. Расчет проводился с использованием следующих параметров: 2020 год, высота 4 км над уровнем моря, долгота 58–85° Е с шагом 0.03 градуса, широта 52–74° N с шагом 0.03 градуса. Результаты восстановления компонент аномального магнитного поля в плоскости показаны на рис. 6.

Аномальное поле на географической сетке координат было преобразовано в километровую равномерную сетку с расстоянием между соседними точками в 2 км, всего 1386 × 1286 точек. Для обработки изображения с помощью искусственной нейронной сети полученная карта вертикальной компоненты разбивалась случайным образом на 50000 пересекающихся участков с размерами 40 × 40 пикселей.

Затем каждый участок обрабатывался с помощью нейронной сети, а для уменьшения влияния краевых эффектов 10 краевых пикселей каждого изображения удалялись. Наконец, из маленьких участков 20 × 20 пикселей, которые содержат данные о восстановленных компонентах B_x и B_y аномального магнитного поля, формировались карты аномального магнитного поля исходного размера.

Расчет проводился на персональном компьютере, время обработки 50000 изображений 40 × 40 пикселей с помощью искусственной нейронной сети не превышает 1 мин при выполнении расчета на CPU. Преобразования карт из географических координат в километровые и обратно проводились с помощью алгоритмов ин-

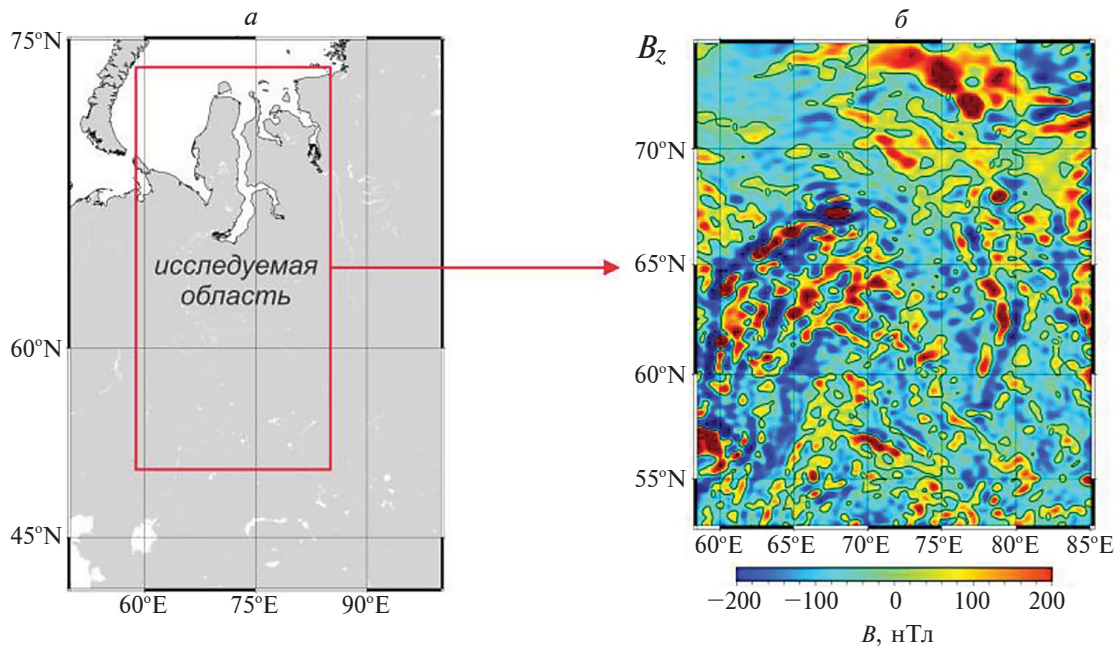


Рис. 5. Исследуемая область, в которой (а) выбиралось anomальное магнитное поле и (б) распределение вертикальной компоненты B_z над исследуемой областью.

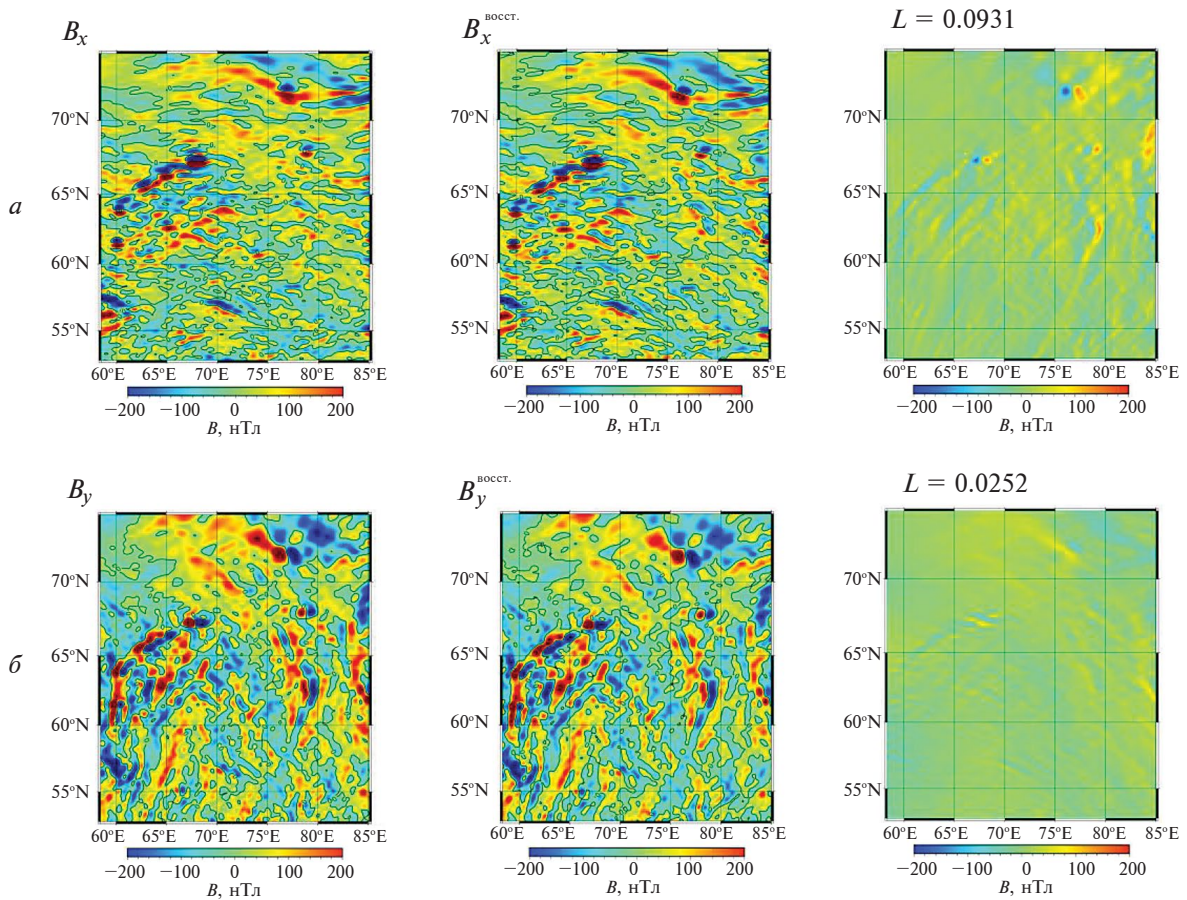


Рис. 6. Исходное anomальное магнитное поле, восстановленное anomальное магнитное поле с помощью обученной искусственной нейронной сети и разница между исходными и восстановленными компонентами (а) B_x и (б) B_y .

терполяции, реализованных в открытой библиотеке *scipy* [Virtanen et. al., 2020].

Серии на рис. 6а, 6б показывают истинные компоненты поля B_x и B_y , полученные из модели ЕММ, восстановленные компоненты $B_x^{\text{восст.}}$ и $B_y^{\text{восст.}}$ с помощью искусственной нейронной сети, а также разницу между истинными и восстановленными компонентами аномального магнитного поля. Так, для компоненты B_x функция невязки принимает значение $L = 0.0931$, для компоненты B_y функция невязки принимает значение $L = 0.0252$.

В области наиболее высокой интенсивности магнитных аномалий, $|B_x| = 1642$ нТл, $|B_y| = 1853$ нТл, погрешность принимает значения 170 нТл и 98 нТл соответственно. В области высоких широт погрешность для компоненты B_x наиболее велика, как показывает рис. 6а. Это может быть связано с большой протяженностью самих аномалий в данной области, около 400 рх как показывает рис. 5б, в сравнении с протяженностью входного изображения нейронной сети, 40 рх.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была разработана модель искусственной нейронной сети для восстановления векторного аномального магнитного поля по данным вертикальной компоненты поля. Нейронная сеть содержит в себе плотный входной слой для предварительного грубого расчета, результаты которого далее уточняются с помощью сверточной нейронной сети. Разработанная нейронная сеть была обучена на данных, созданных с помощью случайного распределения фиктивных точечных магнитных диполей, с помощью которых моделировалось аномальное магнитное поле над поверхностью земли.

Нейронная сеть показала в среднем лучшие результаты при сравнении с известной численной схемой восстановления компонент магнитного поля в плоскости. Обученная нейронная сеть восстанавливает компоненты поля с меньшими краевыми ошибками для случаев, когда магнитная аномалия не входит целиком в искомую область. Также нейронная сеть показала устойчивость к шуму во входных данных.

Результаты восстановления векторного поля на основе данных моделей IGRF и ЕММ показали высокую производительность работы нейронной сети с большим объемом входных данных. На данный момент ведется работа по дальнейшему тестированию и совершенствованию модели нейронной сети.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование проводилось в рамках государственного задания института.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колесова В.И. Аналитические методы магнитной картографии. Москва: Наука, 1985.
- Колесова В.И., Черкаева Е.А. Вычисление компонент векторного аномального геомагнитного поля по модульным данным. Препринт № 46 (735). М.: ИЗМИРАН, 1987.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Ленинград : Изд-во ЛГУ, 591 с. 1978.
- Abadi M. et al. Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems //arXiv preprint arXiv:1603.04467. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467>. 2016.
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth, Planets and Space. V. 73. № 1. P. 1–25. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>. 2021.
- Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E., et al. Effect of solar dynamics parameters on the formation of substorm activity // Geomagn. Aeron. V. 57. P. 251–256. <https://doi.org/10.1134/S0016793217030021>. 2017.
- Buchanan A., Finn C.A., Love J.J., et al. Geomagnetic referencing—the real-time compass for directional drillers // Oilfield Review. V. 25. № 3. P. 32–47. 2013.
- Coskun U.H., Sel B., Plaster B. Magnetic field mapping of inaccessible regions using physics-informed neural networks //Scientific Reports. V. 12. № 1. P. 12858–12867. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15777-4>. 2022.
- Kaftan I. Interpretation of magnetic anomalies using a genetic algorithm // Acta Geophysica. V. 65. № 4. P. 627–634. <https://doi.org/10.1007/s11600-017-0060-7>. 2017.
- Kaji C.V., Hoover R.C., Ragi S. Underwater Navigation using Geomagnetic Field Variations / 2019 IEEE Intern. Conference on Electro Information Technology (EIT). <https://doi.org/10.1109/eit.2019.8834192>. 2019.
- Kingma D.P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization //arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks // Advances in neural information processing systems. V. 25. P. 1097–1105. 2012.
- Lourenco J.S., Morrison H.F. Vector magnetic anomalies derived from measurements of a single component of the field // Geophysics. V. 38, № 2. P. 359–368. doi:10.1190/1.1440346. 1973.
- Maus S. An ellipsoidal harmonic representation of Earth's lithospheric magnetic field to degree and order 720, Geophys. Geosyst., 11, Q06015, <https://doi.org/10.1029/2010GC003026>. 2010.
- Montesinos F.G., Blanco-Montenegro I., Arnoso J. Three-dimensional inverse modelling of magnetic anomaly

- sources based on a genetic algorithm // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. V. 253. P. 74–87. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.02.004>. 2016.
- Pollok S., Bjørk R., Jørgensen P.S. Inverse design of magnetic fields using deep learning // *IEEE Transactions on Magnetics*. V. 57. №. 7. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2021.3082431>. 2021.
- Pollok S. *et al.* Magnetic field prediction using generative adversarial networks // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. V. 571. P. 170556–170565. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170556>. 2023.
- Virtanen P. *et al.* SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // *Nature methods*. V. 17. №. 3. P. 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>. 2020.
- Ying X. An overview of overfitting and its solutions // *Journal of physics: Conference series*. – IOP Publishing. V. 1168. P. 022022–022029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1168/2/022022>. 2019.
- The National Centers for Environmental Information. (2018). [Online]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomag.shtml>

Application of Artificial Neural Networks for Reconstruction of Vector Magnetic Field from Single-Component Data

R. A. Rytov^{1,*}, V. G. Petrov^{1,**}

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, IZMIRAN, 142190, Troitsk, Moscow, Russia*

**e-mail: ruslan.rytov2017@ya.ru*

***e-mail: vgpetrov2018@mail.ru*

In this work the problem of reconstructing the vector anomalous magnetic field from single-component data was solved by means of artificial neural networks. For training an artificial neural network a database of anomalous magnetic field components B_x , B_y , B_z was created using a set of point magnetic dipoles lying under the field measurement plane. Using a synthetic example, the work of a trained neural network was shown in comparison with a well-known numerical algorithm for restoring a vector field from data of one component. Further, according to the data of the vertical component of the anomalous geomagnetic field the horizontal components of the anomalous geomagnetic field were restored using artificial neural networks in the territory of 58 – 85° E, 52 – 74° N with a grid step of 2 arc minutes.

Keywords: artificial neural networks, anomalous magnetic field, vector magnetic field, computer modeling

УДК 550.380.87

ФЕРРОЗОНДОВЫЕ МАГНИТОМЕТРЫ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, СОЗДАННЫЕ НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ (ОБЗОР РАЗРАБОТОК)

© 2025 г. В. В. Любимов¹, *

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

*e-mail: lvy_store@mail.ru

Поступила в редакцию 22.03.2024 г.

После доработки 18.07.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Работа посвящена описанию конструкции измерительного модуля (феррозондового магнитного компаса) и созданию на его основе различных магнитометрических приборов. Эти приборы предназначены для проведения геомагнитных и специальных работ в различных условиях и средах как для применения в стационарных пунктах наблюдений, так и для работы в условиях экспедиций.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитные измерения, магнитные съемки, магнитометры, градиентометры, магнитовариационные станции, феррозондовые магнитометры, измерительный модуль

DOI: 10.31857/S0016794025010116, **EDN:** ADKANT

1. ВВЕДЕНИЕ

Уже давно умы конструкторов-приборостроителей магнитометрической аппаратуры в ИЗМИРАН занимала мысль о создании универсального, экономичного и компактного измерительного прибора для его использования при проведении научных исследований в различных условиях и средах с возможностью незначительного добавления в его схему дополнительных устройств, необходимых для проведения конкретных работ. В настоящее время возможности современной техники и технологий позволяют реально продвигаться по пути решения этой задачи. При этом в качестве основного элемента прибора, — магнитометрического датчика, — появилась возможность использовать малогабаритные феррозондовые датчики (ФД), которые в настоящее время промышленность научилась изготавливать довольно компактными, микропотребляющими и высокочувствительными [Любимов, 2024].

ФД представляет собой первичный магнитомодуляционный преобразователь, используемый в качестве магнитометра для преобразования магнитной индукции в электрический сигнал [Афанасьев, 1986]. Действие ФД основано на модуляции магнитного состояния ферромагнитного сердеч-

ника с помощью вспомогательного переменного магнитного поля (МП). Иногда ФД называют ферромодуляционным преобразователем, подчеркивая его принадлежность к магнитомодуляционным преобразователям. Классическая схема феррозонда включает в себя магнитопровод, обмотку возбуждения (питаемую переменным током) и измерительную обмотку (см. схему на рис. 1а).

В настоящее время существует множество различных конструкций магнитоизмерительных преобразователей (МИП), которые созданы на основе феррозондовых магниточувствительных датчиков (МЧД) [Афанасьев, 1986].

Как уже было сказано ранее, феррозондовые приборы характеризуются малогабаритностью и компактностью, малым энергопотреблением, высокой чувствительностью и точностью. Современные ФД и приборы на их основе обладают малыми собственными шумами, что позволяет проводить работы с высокой надежностью в очень слабых МП и в широком диапазоне температур. Использование приборов (магнитометров) на основе ФД при проведении геомагнитных исследований позволяет (в отличие от других типов МЧД) реализовать возможность непосредственного измерения составляющих вектора магнитной индук-

ции (ВМИ), что обеспечивает получение полной информации о структуре поля и его источниках как на стационарных измерительных пунктах наблюдений, так и в движении, при проведении различного рода экспедиционных и поисковых работ.

Как у нас в стране, так и за рубежом уже существует большое число разработок МИП на основе ФД, которые имеют аналоговый или цифровой вывод измеряемой информации. Наряду с определенными достоинствами всех известных компонентных ФД (и МИП на их основе), таких как компактность и малое энергопотребление, эти приборы обладают некоторыми недостатками. К этим недостаткам относятся изменение и увеличение погрешности измерений за счет изменения внешней температуры окружающей среды (температурный дрейф), а также погрешность измерений за счет неконтролируемого изменения их ориентации в пространстве в процессе длительной эксплуатации. Вот эти параметры ФД необходимо контролировать и учитывать [Любимов, 1992, 2017, 2024], особенно при проведении длительных стационарных измерений как в условиях магнитной обсерватории (МО), так и при проведении экспедиционных работ.

Возможности современной техники позволяют в настоящее время реализовать не только контроль параметров ФД, накопление, обработку и коррекцию получаемых данных и их передачу по каналам связи на расстояние, но и иметь привязку и синхронизацию получаемых данных при проведении полевых работ, например, с помощью системы GPS.

В настоящем обзоре представлены некоторые проекты и конструкции магнитометров [Зверев и Любимов, 2019; Любимов, 1994, 2004, 2018, 2019а, б, в, 2020а, 2024; Любимов и др., 2019; Zverev and Lyubimov, 2019] для проведения долговременных и кратковременных измерений, имеющих высокую (на уровне 1 нТл и выше) разрешающую способность и выполненных на основе универсального измерительного модуля (ИМ), который может быть реализован с применением различных конструкций феррозондовых МЧД.

2. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ

В начале 2009 г., в результате проведения экспериментальных и исследовательских работ с различными типами ФД, коллективом сотрудников под руководством А.С. Зверева была создана конструкция ИМ (см. рис. 1а) и всесторонне испытан опытный образец [Зверев и Любимов, 2019; Любимов, 2021; Любимов и др., 2019; Zverev and Lyubimov, 2019]. Этот ИМ являлся универ-

сальным шестиканальным преобразователем аналоговых геофизических данных с возможностью последующего их накопления, передачи на расстояние и регистрации в цифровом виде. Схема построения этого ИМ универсальна и технологична, что позволяет использовать его в составе различных измерительных комплексов при проведении работ в различных условиях и средах.

ИМ включает в себя три различных самостоятельных преобразователя аналог-цифра (см. рис. 1б): трехканальный МИП, трехканальный преобразователь углов наклона – цифровой инклинометр (ЦИ) и датчик температуры (ДТ). Сочетание магнитных датчиков с инклинометрами в практике геофизических работ называют бесплатформенным магнитным компасом (МК).

Использование в ИМ компонентных ФД и дополняющими их другими приборами (ЦИ и ДТ) позволяет компенсировать искажения МП, которые возникают из-за различных факторов, что позволяет избавиться от части дополнительной погрешности измерения, например, при изменении угла наклона датчика или влиянии температуры окружающей среды.

МИП построен на основе ФД и включает в себя три измерительных канала (ИК) для измерения составляющих ВМИ поля Земли D, H и Z. Функциональная схема ИМ представлена на рис. 1в и включает в себя: трехкомпонентный ФД, плату инклинометров (ПИ), которая включает в себя три ЦИ и ДТ, а также плату микроконтроллера (ПМК), в состав которой входят схемы АЦП, микроконтроллера (МК) с интерфейсом последовательного канала передачи данных (RS232) и блока питания (БП).

При создании прибора и поиске необходимых для использования МЧД в конструкции его МИП рассматривались варианты применения нескольких известных отечественных и зарубежных малогабаритных конструкций ФД (см. данные табл. 1 в работах [Любимов, 1994; Любимов и др., 2019]). В результате анализа характеристик и проведенных сравнительных и оценочных экспериментальных работ для базовой схемы МИП прибора были выбраны ФД типа FLC3-70 немецкой фирмы Stefan Mayer Instruments GmbH & Co. (<http://www.stefan-mayer.com>). Эти датчики реализуют отсчетную точность измерения 1 нТл в диапазоне от 0 до ± 70 мкТл и коэффициент преобразования поле–напряжение 35 мкТл/В по каждому ИК. При этом собственные шумы каждого ФД не превышают уровень 0.1–0.15 нТл. Общий вид используемого в схеме прибора трехкомпонентного ФД и некоторые варианты конструкций ИМ показаны на рис. 1г.

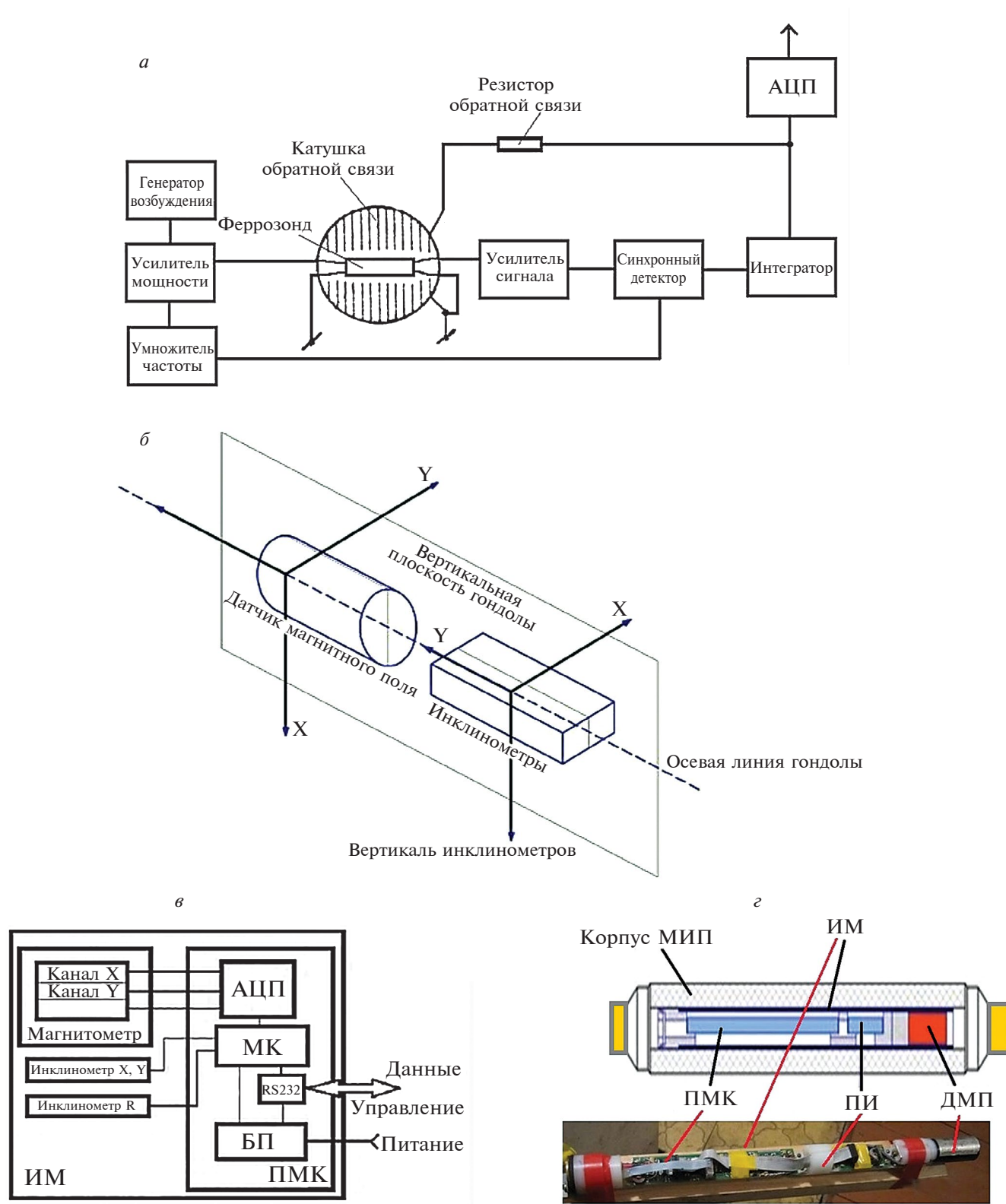


Рис. 1. Блок-схема одноканального феррозондового МИП (*а*), схема расположения ФД и ЦИ (*б*), функциональная схема ИМ (*в*) и конструкция ИМ (*г*).

Главными критериями при выборе этого варианта ФД явилась более высокая точность измерений и низкое потребление (6 мА) энергии от однополярного источника питания (ИП). Низкое потребление (малое значение тока компенсации в измерительных обмотках ФД) было важно для уменьшения (или исключения) эффекта взаимовлияния измерительных каналов друг на друга в конструкции трехкомпонентного малогабаритного ФД, особенно когда ИМ используется в процессе перемещения в пространстве.

Аналоговое напряжение (± 2 В) с выхода каждого из трех ИК (D, H и Z) МИП поступает на входы АЦП, который расположен на плате микроконтроллера (ПМК), где также находятся схемы МК с интерфейсом последовательного канала передачи данных (RS232) и БП. С выхода АЦП данные от МИП поступают на вход МК и далее через последовательный порт RS232 в цифровой форме на выход ИМ. Через этот последовательный порт RS232 осуществляется также управление извне (например, при помощи компьютера) режимами работы МИП, накоплением и коррекцией поступающих данных.

Для контроля пространственной ориентации ФД используется трехкомпонентный инклинометр, который выполнен на базе микросхемы ADIS16209 (<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16209.pdf>) и содержит два устройства (две микросхемы) для измерения углов наклона (см. рис. 1б, в). Выбор данной микросхемы для ЦИ был обусловлен ее компактностью, высокой точностью измерений (см. данные табл. 2 в работе [Любимов и др., 2019]), а также использованием однополярного ИП и малым энергопотреблением, что очень важно при установке ЦИ вблизи ФД. Главным достоинством этого ЦИ является наличие в нем встроенного ДТ, который позволяет проводить коррекцию измеряемых данных как ЦИ, так и ФД.

Инклинометры X, Y измеряют отклонения в горизонтальной плоскости, а инклинометр R измеряет угол наклона ФД в вертикальной в плоскости. ЦИ жестко закреплены (см. рис. 1г) относительно ФД на плате инклинометров (ПИ) и удалены от них на расстояние 55 мм (для исключения влияния на результаты измерений ФД). При помощи инклинометров (одновременно и синхронно с измерением компонент ВМИ) осуществляется измерение и контроль трех углов отклонения измерительных осей ФД, а точность этих измерений составляет $\pm 0.1^\circ$.

Для обеспечения благоприятного температурного режима работы ФД вся схема ИМ размещена в немагнитном корпусе-контейнере (см.

рис. 1г), который в зависимости от условий применения может быть выполнен из дюрала или из пластика с минимальным внутренним диаметром 50 мм и длиной 250–300 мм.

Созданный ИМ на основе трехкомпонентного ФД является функционально законченной конструкцией прибора, который имеет достаточно высокие характеристики по точности измерений и низкое энергопотребление (не более 30 мА), что позволяет использовать его в виде универсального элемента для многих геофизических измерительных систем. Например, предложенная схема и конструкция ИМ была использована при разработках морских магнитометров и градиентометров [Зверев и Любимов, 2019; Любимов, 2019а, в, 2020а; Любимов и др., 2019], а также использовалась при создании поисковых полевых приборов [Любимов, 2020б] и магнитовариационных станций (МВС) [Любимов, 2021, 2024]. Следует отметить, что в зависимости от способа применения ИМ (при решении различных геофизических и специальных задач) его весовые характеристики (масса) могут быть изменены в пределах от 0.3 до 5 кг.

Ниже остановимся на новых решениях и конструкциях созданных приборов и на перспективных проектах реализации устройств и специальных приборов на основе ИМ.

3. МАГНИТОВАРИАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ

На основе универсального ИМ разработан новый магнитометрический прибор – феррозондовая МВС, который позволяет проводить измерения и научные исследования как в условиях МО, так и в условиях экспедиции, в поле [Любимов, 2021; Lyubimov, 2021b]. При этом использование ЦИ позволяет устанавливать в процессе исследований ФД произвольно, измерять составляющие ВМИ и вычислять его модуль.

Предложенная конструкция ИМ (и МВС на его основе) предполагает два основных варианта использования станции, которые показаны на рис. 2а. Первый вариант использования МВС предназначен для работы прибора в условиях МО или стационарного пункта наблюдения, где реализуется установка ИМ на немагнитном постаменте, оборудованном тремя ножками-винтами для нивелировки контейнера с МИП в горизонтальной плоскости (см. рис. 2б). При работе МВС в полевых условиях предусмотрен второй вариант – установка контейнера с ИМ в вырытой в земле яме, которая расположена ниже уровня земли (см. рис. 2а).

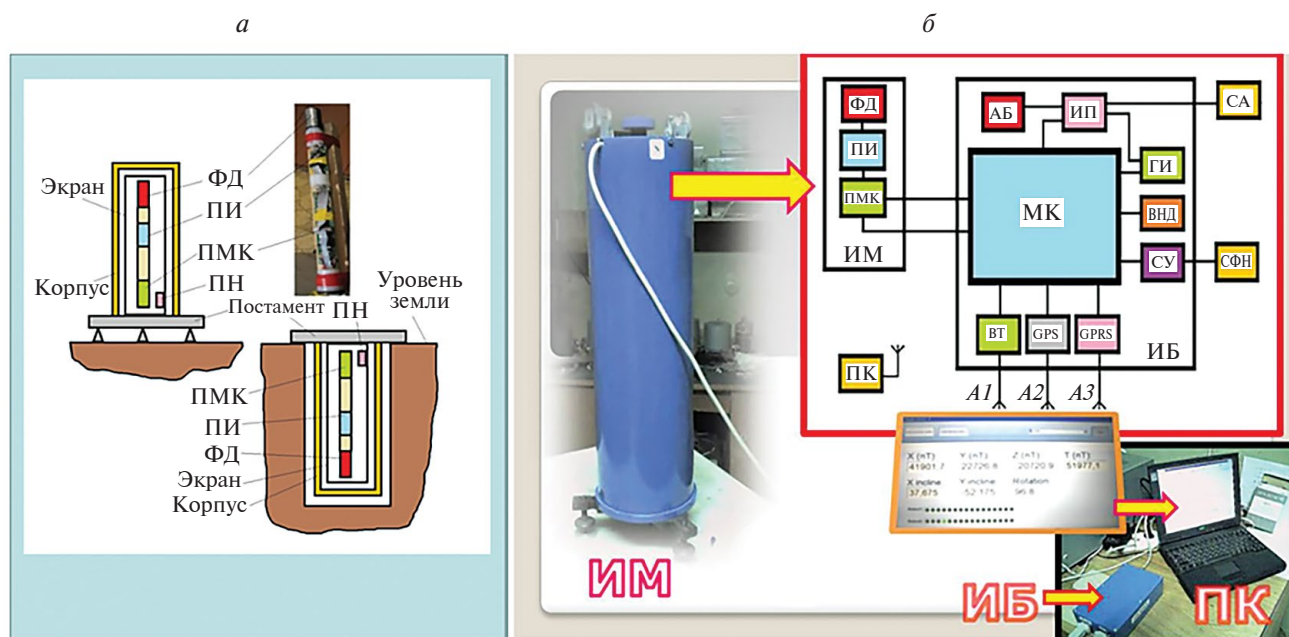


Рис. 2. Общий вид двух вариантов конструкции ИМ: настольный вариант для работы в МО и экспедиционный вариант (а) и функциональная схема МВС с регистрацией данных на ПК (б).

Как было отмечено ранее, основная схема ИМ (в конкретном случае применения) дополнительно оборудована подключенным к МК по линии связи (RS232) цифровой ДТ. Этот датчик установлен (см. рис. 2) внутри корпуса ИМ и расположен вблизи от ФД, что позволяет с точностью 0.1°C контролировать температуру рядом с ФД. ДТ выполнен с применением микросхемы типа LM35D, имеет пластиковый корпус исполнения и потребляет ток не более 60 мкА, что позволяет исключить его электромагнитное влияние на результаты измерений ФД.

Для обеспечения благоприятного температурного режима работы ФД вся схема ИМ размещена в немагнитном корпусе-контейнере, который выполнен из дюралюминия или из пластика (ПХВ или стеклоэпоксидная труба) с размерами $\varnothing 150 \times 300$ мм. Внутри корпуса установлена утепляющая вставка из пенопласта толщиной 20 мм (на рис. 2а не показана), за которой расположен экран, выполненный из фольгированного двухстороннего стеклотекстолита (толщиной 1 мм), который одновременно является электростатическим экраном для ФД. Внутри этого экрана закреплен (припаян) нагревательный элемент (НЭ), который выполнен на основе малогабаритного керамического саморегулирующего позисторного нагревателя (ПН) типа СТ6-1Б-1 [Любимов, 2017].

ПН питается напряжением постоянного или переменного (превышающего примерно на порядок частоту возбуждения ФД) тока от схемы БП. При этом контроль температуры осуществляется ДТ и регулируется при помощи МК.

Функциональная схема МВС (построенная на базе ИМ) показана на рис. 2б. Здесь также представлен внешний вид одного из созданных вариантов МВС для МО. Схема МВС включает в себя: ИМ и измерительный блок (ИБ), которые соединены между собой кабелем, для подачи питающего напряжения от ИП, обмена данными и управляющими сигналами между блоками по стандарту RS232 на расстоянии до 25 м.

В состав ИБ входят следующие функциональные узлы: МК, схема управления (СУ), графический индикатор (ГИ), аккумуляторная батарея (АБ), источник питания (ИП), а также приемник GPS и модули передачи данных Bluetooth (BT) и GPRS с антеннами соответственно А2, А1 и А3.

Модуль GPS оснащен по выходу временным стробом. Модуль Bluetooth имеет опции дальности передачи данных: модуль 2 класса — до 30 м, модуль 1 класса — до 100–200 м, а модуль 1 класса с выносной антенной — до 300–400 м. Конструкция модуля GSM выполнена с применением сменной SIM-карты.

В состав схемы ИБ также входят часы реального времени (с энергонезависимым питанием)

и “буферная” энергонезависимая память (ЭП) — внутренний накопитель данных (ВНД) объемом 8 Мб.

Перед началом проведения работ цикл измерений МВС устанавливается при помощи внешнего персонального компьютера (ПК) и специального программного обеспечения (ПО). Общий вид получаемых МВС данных в цифровой форме на дисплее ПК представлен на рис. 2б. ПО позволяет получать также данные в графическом виде, производить по измеренным составляющим ВМИ вычисление и визуализацию модуля ВМИ (Вт), а также проводить коррекцию получаемых магнитометрических данных на основании данных ЦИ и встроенных ДТ.

В качестве внешнего съемного накопителя цифровых файловых данных (СФН) используется накопитель на ЭП объемом до 4 Гб, который подключается к ИБ и позволяет накапливать измеренные данные в автономном режиме работы, без подключения ПК.

МВС позволяет накапливать и хранить данные в процессе проведения работ во внутреннюю ЭП, а также передавать накопленные данные по имеющимся каналам GPRS и BT на удаленный приемный пункт (компьютер).

Общее потребление схемы ИМ в данной конструкции (без НЭ) — не более 25 мА, а общее потребление всего прибора в режиме передачи данных через канал связи составляет 250 мА. Питание МВС может осуществляться как от АБ напряжением 7–24 В, так и от сети переменного тока 220В (50 Гц) при помощи сетевого адаптера (СА) напряжением 12–24 В.

4. МНОГОКАНАЛЬНЫЙ МАГНИТОМЕТР-ГРАДИЕНТОМЕТР

Многоканальный МГ (ММГ) [Любимов, 2020б] является универсальным прибором, который позволяет проводить компонентные (или модульные) геомагнитные исследования с целью картирования местности, поиска локальных магнитных аномалий. ММГ применяется для поиска локальных ферромагнитных объектов, которые расположены в толще немагнитной среды (в грунте или воде). Методика измерений предполагает одновременное параллельное перемещение МЧД, которые расположены на определенном и устанавливаемом расстоянии (ИБ) друг от друга, в пространстве с одновременным проведением измерений и вычислений элементов ВМИ. В данном варианте конструкция прибора построена с применением пяти МИП. Такая конструкция измерительной

части прибора позволяет за один проход исследовать достаточно большую площадь по ширине, которая может быть переменной и шире, чем у известных современных специальных приборов [Звежинский и Парфенцев, 2009а, б].

Каждый МИП представляет собой ИК и выполнен на основе ИМ и ФД, в качестве которого используется прибор типа FLC3-70. Разрешающая способность каждого из ИК составляет 1 нТл. Применение ЦИ в данной конструкции прибора позволяет обеспечить измерение градиента МП и составляющих ВМИ в процессе движения не хуже 1–5 нТл.

Структурная схема ММГ представлена на рис. 3а. На рис. 3б и рис. 3в показаны соответственно схема расположения основных функциональных узлов прибора при проведении работ по измерению горизонтального градиента (ГГ) и вертикального градиента (ВГ) МП и возможные варианты применения прибора.

На рис. 3а представлена развернутая функциональная схема ММГ, которая реализует основную идею метода измерения градиента ВМИ как на суше, так и в водной среде. При использовании прибора в водной среде дополнительно используется длинный специальный кабель и датчики гидростатического давления (ДГД), которые монтируются в корпус каждого МИП. На рис. 3б показаны схема расположения основных узлов прибора в процессе проведения исследований и возможные варианты его использования при измерении ГГ и ВГ магнитного поля.

На рис. 3в представлены возможные способы проведения исследований с использованием прибора в пешеходном, автомобильном или морском варианте.

Функциональная схема ММГ (см. рис. 3а) включает в себя пять МИП, которые расположены на устройстве их крепления (УКИМ) на определенном (заданном или зависящем от ширины места исследований и размеров УКИМ) расстоянии друг от друга. Каждый МИП подключен через канал передачи данных RS232 к ИБ. В состав ИБ входят следующие функциональные узлы: МК, схема управления (СУ), графический индикатор (ГИ), АБ, ИП, ДТ, а также приемник GPS и модули передачи данных Bluetooth (BT) и GPRS с антеннами А1–А3.

Система передачи данных ММГ, включающая в себя приемник GPS и модули передачи данных BT и GPRS с антеннами, как и схема ВНД, аналогичны тем, что используются в конструкции МВС и описаны выше.

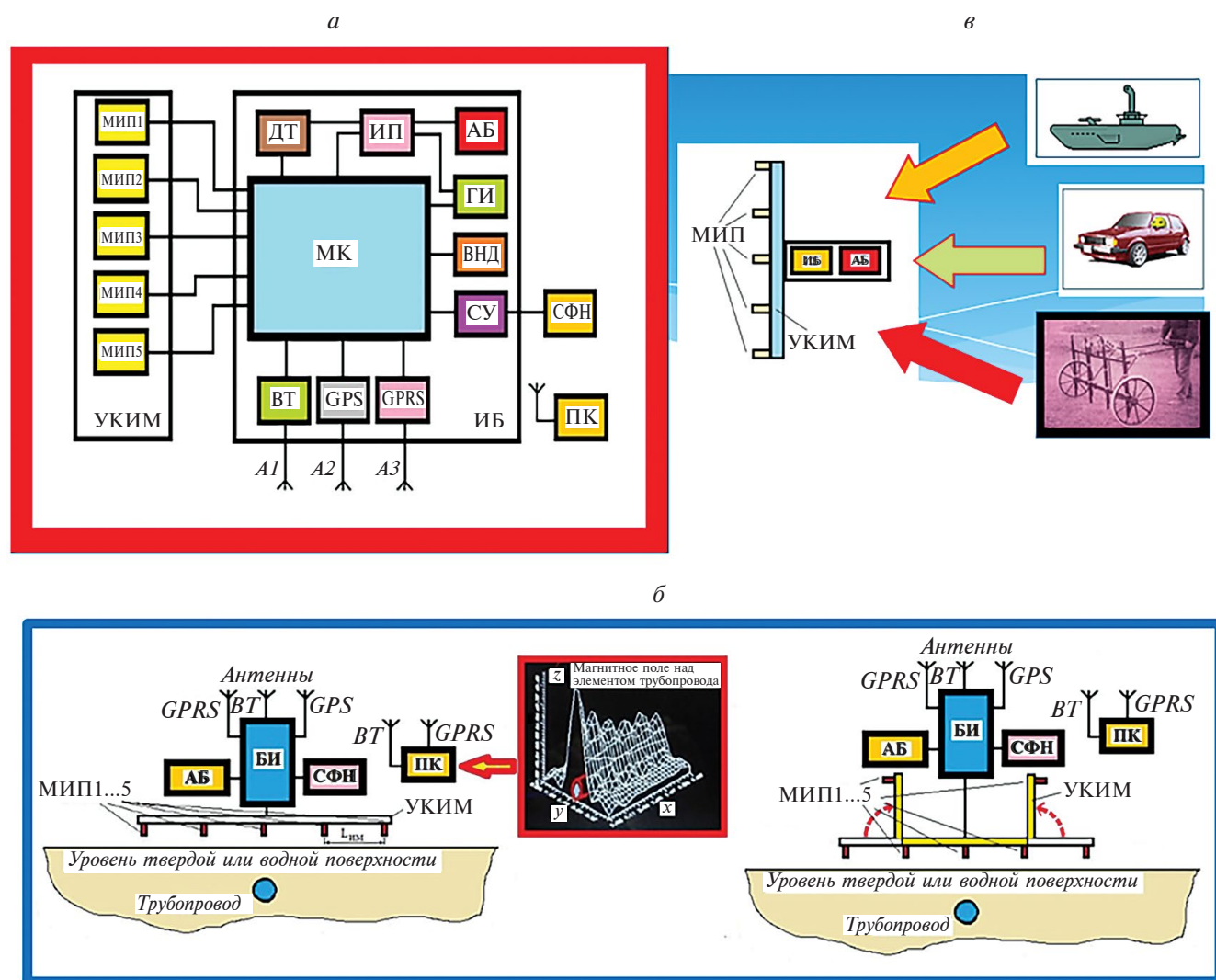


Рис. 3. Функциональная схема прибора (а), схема расположения основных функциональных узлов прибора при проведении работ по измерению ГГ и ВГ (б) и возможные варианты применения прибора (в).

ММГ позволяет накапливать и хранить данные в процессе проведения работ во внутреннюю ЭП, а также передавать накопленные данные по имеющимся каналам GPRS и ВТ на удаленный приемный пункт (компьютер). Общее потребление одного МИП – не более 15 мА, а общее потребление всего прибора в режиме передачи данных через канал связи составляет 250 мА.

ММГ можно успешно использовать в пешеходном режиме, а также и при движении с его буксировкой в качестве прицепа к транспортному средству по земной поверхности или на плоту – по воде. Прибор позволяет одновременно регистрировать данные каждого из МИП и градиенты поля между ними.

Уникальность конструкции ММГ состоит в том, что при измерении ВГ или ГГ магнитного поля нет необходимости юстировать измерительные оси МЧД относительно друг друга (как это делается в большинстве выпускаемых приборов [Звездинский и Парфенцев, 2009а, б]) с высокой точностью. Эту работу берет на себя ЦИ и МК, которые в процессе проведения измерений вносят коррективы и вычисляют реальные значения, измеренные МЧД.

Использование компонентных измерений, – одновременно синхронное измерение ГГ и ВГ составляющих ВМИ в процессе магнитной съемки, – повышают точность и информативность проводимых исследований. Это особенно важно

при поиске и определении локальных аномалий, что значительно труднее сделать при использовании модульных магнитометров или однокомпонентных градиентометров.

5. ГРАДИЕНТОМЕТР ДЛЯ ГИДРОМАГНИТНЫХ СЪЕМОК

Морской компонентный градиентометр (МКГ) был разработан на основе феррозондового ИМ [Зверев и Любимов, 2019; Любимов и др., 2019; Zverev and Lyubimov, 2019]. Созданный прибор предназначен для относительных измерений МП в пространстве в точках и градиента между ними в морских условиях при проведении гидромагнитной съемки (ГМС), в том числе может эффективно использоваться для поиска ферромагнитных предметов и объектов.

Прибор включает в себя две основные части, соединенные между собой кабелем-буксиром, — забортную и набортную. Функциональная схема МКГ представлена на рис. 1 в работе [Зверев и Любимов, 2019].

Наборная часть прибора включает в себя блок питания (БП) и персональный компьютер (ПК) и устанавливается на борту судна-буксировщика. Забортная часть прибора включает в себя два буксировочных кабеля (БК) и две погружные гондолы (ПГ), которые буксируются на расстоянии (для исключения влияния магнитной мас-

сы судна) не менее трех длин корпуса судна-буксировщика от его кормы.

Скорость буксировки ПГ ограничена в пределах от 3 до 10 узлов при допустимой амплитуде волнения моря не более 5 баллов. Общий вид отдельных частей прибора и схема его использования при проведении ГМС показаны соответственно на рис. 4а и рис. 4б. ПГ сконструирована таким образом, чтобы иметь возможность буксировки на горизонтах и глубинах до 130 м. Глубина погружения каждой из ПГ фиксируется при помощи встроенного датчика гидростатического давления (ДГД), позволяющего иметь информацию о ходе и глубине буксировки ПГ с точностью не хуже 0.2 м.

Блок-схема измерительной части МКГ (измерительного модуля — ИМ) прибора, который расположен в каждой из ПГ, включает в себя плату МК, плату ЦИ и МЧД. Измерение составляющих ВМИ в приборе и градиента между ними осуществляется с помощью двух аналоговых трехкомпонентных ФД типа FLC3-70. Аналоговые сигналы, которые поступают с каждого из трех ИК обоих ФД, соответствующих компонентам ВМИ, преобразуются в цифровой код с помощью 24-разрядного АЦП.

Для контроля пространственной ориентации ФД используется двухкомпонентный ЦИ, который содержит два устройства для измерения угла наклона. Инклинометр Х, Y измеряет отклонения от горизонтали плоскости, проходящей через осевую линию гондолы и перпендикулярной “вертикали” гондолы, инклинометр R измеряет угол наклона (вращения) гондолы в плоскости, перпендикулярной осевой линии. Расположение ЦИ относительно ФД в ПГ показано на рис. 1б. С помощью инклинометров осуществляется измерение углов крена и дифферента ПГ, при этом точность этих измерений составляет $\pm 0.1^\circ$. Как было показано выше, для контроля глубины хода ПГ применяется цифровой ДГД, который расположен внутри ПГ на максимальном удалении от МЧД. Чувствительный элемент ДГД соединяется с помощью канала с внешней средой (водой).

Информация с каждой ПГ по последовательному интерфейсу RS422 передается по кабелю на борт судна. Проходя через наборное устройство преобразования интерфейса (ПИ), которое входит в состав БП, данные преобразуются в стандарт RS232 и поступают на ПК. С помощью ПО осуществляется накопление и обработка данных и их визуализация в той или иной форме на экране ПК. Для точной временной привязки текущих измерений к СОМ порту компьютера подключен GPS-приемник.

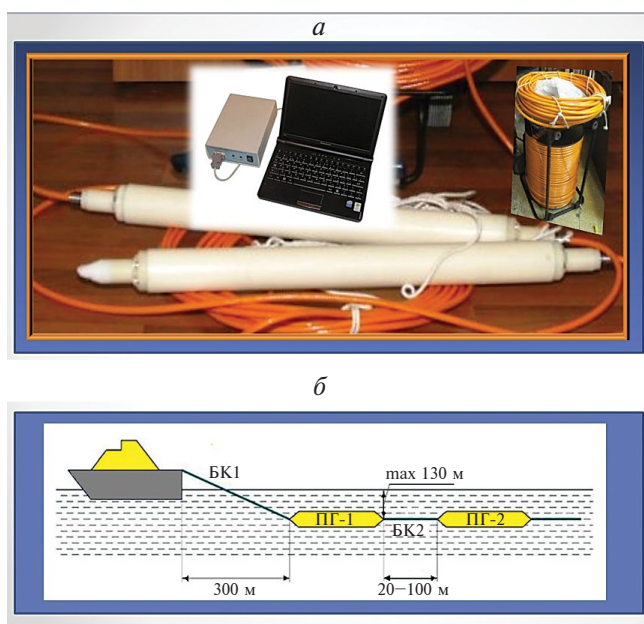


Рис. 4. Общий вид набортной и буксируемой частей МКГ (а) и схема буксировки прибора (б).

В качестве БК используется немагнитный кабель на основе кевлара с повышенным разрывным усилием, порядка 1500 кг. Этот кабель (см. рис. 4а) имеет внешний диаметр 12 мм и включает в себя две токопроводящих жилы для подачи напряжения питания, две витых пары для передачи цифровой информации и экран. Длина БК, соединяющего ближнюю БГ с наботной частью прибора, составляет 380 м. Для измерения ГГ при ГМС на разных ИБ в комплект МКГ входит два аналогичных кабеля длиной 100 м и 20 м.

Конструкция ПГ в сборе [Любимов и др., 2019] состоит из немагнитного корпуса с закрепляемыми на нем съемными стабилизатором и грузом. Стабилизатор предназначен для увеличения устойчивости ПГ при буксировке, а груз необходим для уменьшения колебаний гондолы вокруг продольной оси и для фиксации положения ее вертикальной плоскости. Ближняя от корпуса судна БГ имеет два кабельных ввода, а дальняя БГ — один.

МКГ имеет измерительные диапазоны по всем компонентам ВМИ по каждому из магнитометрических ИК от 0 до ± 70 мкТл, при этом основная погрешность измерений составляет не более 5 нТл, а точность отсчета, реализуемая при помощи АЦП, составляет 0.1 нТл. Диапазон регистрации градиента между МЧД в ПГ по каждому из измерительных магнитометрических каналов лежит в пределах от 0 до ± 10 мкТл. Диапазон регистрации глубины погружения БГ от 0 до 130 м, при этом точность регистрации глубины хода и погружения составляет 0.2 м.

Информация от измерительных каналов магнитометров в двоичном коде выводится через последовательный интерфейс RS422 по линии связи (две жилы буксировочного кабеля) в наботное регистрирующее устройство со скоростью 115200 бод.

В процессе морской съемки (МС) питание прибора (при использовании морских судов) осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 ± 22 В и частотой 50 ± 5 Гц, при этом потребляемая мощность составляет не более 50 ВА. Для работ, выполняемых с использованием различного типа малых “плавающих средств”, предусмотрена возможность питания МКГ от АБ напряжением 10–15 В.

Корпуса обеих ПГ, выполненных на основе полиуретановой немагнитной трубы (толщина стенок корпуса 18 мм), имеют габаритные размеры: диаметр 70 мм и длину 1000 мм. Масса ПГ, включая расположенные внутри нее ИМ и МЧД, составляет не более 10 кг, а общая масса применяемого в приборе в различных вариантах исполь-

зования БК, составляет не более 100 кг. Наботная часть МКГ, БП (размером $120 \times 50 \times 200$ мм) и ПК имеет массу не более 5 кг.

6. МОРСКОЙ МАГНИТОМЕТР-ГРАДИЕНТОМЕТР

Для реализации способа МС, который предложен в работе [Любимов, 2019в], была предложена новая конструкция морского компонентного магнитометра (МКМ), выполненного на основе ИМ. Этот способ измерения градиента МП в водной среде используется при МС, что позволяет повысить точность измерения путем исключения погрешностей, связанных с переменными условиями буксировки ПГ такими как: нестабильность ИБ, “рысканием” и различным заглублением ПГ [Любимов, 2019а, в]. Применение только одной буксируемой ПГ значительно упрощает методику работ (особенно спуско-подъемных), а также работ, связанных с выводом двух или нескольких ПГ при буксировке, например, при измерении ГГ МПЗ, на один горизонт. При этом в качестве главного элемента синхронизации (и метрологического инструмента для реализации точности) всех измерительных процессов магнитометрической аппаратуры используется акустический канал, включающий в себя управляемый импульсный пневмоизлучатель (ПИ), установленный на судне-буксировщике, и пьезоприемник давления (ППД), установленный в буксируемой ПГ. Этот канал формирует импульс ультразвуковой энергии (эхо-сигнал акустической волны), который распространяется в водной среде с некоторой скоростью $V_{зв}$.

На рис. 5 представлена структурная схема устройства, которое реализует основную идею способа измерения градиента МПЗ на море. Это устройство содержит немагнитную буксируемую ПГ, внутри которой расположены ИМ и различные датчики. ИМ содержит микроконтроллер (МК1), АЦП, преобразователь питания (ПП) и интерфейс для передачи данных и управления работой (RS422). К этому ИМ (через АЦП) подключены ФД (три измерительных канала X, Y, Z) магнитометра, два инклинометра (измерительные каналы X, Y и R), датчик гидростатического давления (ДГД) и ППД.

ПГ буксируется при помощи кабеля произвольной длины за кораблём. Как правило, длина кабеля-буксира выбирается после практического определения магнитного момента судна-буксировщика и не должна быть менее 2–3 длин его корпуса. Также при выборе длины кабеля-буксира имеет значение размер акватории, где производится МС, и ее глубина.

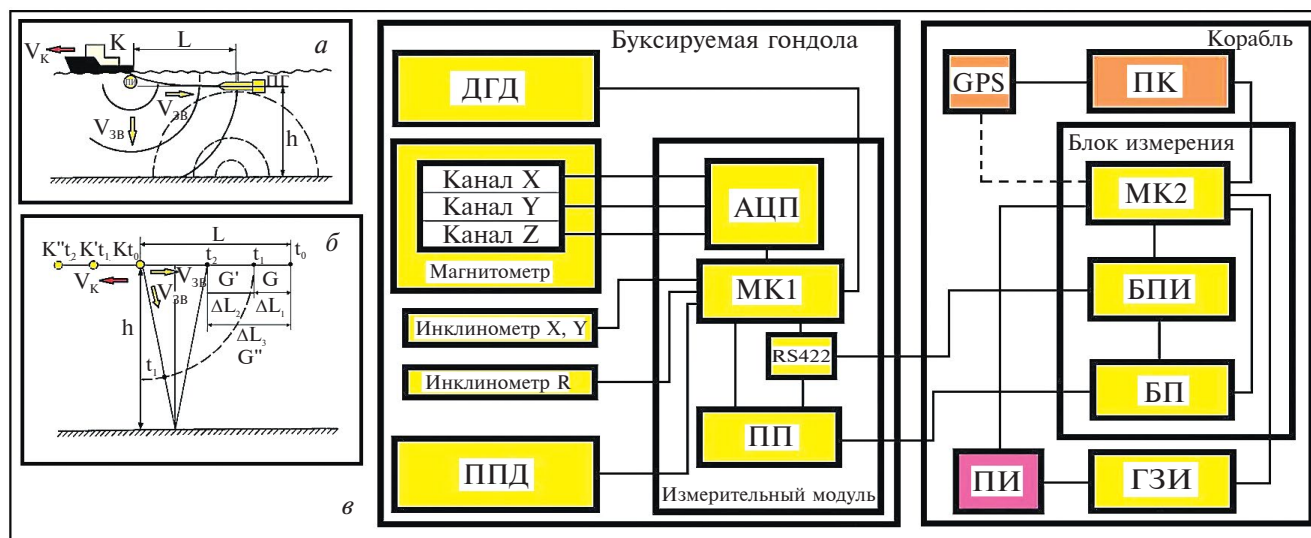


Рис. 5. Структурная схема МКМ для измерения горизонтального градиента МПЗ в водной среде.

На корабле расположены блок измерения (БИ), с подключенными к нему персональным компьютером (ПК), приемником GPS, генератором зондирующих импульсов (ГЗИ) и пневмоизлучателем (ПИ). В состав БИ, являющимся основным элементом синхронизации работы всей системы, входит микроконтроллер (МК2), блок преобразования интерфейса (БПИ) и блок питания (БП).

МК1, расположенный в ПГ, осуществляет синхронизацию и управление получением данных от датчиков в цифровой форме и передачу их через интерфейс RS422 на борт корабля. МК2 осуществляет полную синхронизацию всех данных с мировым временем и их позиционирование с помощью системы GPS, а также осуществляет управление акустическим каналом синхронизации измеренных данных при помощи ГЗИ и ПИ. При этом может быть реализовано два варианта использования ПИ, который может быть жестко закреплён на корпусе корабля или буксироваться за его кормой.

Точность измерения ИБ в предлагаемом устройстве при измерении горизонтального градиента МПЗ определяется параметрами излучаемого ПИ импульса ультразвуковой энергии и позволяет иметь разрешение в условиях ГМС порядка 1–10 см. В качестве ДГД применяется датчик с цифровым выходом (микросхема MS5541B), который позволяет контролировать глубину буксировки ПГ с точностью до 20 см.

Точность измерения МКМ составляющих МПЗ определяется параметрами самих применяемых в магнитометре ФД (в данной конструкции

использован ФД типа FLC-70, имеющий неортогональность осей $\pm 1^\circ$), а также точностными параметрами ЦИ. Оба инклинометра выполнены на основе цифровой микросхемы ADIS16209, которая в настоящее время является наиболее точным интегральным измерительным инструментом. Это позволяет обеспечить точность измерения углов при буксировке ПГ порядка 0.1° (угл. градуса) при разрешающей способности 0.025° .

Опыт применения ЦИ (и, в частности, данной модели) при создании морских магнитометров с буксируемыми ПГ обеспечивает измерение составляющих ВМИ в процессе проведения МС не хуже 1–5 нТл [Любимов, 2019в, 2020а; Любимов и др., 2019].

7. ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИМ

Созданная конструкция ИМ на основе трехкомпонентных ФД может найти свое применение в различных сферах научной, исследовательской, медицинской деятельности [Gurfinkel' et al., 1995a, b; Lyubimov, 2021a]. В том числе — для электромагнитного мониторинга окружающей среды и специальных исследований, например, в радиотехнической промышленности, а также и в военных целях [Афанасьев, 1986; Любимов, 1994, 2004, 2018, 2019б, 2024]. При этом созданная конструкция ИМ компактна, обладает высокой чувствительностью (на уровне единиц нТл) и малым энергопотреблением.

На основании проведенных исследований и полученного опыта предлагается применение нескольких ИМ в медицинских палатах, магнитных камерах и в производственных рабочих помещениях для проведения электромагнитного мониторинга окружающей среды. С помощью необходимого ПО возможно построение карт магнитной обстановки в исследуемых помещениях и рабочих комнатах в реальном масштабе времени [Любимов, 2004, 2018, 2019б, 2024].

При использовании измерительной схемы, показанной на рис. 6а, появляется возможность исследовать (с использованием нескольких ИМ) в помещении магнитный момент (ММ) различных изделий, например, крупных научных и других приборов, спутников, различной специальной техники. При этом появляется возможность многоканальных измерений как ММ (при вращении испытуемого объекта в отдельных плоскостях и направлениях), так и проводить трехкомпонентные градиентные измерения (в том числе модуля ВМИ-Вт).

При организации аналогичной (как на рис. 6а) измерительной многоканальной схемы (4 и более ИМ) в полевых условиях появляется возможность для проведения специальных работ, например, исследования ММ у танков, спецмашин, бронетехники, различного оружия. Так, при установке нескольких ИМ в водной среде (в руслах рек и каналов или на плотках) можно исследовать ММ как различных плавсредств, так и кораблей и подводных лодок (см. рис. 6б).

Данное решение устройства на основе ИМ вполне применимо для охранной высокоточной деятельности и для защиты морских и сухопутных границ (см. рис. 6в). Его можно использовать на немагнитных дрейфующих (в том числе метеозондах и высоколетящих) аэростатах [Любимов, 2024] при проведении научных специальных градиентометрических исследований с большой “измерительной базой” (см. рис. 6г).

В настоящее время применение магнитометрической аппаратуры на основе ФД становится актуальным для проведения научных исследований

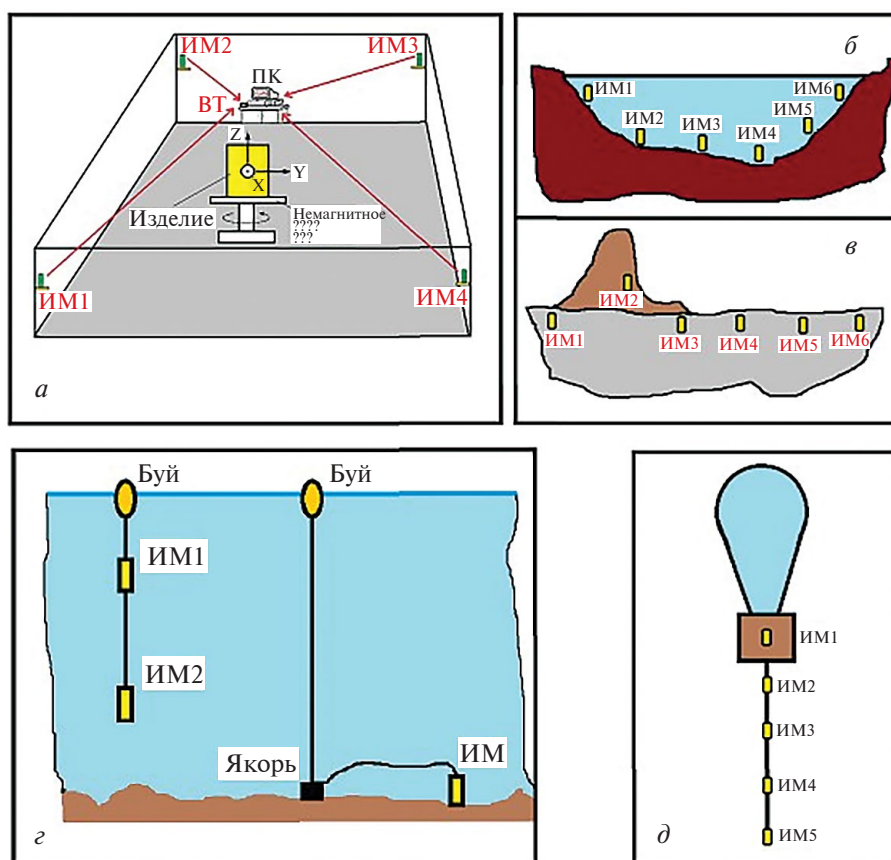


Рис. 6. Схемы проведения исследований с применением ИМ: по изучению ММ изделия (а) и проведение многоканальных градиентометрических измерений в водной среде (б, г), на суше (в) и в воздухе (д).

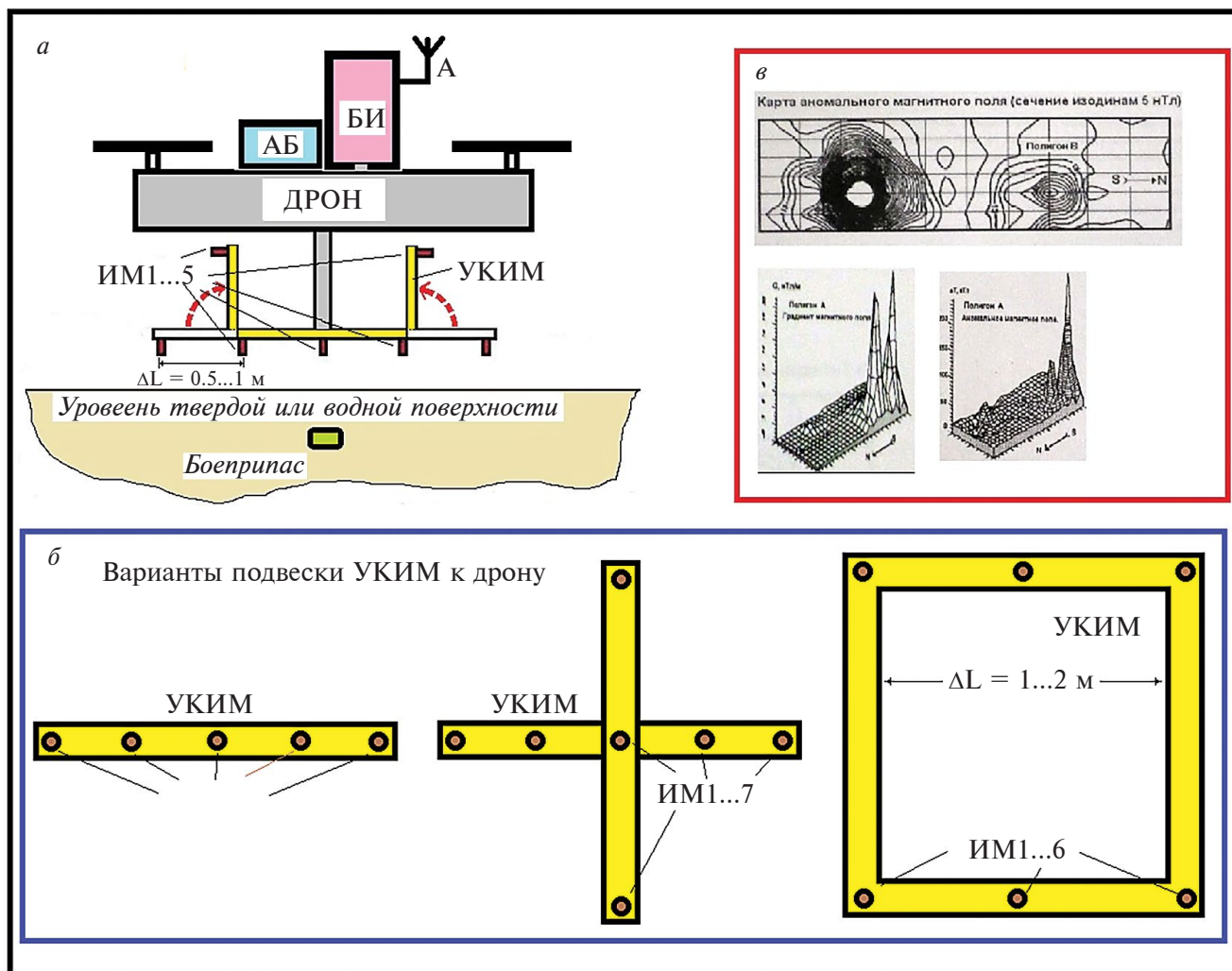


Рис. 7. Конструкция многоканального магнитометра-градиентометра для установки на низколетящих дронах разных конструкций (а), варианты подвески различных конструкций УКИМ (б) и пример проведения поисковых работ при обнаружении магнитных объектов (в).

и поисковых работ с низколетящих над земной или водной поверхностью аппаратов, любого типа БПЛА (дронов) с полезной нагрузкой 2–5 кг.

Предложенная конструкция многоканального магнитометра-градиентометра для дрона (МГД), созданная на базе ИМ и показанная на рис. 7а, предназначена для площадных съемок, когда наземные пешеходные и автомобильные съемки не возможны. МГД может использоваться для съемок с высоким разрешением для обнаружения небольших объектов в земле, например, мины, бомбы и неразорвавшиеся боеприпасы, а также при проведении археологических изысканий.

Применение специального ПО обеспечивает накопление измеренных данных во внутреннюю

ЭП или передачу данных в режиме реального времени, как это выполнено у ММГ. Применение низко потребляющих малогабаритных МЧД в схеме прибора делает его достаточно экономичным и позволяет более длительное время его использования от АБ в процессе съемки. А также значительно уменьшить общий вес УКИМ. Варианты подвески различных конструкций УКИМ к дрону показаны на рис. 7б.

Пример обнаружения магнитных объектов в процессе проведения исследований с использованием МГД представлен на рис. 7в, на котором показаны карты аномального МП и его градиента при проведении поисковых работ на одном из полигонов.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном обзоре показано несколько конструкций магнитометрических приборов для долговременных и кратковременных измерений на основе ИМ, имеющих высокую (на уровне 1 нТл и выше) разрешающую способность и позволяющих проводить как научные и геофизические исследования, так и специальные работы в различных направлениях. При этом основное направление разработок было направлено на компактность создаваемых приборов и их экономичность с использованием самой передовой зарубежной элементной базы.

В настоящее время возникает настоятельная необходимость в отечественном приборостроении ориентироваться на применение собственной продукции приборостроения и элементной базы. Например, в качестве ФД для новых разработок ИМ можно достаточно успешно применять российские трехкомпонентные МЧД НВО391.5-20/3, НВО391.5-35/3 или преобразователи НВ0302 (различных модификаций), выпускаемые фирмой ООО «Магнитные приборы» (www.magnetic.spb.ru). Основные технические характеристики этих МЧД не очень заметно отличаются от лучших на данный момент зарубежных образцов ФД [Звежинский и Парфенцев, 2009а, б; Любимов и др., 2019].

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор хотел бы выразить благодарность и признательность инженерам, ученым, научным сотрудникам и медицинским работникам (Выдрину В.В., Гурфинкелю Ю.И., Звереву А.С.) – участникам и идеологам работ, которые внесли большой личный вклад в создание феррозондовых магнитометров и проведение уникальных исследований с ними. Хотелось отметить также авторов уникальных компьютерных программ (Кириакова В.Х., Суменко К.Г.), созданных для различных модификаций современных феррозондовых приборов, которые используются в настоящее время при проведении научных изысканий и проведении специальных работ в различных условиях и средах [Любимов, 2024]. При использовании созданного оригинального ПО результаты исследований с помощью созданных устройств на основе феррозондовых МЧД могут легко интегрироваться во многие отечественные и зарубежные проекты по сбору, обработке и коллекционированию полученных цифровых данных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 188 с. 1986.

– Звежинский С.С., Парфенцев И.В. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. № 1. С. 16–29. 2009а.

– Звежинский С.С., Парфенцев И.В. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов. Окончание // Спецтехника и связь. № 2. С. 16–23. 2009б.

– Зверев А.С., Любимов В.В. Градиентометр для гидромагнитной съёмки // Датчики и системы. № 12 (242). С. 46–50. 2019. <https://doi.org/10.25728/datsys.2019.12.7>

– Любимов В.В. Феррозондовые магнитометры. Вопросы разработки. Часть 1: Способ устранения температурной неустойчивости компенсационной обмотки датчика. Препринт № 50 (997). М.: ИЗМИРАН, 29 с. 1992.

– Любимов В.В. Феррозондовые диагностические магнитометры, созданные в ИЗМИРАН в период с 1989 по 1994 гг. (Обзор). Препринт № 15 (1065). М.: ИЗМИРАН, 19 с. 1994.

– Любимов В.В. Приборы для электромагнитного мониторинга и экологических исследований окружающей среды // Датчики и системы. № 9. С. 25–27. 2004.

– Любимов В.В. К вопросу повышения точности измерений магнитного поля: Опыт термостатирования датчиков магнитометров // Приднепровский научный вестник. Т. 3. № 4. С. 84–93. 2017.

– Любимов В.В. Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 2: Инструментарий для электромагнитного мониторинга окружающей среды и некоторые результаты его применения // Приднепровский научный вестник. Т. 6. № 12. С. 3–19. 2018.

– Любимов В.В. К вопросу измерения градиента магнитного поля на море: новая идеология создания приборов для ГМС // Проблемы научной мысли. Т. 5. № 11. С. 3–12. 2019а.

– Любимов В.В. Обзор по магнитометрам, созданным в ИЗМИРАН. Часть 3: Приборы для медико-биологических исследований и электромагнитного мониторинга окружающей среды // Евразийское научное объединение. № 6 (52). С. 91–98. 2019б. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3271160>

– Любимов В.В. Способ измерения горизонтального градиента магнитного поля в водной среде и устройство для его реализации: буксируемый компонентный магнитометр // Евразийское научное объединение. № 11 (57). С. 233–238. 2019в. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3579443>

– Любимов В.В., Зверев А.С., Суменко К.Г. Феррозондовый поисковый буксируемый магнитометр-градиентометр: опыт разработки / Евразийское научное объединение. № 1 (47). С. 416–420. 2019. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2560101>

– Любимов В.В. Морской градиентометр на основе одной буксируемой гондолы // Приборы. № 2 (236). С. 39–43. 2020а.

- Любимов В.В. “Феррозондовые грабли” — прибор для поиска магнитных предметов и геомагнитных исследований // Евразийское научное объединение. № 7 (65). С. 120–123. 2020б. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3978400>
- Любимов В.В. Универсальный измерительный модуль на базе трехкомпонентного феррозондового датчика и магнитовариационная станция на его основе // Евразийский союз учёных. Сер. Технические и физико-математические науки. № 10 (91). С. 31–36. 2021. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2021.1.91.1473>
- Любимов В.В. Приборы на базе феррозондовых датчиков и их применение в различных условиях и средах (публикации сотрудников ИЗМИРАН) // Вектор научной мысли. № 3 (8). С. 138–158. 2024.
- Gurfinkel’ Yu.I., Lyubimov V.V., Orayevskii V.N. Experience in the use of a diagnostic magnetometer in the emergency clinic // Biophysics. V. 40. № 5. P. 1047–1054. 1995.
- Gurfinkel’ Y., Lyubimov V., Orayevskii V., Parfenova L. Geomagnetic monitoring: Experiments and prospects in biology and medicine // Non-equilibrium and Coherent Systems in Biology, Biophysics and Biotechnology / Proceedings of International Conference Dedicated to the 120th birthday of Alexander Gavrilovich Gurwitsch (1974–1954) September 28 – October 2, 1994. Moscow, Russia. M.: Bioinform Services Co. P. 473–476. 1995.
- Lyubimov V.V. Instruments to the natural magnetic field visualization for medical institutions // Polish Journal of Science. № 44 (1). P. 10–17. 2021a.
- Lyubimov V.V. Three-component fluxgate magnetovariation station // East European Scientific Journal. № 10 (74). P. 63–66. 2021b. <https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.74.135>
- Zverev A.S., Lyubimov V.V. Marine component gradiometer // Евразийский союз учёных. № 10 (67). 5 часть. С. 4–7. 2019.

Fluxgate Magnetometers for Geophysical and Special Research, Created on the Basis of a Universal Measuring Module (Development Review)

V. V. Lyubimov *

Pushkov Institute of Earth Magnetism, ionosphere and radio wave propagation Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Russia

**e-mail: lvv_store@mail.ru*

The work is devoted to the description of the design of the measuring module (ferrosonde magnetic compass) and the creation on its basis of various magnetometric devices. These devices are designed to carry out geomagnetic and special works in various conditions and environments, — as for use in stationary observation points, also working on expeditions.

Keywords: magnetic field, magnetic measurements, magnetic surveys, magnetometers, gradiometers, magnetovariation stations, fluxgate magnetometers, measuring module