

Том 64, Номер 3

ISSN 0016-7940

Май – Июнь 2024



ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ

Проблемы солнечно-земной физики



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Том 64, номер 3, 2024

Форбуш-эффекты и геомагнитные бури

А. В. Белов, Е. А. Белова, Н. С. Шлык, М. А. Абунина, А. А. Абунин, С. М. Белов 322

Ионосферные черты высыпаний дневного полярного каспа при северном ММП

В. Г. Воробьев, О. И. Ягодкина, Е. Е. Антонова 336

Изучение внезапного начала магнитной бури по наблюдениям
с секундным временным разрешением

Ю. С. Загайнова, С. В. Громов, Л. И. Громова, В. Г. Файнштейн 348

Пространственная структура возмущений концентрации плотности плазмы на высотах
верхней и внешней ионосферы, возбуждаемых при нагреве $F2$ -слоя мощным
радиоизлучением КВ-диапазона

В. Л. Фролов, Е. С. Андреева, А. М. Падохин 363

Тренды критической частоты $foF2$ по данным станций Северного и Южного полушарий

А. Д. Данилов, А. В. Константинова, Н. А. Бербенева 386

Сезонно-суточные особенности характеристик среднемасштабных перемещающихся
ионосферных возмущений в азиатском регионе России в годы умеренной солнечной
активности

В. И. Куркин, А. В. Подлесный, М. В. Цедрик, А. В. Софьин 400

Сезонные, долготные и широтные различия суммы осадков на территории России в годы
максимума и минимума солнечной активности

В. А. Лантухов 408

Влияние вариаций солнечной активности на межсуточную изменчивость
 NmE в геомагнито-спокойных условиях по данным наземного ионозонда *Dourbes*

А. В. Павлов, Н. М. Павлова 416

Соответствие вариаций AE и A_{pro} индексов в 23–24-м солнечных циклах

Т. Л. Гуляева 433

Использование методов классификации при прогнозировании уровня возмущённости
геомагнитного поля по Kp -индексу

И. М. Гаджиев, О. Г. Баринев, И. Н. Мяжкова, С. А. Доленко 441

УДК 524.1.352; 523.62-726; 550.385.4

ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ И ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ

© 2024 г. А. В. Белов¹, Е. А. Белова¹, Н. С. Шлык¹*, М. А. Абунина¹,
А. А. Абунин¹, С. М. Белов¹

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

*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 19.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Выделены и исследованы события Форбуш-эффектов в галактических космических лучах (по данным сети нейтронных мониторов) и сопутствующих геомагнитных возмущений за длительный период с 1957 по 2022 гг. Проанализированы статистические связи между различными параметрами вариаций потока космических лучей и индексами геомагнитной активности. Установлено, что величина Форбуш-эффектов нелинейно зависит от класса геомагнитной бури. Найдена умеренная корреляция (до 0.67) между экстремальными значениями различных индексов геомагнитной активности (A_p , K_p , Dst) и характеристиками космических лучей. Показано, что одновременная регистрация экстремальных значений параметров космических лучей и геомагнитной активности происходит далеко не всегда, а зависит от знака B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в конкретном событии.

DOI: 10.31857/S0016794024030015, EDN: SNFUWI

1. ВВЕДЕНИЕ

Связь Форбуш-эффектов (ФЭ) и геомагнитных бурь (ГМБ) была очевидной с момента их открытия. ФЭ сразу были определены, как явление снижения интенсивности космических лучей (КЛ), происходящее во время магнитной бури [Forbush, 1937, 1938]. Поначалу исследователи решили, раз явления наблюдаются одновременно, значит, одно является следствием другого, и предположили, что ФЭ вызываются ГМБ. Но позже были внесены уточнения. Так, сам Скотт Форбуш несколько лет спустя [Forbush, 1954], анализируя данные по горизонтальному магнитному полю и КЛ ст. Нуансауо с 1937 по 1952 гг., указывает на то, что большинство понижений интенсивности КЛ во время геомагнитных возмущений не позволяет обнаружить количественных характеристик, хорошо коррелирующих между собой. Затем Yoshida and Akasofu [1966] указали, что величина понижения главной фазы ГМБ не показывает очевидной связи с величиной ФЭ, но отметили, что начало значительных ФЭ более тесно связано с возникновением последовательных внезапных импульсов/микроразрывов геомагнитного поля, чем со ступенчатой функцией, по-

добной внезапному началу бури (*Sudden Storm Commencement* — SSC). Однако, позже Ye et al. [1987] рассмотрели ГМБ разной величины за 1966–1982 гг. и установили, что характеристики ФЭ связаны с величиной K_p -индекса геомагнитной активности (ГА): чем больше K_p и длительность бури, тем больше величина ФЭ и скорость понижения интенсивности КЛ. Позднее Kudela and Storini [2005] показали, что величины, характеризующие ГМБ и ФЭ, не всегда пропорциональны.

Известно, что сами магнитные бури (а именно изменение жесткостей обрезания) также оказывают влияние на профиль ФЭ, только оно проявляется не в снижении интенсивности КЛ, а, наоборот, в некотором росте, часто по данным отдельных станций. Такие магнитосферные эффекты описаны в работах Dorman [1963], Debrunner et al. [1979], Baisultanova et al. [1995], Dvornikov and Sdobnov [2002], Belov et al. [2005]. Однако они наблюдаются не всегда, не так велики, как сами ФЭ, хотя, безусловно, напрямую связаны с ГМБ и наблюдаются только под воздействием магнитного поля Земли.

Несмотря на то, что и геомагнитные бури, и Форбуш-эффекты имеют общее солнечное и межпланетное происхождение, в толковании связи их характеристик по-прежнему существуют противоречия, что, возможно, связано с различными механизмами, действующими при возникновении обоих явлений.

В статье Belov et al. [2001] авторы указывают на нелинейность связи максимального Kp -индекса и величины ФЭ. Исследуя длительный период времени (1978–1996 гг.), они приходят к выводу, что большинство ГМБ связано с небольшими ФЭ: для $Kp_{max} = 5$ средняя амплитуда ФЭ не превышает 1.5%, а ФЭ величиной >5% регистрируются только во время очень больших и/или экстремальных магнитных бурь.

В обзоре Vennerstrom et al. [2016], посвященном экстремальным ГМБ, указано, что во время всех таких событий были зарегистрированы ФЭ, однако четкой связи между их характеристиками не было установлено. Kane [2010] подтверждает этот вывод: величины геомагнитных возмущений и ФЭ (величиной >4%) по данным нейтронного монитора (НМ) Climax для очень больших бурь 23-го солнечного цикла (СЦ) не пропорциональны друг другу: максимальные отрицательные значения Dst -индекса не регистрируются в тот же час, что и максимальный ФЭ, и эволюция во времени индекса Dst и плотности КЛ очень разнится. Но затем в работе Parnahaj et al. [2013] было показано, что для 250 ФЭ, вызванных корональными выбросами массы (КВМ), коэффициент корреляции между величиной ФЭ и минимальным значением Dst -индекса составляет 0.28–0.4, увеличиваясь для КВМ типа гало. Позже эти же авторы [Parnahaj and Kudela, 2015] показали, что ФЭ, хотя и не всегда сопровождаются ГМБ, имеют тенденцию коррелировать свою амплитуду с минимальным значением индекса Dst (например, ни один ФЭ <5% не сопровождается большой бурей, а каждый ФЭ >9% сопровождается как минимум умеренной бурей). Lingri et al. [2016] также указывают, что параметры ФЭ коррелируют с параметрами ГМБ, но четкое соответствие и взаимосвязь их до сих пор не ясны.

Aslam and Badruddin [2017] для нескольких событий 23-го цикла показали, что снижение интенсивности КЛ начинается раньше, чем снижение Dst , а восстановление Dst начиналось раньше, чем восстановление интенсивности потока КЛ. В работе Kharayat et al. [2016] показано, что снижение интенсивности КЛ в дни возникновения ГМБ в 23-м СЦ, наоборот, имеет аналогичную картину с поведением Dst -индекса. Alhassan et al. [2021] для автоматически отобранных про-

граммой 230 ФЭ за 1998–2002 гг. (по данным НМ Oulu) выяснили, что двумерный регрессионный анализ указывает на значительную линейную зависимость между большими ФЭ (величиной >3%), данными солнечного ветра (СВ) и геомагнитными индексами. Mishra et al. [2022], исследуя 5 больших ГМБ и данные по КЛ с высокоширотных станций, показали хорошую связь процентного уменьшения интенсивности космических лучей с индексом Dst во время бури, при этом заметного отставания во времени между обсуждаемыми параметрами не обнаружено. В свою очередь, Мелкумян и др. [2023], исследуя данные по 944 событиям с 1997 по 2021 гг., показали, что развитие ФЭ и геомагнитных возмущений происходит быстрее для спорадических событий (вызванных КВМ), и распределения времени достижения минимума Dst -индекса и плотности КЛ совпадают, а для событий, связанных с высокоскоростными потоками из корональных дыр или несколькими источниками, минимум плотности КЛ достигается позже, чем минимум Dst -индекса. Кроме того, Мелкумян и др. [2024] получили, что Dst -индекс достигает экстремального значения в конце фазы спада ФЭ для всех типов солнечных источников, независимо от характера начала события (наличие или отсутствие SSC).

Ряд работ посвящен обсуждению предвестников начала ГМБ. Из-за влияния фронта приближающегося КВМ, интенсивность потока КЛ изменяется (предпонижение и/или предвозрастание) [Kudela et al., 2000; Dorman, 2005; Papailiou et al., 2021]. Munakata et al. [2000] исследовали 14 очень больших бурь ($Kp \geq 8$) и 25 больших бурь ($Kp \geq 7$) с 1992 по 1998 гг. и обнаружили, что 68% событий имели четко идентифицируемые предвестники в данных мюонного детектора за 6–9 ч до SSC. Зверев и др. [2020] указали на изменения амплитуд зональных (северо-южных) компонент изотропной интенсивности КЛ и первых двух моментов их углового распределения (по данным мировой сети НМ) при приближении возмущений межпланетной среды еще до начала возмущения геомагнитного поля за время от двух часов до суток. Ye et al. [2022], используя ансамблевый самоадаптирующийся метод частотно-временного анализа данных интенсивности КЛ, показали, что можно еще эффективнее обнаруживать предвестники ГМБ, вызванных КВМ, в виде значительного увеличения спектральной амплитуды в определенном диапазоне частот.

Таким образом, несмотря на довольно длительную (86 лет!) историю изучения ФЭ и связей характеристик ФЭ и геомагнитной активности, сегодня существуют довольно противоречивые

заклучения на этот счет и многое еще неясно. Главное, от чего мы будем отталкиваться в наших рассуждениях, это то, что ГМБ — это магнитосферное явление, а ФЭ — гелиосферное. Размеры магнитосферы на пять порядков меньше размеров гелиосферы. Одни и те же межпланетные возмущения по-разному действуют на эти две системы, столь отличающиеся по размеру. ГМБ обычно длится 1–3 дня. ФЭ детектируется на Земле тоже в течение нескольких дней, но только потому, что мы его наблюдаем, находясь внутри системы магнитосферы. На самом деле ФЭ начинается еще раньше (от 15 ч до 3–5 дней) и затем, после нашего наблюдения, может регистрироваться на расстояниях в несколько десятков а.е., то есть в итоге длится около месяца и более. Крупные межпланетные возмущения, соединяясь и взаимопоглощаясь, могут действовать и далее до границы гелиосферы и длиться много месяцев. Мы всегда видим только малую часть явления ФЭ, и оно же, но в другой точке и в другое время, может выглядеть совершенно иначе.

Важно учесть, что магнитное поле и космические лучи — это разные физические сущности. Магнитное поле существует в каждой точке пространства (например, магнитосферы Земли) в каждый момент времени. Его можно измерить магнитометром. Космические лучи — это некое статистическое сообщество, которое можно измерить, только задав дополнительные характеристики: либо количество в определенном объеме пространства за определенное время, либо — для потока — площадь сечения.

Кроме того КЛ — это заряженные частицы, движущиеся с большими скоростями, сравнимыми со скоростью света, и создающие свои поля. При встрече с магнитным полем в гелиосфере они вращаются вокруг его силовых линий с огромным радиусом. Для частиц жесткостью 10 ГВ ларморов радиус у Земли будет $> 10^{12}$ м. Это означает, что в небольшой отрезок времени (например, час) детекторы на Земле регистрируют частицы, собранные с большого объема. Среди них могут быть частицы, прилетевшие и с обратной стороны от Солнца, и от орбиты Юпитера. По этим причинам исследования ФЭ — это не тот случай, когда обоснованные выводы можно сделать по нескольким событиям. Понять главные особенности ФЭ можно, собрав все (или почти все) данные по вариациям космических лучей и подвергнув их комплексному анализу.

Форбуш-эффект — “буря” в космических лучах, которая является следствием бури в межпланетном пространстве и часто наблюдается одновременно с геомагнитной бурей. Все эти три вида

возмущений: возмущения солнечного ветра, магнитосферы и космических лучей тесно взаимосвязаны, и их естественно исследовать совместно. ФЭ наблюдаются не только на Земле, но и на космических аппаратах в космических лучах малых энергий. Однако этим данным или не хватает статистической точности, или же возникают трудности в разделении модуляционных и ускорительных эффектов. Основным источником информации о ФЭ остаются наземные наблюдения КЛ, прежде всего данные нейтронных мониторов.

Целью настоящей работы является исследование различных характеристик ФЭ и соответствующих индексов геомагнитной активности (ГА), зарегистрированных во время этих событий, с использованием большого статистического материала с 1957 по 2022 гг.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Представленные ниже результаты получены с помощью баз данных, созданных в ИЗМИРАН в последние 28 лет. В основном, здесь использовались две базы данных. Первая из них — VCR (*Variations of Cosmic Rays*) — объединяет расчеты вариаций плотности и анизотропии КЛ, выполненные методом глобальной съемки [Белов и др., 2018] за каждый час для 65 лет наблюдений (1957–2022 гг.). Результаты, полученные для КЛ с жесткостью 10 ГВ, объединены с параметрами солнечного ветра и характеристиками геомагнитной активности, включенными в базу данных OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). Еще более активно используется другая база данных: FEID — *Forbush Effects and Interplanetary Disturbances* (<https://tools.izmiran.ru/feid/>). Выделяя события для этой базы данных, мы старались включить все Форбуш-эффекты в наиболее широком определении и сделать это таким образом, чтобы каждый ФЭ соответствовал своему крупномасштабному возмущению межпланетной среды.

В базу данных FEID включены: 1) все события, сопровождавшиеся ударной волной, даже в тех случаях, когда явного эффекта в плотности КЛ не наблюдалось; 2) все достаточно большие ($> 1\%$) изменения плотности КЛ независимо от условий в межпланетной среде; 3) небольшие (как правило, 0.5–1.0%, иногда несколько меньше) события, если в это время наблюдалось выраженное возмущение солнечного ветра.

Такой каталог ФЭ имеет ряд очевидных преимуществ. Во-первых, он основан на физических характеристиках (плотность, анизотропия) косми-

ческих лучей определенной (10 ГВ) жесткости, а не на данных отдельных детекторов КЛ. Во-вторых, количественные характеристики отдельных событий намного (почти на порядок) точнее, чем используемые в каталогах, основанных на данных отдельных НМ [Lockwood, 1990; Cane et al., 1996]. В-третьих, наш каталог охватывает все события, наблюдавшиеся в определенный период, а не только специально выбранные. В него включены события с малой амплитудой, которые являются следствием слабых межпланетных возмущений или значительных солнечных событий с источниками в далекой долготной зоне. В-четвертых, каждое событие (ФЭ) в космических лучах связывается в нашем каталоге с определенным межпланетным возмущением и, по возможности, с его солнечным источником. Поэтому это каталог не только Форбуш-эффектов, но и крупных межпланетных возмущений. Это отличает его от других списков ФЭ, где зачастую одно большое событие — это, по существу, серия эффектов, обусловленных различными источниками.

Наша база данных охватывает период с июля 1957 г. по декабрь 2022 г., т.е. практически весь период функционирования мировой сети станций НМ, и включает в себя более 8500 событий. Каждое событие характеризуется десятками различных параметров (как наблюдаемых, так и рассчитываемых), характеризующих вариации КЛ и сопутствующих явлений. Для КЛ это характеристики заряженных частиц с жесткостью 10 ГВ. Главной из них является величина ФЭ (AF), за которую принимается максимальная вариация плотности КЛ во время события.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Связь средних значений параметров космических лучей и геомагнитной активности

За исследуемый период времени (июль 1957 г. — декабрь 2022 г.) в базе данных FEID содержится 8524 события, но имеем ли мы право анализировать их, не разделяя по типу источника и не отделяя события с несколькими солнечными источниками (смешанные)? В этом исследовании мы исходили из того, что смешанные межпланетные возмущения схоже действуют на ГА и ФЭ, поэтому учитываем все события при расчетах коэффициентов корреляции.

Параметры, отражающие геомагнитную активность, и характеристики космических лучей должны быть связаны между собой в силу существования общего источника (межпланетного возмущения). Рис. 1 показывает связь между максимальным значением Kp -индекса геомагнитной активности

и параметрами потока КЛ в соответствующем событии: AF — величина ФЭ, $A_{\text{хутах}}$ — максимальное значение экваториальной составляющей анизотропии КЛ, $D_{\text{мин}}$ — максимальное часовое понижение плотности КЛ. Чтобы получить этот рисунок, все события были разбиты на 8 групп, в соответствии с максимальным Kp -индексом ($Kp_{\text{мах}}$). Так, в одну группу вошли все события с $Kp_{\text{мах}} = 5-, 5, 5+$, т.е. все малые магнитные бури. Другую группу составили умеренные бури (с $Kp_{\text{мах}}$ от 6— до 6+) и т.д. Все рассчитанные значения приведены ниже в табл. 1.

Хорошо видно, что все зависимости имеют нелинейный характер, хотя определенно существует тенденция к увеличению экстремальных значений параметров КЛ с ростом ГА. При этом наиболее выраженными различия становятся при увеличении геомагнитных возмущений до уровня умеренной магнитной бури.

Анализ рис. 1 и данных табл. 1 также позволяет сделать выводы о том, что спокойному и слабо-возмущенному геомагнитному фону соответствуют очень маленькие ФЭ ($\leq 1\%$). Даже во время малых магнитных бурь ($Kp_{\text{мах}} = 5-...5+$) средний ФЭ $\leq 1.5\%$. Во время сильных магнитных бурь ($Kp_{\text{мах}} \geq 7-$) типичная величина ФЭ составляет 3% и больше. И только во время очень сильных магнитных бурь ($Kp_{\text{мах}} \geq 8$) типичная величина ФЭ становится очень большой (5% и больше).

На рис. 2 показано процентное распределение долей разных видов геомагнитных возмущений за период наблюдения 1957–2022 гг. Видно, что слабые возмущения составляют самую большую часть (31.6%), а доля сильных магнитных бурь с $Kp_{\text{мах}} \geq 7$ составляет всего 6.4% всех событий.

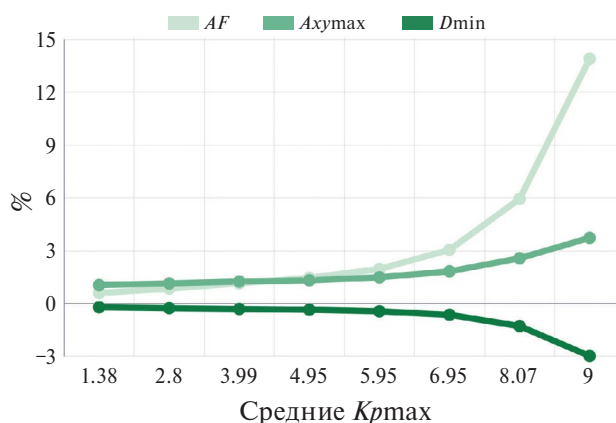


Рис. 1. Взаимосвязь средних значений параметров КЛ (AF, $A_{\text{хутах}}$ и $D_{\text{мин}}$) с Kp -индексом ГА.

Таблица 1. Параметры ГА и КЛ

Геомагнитная обстановка (Kp_{max})	Количество событий	Среднее значение			
		Kp_{max}	$AF, \%$	$A_{хu_{max}}, \%$	$D_{min}, \%$
Спокойная 0...2–	512 (6%)	1.38 ± 0.01	0.61 ± 0.02	1.05 ± 0.02	-0.23 ± 0.00
Слабовозмущенная 2...3+	2691 (31.6%)	2.80 ± 0.01	0.85 ± 0.01	1.13 ± 0.01	-0.27 ± 0.00
Возмущенная 4–...4+	2201 (25.8%)	3.99 ± 0.01	1.15 ± 0.02	1.23 ± 0.01	-0.32 ± 0.00
Малая магнитная буря 5–...5+	1694 (19.9%)	4.95 ± 0.01	1.45 ± 0.03	1.31 ± 0.01	-0.36 ± 0.00
Умеренная магнитная буря 6–...6+	876 (10.3%)	5.95 ± 0.01	1.96 ± 0.05	1.48 ± 0.02	-0.45 ± 0.01
Сильная магнитная буря 7–...7+	347 (4%)	6.95 ± 0.01	3.04 ± 0.12	1.81 ± 0.05	-0.65 ± 0.03
Очень сильная магнитная буря 8–...9–	186 (2.2%)	8.07 ± 0.03	5.93 ± 0.28	2.54 ± 0.09	-1.29 ± 0.07
Экстремальная магнитная буря 9	16 (0.2%)	9	13.89 ± 1.87	3.72 ± 0.59	-2.99 ± 0.49

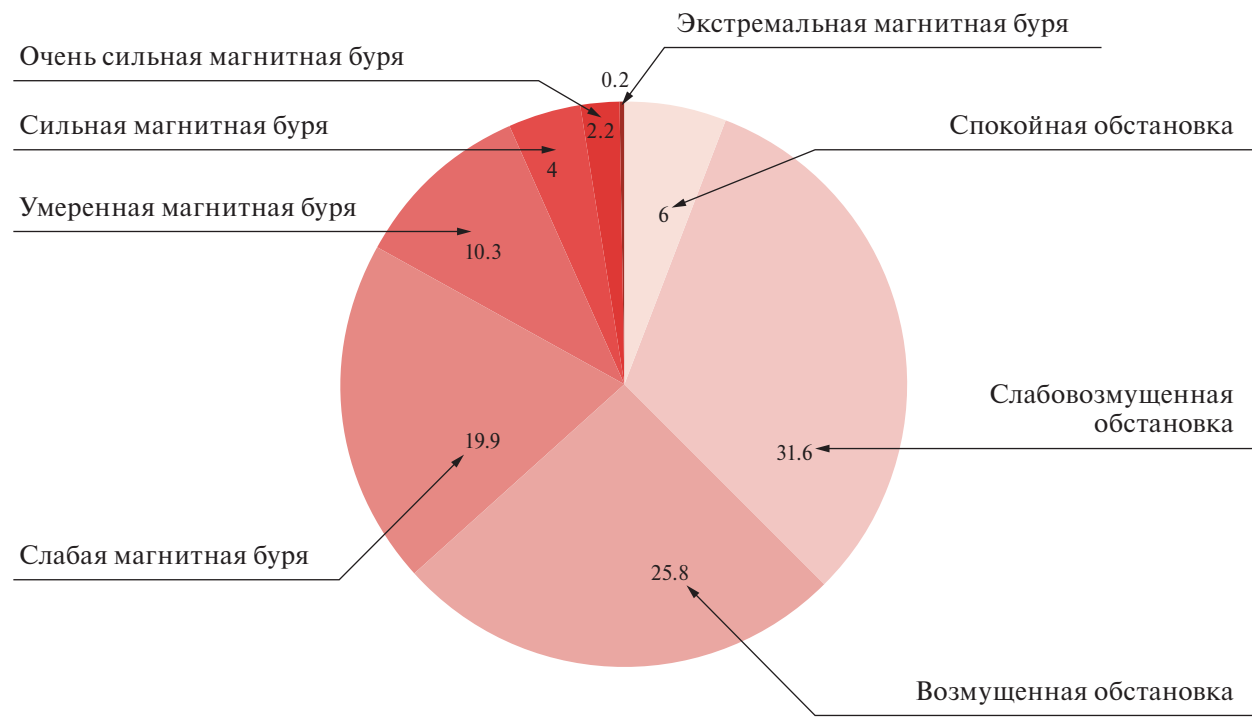


Рис. 2. Процентное распределение различных значений Kp -индекса за 1957–2022 гг.

При хорошем согласии между средними величинами в каждом отдельном случае соотношение изменения уровня ГА и вариаций КЛ может значительно различаться. Возмущение солнечного ветра, способное вызвать магнитную бурю, обязательно повлияет и на космические лучи. Поэтому каждой ГМБ соответствует ФЭ. Однако в наземных наблюдениях этот эффект иногда очень мал и почти не проявляется в изменениях плотности КЛ. Противоположная ситуация, т.е. ФЭ без ГМБ, — это еще более частое явление (чуть более 60% событий в нашей базе данных). Однако при увеличении амплитуды ФЭ эта доля быстро падает, например, Форбуш-эффекты величиной $>5\%$ без магнитной бури почти не встречаются, и в этих редких случаях (0.14%, 12 событий) геомагнитная активность все-таки заметно возрастает.

Приведем примеры событий вышеупомянутых видов. На рис. 3–5 на верхней панели показаны параметры СВ (левая ось: модуль межпланетного магнитного поля (ММП) ($|B|$, нТл) — кривая с круглыми маркерами; северо-южная компонента ММП (B_z , нТл) — кривая с квадратными маркерами; правая ось: скорость СВ (V , км/с) — кривая с ромбами). Средняя панель показывает вариации КЛ жесткостью 10 ГВ (левая ось: плотность потока КЛ (A_0 , %) — кривая с ромбами, северо-южная составляющая анизотропии КЛ (A_z , %) — вертикальные столбики на кривой A_0 ; правая ось: экваториальная составляющая анизотропии КЛ (A_{xy} , %) — столбики). На нижней панели приведены данные геомагнитных индексов: Dst (кривая с круглыми маркерами, правая ось) и Kp (столбики, левая ось). Вертикальной линией отмечено начало события (SSC — по ударной волне или *ons* — по резким изменениям в СВ и/или КЛ).

Пример события 26–28 июля 2004 г., когда был зарегистрирован и большой ФЭ (средняя панель, $AF = 14.4\%$, $D_{min} = -4.72\%$, $A_{x_{max}} = 2.6\%$, $A_{z_{range}} = 6.45\%$ — максимальная разность значений A_z в событии), и очень сильная ГМБ (нижняя панель, $Kp_{max} = 9$), показан на рис. 3.

Описываемое межпланетное возмущение связано с воздействием на околоземное космическое пространство коронального выброса массы, случившегося днем ранее, а затем высокоскоростного потока из южной корональной дыры, проходившей центральный солнечный меридиан 25–26 июля. Максимальная скорость в этом событии составила 1072 км/с, а модуль ММП — 26.1 нТл, B_z -компонента ММП длительное время была отрицательной, достигая значения -18 нТл.

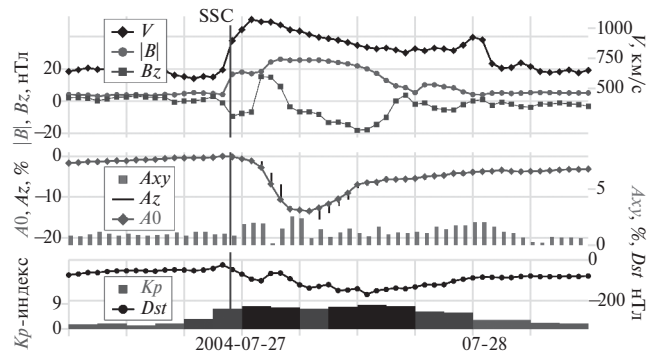


Рис. 3. Событие 26–28 июля 2004 г., в котором зарегистрирована очень сильная ГМБ ($Kp_{max} = 9$) и большой ФЭ (14.4%).

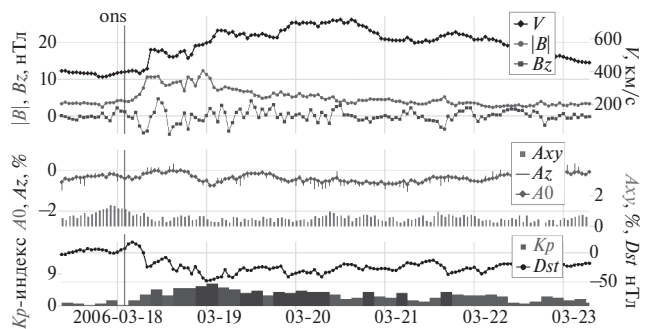


Рис. 4. Событие 18–22 марта 2006 г., в котором зарегистрирована умеренная ГМБ и ФЭ малой амплитуды (0.7 %).

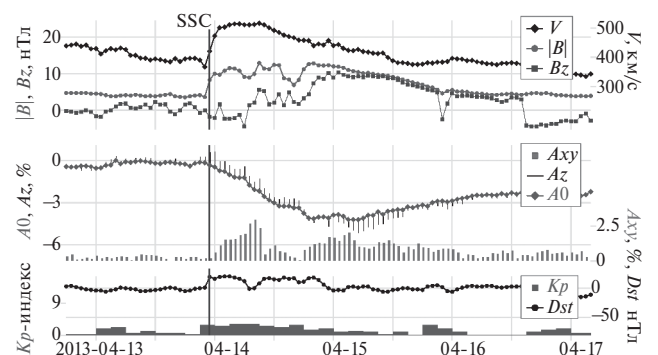


Рис. 5. Событие 13–16 апреля 2013 г., в котором не зарегистрирована ГМБ, но наблюдался большой ФЭ (4.4%).

Событие, изображенное на рис. 4, связано с длительным воздействием на Землю (18–22 марта 2006 г.) высокоскоростного потока из корональной дыры, проходившей центральный солнечный меридиан 16–17 марта 2006 г. Максимальная скорость СВ превысила 700 км/с, а значение модуля

ММП – 12 нТл. В результате 18–19 марта была зарегистрирована умеренная ГМБ ($Kp_{\max} = 6+$), но при этом ФЭ оказался мал ($AF = 0.7\%$, $D_{\min} = -0.3\%$, $A_{\text{ху}}_{\max} = 1.34\%$, $Az_{\text{range}} = 0.76\%$). Это не удивительно, поскольку ФЭ создается, в первую очередь, в области взаимодействия разноразмерных потоков СВ, а внутри самого потока из корональной дыры магнитные поля имеют регулярный характер и наблюдается, в основном, восстановление интенсивности потока КЛ. При этом геомагнитная обстановка менялась от возмущенной к слабовозмущенной, пока скорость СВ не опустилась до 500 км/с.

На рис. 5 приведен пример события 13–16 апреля 2013 г., когда наблюдался достаточно большой ФЭ ($AF = 4.4\%$, $D_{\min} = -0.57\%$, $A_{\text{ху}}_{\max} = 2.98\%$, $Az_{\text{range}} = 2.05\%$), но магнитная буря не была зарегистрирована (геомагнитная обстановка менялась от спокойной до слабовозмущенной, $Kp_{\max} = 3+$). Данное межпланетное возмущение было связано с корональным выбросом массы, произошедшим 11 апреля. Несмотря на то, что в этом событии наблюдался довольно резкий рост скорости СВ ($V_{\max} = 516$ км/с) и модуля ММП ($B_{\max} = 12.9$ нТл), B_z -компонента ММП была, в основном, положительной, что является очевидной причиной отсутствия значительных геомагнитных возмущений (более подробное обсуждение влияния B_z описано в разделе 3.2.).

Сравним, совпадают ли рекордные ГМБ с рекордными ФЭ. На рис. 6 приведена корреляция минимальных значений Dst -индекса и амплитуды ФЭ (AF) для событий с $Dst_{\min} < -200$ нТл. Таких событий всего 73 (из 8524). Коэффициент корреляции небольшой $cc = -0.35345$. Такие события (выделенные кружки), как 31 марта 2001 г.

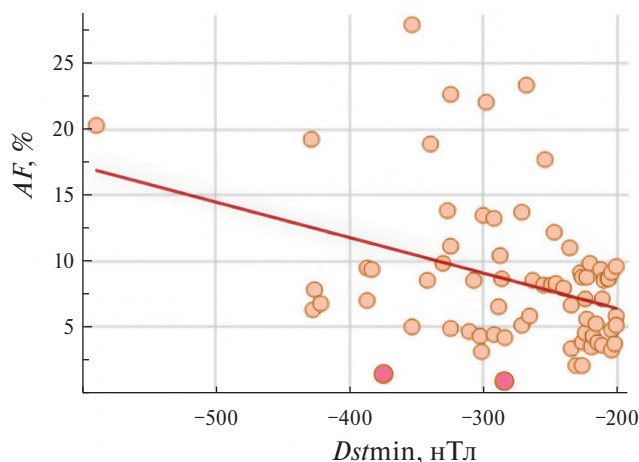


Рис. 6. Взаимосвязь рекордных ГМБ и ФЭ.

($Dst_{\min} = -269$ нТл и $AF = 0.81\%$) и 8 ноября 2004 г. ($Dst_{\min} = -374$ нТл и $AF = 1.26\%$), портят картину. Следует сделать вывод о том, что межпланетные возмущения, вызывающие самые большие геомагнитные возмущения, не всегда приводят к регистрации самых больших ФЭ.

Интересно отметить, что в последние десятилетия, в целом, стало меньше ГМБ и ФЭ. Для сравнения, в 2001–2022 гг. было зарегистрировано 98 больших бурь ($Kp_{\max} \geq 7-$), а за предыдущие 22 года (с 1979 по 2000 гг.) – 239 аналогичных бурь. Отметим, что связь между уровнем ГА и величиной ФЭ стала более тесной (коэффициент корреляции между Ap -индексом ГА и амплитудой ФЭ вырос с 0.62 до 0.71 в более поздний период), следовательно, условия их возникновения стали более схожими. Возникла новая нормальность. И если до 2001 г. средняя амплитуда ФЭ, соответствующего большой ГМБ, составляла $4.1 \pm 0.24\%$, то после 2001 г. большим следует считать ФЭ амплитудой $4.73 \pm 0.43\%$.

3.2. Влияние знака и величины B_z на параметры космических лучей и геомагнитной активности

Геомагнитная активность определяется воздействием солнечного ветра на магнитосферу Земли. Пока солнечный ветер остается спокойным, спокойно и магнитное поле Земли, и все индексы геомагнитной активности остаются на низком уровне [Dungey, 1961; Akasofu, 1981]. Величина скорости СВ и полного вектора индукции ММП являются важнейшими параметрами, характеризующими межпланетную возмущенность. В работах Belov et al. [2001], Belov [2009] и Абуни и др. [2012] показано, что произведение максимальных значений скорости СВ ($V_{\max}$) и индукции ММП ($B_{\max}$) является удачным индексом для оценки мощности межпланетных возмущений. При этом произведение $V_{\max}B_{\max}$ дополнительно нормируется на величины скорости и поля, соответствующие спокойному СВ ($V_0 = 400$ км/с и $B_0 = 5$ нТл), для того чтобы работать с безразмерными и достаточно небольшими величинами: $VmBm = V_{\max}B_{\max}/V_0B_0$. На рис. 7 приведены связи минимальных величин Dst -индекса ГА ($Dst_{\min}$) и амплитуды ФЭ (AF) с параметром $VmBm$ (6102 события, для которых имелись данные по полю и скорости).

Коэффициенты корреляции оказываются высокими как для геомагнитной активности, так и для модуляции КЛ и составляют -0.7 и 0.71 ± 0.01 соответственно.

Однако для геомагнитных возмущений еще важнее одна из составляющих полного векто-

ра ММП, а именно B_z -компонента, направленная вдоль магнитной оси Земли [Rostoker and Fälthammar, 1967; Kubicka et al., 2016; Kay and Gopalswamy, 2018 и ссылки в них].

На рис. 8 показана связь среднесуточных значений Dst -индекса ГА и плотности потока КЛ (A_0 , жесткостью 10 ГВ) с B_z -составляющей ММП за 1991–2022 гг. (11116 суток, содержащих ряд однородных данных по КЛ, нормированных к 2009 г.). Хорошо видно, что при отрицательных и положительных значениях B_z связи имеют разный характер, и экстремальные значения Dst -индекса наблюдаются именно при отрицательных B_z . Для значений плотности потока КЛ картина совершенно другая: знак B_z -компоненты ММП не является определяющим, распределение оказывается симметричным.

Таким образом, можно заключить, что знак B_z -составляющей ММП имеет ключевое значение для развития магнитной бури, но второстепенен для вариаций КЛ и почти не влияет на изменение плотности их потока.

3.3. Анализ связи параметров космических лучей и геомагнитной активности для событий с разным типом начала

Линейный регрессионный анализ, выполненный для 8524 событий (см. табл. 2), для связи величины ФЭ (AF) и максимального Ap -индекса ГА дал коэффициент корреляции 0.665, а для корреляции с минимальным Dst -индексом коэффициент составил -0.615 .

Это более высокие коэффициенты по сравнению с анализом 2059 событий за 15 лет (1977–1980,

1987–1997 гг. и другие отдельные периоды), приведенном в работе Белов и др. [2001], 0.54 и -0.47 соответственно. Это доказывает увеличение коэффициента корреляции для более длительного исследуемого периода.

При проведении регрессионного анализа было решено не приводить корреляции с Kp -индексом ГА по причине его логарифмической природы.

В табл. 2 также приведены коэффициенты корреляции и коэффициенты линейной регрессии для величин индексов ГА (Ap_{max} и Dst_{min}) и величин четырех характеристик КЛ (для частиц с жесткостью 10 ГВ): AF , D_{min} , $A_{x_{max}}$ и $A_{z_{range}}$ для трех групп событий (All – все события, SSC – входящие в группу All события с внезапным началом (1838 событий), $No\ SSC$ – входящие в группу All события без внезапного начала – 6686 событий). Самые высокие коэффициенты корреляции наблюдаются в группе событий с внезапным началом.

Похожие коэффициенты корреляции для пар Dst_{min}/AF , $Dst_{min}/A_{x_{max}}$, $Dst_{min}/A_{z_{range}}$ (0.68; 0.48 и 0.49 соответственно в группе с SSC ; 0.27; 0.27 и 0.3 соответственно в группе без SSC) были получены в работе Мелкумян и др. [2023] для значительно меньшего периода, с 1997 по 2021 гг., при условии ограничения выборки по величине B_z -компоненты ММП ($B_{z_{min}} < -5$ нТл).

На рис. 9–12 приведены изображения соответствующих регрессий. В каждой строке первая картинка – все события, вторая – из них события с SSC , третья – из них события без SSC .

На рис. 9 хорошо видно, что величины ФЭ в группе SSC значительно больше, чем в группе

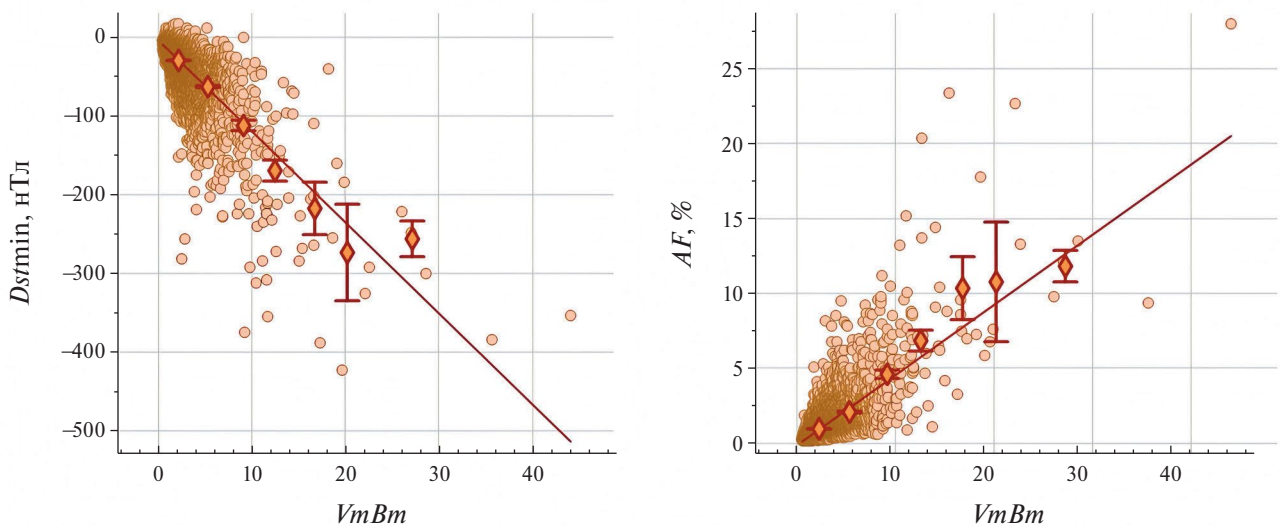


Рис. 7. Связь минимальных величин Dst -индекса ГА (Dst_{min}) и амплитуды ФЭ (AF) с параметром $VmBm$.

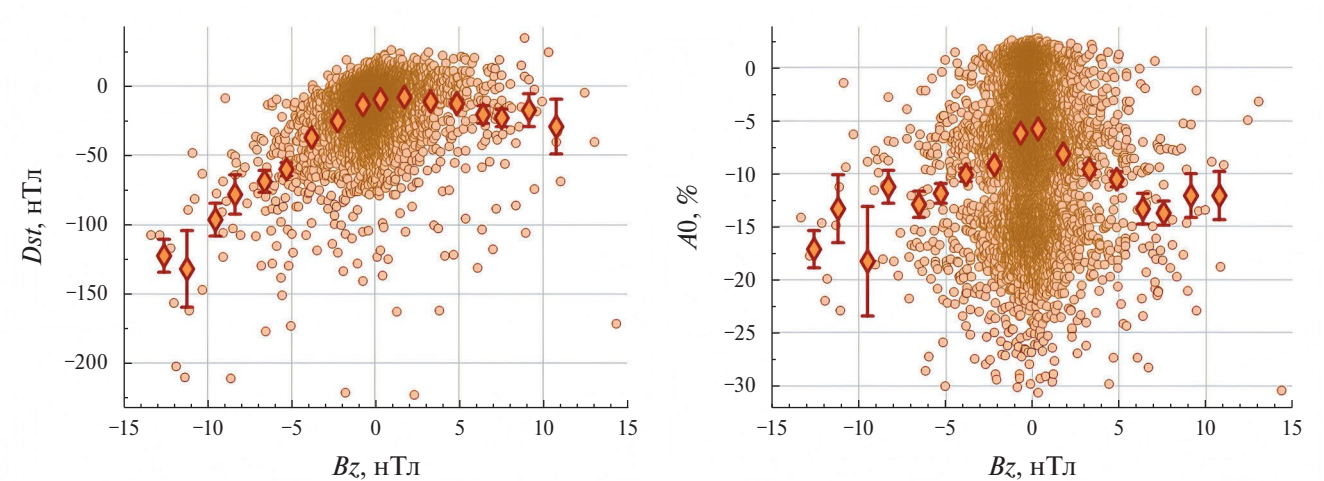


Рис. 8. Связь среднесуточных значений *Dst*-индекса ГА и плотности потока КЛ (*A0*) с *Bz*-составляющей ММП (ромбами показаны величины, усредненные по равным интервалам изменения значений *Bz*).

No SSC. Межпланетные возмущения группы *SSC* более эффективно модулируют КЛ и не менее эффективно возмущают магнитосферу Земли (рис. 9, панели *б* и *д*). Все кроме одной экстремальной бури ($A_{pmax} = 400$) также находятся в группе *SSC*. Очевидно преобладание *SSC*-группы и для других классов бурь. В то же время встречаются события,

когда исключительно большая буря соответствует скромному значению ФЭ (рис. 9*в*). Значит, межпланетные возмущения в группе *No SSC* достаточно эффективны в отношении ГА и менее эффективны в модуляции КЛ.
Коэффициенты линейной регрессии ниже для событий группы *No SSC*, о чем свидетельствует

Таблица 2. Коэффициенты корреляции и коэффициенты линейной регрессии для различных параметров ГА и КЛ

Параметры	Коэффициент корреляции			Коэффициент линейной регрессии		
	<i>All</i>	<i>SSC</i>	<i>No SSC</i>	<i>All</i>	<i>SSC</i>	<i>No SSC</i>
A_{pmax}/AF	0.665 ± 0.006	0.67 ± 0.01	0.45 ± 0.01	0.0236 ± 0.0003	0.0266 ± 0.0008	0.012 ± 0.0003
$Dstmin/AF$	-0.614 ± 0.007	-0.63 ± 0.01	-0.42 ± 0.01	-0.0244 ± 0.0003	-0.028 ± 0.001	-0.0117 ± 0.0003
$A_{pmax}/Dmin$	-0.586 ± 0.007	-0.61 ± 0.02	-0.32 ± 0.01	-0.00450 ± 0.00007	-0.0054 ± 0.0002	-0.0020 ± 0.0001
$Dstmin/Dmin$	0.511 ± 0.008	0.53 ± 0.02	0.27 ± 0.01	0.00439 ± 0.00008	0.0053 ± 0.0002	0.0018 ± 0.0001
A_{pmax}/A_{xymax}	0.444 ± 0.009	0.46 ± 0.02	0.21 ± 0.01	0.0064 ± 0.0001	0.0062 ± 0.0003	0.0036 ± 0.0002
$Dstmin/A_{xymax}$	-0.419 ± 0.009	-0.43 ± 0.02	-0.23 ± 0.01	-0.0067 ± 0.0002	-0.0063 ± 0.0003	-0.004 ± 0.0002
A_{pmax}/A_{zrange}	0.482 ± 0.009	0.49 ± 0.02	0.32 ± 0.01	0.009 ± 0.0002	0.0078 ± 0.0003	0.0079 ± 0.0003
$Dstmin/A_{zrange}$	-0.473 ± 0.008	-0.49 ± 0.02	-0.33 ± 0.01	-0.0099 ± 0.0002	-0.0088 ± 0.0004	-0.0084 ± 0.0003

и меньший наклон регрессионных прямых на рис. 9, это также подтверждает меньшую геоэффективность этих событий.

Анализ рис. 10 и данных табл. 2 позволяет сделать аналогичные выводы о связи величины

максимального часового понижения плотности КЛ (D_{min}) с индексами ГА. В событиях группы SSC изменения плотности КЛ более резкие и соответствуют большим экстремальным значениям индексов A_p и Dst . Наклон регрессионных пря-

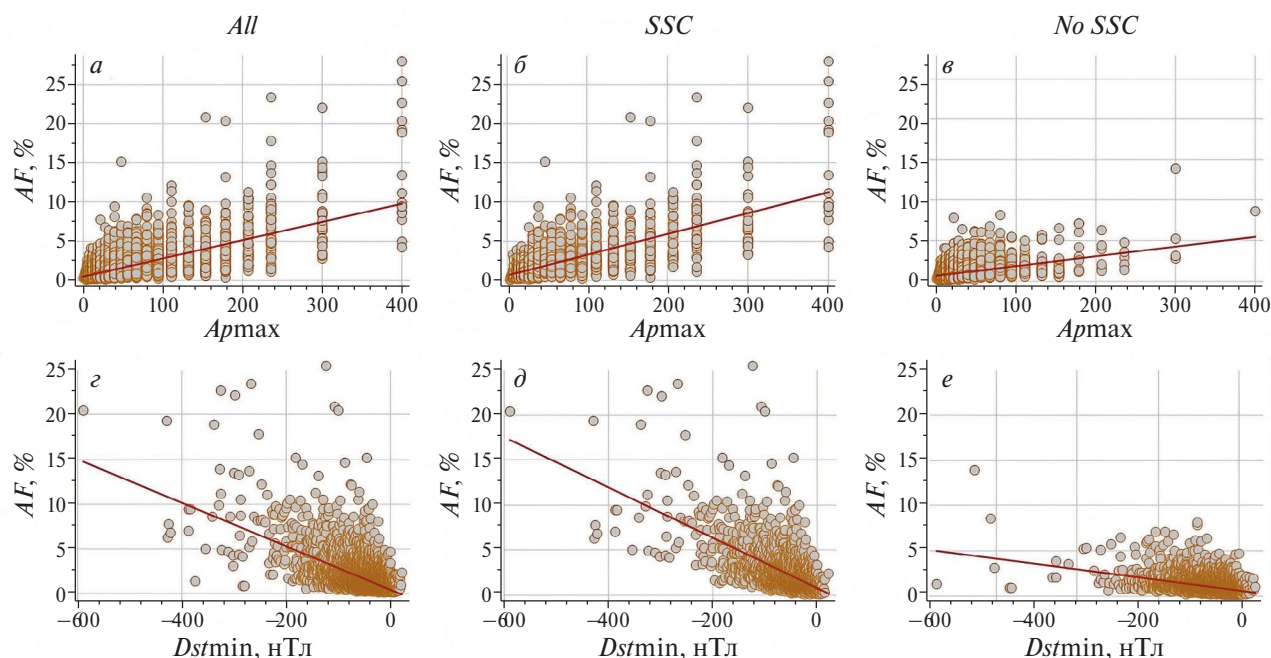


Рис. 9. Взаимосвязь амплитуды ФЭ (AF) с индексами ГА (A_{pmax} , $Dstmin$) для выделенных групп.

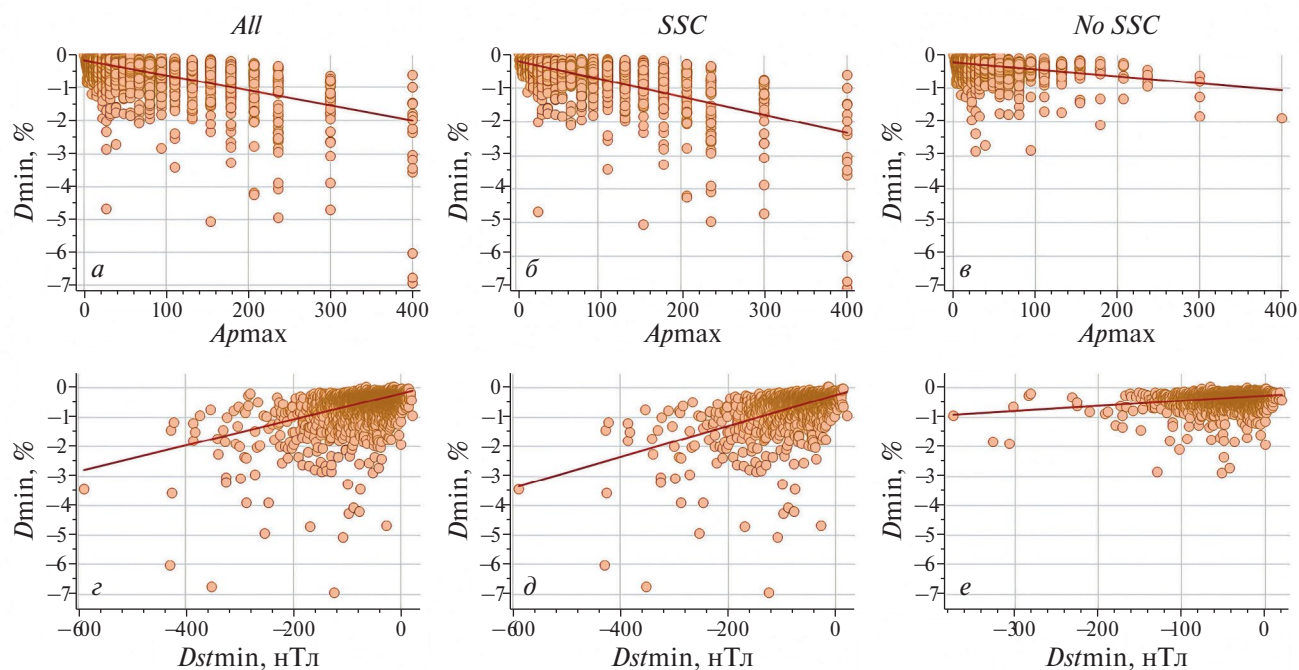


Рис. 10. Взаимосвязь величины максимального часового понижения плотности КЛ (D_{min}) с индексами ГА (A_{pmax} , $Dstmin$) для выделенных групп.

мых в группе *No SSC* также значительно меньше, чем для событий группы *SSC*.

На рис. 11 и рис. 12 видим похожую на рис. 9 ситуацию, так как анизотропия КЛ сильно свя-

зана с изменениями изотропной части потока КЛ и амплитудой ФЭ. Отметим, что на рис. 9д, 10д, 11д, 12д сильно выпадает точка со значением $Dst_{min} = -589$ нТл — это знаменитое Квебекское

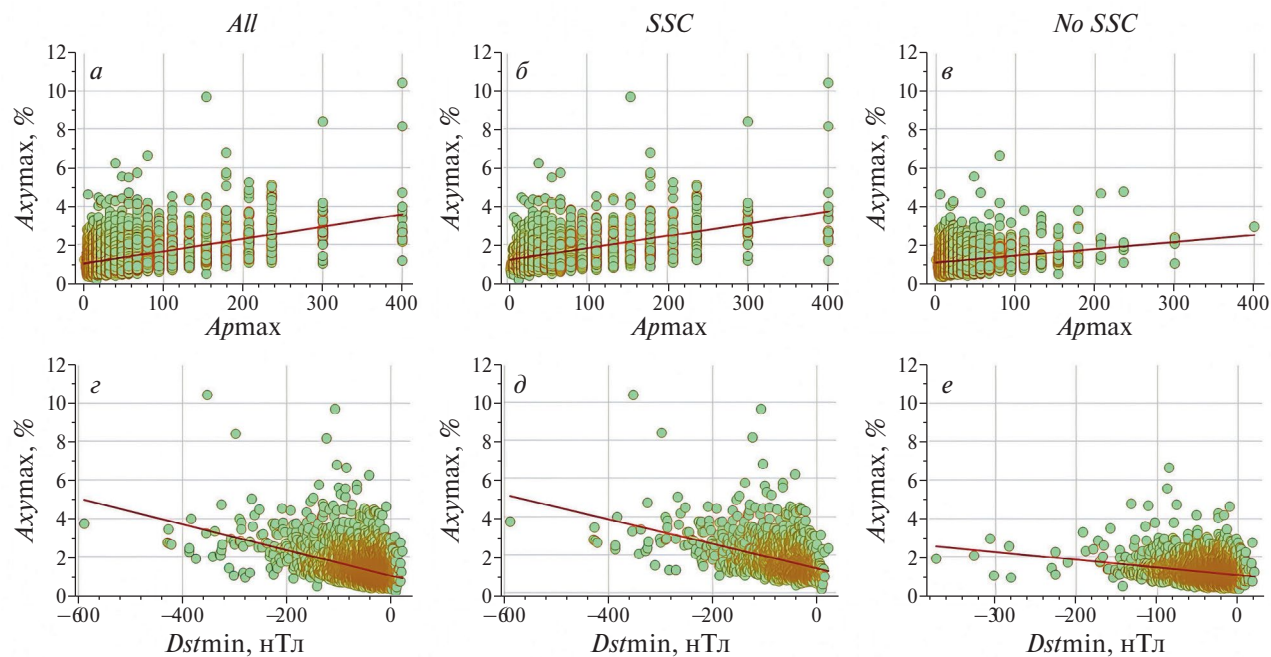


Рис. 11. Взаимосвязь величины экваториальной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{xmax}) с индексами ГА (A_{pmax} , $Dstmin$) для выделенных групп.

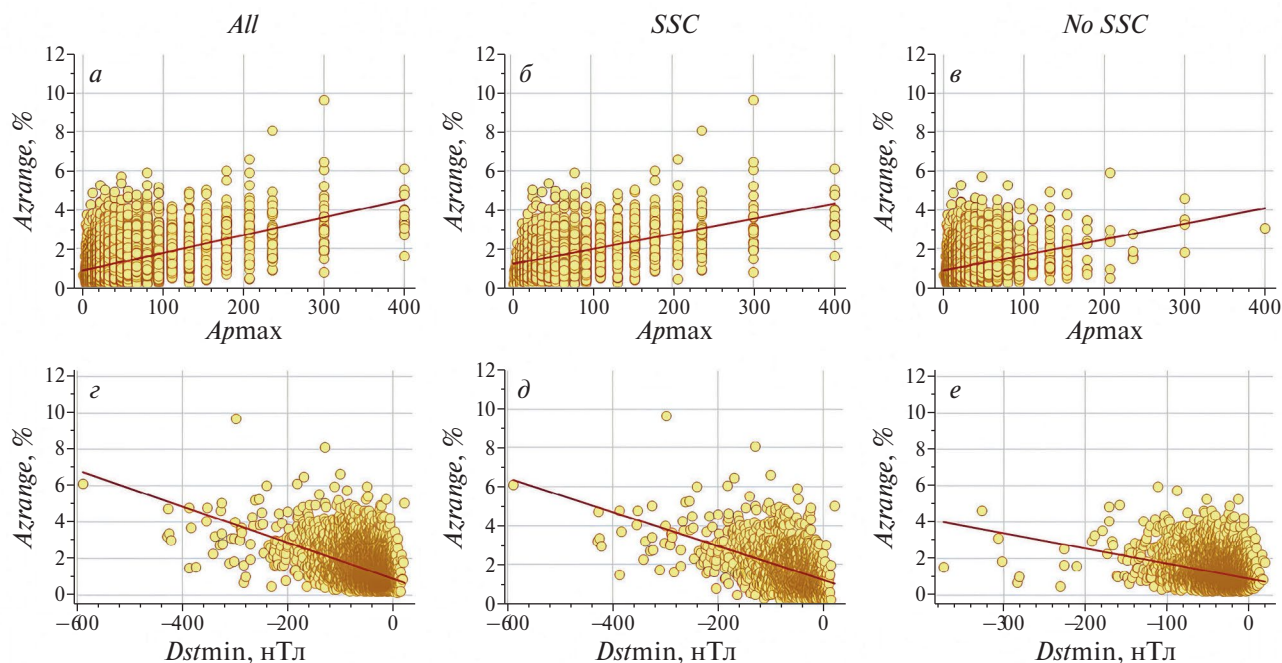


Рис. 12. Взаимосвязь величины северо-южной составляющей векторной анизотропии КЛ (A_{zrange}) с индексами ГА (A_{pmax} , $Dstmin$) для выделенных групп.

событие, отключившее электростанции на севере Канады на 9 часов и показавшее полярное сияние жителям Мексики. Тогда была зарегистрирована экстремальная магнитная буря, третья по величине за время современных наблюдений с 1932 г. Амплитуда ФЭ в этом событии также получилась очень большой $AF = 20\%$, но не рекордной.

Однако следует отметить, что северо-южная составляющая векторной анизотропии КЛ (*Azrange*, рис. 12) менее других параметров подвержена изменениям при делении на группы *SSC* и *No SSC*: величины коэффициентов линейной регрессии практически одинаковы. Выявленная особенность требует дополнительного исследования.

4. ВЫВОДЫ

1. Бури в солнечном ветре, магнитосфере Земли и космических лучах тесно связаны. Между средними характеристиками межпланетных и геомагнитных возмущений и вариациями КЛ можно найти количественную связь и использовать ее в диагностике проявлений солнечной активности.

2. Нарушение связи между параметрами ФЭ и ГА (рис. 1) чаще всего говорит о величине и модуле B_z -компоненты ММП (рис. 8). Знак B_z -составляющей ММП имеет ключевое значение для развития магнитной бури, но второстепенен для вариаций КЛ и почти не влияет на их плотность. Кроме того, ФЭ определяется условиями в протяженной гелиосферной области, тогда как геомагнитная активность зависит от локальной ситуации вблизи Земли. Возмущение солнечного ветра, способное вызвать магнитную бурю, не может не повлиять на КЛ. Каждой ГМБ соответствует хотя бы небольшое понижение плотности КЛ (на 1–2%), тогда как ФЭ без магнитной бури – довольно частое явление.

3. Взаимосвязь между характеристиками КЛ и ГА разумно использовать для классификации Форбуш-эффектов. Классификация магнитных бурь, отраженная в табл.1, практически общепринята (NOAA Space Weather Scales, <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>). Градацию Форбуш-эффектов можно согласовать с градацией магнитных бурь так, чтобы сходно называемые явления и наблюдались бы с приблизительно одинаковой частотой. Проанализировав частоту появления Форбуш-эффектов и магнитных бурь за один и тот же 65-летний период, мы пришли к следующим выводам. Частоте регистрации малых и умеренных ГМБ соответствуют ФЭ величиной $AF > 2\%$ (в вариациях плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ). Аналогично, частоте сильных ГМБ соответствует довольно большой ФЭ

величиной $AF > 3\%$, а очень большие ФЭ ($AF > 5\%$) наблюдаются так же редко, как очень сильные ГМБ.

Авторы наметили себе такие направления для дальнейших исследований связи параметров ФЭ и ГА, как:

– сравнение различных исторических периодов;

– выяснение связей ФЭ и ГА с характеристиками СВ (например, скоростью, индексом Акасофу).

4. Установленную взаимосвязь между ГМБ и ФЭ можно использовать в будущем для моделирования величины ФЭ за почти столетний период с 1830-х по 1950-е годы, когда наука (гелиогеофизика) уже собирала данные о ГМБ, но еще не научилась регистрировать величину потоков КЛ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Дополнительное финансирование на проведение данного исследования не привлекалось, работа проводилась в рамках госзадания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: (http://cr01.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf); благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абуни А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и аэронаомия. Т. 52. № 3. С. 313–320. 2012.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Струминский А.Б., Янке В.Г. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 65. № 3. С. 373–376. 2001.
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке Г.В., Оленева В.А., Абунина М.А., Абуни А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэронаомия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Зверев А.С., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А. Мониторинг параметров анизотропии космических лучей в реальном времени и краткосрочный прогноз геомагнитных возмущений // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 4. С. 42–45. 2020. <https://doi.org/10.12737/szf-64202005>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абуни А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения и геомагнитные возмущения: 1. События,

- связанные с разными типами солнечных и межпланетных источников // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 6. С. 699–714. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600503>
- Мелкумян А.А., Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абунин А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-понижения и геомагнитные возмущения: 2. Сравнение солнечных циклов 23–24 и событий с внезапными и постепенным началом // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 1. С. 39–54. 2024. <https://doi.org/10.31857/S0016794024010057>
- 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>
- Alhassan J.A., Okike O., Chukwude A.E. Testing the effect of solar wind parameters and geomagnetic storm indices on Galactic cosmic ray flux variation with automatically-selected Forbush decreases // Res. Astron. Astrophys. V. 21. № 9. ID 234. 2021. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/9/234>
- Aslam O.P.M., Badruddin Study of the geoeffectiveness and galactic cosmic-ray response of VarSITI-ISEST campaign events in solar cycle 24 // Solar Phys. V. 292. № 9. ID 135. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11207-017-1160-x>
- Baisultanova L.M., Belov A.V., Yanke V.G. Magnetospheric effect of cosmic rays within the different phases of magnetic storms / Proc. ICRC 24th, August 28 – September 8, 1995, Rome, Italy. V. 4. P. 1090–1093. 1995.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. V. 27. № 3. P. 625–630. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00095-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00095-3)
- Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Yanke V., Pchelkin V., Plainaki C., Mariatos G. Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // J. Geophys. Res. — Space. V. 110. № 9. ID A09S20. 2005. <https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena / Proc. IAU Symposium. V. 257. P. 439–450. 2009. <https://doi.org/10.1017/S1743921309029676>
- Cane H.V., Richardson I.G., von Rosenvinge T.T. Cosmic ray decreases: 1964–1994 // J. Geophys. Res. — Space. V. 101. № 10. P. 21561–21572. 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA01964>
- Debrunner H., Flueckiger E., von Mandach H., Arens M. Determination of the ring current radii from cosmic ray neutron monitor data for the 17 December 1971 magnetic storm // Planet. Space Sci. V. 27. № 5. P. 577–581. 1979. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(79\)90155-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(79)90155-7)
- Dorman L.I. Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics. Eds. J.G. Wilson and S.A. Wouthuysen. New York: Elsevier. 1963.
- Dorman L.I. Space weather and dangerous phenomena on the Earth: principles of great geomagnetic storms forecasting by online cosmic ray data // Ann. Geophys. V. 23. № 9. P. 2997–3002. 2005. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-2997-2005>
- Dvornikov V., Sdobnov V. Variation in the rigidity spectrum and anisotropy of cosmic rays at the period of Forbush effect on 12–15 July 1982 // Int. J. Geomag. Aeron. V. 3. № 3. P. 217–228. 2002.
- Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones // Phys. Rev. Lett. V. 6. № 2. P. 47–48. 1961. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.47>
- Forbush S.E. On world-wide changes in cosmic-ray intensity // Phys. Rev. V. 54. № 12. P. 975–988. 1937. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.54.975>
- Forbush S.E. On cosmic-ray effects associated with magnetic storms // Terr. Mag. V. 43. № 3. P. 203–218. 1938. <https://doi.org/10.1029/TE043i003p00203>
- Forbush S.E. World-wide cosmic-ray variations, 1937–1952 // J. Geophys. Res. V. 59. № 4. P. 525–542. 1954. <https://doi.org/10.1029/JZ059i004p00525>
- Kane R. Severe geomagnetic storms and Forbush decreases: interplanetary relationships reexamined // Ann. Geophys. V. 28. № 2. P. 479–489. 2010. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-479-2010>
- Kay C., Gopalswamy N. The effects of uncertainty in initial CME input parameters on deflection, rotation, Bz, and arrival time predictions // J. Geophys. Res. — Space. V. 123. № 9. P. 7220–7240. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JA025780>
- Kharayat H., Prasad L., Mathpal R., Garia S., Bhatt B. Study of cosmic ray intensity in relation to the interplanetary magnetic field and geomagnetic storms for Solar Cycle 23 // Solar Phys. V. 291. № 2. P. 603–611. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0852-y>
- Kubicka M., Möstl C., Amerstorfer T., Boakes P.D., Feng L., Eastwood J.P., Törmänen O. Prediction of geomagnetic storm strength from inner heliospheric in situ observations // Astrophys. J. V. 833. № 2. ID 255. 2016. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/255>
- Kudela K., Storini M., Hofer M.Y., Belov A. Cosmic rays in relation to space weather // Space Sci. Rev. V. 93. № 1–2. P. 153–174. 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026540327564>
- Kudela K., Storini M. Cosmic ray variability and geomagnetic activity: A statistical study // J. Atmos. Sol.-Terr. Phy. V. 67. № 10. P. 907–912. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.02.018>
- Lingri D., Mavromichalaki H., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Abunin A., Abunina M. Solar activity parameters and associated Forbush Decreases during the minimum between Cycles 23 and 24 and the ascending phase of Cycle 24 // Solar Phys. V. 291. № 3. P. 1025–1041. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0863-8>
- Lockwood J.A. List of Forbush decreases 1954–1990 // Solar Geophys. Data. V. 549. P. 154–163. 1990.
- Mishra R.K., Sihwal A., Baral R., Adhikari B., Braga C.R., Gautam S.P., Das P.K., Migoya-Orue Y. Wavelet analysis of Forbush Decreases at high-latitude stations during geomagnetic disturbances // Solar Phys. V. 297. № 2. ID 26. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-01948-z>
- Munakata K., Bieber J.W., Yasue S., Kato C., Koyama M., Akahane S., Fujimoto K., Fujii Z., Humble J.E., Duldig M.L.

- Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 105. № 12. P. 27457–27468. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000JA000064>
- Papailiou M., Abunina M., Mavromichalaki H., Belov A., Abunin A., Eroshenko E., Yanke V. Precursory signs of large Forbush Decreases // *Solar Phys.* V. 296. № 6. ID 100. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11207-021-01844-y>
- Parnahaj I., Kudela K., Kancirova M., Pastircak B. On cosmic ray decreases, geomagnetic storms and CMEs / *Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil, 2–9 July 2013*. P. 3583–3586. 2013.
- Parnahaj I., Kudela K. Forbush decreases at a middle latitude neutron monitor: relations to geomagnetic activity and to interplanetary plasma structures // *Astrophys. Space Sci.* V. 359. № 1. ID 35. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10509-015-2484-3>
- Rostoker G., Fälthammar C.-G. Relationship between changes in the interplanetary magnetic field and variations in the magnetic field at the Earth's surface // *J. Geophys. Res.* V. 72. № 23. P. 5853–5863. 1967. <https://doi.org/10.1029/JZ072i023p05853>
- Vennerstrom S., Lefevre L., Dumbović M., Crosby N., Malandraki O., Patsou I., Clette F., Veronig A., Vršnak B., Leer K., Moretto T. Extreme Geomagnetic Storms – 1868–2010 // *Solar Phys.* V. 291. № 5. P. 1447–1481. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0897-y>
- Ye Z.-H., Lu X.-T., Zong Q.-G. The variation of galactic cosmic ray intensity and the Kp category of magnetic disturbance / *Proc. 20th ICRC*. V. 4. P. 59–62. 1987.
- Ye Q., Wang C., He F., Xue B., Zhang X. The frequency-domain characterization of Cosmic Ray Intensity variations before Forbush decreases associated with geomagnetic storms // *Space Weather*. V. 20. № 3. ID e2021SW002863. 2022. <https://doi.org/10.1029/2021SW002863>
- Yoshida S., Akasofu S.-I. The development of the Forbush decrease and the geomagnetic storm fields // *Planet. Space Sci.* V. 14. № 10. P. 979–986. 1966. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(66\)90134-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(66)90134-6)

Forbush Decreases and Geomagnetic Storms

A. V. Belov¹, E. A. Belova¹, N. S. Shlyk^{1,*}, M. A. Abunina¹, A. A. Abunin¹, S. M. Belov¹

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Forbush decreases in galactic cosmic rays (according to data from a network of neutron monitors) and accompanying geomagnetic disturbances over a long period from 1957 to 2022 have been identified and studied. Statistical relationships between various parameters of cosmic ray flux and geomagnetic activity indices are analyzed. It has been established that the magnitude of Forbush decreases depends nonlinearly on the class of geomagnetic storm. A moderate correlation is found between the extreme values of various geomagnetic activity indices (*Ap*, *Kp*, *Dst*) and the characteristics of cosmic rays. It is also shown that the simultaneous registration of extreme values of cosmic rays and geomagnetic activity parameters does not always occur but depends on the sign of the *Bz*-component of the interplanetary magnetic field in a particular event.

УДК 550.338.1

ИОНОСФЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ВЫСЫПАНИЙ ДНЕВНОГО ПОЛЯРНОГО КАСПА ПРИ СЕВЕРНОМ ММП

© 2024 г. В. Г. Воробьев^{1, *}, О. И. Ягодкина^{1, **}, Е. Е. Антонова^{2, 3, ***}

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

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина
Московского государственного университета

им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: vorobjev@pgia.ru

**e-mail: oksana41@mail.ru

***e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 28.11.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Исследованы геофизические процессы в области дневного полярного каспа 22 декабря 2003 г. при северной ориентации межпланетного магнитного поля (ММП), сравнительно высокой скорости и небольшой плотности солнечного ветра с использованием наземных оптических наблюдений на арх. Шпицберген и данных спутника DMSP F16. Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений показывает, что мягкие электронные высыпания в области каспа определяют область аврорального свечения в эмиссии (OI) 630.0 нм. Особенность рассмотренного события состоит в наблюдении яркой лучистой дуги сияния, окаймляющей дневной касп с его полярного края. Проведен анализ результатов наблюдений низколетящего спутника DMSP F16 при пересечении лучистой дуги. Предложены объяснения наблюдаемых явлений, основанные на анализе изменений спектров высыпающихся электронов и формировании продольного пучка электронов продольным электрическим полем.

DOI: 10.31857/S0016794024030028, EDN: SNAKTK

1. ВВЕДЕНИЕ

Дневные полярные каспы как области, через которые плазма солнечного ветра и переходного слоя может проникать на высоты ионосферы, были обнаружены в исследованиях [Heikkila and Winningham, 1971; Frank, 1971]. В течение прошедших десятилетий были проведены многочисленные исследования положения каспа и его характеристик с использованием наблюдений как низковысотных спутников с полярной орбитой [Newell and Meng 1988; Newell et al., 1989; Newell and Meng, 1994], так и спутников на средних и больших высотах вплоть до магнитопаузы [Zhou et al., 2000; Lavraud et al., 2004; Pitout and Bogdanova, 2021].

Наличие одновременно нескольких низковысотных спутников серии DMSP и сравнительно короткий период их обращения вокруг Земли

способствовали частым пересечениям области дневных высыпаний. Это позволило уже к началу 90-х годов прошлого столетия статистическим путем определить основные крупномасштабные характеристики полярного каспа. Спутники DMSP с орбитами, ориентированными примерно в направлении на Солнце, пересекают область каспа в течение 1–2 мин, показывая почти “мгновенные” характеристики высыпающихся частиц. Спутники с более высокими орбитами, такие, как например Polar и Cluster, медленно перемещаясь в пространстве, могут находиться в области каспа существенно более длительное время. Это в различных условиях позволяет исследовать как пространственные, при изменении положения самого каспа, так и временные характеристики геофизических процессов в этой области. Тем не менее, многие процессы формирования плазменной

воронки каспа и его границ исследованы пока ещё сравнительно плохо [Воробьев и др., 2023].

Наблюдения указывают на сильную изменчивость каспа, его характеристики быстро меняются вслед за изменением параметров внешнего воздействия [Pitout and Bogdanova, 2021]. Солнечный ветер обладает высоким уровнем турбулентных флуктуаций со сложными нелинейными связями флуктуирующих параметров. Разумно предположить, что среднестатистические характеристики каспа в естественных условиях наблюдаются крайне редко. В грубом приближении, в каждый текущий момент времени характеристики каспа определяются сложной комбинацией параметров плазмы солнечного ветра и ММП и временем, прошедшим после установления такой комбинации параметров. В этой связи особую значимость приобретают исследования характеристик каспа в режиме отдельных пролетов, отдельных его регистраций, когда характеристики каспальных популяций определяются уникальной комбинацией параметров внешнего воздействия. Особый интерес представляют пограничные области каспов там, где диамагнитная область каспа переходит в низкоширотный пограничный слой (LLBL) на экваториальной кромке каспа и в плазменную мантию (MP) на его полярной кромке. Процессы в этих областях в настоящее время почти не исследованы.

Хорошо известно, что после изменения ориентации ММП с южной на северную происходит перестройка магнитной конфигурации магнитосферы, бифуркация плазменного слоя и заполнение магнитосферной плазмой долей хвоста. Такая трансформация магнитосферной топологии приводит к высыпаниям частиц и появлению дуг сияния в полярной шапке, включая формирование тета-авроры (см. обзоры [Hosokawa et al., 2020; Fear, 2021]). Недавние исследования показали, что при северном ММП в долях хвоста наблюдаются анизотропные питч-угловые распределения частиц, характерные для внутренней магнитосферы (см. [Milan et al., 2023] и ссылки в этой работе), что делает возможным для описания продольных токов при ММП $B_z > 0$ использование подходов, применяемых ранее для описания токов зон 1 и 2 (см. ссылки в работе [Kirpichev et al., 2023]). Но пока не удалось выяснить, как влияют процессы в каспах и на их полярных границах на формирование системы продольных токов при северном ММП.

В настоящей работе проведено исследование каспа при пролете спутника DMSP F16 над арх. Шпицберген при северной ориентации межпланетного магнитного поля. Целью работы является изучение особенностей высыпания частиц

в дневном секторе и сопоставление параметров высыпаний с одновременными оптическими наблюдениями полярных сияний, выполненными на обсерватории Баренцбург. Особенностью рассмотренного события является существование в полуденном секторе при ММП $B_z > 0$ довольно яркой лучистой дуги сияний, окаймляющей с приполюсной стороны высыпания полярного каспа.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Данные спутника DMSP F16 и одновременные оптические наблюдения в обсерватории Баренцбург (арх. Шпицберген) 22 декабря 2003 г. использованы для изучения характеристик авроральных высыпаний и полярных сияний в полуденном секторе. Исправленные геомагнитные координаты обсерватории Баренцбург: $\Phi' = 75.2^\circ$, $MLT = UT + 2.6$. Схема наблюдений в географической системе координат показана на рис. 1. Отличительной чертой рассматриваемого периода является наличие яркой лучистой дуги сияния (RA), примерное положение которой в поле зрения камеры всего неба показано на рис. 1 линией со штрихами.

Рис. 1 иллюстрирует положение RA в 09:01:50 UT, что примерно соответствует времени пролета спутника F16 над лучистой дугой сияний. Траектория спутника F16 показана сплошной линией со стрелочкой, которая указывает направление полета. Данные спутника F16 взяты на страницах (<http://sd-www.jhuapl.edu>). Спутник имел почти круговую полярную орбиту с высотой ~ 835 км и периодом обращения ~ 101 мин. Каждую секунду

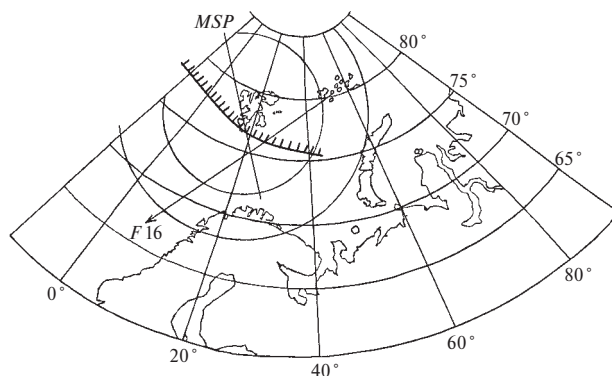


Рис. 1. Схема наблюдений 22 декабря 2003 г. в географической системе координат. Линия со штрихами – лучистая дуга сияния. Сплошная линия со стрелочкой – траектория спутника F16; кругами ограничено поле зрения камеры всего неба на высотах 150 км и 240 км; сплошная линия (MSP) – меридиан регистрации свечения меридиональным сканирующим фотометром.

ду спутник регистрировал спектр высыпавшихся частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 19-и каналах, распределенных по энергиям в логарифмической последовательности.

Кругами на рис. 1 ограничено поле зрения камеры всего неба (угол зрения 160°) на высотах 150 км (высота свечения эмиссии 557.7 нм) и 240 км (для эмиссии 630.0 нм). Камера производила непрерывную цифровую регистрацию свечения небосвода в интегральном свете с экспозицией 5 секунд. Сплошной линией, обозначенной MSP, показан геомагнитный меридиан обсерватории, вдоль которого производилась регистрация свечения основных авроральных эмиссий (427.8 нм, 557.7 нм и 630.0 нм) меридиональным сканирующим фотометром (MSP). К сожалению, в рассматриваемый период времени MSP работал не в полном режиме и производил сканирование небосвода длительностью 10 с каждые 2 мин.

На рис. 2 показаны вариации параметров межпланетной среды и уровня магнитной активности в авроральной зоне в коротком интервале време-

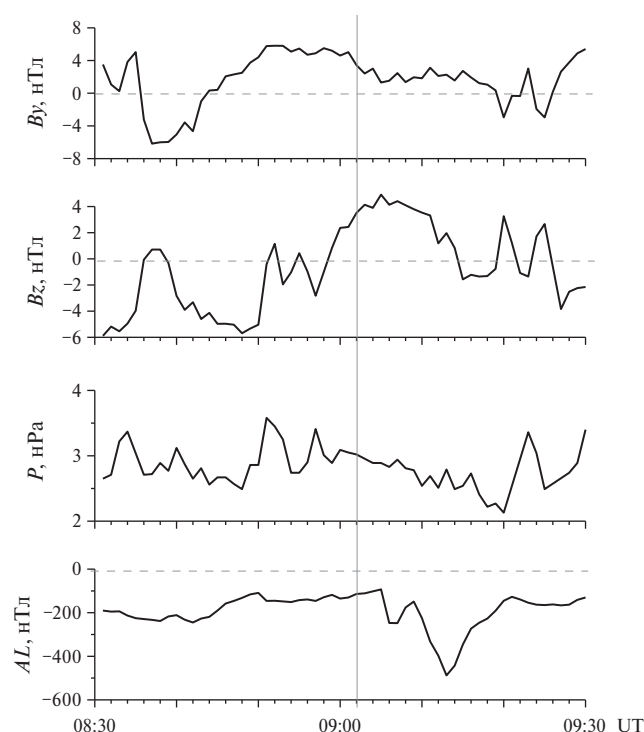


Рис. 2. Вариации параметров межпланетной среды и AL -индекса магнитной активности в интервале 08:30 – 09:30 UT. Сверху вниз показаны: B_y - и B_z -компоненты ММП, динамическое давление солнечного ветра (P , нПа), вариации AL -индекса. Сплошная вертикальная линия – время пересечения спутником области авроральных высыпаний.

ни 08:30 – 09:30 UT, включающем в себя пролет спутника F16. Время пересечения спутником области авроральных высыпаний в дневном секторе отмечено сплошной вертикальной линией. Сверху вниз на рис. 2 показаны B_y - и B_z -компоненты ММП, динамическое давление солнечного ветра (P , нПа) и вариации AL -индекса магнитной активности. Данные по межпланетной среде, приведённые из точки либрации L_1 магнитосфере Земли, взяты на портале OMNI Web (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). Как видно из рисунка, B_y - и B_z -компоненты ММП во время пролета спутника были положительными величиной ~ 3 нТл, скорость, плотность и динамическое давление солнечного ветра менялись незначительно: $V \sim 820$ км/с, $N \sim 4$ см $^{-3}$, $P \sim 3.0$ нПа. Уровень магнитной активности в полуденном секторе авроральной зоны был низким, $AL > -200$ нТл.

3. АНАЛИЗ НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Снимки камеры всего неба, представленные на рис. 3, иллюстрируют положение и динамику дискретных форм дневных сияний. Цифрами в верхней части каждого кадра указано мировое время регистрации сияний. Геомагнитный север находится в верхней части кадра, восток – слева на кадре. Снимок в центральной части верхней панели рисунка в 09:01:50 UT показывает дугу сияний при пролете над ней спутника F16.

В магнито спокойные периоды сияния полушарного сектора обычно характеризуются как слабые лучистые дуги и отдельные лучи, располагающиеся на широтах около 78° исправленной геомагнитной широты (CGL) [Фельдштейн и др., 1966]. Таким образом, довольно яркие лучистые формы сияний, наблюдаемые, как показывает рис. 3, на широтах около 74° CGL, не являются типичными для спокойного периода. Такое явление можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, достаточно большая отрицательная B_z -компонента ММП была зарегистрирована примерно за 12 мин до пролета спутника, что могло привести к уменьшению широты сияний. Во-вторых, наблюдения проводились в период небольшого, но достаточно длительного глобального магнитного возмущения, которое началось 20 декабря. Величина индекса SYM/H в максимуме возмущения составляла -35 нТл. Большие скорости и низкая плотность плазмы солнечного ветра позволяют предположить, что источником возмущения являлась корональная дыра. В период пролета спутника величина SYM/H составляла примерно -25 нТл. Умеренно развитый кольцевой ток, как

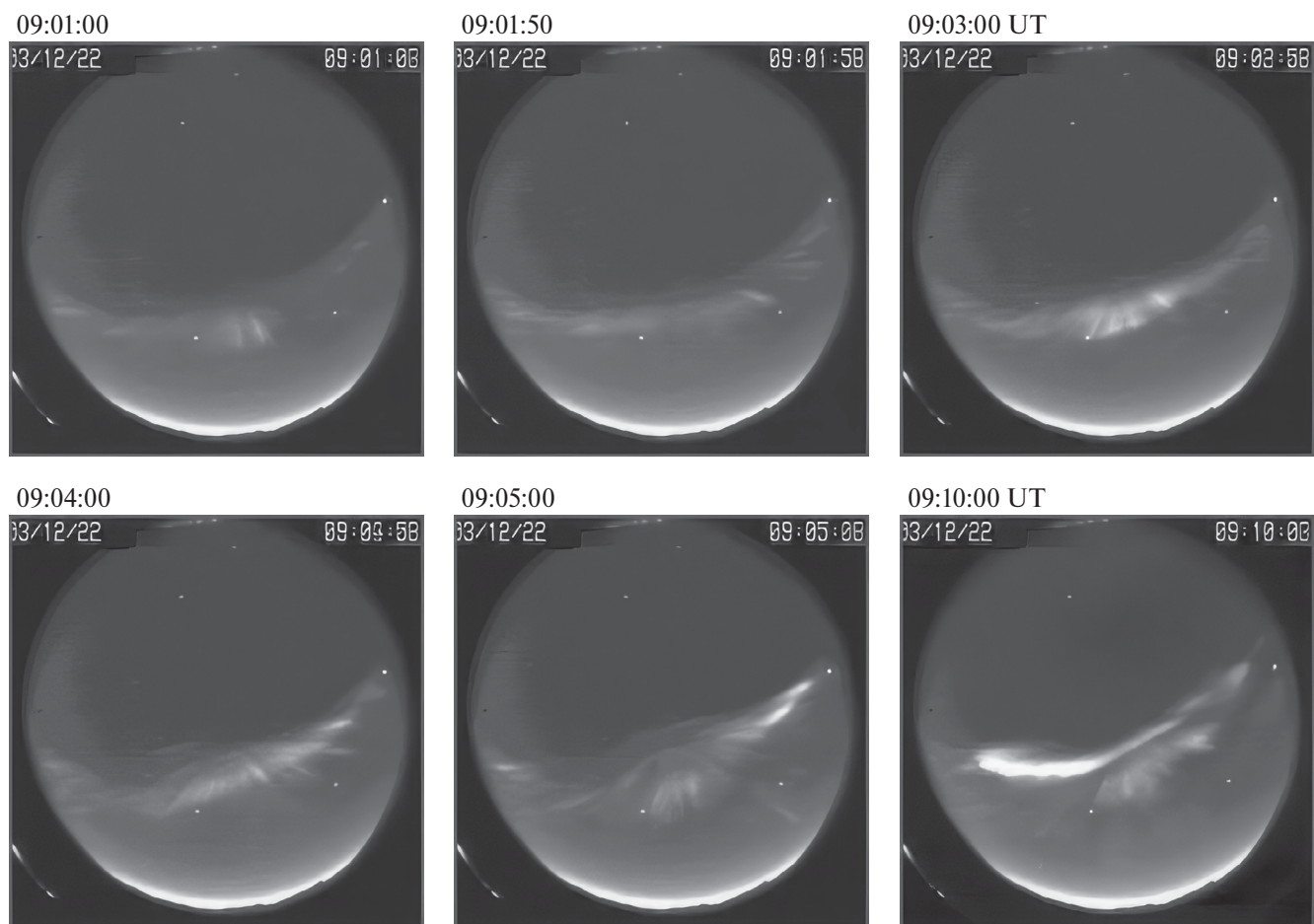


Рис. 3. Снимки камеры всего неба. Цифрами в верхней части каждого кадра указано мировое время. Геомагнитный север в верхней части кадра, восток – слева на кадре.

известно, может быть причиной более низкой широты сияний, а увеличение продольных токов и связанное с ним изменение крупномасштабных электрических полей, возможно, является причиной их значительной яркости.

Интегральные характеристики высыпающих частиц вдоль траектории спутника F16 представлены на рис. 4. На рис. 4а показаны потоки энергии высыпающих ионов (Fi , эВ/см² с ср) и их средние энергии (Ei , кэВ), а на рис. 4б – потоки энергии (Fe) и средние энергии (Ee) высыпающих электронов. По горизонтальной оси на графиках отложена исправленная геомагнитная широта (CGL), которая в проекции вдоль силовых линий на высоту ионосферы определялась по модели AACGM [Baker and Wing, 1989]. Точки на графиках соответствуют значениям параметров, измеренных спутником.

Высыпания полярного каспа идентифицируются при одновременном выполнении следую-

щих условий, сформулированных в работе [Newell and Meng, 1988]:

– средняя энергия: ионов $300 \text{ эВ} < Ei < 3000 \text{ эВ}$, электронов $Ee < 220 \text{ эВ}$;

– поток энергии: ионов $Fi > 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$, электронов $Fe > 6 \cdot 10^{10} \text{ эВ/см}^2 \text{ с ср}$.

Граничные значения потоков энергии и средних энергий высыпающих частиц, соответствующие этим критериям и определяющие границы каспальных высыпаний, показаны на рисунках горизонтальными штриховыми линиями. Экваториальная граница каспа в этом пролете определялась средней энергией высыпающих ионов и потоком энергии высыпающих электронов, а приполюсная граница – средними энергиями ионов и электронов. Идентифицированные таким образом границы каспа указаны вертикальными штриховыми линиями. Экваториальная граница каспа определена на широте 72.8° CGL в 11.9 MLT , а приполюсная – на ши-

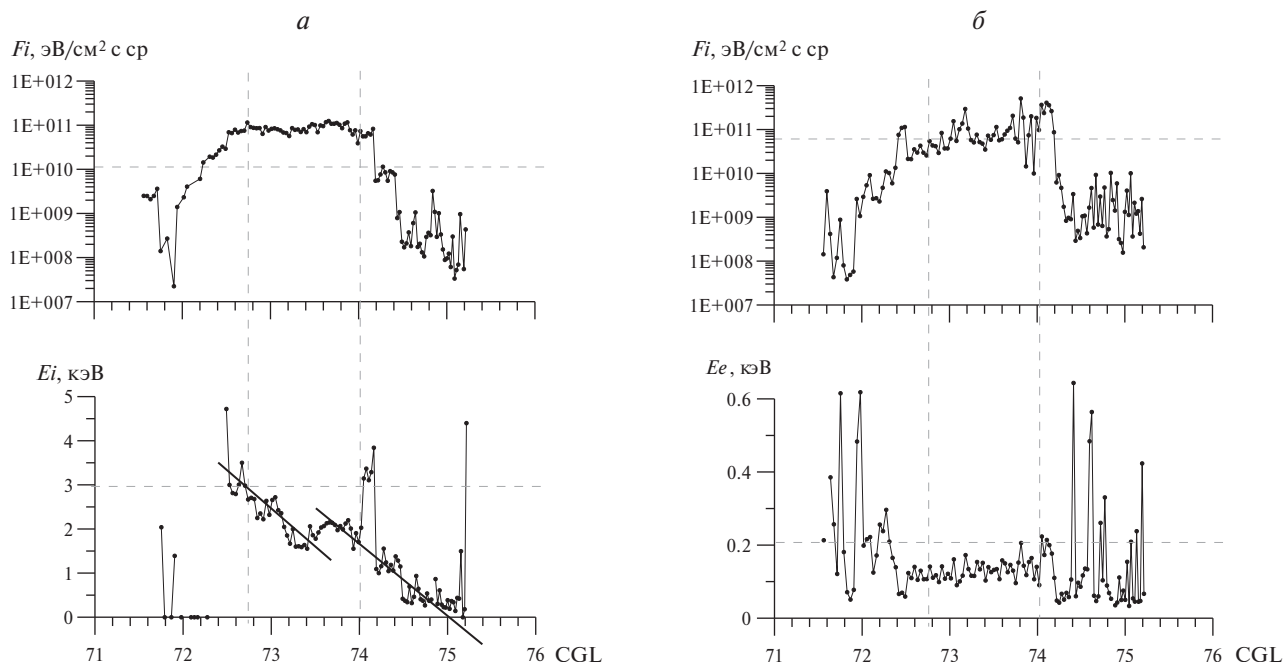


Рис. 4. Интегральные характеристики выпадающих частиц по наблюдениям спутника F16: (а) — потоки энергии выпадающих ионов (F_i , эВ/см² с ср) и их средние энергии (E_i , кэВ), (б) — потоки энергии (F_e) и средние энергии (E_e) выпадающих электронов. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта (CGL). Горизонтальные штриховые линии — уровень критериев для определения выпадений каспа; вертикальные штриховые линии — границы каспа.

роте 74.0° CGL в 12.1 MLT. Ширина каспа, зарегистрированного в местный геомагнитный полдень, составляет ~1.2° широты.

Потоки энергии выпадающих частиц, но уже в единицах эрг/см² с, по наблюдениям спутника F16 и регистрации интенсивности аврорального свечения в килоРэлях (I , кР) по наблюдениям MSP в обсерватории Баренцбург показаны на рис. 5.

Сверху вниз на рис. 5 представлены потоки энергии выпадающих ионов (F_i) и электронов (F_e), а ниже интенсивности свечения эмиссий (OI) 630.0 нм (жирная кривая) и (OI) 557.7 нм (тонкая кривая) в 09:01 UT и 09:03 UT. По горизонтальной оси отложена исправленная геомагнитная широта. Для определения широты по величине зенитного угла наблюдения высота свечения принималась равной 150 км для эмиссии 557.7 нм и 240 км для эмиссии 630.0 нм. Вертикальными штриховыми линиями на рисунке показано положение экваториальной и приполюсной границ каспа.

Сопоставление спутниковых и наземных наблюдений показывает, что мягкие электронные выпадения в области каспа определяют область

аврорального свечения в эмиссии 630.0 нм. Интенсивность свечения максимальна в приполюсной части каспа и составляет ~1.0 — 1.5 кР. Пик интенсивности свечения в эмиссии 557.7 нм определяет широтное положение лучистой дуги сияний и совпадает с пиком в потоках энергии выпадающих электронов. Рисунок 5 показывает, что дуга сияния окаймляет выпадения каспа с его приполюсной стороны и в соответствии с критериями [Newell and Meng, 1988] располагается в самой экваториальной части выпадений полярной мантии. Интенсивность свечения дуги сияний в интервале положительных значений B_z -компоненты ММП не остается постоянной, а существенно изменяется в пределах 0.4–2.0 кР. Непосредственно перед пролетом спутника в 09:01 UT интенсивность эмиссии 557.7 нм в дуге сияния составляла ~0.4 кР, а сразу же после пролета в 09:03 UT была уже ~1.4 кР.

На рис. 6 представлена градиентная кеограмма сияний в интервалах 08:30–09:00 UT (рис. 6а) и 09:00–09:30 UT (рис. 6б). Кеограмма показывает временное поведение аврорального свечения вдоль геомагнитного меридиана, полученное в интегральном свете по наблюдениям камеры всего неба. По вертикальной оси отложен зенитный

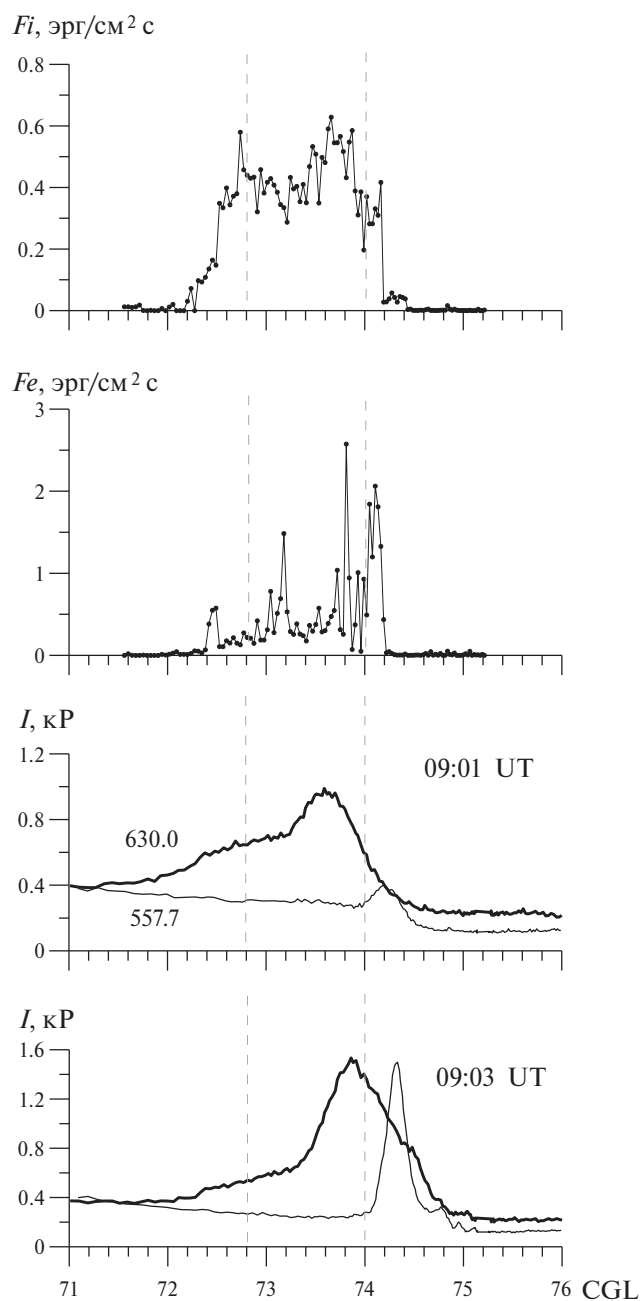


Рис. 5. Характеристики высыпающихся частиц и полярных сияний над арх. Шпицберген.

угол, верх кеограммы соответствует направлению на геомагнитный север. Зенит обсерватории наблюдения находится в центре кеограммы. Градиентная кеограмма выполнена методом, основанным на выделении пространственно-временных и яркостных градиентов, и позволяет выявлять тонкие эффекты в динамике форм сияний и вариациях яркости свечения [Корнилов и Корнилов, 2003].

На рис. 6 горизонтальные линии со стрелками показывают интервал ММП $B_z > 0$. До и после выделенного стрелками интервала дуги сияний движутся преимущественно к полюсу. Динамика лучистых дуг сияний в эти периоды акцентирована отрезками сплошных линий. Движения дискретных форм сияний к полюсу являются характерными для дневного сектора [Vorobjev et al., 1976], особенно при $B_z < 0$. В интервале $B_z > 0$, как показывает рис. 6, явно выраженного движения сияний к полюсу не наблюдалось.

В долготном направлении лучистая дуга протягивается от восточного до западного горизонта обсерватории, охватывая не менее ± 2 часа MLT от геомагнитного полудня. Яркость свечения в разных участках дуги различная и значительно меняется во времени. На кадре в 09:03:00 UT, показанном в правом верхнем углу рис. 3, наблюдается значительное увеличение яркости в центре изображения дуги. При больших яркостях свечения лучистые структуры сияний трансформируются в однородные дуги и полосы, что можно видеть на рис. 3 в 09:10:00 UT, хотя лучистые структуры продолжают при этом одновременно наблюдаться. Как отмечено в [Козелов и др., 2021], при больших яркостях свечения дискретных форм такая трансформация лучистых сияний в однородные может происходить и в результате ухода камеры в режим насыщения.

В верхней части рис. 7 показаны вариации максимального значения интенсивности эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$) по наблюдениям MSP в интервале 08:30 – 09:30 UT. Фактически рисунок иллюстрирует изменения интенсивности свечения наиболее яркой дискретной формы сияний на меридиане обсерватории. Из рис. 7 видно, что интенсивность свечения дискретных форм сияний в зеленой линии (OI) меняется от 0.4 кР до 1.8 кР, показывая три ярко выраженных максимума в интервале положительных значений B_z -компоненты ММП. Попытки найти причины таких вариаций в изменениях параметров внешнего воздействия не привели к положительным результатам, так как ни в ММП, ни в параметрах плазмы солнечного ветра таких вариаций не обнаружено. Наблюдается некоторая корреляция между $I_{557.7}$ и уровнем магнитной активности в полуденном секторе авроральной зоны. В нижней части рис. 7 показаны вариации D -компоненты магнитного поля в обсерватории Колледж (Аляска, США) и AL -индекса магнитной активности. В ночном секторе наблюдалось несколько вспышек магнитной активности, в том числе две небольшие магнитосферные суббури интенсивностью в AL -индексе примерно -300 нТл и -500 нТл.

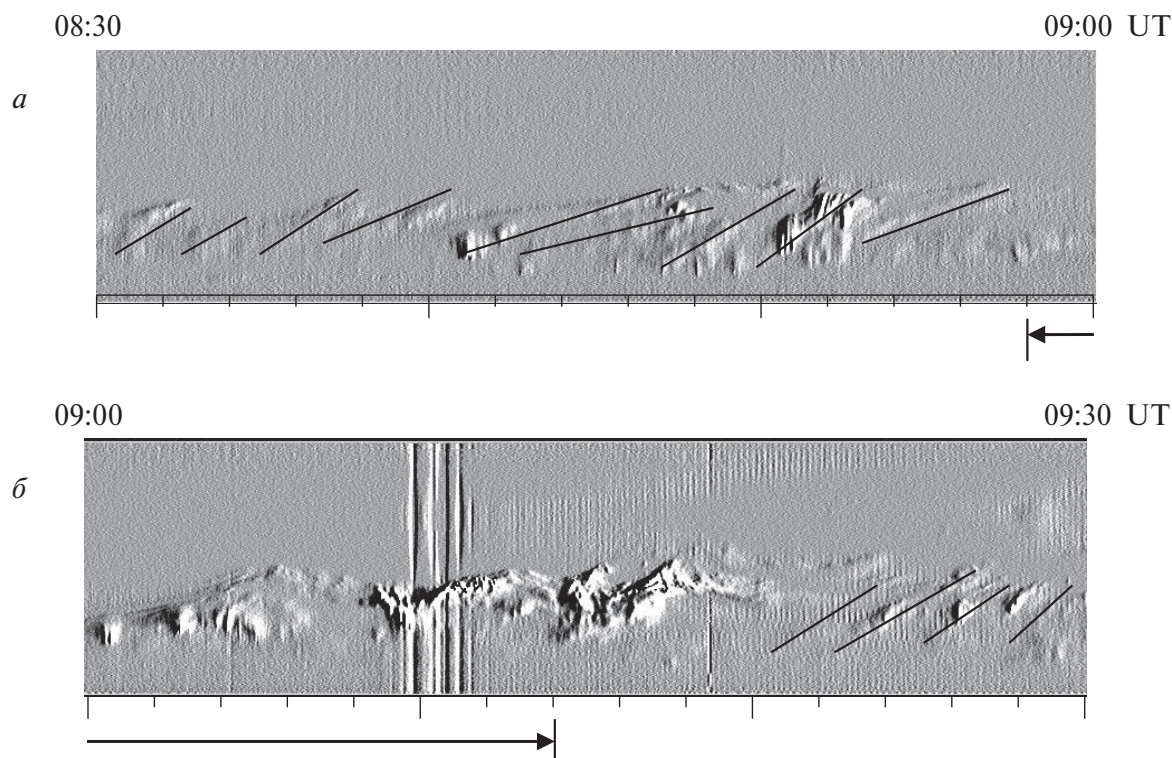


Рис. 6. Кеограммы сияний в интервалах (а) — 08:30– 09:00 UT и (б) — 09:00 – 09:30 UT. По вертикальной оси отложен зенитный угол, верх кеограммы соответствует направлению на геомагнитный север. Зенит обсерватории наблюдения в центре кеограммы. Горизонтальная линия со стрелками — интервал ММП $B_z > 0$.

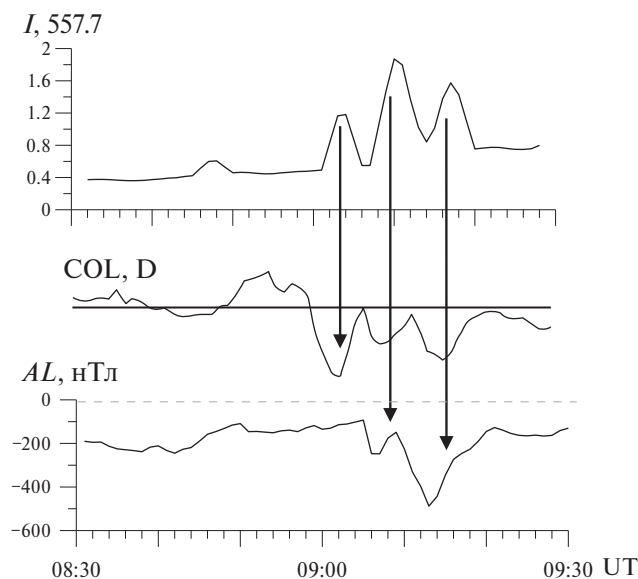


Рис. 7. Вариации максимального значения интенсивности эмиссии 557.7 нм ($I_{557.7}$) по наблюдениям MSP, вариации D -компоненты магнитного поля в обс. Колледж (COL) и AL -индекса магнитной активности.

Возмущение в D -компоненте на обсерватории Колледж, предшествующее этим вариациям, вероятнее всего, связано с суббуревой активностью, протекающей западнее Колледжа, где отсутствуют магнитные станции AL -индекса. Сплошные вертикальные линии со стрелками на рис. 7 нанесены так, чтобы отметить возможную связь между интенсивностью свечения дискретных форм дневных сияний и суббуревой активностью в полуночном секторе. Ниже мы обсудим возможные причины таких вариаций.

Дифференциальные энергетические спектры потока высыпавшихся электронов, полученные спутником перед пересечением и в момент пересечения дневной лучистой дуги, показаны на рис. 8. Можно отметить, что наблюдаемые спектры подобны спектрам высыпавшихся электронов, полученным для ночных лучистых дуг сияний в работе [Дашкевич и др., 2021]. В этой работе спектр электронов рассчитывался путем анализа высотных профилей свечения лучистых дуг сияний, полученных триангуляционными наблюдениями. В отличие от анализируемого события, при этом не было прямых спутниковых

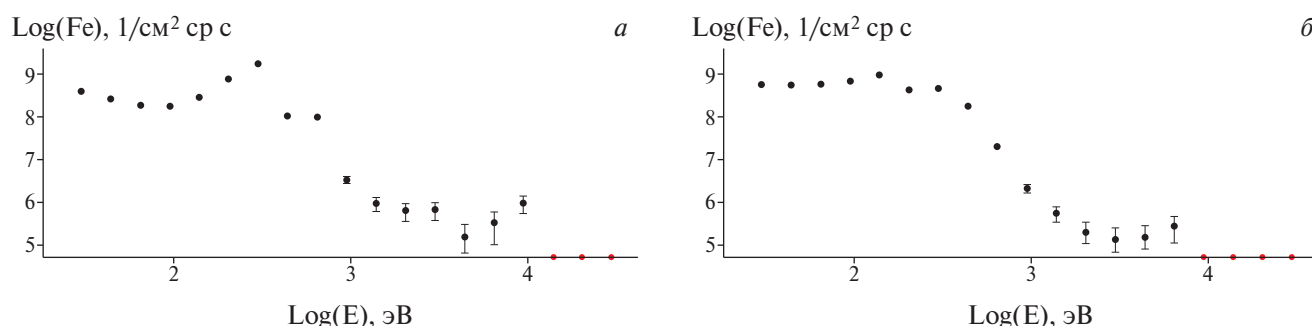


Рис. 8. Спектры высыпающихся электронов в области лучистой дуги сияний, зарегистрированные в (а) 09:01:47 UT – на широте 74.1° CGL и (б) – в 09:01:49 UT на широте 74.0° CGL.

измерений спектров высыпающихся частиц. В спектрах дневных лучистых дуг сияний, зарегистрированных вдоль траектории DMSP F16, наблюдался локальный максимум на энергиях около 0.4 кэВ, но уже в 09:03 UT по данным оптических наблюдений (см. рис. 5 и 8) отношение интенсивностей $I_{630.0}/I_{557.7} < 1$, что свидетельствует об увеличении средней энергии высыпающихся электронов до ~1 кэВ.

Пересечение спутником DMSP F16 лучистой дуги позволяет сделать некоторые выводы относительно механизма ускорения электронов в дуге. В пролете спутника над дугой сияния последовательно наблюдались спектры с ярко выраженным максимумом и широкополосные спектры, в которых дифференциальный поток оставался примерно постоянным в достаточно широком энергетическом диапазоне.

На рис. 8а показан дифференциальный энергетический спектр в 09:01:47 UT, а на рис. 8б в 09:01:49 UT. В соответствии с классификацией [Newell et al., 2009] спектр на рис. 8а соответствует полярному сиянию с явно выделяемым максимумом в спектре, которое было названо “моноэнергетическим” полярным сиянием (*monoenergetic aurora*), а спектр на рис. 8б “широкополосному” полярному сиянию (*broadband aurora*). Хорошо известно, что моноэнергетические полярные сияния вызываются ускорением магнитосферных электронов продольным падением электростатического потенциала. По классификации [Newell et al., 2009] широкополосные сияния были названы альвеновскими полярными сияниями. Основанием для такого названия были данные наблюдений на спутнике Fast, на котором холодные в поперечном направлении пучки электронов, имеющие широкий энергетический спектр в продольном направлении, наблюдались одновременно с альвеновскими волнами [Ergun et al., 1998]. К моменту введения такой классификации сияний были развиты теоретические и численные

модели ускорения частиц косыми альвеновскими волнами (см. ссылки в работе [Newell et al., 2009]). Однако коллимированные пучки частиц сами возбуждают широкий спектр волн, включая альвеновские. Поэтому наблюдения широкополосных высыпаний само по себе не указывает однозначно на механизм ускорения частиц альвеновскими волнами. Ниже мы обсудим альтернативный общепринятому механизм ускорения.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В рассмотренном событии регистрация лучистой дуги сияния на полярном крае каспа при северном ММП ставит ряд вопросов, на которые пока не удастся получить однозначных ответов. Формирование системы продольных токов в околокаспенной области (часто называемой токовой системой 0), содержащей вытекающие и втекающие продольные токи, приводит к существенной перестройке картины магнитосферной конвекции, особенно при северной компоненте ММП. Усредненная система продольных токов по данным системы Iridium приведена на Fig. 5 в работе [Anderson et al., 2008]. В соответствии с этой моделью при ММП $B_z > 0$ и $B_y > 0$ система продольных токов содержит вытекающий ток в области, примерно соответствующей полярной кромке каспа, а к экватору от него втекающий продольный ток.

По данным спутника F16, представленным на портале (<https://dmsp.bc.edu/>), лучистая дуга, регистрируемая в исследуемом нами событии на экваториальной кромке высыпаний полярной мантии, располагается в области вытекающего продольного тока (рисунок не приводится). Втекающий продольный ток был зарегистрирован экваториальнее него в области высыпаний полярного каспа.

Кроме вариаций магнитного поля, спутник F16 измерял скорость конвекции плазмы в на-

правлении перпендикулярном своей траектории. Эти измерения показывают, что в области дуги происходит смена направления конвекции от сильной западной в каспе на более слабую восточную к полюсу от дуги. Рисунок 1 показывает, что лучистая дуга ориентирована под некоторым углом к траектории полета спутника. Тогда в системе координат, связанной с дугой сияния, существует компонента скорости, направленная в северном направлении поперёк дуги сияния. Таким образом, в области каспа конвекция плазмы направлена преимущественно в западном направлении и имеет направленную на север компоненту скорости поперёк лучистой дуги сияния, в то время как к полюсу от дуги в области плазменной мантии конвекция значительно слабее и направлена преимущественно на восток.

Как видно на рис. 4а (нижняя панель), поведение средней энергии высыпавшихся ионов (Ei) с увеличением широты имеет довольно сложный характер. В каспе Ei сначала уменьшается от экваториальной границы каспа к центральной его части, достигая минимальных значений на широте $\sim 73.4^\circ$ CGL, а затем быстро увеличивается на широтах 73.4° – 73.6° CGL. В приполюсной части каспа и в области мантии также наблюдается отчетливо выраженное уменьшение Ei с увеличением широты. Тенденции изменения средней энергии высыпавшихся ионов с увеличением широты показаны на рис. 4а (нижняя панель) отрезками тонких сплошных линий.

Электроны в каспе от его положения в районе магнитопаузы быстро достигают высот атмосферы, где и вызывают авроральное свечение. Ионы намного более медленные, и традиционно считается, что они подвержены $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ дрейфу. Более энергичные ионы в процессе такого дрейфа высыпаются раньше низкоэнергичных, формируя дисперсию энергии по широте. Уменьшение энергии с увеличением широты характерно для отрицательной полярности ММП, в то время как рост Ei характерен для ММП $Bz > 0$. Таким образом, очевидно, что если изменения Ei в рассматриваемом событии рассматривать как дисперсию энергии по широте, тогда дисперсия в экваториальной части каспа, а также в его приполюсной части и в плазменной мантии будет соответствовать направленной к полюсу конвекции плазмы.

Область минимальных значений Ei в каспе примерно совпадает с положением минимума потока энергии высыпавшихся ионов (Fi), который согласно рис. 5 (верхняя панель), находится на широте $\sim 73.2^\circ$ CGL. Давление в каспе определяется, главным образом, ионными высыпаниями

и зависит от их средней энергии и потока энергии [Stepanova et al., 2006]. Из этого следует наличие минимума плазменного давления в центральной части каспа на широтах 73.2° – 73.4° CGL.

Роль градиентов давления в образовании системы продольных токов пока не рассматривалась, но рис. 5, в верхней части которого показан интегральный поток энергии высыпавшихся ионов, явно свидетельствует о существовании таких градиентов как на приполюсной границе, так и внутри каспа. К этому следует добавить, что картина продольных токов не содержит продольных токов меньших масштабов, которые наблюдаются, например, в системе продольных токов аврорального овала.

Изучение продольных токов в магнитосфере показало, что для вытекающих продольных токов характерно ускорение вдоль магнитных силовых линий продольными электрическими полями. Такое ускорение возникает, когда высыпания магнитосферных электронов не могут поддерживать необходимую величину вытекающего продольного тока. На приполюсной границе полярного каспа резко падает концентрация электронов, что в условиях существования продольного тока, вытекающего из ионосферы, создает условия формирования области продольного падения потенциала и формирования спектра электронов с максимумом.

Такой спектр в исследуемом пролете спутника F16 показан на рис. 8а. Существование больших потоков электронов на границе области продольного падения потенциала, согласно [Антонова, 1979, Антонова и др., 2012; Antonova 2002, 2023; Stepanova et al., 2002], может быть связано с проникновением холодной ионосферной плазмы через границу области продольного падения потенциала. Ускоряясь в продольном электростатическом поле, холодные электроны ионосферного происхождения формируют коллимированный электронный пучок, который быстро расплывается вдоль магнитного поля, возбуждая волны в широком частотном диапазоне и формируя спектр с плато по энергии. Вид спектра электронов, измеренный в области пересечения спутником границы между высыпаниями каспа и плазменной мантии, показанный на рис. 8б, соответствует такому сценарию. Данный сценарий является альтернативой теории альвеновского ускорения, которая, с точки зрения авторов, не позволяет объяснить особенности наблюдаемой лучистой дуги. Так, например, не удаётся объяснить длительное существование и стабильность дуги, так как альвеновское ускорение требует существования источника ста-

бильных альвеновских волн в узкой области по поперечной к дуге координате.

Увеличение яркости дуги сияния в полуденном секторе в периоды магнитных суббурь в ночном секторе авроральной зоны можно объяснить быстрым изменением структуры поперечных электрических полей в период начала фазы развития суббури, так как изменение картины конвекции может увеличить скорость дрейфа ионосферной плазмы в область продольного падения потенциала и, соответственно, к увеличению мощности электронного пучка и яркости свечения в дуге.

5. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы наземные оптические наблюдения на обсерватории Баренцбург (Шпицберген) и одновременные спутниковые наблюдения потоков высыпающихся частиц при положительных значениях B_z -компоненты ММП. Поведение эмиссий (OI) 557.7 нм и (OI) 630.0 нм по данным наземного меридионального сканирующего фотометра (MSP) сопоставлены с характеристиками высыпающихся электронов и ионов, регистрируемых спутником DMSP F16 во время его пролета над арх. Шпицберген через область авроральных высыпаний вблизи местного геомагнитного полудня. Данные спутника F16 позволили определить широтное положение экваториальной и приполюсной границ дневного полярного каспа и форму спектров высыпающихся частиц вдоль траектории спутника.

Показано, что мягкие электронные высыпания в области каспа определяют область аврорального свечения в эмиссии (OI) 630.0 нм. Интенсивность свечения этой эмиссии максимальна в приполюсной части каспа и составляет ~ 1.0 – 1.5 кР. Потоки энергии высыпающихся электронов в каспе также увеличиваются от его экваториальной границы к приполюсной, в то время как их средние энергии примерно постоянны и находятся на уровне 140 – 160 эВ. Потоки энергии высыпающихся ионов показывают наличие в каспе двух максимумов, одного в приполюсной, а другого в экваториальной его части. Ранее признаки двух максимумов в ионных высыпаниях каспа при северном ММП были обнаружены в работах [Fuselier et al., 2000; Воробьев и Ягодкина, 2022].

На приполюсной границе каспа наблюдаются дифференциальные спектры высыпающихся электронов, имеющие максимум на энергиях около 0.4 кэВ, соответствующие ускорению электро-

нов продольным падением электростатического потенциала. Во время пролета спутника над лучистой дугой сияния наблюдался широкополосный спектр, в котором поток энергии в диапазоне от 30 эВ до ~ 0.5 кэВ почти не зависел от энергии. Проведенный анализ показал преимущество механизма ускорения холодных электронов продольным падением потенциала и формирования холодного электронного пучка, релаксация которого вызывает формирование наблюдаемого широкополосного спектра.

Оказалось, что интенсивность RA наилучшим образом коррелирует не с параметрами межпланетной среды, а с уровнем магнитной активности в ночном секторе авроральной зоны. Роль активности в ночном секторе в увеличении яркости лучистой дуги сияния можно сравнительно просто объяснить механизмом проникновения ионосферной плазмы в область продольного падения потенциала. Развитие суббури в ночном секторе приводит к быстрому глобальному изменению системы продольных токов и, соответственно, к изменению конфигурации распределения ионосферных электрических полей. Увеличение скорости дрейфа холодной ионосферной плазмы поперек области продольного падения потенциала очевидно увеличит поток холодных ионосферных частиц, ускоряемых в области продольного падения потенциала.

В целом, необходимо отметить, что несмотря на то, что удалось пока проанализировать только одно событие, полученные результаты представляют интерес для выяснения динамики каспа и его полярной границы.

Данные спутника DMSP опубликованы на страницах (<http://sd-www.jhuapl.edu>) и (<https://dmsp.bc.edu/>). Параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) и (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана текущим институтским финансированием. Никаких дополнительных грантов на проведение этого конкретного исследования получено не было.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е. Об образовании продольной разности потенциалов, изотропных и коллимированных потоков электронов в вечернем секторе авроральной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 19. № 6. С. 1064–1069. 1979.
- Антонова Е.Е., И.П. Кирпичев, Рязанцева М.О., Марьин Б.В., Пулинец М.С., Знаткова С.С., Степанова М.В.

Магнитосферная суббурия и дискретные дуги полярного сияния // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. Т. 67. № 6. С. 31–38. 2012.

– Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Особенности структуры высыпаний дневного полярного каспа при северном межпланетном магнитном поле // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 86. № 12. С. 1804–1809. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0367676522120304>

– Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Корничев И.П. Широтная структура высыпаний в области дневного полярного каспа // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 6. С. 736–750. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600448>

– Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами 2. Энергетические спектры высыпавшихся электронов // Космич. исслед. Т. 59. № 5. С. 355–360. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0023420621050034>

– Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е. Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объемной интенсивности свечения // Космич. исслед. Т. 59. № 4. С. 267–274. 2021. <https://doi.org/10.31857/S002342062104>

– Корнилов И.А., Корнилов О.И. Использование методов улучшения изображений для обработки авроральных телевизионных данных // В книге “Техника и методика геофизического эксперимента”. Апатиты. С. 86–91. 2003.

– Фельдштейн Я.И., Шевнина Н.Ф., Лукина Л.В. Сияния в магнитно-спокойные и магнитно-возмущенные периоды // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 6. № 2. С. 312–321. 1966.

– Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Stauning P. Statistical Birkeland current distributions from magnetic field observations by the Iridium constellation // Annales Geophysicae. V. 26. No. 3. P. 671–687. 2008. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-671-2008>

– Antonova E.E. The results of INTERBALL/Tail observations, the innermagnetosphere substorm onset and particle acceleration // Adv. Space Res. V. 30. No. 7. P. 1671–1676. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00434-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00434-9)

– Antonova E.E. From physics of polar aurora to changes of the fundamental approaches to the physics of the magnetospheric processes // In *Generation-to-generation communications in space physics*. Ed.

– Borovsky J.E., Grigorenko E.E., Chau J.L., Miyoshi Y., Usanova M., De Nolfo G.A., Greco A., Partamies N. Lausanne: Frontiers Media SA. ISSN 1664-1714, ISBN 978-2-8325-2553-1. June 2023. P. 138–144. 2023. <https://doi.org/10.3389/978-2-8325-2553-1>

– Baker K.B., Wing S. A new magnetic coordinate system for conjugate studies at high latitudes // J. Geophys. Res. V. 94. No. A7. P. 9139–9144. 1989. <https://doi.org/10.1029/JA094iA07p09139>

– Ergun R.E., et al. FAST satellite observations of electric field structures in the auroral zone // Geophys. Res.

Lett. V. 25. No. 12. P. 2025–2028. 1998. <https://doi.org/10.1029/98GL00635>

– Fear R. The northward IMF magnetosphere // In “Magnetospheres in the solar system”. P. 293–309. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119815624.ch19>

– Frank L.A. Plasma in the Earth’s polar magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 76. No. 22. P. 5202–5219. 1971. <https://doi.org/10.1029/JA076i022p05202>

– Fuselier S.A., Trattner K.J., Petrinen S.M. Cusp observations of high- and low-latitude reconnection for northward interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 105. No. A1. P. 253–266. 2000. <https://doi.org/10.1029/1999JA900422>

– Heikkila W.J., Winningham J.D. Penetration of magnetosheath plasma to low altitudes through the dayside magnetospheric cusps // J. Geophys. Res. V. 76. No. 4. P. 883–891. 1971. <https://doi.org/10.1029/JA076i004p00883>

– Hosokawa K., Kullen A., Milan S., Reidy J., Zou Y., Frey H., Maggiolo R., Fear R. Aurora in the polar cap: A review // Space Sci. Rev. V. 216. No. 1. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-0637-3>

– Kirpichev I.P., Antonova E.E., Stepanova M.V. On the relationship between regions of large-scale field-aligned currents and regions of plateau in plasma pressure observed in the equatorial plane of the Earth’s magnetosphere // Geophys. Res. Lett. V. 50. No. 18. e2023GL105190. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023GL105190>

– Lavraud B., Fedorov A., Budnik E., Grigoriev A., Cargill P.J., Dunlop M.W. et al. Cluster survey of the high-altitude cusp properties: A three-year statistical study // Ann. Geophys. V. 22. No. 8. P. 3009–3019. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-3009-2004>

– Milan S.E., Mooney M.K., Bower G.E., Taylor M.G.G.T., Paxton L.J., Dandouras I., Fazakerley A.N., Carr C.M., Anderson B.J., Vimes S.K. The association of cusp-aligned arcs with plasma in the magnetotail implies a closed magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 128. No. 7. 2023. <https://doi.org/10.1029/2023JA031419>

– Newell P.T., Meng C.-I. The cusp and the cleft/boundary layer: low-altitude identification and statistical local time variation // J. Geophys. Res. V. 93. No. A12. P. 14549–14556. 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA12p14549>

– Newell P.T., Meng C.-I., Sibeck D.G., Lepping R. Some low-altitude cusp dependence on interplanetary magnetic field // J. Geophys. Res. V. 94. P. 8921–8927. 1989. <https://doi.org/10.1029/JA094iA07p08921>

– Newell P.T., Meng C.-I. Ionospheric projections of magnetospheric regions under low and high solar wind pressure conditions // J. Geophys. Res. V. 99. No. A1. P. 273–286. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02273>

– Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget // J. Geophys. Res. V. 114. No. A9. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014326>

– Pitout F., Bogdanova Y.V. The polar cusp seen by Cluster // J. Geophys. Res. V. 126. No. 9. 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029582>

- *Stepanova M.V., Antonova E.E., Bosqued J.M., Kovrazhkin R.A., Aubel K.R.* Asymmetry of auroral electron precipitations and its relationship to the substorm expansion phase onset // *J. Geophys. Res.* V. 107. No. A7. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA003503>
- *Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.-M.* Study of plasma pressure distribution in the inner magnetosphere using low-altitude satellites and its importance for the large-scale magnetospheric dynamics // *Adv. Space Res.* V. 38. No. 8. P. 1631–1636. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.05.013>
- *Vorobjev V.G., Starkov G.V., Feldstein Y.I.* The auroral oval during the substorm development // *Planet. Space Sci.* V. 24. No. 10. P. 955–965. 1976. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(76\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(76)90007-6)
- *Zhou X.W., Russell C.T., Le G., Fuselier S.A., Scudder J.D.* Solar wind control of the polar cusp at high altitude // *J. Geophys. Res.* V. 105. No. A1. P. 245–252. 2000. <https://doi.org/10.1029/1999JA900412>

Ionospheric Features of Dayside Polar Cusp Precipitation under the Northward IMF

V. G. Vorobjev^{1, *}, O. I. Yagodka^{1, **}, E. E. Antonova^{2,3, ***}

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk Region, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Space Research Institute Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

*e-mail: vorobjev@pgia.ru

**e-mail: oksana41@mail.ru

***e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

The geophysical processes in the dayside polar cusp on December 22, 2003 under the northern orientation of the interplanetary magnetic field (IMF), relatively high speed and low density of the solar wind by using the ground-based optical observations on Spitsbergen and DMSP F16 spacecraft observations were examined. A comparison of spacecraft and ground-based observations shows that soft electron precipitation in the cusp region determine the region of the auroral luminosity in the (OI) 630.0 nm emission. The peculiarity of the event under consideration is the observation of a bright rayed auroral arc bordering the dayside cusp from its polar edge. The results of observations of the low-altitude DMSP F16 spacecraft during its pass over the rayed arc were analyzed. Explanations of the observed phenomena are proposed based on the analysis of changes in the spectra of precipitating electrons and the formation of an electron beam by a field-aligned electric field.

УДК 523.9-337

ИЗУЧЕНИЕ ВНЕЗАПНОГО НАЧАЛА МАГНИТНОЙ БУРИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ С СЕКУНДНЫМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

© 2024 г. Ю. С. Загайнова^{1, *}, С. В. Громов¹, Л. И. Громова¹, В. Г. Файнштейн²

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

²Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), г. Иркутск, Россия

*e-mail: yuliazagainova@mail.ru

Поступила в редакцию 19.12.2023 г.

После доработки 21.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

В работе мы представляем результаты исследования регистрации внезапного начала (SC) и главного импульса (MI) магнитной бури как функций географических координат магнитных обсерваторий и Всемирного времени, используя для анализа современные данные с секундным временным разрешением. Анализ проведен для двух событий, в которых межпланетная ударная волна, воздействующая на магнитосферу, связана с межпланетными корональными выбросами массы с источниками в разных полусферах Солнца. Предложен авторский подход к определению моментов времени регистрации SC и MI. Сделан вывод, что время регистрации SC и MI может отличаться на несколько секунд до более одной минуты на магнитных обсерваториях, расположенных на разных географических широтах и долготах. Для исследуемых событий на графиках регистрации SC и MI как функций географических координат магнитных обсерваторий и Всемирного времени обнаружены тренды, согласно которым, в среднем, чем выше широта станции, тем позже регистрируются SC и MI на станции.

DOI: 10.31857/S0016794024030034, EDN: SMZUVV

1. ВВЕДЕНИЕ

Воздействие на магнитосферу Земли межпланетных ударных волн (МУВ), связанных с корональными выбросами массы (КВМ), сопровождается большим разнообразием физических явлений от магнитопаузы и до поверхности Земли. Одним из наиболее ярких и интересных физических явлений, возникающих при этом, является внезапное возмущение магнитного поля, регистрируемое в околоземном пространстве и наземными магнитными обсерваториями. Изменение параметров возмущенной магнитосферы фиксируется сетью наземных магнитных обсерваторий, расположенных на различных географических широтах и долготах Земли, как изменения интенсивности горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля и характеризуется вариацией магнитного поля, получившей название Dst -индекс, использующийся как идентификатор магнитных бурь. Внезапное и резкое увеличение динамического давления на магнитопаузу (внешнюю границу магнитосферы) вслед-

ствие воздействия на нее МУВ является причиной резкого изменения интенсивности горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, которое происходит по всей поверхности Земли на всех рассматриваемых магнитных обсерваториях, в связи с чем, оно и получило название “внезапного начала” магнитной бури [Акасофу, Чепмен, 1975; Nishida, 1978].

Внезапное изменение магнитного поля Земли, которое сопровождается магнитной бурей, отождествляется по заметным изменением величины индексов геомагнитной активности Dst и Kp , обозначают SC (*sudden commencement*; см. Curto et al., 2007a) или в более ранних работах — SSC (*storm sudden commencement*). Однако магнитные бури малой интенсивности могут и не иметь четко выраженного внезапного начала. Регистрация отклика геомагнитного поля в результате воздействия МУВ на магнитосферу показало, что резкий скачок H -компоненты геомагнитного поля может быть как положительным, так и отрицательным. Внезапное отрицательное изменение со-

временем H -компоненты геомагнитного поля во время предварительной фазы магнитной бури наблюдается, например, на ночной стороне магнитосферы [Sun et al., 2011].

На основе отчетов магнитных обсерваторий по результатам морфологического осмотра их магнитограмм составляются предварительные списки времён регистрации внезапного начала магнитной бури SC каждой из обсерваторий. Окончательное время внезапного начала магнитной бури определяют в формате “часы:минуты” на основе визуального осмотра магнитограмм с 1-мин временным разрешением пяти низкоширотных (приэкваториальных) магнитных обсерваторий, например, — Honolulu (сокращенно — HON), San Juan (SJG), Tamanrasset (TAM), Alibag (ABG), Kanoya (KNY) (см. сайт https://isgi.unistra.fr/events_sc.php международной службы геомагнитных индексов — *International Service of Geomagnetic Indices*, созданной МАГА — Международной Ассоциацией Геомагнетизма и Аэронауки).

На протяжении десятилетий создавались и уточнялись списки SC. Так, например, был составлен и проанализирован список SC за 100 лет [Mayaud, 1975]. Отметим также создание международной службы SRMV (*International Service of Rapid Magnetic Variations*), составившей, в частности, наиболее точные списки SC-событий [Curto, et al., 2007a].

Именно благодаря систематическим наблюдениям SC-событий удалось установить, что внезапное изменение во времени H -компоненты геомагнитного поля во время предварительной фазы магнитной бури имеет глобальный характер. Отклик на воздействие МУВ на магнитосферу в той или иной степени проявляется во всей магнитосфере, в том числе, и на всей поверхности Земли. В работе [Araki, 1994] была предложена физическая модель, которая может объяснить глобальную структуру геомагнитного внезапного начала SC. Lam and Rodger [2001] на примере одного события 22 ноября 1997 г. протестировали физическую модель SC, предложенную в работе [Araki, 1994], и пришли к выводу, что эта модель неплохо согласуется с наблюдениями на высоких широтах, и хуже — на низких широтах.

При анализе данных с минутным временным разрешением ограничиваются определением момента регистрации SC в виде внезапного роста горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, которое на магнитограммах различимо в виде ступеньки. По этой причине на магнитограммах с 1-мин временным разрешением момент регистрации SC определяется однозначно и отражается в виде резкого скачка в индексе гео-

магнитной бури $SYM-H$, который соответствует одноминутному аналогу индекса Dst . В действительности, по данным с более высоким, чем 1 минута, временным разрешением, изменение геомагнитного поля происходит не мгновенно: горизонтальная H -компонента магнитного поля достигает максимального значения за некоторое время, т.е. не в виде ступеньки, и имеет заметные суточные вариации [Акасофу, Чепмен, 1975]. Кроме этого, при анализе данных, например, с 1-с (секундным) временным разрешением необходимо уже учитывать особенности, так называемой, “тонкой структуры SC”, поскольку в этом случае SC во времени характеризуется уже как процесс конечной длительности (горизонтальная H -компонента геомагнитного поля часто нарастает по экспоненциальному закону в течение определенного промежутка времени) с четко различимыми структурными элементами. Если нанести на один график данные с 1-мин и 1-с временным разрешением одной магнитной обсерватории, то становятся видно, что они отличаются.

Так, на рис. 1 для сравнения показаны примеры вариации магнитного поля на низкоширотной обсерватории HON для SC-событий от 22 июня 2015 г. в 18:33 UT и 16 июля 2017 г. в 05:59 UT, построенные по минутным и секундным данным. Для построения зависимости интенсивности H -компоненты поля от времени был выделен временной интервал в пределах $\sim \pm 15$ минут от общепринятого времени начала SC в 18:33 UT и 05:59 UT для

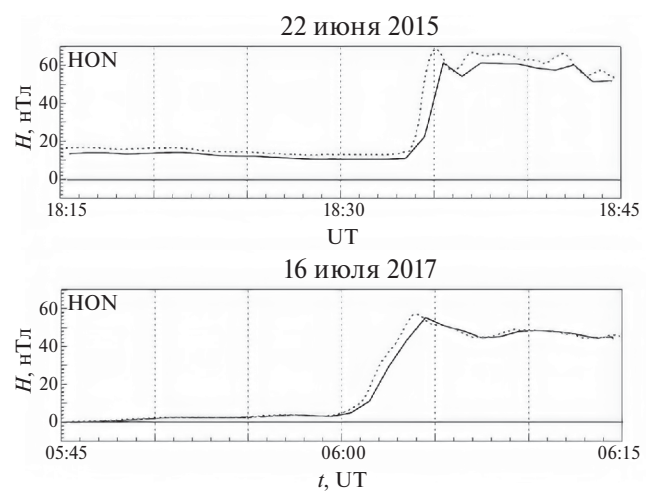


Рис. 1. Примеры данных наблюдений H -компоненты геомагнитного поля на низкоширотной станции Голулу (HON) с минутным (тонкая сплошная линия) и секундным (пунктирная линия) разрешением для оценки начала SSC: на верхней панели — для события от 22 июня 2015 г. в 18:33 UT, на нижней панели — 16 июля 2017 г. в 05:59 UT.

рассматриваемых событий, соответственно. На графиках заметны отличия зависимостей интенсивности H -компоненты поля от времени по данным с разным временным разрешением, т.е. и моменты регистрации SC могут различаться при анализе данных с разным временным разрешением.

К основным элементам тонкой структуры SC относят уже упоминавшийся резкий скачок горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, называемый главным импульсом MI (*main impulse*), выяснение свойств и физической природы которого по многим причинам имеет важное значение. Во-первых, MI является конечным звеном в цепочке физических процессов в магнитосфере вследствие воздействия на нее МУВ. Следовательно, MI могут использоваться для выяснения деталей и физики этих процессов. Во-вторых, MI может быть причиной геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), нарушающих работу наземного электрического энергооборудования. Так, например, разрушение трансформатора энергосистемы Новой Зеландии совпало с SC [Beland, Small, 2004]. Для случаев анализа данных, например, высокоширотных магнитных станций и/или на полуденной линии, MI предшествует импульс поля обратного знака, который называется предварительным обратным импульсом и обозначается PRI (*preliminary recovery impulse*) или PI. В более ранних работах для предварительного обратного импульса было принято обозначение SSC*. В некоторых работах в тонкую структуру SC включают также колебания в диапазоне частот до нескольких герц, которые могут предшествовать PI и MI [Parkhomov, 1985; Пархомов и др., 2017].

Nishimura et al. [2016] проанализировали эволюцию токовой системы в магнитосфере в период воздействия на магнитосферу импульса давления солнечного ветра, опираясь на магнитометрические наблюдения и наблюдения северного сияния. Сделан вывод, что основной импульс MI вызван крупномасштабными вихревыми токовыми системами в ионосфере, которые образованы ионосферными токами, текущими по/против часовой стрелки на утренней/вечерней стороне. Эти токи, в свою очередь, образованы нестационарными продольными токами, втекающими в ионосферу на утренней освещенной Солнцем стороне Земли и вытекающими из нее на вечерней. Сделан вывод, что более слабый предварительный импульс PI обусловлен двух-вихревым ионосферным током, создаваемым продольными токами, один из ко-

торых течет в ионосферу на вечерней стороне, другой — вверх из нее — на утренней стороне.

Достаточно полно физический механизм генерации основного импульса MI был установлен с использованием численных расчетов [см. Samsonov et al., 2010; Sun et al., 2015 и цитируемую там литературу]. В работе [Sun et al., 2015] на основе глобального МГД моделирования связь между изменением MI, регистрируемым наземными магнитными станциями, и откликом магнитосферы на воздействие МУВ описывают следующим образом: возмущения скорости вблизи флангов магнитопаузы вызывают уменьшение магнитного поля, в результате чего возникает динамо, которое усиливает транзитные продольные токи. Эти токи дополнительно генерируют пару вихрей ионосферного тока, что приводит к вариациям MI, наблюдаемым на Земле.

Однако измеряемое на магнитной обсерватории время начала MI на магнитограммах не является моментом регистрации SC. Регистрируемое во время начала MI магнитное поле является комбинацией уже сформировавшихся полей от различных токовых систем на этапе резкого возмущения магнитосферы. Для точного определения момента регистрации SC на конкретно взятой станции необходимо определить момент времени начала плавного увеличения амплитуды геомагнитного поля до измеряемого значения, соответствующего началу MI. В итоге, время регистрации дошедшего геомагнитного возмущения до каждой из магнитных обсерваторий может различаться. Это обуславливает зависимость времени регистрации SC (или SC*) от геомагнитной широты, описанные еще в ранних публикациях на эту тему [Акасофу, Чепмен, 1975].

В настоящей работе мы сопоставляем регистрацию отдельно как SC, так и MI в виде функций географических координат магнитных обсерваторий и Всемирного времени. Вопрос одновременности регистрации SC-событий разными геомагнитными станциями на Земле рассматривался во многих работах. Так, например, этому вопросу в монографии [Акасофу, Чепмен, 1975] уделено особое внимание. Отмечено, что несколькими исследователями был сделан вывод, что начало регистрации SC происходит на несколько минут раньше в высоких широтах по сравнению с низкими (см. также [Sato, 1961; Williams, 1960; Wilson and Sugiura, 1961; Yamamoto and Maeda, 1960]).

Высказывались разные причины, почему SC регистрируется разными обсерваториями неодновременно. Во-первых, оценка моментов регистрации SC разными станциями в течение дли-

тельного времени производилась с большой погрешностью. В частности, было показано, что распределение времен внезапных начал не может быть найдено точно на низких широтах [Gerard, 1959]. В целом погрешность оценки одновременности регистрации SC разными станциями в значительной степени была обусловлена недостаточным временным разрешением измерения вариаций геомагнитного поля (примерно 1 мин), погрешности привязки данных к Всемирному времени (UT) (*universal time*) и определения момента резкого начала возрастания геомагнитного поля. Кроме возможных инструментальных погрешностей, в том числе, связанных с привязкой к UT, которые устранены при современном уровне наблюдений, было выдвинуто предположение, что одна из причин — степень одновременности регистрации SC разными обсерваториями зависит от ориентации МУВ в пространстве [Wang et al., 2006; Selvakumaran et al., 2017]. Проводя анализ наблюдений магнитных обсерваторий на предмет выявления первых станций, реагирующих на приход МУВ (т.е., находя их местоположение относительно земного экватора), необходимо также учитывать склонение Солнца.

В настоящее время вариации геомагнитного поля на многих магнитных обсерваториях измеряются с 1-с разрешением с исключением инструментальных погрешностей, которые были присущи данным наблюдений прошлых десятилетий. Это создало основу для проведения более точного сравнительного анализа свойств SC, зарегистрированных на разных обсерваториях. Цель данной работы: с использованием современных данных с 1-с временным разрешением перепроверить зависимость моментов регистрации SC от широты/долготы с более надежной привязкой к UT, чем это делалось во время первых исследований магнитных бурь с внезапным началом. Оценена степень неодновременности регистрации начала SC на геомагнитных станциях, расположенных на различных широтах и долготах на Земле. Мы предполагаем, что полученные при этом сведения могут быть использованы для уточнения современных механизмов генерации внезапного начала геомагнитной бури. В этой работе мы также рассматриваем вопрос, как возникновение KBM с источниками в разных полусферах Солнца отражается на моменте регистрации SC на разных станциях в зависимости от их географических координат и UT. Кроме того, проверяется предположение, что KBM с источниками формирования в разных полусферах Солнца обеспечат воздействие на магнитосферу

связанных с ними МУВ, распространяющихся под разными углами к линии “Солнце — Земля”.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

По данным каталога межпланетных KBM (MKBM) “List of Richardson/Cane ICMEs” (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>) были отобраны два SC-события, в которых МУВ, воздействующая на магнитосферу, связана с достигшим орбиты Земли MKBM, отождествленным вблизи Солнца с KBM по данным наблюдений коронографов LASCO C2 и C3 [Brueckner et al., 1995] на борту космического аппарата SOHO [Domingo, Fleck and Poland, 1995].

Дополнительно по данным каталога “SOHO/LASCO HALO CME catalog” (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/) отобранные MKBM отождествлены с KBM типа “гало” с источниками в разных полусферах Солнца (Северной и Южной) на относительно небольших удалениях от солнечного экватора и от центра солнечного диска (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/halo/), для которых линейная проекционная скорость больше 1200 км/с. Такие KBM с большей вероятностью могут достичь Земли и во многих случаях связаны с ударной волной уже вблизи Солнца. Мы проверили наличие МУВ перед MKBM по данным каталога межпланетных ударных волн “ACE Lists of Disturbances and Transients” (http://www.ssg.sr.unh.edu/mag/ace/ACELists/obs_list.html) и данных OMNIWeb Service (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>) с минутным разрешением, где МУВ выделяется как резкий скачок основных магнитогидродинамических параметров солнечного ветра: плотности, температуры и направленной скорости плазмы, а также межпланетного магнитного поля [Hundhausen, 1972].

Приведем сведения об отобранных для анализа KBM. KBM-1 впервые наблюдался в поле зрения коронографа LASCO C2 21 июня 2015 в 02:36 UT. Его источник располагался в Северном полушарии Солнца и имел координаты N12E16 (фактически, это координаты связанной с KBM солнечной вспышки), здесь N и E обозначают северную широту и восточную долготу источника KBM. Линейная проекционная скорость KBM в плоскости неба коронографов LASCO составила $V_{lin} = 1366$ км/с, полученная из расчетов скорость KBM в трехмерном пространстве $V_{3D} = 1740$ км/с. Подробно об определении параметров KBM, приведенных в каталоге гало KBM по данным LASCO, см. в [Gopalswamy et al., 2010]. Скорость исследуемого межпланетного KBM на орбите Земли $V_{MKBM} = 610$ км/с. Гало KBM-2 впервые был зарегистрирован коронографом LASCO C2

14 июля 2017 в 01:25 UT. Этот КВМ возник в Южном полушарии Солнца, координаты источника КВМ S06W29 (здесь S и W обозначают южную широту и западную долготу), линейная проекционная скорость $V_{lin} = 1200$ км/с в поле зрения коронографов LASCO, $V_{3D} = 1422$ км/с, скорость межпланетного КВМ на орбите Земли $V_{МКВМ} = 520$ км/с.

Добавим, что для анализа мы специально отобрали SC-события, при наблюдении которых на Земле склонение Солнца принимало близкие значения. Так, для SC-события от 22 июня 2015 г. склонение Солнца составило $\delta = 23.429^\circ$, а для события от 16 июля 2017 г. — $\delta = 21.249^\circ$. Это позволяет исключить вклад угла наклона линии “Солнце–Земля” к плоскости земного экватора на этапе интерпретации результатов анализа данных.

Согласно каталогу SC, представляемому уже упомянутой международной службой геомагнитных индексов ISGI, при взаимодействии с магнитосферой Земли МУВ, связанных с отобранными МКВМ, были зарегистрированы SC-события от 22 июня 2015 г. в 18:33 UT и 16 июля 2017 г. в 05:59 UT. Кроме этого мы использовали информацию о времени регистрации МУВ, МКВМ, границы области ударно-сжатой плазмы за фронтом ударной волны (SHEATH) и передней границы магнитного облака (MC) из каталога [Ермолаев и др., 2009], находящегося в свободном доступе на сайте (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog>). Дополнительно использовали данные Гарвардско-Смитсоновского центра по астрофизике, приведенные на сайте (www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data), об ориентации нормали к фронту МУВ относительно линии “Солнце–Земля”. Для одного из исследуемых нами SC-событий от 22 июня 2015 г. указано, что нормаль к фронту МУВ имеет малый угол наклона к линии “Солнце–Земля”: средние углы $\theta = -4.901^\circ$, $\varphi = 186.201^\circ$. В данном случае ориентация нормали к фронту МУВ почти совпадает с направлением “Солнце–Земля”. При этом распространение МКВМ осуществлялось, преимущественно, в Северной части гелиосферы, что согласуется с информацией об источнике формирования КВМ в Северном полушарии Солнца недалеко от солнечного экватора. Для события от 16 июля 2017 г. такой информации на сайте Гарвардско-Смитсоновского центра не приводится. Однако, поскольку источник формирования КВМ, связанного с исследуемым SC-событием, находился вблизи экватора в Южном полушарии Солнца, то, по аналогии с событием от 22 июня 2015 г. и согласно результатам работы [Fainshtein, Ivanov, 2010] об отклонении траектории движения КВМ

к солнечному экватору, можно предположить, что нормаль к фронту МУВ в этом случае также имела малый угол наклона к линии “Солнце–Земля”, но со стороны Южной части гелиосферы.

Дополнительную информацию об исследуемых в работе SC-событиях мы находили по магнитным данным с высокочувствительных магнитометров с 1мин и 1с временным разрешением, предоставляемых сетью INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org>). Регистрация SC определяется по резкому увеличению горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля, которое происходит на всей Земле и регистрируется всеми наземными магнитными обсерваториями, зарегистрированными в сети INTERMAGNET. При этом нарастание геомагнитного поля начинается внезапно, но время возрастания величины поля может отличаться и зависит от местного времени наблюдения, его амплитуда также может быть различной и зависит от условий в солнечном ветре [Акасофу, Чепмен, 1975]. Информация по времени регистрации SC усредняется по данным приэкваториальных магнитных станций и фиксируется в каталоге SC сети INTERMAGNET в формате “часы:минуты” UT.

Отметим, что в сети INTERMAGNET всего используются данные от 154 магнитных станций, проводящих наблюдения с 1-мин временным разрешением, однако для каждого SC-события доступно разное их количество. Кроме этого часть магнитных станций из этого списка предоставляют 1-с данные, общее число которых также различно для каждого отдельно рассматриваемого SC-события. Так, например, для события от 16 июля 2017 г. данные с 1-мин временным разрешением в сети INTERMAGNET есть для 132 магнитных станций, а 1-с данные предоставляют только 68 магнитных станций: PAF, BOX, WIC, SBA, BDV, TAM, HLP, UPS, HER, CTA, KNY, NUR, HRN, PEG, PHU, GUA, MBO, DLT, LYC, KOU, AMS, LRM, CYG, ASP, KAK, BSL, MAW, MMB, PPT, CKI, GNG, LZH, HBK, HON, BEL, DRV, FRD, SJG, BRD, BOU, API, FRN, CZT, EBR, OTT, TUC, VIC, KDU, IPM, STJ, MEA, NEW, FCC, IQA, BLC, CSY, CNB, CBV, EYR, MCQ, YKC, ABK, SIT, BRW, RES, CMO, CLF, DED. Для события от 22 июня 2015 г. данные с 1-с временным разрешением предоставляют только 56 магнитных станций: KOU, TAM, GUA, SJG, API, FCC, HON, NUR, UPS, CLF, CYG, PEG, KNY, PAF, AMS, MMB, PPT, KDU, FRD, EYR, BEL, LRM, OTT, BDV, ASP, STJ, KAK, TUC, MCQ, CTA, BOU, CZT, IPM, GNG, EBR, CNB, NEW, FRN, MEA, HLP, DRV, YKC, SIT, MAW, BLC,

ABK, HRN, CBV, LYC, SBA, SHU, DED, CMO, BRW, IQA, RES.

Для двух отобранных нами для анализа SC-событий мы обработали общедоступные в сети INTERMAGNET данные магнитных обсерваторий как Северного, так и Южного полушарий Земли с секундным временным разрешением. В процессе анализа данные с секундным временным разрешением сопоставлялись с данными с минутным временным разрешением. Для каждого исследуемого SC-события из данных наблюдений H -компоненты геомагнитного поля для магнитной станции, для которой доступны 1-мин и 1-с данные, выделялся временной диапазон в пределах ± 5 мин от момента регистрации SC, определенного по 1 мин данным. Напомним, для события от 22 июня 2015 г. за время начала SC принято время в 18:33 UT, а для события от 16 июля 2017 г. — 05:59 UT. Исследуемые SC-события связаны с геомагнитными бурями класса G4 и G2, соответственно. В качестве примера на рис. 1 показаны вариации магнитного поля на низкоширотной обс. Гонолулу (HON) для двух отобранных SC-событий от 22 июня 2015 г. и 16 июля 2017 г., построенные по минутным и по секундным данным. Такая же обработка была выполнена для каждой магнитной обсерватории, где доступны данные с секундным временным разрешением для отобранных нами SC-событий. Далее в работе проводился анализ только 1-с данных наблюдений выделенного временного диапазона для каждой магнитной обсерватории.

Ниже обсуждается, как начало регистрации SC и MI зависят от географической широты и долготы магнитных станций. Для этого по 1-с данным наблюдений вариаций H -компоненты геомагнитного поля от UT мы определяли время начала регистрации SC и MI. Значения географической широты и долготы магнитных станций доступны в сети INTERMAGNET. Отрицательные значения широты φ присвоили данным наблюдений станций Южного полушария Земли, положительные значения — Северного полушария Земли. Дополнительно нас интересовало, насколько далеко каждая из станций отстоит от “полуденной долготы”, т.е. географической долготы на освещенном Солнцем полушарии Земли, где в момент начала SC наблюдался полдень. Используя значения географической долготы каждой станции и время начала SC в UT, определялась долгота λ положения магнитной станции относительно “полуденной долготы”, на которой в момент прихода к Земле MKBM наблюдался полдень по местному времени $t = 12:00$ LT. Так, если станция располагалась на момент начала SC

на “полуденной долготе”, то $\lambda = 0^\circ$. При этом, если станция находилась восточнее “полуденной долготы”, то λ принимает значения $(-180^\circ; 0^\circ)$, где значения $\lambda = (-180^\circ; -90^\circ)$ соответствуют положению станции на неосвещенной Солнцем полушарии Земли. Соответственно, если магнитная станция на момент начала SC расположена западнее “полуденной долготы”, то $\lambda = (0^\circ; 180^\circ)$, где значения $\lambda = (90^\circ; 180^\circ)$ также следует относить к станциям, расположенным на ночной стороне Земли.

Поскольку в работе обсуждаются численные зависимости регистрации SC как функции географической широты/долготы и Всемирного времени, обсудим более подробно используемую нами методику определения времени начала регистрации SC и MI из данных наблюдений с 1-с временным разрешением H -компоненты геомагнитного поля $H(t)$ на примере анализа данных наблюдений $H(t)$ двух магнитных обсерваторий в SC-событии от 22 июня 2015 г. — Martin de Vivies Amsterdam Island (AMS) и Hornsund (HRN) (см. рис. 2 и рис. 3). Данные геомагнитных наблюдений станцией HRN в этом случае отличаются от AMS тем, что MI предшествует более слабое возмущение H -компоненты магнитного поля обратного знака, называемое предварительным импульсом PI.

Для определения моментов начала регистрации магнитными станциями SC и MI производилось предварительная нормировка данных $H(t)$. На первом ее этапе вычиталась фоновая составляющая. Для этого на исходных данных $H(t)$ выделялся диапазон значений в пределах ± 5 мин от

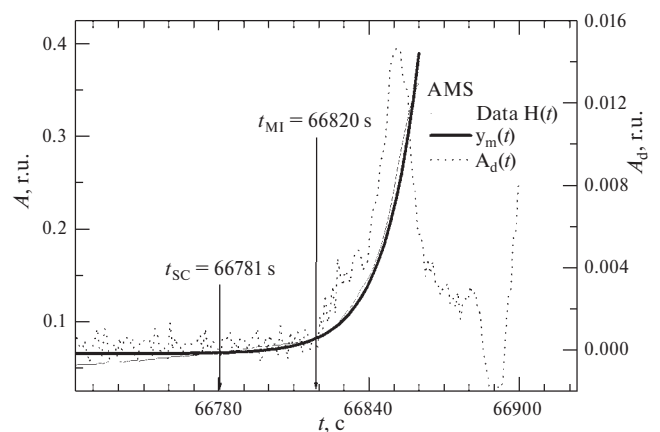


Рис. 2. Зависимость нормированной горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля $H_n(t)$, аппроксимирующей функции $y_m(t)$ и частной производной $A_d(t)$ от $H_n(t)$ по времени для станции AMS. Указаны моменты времени начала регистрации SC t_{SC} и MI t_{MI}

времени начала SC по данным с 1-мин разрешением. Затем на выделенном интервале времени до момента начала SC определялось минимальное значение, которое вычиталось из исходных данных. На следующем этапе выполнялась нормировка $H(t)$ на выделенном интервале в каждый момент времени t на максимальное значение $H_{\max}$. В некоторых случаях при высоком уровне шумов на выделенном интервале исходных данных $H(t)$ производилось их сглаживание методом скользящего среднего по трем точкам. Полученную в результате нормированную функцию обозначим $H_n(t)$. Определение моментов начала регистрации МІ выполнялось по кривой численной производной времени от $H_n(t)$ после нормировки — $H_d(t)$. Время начала регистрации МІ t_{MI} мы определяли, как момент начала роста (или минимума) производной по времени $H_d(t)$ (см. рис. 2).

Начало регистрации SC магнитной обсерватории определялось как начало медленного роста значений горизонтальной H -компоненты магнитного поля Земли. Этот момент времени мы выбрали в качестве времени t_{SC} начала регистрации SC на магнитной станции. При этом начало регистрации SC находили как визуально, так и из анализа численных производных по времени $H_d(t)$. Для некоторых станций, где на временных масштабах $\sim \pm 2$ мин от момента начала МІ нет четко выраженных экстремумов и/или выраженных участков подъема/спада значений горизонтальной компоненты геомагнитного поля (эле-

ментов тонкой структуры SC), но при этом H -компонента поля отчетливо принимает минимальное значение, SC находили визуально как момент начала роста значений H -компоненты поля. Часто для отдельных станций между началом регистрации SC и МІ располагался небольшой экстремум H -компоненты поля (для станции AMS на рис. 2 этот экстремум выражен очень слабо). В таком случае начало регистрации SC определяли по минимуму $H_d(t)$. В том случае, когда t_{SC} визуально или путем анализа $H_d(t)$ однозначно выделить не удавалось, мы аппроксимировали $H_n(t)$ на малых временных масштабах $\pm(1-2)$ мин от момента начала МІ аналитическими экспоненциальными функциями вида $y_m(t) = y_0 + A \cdot \exp((t-t_0)/\tau)$. Параметры аппроксимирующей функции подбирались так, чтобы обеспечить наилучшее согласие между поведением в зависимости от времени этой функции и измеряемой зависимости $H_n(t)$. Так, например, для станции AMS (жирная линия на рис. 2) параметры $y_m(t)$ составили $y_0 = 0.067$, $A = 0.12946$, $x_0 = 66846$ с, $\tau = 13$ с, при этом коэффициент корреляции составил $r^2 = 0.42$. На рис. 2 видно, что в момент времени $t < t_{MI}$ функция $y_m(t)$ пересекает $H_n(t)$. Это время мы определили как начало регистрации SC на исследуемой магнитной станции.

Как было сказано выше, для некоторых магнитных обсерваторий (речь идет, прежде всего, о высокоширотных станциях) в исследуемых SC-событиях основному импульсу предшествовал предварительный обратный импульс PI. Рассмотрим пример такого события по данным наблюдений магнитной станции HRN (см. рис. 3). Момент времени t_{SC} на рис. 3 определен как начало небольшого роста $H_n(t)$ непосредственно перед началом резкого спада интенсивности горизонтальной H -компоненты поля. Момент начала регистрации PI находился по скачку производной $H_d(t)$. Момент начала регистрации МІ t_{MI} магнитной станцией определен как момент начала последующего резкого нарастания значений $H_n(t)$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 и рис. 5 показаны условия в межпланетном магнитном поле (ММП) и в солнечном ветре, а также геомагнитная активность на Земле, выраженная индексом $SYM-H$, связанная с появлением SC от 22 июня 2015 г. и 16 июля 2017 г., соответственно. Момент времени регистрации МУВ, а также области ударно-сжатой плазмы за фронтом ударной волны (SHEATH) и передняя граница магнитного облака (MC), отмеченные на рисунках стрелками, указаны согласно классификации событий в солнечном ветре в каталоге [Ермолаев и др., 2009]. MC для SC-события от 22 июня

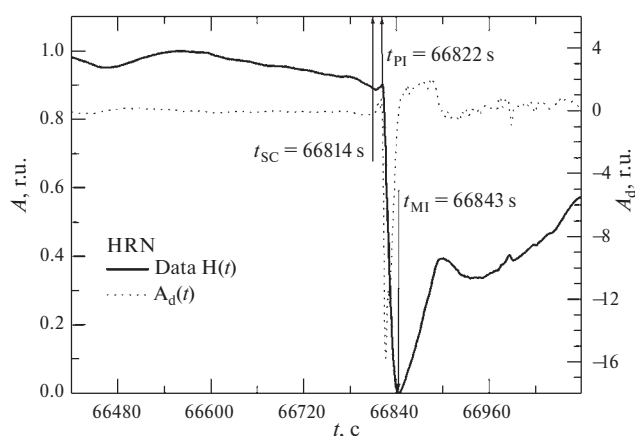


Рис. 3. Пример SC-события, включающего предварительный обратный импульс PI, по данным наблюдениям магнитной обсерватории HRN. Приведена зависимость нормированной горизонтальной H -компоненты геомагнитного поля $H_n(t)$ и частной производной $A_d(t)$ от $H_n(t)$. Указаны моменты времени начала регистрации SC t_{SC} , предварительного обратного импульса PI t_{PI} и главного импульса МІ t_{MI} .

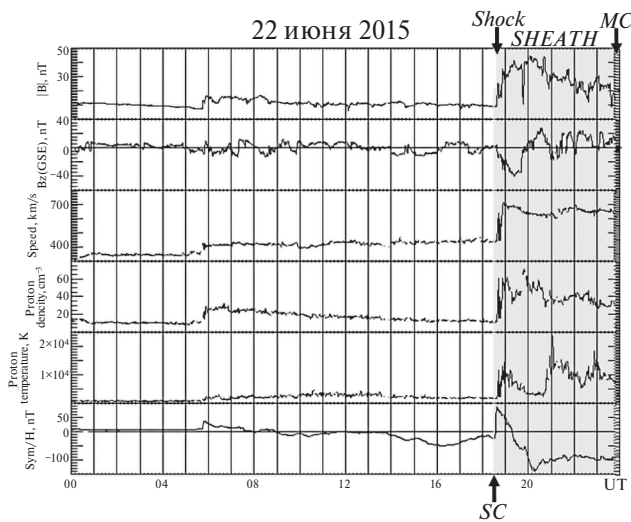


Рис. 4. Условия в межпланетном магнитном поле (ММП) и в солнечном ветре, а также геомагнитная активность на Земле для 22 июня 2015 г. Сверху вниз: вариации модуля поля $|B|$ и $B_z(GSE)$ компоненты поля, солнечного ветра (скорости V , плотности N_p протонов, протонной температуры T) и индекса буревой активности на Земле SYM/H (одноминутного аналога индекса Dst). Стрелкой показан момент, когда наблюдались SSC (SI) вызванной приходом к Земле межпланетной ударной волны КВМ с источником формирования в Северном полушарии Солнца 21 июня 2015 г. 02:36 UT.

2015 г. начинается с началом новых суток, поэтому на рис. 4 его передняя граница указана условно.

Внезапное начало бури SC отражено резким скачком в индексе буревой активности $SYM-H$ (см. панель $SYM-H$ на рис. 4 и рис. 5). Заметим, что в событии 22 июня 2015 г. примерно в 05:48 UT была зарегистрирована еще одна МУВ, которой соответствовало SC небольшой амплитуды и которое не сопровождалось заметным геомагнитным возмущением. МУВ, наблюдавшаяся в 05:48 UT, не связана ни с одним наблюдавшимся КВМ, который мог бы быть ее источником, поэтому в нашей работе это событие не рассматривалось.

В исследуемых случаях амплитуда индекса $SYM-H$ достигала ~ 80 – 90 нТл, что соответствует высокому уровню плотности солнечного ветра N_p за фронтом МУВ в первом случае близкому к 60 cm^{-3} , а во втором — к 45 cm^{-3} . Отметим, что в обоих случаях импульс динамического давления, связанный с МУВ, был обусловлен, главным образом, относительно сильным увеличением плотности на её фронте.

Для выбранных событий были проанализированы данные с 1-с временным разрешением для

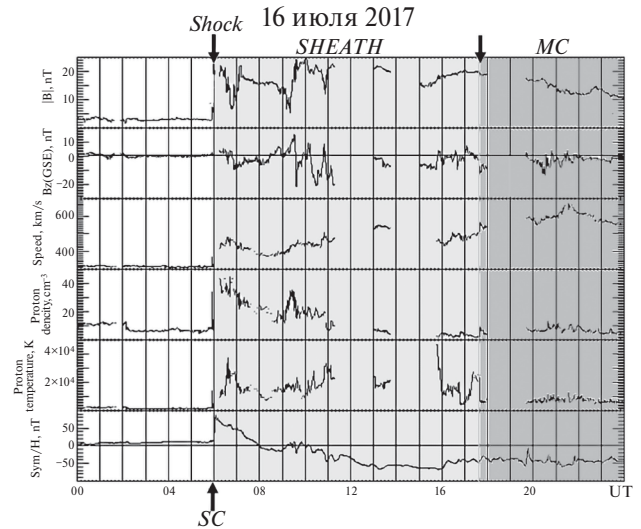


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но для 16 июля 2017 г., когда на земной поверхности наблюдались SSC, вызванные приходом межпланетной ударной волны КВМ с источником формирования в Южном полушарии Солнца 14 июля 2017 г. в 01:25 UT.

58 станций для события от 22 июня 2015 г. и 68 станций для события от 16 июля 2017 г., представленные в сети INTERMAGNET. По этим данным для каждой обсерватории было определено время начала SC, PI (если PI был зарегистрирован) и MI. С использованием полученных данных построены графики регистрации SC и MI как функций и географических координат регистрирующих их станций и Всемирного времени.

Сравним особенности регистрации SC и MI, связанные с приходом МКВМ, с источниками формирования в Северном и Южном полушариях Солнца, на рисунках 6–9, где ϕ — геомагнитная широта станции, λ — геомагнитная долгота, пересчитанная относительно “полуденной” долготы.

На рис. 6 для SC-события от 22 июня 2015 г. показана связь геомагнитной широты станции (a) и долготы λ (b) с моментами начала регистрации SC-события станциями, указанных на шкале UT. На рис. 7 аналогичные зависимости построены для моментов начала регистрации MI. На рисунках 8–9 показано тоже, что и на рисунках 6–7, но для SC-события от 16 июля 2017 г.

Во время SC-события от 22 июня 2015 г., инициированного в результате прихода к Земле МУВ, связанной с КВМ от 21 июня 2015 г. с источником в Северном полушарии Солнца, первой отреагировала станция в Северном полушарии Земли — Kourou (KOU, широта/долгота — ($5^\circ/307^\circ$)) в 18:32:50 UT, расположенная на момент наблю-

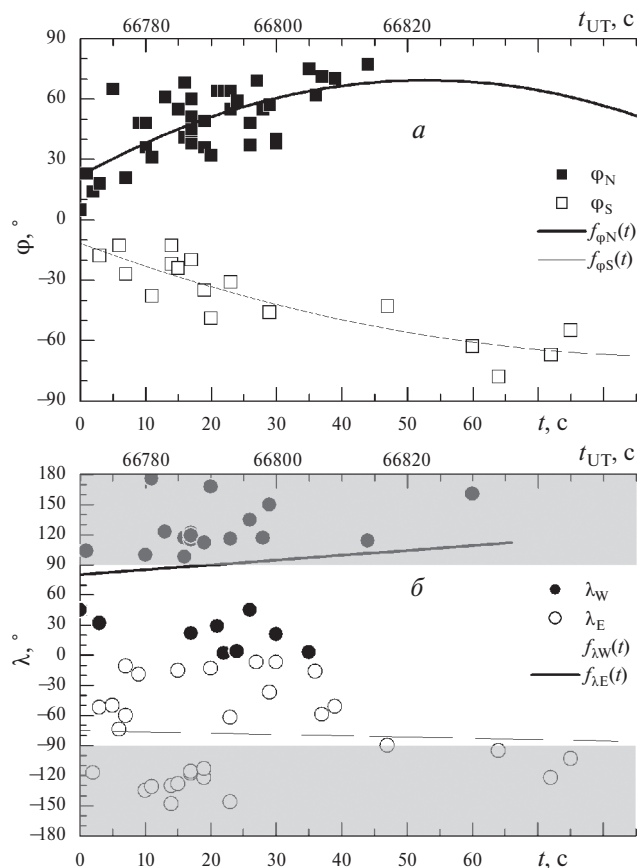


Рис. 6. Регистрация SC (а) — как функция географической широты φ и долготы относительной “полуночной линии” λ ; (б) — географической широты φ (а) — Всемирного времени (t — время в секундах, отсчитываемое от начала регистрации на первой станции из списка KOU; t_{UT} — Всемирное время в секундах от начала сут) для события от 22 июня 2015 г. (КВМ от 21 июня 2015 г.). На панели (б) заштрихованы области значений λ , соответствующие станциям на ночной стороне Земли.

дения в долготном секторе $\Delta\lambda$ от 0° до 90° . Другими словами, геомагнитные возмущения в земной атмосфере, связанные с приходом МКВМ к Земле, начинаются на станциях низких широт на освещенной Солнцем стороне Земли. Заметим, что различные аспекты SC-события от 22 июня 2015 г. детально обсуждались также в работе [Пархомов и др., 2018].

На рис. 6а отчетливо различимы тренды на зависимостях географической широты станции от момента начала регистрации SC-события на станциях. При этом, чем больше широта станции, тем позднее, в среднем, на этой станции регистрируется SC. Линия регрессии для зависимости географической широты и времени отдельно для

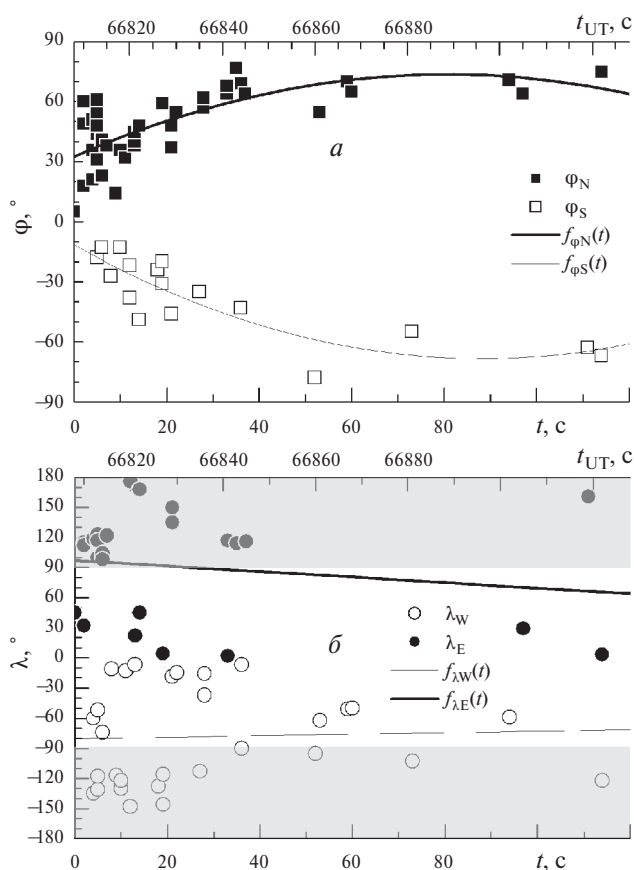


Рис. 7. То же, что на рис. 6, но для начала регистрации MI.

станций Северного полушария Земли принимает вид $f_{\varphi_N}(t) = -0.0171 \cdot t^2 + 1.8039 \cdot t + 21.862$ (коэффициент корреляции $r = 0.7$), для Южного полушария — $f_{\varphi_S}(t) = 0.0065 \cdot t^2 - 1.2055 \cdot t - 11.702$ (коэффициент корреляции $r = -0.88$). Этот результат противоречит результатам работ прошлых лет, где, например, утверждается, что SC регистрируется на несколько минут раньше в высоких широтах по сравнению с низкими (обсуждение этого факта и ссылки см. во Введении).

Тренды для зависимости разницы географической долготы станции от “полуночной” долготы со временем начала регистрации SC на станциях просматриваются слабо (см. рис. 6б). На рис. 6б показаны зависимости разницы между географической долготой станции и “полуночной” долготой $f_{\lambda}(t)$ от времени t ($f_{\lambda}(t)$). Видно, что зависимости $f_{\lambda}(t)$ менее монотонные, чем $f_{\varphi}(t)$. Зависимость $f_{\lambda}(t)$ для станций восточнее “полуночной линии” лучше всего удалось описать линией регрессии вида $f_{\lambda_E}(t) = -0.1283 \cdot t - 75.1274$ с коэффициентом корреляции $r = -0.05$,

а для станций западнее “полуденной долготы” — $f_{\lambda_W}(t) = 0.4821 \cdot t + 80.343$ (коэффициент корреляции $r = 0.11$) (см. рис. 6б). Единственно, что можно отметить по виду зависимостей $f_{\lambda}(t)$: после ~ 40 с начало момента регистрации SC на станции KOU геомагнитное возмущение регистрируется только на станциях на ночной стороне Земли.

Промежуток времени между регистрацией SC на первой и последней 56-ой станции из списка составил чуть более минуты $\Delta t_{SC} = 75$ с или 1 мин 15 с. От станции к станции промежуток времени между моментами начала регистрации SC изменяется от 0 до 13 с, в среднем составляет $\Delta T_{SC} \sim 1$ с. Промежуток времени между регистрацией возмущения на станции KOU, первой зарегистрировавшей SC, и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 10 с. Период времени между регистрацией SC на последней 56-ой станции Северного полушария Земли Resolute Bay (RES; географическая широта/долгота — $75^\circ/265^\circ$) из списка и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 65 с.

На рис. 7, где представлены графики регистрации MI как функции географических координат и времени, первой отреагировала на начало SC-события станция KOU в 18:33:28 UT Северного полушария Земли, находящаяся восточнее “полуденной линии”. Характер связи широты станций φ с началом регистрации MI (рис. 7а) несколько отличается от характера связи φ с началом регистрации SC. Тренд, согласно которому, чем больше широта станции, тем, в среднем, позднее появляется MI, наблюдается на станциях в Северной и Южной полушариях Земли в течение первых ~ 40 с. Позднее, в течение более минуты MI регистрируются на станциях, расположенные на близких широтах около $\pm 70^\circ$. Линия регрессии для зависимости географической широты и времени отдельно для станций Северного полушария Земли принимает вид $f_{\varphi_N}(t) = -0.0064 \cdot t^2 + 1.0267 \cdot t + 32.411$ (коэффициент корреляции $r = 0.72$), для Южного полушария — $f_{\varphi_S}(t) = 0.0073 \cdot t^2 - 1.2874 \cdot t - 11.712$ (коэффициент корреляции $r = -0.85$). Этот результат также, как и для случая начала регистрации SC демонстрирует, что MI регистрируется на несколько минут раньше в низких широтах по сравнению с высокими.

Что касается связи разницы долготы станции и полуденной долготы с моментом начала регистрации MI, то здесь, как и в предыдущем случае, заметные тренды не обнаруживаются. Так, зависимость $f_{\lambda}(t)$ для станций восточнее “полуденной линии” удалось описать линейной регрессии вида $f_{\lambda_E}(t) = 0.075 \cdot t - 80.324$ с малым значением коэффициента корреляции $r = -0.04$, а для станций

западнее “полуденной долготы” — $f_{\lambda_W}(t) = -0.2761 \cdot t + 97.148$ (коэффициент корреляции $r^2 = 0.16$) (см. рис. 7б). Станция KOU на момент наблюдения SC-события находилась в долготном секторе $\Delta \lambda$ от 0° до 90° , т.е. на полушарии Земли, контролируемом Солнцем, западнее “полуденной линии”. После ~ 40 с начало момента регистрации MI на станции KOU геомагнитное возмущение регистрируется, как на станциях на ночной стороне Земли, так и на дневной стороне.

Дополнительно отметим, что промежуток времени между регистрацией MI на первой и последней станциях из списка составило $\Delta t_{MI} = 114$ с или 1 мин 54 с. От станции к станции промежуток времени между моментами начала регистрации

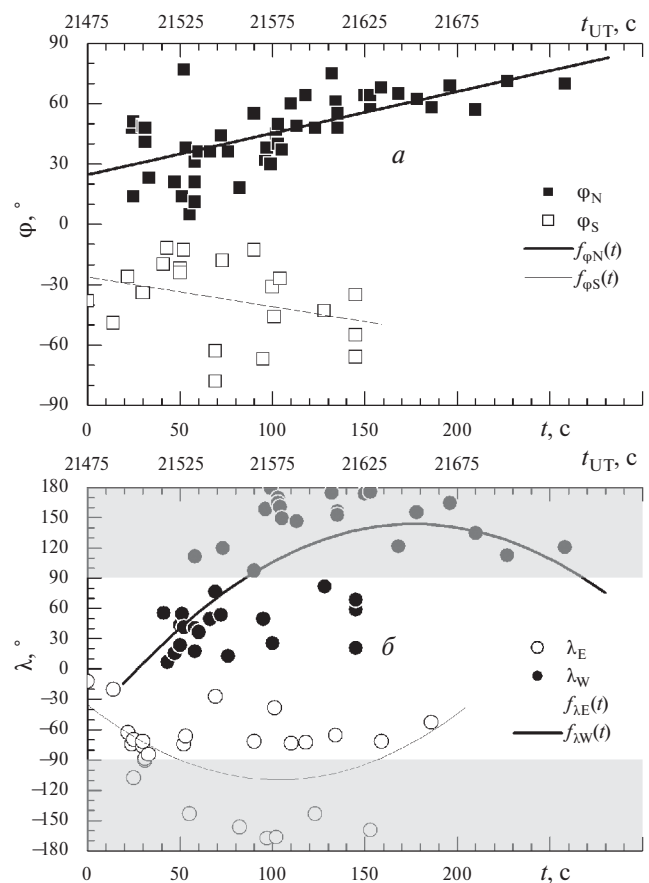


Рис. 8. Регистрация SC как функции географической широты φ (а) и долготы относительно “полуденной линии” λ (б) и времени (t — время в секундах, отсчитываемое от начала регистрации на первой станции из списка AMS; t_{UT} — Всемирное время в секундах от начала суток) для события от 16 июля 2017 г. (КВМ от 14 июля 2017). На рисунке (б) заштрихованы области значений λ , соответствующие станциям на ночной стороне Земли.

MI изменяется от 0 до 21 с, в среднем составляет $\Delta T_{MI} \sim 2$ с. Промежуток времени между регистрацией MI на станции KOU и временем регистрации SC по данным INTERMAGNET составил 28 с. Период времени между регистрацией MI на последней станции из списка (56-я станция) и временем начала регистрации SC по данным INTERMAGNET составил 142 с.

На рис. 8 и рис. 9 показаны графики регистрации SC и MI как функций географических координат и Всемирного времени для события от 16 июля 2017 г. На зависимостях широты станции φ от момента начала регистрации SC отчетливо просматривается линейный тренд в Северном полушарии $f_{\varphi N}(t) = 0.5798 \cdot t + 24.17$ (коэффициент корреляции $r = 0.64$) и довольно слабый тренд в Южном полушарии Земли $f_{\varphi S}(t) = -0.3611 \cdot t - 27.256$ (коэффициент корреляции $r = -0.33$) (см. рис. 8а). Первой отреагировала на начало SC-события станция Amsterdam Island (AMS) в 05:58:09 UT Южного полушария Земли, находящаяся восточнее “полуденной линии” (геогра-

фическая широта/долгота станции — $(-38^\circ/78^\circ)$, последней из списка — станция Deadhorse (DED; географическая широта/долгота — $(70^\circ/211^\circ)$) Северного полушария Земли. Напомним, что в этом событии источник формирования KBM и, как мы предполагаем, связанная с ним УВ были расположены в Южной полусфере Солнца.

На аналогичных зависимостях для MI линейные тренды наблюдаются как для станций Северного полушария Земли, так и для станций Южного полушария. Однако в последнем случае связь между широтой φ станции и началом регистрации MI более слабая по сравнению с соответствующей зависимостью для Северного полушария (см. рис. 9а). Так, на зависимостях широты φ станции от момента начала регистрации MI просматривается линейный тренд в Северном полушарии $f_{\varphi N}(t) = 0.223 \cdot t + 26.868$ (коэффициент корреляции $r = 0.66$) и очень слабый тренд в Южном полушарии Земли $f_{\varphi S}(t) = -0.0254 \cdot t - 35.337$ (коэффициент корреляции $r = -0.05$). Как и для случая регистрации SC, первой из списка станций, зарегистрировавшей MI в 05:59:69 UT, стала станция Южного полушария Земли AMS, последней из списка — станция DED.

На зависимостях разности географической долготы станции и “полуденной линии” λ от момента начала регистрации SC во всех случаях наблюдается слабый квадратичный тренд, причем более слабый для станций на долготах восточнее “полуденной линии” (см. рис. 8б). Так, для станций, расположенных на момент начала SC на долготах восточнее “полуденной линии” — $f_{\lambda E}(t) = 0.039 \cdot t^2 - 2.9156 \cdot t - 52.885$ (коэффициент корреляции $r = -0.42$), западнее — $f_{\lambda W}(t) = -0.0478 \cdot t^2 + 5.8656 \cdot t - 47.144$ (коэффициент корреляции $r = 0.67$). На рис. 8б видно, что станция AMS на момент наблюдения SC-события находилась в долготном секторе $\Delta \lambda$ от 0° до -90° , т.е. на освещенной Солнце восточной части полушария Земли. Спустя ~ 160 с с момента начала регистрации SC на станции AMS все станции, находящиеся западнее “полуденной линии”, находились на ночной стороне Земли. В то время как на станциях, находящихся восточнее “полуденной линии”, наблюдалось утреннее время (вблизи восхода Солнца).

На графиках регистрации MI как функции разности географической долготы станции и “полуденной линии” λ и времени t , можно выделить только слабые линейные тренды (см. рис. 9б). Так, для станций, расположенных на момент начала SC-события на долготах восточнее “полуденной линии” — $f_{\lambda E}(t) = 0.3812 \cdot t + 59.077$ (коэффициент корреляции $r = 0.31$), западнее —

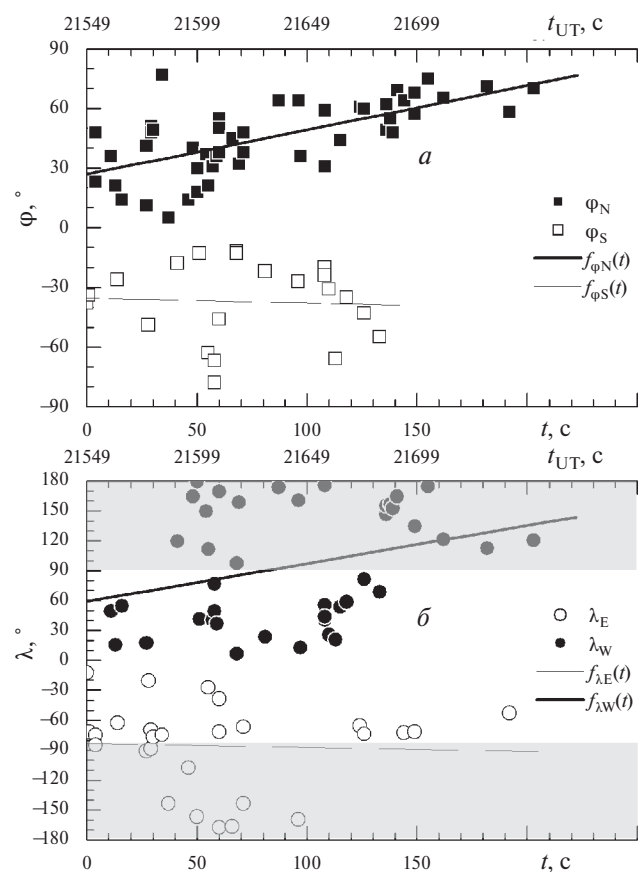


Рис. 9. То же, что на рис. 8, но для начала регистрации MI.

$f_{\lambda_W}(t) = -0.0398 \cdot t - 83.11$ (коэффициент корреляции $r^2 = -0.05$). Через ~ 150 с начало момента регистрации МІ на станции AMS все станции, находящиеся западнее “полуденной линии”, находились на ночной стороне Земли. Тогда как местное время на станциях, находящиеся восточнее “полуденной линии” к этому моменту времени, соответствовало утренним часам.

Из рис. 8 и рис. 9 следует, что, в среднем, регистрация SC и МІ для события от 16 июля 2017 г. начинается раньше на низких широтах на дневной стороне на Земле и позже на высоких широтах. Также отметим, что от станции к станции промежуток времени ΔT_{SC} между моментами начала регистрации SC изменяется от 0 до 31 с, в среднем составляет ~ 4 с. Промежуток времени между наблюдениями начала регистрации SC на первой и последней 68-ой из списка станций для данного события составил $\Delta t_{SC} = 258$ с или 4 мин 18 с. Промежуток времени между моментами начала регистрации МІ изменяется от 0 до 20 сек, в среднем составляет $\Delta T_{MI} \sim 3$ с. Промежуток времени между наблюдениями начала регистрации МІ на первой и последней станции для данного SC-события составил $\Delta t_{MI} = 202$ с или 3 мин 22 с.

Промежуток времени между регистрацией возмущения на станции AMS, первой зарегистрировавшей SC-событие от 16 июля 2017 г., и временем начала SC по данным INTERMAGNET (05:59 UT) составил 51 с. Период времени между регистрацией SC на последней 68-ой станции DED и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 193 с. Промежуток времени между регистрацией МІ на станции AMS и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 9 с. Период времени между регистрацией МІ на последней станции из списка (68-я станция) и временем начала SC по данным INTERMAGNET составил 212 с.

Причина обнаруженных закономерностей регистрации SC и МІ на магнитных обсерваториях как функций их географических координат и Всемирного времени, по-видимому, заключается в неизвестных нам пока особенностях распространения возмущений в магнитосфере, возникших после воздействия на нее межпланетной ударной волны. Можно предположить, что, опираясь на полученные нами зависимости $f_{\phi_N}(t)$ и $f_{\phi_S}(t)$, удастся получить более точные сведения о физических механизмах генерации SC и МІ.

Обнаруженные тренды $f_{\phi_N}(t)$ и $f_{\phi_S}(t)$ для регистрации SC и МІ как функций географической широты и Всемирного времени можно, например, объяснить, если предположить, что в результате воздействия МУВ на магнитосферу в ней возник-

кает МГД возмущение в области первого контакта фронта МУВ с магнитосферой, которое распространяется со скоростью, близкой к скорости поперечной магнитно-звуковой волны, по крайней мере, до нижнего основания ионосферы. Такое движение МГД-возмущения вглубь магнитосферы будет генерировать альфвеновские возмущения, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля Земли, имеющих примерно дипольный характер. В тех случаях, когда основания силовых линий на Земле будут совпадать с местом расположения магнитной станции, приход сюда альфвеновского возмущения приведет к появлению внезапного начала. При прохождении через магнитосферу МГД-возмущения раньше будут возмущаться внешние силовые линии, связывающие высокоширотные станции, позднее — внутренние, связывающие низкоширотные станции. Если время распространения МГД-возмущения от более далеких к более близким к Земле силовым линиям будет заметно меньше времени распространения альфвеновских волн по силовым линиям, приходящих на высокоширотные магнитные станции, тогда SC и МІ будут возникать раньше на низкоширотных станциях. Однако остается открытым вопрос о том, как такой механизм связан с известными механизмами генерации МІ, обсуждавшимися во Введении.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ связи географических координат магнитных обсерваторий и времени регистрации на них SC и МІ по данным с 1-с временным разрешением для двух SC-событий от 22 июня 2015 и 16 июля 2017 г. позволил сделать следующие выводы:

(i) Магнитные станции, которые первыми откликнулись на воздействие МУВ на магнитосферу, оказались в тех же полусферах на Земле, что и источники формирования КВМ в полусферах на Солнце, что можно объяснить небольшим отклонением траектории КВМ в межпланетном пространстве от радиального направления;

(ii) Регистрация SC и МІ на наземных магнитных станциях, расположенных на разных широтах ϕ , включая приэкваториальные и приполярные широты, вследствие воздействия МУВ на магнитосферу, не происходит одновременно;

(iii) Время регистрации SC и МІ на станциях на разных широтах ϕ отличаются от нескольких секунд до более одной минуты;

(iv) В исследуемых событиях на графиках зависимости регистрации SC и МІ как функций географической широты и времени обнаружены

тренды, согласно которым, в среднем, чем позже регистрируются SC и MI на станции, тем выше ее широта φ ;

(v) В обоих событиях SC и MI регистрируется сначала на станциях на освещенной Солнцем стороне Земли;

(vi) На зависимости регистрации SC и MI как функций разницы географической долготы станции с “полуденной долготой” λ и времени тренды просматриваются слабо как в целом для всего набора точек, так и отдельно для диапазонов долгот $\lambda = [-90^\circ; 90^\circ]$, $\lambda < -90^\circ$ и $\lambda > 90^\circ$;

(vii) Промежутки времени между началом регистрации SC на первой и на последней по времени станциях Δt различаются, что, возможно, связано с разной скоростью межпланетного КВМ и связанной с ним МУВ в двух рассмотренных событиях, так, для SC-события от 22 июня 2015 г. Δt_{SC} составило 75 с (при скорости МКВМ на орбите Земли $V_{МКВМ} = 610$ км/с), а для события от 16 июля 2017 г. — 258 с (при скорости $V_{МКВМ} = 520$ км/с);

(viii) Временной промежуток Δt_{MI} между началом регистрацией MI на первой и на последней по времени станциях для двух SC-событий также различен и составляет для первого SC-события 114 с, для второго — 202 с.

Мы планируем продолжить исследование зависимостей времени регистрации SC и MI в связи с приходом на орбиту Земли межпланетных ударных волн, связанных с КВМ, как функции географической широты/долготы и Всемирного времени на большей выборке событий. Предполагается более детально изучить влияние свойств КВМ, как источников МУВ, на характер указанных зависимостей.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИЗМИРАН и Basic Research Program II.16., а также частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00150.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны научным группам проектов SOHO и SDO за возможность доступа к материалам наблюдений. Авторы также благодарят Пархомова В.А. и Кузнецова В.Д. за полезные обсуждения работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

— Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. 2 часть. Перевод с англ. М.: Изд-во «Мир», 512 с. 1975.
— Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. ис-

след. Т. 47. № 2. С. 99–113. 2009. <https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>

— Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г., Суворова А.В., Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Козелов Б.В. Глобальный импульсный всплеск геомагнитных пульсаций в частотном диапазоне 0.2–5 Гц, как предвестник внезапного начала геомагнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. // Космич. исслед. Т. 55. № 5. С. 323–336. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0023420617050016>

— Пархомов В.А., Бородкова Н.Л., Яхнин А.Г. и др. Два типа отклика магнитосферы в геомагнитных пульсациях Psc на взаимодействие с межпланетными ударными волнами. // Солнечно-земная физика. Т. 4. № 3. С. 68–83. 2018. <https://doi.org/10.12737/szf-43201808>

— Пилипенко В.А., Браво М., Романова Н.В., Козырева О.В., Самсонов С.Н., Сахаров Я.А. Геомагнитный и ионосферный отклики на межпланетную ударную волну 17 марта 2015 г. // Физика земли. № 5. С. 61–80. 2018. <https://doi.org/10.1134/S1069351318050129>

— Araki T. A physical model of the geomagnetic sudden commencement // Geophysical Monograph, V. 81. P. 183–200. 1994. <https://doi.org/10.1029/GM081p0183>

— Beland J., Small K. Space weather effects on power transmission systems: The cases of Hydro-Quebec and Transpower New Zealand Ltd. Effects of Space Weather on Technology Infrastructure, Kluwer, Dordrecht, Netherlands / ed. Eaglis I.A. P. 287–299. 2004.

— Brueckner G.E., Howard R.A., Koomen M.J., Korendyke C.M. The large angle spectroscopic coronagraph (LASCO) // Solar Physics. 162. P. 357. 1995.

— Chapman S., Bartels J. Geomagnetism, Vol. I: Geomagnetic and Related Phenomena. London: Oxford Univ. Press, 1940a.

— Chapman S., Bartels J. Geomagnetism, Vol. II: Analysis of the Data, and Physical Theories. London: Oxford Univ. Press, 1940b.

— Burlaga L.F. and Ogilvie K.W., Causes of sudden commencements and sudden impulses // J. Geophys. Res. V. 74. P. 2815. 1969.

— Curto J.J., Araki T., Alberca L.F. Evolution of the concept of Sudden Storm Commencements and their operative identification // Earth Planets Space. V. 59. i–xii. 2007a. <https://doi.org/10.1186/BF03352059>

— Curto J.J., Cardús J.O., Alberca L.F., Blanch E. Milestones of the IAGA International Service of Rapid Magnetic Variations and its contribution to geomagnetic field knowledge // Earth, Planets and Space. V. 59. P. 463–471. 2007b.

— Domingo V., Fleck B., Poland A.I. The SOHO Mission: an Overview // Solar Phys. 162(1–2). P. 1. 1995.

— Fainshtein V.G., Ivanov E.V. Relationship between CME Parameters and Large-Scale Structure of Solar Magnetic Fields // Sun and Geosphere. V. 5. N. 1. P. 28–33. 2010.

— Ferraro V.C.A., Parkinson W.C., and Unthank H.W. Sudden commencements and sudden impulses in geomagne-

- tism, Cheltenham, Tucson, San Juan, Honolulu, Huancayo and Watheroo // *J. Geophys. Res.* V. 56. P. 177–195. 1951.
- *Gerard V.B.* The Propagation of World-Wide Sudden Commencements of Magnetic Storms // *Journal of Geophysical Research.* V. 64. Issue 6. P. 593–596. 1959.
- *Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Stenborg G., Xie G., Mäkelä P., Vourlidas A.* A Catalog of Halo Coronal Mass Ejections from SOHO // *Earth Moon Planet.* V. 104. P. 7–16. 2010.
- *Hundhausen A.J.* Coronal expansion and solar wind. Berlin: Springer-Verlag Heidelberg New York, 1972.
- *Kim S.-I., Kim K.-H., Kwon H.-J., et al.* SC-associated electric field variations in the magnetosphere and ionospheric convective flows // *J. Geophys. Res.: Space Physics.* V. 122. P. 11,044–11,057. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024611>
- *Lam M.M., Rodger A.S.* A case study test of Araki's physical model of geomagnetic sudden commencement // *Journal of Geophysical Research.* V. 106. Issue A7. P. 13135–13144. 2001. <https://doi.org/10.1029/2000JA900134>
- *Mayaud P.* Analysis of storm sudden commencements for the years 1868–1967 // *J. Geophys. Res.* V. 80. № 1. P. 111–122. 1975.
- *Nishida A.* Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere. Berlin: Springer-Verlag New-York-Hedelberg. 1978.
- *Nishimura Y., Kikuchi T., Ebihara Y., Yoshikawa A., Imajo S., Li W., Utada H.* Evolution of the current system during solar wind pressure pulses based on aurora and magnetometer observations // *Earth, Planets and Space.* V. 68. P. 144. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0517-y>
- *Parkhomov V.A.* Fine structure of the preliminary impulse of a sudden storm commencement // *Geomagnetizm i Aeronomiia* (ISSN 0016-7940), vol. 25, May-June 1985, p. 420–424. In Russian. 1985.
- *Russell C.T., Ginskey M., Petrinec S.M.* Sudden impulses at low latitude stations: Steady state response for southward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* V. 99 (A7). P. 13403–13408. 1994. <https://doi.org/10.1029/94JA00549>
- *Samsonov A.A., Sibeck D.G., Chen S., Singer H.J., Biernat H.K., Zolotova N.* An event of interplanetary shock - magnetosphere interaction: Comparison between spacecraft observations and MHD modeling. American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract id.SM13B-1799. 2010.
- *Sato T.* Sudden commencement of geomagnetic storms in high latitudes // *Rep. Ionosph. Space Res. Japan.* V. 15. P. 215. 1961.
- *Selvakumaran R., Veenadhari B., Ebihara Y., Kumar S., Prasad D.S.V.V.D.* The role of interplanetary shock orientation on SC/SI rise time and geoeffectiveness // *Advances in Space Research.* V. 59. N. 5. P. 1425–1438. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.12.010>
- *Sun T.R., Wang C., Li H., Guo X.C.* Nightside geosynchronous magnetic field response to interplanetary shocks: Model results // *J. Geophys. Res.* V. 116. A04216. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016074>
- *Sun T.R., Wang C., Zhang J.J., Pilipenko V.A., Wang Y., Wang J.Y.* The chain response of the magnetospheric and ground magnetic field to interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* V. 120. P. 157–165. 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JA020754>
- *Wang C., Li C.X., Huang Z.H., and Richardson J.D.* Effect of interplanetary shock strengths and orientations on storm sudden commencement rise times // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. P.L14104. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL025966>
- *Wang C., Li H., Richardson J.D., and Kan J.R.* Interplanetary shock characteristics and associated geosynchronous magnetic field variations estimated from sudden impulses observed on the ground // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A09215. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014833>
- *Williams V.L.* The simultaneity of sudden commencements of magnetic storms // *J. Geophys. Res.* V. 65. N. 1. P. 85–92. 1960.
- *Wilson C.R., Sugiura M.* Hydromagnetic Interpretation of Sudden Commencements of Magnetic Storms? // *Journal of Geophysical Research.* V. 66. Issue 12. P. 4097–4111. 1961.
- *Yamamoto M., Maeda H.* The simultaneity of geomagnetic sudden impulses // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 22. P. 212–215. 1960.
- *Yue C., Zong Q.G., Zhang H., Wang Y.F., Yuan C.J., Pu Z.Y., Fu S.Y., Lui A.T.Y., Yang B., and Wang C.R.* Geomagnetic activity triggered by interplanetary shocks // *J. Geophys. Res.* V. 115. P. A00I05. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010JA0115356>

Study of Sudden Magnetic Storm Commencement from Observations with Second Time Resolution

Iu. S. Zagainova^{1,*}, S. V. Gromov¹, L. I. Gromova¹, V. G. Fainshtein²

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

²Institute of Solar–Terrestrial Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS), Irkutsk, Russia

**e-mail: yuliazganova@mail.ru*

The article presents the results of a studying detection of the sudden commencement (SC) and main impulse (MI) of a magnetic storm as a function of the geographic coordinates of magnetic observatories and Universal Time, using modern data with second time resolution. The analysis was carried out for two events in which an interplanetary shock wave impacting the magnetosphere was associated with interplanetary coronal mass ejections (CMEs) with sources in different hemispheres of the Sun. The authors propose an approach to determine the time points of SC and MI detection. It is concluded that the SC and MI detection times may differ by several seconds to more than a minute at magnetic observatories located at different geographic latitudes and longitudes. For the studied events, the graphs of SC and MI detection as functions of the geographic coordinates of magnetic observatories and Universal Time revealed trends according to which, on average, the higher station the latitude, the later SC and MI are detected at the station.

УДК 550.3 + 530.182 + 533.951

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА ВЫСОТАХ ВЕРХНЕЙ И ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПРИ НАГРЕВЕ F_2 -СЛОЯ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ КВ-ДИАПАЗОНА

© 2024 г. В. Л. Фролов^{1, 2, *}, Е. С. Андреева^{3, **}, А. М. Падохин^{3, 4, ***}

¹Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского (НИРФИ ННГУ),
Нижний Новгород, Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет (КазФУ), Казань, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ),
Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН),
Москва, Троицк, Россия

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

**e-mail: es_andreeva@mail.ru

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

Поступила в редакцию 13.11.2023 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Проанализированы полученные методом низкоорбитальной спутниковой радиотомографии результаты измерений пространственной структуры искусственно созданных вариаций концентрации электронов на высотах верхней и внешней ионосферы Земли, возбуждаемых при модификации F_2 -слоя среднеширотной ионосферы мощными радиоволнами КВ-диапазона O -поляризации, излучаемыми нагревным стендом СУРА. Рассматриваются характеристики полости с уменьшенной концентрацией плазмы, образующейся на высотах вблизи высоты отражения мощной радиоволны, даков с увеличенной концентрацией плазмы, формирующихся на высотах внешней ионосферы за счет вытеснения плазмы из области сильного ее разогрева вдоль геомагнитного поля, различных волновых возмущений, индуцируемых на ионосферных высотах. Кроме того, исследованы свойства обнаруженных возмущений плотности плазмы особой природы, регистрируемых в вертикальном столбе над центральной частью возмущенной области ионосферы. Размеры исследуемых неоднородностей составляют от нескольких десятков до нескольких сотен километров, при этом область их регистрации выходит далеко за пределы области резонансного взаимодействия мощной радиоволны O -поляризации с ионосферной плазмой вблизи высоты ее отражения, где возбуждается наиболее интенсивная искусственная ионосферная турбулентность.

DOI: 10.31857/S0016794024030043, EDN: SMYMQK

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования особенностей взаимодействия мощного радиоизлучения с ионосферой Земли относятся к числу наиболее активно разрабатываемых сегодня направлений физики плазмы. Интерес к этой проблеме диктуется разнообразными возможными приложениями, связанными с нагревом плазмы высокочастотным электромагнитным излучением и с использованием генерируемой при этом искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) для диагностики плазменных процессов. Принципиальным моментом здесь является то, что взаимодействие интенсивного излучения с плазмой сопровождается развитием целого ряда фундаментальных нелинейных процессов, к которым относятся: параметрические неустойчивости плазмы и возбуждение интенсивной плазменной турбулентности, сильный

руемой при этом искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ) для диагностики плазменных процессов. Принципиальным моментом здесь является то, что взаимодействие интенсивного излучения с плазмой сопровождается развитием целого ряда фундаментальных нелинейных процессов, к которым относятся: параметрические неустойчивости плазмы и возбуждение интенсивной плазменной турбулентности, сильный

разогрев плазмы мощными электромагнитными волнами, модификация профиля плотности плазмы под действием сил светового и теплового давления, ускорение электронов до сверхтепловых энергий и генерация ими оптических излучений, генерация искусственного радиоизлучения (ИРИ), возбуждение электрических полей и токов в плазме, стимуляция искусственной инжекции (ИИ) энергичных электронов из радиационного пояса Земли и др. Изучение их природы и свойств в настоящее время выполняется с помощью хорошо развитых радиофизических методов исследования ионосферы с размещением измерительных приборов на земле и на борту космических аппаратов. Важно, что в таких экспериментах используются управляемые источники возмущений, которые индуцируются в ионосфере под воздействием мощной радиоволны (волны накачки, ВН), излучаемой с заданными характеристиками в течение выбранного интервала времени в известных геофизических условиях.

В настоящей работе представлен анализ результатов измерений пространственных структур ионизированной компоненты атмосферы с размерами $L \geq 30$ км, возбуждаемых на высотах верхней и внешней ионосферы при модификации ее F -области мощным КВ-радиоизлучением O -поляризации, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом СУРА. Эти измерения были выполнены методом низкоорбитальной спутниковой радиотомографии. Они проводились в различных геофизических условиях и касались изучения характеристик полости с уменьшенной концентрацией плазмы, образующейся в области сильного ее разогрева на высотах вблизи высоты отражения мощной радиоволны, дактов с увеличенной концентрацией плазмы, регистрируемых на высотах внешней ионосферы, характеристик различного типа волновых возмущений (ВВ), а также других крупномасштабных вариаций плотности плазмы, индуцируемых на ионосферных высотах. При этом в работе основное внимание уделяется изучению особенностей развития индуцированных нагревом ионосферы возмущений за пределами центральной части возмущенной области ионосферы ($VO_{\text{ц}}$), где происходит наиболее интенсивное взаимодействие мощной радиоволны O -поляризации с ионосферной плазмой, поглощается большая часть энергии ВН и происходит быстрая генерация различных компонент ИИТ (см., например, [Гуревич, 2007; Ерухимов и др., 1987; Фролов и др., 2007; Фролов, 2015, 2017; Черногор, 2014; Gurevich, 1978; Streltsov et al., 2018] и приведенные в них многочисленные ссылки на другие

публикации). Эта область расположена вблизи высоты отражения ВН и имеет размер по высоте от нескольких сот метров до ~ 50 км в зависимости от типа турбулентности; ее размер в горизонтальной плоскости определяется диаграммой направленности излучения ВН и пороговой мощностью генерации той или иной компоненты ИИТ. Индуцируемые в $VO_{\text{ц}}$ различные компоненты плазменных возмущений определяются генерацией первичной ИИТ, индуцируемой в результате прямого взаимодействия мощной радиоволны с плазмой.

Выполненные в последние годы исследования особенностей генерации ИИТ убедительно продемонстрировали, что вызванные нагревом F -области сильные возмущения ионосферной плазмы наблюдаются и далеко вне $VO_{\text{ц}}$: по высоте их генерация обнаруживается от $h \approx 60\text{--}120$ км (нижняя ионосфера) до высот $h \geq 1000$ км (внешняя ионосфера), в горизонтальной плоскости эти возмущения могут регистрироваться на расстояниях до 1000 км и больше от нагревного стенда. К ним относятся разного рода ВВ, возбуждаемые при периодическом и моноимпульсном режимах излучения ВН [Черногор, 2014], выпадения энергичных электронов из радиационного пояса Земли [Frolov and Troitsky, 2023], генерация дактов плотности плазмы [Фролов и др., 2016], генерация электрических токов на ионосферных высотах при развитии ИИТ [Фролов и др., 2021; Lukianova et al., 2019], генерация микроволновых излучений на ионосферных высотах [Троицкий и др., 2019] и др. Выполненные на стенде СУРА исследования позволили выделить новые механизмы генерации ИИТ, являющиеся следствием развития первичной турбулентности при модификации плазмы F -области ионосферы мощным КВ-радиоизлучением. Эти возмущения можно рассматривать как результат развития вторичной турбулентности, которая, в частности, отвечает за свойства плазменных возмущений, обнаруживаемых в атмосфере Земли на больших расстояниях от нагревного стенда [Frolov and Troitsky, 2023].

В разделе 2 работы приводится описание используемых в измерениях технических средств, методов проведения исследований и особенностей обработки полученных в них экспериментальных данных, анализ которых представлен в разделе 3. Обсуждение выполненных исследований и сделанные заключительные замечания составляют содержание ее 4-го раздела. В нем также сформулированы вопросы, еще требующие своего решения.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИЗМЕРЕНИЯХ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

2.1. Нагревный стенд СУРА

Рассматриваемые в работе эксперименты с использованием низкоорбитальной радиотомографии выполнялись в 2010–2017 гг. на среднеширотном нагревном стенде СУРА, который расположен около р/п Васильсурск в 120 км восточнее г. Н. Новгород (Россия); его географические координаты: 56.15° N, 46.1° E, параметр Мак-Илвейна $L \approx 2.7$. В них все три (в отдельных измерениях только два) модуля стенда излучали синфазно в диапазоне частот ВН $f_{\text{ВН}} = 4300\text{--}6720$ кГц. Эффективная мощность излучения стенда в режиме когерентного излучения всех трех его модулей составляла $P_{\text{эфф}} = PG = 80\text{--}160$ МВт, возрастая с увеличением частоты ВН (здесь P — генерируемая передатчиками стенда ВЧ-мощность, G — коэффициент усиления передающей антенны стенда). Во всех представленных в работе экспериментах использовались мощные радиоволны O -поляризации. Диаграмма направленности антенны стенда была в большинстве случаев наклонена к югу на 12°, чтобы обеспечить более эффективную генерацию ИИТ при излучении ВН в направлении “магнитного зенита”, когда радиоволна с учетом ее рефракции в ионосфере распространяется на уровне верхнего гибридного резонанса вдоль силовых линий геомагнитного поля [Гуревич и др., 2005; Гуревич, 2007; Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018]. Более полное описание стенда СУРА и его возможностей можно найти в статье [Беликович и др., 2007].

Во время проведения измерений модификация ионосферной плазмы над стендом начиналась, как правило, не меньше чем за 10–15 мин до пролета спутника через возмущенную магнитную силовую трубку, чтобы обеспечить возбуждение ИИТ достаточно высокого уровня. До этого стенд часто излучал мощные радиоволны в течение 1.5–3 часов в режиме периодического излучения ВН [10 ÷ 15 мин — излучение, 10 ÷ 15 мин — пауза] с целью генерации ВВ на ионосферных высотах. Ниже аналогичные режимы излучения ВН для краткости будут записываться в форме [+ (10 ÷ 15) мин, – (10 ÷ 15) мин] (или как [± (10 ÷ 15) мин] для режимов типа “меандр”). Конкретные режимы излучения ВН, ее частота и мощность приведены при анализе каждого рассматриваемого в работе сеанса измерений; там же приведены характеристики геофизических условий, в которых они проводились.

Проведение измерений на стенде СУРА всегда сопровождалось работой станции вертикального зондирования ионосферы CADY (Канада). Это позволяет отслеживать изменения критической частоты $F2$ -слоя ионосферы, вычислять высоту отражения ВН, определять наличие F -рассеяния (F_{spread}) и спорадического слоя E ($E_{\text{спор}}$) на ионограммах. По ионограммам, снятым во время работы стенда СУРА, можно также делать некоторые выводы о развитии различных компонент ИИТ [Фролов, 2017]: по уровню поглощения пробных радиоволн O -поляризации, зондирующих ВО ионосферы на частотах, близких к частоте ВН, — об уровне развития мелкомасштабных неоднородностей плотности плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp} \sim 1\text{--}50$ м; по уровню F_{spread} — об уровне развития неоднородностей плотности плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp} \sim 0.2\text{--}5$ км; по уровню рассеяния пробных радиоволн O - и X -поляризаций — об уровне развития неоднородностей плотности плазмы с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp} \sim 0.1\text{--}1$ км; по пропаданию концов ионограмм на частотах ≤ 2 МГц и кратных отражений — о появлении дополнительных ионизации и поглощения радиоволн в нижней (в D -области) ионосфере, которые определяются ИИ энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированной воздействием на ионосферу мощными радиоволнами; по появлению дополнительных следов на ионограммах — о появлении крупномасштабных искажений профиля концентрации плазмы в ВО ионосферы.

2.2. Метод низкоорбитальной радиотомографии

Исследования свойств искусственных ионосферных неоднородностей, которые анализируются в настоящей работе, были выполнены методом низкоорбитальной радиотомографии [Куницын и др., 2007] с использованием спутников “Парус” и CASSIOPE. Из-за существующих принципиальных ограничений (необходимости пересечения зондирующих лучей) этот метод не позволяет восстанавливать вариации плотности плазмы на высотах $h \leq 200$ км и $h \geq 800$ км (≥ 1200 км для спутника CASSIOPE с высотой орбиты до 1400 км). Для его реализации в окрестностях стенда СУРА была развернута цепочка из трех приемных пунктов (п. СУРА — (56.15° N, 46.1° E), п. Галибиха — (56.75° N, 45.6° E) и п. Сеченово — (55.21° N, 45.88° E)), в которых проводилась регистрация амплитуды и фазы сигналов ИСЗ на двух когерентных частотах ~ 150 и ~ 400 МГц. Это позволяет проводить измерения вариаций полного

электронного содержания на луче ИСЗ—приемник, по которым в свою очередь восстанавливается пространственное распределение плотности плазмы в ионосфере в плоскости цепочки приемных пунктов и орбиты спутника. Типичное пространственное разрешение подобных реконструкций составляло 15–20 км, что позволило исследовать неоднородности интересующих нас масштабов. Геометрия экспериментов подбиралась таким образом, чтобы можно было получать такие реконструкции над стендом СУРА.

В статье на рис. 1–5 полученные радиотомограммы (нижние панели) дополнены четырьмя их разрезами по высотам около 300, 400, 600 и 800 км (четыре верхние панели), чтобы дать более ясное представление о высотной зависимости характеристик вариаций концентрации плазмы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Общая характеристика выполненных экспериментов

Рассматриваемые в работе радиотомографические измерения были выполнены в 2010–2017 гг. в течение 24-го цикла солнечной активности: один сеанс измерений в 2010 г. во время минимума солнечной активности, 4 сеанса в 2011–2013 гг. в годы ее максимума, 6 сеансов в 2014–2015 гг. в годы ее уменьшения после максимума и 1 сеанс в 2017 г. близко к ее минимуму. Чаще всего измерения выполнялись в поздние вечерние и ночные часы (10 сеансов из 13), остальные 3 сеанса были выполнены в ранние вечерние часы в условиях сильной освещенности ионосферы Солнцем, когда имеет место большое линейное поглощение радиоволн в нижней ионосфере и, следовательно, более слабое развитие ИИТ по сравнению с измерениями в поздние вечерние и ночные часы. В измерениях в поздние утренние и полуденные часы не были обнаружены какие-либо значимые вариации плотности плазмы, поэтому в работе результаты этих сеансов не рассматриваются. Выполнение экспериментов большей частью вблизи максимума солнечной активности определялось тем, что в этих условиях критические частоты $F2$ -слоя ионосферы были достаточно высокие и имелась возможность проводить измерения в вечерние и ночные часы, используя для модификации ионосферы мощные радиоволны O -поляризации на минимально возможной для стенда СУРА частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц. Следует также отметить, что измерения в большинстве случаев были выполнены в спокойных геомагнитных условиях; только в трех случаях они выполнялись на стадии релаксации возмущений уже

при умеренных значениях индекса $K_p \sim 3$, но при еще повышенном уровне индекса авроральной электроструи AE до 300–500 нТл.

Среди тринадцати анализируемых в работе сеансов в трех случаях заведомо не было зарегистрировано на высотах выше максимума $F2$ -слоя ионосферы появление дактов с увеличенной относительно фоновой плотностью плазмы, искусственных ионосферных неоднородностей концентрации плазмы и генерации ВВ. Это имело место, когда модификация ионосферы проводилась: а) на высоких частотах $\text{ВН } f_{\text{ВН}} = 6720$ кГц в сильно освещенной ионосфере; б) при частотах ВН , равных или превышающих критическую частоту f_{oF2} ; в) когда время нагрева ионосферы перед пролетом спутника не превышало 3–5 мин. Все эти причины практически полностью отвечают найденным ранее в работе [Фролов, 2017] условиям отсутствия генерации интенсивной ИИТ, включая и генерацию дактов плотности плазмы [Фролов и др., 2016].

3.2. Характеристики полости с уменьшенной концентрацией плазмы

При выполнении условий оптимального нагрева ионосферы мощным КВ-радиоизлучением в ее F -области вблизи высоты отражения ВН регистрировалось, как правило, формирование полости с уменьшенной концентрацией плазмы за счет термодиффузионного ее перераспределения, сопровождающегося выносом плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Горизонтальные размеры этой полости определяются шириной пучка мощных радиоволн, составляя 50–100 км; ее размеры вдоль силовых линий геомагнитного поля могут достигать 150–250 км, завися от геофизических условий проведения измерений и уровня развития ИИТ в $\text{ВО}_{\text{ц}}$. Время ее развития составляет несколько минут, завися от мощности ВН и геофизических условий, время ее релаксации при этом может составлять 10–15 мин, достигая в некоторых случаях 30 мин [Фролов, 2015, 2017]. В поздние вечерние и ночные часы уменьшение концентрации плазмы в этой области при $P_{\text{эфф}} \approx 100$ МВт в благоприятных геофизических условиях может составлять до 30%. Эта полость обладает свойствами фокусирующей линзы [Фролов, 2015; Gurevich, 1978]. Характеристики этой полости раньше подробно рассматривались в публикациях [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 2015, 2017; Gurevich, 1978]. В работах [Milikh et al., 2010; Streltsov et al., 2018] было показано, что вынос плазмы из этой области является причиной формирования дакта с повышенной концентрацией плазмы на высотах внешней ионосферы.

В центральной части ВО ионосферы ($ВО_{\text{Ц}}$), где наблюдается уменьшение концентрации плазмы и развитие интенсивной ИИТ, имеет место генерация искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \sim 0.2\text{--}5$ км, которые отвечают за появление F_{spread} на ионограммах, мелкомасштабных неоднородностей с $l_{\perp} \sim 1\text{--}50$ м, отвечающих за аномальное ослабление (АО) пробных радиоволн в ВО ионосферы, и неоднородностей с $l_{\perp} \sim 50\text{--}200$ м, отвечающих за рассеяние электромагнитных волн с сохранением их поляризации [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 2017].

Выполненные исследования позволили установить, что вследствие эффекта “магнитного зенита” [Гуревич и др., 2005; Гуревич, 2007; Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018] внутри $ВО_{\text{Ц}}$ может выделяться особая область с более сильным разогревом плазмы и с более сильным уменьшением ее концентрации, а также с более интенсивными неоднородностями концентрации плазмы различных масштабов. Положение этой области (области “магнитного зенита”) определяется условием, что в ней мощная радиоволна O -поляризации распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля. Размер этой области по горизонтали составляет 30–50 км. В наших экспериментах транспорт энергии мощной радиоволны в эту область достигается наклоном диаграммы направленности антенны стенда на $12\text{--}16^\circ$ от вертикали на геомагнитный юг.

При нагреве плазмы мощной КВ-радиоволной как O -, так и X -поляризации с $P_{\text{эфф}} \geq 30$ МВт на высотах 130–180 км с увеличением температуры электронов и, как следствие этого, нарушением ионизационно-рекомбинационного баланса наблюдается рост концентрации N_e [Gurevich, 1978]. Это приводит к формированию на этих высотах области с повышенной концентрацией плазмы, которая играет роль дефокусирующей линзы [Гуревич и Шварцбург, 1973; Бойко и др., 1985; Gurevich, 1978]. При мощностях ВН ~ 100 МВт величина δN_e может составить 10–20%. При этом ослабление потока энергии мощной радиоволны на уровне ее отражения в $F2$ -слое может достигать до 10–20 дБ и больше, что существенно влияет на характер развития стрикционной и тепловой параметрических неустойчивостей и изменяет характер модификации ионосферной плазмы. Характерные времена развития и релаксации дефокусирующей линзы составляют 15–20 с.

Важным результатом наших недавних экспериментов явилось обнаружение генерации электрических токов в ионосфере при развитии крупномасштабных с $l_{\perp} \sim 10\text{--}100$ км [Фролов и др., 2021; Lukianova et al., 2019], которые могут оказы-

вать свое влияние на развитие и эволюцию ИИТ. Заметим также, что, когда перед пролетом спутника стенд длительное время работал в периодическом режиме излучения ВН (в режиме “менандр”), наблюдалась генерация ВВ, которые могут распространяться на 1000 км и более и вызывать турбулизацию ионосферной плазмы [Черногор, 2014] (см. раздел 3.4 работы).

В следующем разделе работы при анализе результатов радиотомографических измерений мы еще будем дополнительно останавливаться на анализе характеристик крупномасштабных изменений концентрации плазмы, вызванных нагревом F -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами.

3.3. Высотная характеристика дактов плотности плазмы

Условия формирования во внешней ионосфере дактов с увеличенной плотностью плазмы и их характеристики подробно исследовались в работе [Фролов и др., 2016] на основе измерения свойств плазменных возмущений бортовой аппаратурой низкоорбитального спутника DEMETER. Важными характеристиками дактов, которые позволяют верифицировать предложенные модели их образования, являются зависимости от высоты величины увеличения в них плотности плазмы и роста их размера L в поперечном к геомагнитному полю направлении. Спутниковые бортовые измерения этих характеристик имеют ограниченный характер, поскольку пересечение спутником возмущенной магнитной силовой трубки (или дакта плотности плазмы) происходит достаточно редко из-за малого (80–100 км) их поперечного размера и часто в неоптимальных для формирования дактов условиях. Кроме того, используемые для измерений немногочисленные низкоорбитальные спутники пересекают возмущенную трубку (дакт) только на высотах 400–1500 км и в разное время суток. Все это сильно ограничивает возможности получения достаточно полного объема экспериментальных данных относительно их высотных характеристик.

В настоящей работе представлены результаты выполненных в 2010–2017 гг. исследований характеристик дактов концентрации плазмы, индуцированных нагревом ионосферы мощными радиоволнами. Измерения проводились с использованием метода низкоорбитальной радиотомографии, позволяющего для спутников с высотой орбиты ~ 1000 км провести практически одновременные измерения величины вариаций концентрации плазмы в области высот 200–800 км. Всего за период проведения рассматриваемых в работе экс-

периментов было 4 сеанса, в которых безусловно регистрировалось формирование дактов с увеличенной концентрацией плазмы N_e , и один сеанс, когда обнаруживался дакт с уменьшенной концентрацией. В остальных сеансах условия были не совсем оптимальными для формирования дакта и его обнаружения.

На рис. 1 на примере одного из наиболее удачных сеансов измерений демонстрируются возможности предлагаемого метода [Kunitsyn et al.,

2012]. На нем (внизу) приведена радиотомограмма, полученная 18 августа 2011 г. в предполуденные часы в 18:48 UT (в 22:48 мск за 3 мин до окончания импульса излучения ВН) с использованием радиосигналов спутника COSMOS-2407, которая построена с помощью изолиний плотности плазмы, нормированных на 10^{12} эл/м³. На четырех панелях в верхней части рисунка сверху вниз приведены значения концентрации плазмы на высотах 300, 400, 600 и 800 км, что дает необ-

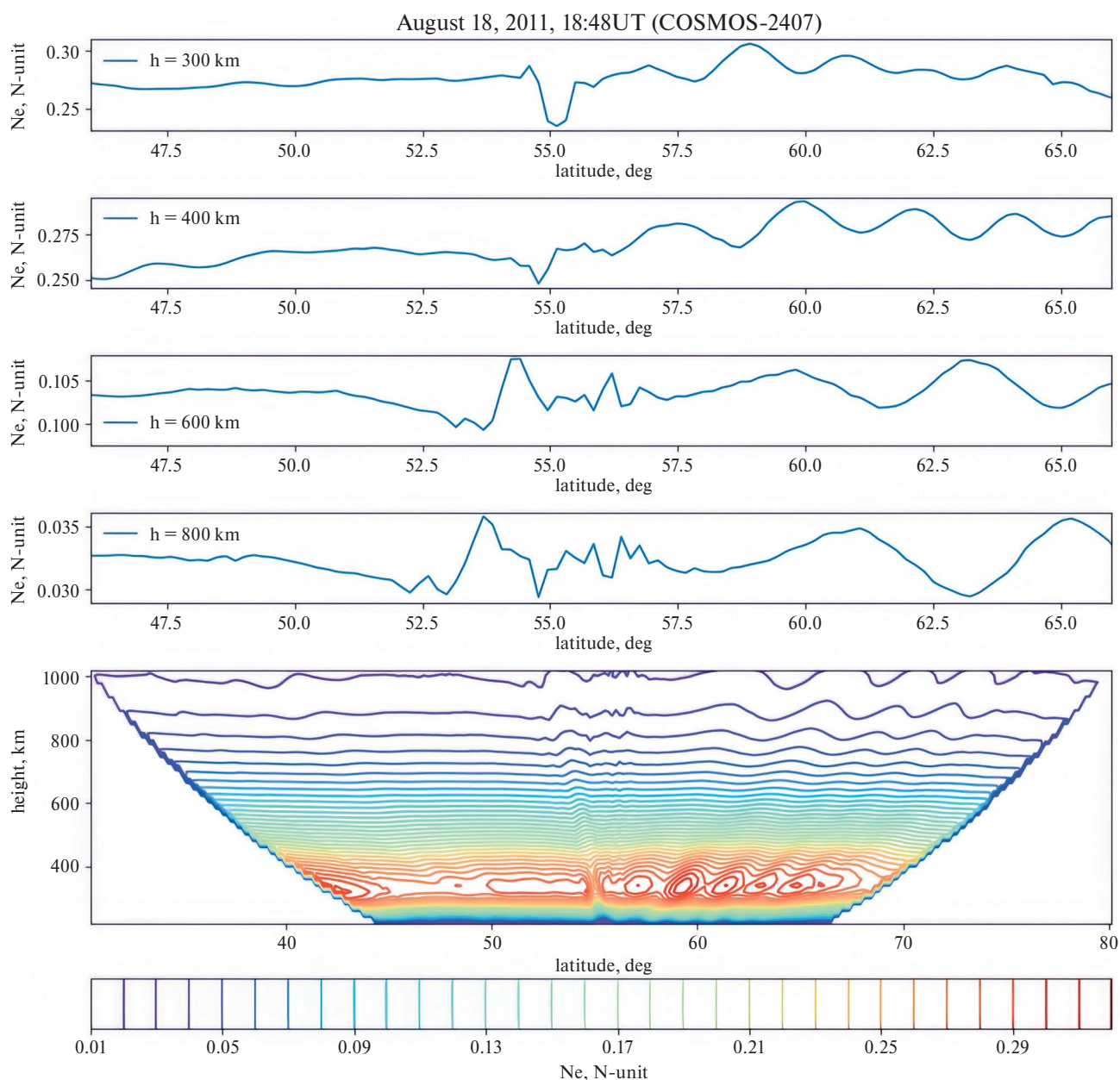


Рис. 1. Радиотомограмма, полученная 18.08.2011 г. в 22:48 мск (внизу). На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 300, 400, 600 и 800 км (сверху вниз).

ходимую информацию о характере ее изменения с высотой. Модификация ионосферы в этом сеансе измерений проводилась с 21:01 до 22:51 мск с использованием периодического излучения мощной радиоволны в режиме $[\pm 10 \text{ мин}]$; воздействие осуществлялось на частоте ВН 4785 кГц с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} \approx 50 \text{ МВт}$ при критической частоте $F2\text{-слоя } f_{\text{эфф}} \approx 5.2 \text{ МГц}$. Измерения выполнялись в спокойных геомагнитных условиях: суммарное суточное значение K_p -индекса $\Sigma K_p = 11^+$ при индексе $AE \approx 50 - 100 \text{ нТл}$. Ионозонд, расположенный на стенде СУРА, зарегистрировал возбуждение F_{spread} среднего уровня (с уширением ветвей ионограмм по частоте до $\sim 0.5 \text{ МГц}$), что указывает на достаточно большую эффективность взаимодействия мощной радиоволны с плазмой верхней ионосферы Земли и генерацию в $\text{ВО}_{\text{ц}}$ неоднородностей с поперечными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp}$ от нескольких сотен метров до нескольких километров. Максимальный угол возвышения спутника для всех трех используемых в этих измерениях приемных пунктов составлял около 85° , при этом лучи от приемников на спутник проходили через край диаграммы направленности излучения ВН по близким подионосферным траекториям. Предварительный анализ экспериментальных данных, полученных в этом сеансе измерений, был представлен в работах [Фролов и др., 2023; Kunitsyn et al., 2012].

Томограмма, представленная на рисунке 1, охватывает интервал широт $35^\circ - 75^\circ \text{ N}$ в плоскости орбиты спутника, что соответствует расстоянию его перемещения $\sim 4500 \text{ км}$ в приблизительно северо-южном направлении. Обработка экспериментальных данных, полученных в этом сеансе, показала, что на высотах вблизи высоты отражения мощной радиоволны $h_{\text{отр}} \approx 260 \text{ км}$ на широтах $\sim 55.1^\circ \text{ N}$ имеет место сильное уменьшение концентрации плазмы на величину до 20 %. Область с уменьшенной плотностью плазмы имеет протяженность $\sim 55 \text{ км}$ вдоль орбиты спутника и захватывает высотный интервал 250–400 км. На высоте отражения ВН центр этой области сдвинут к югу на $\sim 25 \text{ км}$ от положения центра диаграммы направленности излучения ВН, что определяется влиянием эффекта “магнитного зенита” [Гуревич, 2007; Гуревич и др., 2005; Streltsov et al., 2018].

В интервале высот 400–500 км имеет место переход от области генерации сильной первичной ИИТ, сильного разогрева плазмы в поле мощных радиоволн и формирования полости с уменьшенной плотностью плазмы, к области выше максимума $F2\text{-слоя}$, где наблюдается перенос плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля на высоты внешней ионосферы и формирование дакта

с повышенной плотностью плазмы. Это подтверждается тем, что полость с уменьшенной плотностью плазмы и дакт находятся на одних и тех же силовых линиях поля. По результатам измерений помощью спутников SWARM [Фролов и др., 2018] на высотах 450–500 км регистрируются большие вариации температуры электронов плазмы, величина которых уменьшается с ростом высоты и небольшие вариации ее плотности с характерным масштабом $l_{\perp} \sim 15 \text{ км}$. Важно, что на этих высотах не обнаруживаются дакты с увеличенной плотностью плазмы. Это может быть следствием двух причин. Во-первых, выносимая из области разогрева вдоль геомагнитного поля плазма (при сохранении постоянной величины абсолютного приращения ее плотности на высотах вблизи максимума $F2\text{-слоя}$) здесь не должна превышать величины относительного ее изменения $\sim 3 \%$, что лишь немного превышает уровень ее естественных флуктуаций и соответствует величине индуцированных нагревом искусственных вариаций плотности. Во-вторых, с учетом продолжающего влияния полости с дефицитом плотности плазмы, которое все еще обнаруживается до высот $\sim 450 \text{ км}$, увеличение N_c за счет выноса плазмы может оказаться скомпенсированным здесь ее уменьшением и оставаться за пределами разрешения в радиотомографических измерениях.

Как хорошо видно из рис. 1, выше $h \sim 500 \text{ км}$ начинает регистрироваться дакт с увеличенной плотностью плазмы. Из-за наклона геомагнитного поля широта оси дакта уменьшается до 54° N для $h \sim 800 \text{ км}$. Анализ представленной на рис. 1 томограммы показал, на высотах выше максимума $F2\text{-слоя}$ до высоты $h \sim 700 \text{ км}$ величина относительного приращения плотности плазмы в центре дакта слабо изменяется с высотой h , составляя $\sim 8 \%$; на больших высотах эта величина начинает даже несколько нарастать. С ростом высоты h наблюдается увеличение размера дакта вдоль орбиты ИСЗ (приблизительно поперек линий геомагнитного поля) от $L_{\perp} \sim 110 \text{ км}$ на высоте $h \approx 600 \text{ км}$ до $\sim 170 \text{ км}$ для $h \approx 800 \text{ км}$. Как это будет показано ниже, такое увеличение размера дакта не определяется увеличением с высотой поперечных размеров возмущенной магнитной силовой трубки за счет пространственного расхождения силовых линий геомагнитного поля.

На представленной на рис. 1 томограмме хорошо различимы волновые структуры (волновые возмущения, ВВ), возбужденные в ионосфере в условиях, когда до пролета ИСЗ через возмущенную магнитную силовую трубку в течение почти двух часов осуществлялось воздействие на

ионосферу мощными радиоволнами в режиме периодического $[\pm 10 \text{ мин}]$ излучения ВН. Анализ характеристик ВВ для рассматриваемого сеанса измерений приведен в работе [Kunitsyn et al., 2012]. Результаты выполненных на стенде СУРА других исследований свойств ВВ представлены в работах [Черногор, 2014; Черногор и Фролов, 2012, 2014, 2021; Черногор и др., 2015, 2019]. В разделе 3.4 мы дополнительно остановимся на анализе их характеристик.

Из рис. 1 также видно, что на высотах 500–800 км к северу от дакта в интервале широт $55\text{--}57^\circ \text{ N}$ регистрируется выделенная область с сильными флуктуациями плотности плазмы с масштабами $l_\perp \sim 50 \text{ км}$. Их характерной особенностью является то, что область их регистрации располагается в вертикальном столбе. Существование таких возмущений ранее не отмечалось в каких-либо известных нам публикациях. В разделе 3.5 мы специально рассмотрим свойств такого рода возмущений на основе всех полученных нами экспериментальных данных.

Представленный пример демонстрирует, что с помощью метода низкоорбитальной радиотомографии можно проводить изучение пространственной структуры вариаций плотности плазмы с масштабами $l_\perp \geq 15\text{--}20 \text{ км}$ в широкой области высот 200–800 км, которая включает в себя: а) область формирования на высотах 200–400 км полости с дефицитом плотности плазмы (фокусирующей линзы), из которой плазма выталкивается вверх и вниз вдоль силовых линий геомагнитного поля, б) область на высотах 400–500 км — переходная область от $\text{ВО}_\text{ц}$ к области переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу, в которой величина относительных вариаций температуры электронов T_e заметно превышает величину вариаций ее плотности, в) область внешней ионосферы, в которой на высотах $h \geq 500 \text{ км}$ регистрируется дакт с повышенной концентрацией плазмы внутри возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на $\text{ВО}_\text{ц}$. Установлено также, что внутри дактов обнаруживаются сильные флуктуации концентрации плазмы в диапазоне масштабов $l_\perp$ от десятка метров до километров и только слабые вариации T_e [Фролов и др., 2016; Фролов, 2017]. Особый интерес представляют возмущения плотности плазмы, которые обнаруживаются в вертикальном столбе на широтах $55\text{--}57^\circ \text{ N}$, практически прямо над стендом СУРА. К анализу их характеристик мы вернемся ниже в разделе 3.5. Все эти результаты имеют принципиальное значение для развития модели генерации в широкой области

пространства вокруг стенда СУРА различного рода крупномасштабных плазменных возмущений, возбуждаемых в ионосфере при ее модификации мощными радиоволнами.

Рассмотренные выше результаты сеанса измерений, который проводился в ночной ионосфере в спокойных геофизических условиях при оптимальном режиме генерации ИИТ, можно отнести к случаю, когда на радиотомограмме хорошо обнаруживается полость с уменьшенной плотностью плазмы на высотах 200–400 км и дакт с увеличенной плотностью плазмы на высотах выше 500 км. Важно, что центральные оси этих двух плазменных структур лежат на одной магнитной силовой линии. Это соответствует модели генерации дактов с увеличенной концентрацией плазмы за счет вытеснения плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля из области ее сильного разогрева [Демехов, 2022; Milikh et al., 2012; Streltsov et al., 2018; Vartanyan et al., 2012].

Представленная на рисунке 1 ситуация имеет место далеко не всегда. Это иллюстрирует рис. 2, на котором показаны результаты измерений в ночь с 8 на 9 сентября 2014 г. ($T^* = 00:45 \text{ мск}$ 9.09.2014 или $T^* = 20:45 \text{ UT}$ 8.09.2014) с использованием радиомаяков, установленных на канадском спутнике CASSIOPE, имеющим эллиптическую орбиту с апогеем 1410 км и перигеем 330 км. В рассматриваемом сеансе спутник находился от Земли на расстоянии, близком к максимальному. Эти измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 10^-$, $AE \approx 100 \text{ нТл}$) при критической частоте $f_{oF2} \approx 4.6 \text{ МГц}$. Стенд СУРА излучал на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300 \text{ кГц}$ радиоволны с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = 55 \text{ МВт}$ в режиме $[\pm 15 \text{ мин}]$ с 23:04 мск (8 сентября) до 00:19 мск (9 сентября), а с 00:34 до 00:54 мск (9 сентября) — в режиме $[+ 9 \text{ с}, - 1 \text{ с}]$. В последнем случае режим квазинепрерывного излучения ВН использовался для идентификации сигнала СУРЫ установленным на спутнике КВ-приемником. ВН отражалась на высоте $h_{\text{отр}} \approx 255 \text{ км}$. Максимальный угол наклона лучей на спутник из радиотомографических приемных пунктов был $\sim 85^\circ$, т.е. подионосферная траектория на высоте отражения ВН проходила близко к краю центральной части $\text{ВО}_\text{ц}$.

На высотах выше максимума $F2$ -слоя ионосферы (выше $h \sim 300 \text{ км}$) на рис. 2 четко видны две вытянутые вдоль линий геомагнитного поля возмущенные магнитные силовые трубки, в которых на высотах, близких к высоте отражения ВН, наблюдается формирование полостей с уменьшенной концентрацией плазмы с их координатами по широте $\sim 55.7^\circ \text{ N}$ (это отвечает положению

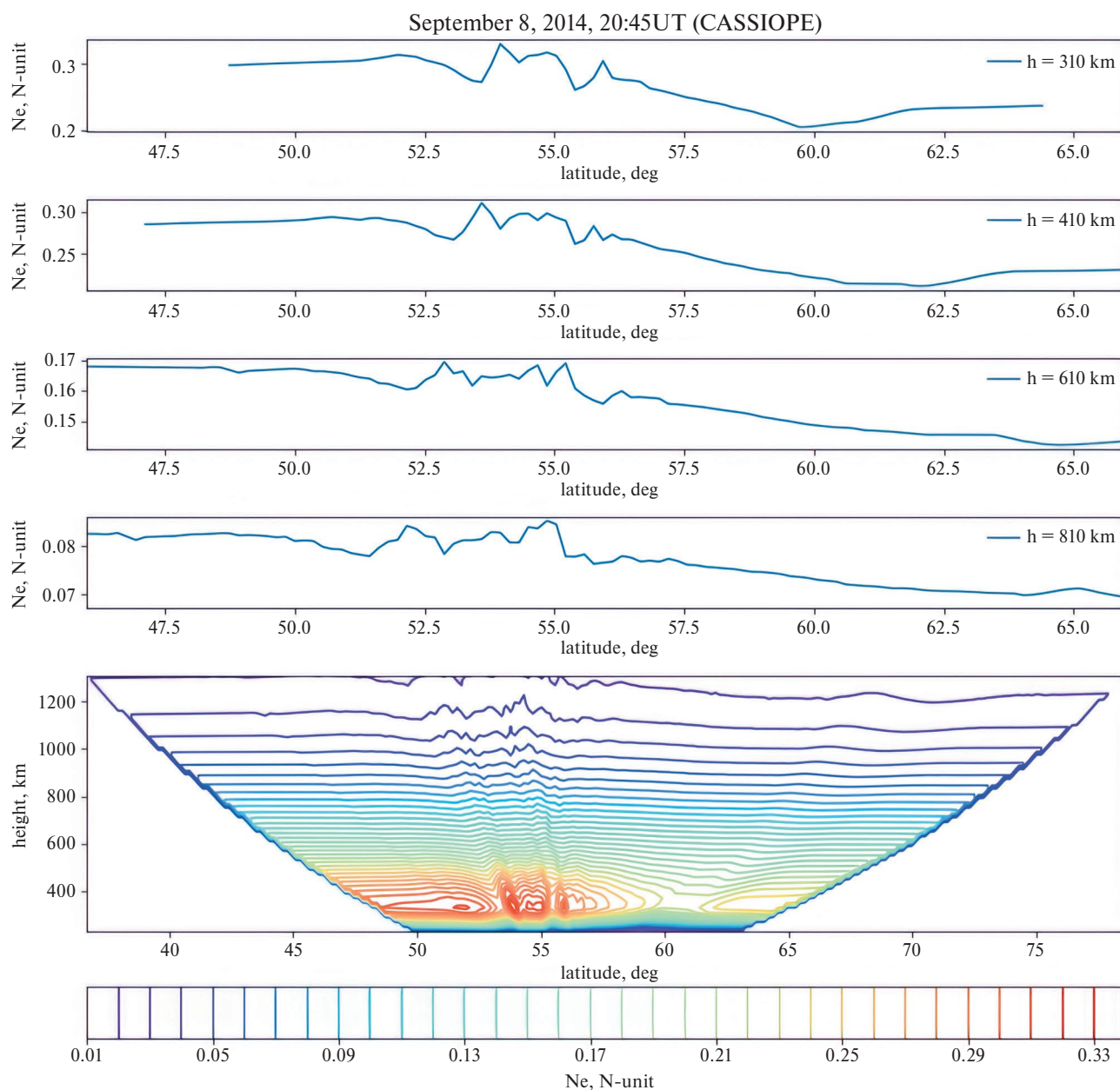


Рис. 2. Радиотомограмма, полученная 09.09.2014 г. в 00:45 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 310, 410, 610 и 810 км (сверху вниз).

центра диаграммы направленности излучения ВН) и $\sim 54.6^\circ$ N, которая соответствует области, расположенной приблизительно на 120 км южнее первой, заведомо уже далеко вне главного лепестка диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. На высоте $h_{\text{отр}} \approx 255$ км обе эти области имеют характерный размер поперек линий геомагнитного поля ~ 80 км. Образование такой двойной структуры возмущения плазмы, скорее всего, связано с появлением второй обла-

сти интенсивного ее разогрева, например, за счет локальной фокусировки мощной радиоволны на развитых во время нагрева искусственных неоднородностях концентрации плазмы, как это отмечалось в работах [Вертоградов и др., 2012; Урядов и др., 2008]. Из результатов этих измерений можно определить величину расхождения силовых линий геомагнитного поля над станцией СУРА, которая в интервале высот 600–800 км составляет ~ 8 км. Ясно, что такое слабое расхож-

дение силовых линий не может объяснить наблюдаемое увеличение на ~ 60 км ширины дакта $L_{\perp}$ в этом же интервале высот. Следовательно, основной вклад в расширение дакта с ростом высоты должно быть связано с его расплыванием поперек силовых линий геомагнитного поля (см. раздел 4.2).

На рис. 2 вдоль обеих возмущенных магнитных силовых трубок выше областей с уменьшенной концентрацией плазмы наблюдается формирование дактов с повышенной плотностью плазмы, в которых с ростом высоты регистрируется увеличение величины относительного приращения плотности: около 4 % и 5.5 % для высоты 600 км и 11 % и 21 % для высоты 800 км соответственно для трубок с минимумами на широтах 54.6° N и 55.7° N. Более сильное увеличение концентрации плазмы имело место в дакте, опирающемся на центр диаграммы направленности пучка мощных радиоволн. Важно отметить, что на высотах выше 800 км наблюдается постепенное увеличение концентрации плазмы в пространстве между этими дактами вместе с появлением здесь неоднородностей концентрации с $l_{\perp} \approx 30\text{--}50$ км, интенсивность которых увеличивается с ростом высоты. При этом на высоте $h \approx 1300$ км первоначальные дакты уже не выделяются на фоне этих флуктуаций. Поэтому можно говорить об их слиянии в единую область с высоким уровнем флуктуаций концентрации плазмы, размер которой вдоль орбиты спутника здесь составляет ~ 770 км.

Представленная на рис. 2 радиотомограмма является единственной в наших измерениях, поэтому образование второй области с сильным разогревом плазмы и развитием дакта следует относить к редкому событию.

Завершая этот раздел работы, представим результаты эксперимента, в котором нами единственный раз на высотах внешней ионосферы был зарегистрирован дакт с уменьшенной плотностью плазмы. Измерения проводились 21 августа 2010 г. в поздние вечерние часы (но в еще освещенной Солнцем ионосфере) в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 4^-$, $AE < 50$ нТл), когда луч на спутник COSMOS-2414 пересекал возмущенную магнитную силовую трубку близко к ее центру в $T^* = 20:24$ мск ($T^* = 16:24$ UT). Их результаты представлены на рисунке 3. В этом сеансе критическая частота f_{oF_2} была ~ 5.2 МГц. Стенд СУРА излучал с 20:00 мск в режиме [+ 3 мин, – 7 мин] на частоте $f_{\text{ВН}} = 4785$ кГц с эффективной мощностью $P_{\text{эфф}} = 80$ МВт; во время 7-минутных пауз каждую минуту дополнительно излучались 15-секундные импульсы ВН. Такой режим излучения ВН был связан проведением

одновременно с нашим другого эксперимента, в котором требовалось излучение дополнительных 15-секундных диагностических импульсов. Минимальный угол наклона лучей на спутник из приемных пунктов был $\sim 85^\circ$ N. ВН отражалась на высоте $h_{\text{отр}} \approx 230$ км. Во время модификации ионосферы на ионограммах вертикального зондирования наблюдалось пропадание O-моды на частотах $f \geq f_{\text{ВН}}$, что отвечало развитию АО и генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей концентрации плазмы в $\text{VO}_{\perp}$ ионосферы, но не наблюдалось развития искусственного F_{spread} , что отвечает отсутствию генерации среднемасштабных и крупномасштабных неоднородностей с $l_{\perp}$ от сотен метров до нескольких километров. Это могло быть связано с коротким (3 мин) временем нагрева ионосферы в условиях ее освещенности Солнцем. В целом, условия проведения измерений для формирования дакта и генерации искусственных неоднородностей концентрации плазмы на высотах внешней ионосферы были благоприятными за исключением, возможно, режима излучения ВН с коротким временем ее излучения при достаточно длительной паузе.

Из представленных на рис. 3 результатов измерений видно, что выше высоты отражения ВН (на высотах внешней ионосферы) имеет место уменьшение концентрации плазмы во всей возмущенной магнитной силовой трубке, идущей с широты $\sim 55.6^\circ$ N; на высоте 300 км уменьшение концентрации плазмы составляет около 20 %. Образование областей с повышенной концентрацией плазмы здесь не обнаруживается. Из полученной радиотомограммы можно заключить, что, по крайней мере, до высот ~ 900 км регистрируется уменьшение приблизительно на 10 % концентрации плазмы в возмущенной магнитной силовой трубке относительно концентрации фоновой плазмы. Отмечается также рост размера области уменьшения концентрации в поперечном к геомагнитному полю направлении с 65 до 100 км с ростом h от 400 до 800 км, несколько более слабое по сравнению с представленными на рисунке 2 результатами. Последнее может быть связано с обычно наблюдаемой более быстрой релаксацией искусственных плазменных возмущений в дневных условиях по сравнению с ночными [Ерухимов и др., 1987; Фролов, 2017; Streltsov et al., 2018].

Радиотомограмма на рисунке 3 также ясно демонстрирует существование отмеченной ранее вертикальной структуры с вариациями концентрации плазмы на широтах $\sim 57^\circ$ N, что на 0.85° больше широты стенда СУРА и на 1.3° больше

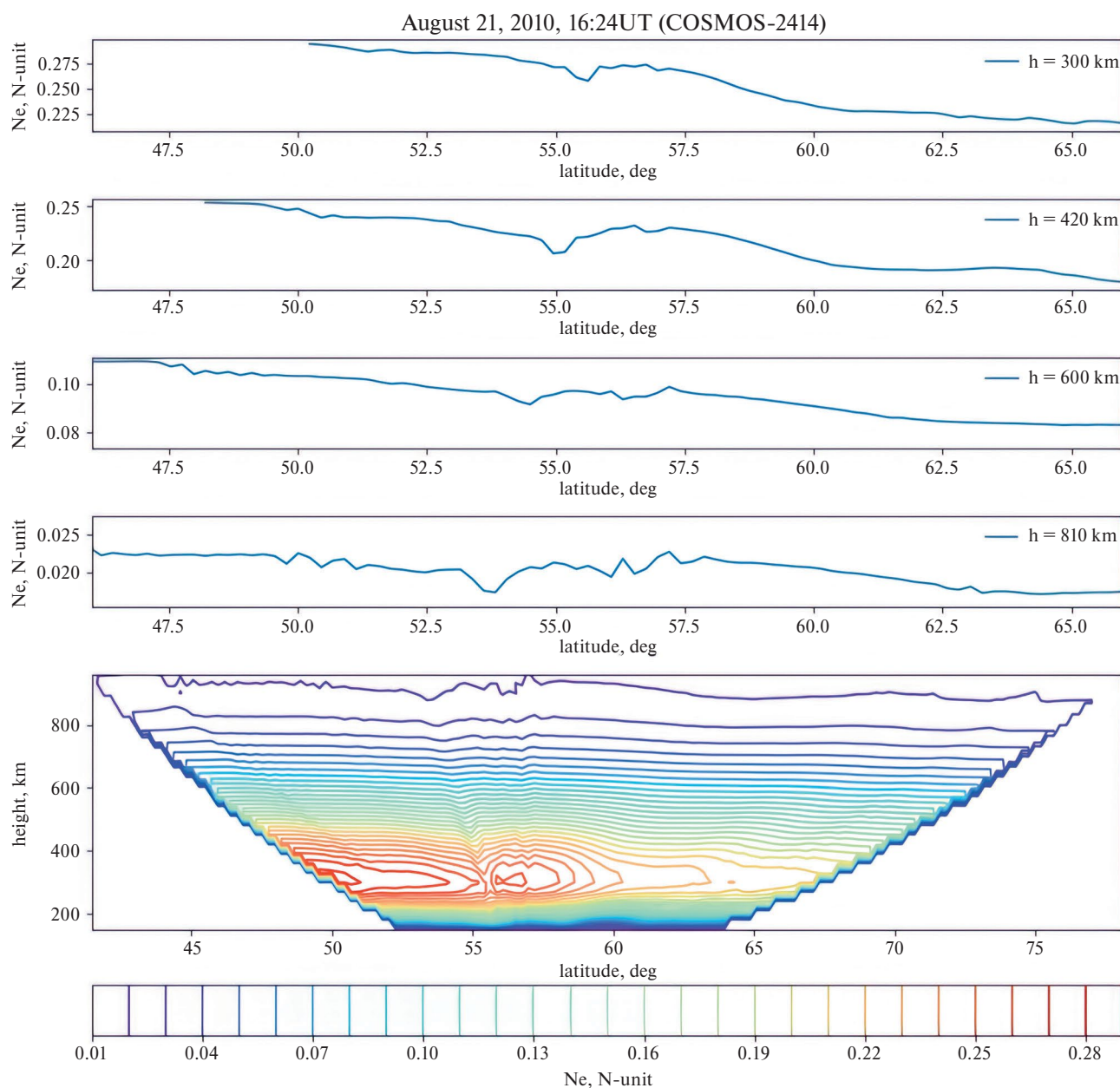


Рис. 3. Радиотомограмма, полученная 21.08.2010 г. в 20:24 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 300, 420, 600 и 810 км (сверху вниз).

широты центра $VO_{\text{ц}}$ на уровне высоты отражения ВН при наклоне диаграммы направленности ее излучения на 12° на юг.

3.4. Вариации концентрации плазмы, вызванные распространением искусственных ВВ в ионосфере

Как было показано в разделе 3.2 (см. рис. 1), большие возмущения концентрации плазмы на высотах внешней ионосферы могут вызываться

распространяющими здесь волновыми возмущениями (ВВ), которые наиболее эффективно возбуждаются при модификации ионосферы мощными радиоволнами в режиме их излучения с периодически изменяющейся мощностью. В наших измерениях использовалась амплитудная модуляция ВН в режиме “меандр”. В ряде случаев они могут генерироваться как отклик ионосферы на включение и выключение мощной радиоволны даже при моноимпульсном ее излучении.

Регулярные исследования характера генерации ВВ и их свойств проводятся на стенде СУРА с 2011 г., их результаты можно найти в работах [Черногор, 2014; Черногор и Фролов, 2012, 2021; Черногор и др., 2015, 2019]. Диагностика ВВ выполнялась с помощью когерентного радара, цифрового ионозонда, радара некогерентного рассеяния, а также при измерении полного электронного содержания (ПЭС) при зондировании ионосферы сигналами навигационных спутников GPS и GLONASS. Параллельно с нашими исследованиями аналогичные работы проводились на стенде HAARP (США) [Mishin et al., 2012; Pradipta et al., 2015]. На основе выполненного к настоящему времени большого объема экспериментальных исследований можно заключить, что ВВ, генерируемые при периодическом нагреве ионосферной плазмы, имеют следующие основные характеристики.

1) Генерация ВВ регистрировалась, если частота воздействия была меньше частоты Брента–Вайсяля, что соответствует периоду воздействия ≥ 10 мин в условиях проведения измерений на стенде СУРА. Эти ВВ уверенно регистрировались на высотах 100–500 км на расстоянии ~ 1000 км от стенда практически во все сезоны и в любое время суток. Ясно, что они могут распространяться и на большие расстояния. На более высоких частотах модуляции было зарегистрировано генерация инфразвуковых колебаний [Черногор, 2014].

2) Наиболее эффективным режимом излучения ВВ для генерации ВВ был режим, в котором для модификации ионосферы использовались радиоволны O -поляризации с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} \geq 40$ МВт в режиме $[\pm (15 \div 30)$ мин], которые излучались в направлении “магнитного зенита” для ВВ. Воздействие волнами O - или X -поляризации на нижнюю ионосферу не приводило к эффективной генерации ВВ. Все это указывает на то, что генерация ВВ происходит, главным образом, на высотах F -области ионосферы.

3) Сделанные оценки показали, что увеличение температуры нейтралов в таких ВВ может достигать 10–50° К.

4) Скорость распространения ВВ с периодами 20 – 60 мин на ионосферных высотах обычно составляла 300–500 м/с, увеличиваясь с ростом высоты.

5) Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов в поле ВВ на высотах 120–300 км достигала 1–10%, увеличиваясь с ростом высоты.

6) По своим характеристикам такие ВВ отвечают ВГВ с длиной волны около 200–250 км.

7) Наличие во время измерений умеренной геомагнитной бури не сильно влияло на характеристики генерируемых ВВ, если их уровень был выше уровня естественных волновых возмущений.

8) Отмечается (см. рис. 1), что часто пространственный период распространяющихся на север ВВ оказывается заметно меньше, чем для ВВ, распространяющихся на юг, составляя в этом сеансе 300 и 1100 км соответственно. Считается, что это связано с влиянием на генерацию ВВ направления нейтрального ветра на ионосферных высотах [Medvedev et al., 2017].

9) На основании выполненных экспериментальных исследований был предложен механизм генерации ВВ за счет изменяющегося во времени теплового давления нагретого нейтрального газа через их столкновение с разогретыми мощной радиоволной ионами [Григорьев, 1999; Mishin et al., 2012; Pradipta et al., 2015]. Однако, как это теперь стало ясно, разогрев нейтрального газа на ионосферных высотах возможен также за счет искусственной инъекции энергичных электронов на ионосферные высоты [Frolov and Troitsky, 2023]. Исследования по разработке модели на основе ИИ еще только предстоит выполнить.

10) Важно принимать во внимание, что ВВ, изменяя величину градиента концентрации плазмы на ионосферных высотах, могут стимулировать развитие неоднородностей концентрации на значительных расстояниях от стенда СУРА [Афраймович и др., 2006; Гершман, 1989; Pradipta et al., 2015]. С этим, в частности, может быть связана турбулизация ионосферной плазмы на больших расстояниях от нагревного стенда, работающего в режиме периодического нагрева ионосферы.

Завершая краткий обзор основных свойств ВВ, индуцируемых при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными КВ-радиоволнами, отметим, что при проведении измерений эти возмущения часто могли проявляться как усиление практически постоянно присутствующих на ионосферных высотах ВВ естественной природы [Шерстюков и др., 2016].

Выполненные эксперименты с импульсным излучением ВВ показали, что при ее включении и выключении обнаруживается генерация специфических уединенных квазипериодических возмущений, отличающихся по своим свойствам от ВГВ как по форме распространяющегося цуга колебаний, так и по скорости его распространения, которая составляет ~ 1600 м/с. Такая ско-

рость соответствует скорости распространения медленных МГД-волн [Черногор, 2014]. Заметим, что старты мощных ракет сопровождались усилением волновой активности в ионосфере со скоростью распространения одного из ее типов $V = 1.2\text{--}1.7$ км/с, отвечающей скорости медленных МГД-волн [Chernogor and Blaunstein, 2013]. Такие ВВ регистрировались на расстоянии $\sim 10\,000$ км от космодрома.

К настоящему времени по искусственной генерации различных типов ВВ собран обширный материал, который нуждается в своем отдельном рассмотрении и дополнительном обобщении полученных здесь результатов. Это, однако, выходит за рамки настоящей работы и будет выполнено в отдельной публикации.

3.5. Вертикальная структура плазменных возмущений

При рассмотрении представленных на рисунках 1–3 результатов экспериментов отмечалось, что над стендом СУРА на томограммах была обнаружена выделяющаяся вертикальная структура возмущений со значительными вариациями плотности плазмы. Анализ всех имеющихся данных привел к выводу, что широта, на которой она регистрируется, составляет около 56.6° N, что на 0.45° больше, чем широта расположения стенда СУРА. Следуя результатам [Zhang et al., 2020], эта вертикальная структура находится практически посередине между главным лепестком диаграммы направленности антенны стенда и первым северным ее боковым лепестком при используемом в измерениях наклоне диаграммы направленности антенны стенда на 12° на юг. При этом эффективная мощность излучения ВН в направлении этой вертикальной структуры не должна превышать нескольких мегаватт и, следовательно, не должны возбуждаться сильные плазменные возмущения.

Рассмотрим еще несколько примеров регистрации таких распространяющихся вертикально вверх возмущений, зарегистрированных в наших радиотомографических измерениях, чтобы дать более полное описание их характеристик.

На рис. 4 приведена радиотомограмма, полученная 25 сентября 2017 г., когда спутник CASSIOPE в $T^* = 15:37$ UT ($T^* = 18:37$ мск) пролетал над стендом СУРА; в этом сеансе луч на спутник пересекал область “магнитного зенита” близко к его центру. Измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 8^-$, $AE \sim 50$ нТл) в освещенной Солнцем ионосфере; последняя перед измерениями суббуря с индексом

$K_p \sim 6$ была 14 – 15 сентября за 10 дней до их проведения. Мощная радиоволна с 18:06 до 18:33 мск излучалась на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц при ($f_{\text{OF2}} \approx 4.4$ МГц) с $P_{\text{эфф}} = 45$ МВт в режиме “несущая”, а с 18:36 до 18:41 мск — в квазинепрерывном режиме [+ 9 с, – 1 с] для идентификации приемной аппаратурой спутника излучаемого стендом сигнала. Высота отражения ВН составляла ~ 235 км. Наблюдалось развитие сильного F_{spread} , свидетельствующее об эффективном взаимодействии мощной радиоволны с плазмой $F2$ -слоя ионосферы. Следуя экспериментальным результатам и теоретическим оценкам, представленным в работах [Демехов, 2022; Фролов и др., 2016; Milikh et al., 2012; Vartanyan et al., 2012], 3-минутная пауза после длительного нагрева ионосферной плазмы и использование квазинепрерывного режима излучения ВН во второй части сеанса не должны были оказать какого-либо заметного влияния на характеристики дакта с повышенной концентрацией плазмы, если бы его генерация имела место во время излучения мощной радиоволны в режиме “несущая”. Однако, как следует из рис. 4, в этом эксперименте он не был обнаружен. Можно отметить следующие факторы, которые могли препятствовать его образованию [Фролов и др., 2016]. Это: проведение измерений в условиях освещенной ионосферы при недостаточно высокой эффективной мощности излучения ВН, когда, кроме того, нагрев ионосферы осуществлялся при частоте ВН $f_{\text{ВН}}$, на 0.3 МГц превышающей f_{OF2} .

На томограмме (см. рис. 4) на высотах $h \approx 240\text{--}600$ км видны две области с уменьшенной плотностью плазмы с более сильным уменьшением (на $\sim 2\%$) на широте $\sim 55.5^\circ$ N и с более слабым ее уменьшением (на $\sim 1\%$) на широте $\sim 55^\circ$ N, которые хорошо различимы на высоте 310 км (см. верхнюю панель). В первом случае широта области с уменьшенной концентрацией плазмы на высоте максимума $F2$ -слоя ионосферы практически соответствует широте центра пучка мощных радиоволн на высоте отражения ВН. Второй минимум располагается приблизительно в 55 км южнее первого и находится уже за краем диаграммы направленности излучения мощных радиоволн, отвечая более низкой мощности излучения ВН с $P_{\text{эфф}} \approx 20$ МВт. Эти минимумы хорошо прослеживаются, по крайней мере, до высот ~ 610 км лишь с небольшим изменением широты с ростом высоты их регистрации за счет увеличения горизонтальных размеров области с этими возмущениями. Второе, что следует здесь отметить, это формирование области с увеличенной концентрацией плазмы между этими двумя минимума-

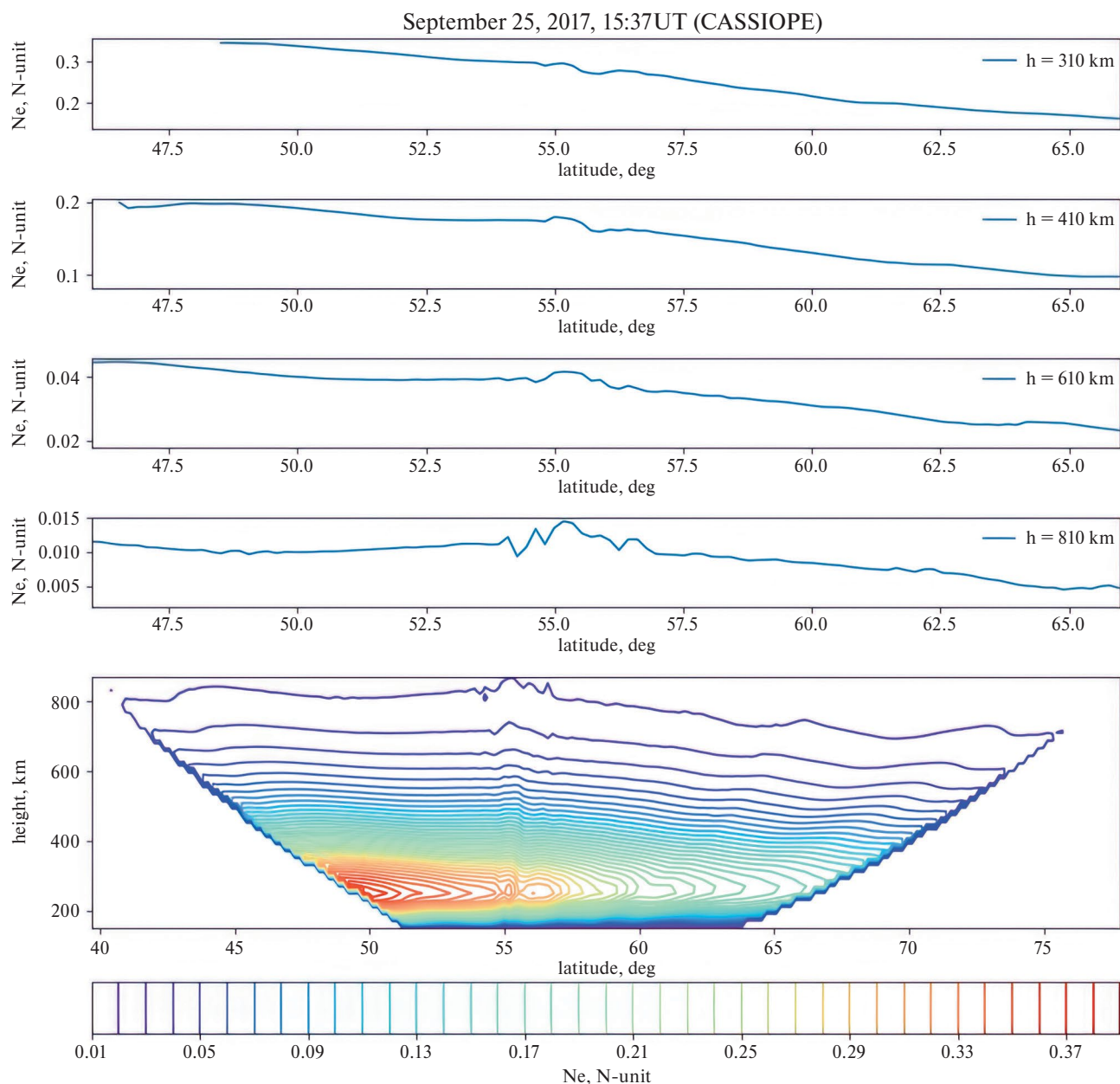


Рис. 4. Радиотомограмма, полученная 25.09.2017 г. в 18:37 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 310, 410, 610 и 810 км (сверху вниз).

ми. Размер этой области вдоль орбиты спутника (приблизительно в северо-южном направлении) увеличивается от 55 км для $h \approx 310$ км до 160 км для $h \approx 810$ км, как и для дактов. Для этой структуры, в отличие от дактов, с ростом высоты наблюдается резкое увеличение уровня флуктуаций концентрации плазмы относительно ее фонового значения, составляющее $\sim 10\%$ для $h \approx 400\text{--}600$ км и $\sim 35\%$ для $h \approx 800$ км. Отмечается также уси-

ние с ростом высоты флуктуаций плотности плазмы, которые на высоте $h \approx 800$ км имеют горизонтальный размер $l \sim 70$ км вдоль орбиты спутника. Поскольку, как отмечалось выше, рассматриваемые возмущения плотности плазмы расположены в вертикальном столбе над станцией СУРА, а не вытянуты вдоль направления линий геомагнитного поля, следует заключить, что в основе механизма их образования должно лежать рас-

пространство вариаций плотности нейтральной компоненты атмосферы, источник которых находится вблизи высоты отражения ВН. Если считать, что начало генерации этих возмущений определяется временем с момента начала нагрева ионосферной плазмы, то можно оценить среднюю скорость их вертикального распространения на интервале высот 235–800 км как $V \geq 300$ м/с, которая соответствует скорости ВГВ на этих высотах.

Как видно из рис. 4, вблизи северного и южного краев области построения радиотомограммы регистрируются максимумы концентрации плазмы, которые с ростом высоты все более удалены от центрального возмущения на широте $\sim 55.6^\circ$ N. Структура этих возмущений напоминает структуру уединенной волны, расходящейся от источника ее генерации со скоростью, увеличивающейся с ростом высоты. Координаты по широте ближайших к центру максимумов составляют $\sim 50^\circ$ N ($\sim 5^\circ$ на юг от центрального возмущения) и $\sim 61^\circ$ N ($\sim 6^\circ$ на север) для высоты $h \approx 300$ км и $\sim 44^\circ$ N ($\sim 11^\circ$ на юг от центрального возмущения) и $\sim 66^\circ$ N ($\sim 11^\circ$ на север от него) для высоты $h \approx 800$ км. В сторону севера на томограмме видна еще одна волна с координатами максимума $\sim 66^\circ$ N (отклонение $\sim 11^\circ$) для высоты $h \approx 300$ км и $\sim 73^\circ$ N (отклонение $\sim 18^\circ$) для высоты $h \approx 800$ км. Если допускать, что включение ВН в $T = 18:06$ мск привело к генерации этой волны, то ее скорость на высоте 300 км можно оценить, как не меньше, чем 660 м/с, и более высокую скорость 1075 м/с для высоты 800 км. Эти скорости превышают скорость ВГВ на этих высотах. Аналогичные результаты в случае моноимпульсного излучения ВН были получены в работах [Черногор, 2014; Chernogor and Blaunstein, 2013]. Если же сделать привязку генерации этих возмущений к окончанию излучения ВН в режиме “несущая”, это даст оценку их скорости распространения в 8 раз более высокую, чем было найдено выше. Заметим, что возмущения с такими высокими скоростями их распространения $V \approx (5-8)$ км/с ранее никогда не обнаруживались в нагревных экспериментах.

На рис. 5 представлена радиотомограмма, демонстрирующая еще один пример пространственной структуры ВО, которая была зарегистрирована при модификации F -области ионосферы мощными КВ-радиоволнами. Этот эксперимент был выполнен 25 марта 2014 г. с помощью спутника COSMOS-2407 в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 12$, $AE \approx 50-100$ нТл). Над стендом СУРА он пролетал в $T^* = 18:49$ UT ($T^* = 22:49$ мск), при этом угол наклона луча на спутник состав-

лял $87-88^\circ$. Следовательно, осуществлялось зондирование центральной части ВО в ночных условиях ее образования. Критическая частота f_{oF2} составляла около 6.3 МГц. Начиная с 19:58 мск, почти за три часа до пролета спутника, ВН излучалась все время в режиме $[\pm 10 \text{ мин}]$ на частоте $f_{ВН} = 5455$ кГц ($h_{отр} \approx 230$ км) с $P_{эфф} = 90$ МВт. Цикл нагрева 22:38 – 22:48 мск был продлен на 4 минуты, чтобы модификация ионосферы выполнялась и во время пролета спутника над стендом. Во время излучения мощной радиоволны наблюдались развитие сильного F_{spread} , который полностью не исчезал и во время паузы излучения ВН; регистрировалось также подавление O -моды на ионограммах вертикального зондирования на частотах около и выше $f_{ВН}$. Все это указывает на развитие интенсивной ИИТ.

Из представленной на рис. 5 радиотомограммы хорошо видно, что на высотах максимума $F2$ -слоя ионосферы (~ 300 км) на широте $\sim 55^\circ$ N во время излучения ВН образуется полость с дефицитом плотности плазмы $\sim 15\%$ и размером в направлении СЮ ~ 40 км, которая с севера и юга окаймлена областями с несколько повышенной относительно фоновой концентрацией плазмы. На радиотомограмме эти области как бы определяют начало ВВ, идущих от области сильного разогрева плазмы вблизи максимума $F2$ -слоя, которые более ярко выражены к северу от ВО_ц ионосферы и регистрируются здесь на большем расстоянии от стенда, чем на более южных широтах; их свойства соответствуют характеристикам ВГВ.

Из представленных на рис. 5 данных также можно заключить, что на высотах выше максимума $F2$ -слоя продолжает регистрироваться структура с минимумом плотности плазмы в центре возмущенной трубки с увеличенной плотностью плазмы по ее краям. Область минимума плотности плазмы на высоте $h \approx 400$ км имеет размер около 80 км и увеличивается до 150 и далее до 220 км на высотах 600 и 800 км соответственно, что, как это отмечалось выше, отвечает характеру изменения поперечного размера дакта с увеличенной плотностью плазмы. Внутри этого минимума плотности на высотах 500–800 км обнаруживается существование слабого максимума плотности плазмы, который может отвечать формированию дакта. На больших высотах он становится неразличимым на фоне флуктуаций концентрации плазмы. Область существования всех этих возмущений вытянута вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Из рис. 5 можно также видеть, что на высотах внешней ионосферы до 1000 км и более к северу

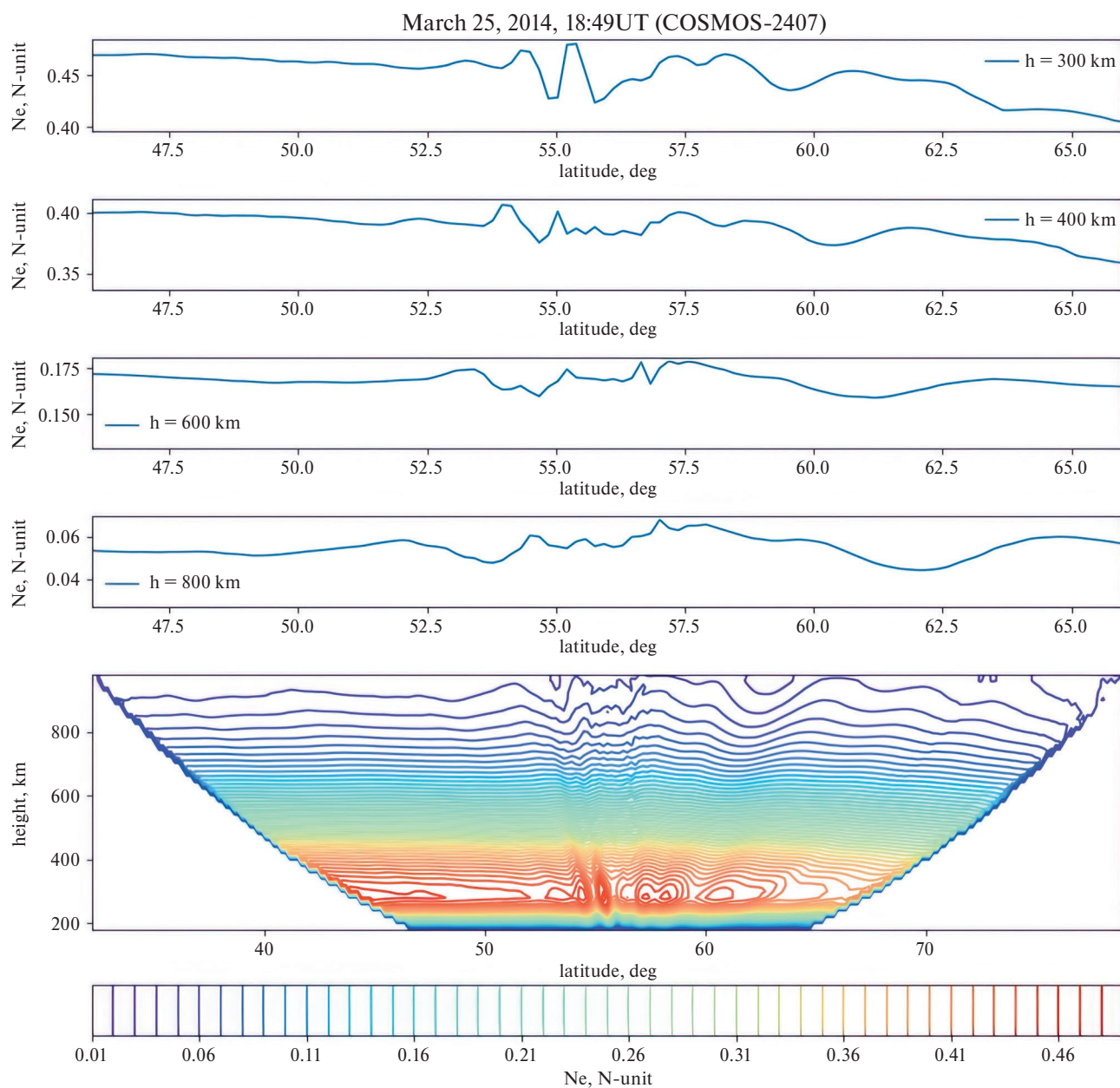


Рис. 5. Радиотомограмма, полученная 25.03.2014 г. в 22:49 мск. На четырех верхних панелях приведены профили концентрации электронов на высотах 300, 400, 600 и 800 км (сверху вниз).

от возмущенной магнитной силовой трубки (или на широтах $\sim 56.6^\circ$ N) регистрируется вертикальный столб с возмущениями плотности плазмы, который имеет характерный размер вдоль орбиты спутника ~ 60 и ~ 75 км для высот 600 и 800 км соответственно. Из полученных данных можно заключить, что величина относительных вариаций концентрации плазмы для диапазона высот 600–800 км практически не изменяется с ростом высоты, составляя $\delta N \approx 10\%$.

Особенностью рассматриваемой вертикальной структуры, как это следует из всех рассмотренных выше примеров, является то, что ее положение в пространстве не контролируется наклоном геомагнитного поля. Поэтому механизм ее образования не должен быть связан с генерацией возбуждаемых при модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением плазменных возмущений, распространяющихся на высотах верхней и внешней ионосферы вдоль силовых

линий геомагнитного поля, а должен быть связан с возмущениями плотности нейтральной атмосферы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ СВЕРХКРУПНОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ВЫСОТАХ ОТРАЖЕНИЯ ВНЕ И ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Следуя классификации, предложенной в работе [Фролов, 2017], мы будем разделять искусственные неоднородности плотности плазмы с $l_{\perp} > 2$ км на крупномасштабные с $l_{\perp}$ до 10–20 км, механизм генерации которых на высотах F -области ионосферы определяется разогревом естественных неоднородностей в поле мощных радиоволн, и сверхкрупномасштабные с $l_{\perp}$ от 20 км до 50–200 км, имеющие различные механизмы своей генерации. К последним относятся такие рассмотренные в разделе 3 структуры, как полость с уменьшенной концентрацией плазмы на высотах 200–400 км, формирующиеся во внешней ионосфере дакты с увеличенной концентрацией плазмы, возмущения, индуцируемые ВГВ на высотах от ~ 100 км до 1000 км и выше, возмущения нейтральной атмосферы, генерируемые в вертикальном столбе атмосферы над станцией. Полученные результаты показали, что эти структуры характеризуются следующими основными свойствами.

4.1. Полость с уменьшенной концентрацией плазмы

Метод радиотомографии позволяет изучать пространственную структуру полости с уменьшенной концентрацией плазмы, которая образуется на высотах 200–400 км в результате нагрева F -области среднеширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами и выталкивания плазмы вверх и вниз из нагретой области вдоль силовых линий геомагнитного поля. В работах [Гуревич и Шварцбург, 1973; Гуревич, 2007; Ерухимов и др., 1987; Фролов и др., 2007; Фролов, 2015, 2017; Черногор, 2014; Gurevich, 1978; Streltsov et al., 2018] приведены ранее изученные ее свойства и определены необходимые условия для наиболее эффективного ее образования. Это: а) нагрев ионосферы волнами O -поляризации в вечерних и ночных условиях; б) частота ВН должна быть ниже частоты максимума $F2$ -слоя ионосферы f_{OF2} ; в) модификация ионосферы должна проводиться при достаточно высокой мощности излучения

ВН (как правило, не ниже 25 МВт); г) более оптимальным является нагрев не слишком плотной плазмы, когда критическая частота f_{OF2} не превышает 6 МГц; д) в условиях оптимального развития ИИТ длительность нагрева должна быть не меньше 3–5 минут. Все эти условия отвечают условиям эффективной модификации плазмы верхней ионосферы Земли и развития в ней интенсивной ИИТ. Горизонтальные размеры полости с уменьшенной плотностью плазмы определяются шириной диаграммы направленности излучения мощных радиоволн и пороговой мощностью генерации плазменных возмущений, что составляет до 50–100 км на высоте отражения ВН в $F2$ -слое ионосферы. При $P_{эфф} \approx 100$ МВт и в оптимальных условиях модификации ионосферы относительное уменьшение концентрации плазмы в ней может достигать 30% относительно ее фоновой величины. Такая полость с уменьшенной концентрацией плазмы вытянута вдоль силовых линий геомагнитного поля, занимая интервал высот как выше, так и несколько ниже высоты отражения ВН: от ~ 200 км до ~ 400 км. На ее развитие оказывает влияние эффект “магнитного зенита”. Она оказывает фокусирующее действие на распространяющиеся через нее радиоволны КВ-диапазона. Вытеснение плазмы вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля приводит к формированию дактов с увеличенной концентрацией плазмы, обнаруживаемых на высотах выше 500 км.

Кроме того, на высотах 130–180 км формируется область с увеличенной плотностью плазмы как за счет ее вытеснения из области сильного разогрева, так и в результате нарушения на этих высотах ионизационно-рекомбинационного баланса при нагреве дневной ионосферы проходящим через нее мощным радиоизлучением [Бойко и др., 1985; Гуревич и Шварцбург, 1973; Ерухимов и др., 1987; Gurevich, 1978]. Эта область с увеличенной плотностью плазмы действует как дефокусирующая линза. В дневных условиях совместное влияние увеличения поглощения радиоволн и их дефокусировка приводит к сильному ослаблению плотности потока проходящего в F -область мощного радиоизлучения и, следовательно, к уменьшению эффективности воздействия мощной радиоволны на ионосферную плазму и интенсивности генерируемой ИИТ [Фролов, 2017].

Отметим, что согласно выполненным на станции СУРА измерениям [Фролов и др., 2007; Фролов, 2015, 2017], область с дефицитом плотности плазмы может быть опоясана слоем с увеличенной плотностью плазмы; при этом на еще больших расстояниях от центра ВО могут обнаруживаться и другие крупномасштабные структуры.

Все это еще больше усложняет наблюдаемую картину плазменных возмущений, формирующихся вокруг возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на $BO_{\perp}$. Природа образования этих крупномасштабных неоднородностей и их пространственная структура сегодня еще слабо изучены, чтобы сделать какие-либо окончательные выводы. Можно предположить, что их генерация связана с возбуждением в фоновой плазме продольных электрических токов при развитии ИИТ. Такие токи были обнаружены в работе [Lukianova et al., 2019], их пространственная структура исследовалась в работе [Фролов и др., 2021].

Следует также иметь в виду, что за счет фокусировки мощных радиоволн на искусственных крупномасштабных неоднородностях в $BO_{\perp}$ за ее границами могут формироваться изолированные области с сильно развитой ИИТ, как это рассматривалось в работах [Вертоградов и др., 2012; Ружин и др., 2013; Урядов и др., 2008; Hansen et al., 1992], которые будут оказывать свое влияние на распространение радиоволн и на результаты зондирования BO ионосферы. В работе [Andreeva et al., 2016] приведены примеры моделирования распространения мощных радиоволн в такой возмущенной ионосфере.

4.2. Дакты с увеличенной концентрацией плазмы

Представленное в работе рассмотрение полученных новых экспериментальных данных и результаты модельных и теоретических расчетов позволяют сделать следующие выводы относительно свойств дактов с увеличенной концентрацией плазмы. Было установлено, что из области сильного разогрева электронов вблизи высоты отражения VH O -поляризации плазма за время 5–10 мин выталкивается вдоль силовых линий геомагнитного поля вверх до высот $h \approx 1000$ –1500 км (на большие высоты за большее время), формируя дакт с повышенной ее концентрацией. Существование дактов в области высот 300–450 км не было обнаружено экспериментально. Предполагается, что это связано с высокой концентрацией плазмы в максимуме $F2$ -слоя ионосферы, когда на ее фоне не может быть зарегистрировано не слишком большое увеличение концентрации в области дакта, особенно при наличии высокого уровня на этих высотах ее флуктуаций и влияния полости с пониженной концентрацией плазмы. На высотах $h \approx 500$ –800 км дакты хорошо обнаруживаются, их генерация при выполнении определенных условий — обычно наблюдаемое здесь явление. Это позволяет использовать искусственно создаваемые дакты в различных экспериментах в ка-

честве, например, инструмента влияния на ионосферно-магнитосферные связи. Установлено, что относительное приращение концентрации плазмы в области дакта слабо зависит от высоты. Отсюда следует, что на высотах внешней ионосферы приращении плотности плазмы в дакте быстро (экспоненциально) убывает с ростом h . После выключения VH плотность плазмы в дакте релаксирует до фонового уровня за время ~ 30 мин. Согласно выполненным на стенде HAARP измерениям, формирование дакта сопровождается интенсивным выносом ионов во внешнюю ионосферу, скорость которых увеличивается с ростом высоты вместе с уменьшением концентрации плазмы. При этом, как отмечается в работе [Milikh et al., 2010], профили скорости выноса ионов и изменения плотности плазмы совпадают. По результатам детальных измерений, выполненных с помощью радара некогерентного рассеяния на стенде EISCAT/Heating, величина скорости выноса ионов вдоль геомагнитного поля возрастает от $V_i \sim 0$ на высоте ~ 400 км до ~ 300 м/с на высоте ~ 600 км [Rietveld et al., 2003].

Было экспериментально установлено, что на формирование дактов сильное влияние оказывает эффект “магнитного зенита” за счет более интенсивного разогрева здесь плазмы.

Выполненные исследования показали, что метод низкоорбитальной радиотомографии, в которой используются спутники с высотой их орбиты до 1000–1500 км, дает возможность проведения одновременных измерений характеристик дактов в диапазоне высот от 200 до 800–1200 км. С его помощью были получены данные об ориентации дактов вдоль силовых линий геомагнитного поля, величины увеличения в них плотности плазмы, изменении размера дактов в поперечном к геомагнитному полю направлении. На основе полученных экспериментальных данных было установлено, что с ростом высоты от 500 до 800 км поперечный размер дактов $L_{\perp}$ увеличивается от 60–80 км до 120–150 км (на ~ 60 км или приблизительно в 2 раза). Перенос плазмы поперек линий геомагнитного поля не учитывается в выполненных задачах численного 2D-моделирования (см., например, [Демехов, 2022; Hansen et al., 1992; Milikh et al., 2010, 2012; Vartanyan et al., 2012]). Имеются большие сложности их решения в 3D-приближении, когда надо также учитывать влияние сильной зависимости концентрации плазмы от высоты и изменение профиля плотности ионосферной плазмы в $BO_{\perp}$ при нагреве F -области ионосферы мощными радиоволнами, степень возмущенности концентрации ионосферной плазмы (генерация в ней различного рода

неоднородностей) при ее модификации мощными радиоволнами, изменение функции распределения электронов по энергии в процессе их разогрева мощной радиоволной, индуцированные нагревом электрические токи на ионосферных высотах, а также влияние ускоренных до сверхтепловых энергий электронов фоновой плазмы, искусственной инжекции в ионосферу энергичных электронов из радиационного пояса Земли и др.

Вышеприведенные результаты касаются, в основном, результатов измерений в ночной ионосфере. В утренние и вечерние часы дакты характеризуются меньшим увеличением концентрации плазмы и меньшими его поперечными размерами. В дневной ионосфере дакты на стенде СУРА при мощностях ВН $P_{эфф} \leq 25\text{--}50$ МВт не были зарегистрированы. Непосредственное измерение вариаций температуры и концентрации плазмы с борта спутников, летающих на высотах 400–800 км, показали присутствие в дактах неоднородностей концентрации плазмы с размерами $l_{\perp} \sim 10$ м–15 км.

Важно отметить, что метод радиотомографии не позволяет изучать динамические характеристики дактов из-за быстрого пролета спутника через возмущенную ионосферу. В этом состоит его сильное ограничение.

Собранный банк экспериментальных данных показывает, что дакты могут иметь не всегда такую простую форму, как это было отмечено выше и продемонстрировано на рисунке 1. В некоторых случаях может формироваться структура, состоящая из нескольких дактов. Следует также отметить, что в наших измерениях в одном случае было зарегистрировано формирование дакта с уменьшенной концентрацией плазмы. Ограниченность полученных здесь экспериментальных данных не позволяет пока сформулировать свойства таких структур и условий их образования. Здесь требуется проведение дополнительных исследований.

Механизмы образования дактов плотности плазмы при модификации ионосферы мощными КВ-радиоволнами рассматривались во многих работах. Среди более ранних отметим работы, в которых рассмотрение переноса возмущений в магнитной силовой трубке проводилось на основе одномерной модели [Васьков и др., 1995; Fallen et al., 2011; Vas'kov et al., 1993]. Около 20 лет назад была разработана двумерная модель SAMI 2 для среднеширотной ионосферы, в которой учитываются динамика плазмы и химические процессы для ионосферы в интервале высот от 100 до нескольких тысяч километров, а также нагрев

плазмы мощными радиоволнами, принимая во внимание эффекты их самовоздействия; околоземная плазма в этой модели описывается гидродинамическими уравнениями переноса ионов и электронов, дополненных условием квазинейтральности и моделью нейтральной компоненты атмосферы [Демехов, 2022; Milikh et al., 2012; Vartanyan et al., 2012]. На основе модели SAMI2 было выполнено модельные расчеты в 2D-приближении полученных на стенде СУРА экспериментальных данных, показавшие, в целом, их хорошее совпадение с результатами измерений изменения концентрации плазмы в продольном к геомагнитному полю направлении [Демехов, 2022; Фролов и др., 2016; Milikh et al., 2012; Streltsov et al., 2018; Vartanyan et al., 2012].

Следует отметить, что модель SAMI 2 образования дактов с увеличенной плотностью плазмы обладает рядом недостатков, которые определяют ограничение точности расчетов с ее использованием. Например, в ней, кроме уже отмеченных выше, не учитывается влияние эффекта “магнитного зенита” при развитии ИИТ на развитие взаимодействия ВН с ионосферной плазмой и на характеристики генерируемой ИИТ. Кроме того, пренебрегается горизонтальным дрейфом плазмы, на важность учета которого указывалось в работе [Fallen et al., 2011], а также влиянием переноса плазмы поперек линий геомагнитного поля на свойства дактов, о чем свидетельствуют результаты настоящей работы. Все отмеченные здесь и другими авторами особенности образования дактов и их характеристик должны быть учтены в новой модели, построенной на основе SAMI-2, разработка которой еще не закончена.

По измерениям в магнитно сопряженной к стенду СУРА области ионосферы не были обнаружены какие-либо признаки существования здесь дактов с увеличенной концентрацией плазмы. Fallen et al. [2011] приводят аргументы, почему они принципиально не могут распространяться на всю магнитную силовую трубку.

4.3. Генерация возмущений плотности нейтральной атмосферы при модификации ионосферы мощными радиоволнами

Выполненные исследования ясно продемонстрировали, что при периодическом нагреве ионосферной плазмы мощными радиоволнами с $T \geq 10$ мин на ионосферных высотах возбуждаются ВВ в широкой области пространства: они обнаруживаются на расстояниях до 1000 км и более как к северу, так и к югу от стенда СУРА, а также на расстоянии ~ 300 км в меридиональном направлении [Куницын и др., 2009]. Приведенные

в работе оценки показывают, что на высотах F -области ионосферы горизонтальная скорость ВВ обычно составляет 300–500 м/с, что отвечает скорости ВГВ. При этом, с ростом высоты (с уменьшением концентрации плазмы) скорость распространения возмущений увеличивается, как это и следует из теории генерации ВГВ [Черногор, 2014; Григорьев, 1999]. Установлено, что источник генерации этих ВВ находится в F_2 -слое — в области наиболее интенсивной генерации ИИТ и наиболее сильного разогрева плазмы. Механизм их генерации определяется периодическим разогревом нейтралов при их столкновении с разогретыми ионами [Mishin et al., 2012; Pradipta et al., 2015]. Отмечено, что при моноимпульсной модификации ионосферы обнаруживается генерация ВВ, скорость распространения которых составляет 1.2–1.7 км/с, которая соответствует скорости распространения медленных МГД-волн [Chernogor and Blaunstein, 2013]. Важно, что колебания нейтральной атмосферы приводят к колебаниям ее ионизированной компоненты и через них — к генерации неоднородностей концентрации плазмы [Афраймович и др., 2006; Гершман, 1989; Pradipta et al., 2015].

Новым результатом выполненных нами исследований явилось обнаружение особой структуры плазменных возмущений, которые на радиотомограммах регистрируются как возмущения плотности плазмы на высотах до 1000 км и более, расположенные в вертикальном столбе атмосферы над станцией СУРА, пространственная ориентация которого не диктуется направлением геомагнитного поля. Размер этого столба вдоль орбиты спутника (приблизительно в северо-южном направлении) составляет 60–220 км, увеличиваясь с ростом высоты. Измерения показывают, что пространственное положение основания такого столба соответствует области минимума между главным лепестком диаграммы направленности и ее первым северным лепестком, т.е. области слабого разогрева плазмы, окруженной областями ее сильного разогрева. Внутри столба регистрируются неоднородности плотности плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 35$ –70 км, их интенсивность по отношению к концентрации фоновой плазмы возрастает с ростом высоты. Важно, что такая вертикальная структура возмущений образуется как при излучении ВН в периодическом режиме типа $[\pm (10 \div 15) \text{ мин}]$, так и при ее излучении в виде единичного импульса. Поскольку пространственная структура этого типа возмущений имеет вертикальное направление и не определяется направлением силовых линий геомагнитного поля, как это имеет место для рассмотренных

выше фокусирующей линзы или дакта концентрации плазмы, можно заключить, что в основе механизма их генерации должно лежать возмущение нейтральной компоненты ионосферы, которое инициирует появление наблюдаемых возмущений ионизированной ее компоненты. Из того, что эти возмущения расположены в вертикальном столбе, для механизма их образования, по-видимому, важно направление вектора ускорения g , которое в нашем случае совпадает по направлению с градиентом лотности нейтральной атмосферы. Следуя монографии Ландау и Лифшица [1988], можно допускать, что в основе переноса возмущений вертикально вверх лежит конвекция неравномерно разогретого газа в поле силы тяжести с развитием конвективной неустойчивости, приводящей к турбулизации атмосферного нейтрального газа. Неравномерность разогрева атмосферы определяется изменением плотности потока электромагнитного излучения ВН по диаграмме направленности передающей антенны станция.

Высказанное предположение о механизме генерации плазменных возмущений в вертикальном столбе над станцией СУРА нуждается в своем экспериментальном и теоретическом обосновании. Это касается выполнения сравнительных экспериментов при нагреве E - и F -областей ионосферы мощными радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации в разное время суток и в различных геофизических условиях при разных мощностях $P_{\text{эфф}}$ излучения ВН, а также, когда модификация ионосферы выполняется в режиме нагрева “на просвет” при $f_{\text{ВН}} > f_{oF_2}$ и др. Трудность выполнения этих исследований сегодня связана с тем, что в настоящее время практически не осталось низкоорбитальных спутников с радиомаяками, которые можно было бы использовать для проведения радиотомографических измерений.

Проведенные в последние годы на станции СУРА исследования продемонстрировали, что дальнейшее развитие модели ИИТ связано с учетом влияния искусственной инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в ионосферу, вызванные ее модификацией мощными КВ-радиоволнами, поскольку они могут прямо влиять на механизмы развития и свойства плазменной турбулентности, являясь их мощным вторичным источником [Frolov and Troitsky, 2023]. Не исключено, что инжектируемые в ионосферу энергичные электроны могут стимулировать генерацию ВВ, как это имеет место в высокоширотной ионосфере. Как ожидается, выполнение с учетом уже полученных результатов новых экс-

периментов и получение в них новых экспериментальных данных позволит разработать более полную модель генерации ИИТ и дать адекватную интерпретацию свойств этой турбулентности. Это, в свою очередь, даст возможность более полного использования ИИТ для решения различных практических задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Полу Бернхарду и Гарри Гордону Джеймсу за возможность проведения экспериментов со спутником CASSIOPE.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования Фролова В.Л. выполнены по проекту № FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Воейков С.И.* Генерация ионосферных неоднородностей при распространении уединенной внутренней гравитационной волны во время мощной магнитной бури 29–31 октября 2003 года // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 49. № 2. С. 89–104. 2006.
- *Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В.* Стенд “Сура”: исследование атмосферы и космического пространства // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 5. № 7. С. 545–576. 2007.
- *Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др.* Исследование дефокусировки радиоволн в ионосфере при воздействии мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 28. № 8. С. 960–971. 1985.
- *Васьков В.В., Комраков Г.П., Рябова Н.А.* Тепловые возмущения околоземной плазмы, создаваемые мощным радиоизлучением комплекса “Сура” // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 35. № 5. С. 75–82. 1995.
- *Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Крашенинников И.В., Черкашин Ю.Н., Валов В.А., Бредихин Д.В., Макаров А.В.* Кластерная структура искусственной ионосферной турбулентности по данным радарных измерений с помощью ионозонда-радиопеленгатора // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 55. № 1–2. С. 1–13. 2012.
- *Гершман Б.Н.* О влиянии перемещающихся возмущений на возникновение дополнительных ионосферных неоднородностей в области F // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 32. № 12. С. 1571. 1989.
- *Григорьев Г.И.* Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 42. № 1. С. 3–25. 1999.
- *Гуревич А.В., Шварцбург А.Б.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 272 с. 1973.
- *Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С.* Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 48. № 9. С. 772–787. 2005.
- *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // УФН. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
- *Демехов А.Г.* Формирование крупномасштабных возмущений при высокочастотном нагреве ионосферы: зависимость характеристик возмущений от частоты и мощности высокочастотного излучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 65. № 2. С. 79–95. 2022. https://doi.org/10.52452/00213462_2022_65_02_79
- *Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л.* Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 30. № 2. С. 208–225. 1987.
- *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. Москва: Физматлит, 255 с. 2007.
- *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю., Назаренко М.О., Вапиров Ю.М., Иванов И.И.* Трансконтинентальная радиотомографическая система. Результаты первых ионосферных измерений // Вестн. Московского ун-та. Серия 3: Физика, астрономия. № 6. С. 102–104. 2009
- *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Курс теоретической физики. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 733 с. 1988.
- *Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А., Карабаджак Г.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Парро М.* Авроральная активность, вызванная мощным радиоизлучением стенда “Сура” // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 53. № 1. С. 46–52. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013010173>
- *Троицкий А.В., Фролов В.Л., Востоков А.В., Ракуть И.В.* Радиоизлучение ридберговских атомов верхней атмосферы при ее модификации мощными КВ радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. № 10. С. 759–768. 2019.
- *Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Понятов А.А., Вертоградов В.Г., Кубатко С.В., Черкашин Ю.Н., Крашенинников И.В., Комраков Г.П., Валов В.А.* О структуре и динамике области ионосферы с искусственными мелкомасштабными неоднородностями по данным комплексных измерений характеристик рассеянных радиосигналов // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 51. № 12. С. 1011–1025. 2008.
- *Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др.* Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением // УФН. Т. 177. № 3. С. 330–340. 2007. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200703j.0330>
- *Фролов В.Л.* Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 2. С. 22–45. 2015. <https://doi.org/10.12737/10383>
- *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А., Белов А.С., Парро М., Рош Ж.-Л.* Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуциру-

- емых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F_2 -области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 59. № 3. С. 198–222. 2016.
- Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: Изд. ННГУ, 468 с. 2017.
- Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С., Болотин И.А., Добровольский М.Н., Рябов А.О., Шорохова Е.А. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450–500 км при работе стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 45. № 5. С. 359–373. 2018.
- Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Рябов А.О., Болотин И.А. Спутниковые измерения плазменных возмущений и электрических токов, индуцируемых в среднеширотной ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами // Космические исследования. Т. 59. № 4. С. 275–295. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0023420621040014>
- Фролов В.Л., Андреева Е.С., Падохин А.М. Пространственная структура сверхкрупномасштабных возмущений плотности плазмы на ионосферных высотах // XXVIII Всероссийская открытая научная конференция “Распространение радиоволн”. 16–19 мая 2023 г. г. Йошкар-Ола. Тезисы докладов. С. 627–630. 2023.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 55. № 1–2. С. 14–36. 2012.
- Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе. Харьков: Изд. ХНУ им. В.Н. Каразина, 541 с. 2014.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Вариации уровня и спектра геомагнитных пульсаций, сопровождавшие воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением стенда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 57. № 5. С. 378–399. 2014.
- Черногор Л.Ф., Панасенко С.В., Фролов В.Л., Домнин И.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие воздействие на околоземную плазму мощным радиоизлучением: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 58. № 2. С. 85–99. 2015.
- Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Фролов В.Л. Крупномасштабные возмущения в нижней и средней ионосфере, сопровождавшие воздействие на нее радиоизлучением стенда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. № 6. С. 440–459. 2019.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности крупномасштабных возмущений, индуцируемых в ионосфере мощным дециметровым радиоизлучением во время умеренных магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 5. С. 618–640. 2021. <https://doi.org/10.31857/S0016794021040039>
- Шерстюков Р.О., Фролов В.Л., Акчурун А.Д. Контроль возмущенности ионосферы над стендом “СУРА” с помощью построения двумерных карт вариаций полного электронного содержания // Изв. вузов. Физика. Т. 59. № 12–3. С. 23–27. 2016.
- Andreeva E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., Kryukovskii A.S., Lukin D.S., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the SURA heating facility // Radio Sci. V. 51. № 6. P. 638–644. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015RS005939>
- Chernogor L.F., Blaunstein N. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near the Earth environment. New York: Taylor and Francis Group, 542 p. 2013.
- Fallen C.T., Secan J.A., Watkins B.J. In situ measurements of topside ionosphere electron density enhancements during an HF-modification experiment // Geophys. Res. Lett. V. 38. № 8. ID L08101. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL046887>
- Frolov V.L., Troitsky A.V. HF-induced artificial injection of energetic electrons from the Earth’s radiation belt as a powerful source for modification of ionized and neutral components of the Earth’s atmosphere // Atmosphere. V. 14. № 5. ID 843. 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14050843>
- Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York: Springer, 372 p. 1978.
- Hansen J.D., Morales G.J., Maggs J.E. Large-scale HF-induced ionospheric modifications: theory and modeling // J. Geophys. Res. – Space. V. 97. N 11. P. 17019–17032. 1992. <https://doi.org/10.1029/92JA01603>
- Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., Komrakov G.P., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions // Radio Sci. V. 47. № 4. ID RS0L15. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011RS004957>
- Lukianova R., Frolov V., Ryabov A. First SWARM observations of the artificial ionospheric plasma disturbances and field-aligned currents induced by the SURA power HF heating // Geophys. Res. Lett. V. 46. № 22. P. 12731–12738. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL085833>
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Oinats A.V., Alsatkin S.S., Zherebtsov G.A. Relation of internal gravity wave anisotropy with neutral wind characteristics in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. – Space. V. 122. № 7. P. 7567–7580. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JA024103>
- Milikh G.M., Mishin E., Galkin I., Vartanyan A., Roth C., Reinisch B.W. Ion outflows and artificial ducts in the topside ionosphere at HAARP // Geophys. Res. Lett. V. 37. № 18. ID L18102. 2010. <https://doi.org/10.1029/2010GL044636>
- Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A., Mishin E.V., Huba J. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating // Geophys. Res. Lett. V. 39. № 10. ID L10102. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL051718>
- Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Forster M. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization stream // Geophys. Res. Lett. V. 39. № 11. ID L11101. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL052004>

- Pradipta R., Lee M.C., Cohen J.A., Watkins B.J. Generation of artificial acoustic-gravity waves and travelling ionospheric disturbances in HF heating experiments // *Earth Moon Planets*. V. 116. № 1. P. 67–78. 2015. <https://doi.org/10.1007/s11038-015-9461-2>
- Rietveld M.T., Kosch M.J., Blagoveshchenskaya N.F., Kornienko V.A., Leyser T.B., Yeoman T.K. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 108. № 4. ID 1141. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002JA009543>
- 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.* V. 214. № 8. ID 118. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
- Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., Parrot M., Galkin I., Reinisch B., Huba J., Joyce G., Papadopoulos K. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 117. № 10. ID A10307. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012JA017563>
- Vas'kov V.V., Dimant Y.S., Ryabova N.A. Magnetospheric plasma thermal perturbations induced by resonant heating of the ionospheric *F*-region by high-power radio waves // *Adv. Space Res.* V. 13. № 10. P. 1025–1033. 1993. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(93\)90047-F](https://doi.org/10.1016/0273-1177(93)90047-F)
- Zhang X., Frolov V., Shen X., Wang Y., Zhou C., Lu H., Huang J., Ryabov A., Zhai D. The electromagnetic emissions and plasma modulations at middle latitudes related to SURA-CSES experiments in 2018 // *Radio Sci.* V. 55. № 8. ID e2019RS007040. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019RS007040>

Spatial Structure of Plasma Density Perturbations Excited at Altitudes of the Upper and Outer Ionosphere During *F2*-Layer Heating by Powerful HF Radio Waves

V. L. Frolov^{1, 2, *}, E. S. Andreeva^{3, **}, A. M. Padokhin^{3, 4, ***}

¹Radio Physical Research Institute in NNSU by N.I. Lobachvsky (NIRFI NNSU), Nizhny Novgorod, Russia

²Kazan Federal University (KazFU), Kazan, Russia

³Moscow State University by M.V. Lomonosov (MSU), Moscow, Russia

⁴Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

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

**e-mail: es_andreeva@mail.ru

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

The results of measurements of the spatial structure of variations in the electron concentration excited at altitudes of the Earth's upper and outer ionosphere by modification of the *F2*-layer of the mid-latitude ionosphere by powerful HF radio waves of *O*-polarization radiated by the SURA heating facility are analyzed. The results were obtained by the method of low-orbit satellite radio tomography. The characteristics of a cavity with a reduced plasma concentration formed at altitudes near the height of reflection of a powerful radio wave, ducts with an increased plasma concentration formed at altitudes of the external ionosphere due to the displacement of plasma from the region of its strong heating along the geomagnetic field, and various wave disturbances HF-induced at ionospheric altitudes are considered. In addition, the properties of detected plasma density disturbances of a special nature, revealed in a vertical column above the SURA facility, were also studied. The sizes of studied irregularities are from several tens to several hundred kilometers, and the area of their registration extends far beyond the region of resonant interaction of a powerful *O*-polarized radio wave with the ionospheric plasma near the height of its reflection, where the most intense artificial ionospheric turbulence is excited.

УДК 550.388.2

ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ $foF2$ ПО ДАННЫМ СТАНЦИЙ СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ

© 2024 г. А. Д. Данилов¹, *, А. В. Константинова¹, Н. А. Бербенева²

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

²Физический факультет Московского государственного университета

им. М.В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 16.12.2023 г.

После доработки 10.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Представлены результаты поиска долговременных трендов критической частоты слоя $F2$, $foF2$, на основании наблюдения методом вертикального зондирования на трех станциях Северного полушария (Juliusruh, Boulder и Moscow) и трех станциях Южного полушария (Townsville, Hobart и Canberra). Использовался метод, разработанный и неоднократно описанный авторами ранее. Анализировались данные для двух зимних месяцев (январь и февраль в Северном полушарии и июнь и июль в Южном) и для пяти околополуденных моментов местного времени. Для устранения эффектов солнечной активности использовались три индекса солнечной активности ($F30$, $Ly-\alpha$ и $MgII$). Для всех рассмотренных ситуаций (станция, месяц, момент LT, индекс солнечной активности) получены отрицательные тренды. Они хорошо согласуются друг с другом как при сравнении между собой отдельно станций Северного и Южного полушарий, так и при сравнении станций обоих полушарий.

DOI: 10.31857/S0016794024030059, EDN: SMXYCX

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема долговременных трендов параметров ионосферы и особенно критической частоты слоя $F2$, $foF2$, хорошо известна, и ей посвящено много работ. Обсуждение проблемы и соответствующие ссылки можно найти в обзорной работе Данилова и Константиновой [2020], а также в обзорных работах Laštovička [2017; 2022]. Наиболее подробное обсуждение современного состояния исследований приводится в недавней работе Laštovička [2023].

Авторами был разработан и неоднократно использовался метод определения долговременных трендов параметров ионосферного слоя $F2$. Достаточно подробное описание метода можно найти в работе Данилова и Бербеновой [2023a]. Здесь мы напомним только, что метод основан на сравнении величин $foF2$ в течение двух последних десятилетий с величинами $foF2$ для тех же условий в течение “эталонного” периода 1957–1980 гг., когда еще не было трендов $foF2$ антропогенной природы. Между соответствующими величинами $foF2$ вычисляется разница $\Delta foF2$, изменение ко-

торой со временем в течение анализируемого периода и дает искомый тренд $k(foF2)$.

При определении трендов ионосферных параметров очень важен вопрос о выборе индексов солнечной активности (СА) для устранения эффектов СА. Вопрос обсуждался многими исследователями. Отметим здесь лишь две работы аргентинской группы [De Haro Barbás and Elias, 2020; De Haro Barbás et al., 2021] и публикации Laštovička [2022] и Laštovička and Burešová [2023].

Авторами работ [Данилов и Бербенева, 2023б; 2024; Данилов и др., 2023в; Danilov and Berbeneva, 2023] подробно рассматривался вопрос о качестве описания изменения $foF2$ со временем различными индексами СА. Вывод этих работ состоит в том, что наилучшее описание обеспечивает индекс $F30$. Далее следуют индексы $Ly-\alpha$ и $MgII$. Наихудшим для такого описания является индекс Rz . Следуя этим результатам, мы в данной работе использовали для устранения эффектов СА индексы $F30$, $Ly-\alpha$ и $MgII$.

В статье Данилова и Бербенева [2023a] были рассмотрены тренды $foF2$ по данным ст. Juliusruh до 2022 г. Более подробный анализ полного суточного хода этих трендов был представлен в работе Данилова и др. [2023б].

Целью данной работы явился анализ трендов критической частоты ионосферного слоя $F2$ по данным нескольких станций, расположенных как в Северном, так и в Южном полушариях. Мы анализировали только среднеширотные ($\varphi = 30\text{--}60^\circ$) станции ВЗ, для которых нам удалось найти в банках данных месячные медианы $foF2$ для обоих периодов (1957–1980 и 1996–2023 гг.).

Поскольку наиболее значимые тренды $foF2$ наблюдаются днем, а ночью они близки к нулю, (подробнее см. [Данилов и др., 2023б]) мы рассматривали только пять околополуденных моментов LT. Точно так же, поскольку эти тренды хорошо выражены зимой, но практически отсутствуют летом (см. [Данилов и Бербенева, 2023a]), мы провели поиск этих трендов для двух зимних месяцев. Это январь и февраль для станций Северного полушария, а также июнь и июль для станций Южного полушария.

2. СТАНЦИИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

На рис. 1–4 представлены примеры изменения со временем величины $\Delta foF2$. Чтобы не перегружать статью рисунками, мы приводим их только для двух станций — Moscow и Boulder. Аналогичные рисунки для ст. Juliusruh можно найти в работе Данилова и Бербенева [2023a]. Сводка результатов для всех станций Северного полушария будет представлена ниже в таблицах. Все тренды величины $k(foF2)$ на всех рисунках и в таблицах приводятся в единицах МГц/год. На рисунках приводятся величины коэффициента определенности R^2 согласно критерию Фишера, которые позволяют судить о статистической значимости получаемых зависимостей.

Как видно из приведенных рисунков, для обоих зимних месяцев на обеих станциях наблюдается систематическое уменьшение величины $\Delta foF2$ со временем, которое дает отрицательный тренд. Разброс точек относительно аппроксимирующей их прямой линии несколько различается (что естественно), однако все рисунки позволяют утверждать (в соответствии с приведенными на них величинами R^2), что получаемый тренд имеет высокую статистическую значимость. Для справки отметим, что для имеющегося на каждом рисунке количества точек 18 при величине R^2 выше 0.70 статистическая значимость получаемых трендов S превышает 99%.

Необходимо сделать следующее пояснение. Не следует удивляться тому, что поведение точек относительно аппроксимирующей линии при заданном месяце может быть различным для одной станции, но для различных часов LT. Приводимые в банках величины медиан $foF2$ содержат неизбежные ошибки (мы писали об этом и приводили примеры в работе [Данилов и Константинова, 2013]). Кроме того, они могут отражать наличие в данном месяце дней с магнитными возмущениями, нарушая тем самым зависимость от времени, которую мы анализируем. Все это и приводит к разбросу (иногда достаточно сильному) точек относительно аппроксимации. На наш взгляд, важным является статистическая сторона вопроса — во всех проанализированных ситуациях (станция, месяц, индекс CA, момент LT) наблюдается уменьшение $\Delta foF2$ со временем, дающее отрицательный тренд $foF2$.

Штриховой линией на всех рисунках показано изменение $\Delta foF2$ в последние годы. Рассматривались точки, для которых наклон этого изменения увеличивался, указывая на более сильный отрицательный тренд. При этом первой точкой была та, где начиналось это изменение, а последней всегда была последняя точка рассматриваемого интервала. Мы вернемся к обсуждению недавних лет ниже.

По графику зависимости $\Delta foF2$ от времени для каждой ситуации (станция, месяц, индекс CA) строилась соответствующая таблица с полученными параметрами. Чтобы не перегружать статью таблицами, мы приводим в табл. 1 в качестве примера результаты только для двух ситуаций. В этой таблице для каждой ситуации приводится тренд $k(foF2)$ для всех пяти моментов LT для всего анализируемого периода 1996–2023 гг. с соответствующими величинами R^2 , а также тренд для недавних лет также с величинами R^2 .

Суммарный результат по каждой станции представлен в таблицах 2 и 3. В этих таблицах даны величины $k(foF2)$ для периода 1996–2023 гг. для пяти моментов LT для каждого индекса CA. В строке “Средн.” приводится среднее значение по всем пяти моментам LT. В следующей строке приводится среднеквадратическая ошибка (SD) при усреднении этих пяти величин. В столбце “Средн.” приводится результат усреднения трех средних для каждого индекса CA величин и соответствующая величина SD.

Таблица 2 показывает, что для ст. Moscow для двух индексов CA ($F30$ и $MgII$) для всех пяти моментов LT получаются достаточно близкие величины $k(foF2)$, которые позволяют после

усреднения получить средний тренд для около-
полуденных часов с относительно небольшой
величиной SD.

Исключение составляет индекс $Ly-\alpha$, для ко-
торого для трех моментов LT не удастся получить
систематического изменения $\Delta foF2$ со временем –

Таблица 1. Величины $k(foF2)$ для двух ситуаций

Moscow, январь, $MgII$					Boulder, февраль, $Ly-\alpha$.			
LT	1996–2023	R^2	недавно	R^2	1996–2023	R^2	недавно	R^2
10:00	–0.025	0.85	–0.100	0.8	–0.028	0.70	–0.044	0.95
11:00	–0.024	0.71	–0.069	0.86	–0.034	0.76	–0.044	0.95
12:00	–0.042	0.89	–0.112	0.95	–0.029	0.75	–0.050	0.93
13:00	–0.043	0.90	–0.090	0.73	–0.030	0.65	–0.040	0.70
14:00	–0.031	0.80	–0.068	0.89	–0.031	0.60	–0.011	0.32

Таблица 2. Величины $k(foF2)$ для 1996–2023 гг. для ст. Moscow

январь					февраль				
LT	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	средн.	LT	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	средн.
10:00	–0.007		–0.025		10:00	–0.032	–0.025	–0.048	
11:00	–0.023		–0.024		11:00	–0.029	–0.027	–0.050	
12:00	–0.027	–0.021	–0.042		12:00	–0.034	–0.021	–0.043	
13:00	–0.019		–0.043		13:00	–0.038	–0.028	–0.048	
14:00	–0.023	–0.022	–0.031		14:00	–0.044	–0.035	–0.042	
средн.	–0.020	–0.022	–0.033	–0.025	средн.	–0.035	–0.027	–0.046	–0.036
SD	0.008	0.001	0.009	0.007	SD	0.006	0.005	0.003	0.010

Таблица 3. Величины $k(foF2)$ для 1996–2023 гг. для ст. Boulder

январь					февраль				
LT	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	средн.	LT	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	средн.
10:00	–0.034	–0.030	–0.039		10:00	–0.035	–0.028	–0.040	
11:00	–0.020	–0.017	–0.027		11:00	–0.029	–0.034	–0.043	
12:00	–0.034	–0.025	–0.035		12:00	–0.021	–0.029	–0.042	
13:00	–0.027	–0.020	–0.025		13:00	–0.026	–0.030	–0.043	
14:00	–0.025	–0.021	–0.032		14:00	–0.024	–0.031	–0.042	
средн.	–0.028	–0.023	–0.032	–0.028	средн.	–0.027	–0.030	–0.042	–0.033
SD	0.006	0.005	0.006	0.005	SD	0.005	0.002	0.001	0.008

точки на рисунках типа рис. 1–4 ведут себя хаотически. Поскольку при анализе всех моментов LT в данной ситуации используются одни и те же значения индекса $Ly-\alpha$, причина эффекта может лежать только в ошибках в данных о медианах $foF2$ для 10:00, 11:00 и 13:00 LT, поскольку для 12:00 и 14:00 LT получается обычный ход $\Delta foF2$ со временем, дающий разумные величины $k(foF2)$.

Видно также, что средние околополуденные величины $k(foF2)$ достаточно близки для всех трех индексов СА. Например, для ст. Moscow в феврале, когда не обнаружено указанных про-

блем с трендами при использовании индекса $Ly-\alpha$, величины $k(foF2)$ составляют -0.027 , -0.030 и -0.042 МГц/год при SD в пределах 0.003 – 0.006 МГц/год. Для ст. Boulder проблем с трендами при использовании $Ly-\alpha$ не обнаружено — и в январе, и в феврале тренды, получаемые с помощью всех трех индексов СА, близки между собой.

Интересно сравнить также тренды, получаемые для каждого месяца после усреднения по всем моментам LT и индексам СА на разных станциях. В январе это -0.025 МГц/год для ст. Moscow и -0.028 МГц/год для ст. Boulder.

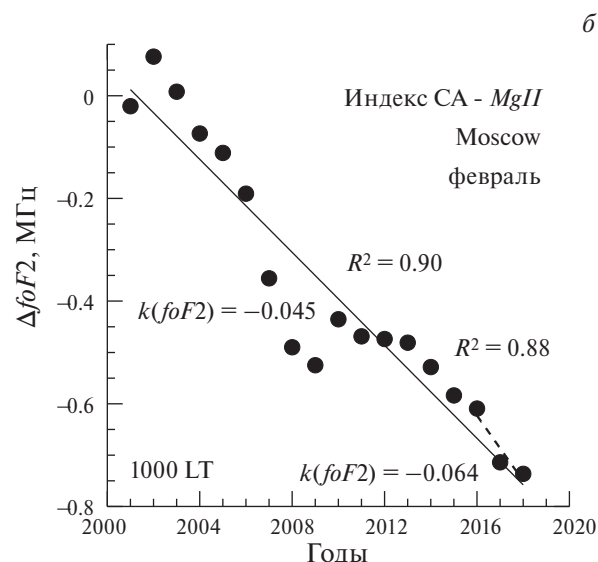
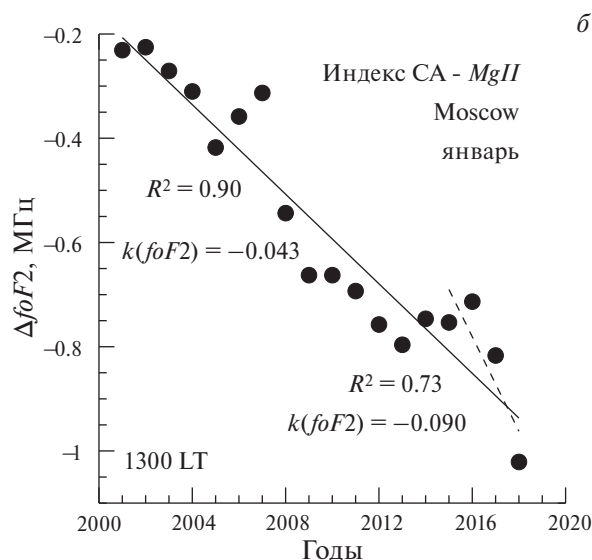
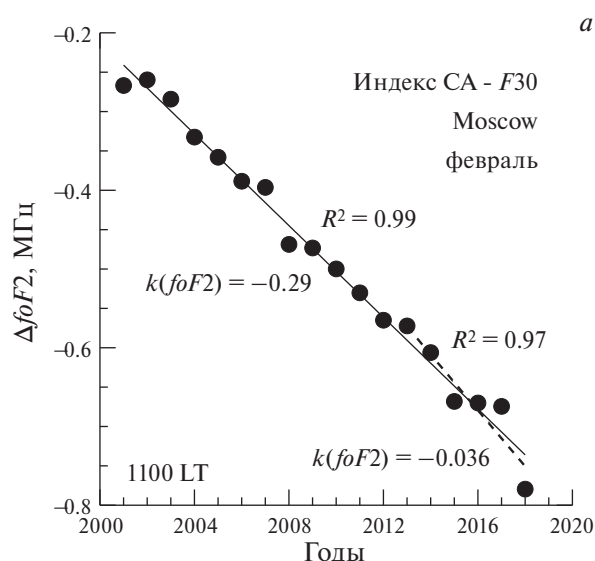
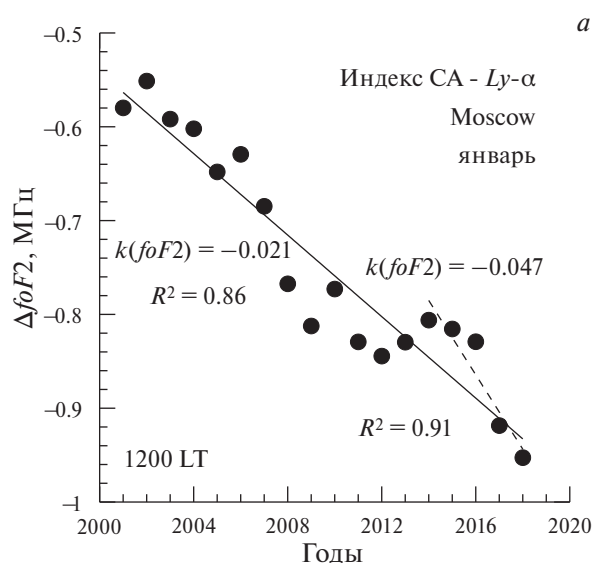


Рис. 1. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Moscow в январе.

Рис. 2. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Moscow в феврале.

В феврале эти величины равны, соответственно, -0.036 МГц/год и -0.033 МГц/год. Лучшего согласия ожидать просто невозможно.

В работе Данилова и др. [2023a] приведены результаты детального анализа суточных вариаций трендов $foF2$ по данным ст. Juliusruh. В указанной работе показано, что в дневные часы в суточном ходе $k(foF2)$ наблюдается “плато”: в течение 5–7 часов величины $foF2$ почти не меняются. Для сравнения с приведенными выше результатами мы приводим в табл. 4 величины $k(foF2)$ для этого “плато” из указанной статьи.

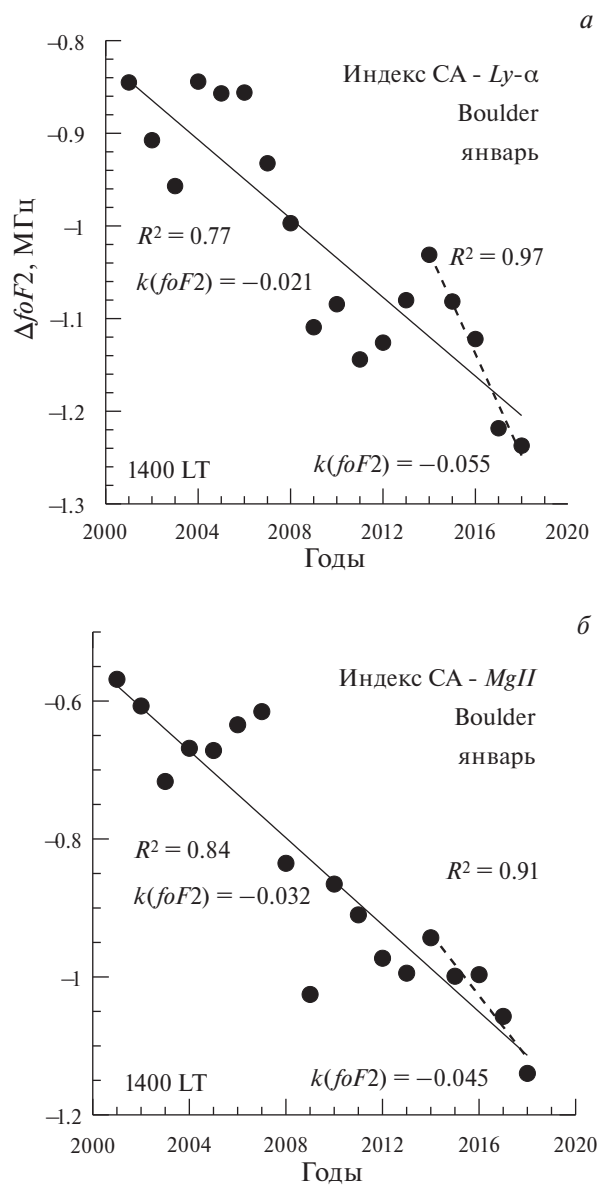


Рис. 3. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Boulder в январе.

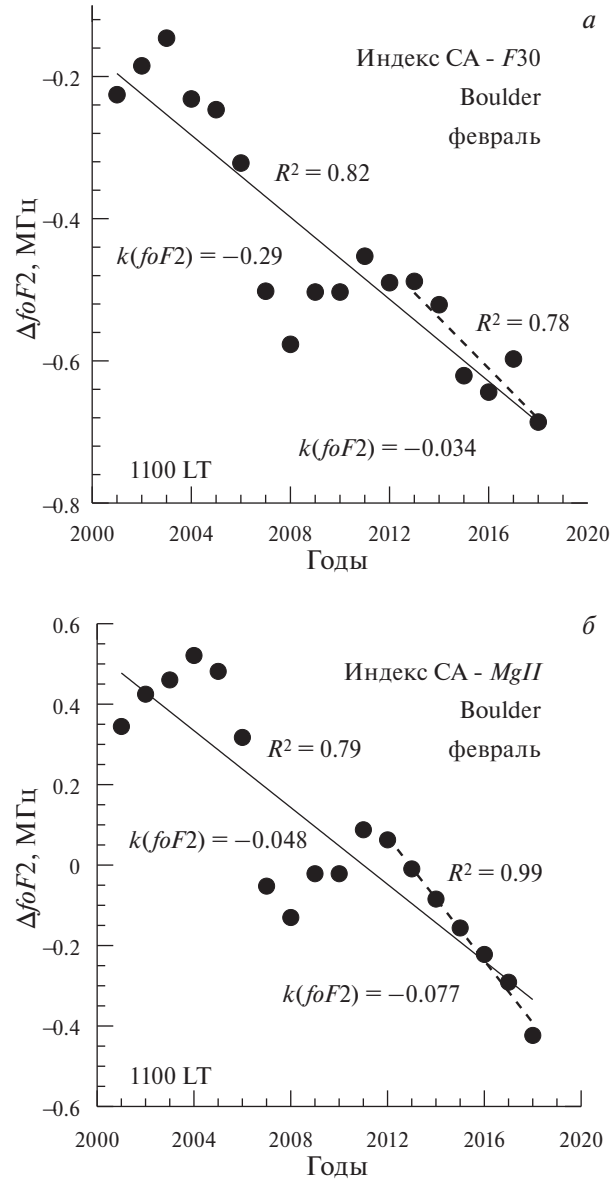


Рис. 4. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Boulder в феврале.

Таблица 4. Величины $k(foF2)$ и длительность дневного “плато” для ст. Juliusruh

январь		февраль	
LT	$k(foF2)$	LT	$k(foF2)$
11:00–18:00	–0.038	11:00–18:00	–0.041
13:00–18:00	–0.027	11:00–18:00	–0.034
10:00–18:00	–0.031	11:00–18:00	–0.048

Как видно из этой таблицы, величины $k(foF2)$ в дневное время по данным ст. Juliusruh лишь немного больше, чем соответствующие величины для ст. Moscow и Boulder в таблицах 2 и 3. В целом, на наш взгляд, согласие результатов для всех трех станций является хорошим.

3. СТАНЦИИ ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЯ

Для сравнения с результатами для станций Северного полушария, описанными в предыдущем параграфе, мы провели поиски трендов тем же способом по данным станций Австралийского региона: Townsville, Hobart и Canberra. Выбор станций был обусловлен рассматриваемым интервалом средних широт и доступностью медиан $foF2$ за два необходимых для нашего метода периода (1957–1980 и 1996–2023 гг.) – эти медианы представлены на сайте Австралийского Центра Прогнозов Космической погоды.

Поскольку в этом параграфе речь идет о станциях Южного полушария, мы анализировали два зимних месяца июнь и июль. Так же, как и при анализе станций Северного полушария, для удаления эффектов солнечной активности мы использовали три индекса СА ($F30$, $MgII$ и $Ly-\alpha$), которые, согласно нашим предыдущим исследованиям, являются наилучшими для описания зависимости $foF2$ от СА. Анализировались те же пять околополуденных моментов LT, что и в предыдущем параграфе.

Результаты близки к результатам, полученным в предыдущем параграфе. Примеры зависимостей $\Delta foF2$ от индексов СА приведены на рис. 5 и 6 для ст. Townsville, на рис. 7 и 8 для ст. Hobart и на рис. 9 и 10 для ст. Canberra.

Как видно из приведенных рисунков, для обоих зимних месяцев на всех трех станциях наблюдается систематическое уменьшение величины $\Delta foF2$ со временем, которое дает отрицательный тренд. Как и на рисунках 1–4, разброс точек относительно аппроксимирующей их прямой линии несколько различается (что естественно), однако все рисунки позволяют утверждать (в соответствии с приведенными на них величинами R^2), что получаемый тренд имеет высокую статистическую значимость. Отметим, что, как и для станций Северного полушария, в последние несколько лет наблюдается усиление отрицательного тренда (см. ниже).

Для каждой ситуации (станция, месяц) строилась таблица, аналогичная табл. 1. Суммарный результат по каждой станции представлен в таблицах 5, 6 и 7.

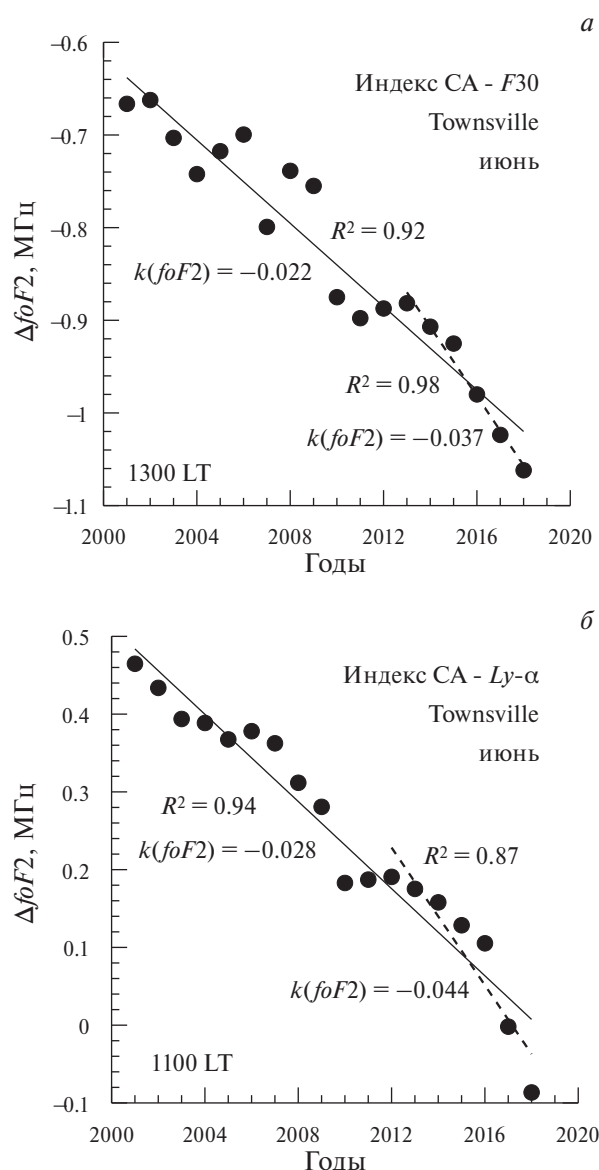


Рис. 5. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Townsville в июне.

Таблицы 5–7 показывают, что внутри каждой ситуации (станция, месяц, индекс СА) величины $k(foF2)$ для разных моментов LT близки, что позволяет получить средние околополуденные тренды с небольшой среднеквадратической ошибкой. Соответственно, усреднение для данной станции и месяца по индексам СА также дает средние величины с относительно небольшими SD. Наконец, сравнение величин $k(foF2)$, усредненных по LT и индексам СА, дает достаточно близкие величины для разных станций. Так, для июня эти величины равны -0.030 , -0.024 и -0.026 МГц/год для ст. Townsville, Hobart

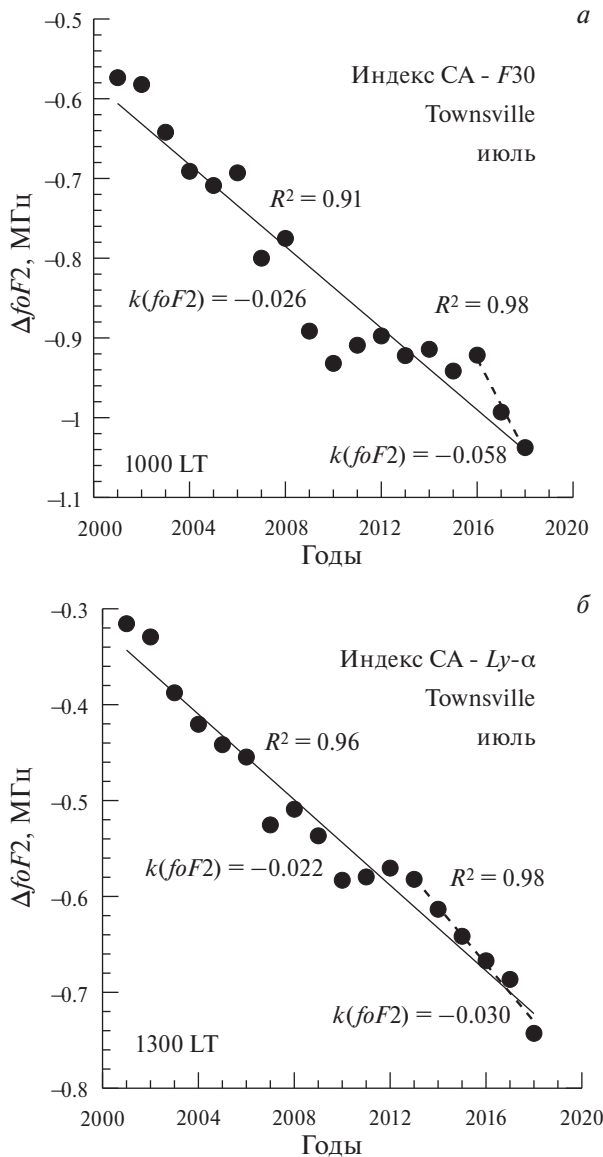


Рис. 6. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Townsville в июле.

и Canberra, соответственно. Эти величины для тех же станций для июля равны -0.024 , -0.023 и -0.026 МГц/год. Как и для станций Северного полушария в предыдущем параграфе, согласие можно считать очень хорошим.

Поскольку ранее в наших публикациях мы не рассматривали трендов $foF2$ в Южном полушарии в летние месяцы, интересно провести такой анализ для того, чтобы убедиться, что представления о сезонных вариациях трендов, полученные для станций Северного полушария, справедливы и для Южного. Мы провели этот анализ для всех трех станций для летнего месяца

февраля. Результаты для ст. Hobart и Townsville представлены в табл. 8.

Как видно из этой таблицы, для летнего месяца февраля для всех индексов СА и всех моментов ЛТ получены близкие к нулю (как положительные, так и отрицательные) тренды. При их определении на соответствующих рисунках, подобных рис. 1–10, наблюдался сильный разброс точек, поэтому соответствующие величины R^2 очень малы. А, следовательно, статистическая значимость полученных трендов мала. Фактически это означает, что в феврале трендов просто нет. Таким образом, полученные результаты полностью

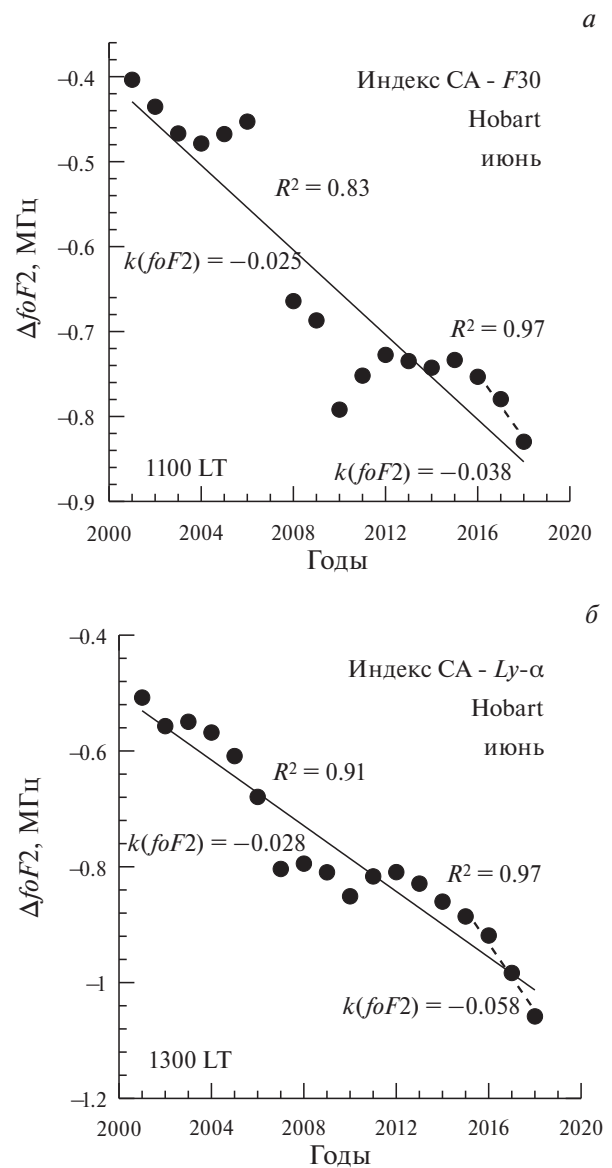


Рис. 7. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Hobart в июне.

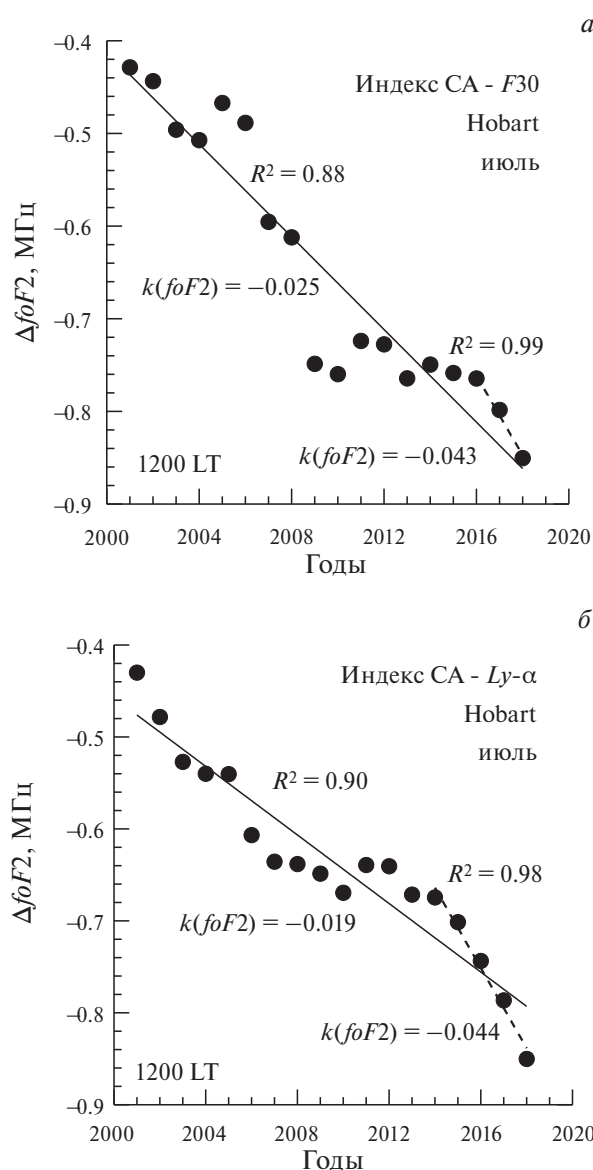


Рис. 8. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Hobart в июле.

согласуются с нашими представлениями о сезонных вариациях трендов $foF2$ — тренды значимы зимой и отсутствуют летом как Северном полушарии, так и в Южном.

Метод “Дельта”, предложенный ранее [Данилов и Константинова, 2017] является наиболее наглядным методом определения характера и примерной амплитуды трендов $foF2$. Он основан на том же сравнении величин $foF2$ для заданного индекса солнечной активности в “эталонный” период (1957–1980 гг.), когда не было трендов антропогенной природы, и в анализируемый период, как

и основной метод. В тренде нет никаких искусственных процедур (сглаживания, усреднения и т. д.) — сравниваются две кривые (зависимости $foF2$ от выбранного индекса СА в каждом из периодов), и их различие и дает изменение $foF2$ (величину Дельта) за время, прошедшее после “эталонного периода”. Более подробное описание метода “Дельта” и результатов анализа этим методом данных для ст. Juliusruh можно найти в недавней работе авторов [Данилов и др., 2023б].

Детальное исследование методом “Дельта” трендов для многих станций требует отдельной

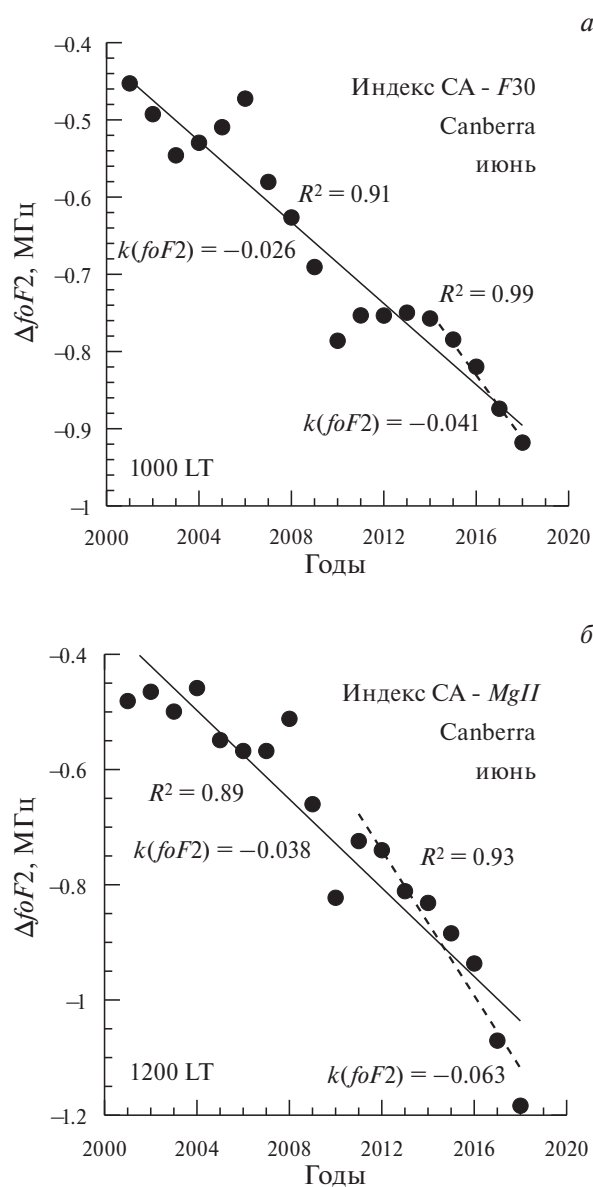


Рис. 9. Примеры изменения $\Delta foF2$ со временем для ст. Canberra в июне.

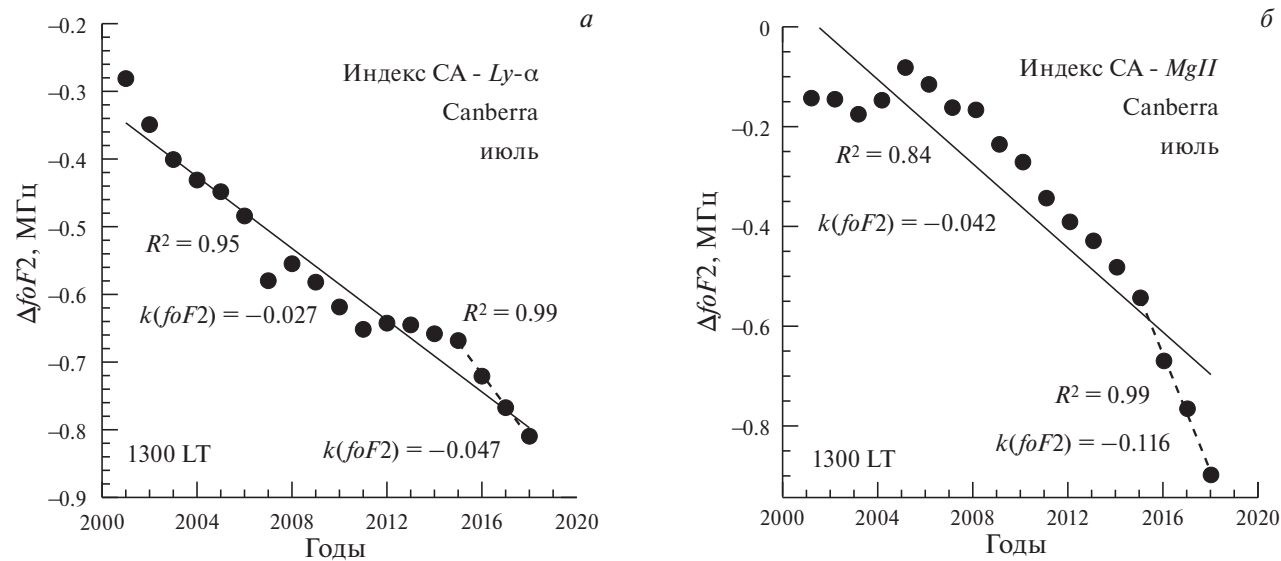


Рис. 10. Изменение $\Delta foF2$ со временем для ст. Canberra в июле.

Таблица 5. Тренды в МГц/год для 1996–2023 гг. в июне на ст. Townsville и Hobart

		Townsville				Hobart		
LT	F30	Ly-a	MgII	сред.	F30	Ly-a	MgII	сред.
10:00	-0.041	-0.034	-0.044		-0.018	-0.006	-0.022	
11:00	-0.040	-0.028	-0.044		-0.025	-0.011	-0.024	
12:00	-0.034	-0.018	-0.031		-0.028	-0.019	-0.026	
13:00	-0.022	-0.019	-0.027		-0.042	-0.028	-0.036	
14:00	-0.024	-0.013	-0.032		-0.035	-0.018	-0.026	
сред.	-0.032	-0.022	-0.036	-0.030	-0.030	-0.016	-0.027	-0.024
SD	0.009	0.008	0.008	0.007	0.009	0.008	0.005	0.007

Таблица 6. Тренды в МГц/год для 1996–2023 гг. в июле на ст. Townsville и Hobart

		Townsville				Hobart		
LT	F30	Ly-a	MgII	сред.	F30	Ly-a	MgII	сред.
10:00	-0.026	-0.022	-0.033		-0.020	-0.011	-0.023	
11:00	-0.028	-0.021	-0.031		-0.020	-0.018	-0.023	
12:00	-0.014	-0.010	-0.025		-0.025	-0.019	-0.025	
13:00	-0.024	-0.022	-0.027		-0.031	-0.027	-0.03	
14:00	-0.029	-0.020	-0.032		-0.031	-0.019	-0.028	
сред.	-0.024	-0.019	-0.030	-0.024	-0.025	-0.019	-0.026	-0.023
SD	0.006	0.005	0.003	0.006	0.006	0.006	0.003	0.004

Таблица 7. Тренды в МГц/год для 1996–2023 гг. в июне и июле на ст. Canberra

июнь					июль			
LT	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	сред.	$F30$	$Ly-\alpha$	$MgII$	сред.
10:00	–0.026	–0.018	–0.037		–0.023	–0.017	–0.029	
11:00	–0.029	–0.017	–0.042		–0.024	–0.017	–0.028	
12:00	–0.026	–0.014	–0.038		–0.023	–0.019	–0.03	
13:00	–0.022	–0.01	–0.034		–0.032	–0.027	–0.042	
14:00	–0.028	–0.014	–0.037		–0.029	–0.020	–0.037	
сред.	–0.026	–0.015	–0.038	–0.026	–0.026	–0.020	–0.033	–0.026
SD	0.003	0.003	0.003	0.012	0.004	0.004	0.006	0.007

Таблица 8. Тренды для 1996–2023 гг. в феврале

Hobart					Canberra			
LT	$F30$	$Ly-a$	$MgII$	средн.	$F30$	$Ly-a$	$MgII$	средн.
10:00	–0.008	–0.003		–0.002		–0.005	–0.002	–0.001
11:00	–0.01	+0.004	–0.001		–0.004	–0.007	–0.007	
12:00	–0.008	+0.003	+0.005		–0.007	–0.002	–0.003	
13:00	–0.002	+0.004	+0.005		0.000	+0.002	–0.002	
14:00	–0.008	–0.002	+0.003		–0.003	+0.002	+0.002	
средн.	–0.007	+0.001	+0.002	–0.001	–0.004	–0.001	–0.002	0.002
SD	0.003	0.003	0.003	0.005	0.003	0.004	0.003	0.002

публикации. Мы ограничимся здесь лишь примерами построения зависимостей критической частоты от индекса СА для двух периодов, позволяющих наглядно увидеть тенденцию изменения f_oF2 от одного периода к другому.

Примеры зависимости месячных медиан f_oF2 от различных индексов СА в “эталонный” и анализируемый периоды приведены на рис. 11. Точки — чисто экспериментальные величины медиан f_oF2 для соответствующего месяца и момента LT, нанесенные как функция индекса СА для данного месяца. Кривые — аппроксимация этих точек полиномом 3-й степени. Возле кривых приведены интервалы лет и величины коэффициента определенности по критерию Фишера.

Как видно из примеров, приведенных на рис. 11, кривые аппроксимации зависимости f_oF2 от индекса СА идут для анализируемого периода

существенно ниже, чем для эталонного. Усреднение разницы между двумя кривыми и дает искомую величину Дельта. Для панелей рис. 11 она равна, соответственно, –0.77, –1.10, –0.93 и –0.93 МГц. Иначе говоря, уменьшение f_oF2 между двумя рассмотренными временными интервалами составляет около 1 МГц.

Как уже указывалось выше, этот метод не дает величин тренда $k(f_oF2)$. Но тенденция уменьшения величин f_oF2 от эталонного периода к анализируемому хорошо видна. Это согласуется с конкретными величинами трендов, полученными в этом и предыдущем параграфах.

4. НЕДАВНИЕ ГОДЫ

В работах [Данилов и Бербенева, 2023а; Danilov and Berbeneva, 2023] уже рассматривался

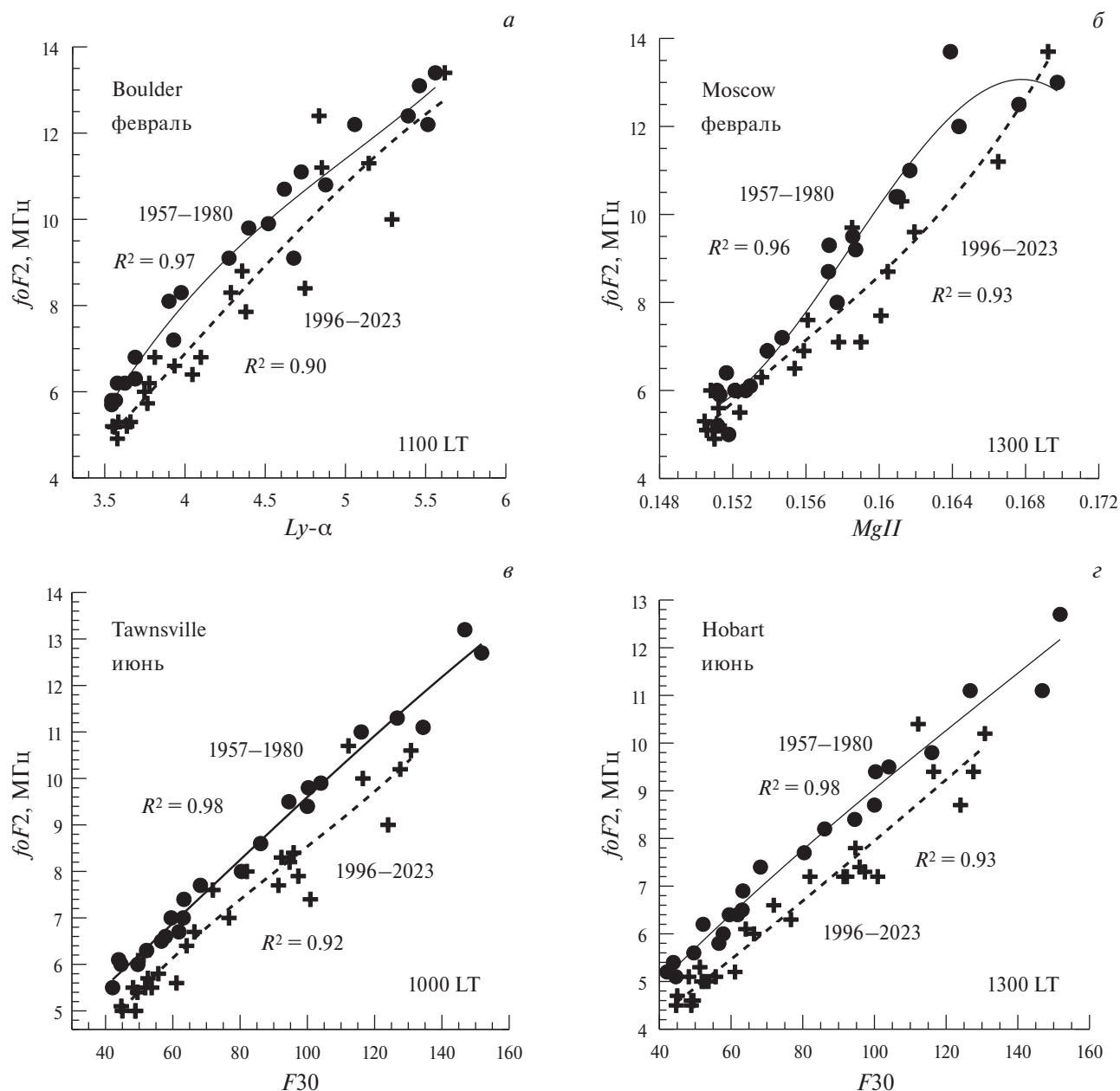


Рис. 11. Примеры зависимости $foF2$ от индексов СА для двух временных интервалов.

вопрос об усилении отрицательных трендов $foF2$ в недавние годы. Но в указанных статьях анализировались данные только одной станции Juliusruh до 2022 г. В данной работе мы анализируем эту проблему на основании данных всех шести рассмотренных станций с добавлением величин $foF2$ за 2023 г.

На всех рисунках 1–10 кроме основной линии, показывающей тренд $foF2$ за период 1996–2023 г., приводится также штриховая линия, показывающая тенденцию изменения величин $\Delta foF2$ в течение

недавних лет. Эта линия на всех рисунках кончается в конце анализируемого временного интервала, а начинается в разные годы. Мы во всех случаях начинали ее там, где наблюдается заметный “излом” в изменении точек со временем, поэтому длина периода, для которого анализируется величина $\Delta foF2$, различна — от трех до восьми лет. Конечно, при таком подходе в определении величины $k(foF2)$ есть элемент произвола. Однако это касается только амплитуды трендов, тогда как сам факт “убыстрения” падения

величин $\Delta foF2$ в недавние годы сомнения не вызывает. На всех приведенных выше рисунках отрицательные величины $k(foF2)$ для недавних лет больше по абсолютной величине, чем для всего периода 1996–2023 гг.

В силу упомянутого выше метода проведения аппроксимирующей линии для недавних лет, величины $k(foF2)$ для этого периода для заданной ситуации (станция, месяц) меняются от одного момента LT к другому гораздо сильнее, чем величины $k(foF2)$ для всего периода. Судить о степени этой изменчивости можно по данным таблицы 1, приведенной для примера выше в параграфе 1.

Получаемые для недавних лет величины $k(foF2)$ лежат в широких пределах и для некоторых ситуаций опускаются ниже -0.1 . Однако, наиболее часто встречающиеся значения лежат в пределах от -0.04 до -0.07 МГц/год.

Тот факт, что эффект усиления отрицательных трендов обнаружен для подавляющего большинства ситуаций (месяц, момент LT, индекс CA) на всех рассмотренных станциях в обоих полушариях важен, поскольку тем самым исключается объяснение этого эффекта какими-то локальными особенностями изменения $foF2$ со временем.

Насколько надежен вывод об усилении отрицательных трендов $foF2$ в недавние годы можно будет с большей уверенностью судить только через несколько лет. Однако, тот факт, что добавление к анализу данных за 2023 г. лишь усиливает эффект, который обсуждается в наших предыдущих работах [Данилов и Бербенева, 2023а; Danilov and Berbeneva, 2023] на основании данных до 2022 г., увеличивает вероятность того, что эффект реален.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже указывалось выше, основной целью данной работы был анализ изменений критической частоты $foF2$ со временем в течение последних десятилетий. Поскольку ранее уже было неоднократно показано (см., например, Данилов и Бербенева [2023а] и Данилов и др. [2023б]), что отрицательные тренды $foF2$ максимальны зимой и практически отсутствуют летом, а также максимальны днем и минимальны ночью, мы выбрали для анализа два зимних месяца и околополуденный период 10:00–14:00 LT. При этом для увеличения надежности получаемых выводов мы выбрали в Северном и Южном полушариях по три станции, для которых смогли найти месячные медианы $foF2$ для двух необходимых для анализа периодов: 1957–1980 и 1996–2023 гг.

На первый взгляд сравнивать результаты для станций двух полушарий трудно, поскольку результаты относятся к разным месяцам. Но поскольку в обоих параграфах мы анализируем таким образом типичные зимние величины $k(foF2)$, такое сравнение вполне правомерно.

Если усреднить условно приведенные выше в соответствующих таблицах величины $k(foF2)$ по всем трем станциям Северного полушария, мы получим $(-0.025-0.028-0.032)/3 = -0.028$ МГц/год для января и $(-0.041-0.036-0.033)/3 = -0.038$ МГц/год для февраля. А соответствующее усреднение по трем станциям Южного полушария дает $(-0.030-0.024-0.026)/3 = -0.027$ МГц/год для июня и $(-0.024-0.023-0.026)/3 = -0.024$ МГц/год для июля.

На наш взгляд близость найденных зимних величин $k(foF2)$ для разных станций в разных полушариях является подтверждением надежности полученных выводов о знаке и амплитуде трендов $foF2$. Следует подчеркнуть, что в каждой ситуации для устранения эффектов солнечной активности мы использовали три индекса CA ($F30$, $Ly-\alpha$ и $MgII$), которые согласно недавнему исследованию являются наилучшими для описания изменения $foF2$ со временем.

Приведенные результаты подтверждают наши предыдущие выводы о том, что в течение последних десятилетий происходит систематическое уменьшение критической частоты слоя $F2$, т.е. тренды $foF2$ отрицательны. Этот вывод согласуется со многими исследованиями последних лет (см. недавний обзор Laštovička [2023]). В частности, вывод о том, что амплитуда отрицательных трендов $foF2$ имеет выраженный суточный ход (днем больше, чем ночью) получен также в работе Yue et al. [2018].

Работа [Duran et al., 2023] была специально посвящена проблеме суточных и сезонных вариаций трендов $foF2$. В частности, был получен суточный ход $k(foF2)$: наиболее сильный отрицательный тренд наблюдается в дневные часы, тогда как ночью он слаб. При этом было получено, что максимальные отрицательные тренды днем могут достигать $-(0.03-0.04)$ МГц в год, что близко к величинам $k(foF2)$, полученным в данной работе.

То, что для пяти околополуденных моментов LT в каждой ситуации получились достаточно близкие результаты, подтверждает вывод [Данилов и Бербенева, 2023а; Данилов и др., 2023б] о том, что в суточном ходе трендов $foF2$ существует “плато” в дневные часы, когда величины $k(foF2)$ практически неизменны. Этот вывод важен для

выбора данных для анализа трендов критической частоты. Например, в работе Laštovička [2024] как раз анализируются тренды f_oF2 для 11:00–13:00 LT, что исключает мешающее влияние суточных вариаций на получаемые величины трендов.

Нам представляется, что подтверждение вывода об усилении отрицательных трендов f_oF2 в последние годы, который был получен ранее [Данилов и др., 2023а, б; Данилов и Бербенева, 2023а] также является важным результатом данной работы. Если это усиление действительно происходит, то уже скоро можно ожидать заметных эффектов в распространении КВ-радиоволн, вызванных отрицательными трендами f_oF2 .

Анализ величин f_oF2 станциях Южного полушария в летний месяц февраль подтвердил наши представления о сезонных вариациях трендов, которые основывались на анализе данных только станций Северного полушария.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы надеемся, что полученные в данной работе результаты являются еще одним подтверждением нашей концепции заметных отрицательных трендов критической частоты f_oF2 в течение последних десятилетий. На наш взгляд важен факт, что получены близкие по амплитуде отрицательные тренды для разных месяцев (январь/февраль с одной стороны и июнь/июль – с другой), которые являются, однако, зимними месяцами для Северного и Южного полушарий.

Подавляющее большинство полученных для различных ситуаций (станция, месяц, индекс СА, момент LT) величин $k(f_oF2)$ лежит в интервале от -0.020 до -0.045 МГц/год. Усреднение всех данных по каждому полушарию дает два значения, близких к -0.025 МГц/год. Эту цифру можно считать основным результатом работы.

Отличие наших результатов от результатов некоторых других исследований связано на наш взгляд с более точным учетом в наших исследованиях влияния эффектов солнечной активности. При анализе всего ряда данных за много десятилетий, как это делается во многих работах по поиску трендов, есть опасность того, что для исключения эффектов СА используются данные, которые уже “загрязнены” трендами.

Наконец, подтверждение полученного ранее вывода об усилении отрицательных трендов в последние годы может оказаться важным для всей концепции возникновения и развития долговременных изменений в ионосфере и термосфере.

БЛАГОДАРНОСТИ

Величины солнечных индексов взяты с сайта LISIRD (<https://lasp.colorado.edu>). Медианы f_oF2 взяты из банка Дамбольдта на сайте (<https://downloads.sws.bom.gov.au/wdc/iondata/medians/>) и с сайта ИЗМИРАН ([http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_\(IZMIRAN\)](http://www.wdcb.ru/stp/data/ionosphere_4/MO155_Moscow_(IZMIRAN))).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Тренды критической частоты слоя $F2$ в последнее десятилетие // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 2. С. 139–146. 2023а. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600697>
- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Статистический анализ зависимости критической частоты f_oF2 от различных индексов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 63. № 5. С. 584–594. 2023б. <https://doi.org/10.31857/S0016794023600588>
- Данилов А.Д., Бербенева Н.А. Дальнейший детальный анализ зависимости f_oF2 от солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 64. № 2. С. 253–262. 2024.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Поведение параметров слоя $F2$ на грани веков. 1. Критическая частота // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 53. № 3. С. 361–372. 2013. <https://doi.org/10.7868/S0016794013030048>
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные изменения параметра “дельта f_oF2 ” по данным двух европейских ионосферных станций // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 5. С. 623–627. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017050054>
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Долговременные вариации параметров средней и верхней атмосферы и ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 4. С. 411–435. 2020. <https://doi.org/10.31857/S0016794020040045>
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Анализ трендов f_oF2 до 2022 г. с использованием разных индексов солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 37. С. 42–54. 2023а. https://doi.org/10.5425/2304-7380_2022_37_42
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Детальный анализ суточных вариаций трендов f_oF2 // Гелиогеофизические исследования. Вып. 39. С. 8–16. 2023б. https://doi.org/10.5425/2304-7380_2023_39_8
- Данилов А.Д., Константинова А.В., Бербенева Н.А. Дальнейший детальный анализ зависимости f_oF2 от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 40. С. 68–80. 2023в.
- Danilov A.D., Berbeneva N.A. Statistical analysis of the critical frequency f_oF2 dependence on various solar activity indices // Adv. Space Res. V. 72. № 6. P. 2351–2361. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.05.012>

- *De Haro Barbás B.F., Elias A.G.* Effect of the inclusion of solar cycle 24 in the calculation of f_oF2 long-term trend for two Japanese ionospheric stations // *Pure Appl. Geophys.* V. 177. № 2. P. 1071–1078. 2020. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02307-z>
- *De Haro Barbás D.F., Elias A.G., Venchiarutti J.V., Fagre M., Zossi B.S., Jun G.T., Medina F.D.* MgII as a solar proxy to filter $F2$ -region ionospheric parameters // *Pure Appl. Geophys.* V. 178. № 11. P. 4605–4618. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02884-y>
- *Duran T., Melendi Y., Zossi B.S., de Haro Barbás B.F., Buezas F.S., Juan A., Elias A.G.* Contribution to ionospheric $F2$ region long-term trend studies through seasonal and diurnal pattern analysis // *Global Planet. Change.* V. 229. ID 104249. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2023.104249>
- *Laštovička J.* A review of recent progress in trends in the upper atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 163. P. 2–13. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.009>
- *Laštovička J.* Long-term changes in ionospheric climate in terms of f_oF2 // *Atmosphere.* V. 13. № 1. ID 110. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010110>
- *Laštovička J.* Dependence of long-term trends in f_oF2 at middle latitudes on different solar activity proxies // *Adv. Space Res.* V. 73. № 1. P. 685–689. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.047>
- *Laštovička J.* Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere // *Atmos. Chem. Phys.* V. 23. № 10. P. 5783–5800. 2023. <https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023>
- *Laštovička J., Burešová D.* Relationships between f_oF2 and various solar activity proxies // *Space Weather* V. 21. № 4. ID e2022SW003359. 2023. <https://doi.org/10.1029/2022SW003359>
- *Yue X., Hu L., Wei Y., Wan W., Ning B.* Ionospheric trend over Wuhan during 1947–2017: Comparison between simulation and observation // *J. Geophys. Res.—Space.* V. 123. № 2. P. 1396–1409. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017JA024675>

Trends in the Critical Frequency f_oF2 at Stations of the Northern and Southern Hemispheres

A. D. Danilov^{1, *}, A. V. Konstantinova¹, N. A. Berbeneva²

¹*Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*

²*Physical Faculty of the Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: adanilov99@mail.ru

A search for long-term trends in the $F2$ layer critical frequency f_oF2 is performed based on vertical sounding observations at three stations of the Northern Hemisphere (Juliusruh, Boulder, and Moscow) and three stations of the Southern Hemisphere (Townsville, Hobart, and Canberra). A method developed and extensively described by the authors is used. The data for two winter months in each hemisphere for five near-noon LT moments were analyzed. Three solar activity (SA) proxies ($F30$, $Ly-\alpha$, and $MgII$) were used to eliminate SA effects. Negative trends are obtained for all considered situations (station, month, LT moment, SA proxy). The trends agree well with each other both if stations of the Northern and Southern hemispheres are compared individually or in aggregate.

УДК 621.371.3+537.87

СЕЗОННО-СУТОЧНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ В ГОДЫ УМЕРЕННОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. В. И. Куркин^{1, 2, *}, А. В. Подлесный^{1, **,}, М. В. Цедрик^{1, ***,}, А. В. Софьин^{1, 2, ****}

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

²Российский новый университет (РосНОУ), Москва, Россия

*e-mail: vikurkin@yandex.ru

**e-mail: pav1986@rambler.ru

***e-mail: mark7cedrick@gmail.com

****e-mail: sof@rambler.ru

Поступила в редакцию 21.11.2023 г.

После доработки 25.12.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

На основе данных системы радиотрасс наклонного зондирования на средних широтах азиатского региона России выявлена высокая (до 40–50%) среднесуточная вероятность появления среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений в годы умеренной солнечной активности. Суточный ход вероятности регистрации этих возмущений имеет ярко выраженную сезонную зависимость. Для зимнего сезона наблюдается дневной максимум вероятности, достигающий в отдельные дни 100%. В летний сезон максимум вероятности приходится на ночные часы местного времени в средней точке соответствующей трассы. Возможной причиной этого является переход от зимней к летней системе атмосферной циркуляции.

DOI: 10.31857/S0016794024030065, EDN: SMRMAS

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений (СМ ПИВ) с помощью ионозондов вертикального и наклонного зондирования имеют длительную историю (см., например, [Wells et al., 1946; Munro, 1950]). Ввиду существенного влияния СМ ПИВ на многолучевость КВ ионосферного радиоканала и трудности прогнозирования их появления, реализуются многолетние национальные и международные программы исследования СМ ПИВ с использованием систем радиотрасс наклонного зондирования (НЗ) [Zolesi et al., 2008; Verhulst et al., 2017; Heitmann et al., 2018]. В России аналогичные многолетние исследования активно ведутся в ее европейской части [Вертоградов и др., 2008; Vybornov et al., 2022]. В азиатском регионе России СМ ПИВ исследуются как с использованием многопозиционных измерений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния и дигизонде DPS-4 [Medvedev et al., 2013], так

и на системе радиотрасс наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы [Софьин и Куркин, 2021]. Однако многообразие потенциальных источников СМ ПИВ и широкий диапазон их собственных характеристик оставляет еще много неясных вопросов в их прогнозировании и возможном использовании для диагностики динамических характеристик нейтральной атмосферы. В данной статье приведены результаты анализа сезонно-суточных зависимостей характеристик СМ ПИВ на основе двухлетнего эксперимента по наклонному зондированию ионосферы азиатского региона России в годы умеренной солнечной активности (2015–2016 гг.).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Мы проанализировали данные наклонного зондирования ионосферы непрерывным сигналом с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ-сигнал) в диапазоне 6–30 МГц со скоростью пере-

стройки 500 кГц/с на системе из пяти радиотрасс с использованием аппаратуры, разработанной в ИСЗФ СО РАН и послужившей основой для многофункционального ЛЧМ-ионозонда для мониторинга ионосферы [Подлесный и др., 2013]. Три ЛЧМ-передатчика, расположенные в обсерваториях ИСЗФ СО РАН в Норильске (координаты 70.1° N, 88.1° E; мощность 150 Вт) и ИКИР ДВО РАН вблизи Магадана (60° N, 150.7° E; 150 Вт) и Хабаровска (47.6° N, 134.7° E; 15 Вт), излучали круглосуточно с интервалом 5 минут. В Норильске и Магадане передача велась на логопериодические антенны, в Хабаровске – на горизонтальный ромб. Два приемных пункта расположены в п. Торы вблизи Иркутска (координаты 51.8° N, 103.1° E) и вблизи Норильска (рис. 1).

В Иркутске прием проводился на дельта-образную антенну размахом 36 м на мачте высотой 10 м, в Норильске – на активную рамочную антенну диаметром 1 м. Буквами *A*, *B*, *C*, *D* и *E* на рис. 1 обозначены средние точки односкачковых радиотрасс, анализируемых в данной работе. Непрерывный мониторинг в режиме наклонного зондирования осуществлялся на 5 трассах: Хабаровск–Иркутск (2300 км), Магадан–Иркутск (3000 км), Норильск–Иркутск (2100 км), Хабаровск–Норильск (3500 км) и Магадан–Норильск (3000 км). Эксперимент проводился в годы умеренной солнечной активности на спаде 24-го цикла, когда ежемесячное усредненное количество солнечных пятен уменьшалось от 90 до 30.

На рис. 2, в качестве иллюстрации, для трассы Хабаровск–Иркутск показаны характерные возмущения (*Z*-типа) на ионограммах наклонного зондирования, возникающие за счет дополни-

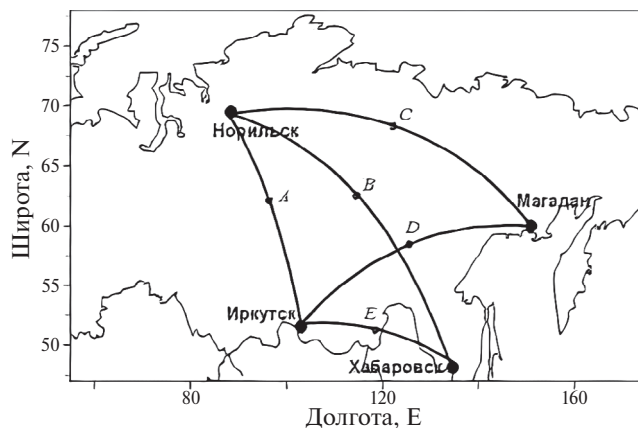


Рис. 1. Система радиотрасс наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы в азиатском регионе России.

тельной многолучевости принимаемого сигнала при пересечении СМ ПИВ области в окрестности точки отражения односкачкового сигнала. Область эффективного воздействия СМ ПИВ на регистрируемые ионограммы составляет несколько сотен км в окрестности средней точки трассы [Софьин и Куркин, 2021]. Следует отметить, что в отличие от вертикального и слабонаклонного зондирования возмущенная область на ионограммах НЗ (*Z*-типа) всегда спускается вдоль трека верхнего луча вниз, переходя, как правило, со временем на нижний луч и продолжая движение в область меньших задержек.

Указанная система радиотрасс позволила провести сопоставление влияния СМ ПИВ на ионограммы наклонного зондирования для односкачковых радиотрасс азиатского региона России при различной их ориентации и при расположении области отражения сигналов в средних и субпо-

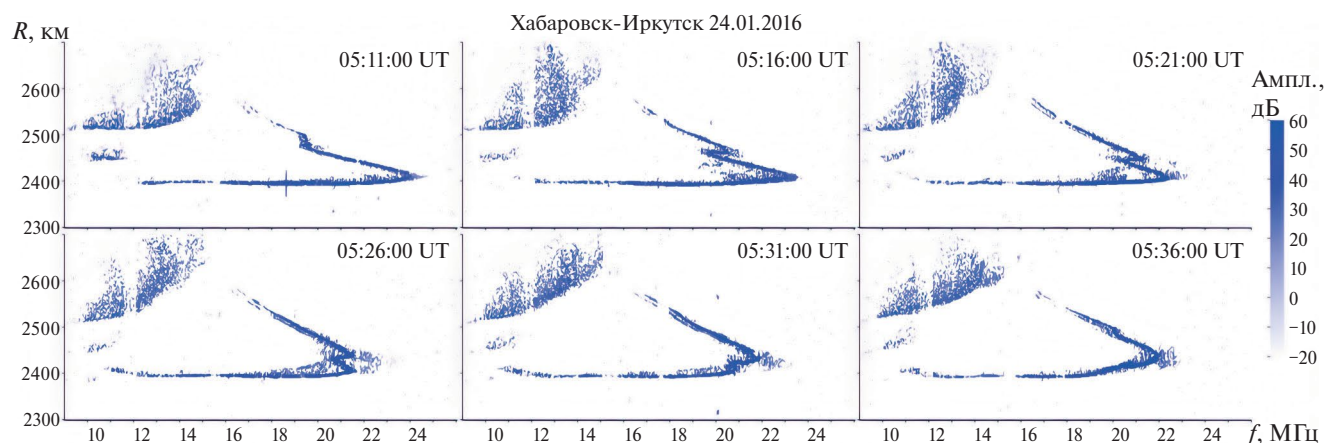


Рис. 2. Примеры ионограмм НЗ с возмущениями *Z*-типа для трассы Хабаровск–Иркутск с интервалом 5 мин.

лярных широтах. В качестве характеристик возмущений ионограмм в дальнейшем будут использоваться:

P_t — вероятность регистрации СМ ПИВ, определяемая отношением числа ионограмм с возмущениями Z-типа к общему числу зарегистрированных ионограмм в течение часового интервала наблюдений;

P_d — среднесуточная вероятность регистрации СМ ПИВ, определяемая отношением возмущенных ионограмм для какого-либо числа выбранного месяца к общему числу зарегистрированных ионограмм в этот день;

T_n — длительность регистрации конкретного СМ ПИВ определяемая произведением числа

возмущенных ионограмм, где он присутствует, на пятиминутный интервал регистрации.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЯ

Передающие пункты рассматриваемой системы радиотрасс работали стабильно в течении всего анализируемого периода наблюдений, обеспечивая излучение в более 95% всех планируемых сеансов. Исключение составляют сентябрь 2015 г. для Магаданского пункта (65%) и август 2015 г. для Норильского передатчика (75%). Приемный пункт в п. Торы вблизи Иркутска работал без сбоев. Норильский приемный пункт, расположенный на выносном пункте “Исток” Норильской

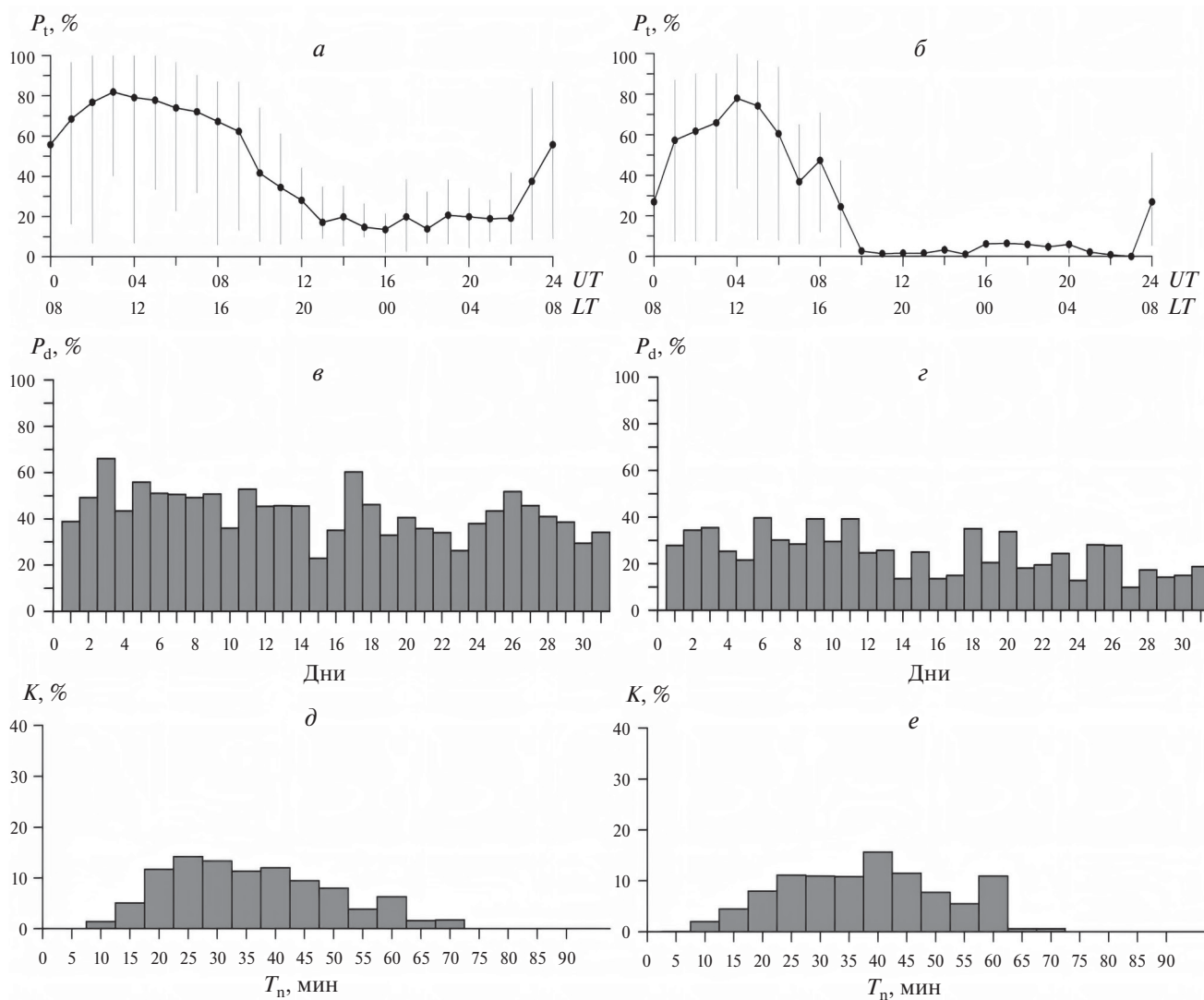


Рис. 3. Характеристики СМ ПИВ (P_t , P_d , T_n) в декабре 2015 г. для радиотрасс Хабаровск–Иркутск (а, в, д) и Магадан–Иркутск (б, г, е).

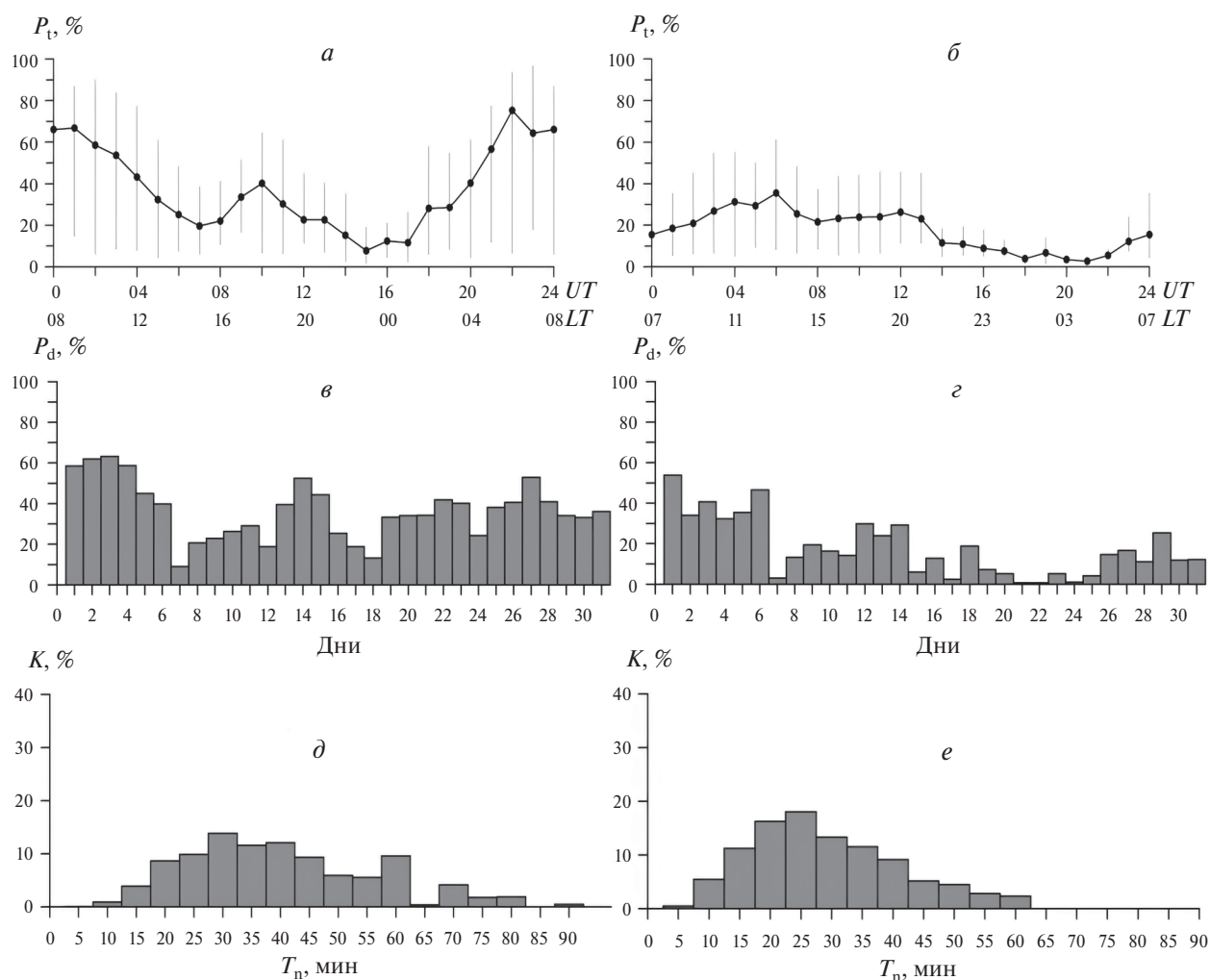


Рис. 4. Характеристики СМ ПИВ (P_r , P_d , T_n) для радиотрасс Хабаровск–Иркутск (а, в, д) и Норильск–Иркутск (б, г, е) в марте 2016 г.

комплексной магнитно-ионосферной станции (КМИС) в тундре в 100 км от Норильска, обеспечил регистрацию ионограмм в более 80% случаев, когда излучали передатчики в Хабаровске и в Магадане. Исключение составил март 2016 г., когда было зарегистрировано около 50% излученных сигналов.

Для среднеширотных трасс Хабаровск–Иркутск, Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск суточный ход вероятности регистрации СМ ПИВ (P_r) в зимние месяцы имеет ярко выраженный максимум в дневные часы местного времени в средних точках указанных радиотрасс.

На рис. 3 (а и б) вертикальными линиями указан диапазон значений P_r ото дня ко дню для каждого часа суток в декабре 2015 г. для трасс Хабаровск–Иркутск и Магадан–Иркутск. Среднеме-

сячные значения P_r , указанные здесь точками, в дневные часы превышали 70%. Среднесуточная вероятность регистрации СМ ПИВ (P_d) была максимальной на трассе Хабаровск–Иркутск (в среднем более 40%), достигая в отдельные дни 60% (рис. 3в). Вероятность регистрации СМ ПИВ длительностью от 30 до 70 мин превышала 60%. При этом интервал минимальной вероятности регистрации возмущенных ионограмм в суточном ходе (12–20 UT) для трассы Хабаровск–Иркутск хорошо коррелирует с данными многолетних наблюдений временной зависимости интенсивности ВГВ вблизи средней точки радиотрассы (ст. Мохэ) с использованием метеорного радара [Long et al., 2023]. На трассах Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск в освещенное время суток (00–09 UT) среднесуточные значения вероятности регистра-

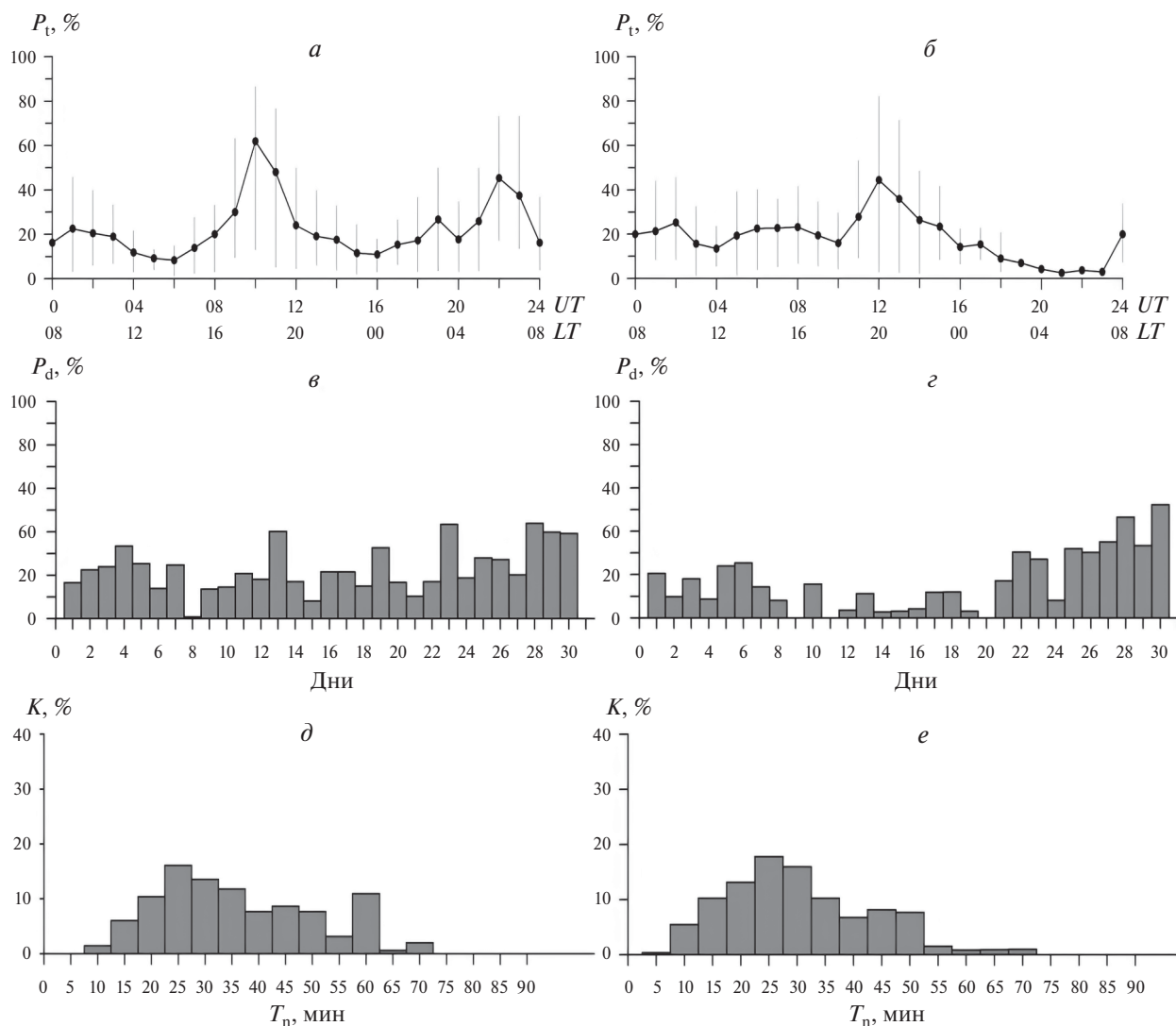


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для сентября 2015 г.

ции возмущений P_i превышали 60%, достигая в отдельные дни 100% так же, как и для трассы Хабаровск–Иркутск. В ночные часы частота появления СМ ПИВ на этих трассах мала, хотя критические частоты в средних точках трасс незначительно ниже, чем для трассы Хабаровск–Иркутск. Среднесуточная вероятность регистрации СМ ПИВ (P_d) в декабре 2015 г. на трассе Магадан–Иркутск варьировалась от 10% до 40% (рис. 3г). Длительность регистрации каждого СМ ПИВ (T_n) для этих трех радиотрасс варьировалась от 15 до 90 минут. При этом, значения T_n , равные 30 мин и более, зарегистрированы приблизительно в 70% случаев. Указанные особенности вероятностных характеристик СМ ПИВ на среднеширотных односторонних радиотрассах азиатского региона России характерны как для остальных месяцев

зимнего сезона 2015–2016 гг. [Kurkin et al., 2023], так и для зимнего сезона 2014–2015 гг.

На субполярной радиотрассе Магадан–Норильск среднесеasonные значения вероятности регистрации возмущений P_i в дневные часы были существенно ниже, не превышая 60%, а интервал времени регистрации ПИВ сократился (01–08 UT). В остальные часы вероятность регистрации СМ ПИВ очень мала, что связано с низкой концентрацией фоновой ионосферы в это время вдоль субполярной радиотрассы. Длительность регистрации отдельных СМ ПИВ, в основном, составляла 15–35 мин.

Для весеннего сезона характерно существенное падение вероятности регистрации СМ ПИВ (P_i) на трассах Хабаровск–Иркутск (рис. 4а) и Ма-

гадан—Иркутск в дневные часы местного времени и увеличение ее в утренние и вечерние часы. При этом среднесуточная вероятность регистрации СМ ПИВ (P_d) уменьшилась незначительно за счет расширения временного интервала регистрации СМ ПИВ. Незначительно изменились и гистограммы распределения времени регистрации отдельных СМ ПИВ (T_n) для этих радиотрасс.

На трассе Норильск—Иркутск наряду с уменьшением дневного максимума P_i (рис. 4б) отмечается существенная изменчивость как вероятности регистрации СМ ПИВ от дня ко дню в одни и те же часы, так и длительности регистрации отдельных СМ ПИВ в результате перестройки

глобальной атмосферной циркуляции. Более 60% зарегистрированных СМ ПИВ имели длительность T_n менее 30 мин.

Для радиотрасс Хабаровск—Норильск и Магадан—Норильск дневной максимум вероятности регистрации СМ ПИВ увеличился по сравнению с зимним сезоном до 60% при незначительном росте вероятности регистрации СМ ПИВ в ночные часы.

Аналогичные особенности проявления СМ ПИВ на среднеширотных трассах азиатского региона России Хабаровск—Иркутск, Норильск—Иркутск и Магадан—Иркутск зарегистрированы в осенний сезон (рис. 5). Для радиотрасс Хабаровск—Норильск и Магадан—Норильск дневной

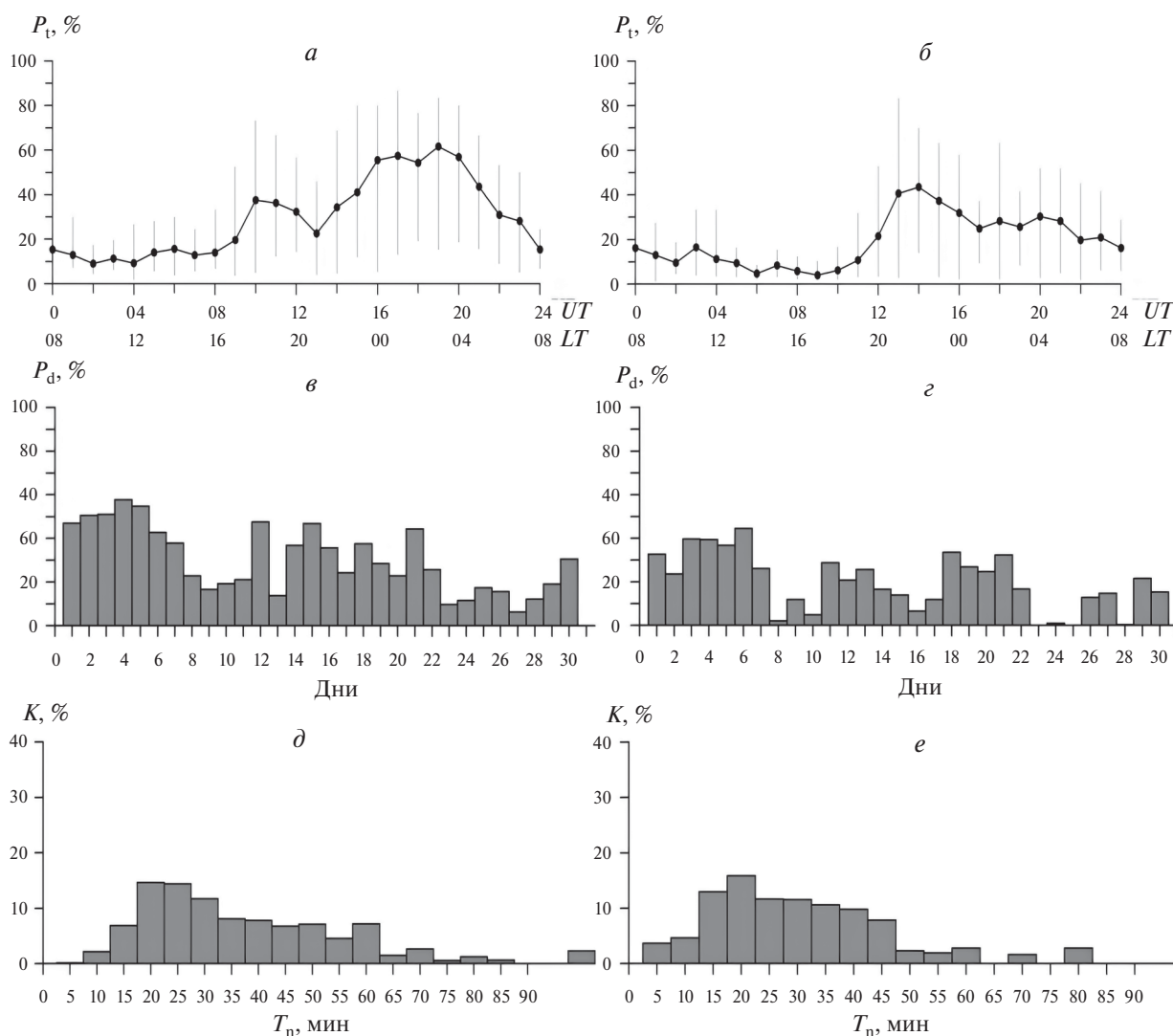


Рис. 6. Характеристики СМ ПИВ (P_i , P_d , T_n) для радиотрасс Хабаровск—Иркутск (а, в, д) и Норильск—Иркутск (б, г, е) в июне 2015 г.

максимум среднемесячных значений вероятности регистрации СМ ПИВ (P_i) осенью не превышал 30%.

В летние месяцы на всех трассах в дневные часы местного времени регистрировалось минимальное количество СМ ПИВ (не более 20%) с выраженным максимумом среднемесячной вероятности (около 60%) в ночные часы. Наряду с большими длительностями (40 мин и более) в эти дни наблюдались многочисленные СМ ПИВ с длительностями 30 минут и менее. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведены характеристики СМ ПИВ на трассах Хабаровск–Иркутск и Норильск–Иркутск в июне 2015 г. Существенные вариации среднесуточных вероятностей регистрации СМ ПИВ (P_i) в периоды 8–10 и 22–28 июня объясняются влиянием умеренной и мощной геомагнитных бурь.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суточный ход вероятности регистрации СМ ПИВ на однокачковых радиотрассах в азиатском регионе России в годы умеренной солнечной активности имеет ярко выраженную сезонную зависимость. Для зимнего сезона на всех рассмотренных трассах наблюдается дневной максимум P_i , достигающий на среднеширотных радиотрассах в отдельные дни 100%. В летний сезон максимум P_i приходится на ночные часы местного времени в средней точке соответствующей трассы. Наиболее вероятной причиной этого является переход от зимней к летней системе атмосферной циркуляции. Поэтому в весенний и осенний сезоны отмечены существенные изменения как вероятности регистрации СМ ПИВ от дня ко дню, так и длительности регистрации отдельных СМ ПИВ в течение суток.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-12-00299-П), использованы экспериментальные данные и результаты первичной обработки, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278) с помощью оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вертоградов Г.Г., Денисенко П.Ф., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П. Мониторинг среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы // Электромагнитные волны и электронные системы. Т. 13. № 5. С. 35–44. 2008.
- Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселев А.М., Петухов Е.В. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. Вып. 4. С. 24–31. 2013.
- Софьян А.В., Куркин В.И. Исследование пространственных областей влияния ПИВ на ионограммы наклонного зондирования ионосферы // Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции “Распространение радиоволн” [Электронный ресурс]: научное электронное издание. Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта. С. 358–363. 2021.
- Heitmann A.J., Cervera M.A., Gardiner-Garden R.S., Holdsworth D.A., MacKinnon A.D., Reid I.M., Ward B.D. Observations and modelling of travelling ionospheric disturbance signatures from an Australian network of oblique angle-of-arrival sounders // Radio Sci. V. 53. № 9. P. 1089–1107. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018RS006613>
- Kurkin V.I., Medvedeva I.V., Podlesnyi A.V. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia // Adv. Space Res. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.020>
- Long C., Yu T., Sun Y.-Y., Yan X., Zhang J., Yang N., Wang J., Xia C., Liang Y., Ye H. Atmospheric gravity wave derived from the neutral wind with 5-minute resolution routinely retrieved by meteor radar at Mohe // Remote Sensing. V. 15. № 2. ID 296. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15020296>
- Medvedev A.V., Ratovsky K.G., Tolstikov M.V., Alsatkin S.S., Scherbakov A.A. Studying of the spatial-temporal structure of wavelike ionospheric disturbances on the base of Irkutsk incoherent scatter radar and Digisonde data // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 105–106. P. 350–357. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.09.001>
- Munro G.H. Travelling disturbances in the ionosphere // P. Roy. Soc. Lond. A Mat. V. 202. № 1069. P. 208–223. 1950. <https://doi.org/10.1098/rspa.1950.0095>
- Verhulst T., Altadill D., Mielich J. et al. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes // Adv. Space Res. V. 60. № 8. P. 1644–1656. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.033>
- Vybornov F., Sheiner O., Kolchev A., Zykov E., Chernov A., Shumaev V., Pershin A. On the results of a special experiment on the registration of traveling ionospheric disturbances by a system of synchronously operating chirp ionosondes // Atmosphere. V. 13. № 1. P. 84–98. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010084>
- Wells H.W., Watts J.M., George D.E. Detection of rapidly moving ionospheric clouds // Phys.-Rev. V. 69. № 9–10. P. 540–541. 1946. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.69.540>
- Zolesi B., Fontana G., Perrone L. et al. A new campaign for oblique incidence ionospheric sounding over Europe and its data application // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 70. № 6. P. 854–869. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.02.015>

Seasonal-Diurnal Features of the Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances Characteristics in the Asian Region of Russia During Years of Moderate Solar Activity

V. I. Kurkin^{1, 2, *}, A. V. Podlesnyi^{1, **}, M. V. Cedrik^{1, ***}, A. V. Sofyin^{1, 2, ****}

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS),
Irkutsk, Russia*

²*Russian New University (ROSNOU), Moscow, Russia*

**e-mail: vikurkin@yandex.ru*

***e-mail: pav1986@rambler.ru*

****e-mail: mark7cedrick@gmail.com*

*****e-mail: sof@rambler.ru*

Based on data from a network of oblique-incidence sounding radio paths at mid-latitudes in the Asian region of Russia, a high (up to 40–50%) average-daily recording probability of the medium-scale traveling ionospheric disturbances in years of moderate solar activity has been identified. The daily variation in the recording probability of these disturbances at mid-latitude radio paths in the Asian region of Russia has a pronounced seasonal dependence. For the winter season, there is a daily maximum probability, reaching 100% on some days. In the summer season, it occurs at night hours of local time at the midpoint of the corresponding radio path. The most likely reason for this is the transition from winter to summer pattern of the atmosphere zonal circulation.

УДК 523.982.8

СЕЗОННЫЕ, ДОЛГОТНЫЕ И ШИРОТНЫЕ РАЗЛИЧИЯ СУММЫ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В ГОДЫ МАКСИМУМА И МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. В. А. Лаптухов^{1,*}

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

*e-mail: laptuhov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 20.11.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

На большом массиве данных наблюдений (за ~50–80 лет) 456 метеорологических станций России показано, что существует отчетливо выраженное различие месячной суммы осадков DP в годы максимума и минимума солнечной активности по месяцам и сезонам года, по широтам и долготам. Особенно большие величины параметра DP наблюдаются в полосе широт $U = 40\text{--}55^\circ \text{ N}$ в полосе долгот $D = 20\text{--}40^\circ \text{ E}$ в октябре, $DP = 13.6 \pm 2.2$ мм, а также в полосе долгот $D = 110\text{--}130^\circ \text{ E}$ в июне, $DP = -8.5 \pm 1.0$ мм. В зоне максимального влияния солнечной активности на сумму осадков было проведено исследование на наличие корреляционной связи чисел Вольфа с суммой осадков. В результате был обнаружен сильный рост корреляции в случае сдвига чисел Вольфа назад по времени, что и послужило аргументом для доказательства влияния солнечной активности на погоду. Автора убеждает в физической значимости корреляции то, что она получена на основе данных нескольких географических пунктов. Сделан вывод о том, что солнечная и геомагнитная активность способна управлять развитием внутренних неустойчивостей атмосферы и, тем самым, влиять на климат.

DOI: 10.31857/S0016794024030071, EDN: SMMKGP

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследованию влияния солнечной активности (СА) на физические параметры атмосферы Земли посвящено большое количество работ (см., например, [Пудовкин и Морозова, 2000; Распопов и др., 2008; Дергачев и Распопов, 2008; Веретененко и Огурцов, 2010]). Однако доказательства существования такого влияния убеждают далеко не всех исследователей, и поэтому они считают, что влияние СА на климат Земли является малосущественным. По-видимому, основным аргументом противников влияния СА на климат является различие не только по величине, но и по знаку коэффициентов корреляции между параметрами атмосферы и СА в разных точках поверхности Земли и, кроме того, в разные месяцы года. Поэтому при усреднении по большим площадям и/или по многим месяцам года исследуемый эффект становится пренебрежимо малым. Используемый в этой работе метод анализа лишен этого недостатка и учитывает, что влияние

СА на динамику атмосферы не может быть одинаковым в разных ее точках и в разное время года из-за неустойчивости атмосферы Земли, проявляющейся в образовании и последующем угасании циклонов и антициклонов.

В работе [Лаптухов и Лаптухов, 2010] на массиве данных наблюдений за ~100 лет многих российских, западноевропейских, канадских, австралийских и других метеорологических станций показано, что температура воздуха на средних широтах в годы, близкие к максимуму солнечной активности, в среднем на $DT = 0.11\text{--}0.15^\circ \text{C}$ выше, чем в остальные годы, близкие к годам минимума СА. Вблизи экватора и полюсов параметр DT отрицателен и меньше по величине. Показано, что величина и знак DT зависят от средней скорости глобальной циркуляции воздуха на поверхности Земли. Параметр DT существенно отличается для разных месяцев года. Предложен физический механизм влияния солнечной и геомагнитной активности на приземную температуру воздуха.

При анализе большого массива метеорологических данных в работе [Лаптухов и Лаптухов, 2011] показано, что различие температуры воздуха DT приземного воздуха в России в годы максимумов и минимумов солнечной активности существенно разное для разных месяцев года, широт и долгот точек наблюдения. Особенно большие величины этого различия наблюдаются в высоких широтах $U = 60-83^\circ \text{ N}$ в феврале, $DT = +2.07 \pm 0.28^\circ \text{C}$, в полосе долгот $D = 170-190^\circ \text{ E}$ и в ноябре, $DT = -1.41 \pm 0.29^\circ \text{C}$, в полосе долгот $D = 150-170^\circ \text{ E}$.

Цель этой работы: на основе большого массива данных метеорологических станций России провести анализ различий суммы осадков DP в годы максимума и минимума солнечной активности по трем независимым параметрам: месяцу (или сезону) года, широте и долготе точки наблюдения. Путем введения дифференциации DP от трех этих параметров добиться существенного уменьшения погрешности расчета и получить достаточно плавные и убедительные зависимости DP от долготы и широты для разных месяцев года, разных узких диапазонов широт и долгот.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

Мы имеем данные среднемесячных значений суммы осадков $p_{im}(t)$ и $P_{im}(t)$ за многие годы на метеорологических станциях с номером $I = 1, 2, \dots$, географической широтой U_i и долготой D_i . Проведем сортировку этих данных для каждой станции наблюдения по четырем параметрам: номеру месяца года $m = 1, 2, \dots, 12$, номерам широтного $j = 1 + [(U_i - U_0)/H_U]$, $j = 1, 2, \dots, j_k$ и долготного интервалов $k = 1 + [(D_i - D_0)/H_D]$, $k = 1, 2, \dots, k_k$ и номеру группы по солнечной активности $n = 1, 2$. Здесь U_0 и D_0 — минимальные значения соответственно широты и долготы рассматриваемых метеорологических станций, H_U и H_D — ширина ячейки дискретизации соответственно по широте и долготу, квадратные скобки обозначают оператор взятия целой части от числа, стоящего внутри их, например: $[0.63] = 0$, $[3.99] = 3$. При этом, если станции с номером i соответствуют определенные выше числа j и k , а рассматриваемый момент времени t относится к номеру месяца m и удовлетворяет неравенству $t_{\max} + t_1 < t < t_{\max} + t_2$ (где $t_1 = -1$ год, $t_2 = 4$ года, $t_{\max}$ — любой из моментов максимума СА по числам Вольфа в годах), то соответствующее этому моменту времени суммы осадков $P_i(t)$ отнесено в ячейку с номерами m, j, k и $n = 2$. Остальные данные измерений отнесены в ячейки с номерами m, j, k и $n = 1$.

Пусть максимальный номер группы по широте $j_k = 4$, а по долготу $k_k = 8$. Тогда после такой

сортировки всего массива наших данных в каждой из $12 \times 4 \times 8 \times 2 = 768$ ячеек мы можем подсчитать количество данных измерений $K(m, j, k, n)$, сумму осадков и среднее для этой ячейки значение суммы осадков $\langle P(m, j, k, n) \rangle$. Наконец, можно найти разность этих средних значений суммы осадков $DP(m, j, k) = \langle P(m, j, k, 2) \rangle - \langle P(m, j, k, 1) \rangle$ для каждого набора чисел m, j, k . Параметр $DP(m, j, k)$ характеризует влияние СА на сумму осадков. Если бы влияние СА на сумму осадков было пренебрежимо мало, то годы максимума и минимума СА не отличались бы заметным образом друг от друга. Тогда параметр $DP(m, j, k)$ был бы равен нулю в пределах погрешности расчета и измерений.

Но если величина $DP(m, j, k)$ существенно выше погрешности, то, значит, влияние СА на сумму осадков реально существует. Погрешность расчета параметра $DP(m, j, k)$ находится по формуле $\sigma = (\sigma_{\max}^2 + \sigma_{\min}^2)^{1/2}$ [Яворский и Детлаф, 1990], где $\sigma_{\max}$ и $\sigma_{\min}$ — погрешности расчета средних величин $\langle P(m, j, k, 2) \rangle$ и $\langle P(m, j, k, 1) \rangle$, соответственно. Напомним, что чем большее число точек N_{jk} используется при расчете средних величин $\langle P(m, j, k, 2) \rangle$, тем меньше величина погрешности среднего: $\sigma_{\max} \sim 1/N_{jk}^{1/2}$ [Корн и Корн, 1978].

В этой работе рассматривались среднемесячные значения суммы осадков для 456 метеорологических станций России, взятые в интернете по электронному адресу: (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=17>). Большинство из этих станций вели измерения за промежуток времени 80 лет (с 1936 по 2015 гг.). К сожалению, по этому адресу не указаны широта и долгота станций, а только их кодовые номера. Поэтому были взяты географические координаты исследуемых метеорологических станций с известными кодовыми номерами из интернета по адресу: (http://meteomaps.ru/meteostation_codes.html). Однако по этому адресу для некоторых станций России их географические координаты отсутствуют, и такие станции не рассматривались.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Рассмотрим метеорологические станции, находящиеся в диапазоне долгот $D = 20-50^\circ \text{ E}$, и проведем сортировку их по широте в диапазоне $U = 40-70^\circ \text{ N}$ на 6 равных интервалов по 5° в каждом. В выбранном интервале широт $j = 1, 2, \dots, 6$ найдем средние по всем станциям, входящим в эти интервалы, значения DP для каждого месяца года m , которые будем обозначать $[DP]_{mj}$. Для нахождения погрешности σ величины $[DP]_{mj}$ мы вычислили для каждого месяца года m в каждом интервале широт j погрешности средних вели-

чин сумм осадков в годы максимума $\sigma_{\max}$ и в годы минимума $\sigma_{\min}$ солнечной активности. Тогда имеем $\sigma = (\sigma_{\max}^2 + \sigma_{\min}^2)^{1/2}$ [Яворский и Детлаф, 1990]. Далее к рассчитанным $[DP]_{mj}$ для каждого интервала j и месяца года m прибавляем и вычитаем вычисленную величину σ . Полученные таким образом результаты расчета представлены на рис. 1а и б. На рис. 1а отображены 6 месяцев с ноября по апрель, а на рисунке 1б отображены 6 месяцев с мая по октябрь.

Жирными линиями обозначены $[DP]_{mj}$ для разных месяцев года, а пунктирными линиями обозначены диапазоны их погрешностей $\pm\sigma$. Номер жирных линий на этих рисунках соответствует номеру месяца года. Пунктирные линии '1–' и '1+' есть границы диапазона погрешности для средних DP января, '2–' и '2+' — для февраля, и т. д.

Рассмотрим метеорологические станции, находящиеся в диапазоне широт $U = 40–55^\circ \text{ N}$, и проведем сортировку их по долготе на 7 равных интервалов по 20° в каждом в диапазоне $D = 20–160^\circ \text{ E}$. В каждом выбранном интервале долгот $k = 1, 2, \dots, 7$ найдем средние по всем станциям, входящим в эти интервалы, значения DP для каждого месяца года m , которые будем обозначать $[DP]_{mk}$. Погрешность σ величины $[DP]_{mk}$ рассчитываем аналогично вышеизложенному. Полученные таким образом результаты вычисления представлены на рис. 2а и б. Этот рисунок представляет собой величины $[DP]_{mk}$ для семи интервалов долгот из диапазона $D = 20–160^\circ \text{ E}$ в диапазоне широт $U = 40–55^\circ \text{ N}$. На рис. 2а представлены данные расчетов для шести месяцев с ноября по апрель, а на рис. 2б — для шести месяцев с мая по октябрь. Жирными линиями обозначены $[DP]_{mk}$ для разных месяцев года, а пунктирными линиями обозначены их погрешности так же, как и на рис. 1.

Из рисунков 1, 2 видно, что погрешность расчета среднего значения параметра DP существенно меньше самой величины, поэтому зависимость параметра DP от широты и долготы существует, причем она существенно разная как для разных широтных интервалов, так и для разных сезонов года. Именно введение дифференциации параметра DT для разных широт, долгот и месяцев года позволило нам значительно уменьшить погрешность расчета и, тем самым, доказать реальность существования различий температуры (см. [Лаптухов и Лаптухов, 2011]) воздуха в годы максимумов и минимумов СА. Кроме того, при этом установлен сложный характер этих различий как функции месяцев года, широты и долготы точки наблюдения.

Для построения поверхностных графиков величины DP как функции $DP(U, D)$ от широты U и долготы D сделаем следующее. Разделим область широт в диапазоне $U = 40–80^\circ \text{ N}$ на четыре равных промежутка, каждый по 10° . Разделим область долгот в диапазоне $D = 20–180^\circ \text{ E}$ на восемь равных промежутков, каждый по 20° .

В каждой из $4 \times 8 = 32$ выбранных ячеек широт и долгот находим средние значения величины DP .

На рис. 3 изображены поверхностные графики $DP(U, D)$, усредненные по трем месяцам года для ноября, декабря, января (рис. 3а); февраля, марта, апреля (3б); мая, июня, июля (3в); августа, сентября, октября (3г) соответственно. Из этих

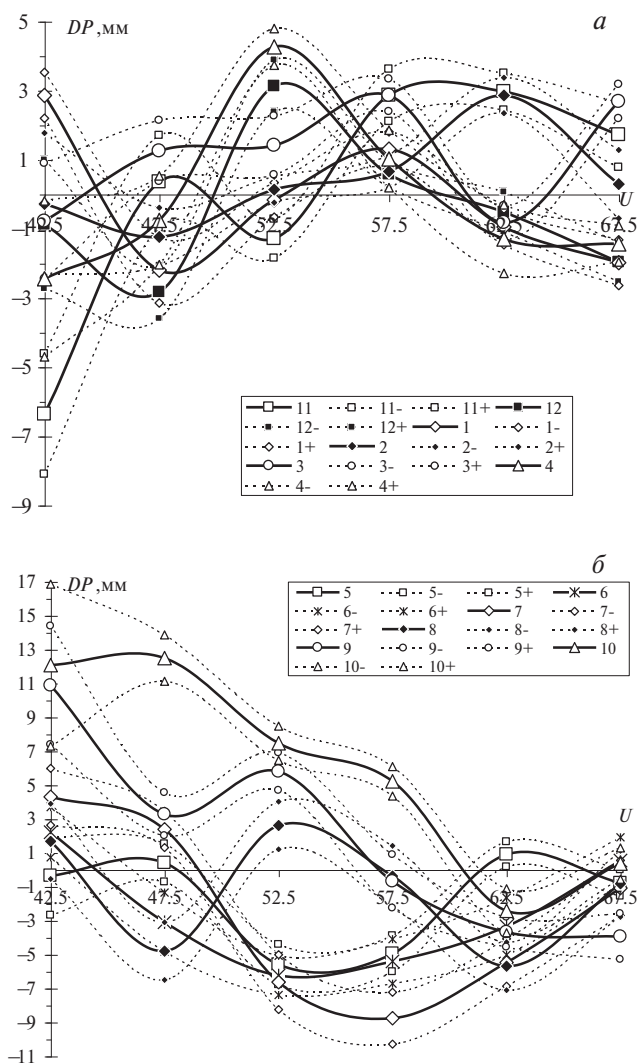


Рис. 1. Зависимость параметра DP от широты U в диапазоне долгот $D = 20–50^\circ \text{ E}$: (а) для ноября, декабря, января, февраля, марта и апреля; (б) для мая, июня, июля, августа, сентября и октября.

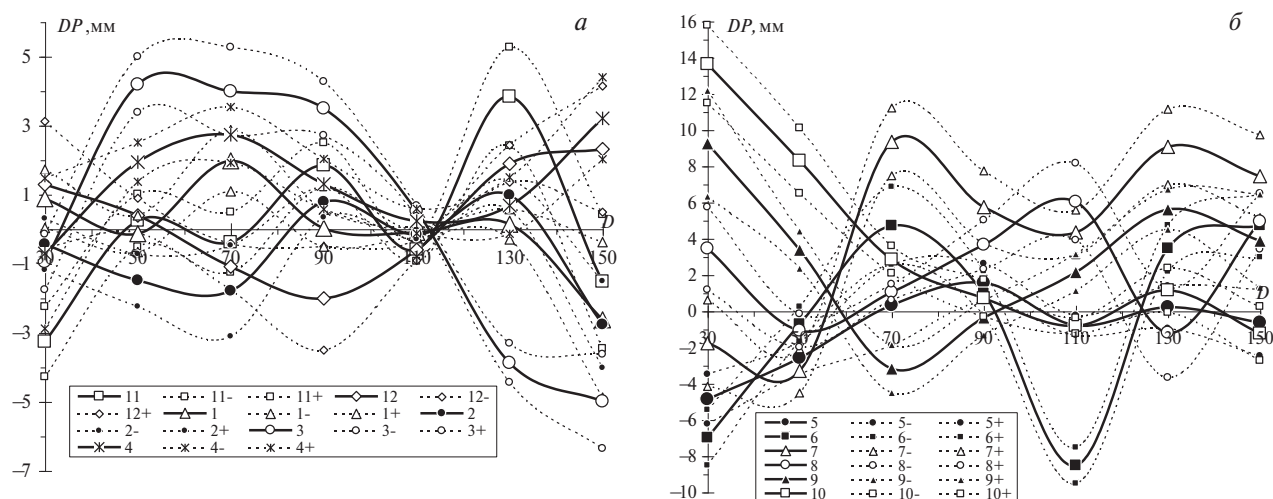


Рис. 2. Зависимость параметра DP от долготы D в диапазоне широт $U = 40-55^\circ \text{ N}$:

(а) для ноября, декабря, января, февраля, марта и апреля; (б) для мая, июня, июля, августа, сентября и октября.

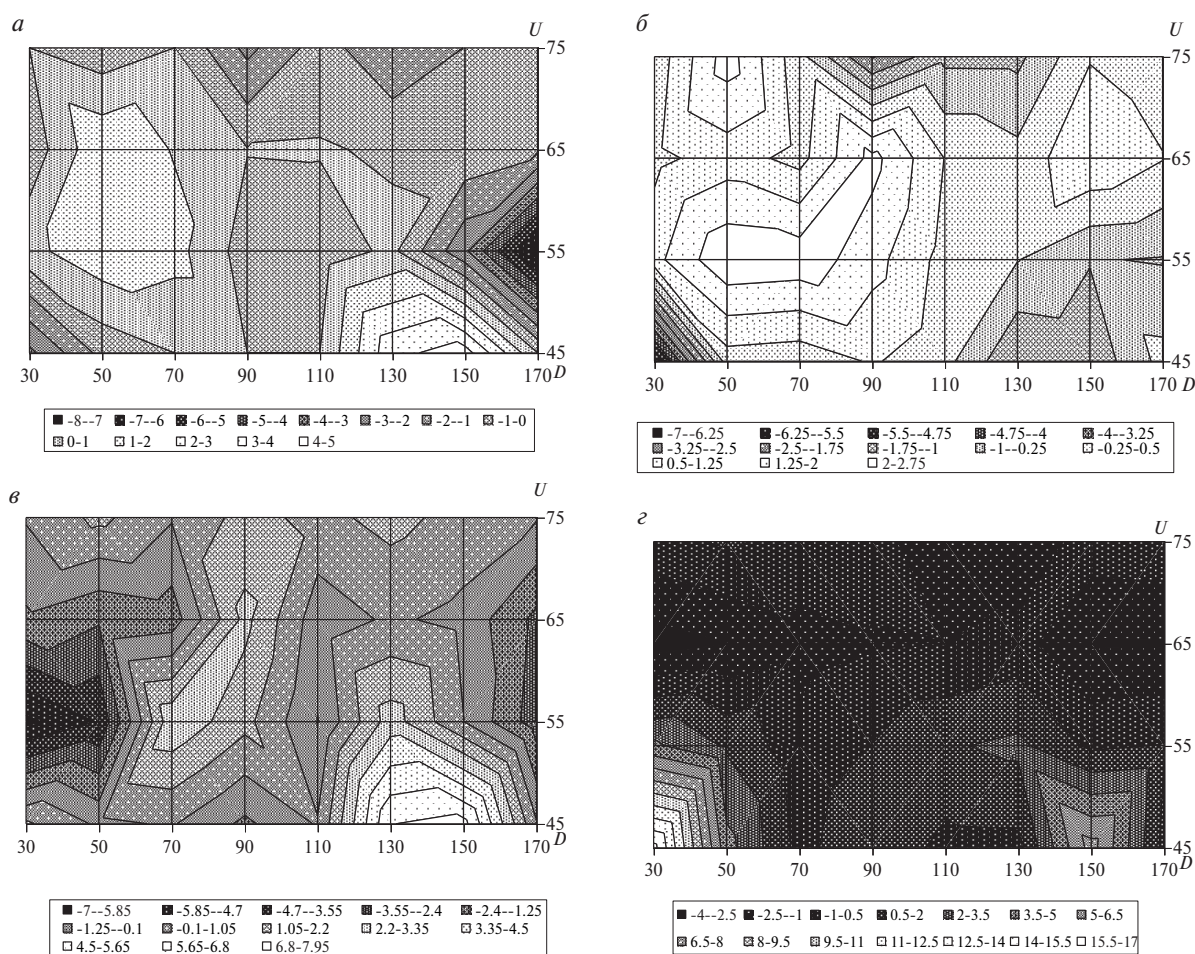


Рис. 3. Зависимость среднего по ноябрю, декабрю и январю (а); февралю, марту и апрелю (б); мая, июню и июлю (в); августу, сентябрю и октябрю (г) параметра DP от широты U и долготы D для четырех интервалов широт в диапазоне $U = 40-80^\circ \text{ N}$ и восьми интервалов долгот в диапазоне $D = 20-180^\circ \text{ E}$.

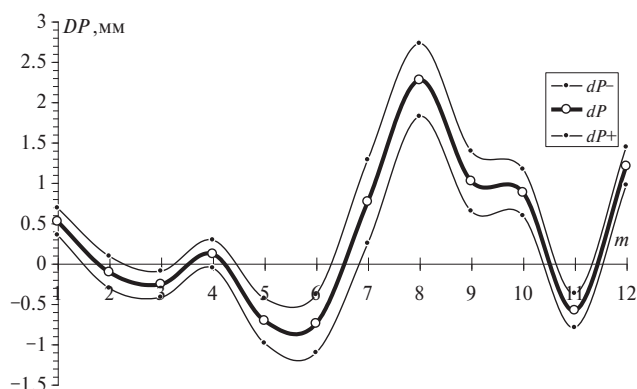


Рис. 4. Зависимость средней величины DP и ее погрешности от номера месяца m для всей области широт и долгот по 456 метеорологическим станциям России.

графиков наглядно виден сложный и плавный характер зависимости $DP(U, D)$ от широты и долготы в разные месяцы года. Плавные изменения параметра $DP(U, D)$ как функции широты U и долготы D указывают на то, что эти изменения реально существуют, а не являются случайными флуктуациями. Такой вывод согласуется с полученными на рис. 1, 2 результатами, из которых видно, что погрешность расчета величины DP существенно меньше самой этой величины.

Зависимость средней величины DP от номера месяца года m для всех 456 рассмотренных метеорологических станций России изображена на рис. 4. На этом графике наглядно показана очень малая погрешность вычислений величины DP , что является следствием выбора большого количества метеорологических станций в сравнительно небольшом диапазоне широт.

4. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ЧИСЛАМИ ВОЛЬФА И КОЛИЧЕСТВОМ ОСАДКОВ НА ЗЕМЛЕ

В этом разделе речь пойдет о том, каким образом между числами Вольфа и количеством осадков на Земле обнаруживается корреляция и когда она достигает максимальных величин.

Был обнаружен интересный, факт, что корреляция сильно возрастает в случае сдвига чисел Вольфа назад по времени, что дало возможность предположить влияние солнечной активности на погоду. То есть изменение среднего количества осадков, типичного для данной местности, происходит спустя некоторое время после изменения солнечной активности. Действительно, так и должно быть, потому что изменение солнечной

активности не может изменить погоду сразу и проходит некоторое время для того, чтобы эти изменения произошли. Вычисления проводились следующим образом.

Брались данные метеорологических станций в области широт $U = 40\text{--}55^\circ \text{ N}$ и долгот $D = 20\text{--}40^\circ \text{ E}$. Этот диапазон широт и долгот выбран не случайно, поскольку влияние солнечной активности на количество выпадающих там осадков в этом диапазоне широт и долгот максимально. Ну, а теоретически доказать это влияние солнечной активности можно за счет сдвига чисел Вольфа назад по времени (см. выше).

Для дальнейшего рассмотрения был выбран только октябрь месяц по той причине, что в октябре для географических широт $U = 40\text{--}55^\circ \text{ N}$ и долгот $D = 20\text{--}40^\circ \text{ E}$ влияние солнечной активности на количество выпадающих там осадков максимально и равно $DP = 13.6 \pm 2.2 \text{ мм}$. В месячных числах Вольфа был выбран только сентябрь месяц для того, чтобы осуществить сдвиг чисел Вольфа назад по времени для дальнейшей корреляции. Далее числа Вольфа, выбранные для сентября месяца, и сумма выпадающих осадков, выбранная для октября месяца с 1938 по 2015 гг., были усреднены методом скользящего среднего по 11 годам. Корреляция резко возросла после сдвига на 5 лет вперед ряда количества выпадающих осадков. Таким образом можно обнаружить влияние минимумов в числах Вольфа на количество выпадающих осадков. Сдвиг 5 лет — это приблизительно половина солнечного цикла. Была выбрана станция с длинным рядом наблюдений, начиная с 1938 г. Это Краснодар с географическими координатами $U = 45.03^\circ \text{ N}$, $D = 39.15^\circ \text{ E}$, $N = 34 \text{ м}$. Результаты вычислений изображены на рис. 5, там же изображены четыре кривые.

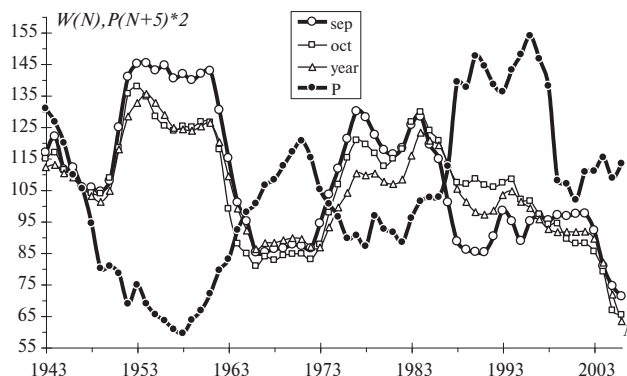


Рис. 5. Корреляционные связи чисел Вольфа с суммой осадков для Краснодара.

Кривая *ser* — месячные числа Вольфа, выбранные для сентября месяца и усредненные в дальнейшем по 11 годам методом скользящего среднего. Кривая *ost* — месячные числа Вольфа, выбранные для октября месяца и усредненные в дальнейшем по 11 годам тем же методом. Кривая *year* — годовые числа Вольфа, усредненные по 11 годам тем же методом. Кривая *P* — увеличенное вдвое месячное количество осадков, выбранные для октября месяца, с усреднением методом скользящего среднего по 11 годам и со сдвигом на 5 лет вперед по времени для ст. Краснодар. Увеличение *P* вдвое было произведено с целью масштабирования. Коэффициент корреляции кривой *ser* и кривой *P* составил -0.75 . Коэффициент корреляции кривой *ost* и кривой *P* составил -0.46 . Коэффициент корреляции кривой *year* и кривой *P* составил -0.56 .

Мы видим, что корреляция со знаком минус достигает максимальных величин при сдвиге чисел Вольфа на месяц назад. Стоит заметить, что сдвиг на 5 лет вперед у кривой *P* обнаруживает максимальную величину корреляции со знаком минус не только для кривой *ser*, но и для кривых *ost* и *year*. На рис. 5 введены обозначения: *N* — номер года; *W* — числа Вольфа; *P* — увеличенное вдвое количество осадков.

Следующий рисунок (рис. 6) выполнен точно так же, как и рис. 5, для ст. Сочи ($U = 43.6^\circ \text{ N}$, $D = 39.8^\circ \text{ E}$, $H = 34 \text{ м}$). В целях масштабирования количество осадков (кривая *P*) было уменьшено в 1.5 раза. Коэффициент корреляции кривой *ser* и кривой *P* составил -0.75 . Коэффициент корреляции кривой *ost* и кривой *P* составил -0.61 . Коэффициент корреляции кривой *year* и кривой *P* составил -0.64 .

Следующий рисунок (рис. 7) выполнен аналогично рис. 5 для ст. Благовещенск ($U = 50.2^\circ \text{ N}$, $D = 127.6^\circ \text{ E}$, $H = 132 \text{ м}$). Станция Благовещенск попадает в полосу долгот $D = 110-130^\circ \text{ E}$ и широт

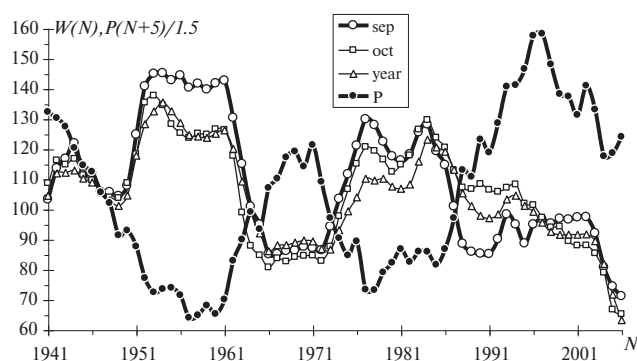


Рис. 6. Корреляционные связи чисел Вольфа с суммой осадков на Земле для Сочи.

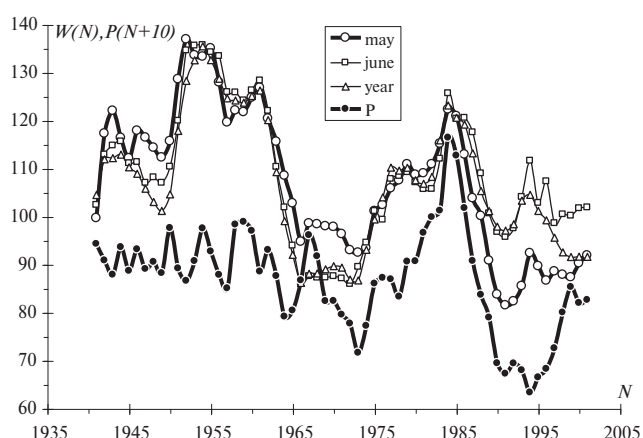


Рис. 7. Корреляционные связи чисел Вольфа с суммой осадков на Земле для Благовещенска.

$U = 40-55^\circ \text{ N}$ и находится в зоне особенно больших величин параметра DP , где сама величина $DP = -8.5 \pm 1.0 \text{ мм}$ для июня месяца. На рис. 7 изображены 4 кривые. Кривая *may* — числа Вольфа для месяца май, усредненные по 11 годам методом скользящего среднего, кривая *june* — числа Вольфа для месяца июнь, усредненные по 11 годам тем же методом. Кривая *year* — годовые числа Вольфа, усредненные по 11 годам тем же методом. Кривая *P* — есть сумма осадков в июне месяце для ст. Благовещенска, усредненная методом скользящего среднего по 11 годам и со сдвигом на 10 лет вперед. Величина сдвига 10 лет для кривой *P* близка к полному солнечному циклу и позволяет обнаружить влияние максимумов солнечной активности на сумму осадков. Коэффициент корреляции кривой *may* и кривой *P* составил 0.70. Коэффициент корреляции кривой *june* и кривой *P* составил 0.48. Коэффициент корреляции кривой *year* и кривой *P* составил 0.54.

Стоит заметить, что при исследовании данного эффекта всюду выбирались метеорологические станции на небольших высотах H над уровнем моря. На слишком больших высотах данный эффект, действительно, не обнаруживается.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На большом массиве данных наблюдений (за $\sim 50-80$ лет) 456 метеорологических станций России показано, что существует отчетливо выраженное различие месячной суммы осадков DP в годы максимума и минимума солнечной активности по месяцам и сезонам года, по широтам и долготам.

— Средняя по 8 циклам СА величина различия месячных сумм осадков DP между годами максимальной и минимальной активности Солнца сильно зависит от трех переменных: месяца года, широты и долготы метеорологической станции. Введение различий (дифференциации) параметра $DN(m,j,k)$ от трех этих переменных привело к тому, что погрешность расчета существенно уменьшилась и стала значительно меньше самой величины DP . Это позволило убедиться в реальности существования различий сумм осадков на поверхности Земли в годы максимумов и минимумов СА и установить конкретную зависимость параметра $DP(m,j,k)$ от месяца года, широты и долготы.

— Сложный характер зависимости $DP(m,j,k)$ как функции месяцев года, широты и долготы точки наблюдения, по-видимому, обусловлен столь же сложной картиной структуры ветров в атмосфере со сложным рельефом поверхности Земли и ее динамики в цикле СА и в течение года.

— Отклик низкоширотных областей России на изменение СА более сильный по абсолютной величине, чем областей средних и высоких широт.

— Особенно большие величины параметра DP наблюдаются в полосе долгот $D = 20-40^\circ$ Е на широтах $U = 40-55^\circ$ N в октябре: $DP = 13.6 \pm 2.2$ мм в месяц, а также в полосе долгот $D = 110-130^\circ$ Е на тех же широтах в июне: $DP = -8.5 \pm 1.0$ мм в месяц. Столь большие величины могут представлять интерес и быть использованы для статистического долгосрочного прогноза сумм осадков в цикле СА.

— В зоне максимального влияния солнечной активности на сумму осадков была обнаружена корреляция чисел Вольфа с суммой осадков. Коэффициент корреляции сильно возрос при сдвиге назад по времени чисел Вольфа, что и послужило аргументом для доказательства влияния

солнечной активности на погоду. Автора убеждает в физической значимости корреляций то, что они получены по многим географическим пунктам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Пространственно-временные вариации эффектов солнечной активности и галактических космических лучей в циркуляции нижней атмосферы / Тр. 31-й ВККЛ. Москва, МГУ, 5–9 июля 2010 г. cr2010.sinp.msu.ru/cr2010/geo/geo_17.pdf
- Дергачев В.А., Распопов О.М. Долговременная солнечная активность — контролирующий фактор глобального потепления 20 века // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. С. 272–275. 2008.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 831 с. 1978.
- Лаптухов А.И., Лаптухов В.А. Различия температур воздуха в годы максимума и минимума солнечной активности и его механизм // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 3. С. 392–400. 2010.
- Лаптухов В.А., Лаптухов А.И. Сезонные, долготные и широтные различия температур воздуха России в годы максимума и минимума солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 6. С. 816–821. 2011.
- Пудовкин М.И., Морозова А.Л. 11-летние вариации климата в Швейцарии с 1700 по 1989 г. и солнечная активность // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 40. № 3. С. 3–8. 2000.
- Распопов О.М., Дергачев В.А., Козырева О.В., Колстром Т., Лопатин Е.В., Лукман Б. Интерпретация физических причин глобального и регионального климатических откликов на долговременные вариации солнечной активности // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. С. 276–278. 2008.
- Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 624 с. 1990.

Seasonal, Longitudinal, and Latitudinal Differences in the Amount of Precipitation in Russia During the Years of Maximum and Minimum of Solar Activity

V. A. Laptukhov^{1, *}

*¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation,
Moscow, Troitsk, Russia*

**e-mail: laptuhov@mail.ru*

An analysis of a large array of observation data (over ~50–80 years) for 456 meteorological stations in Russia revealed a distinct difference in the monthly amount of precipitation (DP) during years of maximum and minimum solar activity depending on months and seasons of the year and on latitudes and longitudes. Particularly large DP values are observed in the latitude belt of $U = 40–55^\circ$ N in the longitude range $D = 20–40^\circ$ E in October, DP being 13.6 ± 2.2 mm, as well as in the longitude range $D = 110–130^\circ$ E in June, DP being -8.5 ± 1.0 mm. In the zone of maximum influence of solar activity on the amount of precipitation, a study was conducted on the presence of a correlation between Wolf numbers and the amount of precipitation. As a result, a strong increase in the correlation was discovered in the case of a backward shift in the Wolf numbers, which argued in favor of the influence of solar activity on weather. The author is convinced of the physical significance of the correlation, because it is obtained from data from several geographical points. It is concluded that solar and geomagnetic activity can govern the development of internal instabilities of the atmosphere and thereby influence climate.

УДК 533.95:537.84:551.510.535

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА МЕЖСУТОЧНУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ NmE В ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНОГО ИОНОЗОНДА DOURBES

© 2024 г. А. В. Павлов^{1,*}, Н. М. Павлова¹¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

* e-mail: pavlov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 08.09.2023 г.

После доработки 29.12.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Выполнено исследование межсуточных вариаций статистических характеристик электронной концентрации NmE максимума слоя E ионосферы для каждого месяца года в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности по данным часовых измерений критической частоты слоя E ионосферы наземным ионозондом Dourbes с 1957 по 2023 г. В работе вычислялись математическое ожидание NmE_E , наиболее вероятное NmE_{MP} , арифметически средняя месячная медиана NmE_{MED} , стандартные отклонения σ_E , σ_{MP} и σ_{MED} величины NmE от NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} и коэффициенты вариаций CV_E , CV_{MP} и CV_{MED} значения NmE относительно NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} соответственно. Показано, что NmE_E обеспечивает наилучшее описание множества измерений NmE единственным статистическим параметром за счет меньшей межсуточной изменчивости NmE в сравнении с NmE_{MP} или NmE_{MED} . Впервые доказано, что переход от низкой к средней солнечной активности приводит к существенным изменениям межсуточной изменчивости NmE с наибольшей продолжительностью периодов увеличения и уменьшения исследуемой изменчивости в марте и декабре соответственно.

DOI: 10.31857/S0016794024030087, EDN: SMLNND

1. ВВЕДЕНИЕ

Электронная концентрация NmE максимума слоя E ионосферы, измеренная в геомагнито-спокойных условиях примерно над одной и той же точкой поверхности Земли при одних и тех же или при близких значениях местного времени, номера дня в году и уровня солнечной активности, значительно изменяется от одних суток к другим суткам, формируя межсуточную изменчивость NmE .

Из анализа источников межсуточных вариаций NmE (см., например, обзоры [Moore et al., 2006; Nicolls et al., 2012; Liu et al., 2021; Mendillo, 2021] и далее п. 2 настоящей работы) следует, что данная изменчивость NmE позволяет рассматривать NmE как случайный параметр, для изучения исследуемых вариаций которого можно применять статистические методы, описанные, например, в монографиях [Кремер, 2012; Балдин и др., 2016; Ross, 2004; Gatti, 2005]. Такой статистиче-

ский подход был использован авторами работ [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017] при изучении межсуточных вариаций NmE средних широт в условиях низкой солнечной активности. Для этого проводились расчеты математического ожидания NmE_E , наиболее вероятного значения NmE_{MP} , арифметически средней месячной медианы NmE_{MED} , арифметически средней величины NmE , стандартных отклонений величины NmE от NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} и коэффициентов вариаций CV_E , CV_{MP} и CV_{MED} значения NmE относительно NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} соответственно.

Цель настоящей работы — рассчитать для каждого месяца года вариации вышеуказанных статистических характеристик межсуточной изменчивости NmE в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности по данным часовых измерений критической

частоты foE наземного ионозонда Dourbes с 1957 по 2023 г., что позволит впервые изучить влияние вариаций солнечной активности на межсуточную изменчивость NmE средних широт для каждого месяца года.

2. ИСТОЧНИКИ МЕЖСУТОЧНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ NmE

Из теоретических расчетов состава, структуры и динамики области E ионосферы и анализа вариаций скоростей образования и потерь концентраций ионов и электронов на этих высотах ионосферы следует, что при заданных географических координатах, месяце года и местном времени изменения ото дня ко дню концентрации NmE слоя E ионосферы зависят от зенитного угла Солнца, изменений потока рентгеновского и крайнего ультрафиолетового излучения Солнца в цикле солнечной активности и вариаций температуры и концентраций нейтральных компонентов атмосферы с солнечной и геомагнитной активностью (см., например, [Pavlov and Pavlova, 2013; Павлов и Павлова, 2015; Schunk and Nagy, 2009]).

Среднесуточный индекс $F10.7$ солнечной активности (или среднесуточное число солнечных пятен) и трехчасовой индекс Ap (или Kp) геомагнитной активности широко применяются для описания влияния солнечной и геомагнитной активности на ионосферу (см., например, [Акасофу и Чепмен, 1974; Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Schunk and Nagy, 2009] и ссылки в этих монографиях). Как указано ниже, это служит одним из источников неопределенностей расчетов NmE .

Ионы NO^+ и O_2^+ являются основными ионами области E ионосферы [Schunk and Nagy, 2009]. Характерное время достижения фотохимического равновесия этих ионов в реакциях диссоциативной рекомбинации ионов NO^+ и O_2^+ с электронами меньше примерно одной минуты в дневных условиях вблизи максимума слоя E ионосферы [Banks and Kockarts, 1973], т.е. намного меньше трех часов. Поэтому вариации NmE , вызванные изменениями геомагнитной активности за время менее трех часов, не могут быть корректно описаны при использовании трехчасовых индексов Ap или Kp . Кроме того, характерная продолжительность полярной суббури составляет от 1 до 3 ч [Акасофу, 1971]. Поэтому использование трехчасовых индексов геомагнитной активности может привести к некорректной идентификации геомагнито-спокойных условий, так как за это время полярная суббуря может начаться и закончиться. Таким образом, межсуточные вариации NmE можно рассматривать как случайные изменения NmE , если один из трехчасовых индексов

Ap или Kp используется при определении уровня геомагнитной активности.

Вариации потока рентгеновского и крайнего ультрафиолетового солнечного излучения с характерными временами менее суток не могут быть описаны при использовании среднесуточного индекса $F10.7$ или других среднесуточных индексов солнечной активности [Acebal and Sojka, 2011]. Поэтому реакция NmE на такие изменения потока солнечного излучения также не может быть корректно описана при использовании среднесуточных индексов солнечной активности. Следует также отметить, что, согласно исследованию [Manson, 1976], корреляция вариаций индекса $F10.7$ и потока излучения Солнца в области длин волн от 5.2 до 12 нм, оказывающего существенное влияние на NmE [Sengupta, 1970; Pavlov and Pavlova, 2013; Sojka et al., 2014; Павлов и Павлова, 2015], слабо выражена. Поэтому заметное отличие между вычисленным и измеренным NmE можно объяснить неопределенностями предсказания этого излучения по индексу $F10.7$ и среднему значению $F10.7$ индекса $F10.7$ за 81 день с центром в рассматриваемый день [Pavlov and Pavlova, 2013; Sojka et al., 2014; Павлов и Павлова, 2015]. Поэтому использование индексов $F10.7$ и $\overline{F10.7}$ как индикатора солнечной активности является одним из источников исследуемой межсуточной изменчивости NmE , и эти вариации NmE можно рассматривать как случайные изменения NmE .

В результате взаимодействия метеорного потока с набегающими потоками газа атмосферы происходит разбрызгивание и частичное испарение расплавленного материала метеоров, что приводит к формированию слоев паров атомов металлов (процесс абляции метеорных тел). После абляции концентрации компонентов пара изменяются в процессах его переноса ветром и диффузией и в химических реакциях рассматриваемых атомов с компонентами атмосферы, формируя высотные профили атомов металлов. Ионы атомов металлов образуются в атмосфере при ионизации паров атомов и в химических реакциях рассматриваемых атомов с ионами ионосферы. На средних широтах диффузия и дрейф ионов металлов вдоль магнитного поля приводит к увеличению концентраций ионов металлов на высотах области E ионосферы [Whitehead, 1970; Haldoupis, 2012]. Вышеперечисленные процессы являются источниками ионов металлов на высотах областей D и E ионосферы (см., например, [Pavlov 2012] и ссылки в этом обзоре). Иногда в результате вторжения в атмосферу метеорного потока происходит сильная деформация всей об-

ласти E ионосферы, приводя к формированию слоя E шириной 30–40 км [Pellinen-Wannberg et al., 2014]. Ветровой сдвиг может привести к формированию спорадического слоя E ионосферы, состоящего в основном из ионов металлов [Whitehead, 1970; Haldoupis, 2012]. Присутствие ионов металлов на всех высотах области E ионосферы приводит к некоторым вариациям концентрации тепловых электронов из-за условия квазинейтральности плазмы. За исключением области спорадического слоя E ионосферы, ионы металлов — малые составляющие ионосферы, и эти вариации электронной концентрации незначительны. Характерное время изменения концентраций металлических ионов в химических реакциях изменяется от нескольких суток до нескольких недель вблизи высоты максимума слоя E ионосферы (см., например, [Pavlov, 2012] и ссылки в этом обзоре), т.е. концентрации ионов металлов оказывают некоторое влияние на NmE в течение длительного времени после взаимодействия метеорного потока с атмосферой. Из-за большого числа неопределенностей невозможно предсказать концентрации металлических ионов на высоте максимума слоя E ионосферы в какой-либо момент времени при заданных географических координатах. Поэтому вариации концентраций ионов металлов метеорного происхождения являются одним из источников исследуемой изменчивости NmE , и эти вариации NmE можно рассматривать как случайные изменения NmE .

При фиксированных значениях мирового времени UT, месяце года и уровня солнечной и геомагнитной активности переход от одних суток к другим суткам вызывает изменение NmE за счет зависимости NmE от зенитного угла Солнца, величина которого зависит от номера дня в году (см., например, [Павлов и Павлова, 2010]). Изменение номера дня в году в течение рассматриваемого месяца года вызывает соответствующую изменчивость NmE . В условиях низкой солнечной активности преобладающее число измерений геомагнито-спокойных foE , имеющихся в международной базе данных, проводилось при фиксированных UT=0, 1, ..., 23 ч с шагом в один час. Поэтому отсутствует возможность выполнить достоверные статистические расчеты статистических параметров NmE , измеренных каким-либо ионозондом в течение месяца при одном и том же зенитном угле Солнца (недостаточно данных). Таким образом, зависимость NmE от зенитного угла Солнца при фиксированном UT и месяце года можно рассматривать как один из источников межсуточной изменчивости NmE .

Ионизация N_2 и O_2 солнечным излучением и образующимися фотоэлектронами — источник первичных ионов N_2^+ и O_2^+ области E ионосферы средних широт, а химические реакции с участием ионов N_2^+ , O_2^+ и NO^+ , включающие в себя NO и O_2 , формируют зависимость NmE от концентраций N_2 , O_2 и NO и температуры нейтральной атмосферы и электронов (см., например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988; Schunk and Nagy, 2009; Pavlov, 2012]). Из теоретических расчетов [Pavlov, 1994] следует, что отличием температуры электронов от температуры нейтральной атмосферы можно пренебречь на высотах областей D и E ионосферы. Таким образом, межсуточная изменчивость концентраций N_2 , O_2 и NO и температуры нейтральной атмосферы (см., например, [Krall et al., 2016; Liu et al., 2021]) ответственна за часть межсуточной изменчивости NmE .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ АНАЛИЗА

В работе используются часовые значения foE , измеренные ионозондом Dourbes (50.1° N, 4.6° E, 1957–2023 гг.), где в скобках указаны географические координаты и годы, в течение которых проводились измерения. Величины foE были скопированы с помощью интернета из базы геофизического центра данных Боулдер, США (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/iono/ionohome.html>) и базы мирового центра данных по солнечно-земной физике Великобритании (https://www.ukssdc.ac.uk/cgi-bin/digisondes/cost_database.pl). Для определения значений NmE используется связь между NmE и foE [Пиггот и Равер, 1978]

$$NmE = 1.24 \times 10^4 foE^2, \quad (1)$$

где размерности NmE и foE — см⁻³ и МГц соответственно.

Следуя подходу [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017], значение foE , измеренное в момент мирового времени UT, рассматривается как геомагнито-спокойное значение foE , если $Kp \leq 3$ в течение 24-часового периода, предшествующего моменту измерения foE , включая момент измерения foE . Сортировка геомагнито-спокойных foE проводилась по номеру месяца в году и выбирались только часовые измерения foE в моменты мирового времени UT от 07:00 до 17:00. В этом промежутке времени число результатов измерений $foE(UT, M)$ в геомагнито-спокойных условиях и заданном уровне солнечной активности достаточно для проведения статистических исследований (см. п. 4). Величины UT и солнечное местное время SLT связаны соотно-

шением $SLT = UT + \lambda/15$, где λ — географическая долгота в градусах, а единицы измерения SLT и UT — часы.

Значение NmE зависит от потока ионизирующего солнечного излучения в рассматриваемый день, величина которого коррелирует с индексом солнечной активности $F10.7$ для исследуемого дня и арифметически средним значением $F10.7$ индекса $F10.7$ за 81 день с центром в рассматриваемый день [Richards et al., 1994]. С другой стороны, изменения NmE в цикле солнечной активности также связаны с вариациями температуры и концентраций нейтральных компонентов, зависимость которых от солнечной активности определяется изменениями индексов $F10.7p$ (величина $F10.7$ в день, предшествующий рассматриваемому дню) и $\overline{F10.7}$ [Hedin, 1987; Picone et al., 2002]. Поэтому зависимость NmE от солнечной активности можно приближенно описать в терминах изменений индексов $F10.7$, $F10.7p$ и $\overline{F10.7}$. В настоящей работе рассматриваются NmE , измеренные ионозондом Dourbes при низкой солнечной активности, когда $65 \leq F10.7 \leq 85$, $65 \leq F10.7p \leq 85$, $65 \leq \overline{F10.7} \leq 85$ и средней солнечной активности, определяемой изменениями индексов $85 < F10.7 \leq 135$, $85 < F10.7p \leq 135$, $85 < \overline{F10.7} \leq 135$, где индексы $F10.7$, $F10.7p$ и $\overline{F10.7}$ выражены в единицах 10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹.

Рассмотрим измеренные частоты foE_k и соответствующие значения NmE_k при фиксированных значениях UT и месяце M года, где k — положительное целое число. При статистическом определении за вероятность (плотность распределения вероятности) события принимают относительную частоту события [Кремер, 2012; Балдин и др., 2016; Ross, 2004; Gatti, 2005]. Поэтому вероятность W_k измерения NmE_k вычисляется по формуле

$$W_k(UT, M) = F_k(UT, M) / F(UT, M), \quad (2)$$

где $F_k(UT, M)$ — число измерений геомагнитоспокойных NmE_k для выбранных UT и M ; $F(UT, M) = \sum_{k>0} F_k(UT, M)$ — полное число измерений геомагнитоспокойных NmE .

Если событие обязательно произойдет, то вероятность рассматриваемого события равна 100%. Поэтому для определения выраженной в процентах вероятности P_k измерения NmE_k используется выражение

$$P_k(UT, M) = 100 W_k(UT, M). \quad (3)$$

При заданных значениях UT и M математическое ожидание и арифметически среднее значение NmE определяются по формулам:

$$NmE_E = \sum_{k>0} NmE_k W_k, \quad (4)$$

$$NmE_A = \sum_{k>0} NmE_k / F, \quad (5)$$

а наиболее вероятная величина NmE_{MP} (мода) максимума электронной концентрации слоя E ионосферы соответствует максимуму вероятности W_k .

Если значения UT и M фиксированы, то арифметически средняя месячная медиана NmE_{MED} электронной концентрации максимума слоя E ионосферы определяется как сумма месячных медиан NmE^* , деленная на общее число медиан для данного набора измерений ионозонда. При этом величина NmE^* вычисляется из измеренной медианы foE^* критической частоты foE слоя E ионосферы, используя связь между NmE и foE (см., например, [Пиггот и Равер, 1978]). Для нахождения foE^* значения foE , измеренные ионозондом в течение месяца M при данном UT , сортируются в порядке возрастания их амплитуд, формируя последовательность foE . При нечетном количестве foE медиана foE^* равна foE , расположенной в середине этой последовательности. Если количество foE в рассматриваемой последовательности нечетно, то foE^* вычисляется как арифметически среднее значение двух срединных величин данной последовательности foE . Значения индексов $F10.7$, $F10.7p$ и $\overline{F10.7}$ для дня, соответствующего срединной foE , или двух дней в случае двух срединных foE определяют уровень солнечной активности для NmE^* . Отметим, что измерения foE отсутствуют для некоторых дней и при малом количестве измерений foE в месяце найденную величину foE^* нельзя рассматривать в качестве месячной медианы foE . В настоящей работе и, например, в работах [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017] вычисленная foE^* рассматривается как месячная медиана foE , если число измерений foE больше или равно 20.

Для каждого месяца года при заданном UT стандартные (среднеквадратичные) отклонения σ_E , σ_{MP} и σ_{MED} величины NmE , соответственно от NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} , имеют вид

$$\sigma_E = \left[\sum_{k=1}^K W_k (NmE_k - NmE_E)^2 \right]^{0.5}, \quad (6)$$

$$\sigma_{MP} = \left[\sum_{k=1}^K W_k (NmE_k - NmE_{MP})^2 \right]^{0.5}, \quad (7)$$

$$\sigma_{MED} = \left[\sum_{k=1}^K W_k (NmE_k - NmE_{MED})^2 \right]^{0.5}, \quad (8)$$

а выраженные в процентах коэффициенты CV_{E^*} , CV_{MP} и CV_{MED} вариаций NmE относительно NmE_{E^*} , NmE_{MP} и NmE_{MED} вычисляются по формулам:

$$CV_E = 100\sigma_E / NmE_{E^*}, \quad (9)$$

$$CV_{MP} = 100\sigma_{MP} / NmE_{MP}, \quad (10)$$

$$CV_{MED} = 100\sigma_{MED} / NmE_{MED}. \quad (11)$$

Если параметр А — результат измерения величины В, то относительное отличие А от В (относительная погрешность измерения В) обычно определяется как $|1-A/B|$ (см., например, [Тейлор, 1985]). Следуя этому общепринятому подходу, рассмотрим случай, когда два параметра А и В одинаковой размерности характеризуют один и тот же объект С, причем доказано, что оценка С параметром В — более точная, чем параметром А. В этом случае относительное различие между этими параметрами можно определять как $|1-A/B|$ при $B \neq 0$, т.е. как отличие менее точного параметра А от более точного параметра В [Демидович и Марон, 1970; Мак-Кракен и Дорн, 1977]. Поэтому выраженное в процентах отличие $Z(A, B)$ между двумя статистическими параметрами А и В электронной концентрации максимума слоя Е ионосферы определяется выражением

$$Z(A, B) = 100|B-A|/B, \quad (12)$$

где В и А — соответственно, более точная и менее точная характеристики изменчивости NmE одинаковой размерности.

Результаты проведенных измерений NmE могут иногда существенно отличаться от наблюдаемых средних значений NmE . Необходимо быть уверенным, что эти результаты не являются грубой ошибкой измерений (промахом, выбросом, аномальным измерением). Грубые ошибки обычно обусловлены неправильным отсчетом по шкале прибора, ошибкой при записи наблюдений, наличием сильно влияющей величины, неисправностью средств измерений, и эти ошибки влияют на достоверность измерений и величин статистических параметров [Агекян, 1968; Кобзарь, 2006]. Поэтому результаты измерений, содержащие грубые ошибки, необходимо выявлять и исключать из обработки данных.

Промахи обычно приводят к аномально большому или очень малым по абсолютной величине ошибкам измерений, и эти грубые ошибки изме-

рений можно обнаружить по резкому выпадению аномального результата из общего ряда полученных экспериментальных данных (см., например, [Агекян, 1968; Кобзарь, 2006]). Для выявления и удаления аномально низких и аномально высоких значений NmE при произвольном законе распределения плотности распределения вероятности можно использовать неравенство Чебышева [Durivage, 2022], согласно которому любое выборочное значение NmE не может отклоняться от математического ожидания NmE на произвольную величину (см., например, [Дэйвид, 1979; Кобзарь, 2006; Durivage, 2022]):

$$NmE_E(UT, M) - d(UT, M) \leq NmE(UT, M) \leq NmE_E(UT, M) + d(UT, M), \quad (13)$$

где $d(UT, M) = \sigma_E(UT, M)(1-q)^{-0.5}$, q — доверительная вероятность.

Известно (см., например, [Балдин и др., 2016]), что при нормальном (гауссовом) законе распределения случайной величины X вероятность попадания X в интервал $(X_E - 3\sigma, X_E + 3\sigma)$ составляет 0.997, где X_E — математическое ожидание X и σ — стандартное отклонение X от X_E . Если закон распределения X отличается от нормального (см. п. 4.1), то вероятность данного события будет не ниже 8/9 [Балдин и др., 2016]. Исходя из этого в настоящей работе используется значение $q=0.997$. Заданная доверительная вероятность и вычисленные значения NmE_E и σ_E позволяют скорректировать выборку с помощью неравенства (13). Применение в расчетах статистических параметров NmE метода последовательных приближений обусловлено зависимостью объема выборки от NmE_E и σ_E . В первом приближении условие (13) не используется.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для приведенных в п. 3 промежутков времени часовых измерений foE величина $F(UT, M) \geq 48$ в условиях низкой солнечной активности и значение $F(UT, M) \geq 39$ при средней солнечной активности. Таким образом, используемые величины $F(UT, M) \geq 30$, т.е. достаточно велики для корректного вычисления NmE_E , σ_E и CV_E [Gatti, 2005; Verma and Verma, 2020]. Если используются только часовые измерения foE в моменты мирового времени UT от 08:00 до 15:00, то $F(UT, M) \geq 251$ и $F(UT, M) \geq 114$ в условиях низкой и средней солнечной активности соответственно. В этом случае используемая величина $F \geq 100$, т.е. достаточно велика для корректного вычисления всех рассматриваемых статистических параметров NmE

[Gatti, 2005; Rumsey, 2022]. Статистическое исследование показало, что арифметически среднее NmE отличается от математического ожидания NmE не более, чем на 7.3% и 9.6% при низкой и средней солнечной активности соответственно.

4.1. Полиmodalность P_k

Результаты расчетов вероятности P_k появления NmE_k показаны для каждого месяца года вблизи полдня в 12:00 UT (12:18 SLT) на рис. 1 и рис. 2 при низкой и средней солнечной активности соответственно. Видно, что вычисленная вероятность достигает локального максимума в нескольких точках, т.е. распределение вероятности является полиmodalным (многоmodalным или мультимodalным). Полиmodalность рассматриваемого распределения вероятности свидетельствует о существенной неоднородности множества значений исследуемой величины и показывает, что результаты наблюдений NmE состоят из нескольких подмножеств данных с разными законами распределения вероятности [Titterton et al., 1985; Howell, 2013]. Поэтому можно предположить, что полиmodalность P_k может возникать благодаря существованию нескольких источников изменчивости NmE , приведенных в п. 2. Следует отметить, что полиmodalность распределения вероятности характерна и для межсуточной изменчивости $NmF2$ низких и средних широт [Pavlov and Pavlova, 2016; Павлов и Павлова, 2023].

4.2. Сравнение NmE_{MED} и NmE_{MP} с NmE_E

Из проведенных расчетов следует, что при фиксированном значениях UT и M $0\% \leq Z(NmE_{MED}, NmE_E) \leq 10\%$, $0\% \leq Z(NmE_{MP}, NmE_E) \leq 12\%$ в условиях низкой солнечной активности и $0\% \leq Z(NmE_{MED}, NmE_E) \leq 5\%$, $0\% \leq Z(NmE_{MP}, NmE_E) \leq 18\%$ при средней солнечной активности. Таким образом, в соответствии с выводами работ [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017] рассматриваемые количественные статистические характеристики, каждая из которых может обеспечить описание множества наблюдений рассматриваемой случайной величины NmE , заметно отличаются друг от друга и результаты решения задачи с участием статистической характеристики NmE зависят от выбора между NmE_E , NmE_{MED} и NmE_{MP} .

4.3. Сравнение σ_{MED} и σ_{MP} с σ_E

При выполнении закона больших чисел математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины X от любой постоянной величины превосходит или совпадает с математическим ожиданием квадрата отклонения X от математиче-

ского ожидания X [Кремер, 2012; Балдин и др., 2016; Ross, 2004]. В соответствии с этим общим выводом математической статистики вычисленные значения σ_E , σ_{MED} и σ_{MP} удовлетворяют неравенствам

$$\sigma_E \leq \sigma_{MED}, \sigma_E \leq \sigma_{MP} \quad (14)$$

как при низкой, так и при средней солнечной активности при заданных значениях UT и M.

Таким образом, абсолютная величина изменчивости NmE минимальна при использовании NmE_E . Отметим, что максимальные значения $Z(\sigma_{MED}, \sigma_E)$ и $Z(\sigma_{MP}, \sigma_E)$ составляют 37 и 42% при низкой солнечной активности соответственно, а при средней солнечной активности эти максимальные значения равны 16 и 56% соответственно. Таким образом, стандартные отклонения σ_{MED} и σ_{MP} существенно отличаются от σ_E как при низкой, так и при средней солнечной активности.

Величины σ_E , σ_{MED} и σ_{MP} дают абсолютную оценку меры разброса электронной концентрации максимума слоя E ионосферы относительно NmE_E , NmE_{MED} и NmE_{MP} соответственно. Чтобы определить, насколько разброс NmE велик или мал независимо от величины NmE , используются коэффициенты вариаций CV_E , CV_{MED} и CV_{MP} . Кроме того, статистические параметры NmE_E , NmE_{MED} и NmE_{MP} зависят не только от UT и M, но и от уровня солнечной активности и географической широты и долготы. Поэтому коэффициенты вариаций NmE , являющиеся относительными показателями межсуточной изменчивости NmE , также необходимы и для сопоставления степени этой изменчивости при разных значениях уровня солнечной активности, географической широты и долготы, UT и M.

4.4. Сравнение CV_{MED} и CV_{MP} с CV_E

Результаты расчетов суточных вариаций CV_E , CV_{MED} и CV_{MP} представлены на рисунках 3–6 для условий низкой (рис. 3 и 4) и средней (рис. 5 и 6) солнечной активности. Рассматриваемые статистические характеристики NmE изменяются в промежутках $4\% \leq CV_E \leq 26\%$, $5\% \leq CV_{MED} \leq 26\%$ и $6\% \leq CV_{MP} \leq 26\%$ при низкой солнечной активности, а при средней солнечной активности $3\% \leq CV_E \leq 76\%$, $7\% \leq CV_{MED} \leq 20\%$ и $7\% \leq CV_{MP} \leq 27\%$. Из рис. 3–6 видно, что коэффициенты вариаций CV_E , CV_{MED} и CV_{MP} отличаются друг от друга как при низкой (см. также работы [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017]), так и при средней солнечной активности. При этом, в преобладающем большинстве случаев значение CV_E меньше, чем величина CV_{MED} или CV_{MP} .

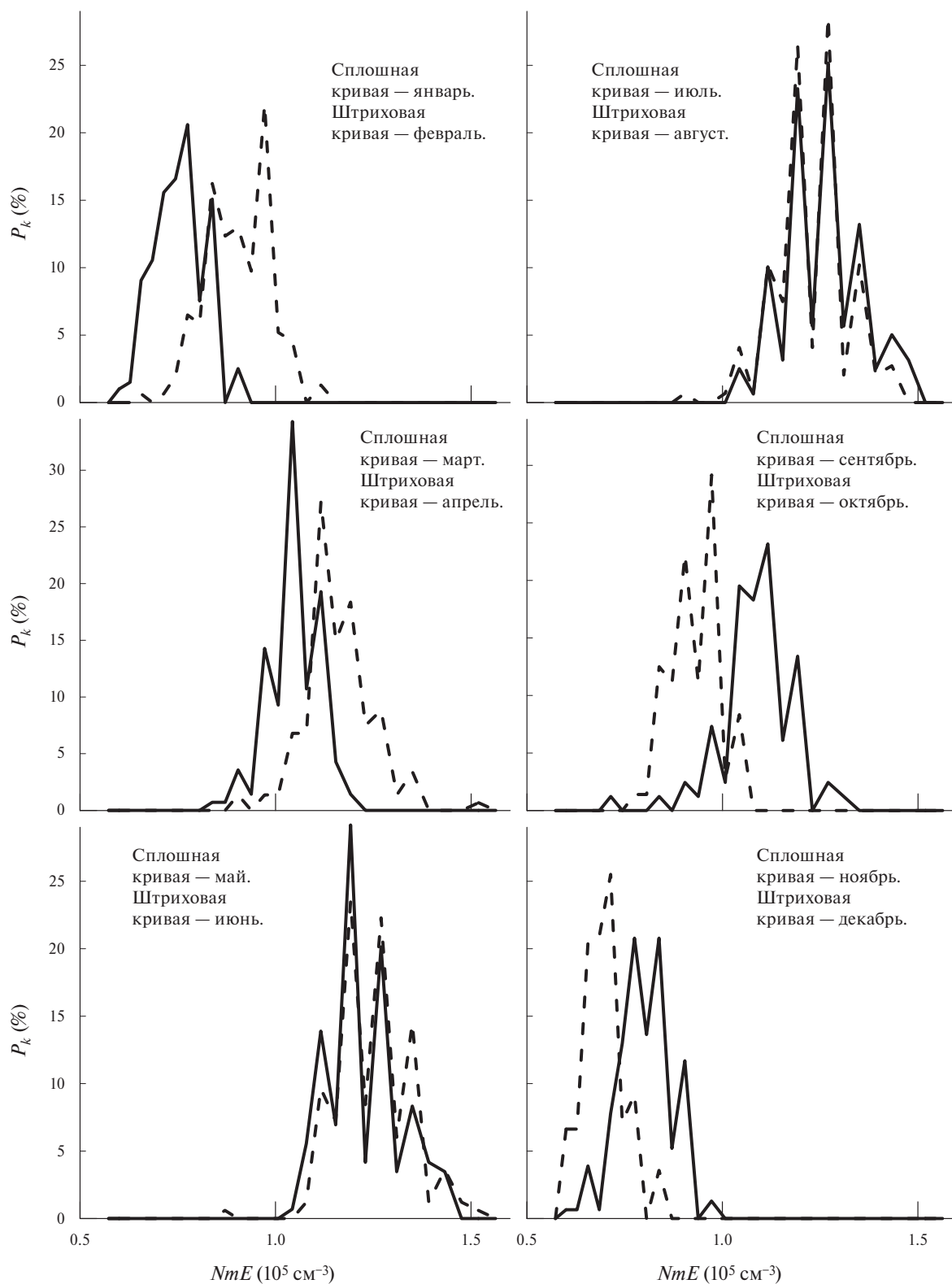


Рис. 1. Зависимость P_k от NmE в 12:00 UT (12:18 SLT) при низкой солнечной активности. Сплошные и штриховые кривые соответствуют январю и февралю (верхняя левая панель), марту и апрелю (средняя левая панель), маю и июню (нижняя левая панель), июлю и августу (верхняя правая панель), сентябрю и октябрю (средняя правая панель) и ноябрю и декабрю (нижняя правая панель).

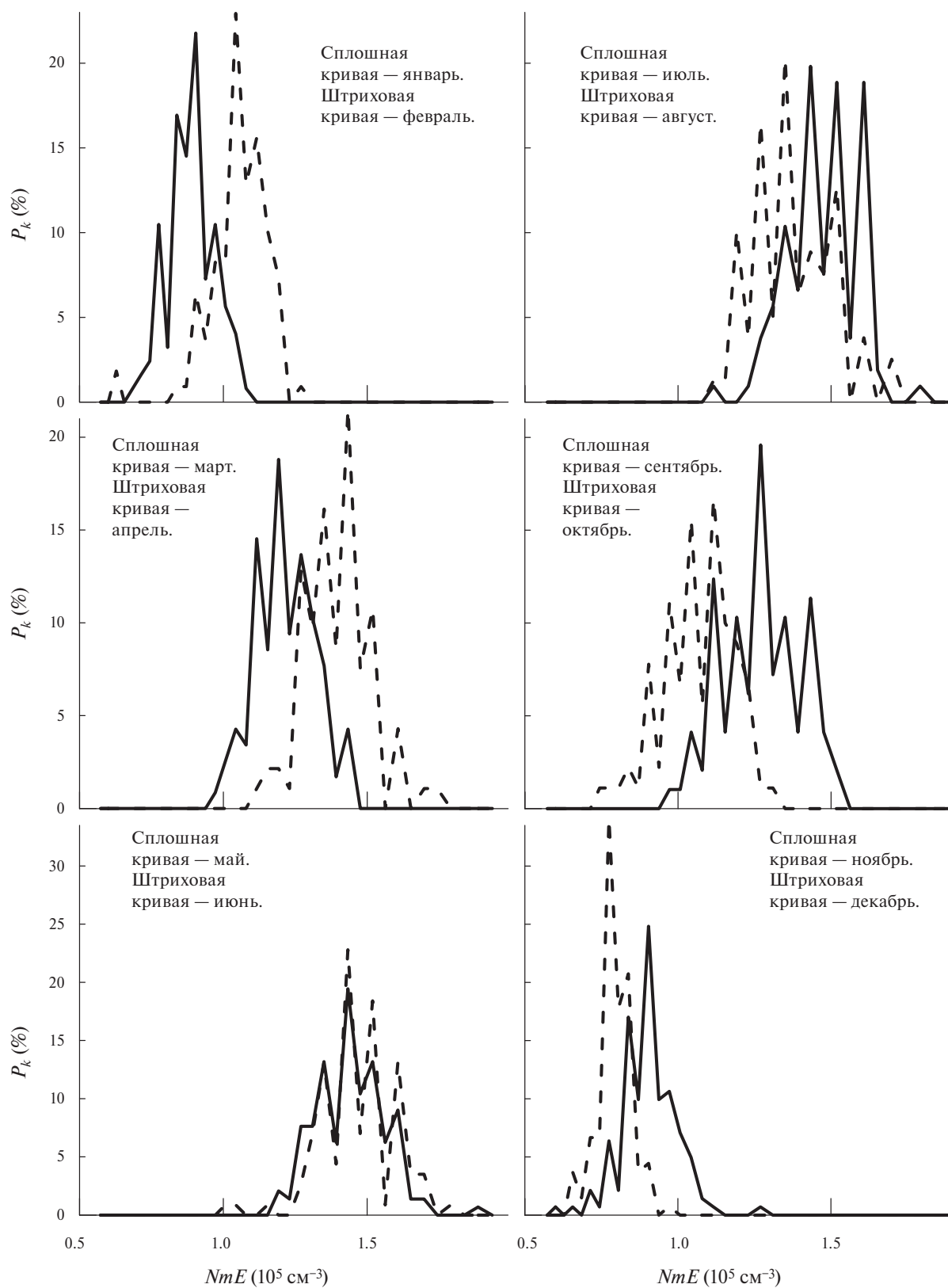


Рис. 2. Зависимость P_k от NmE в 12:00 UT (12:18 SLT) при средней солнечной активности. Соответствие сплошных и штриховых кривых месяцам года тоже, что и на рис. 1.

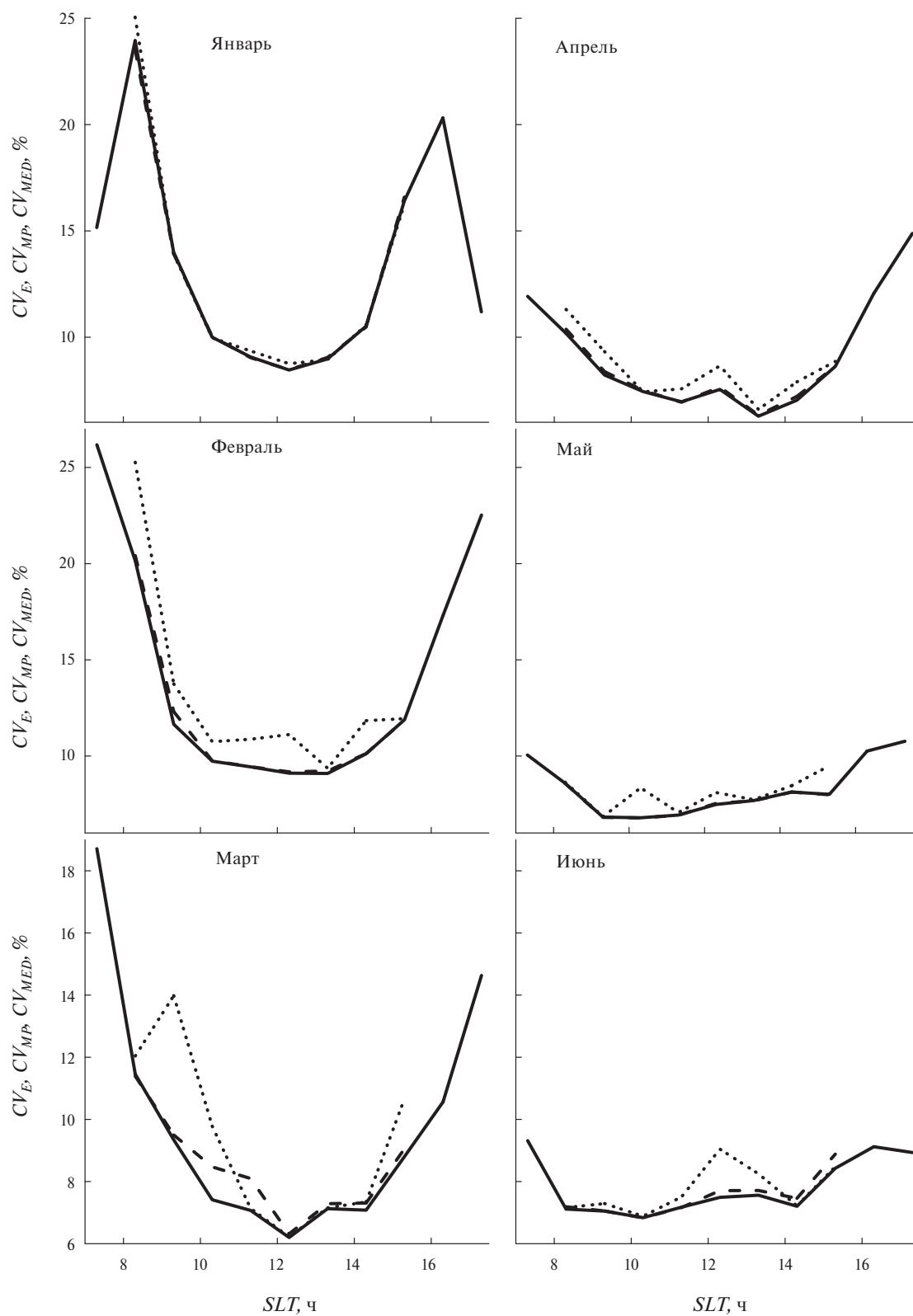


Рис. 3. Суточные вариации CV_E (сплошные кривые), CV_{MP} (пунктирные кривые) и CV_{MED} (штриховые кривые) для января (верхняя левая панель), февраля (средняя левая панель), марта (нижняя левая панель), апреля (верхняя правая панель), мая (средняя правая панель) и июня (нижняя правая панель) при низкой солнечной активности.

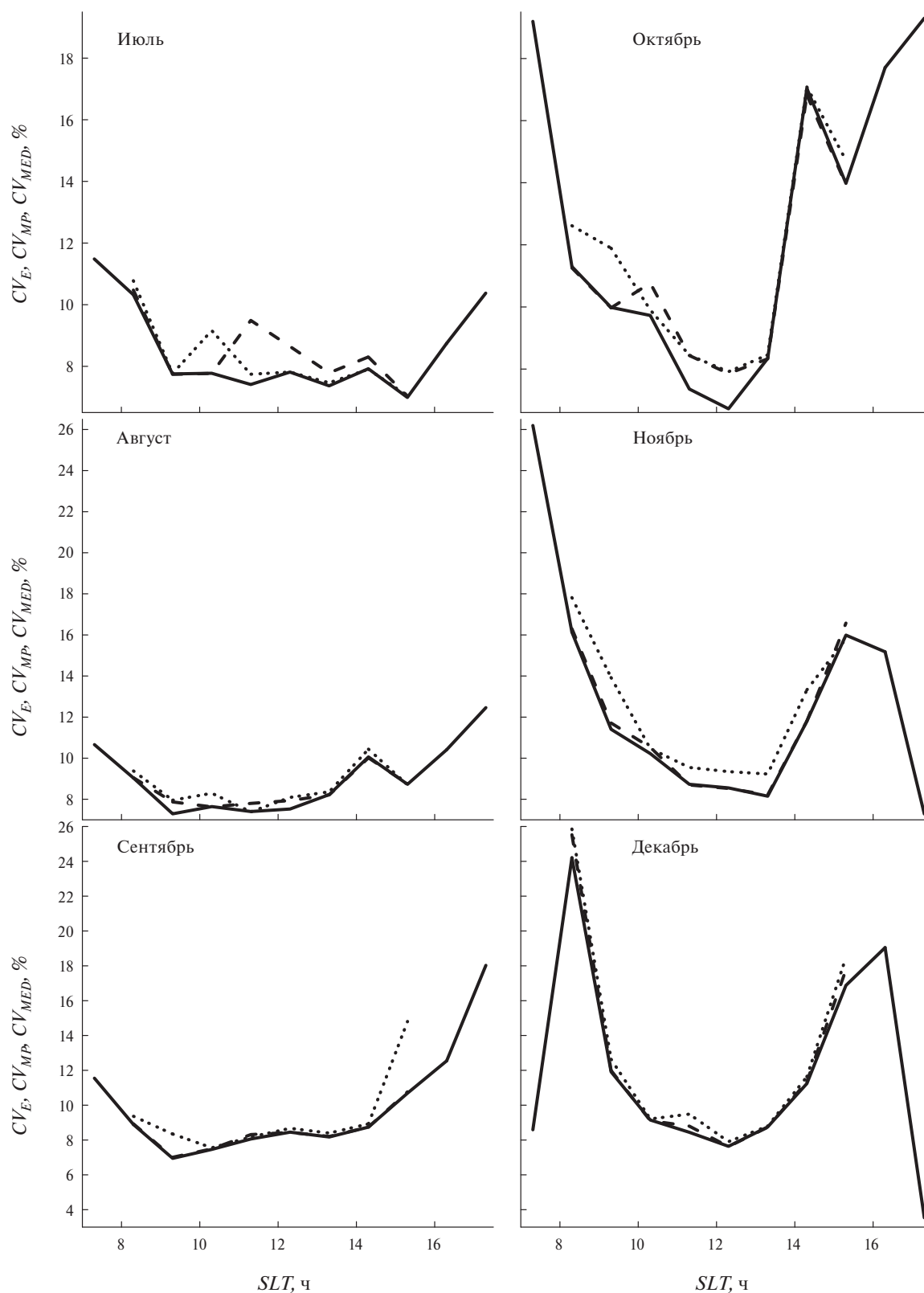


Рис. 4. Суточные вариации CV_E (сплошные кривые), CV_{MP} (пунктирные кривые) и CV_{MED} (штриховые кривые) для июля (верхняя левая панель), августа (средняя левая панель), сентября (нижняя левая панель), октября (верхняя правая панель), ноября (средняя правая панель) и декабря (нижняя правая панель) при низкой солнечной активности.

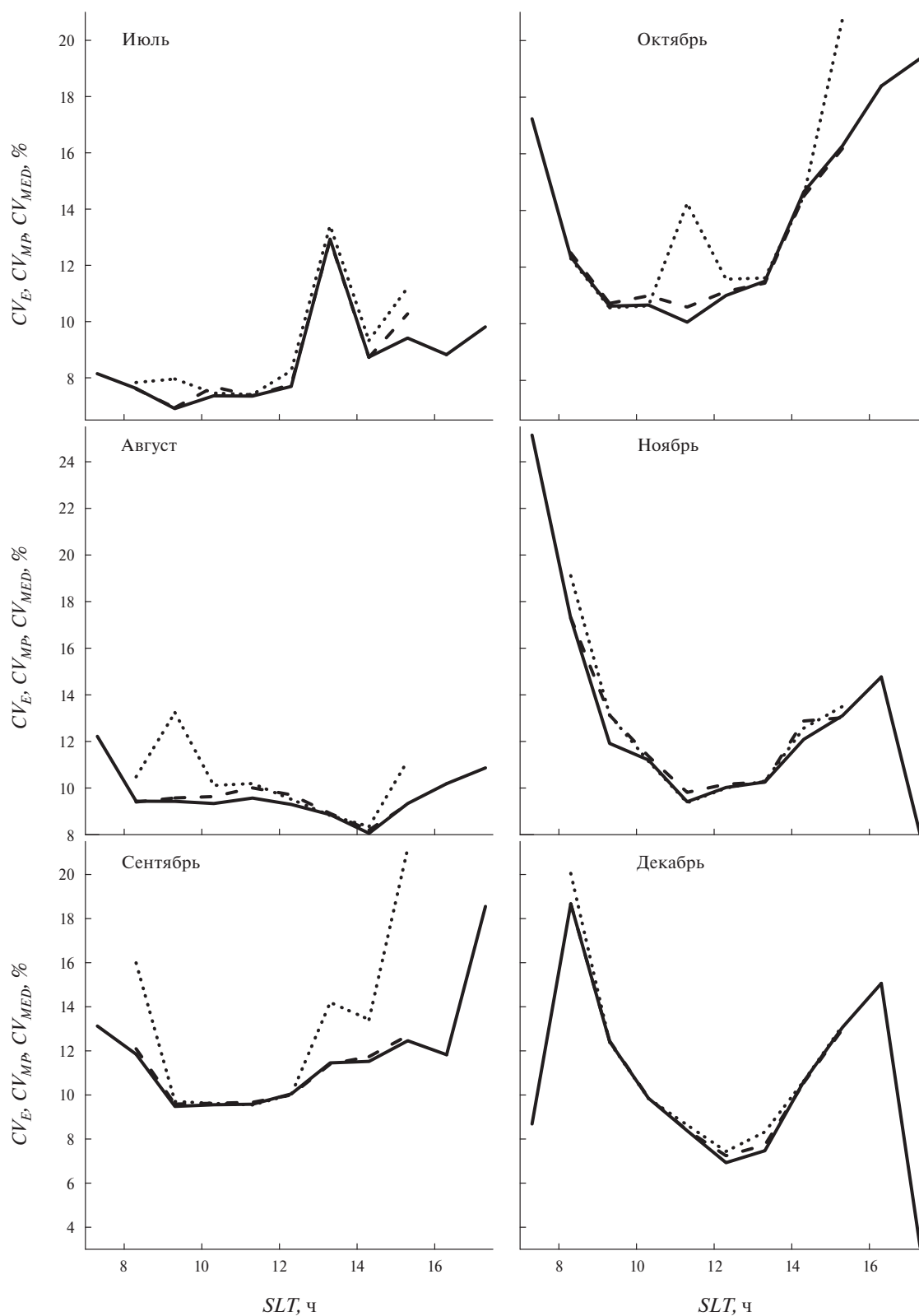


Рис. 5. Суточные вариации CV_E (сплошные кривые), CV_{MP} (пунктирные кривые) и CV_{MED} (штриховые кривые) для января (верхняя левая панель), февраля (средняя левая панель), марта (нижняя левая панель), апреля (верхняя правая панель), мая (средняя правая панель) и июня (нижняя правая панель) при средней солнечной активности.

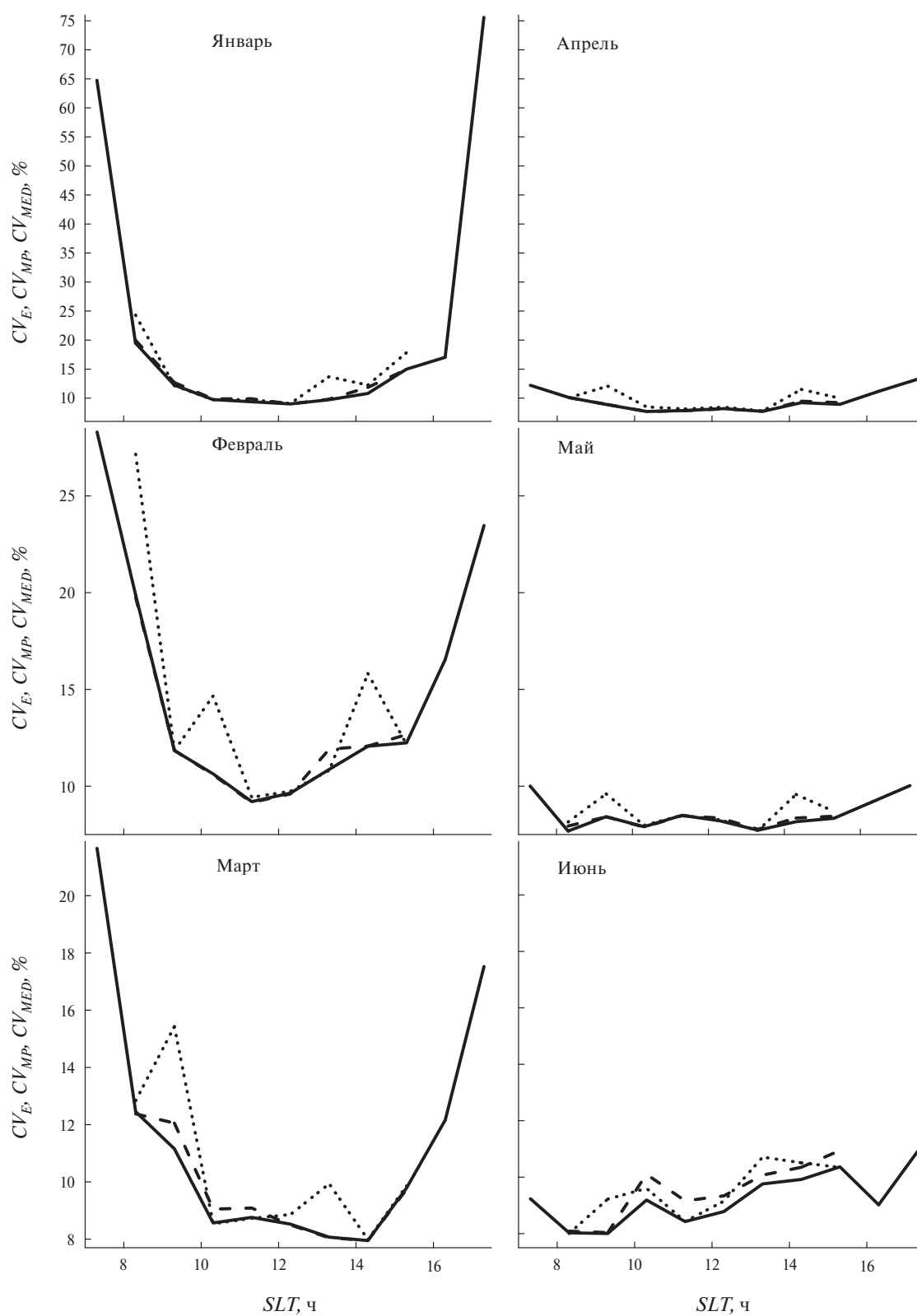


Рис. 6. Суточные вариации CV_E (сплошные кривые), CV_{MP} (пунктирные кривые) и CV_{MED} (штриховые кривые) для июля (верхняя левая панель), августа (средняя левая панель), сентября (нижняя левая панель), октября (верхняя правая панель), ноября (средняя правая панель) и декабря (нижняя правая панель) при средней солнечной активности.

Чем меньше коэффициент вариации случайной величины NmE относительно статистического параметра $Y = NmE_E, NmE_{MP}, NmE_{MED}$, тем более точной является оценка NmE параметром Y при заданных величинах UT и M . Если условия минимизации стандартного отклонения и коэффициента вариации NmE принимаются в качестве критерия наилучшего описания множества измерений NmE одним статистическим параметром NmE , то согласно результатам настоящей работы использование в ионосферных исследованиях математического ожидания NmE в наилучшей степени обеспечивает выполнение этого критерия в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности. Таким образом, использование σ_{MED} и CV_{MED} или σ_{MP} и CV_{MP} вместо σ_E и CV_E приводит к неточным выводам о межсуточной изменчивости NmE при низкой и средней солнечной активности. Такое же заключение было сделано в работах [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017], использовавших результаты измерений foE наземными ионозондами средних широт в условиях низкой солнечной активности.

Вычисленные в моменты мирового времени UT от 07:00 до 17:00 коэффициенты CV_E позволили определить арифметически средний по времени коэффициент CV_0 межсуточных вариаций NmE относительно математического ожидания NmE , т.е. арифметически среднюю межсуточную изменчивость NmE для каждого месяца года при заданном уровне солнечной активности. Расчеты показали, что величина CV_0 изменяется от 7.8% в июне до 14.3% в феврале при низкой солнечной активности и от 8.6% (май) до 23.0% (январь) в условиях средней солнечной активности.

Из выражения (6) следует, что значение σ_E зависит от типа данных, краткой характеристикой которого является NmE_E . Поэтому сравнение $\sigma_E(UT, M)$ при низкой и средней солнечной активности отсутствует в настоящей работе, т.к. такое сравнение не является мерой влияния солнечной активности на межсуточную изменчивость NmE . Коэффициент вариации — это относительная мера изменчивости или разброса данных в статистике и этот коэффициент используется для сравнения степени изменчивости между разными наборами данных, учитывая отличия их средних значений (см., например, [Chattamvelli and Shanmugam, 2015]).

4.5. Сравнение коэффициента CV_E , определяющего межсуточную изменчивость NmE при низкой и средней солнечной активности

Из проведенных расчетов следует, что максимальная межсуточная изменчивость NmE состав-

ляет 26% в феврале в 7:18 SLT при низкой солнечной активности и 76% в январе в 17:18 SLT в условиях средней солнечной активности. Минимальная межсуточная изменчивость NmE , составляющая 4% при низкой солнечной активности и 3% в условиях средней солнечной активности, реализуется в декабре в 17:18 SLT. Таким образом, переход от низкой к средней солнечной активности приводит к существенным изменениям максимальной межсуточной изменчивости NmE .

Исследуемое влияние солнечной активности на межсуточную изменчивость NmE определяется параметром

$$\Delta CV_E = CV^{AV} - CV^L, \quad (15)$$

где CV^{AV} и CV^L — значения коэффициента $CV_E(UT, M)$ при средней и низкой солнечной активности соответственно.

На рис. 7 представлены результаты расчетов суточных вариаций ΔCV_E для каждого месяца года. Можно сделать вывод, что рассматриваемое в работе изменение солнечной активности приводит к увеличению или уменьшению межсуточной изменчивости NmE в диапазоне изменения ΔCV_E от -4.0% в декабре в 16:18 SLT до 64.4% в январе в 17:18 SLT. Из рисунка 7 видно, что при возрастании солнечной активности наибольшая продолжительность периодов увеличения межсуточной изменчивости NmE ($\Delta CV_E > 0$) реализуется в марте, а периодов уменьшения рассматриваемой изменчивости NmE ($\Delta CV_E < 0$) — в декабре. При возрастании солнечной активности продолжительность периодов уменьшения межсуточной изменчивости NmE наибольшая в зимних условиях (декабрь, январь и февраль) и наименьшая в осенних условиях (сентябрь, октябрь и ноябрь) в сравнении с каждым из других сезонов года.

Исследование относительной роли процессов формирования вариаций статистических характеристик межсуточной изменчивости NmE выходит за рамки целей настоящей работы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование межсуточных вариаций статистических характеристик NmE для каждого месяца года в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности по данным часовых ($UT = 7, 8, \dots, 17$ ч) измерений foE наземным ионозондом Dourbes с 1957 по 2023 г. Выполнены расчеты следующих статистических параметров NmE : математическое ожидание NmE_E , арифметически среднее NmE , наиболее вероятное NmE_{MP} , арифметически средняя

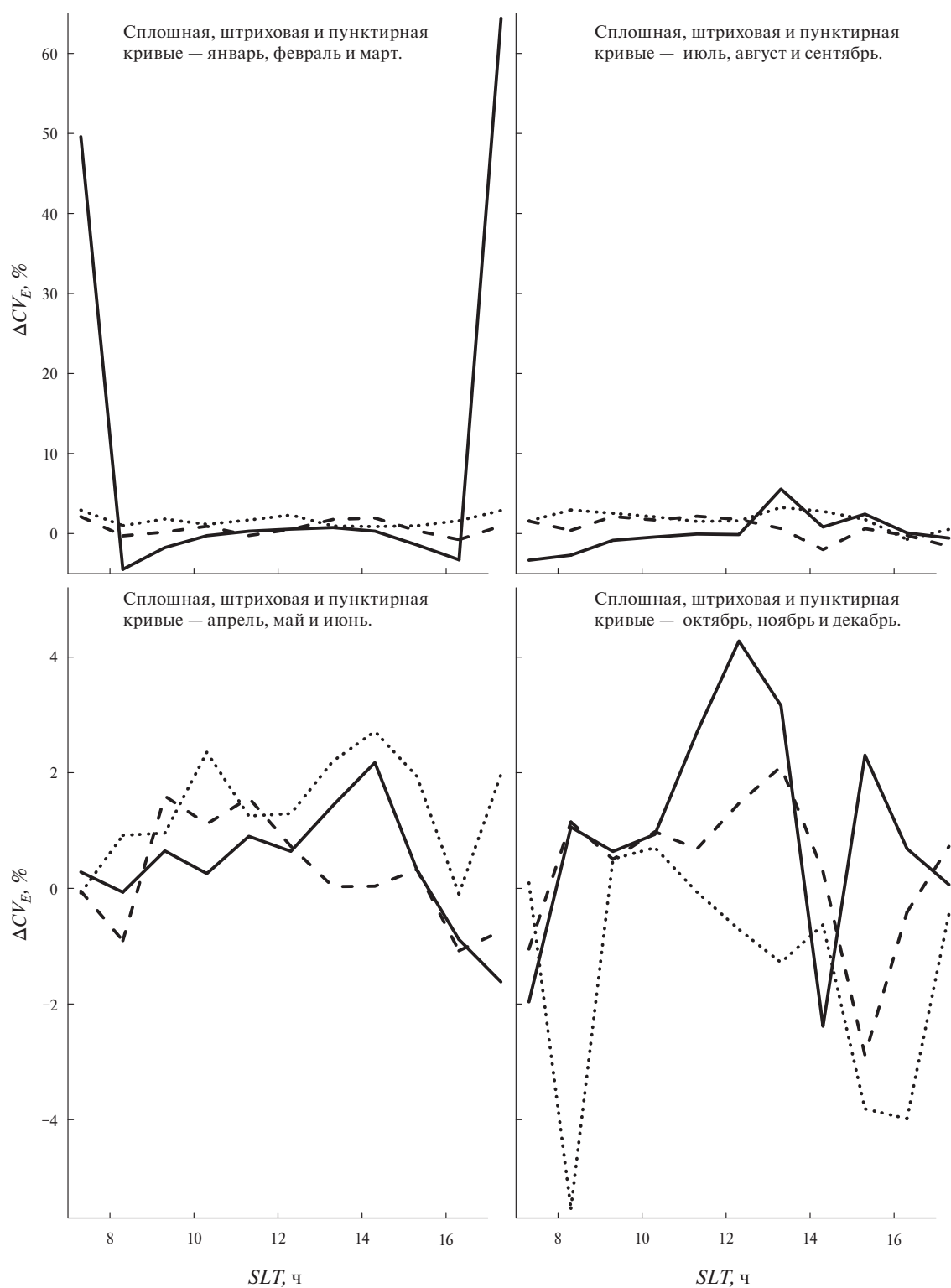


Рис. 7. Суточные вариации ΔCV_E в январе, феврале и марте (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней левой панели), в апреле, мае и июне (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней левой панели), в июле, августе и сентябре (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней правой панели), в октябре, ноябре и декабре (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней правой панели).

месячная медиана NmE_{MED} , стандартные отклонения σ_E , σ_{MP} и σ_{MED} величины NmE от NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} и коэффициенты вариаций CV_E , CV_{MP} и CV_{MED} значения NmE относительно NmE_E , NmE_{MP} и NmE_{MED} соответственно.

Найдено, что вычисленное распределение вероятности результатов наблюдений NmE является полимодальным (многомодальным или мультимодальным) как при низкой, так и при средней солнечной активности. Этот результат свидетельствует о существенной неоднородности множества значений исследуемой величины и показывает, что результаты наблюдений NmE состоят из нескольких подмножеств данных с разными законами распределения вероятности, которые могут формироваться разными источниками межсуточной изменчивости.

Из проведенного исследования следует, что арифметически среднее NmE отличается от математического ожидания NmE не более, чем на 7.3% и 9.6% при низкой и средней солнечной активности соответственно. Как при низкой, так и при средней солнечной активности величины NmE_E , NmE_{MED} и NmE_{MP} , каждая из которых может обеспечить описание множества наблюдений рассматриваемой случайной величины NmE , существенно отличаются друг от друга, и результаты решения задач с участием статистической характеристики NmE зависят от выбора между NmE_E , NmE_{MED} и NmE_{MP} .

Показано, что в преобладающем большинстве случаев коэффициент вариации NmE относительно математического ожидания NmE меньше или близок к значениям коэффициентов вариации NmE относительно арифметически средней месячной медианы NmE или наиболее вероятного значения NmE . Если величина CV_E больше, чем значение CV_{MED} или CV_{MP} , то отличие между коэффициентами CV_E и CV_{MED} или между CV_E и CV_{MP} не значительно в сравнении с их величинами. Кроме того, величина σ_E меньше, чем σ_{MP} или σ_{MED} как при низкой, так и при средней солнечной активности. Таким образом, в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности следует использовать математическое ожидание NmE в качестве количественной характеристики, обеспечивающей наилучшее описание множества измерений NmE одним статистическим параметром NmE . Из проведенных ранее исследований [Павлов и Павлова, 2016; Pavlov and Pavlova, 2017] и результатов настоящей работы следует, что использование σ_{MED} и CV_{MED} или σ_{MP} и CV_{MP} вместо σ_E и CV_E приводит к не точным выводам о межсуточной изменчивости NmE при низкой и средней солнечной активности.

Найдено, что коэффициент CV_E изменяется в пределах 4–26% и 3–76% при низкой и средней солнечной активности соответственно. Таким образом, переход от низкой к средней солнечной активности приводит к существенным изменениям максимальной межсуточной изменчивости NmE . Показано, что арифметически средняя межсуточная изменчивость NmE изменяется от 7.8% в июне до 14.3% в феврале при низкой солнечной активности и от 8.6% (май) до 23.0% (январь) в условиях средней солнечной активности.

Выполненные расчеты изменения величины коэффициента CV_E при переходе от низкой к средней солнечной активности позволили впервые определить влияние солнечной активности на межсуточную изменчивость NmE . Доказано, что рассматриваемая вариация солнечной активности приводит как к увеличению исследуемой изменчивости NmE (например, на 64.4% в январе в 17:18 SLT), так и к уменьшению данной изменчивости NmE (например, на 4.0% в декабре в 16:18 SLT). При переходе от низкой к средней солнечной активности наибольшая продолжительность периодов увеличения межсуточной изменчивости NmE реализуется в марте, а периодов уменьшения рассматриваемой изменчивости NmE — в декабре. Кроме того, продолжительность периодов уменьшения межсуточной изменчивости NmE наибольшая в зимних условиях (декабрь, январь и февраль) и наименьшая в осенних условиях (сентябрь, октябрь и ноябрь) в сравнении с каждым из других сезонов года. Насколько известно авторам, сравнение коэффициента CV_E при низкой и средней солнечной активности и приведенные выше результаты этого сравнения — первое исследование влияния солнечной активности на межсуточную изменчивость NmE .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агекян Т.А. Основа теории ошибок для астрономов и физиков. М.: Наука, 148 с. 1968.
- Акасофу С.И. Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 316 с. 1971.
- Акасофу С.И., Чепмен С. Солнечно-земная физика. Ч. 1. М.: Мир, 384 с. 1974.
- Балдин К.В., Башлыков В.Н., Рукосуев А.В. Основы теории вероятностей и математической статистики. М.: ФЛИНТА, 489 с. 2016.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 527 с. 1988.
- Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Наука, 664 с. 1970.
- Дэвид Г. Порядковые статистики. М.: Наука, 336 с. 1979.

- Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 816 с. 2006.
- Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 551 с. 2012.
- Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе. М: Мир, 584 с. 1977.
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Влияние рефракции солнечного излучения на зенитный угол и времена восхода и захода Солнца в атмосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 50. № 2. С. 228–233. 2010.
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Сравнение измеренных ионизацией Москвы и вычисленных концентраций электронов максимума слоя E ионосферы в весенних условиях // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 55. № 2. С. 247–257. 2015. <https://doi.org/10.7868/S0016794015020145>.
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Зависимости от месяца года статистических характеристик NmE средних и низких широт в дневных геомагнитно-спокойных условиях при низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 56. № 4. С. 431–436. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794016040167>
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Суточные вариации статистических характеристик изменчивости NmF2 по данным наземных ионизаций низких широт в геомагнитно-спокойных условиях при низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 63. № 4. С. 429–440. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600685>
- Пиггот В.П., Равер К. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 342 с. 1978.
- Тейлор Д. Введение в теорию ошибок. М.: Мир, 272 с. 1985.
- Acebal A.O., Sojka J.J. A flare sensitive 3 h solar flux radio index for space weather applications // Space Weather. V. 9. № 7. ID S07004. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010SW000585>
- Banks P.M., Kockarts G. Aeronomy. Part B. New York and London: Academic Press, 355 p. 1973.
- Chattamvelli R., Shanmugam R. Statistics for scientists and engineers. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc., 467 p. 2015.
- Durivage M.A. Practical engineering, process, and reliability statistics. Milwaukee, WA: ASQ Quality Press, 260 p. 2022.
- Gatti P.L. Probability theory and mathematical statistics for engineers. London and New York: Spon Press of Taylor & Francis Group, 356 p. 2005.
- Haldoupis C. Midlatitude sporadic E. A typical paradigm of atmosphere-ionosphere coupling // Space Sci. Rev. V. 168. № 1–4. P. 441–461. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9786-8>
- Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. — Space. V. 92. № 5. P. 4649–4662. 1987. <https://doi.org/10.1029/JA092iA05p04649>
- Howell D.C. Statistical Methods for Psychology. Belmont, CA: Wadsworth Cengage Learning, 771 p. 2013.
- Krall J., Emmert J.T., Sassi F., McDonald S.E., Huba J.D. Day-to-day variability in the thermosphere and its impact on plasmasphere refilling // J. Geophys. Res. — Space. V. 121. № 7. P. 6889–6900. 2016. <https://doi.org/10.1002/2015JA022328>
- Liu H., Yamazaki J., Lei J. Day-to-day variability of the thermosphere and ionosphere / Upper atmosphere dynamics and energetics / Geophysical Monograph Series, 261 / Eds. W. Wang, Y. Zhang, L.J. Paxton / Space Physics and Aeronomy Collection. V. 4, Hoboken, NJ: John Wiley and Sons Inc. P. 275–300. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119815631.ch15>
- Manson J.E. The solar extreme ultraviolet between 30 and 205 Å on November 9, 1971, compared with previous measurements in this spectral region // J. Geophys. Res. V. 81. № 10. P. 1629–1635. 1976. <https://doi.org/10.1029/JA081i010p01629>
- Mendillo M. Day-to-day variability of the ionosphere / The Dynamical Ionosphere. A Systems Approach to Ionospheric Irregularity / Eds. M. Materassi, B. Forte, A.J. Coster, S. Skone, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. P. 7–11. 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814782-5.00002-9>
- Moore L., Mendillo M., Martinis C., Bailey S. Day-to-day variability of the E layer // J. Geophys. Res. — Space. V. 111. № 6. ID A06307. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011448>
- Nicolls M.J., Rodrigues F.S., Bust G.S. Global observations of E region plasma density morphology and variability // J. Geophys. Res. — Space. V. 117. № 1. ID A01305. 2012. <https://doi.org/10.1029/2011JA017069>
- Pavlov A.V. The role of vibrationally excited oxygen and nitrogen in the D and E regions of the ionosphere // Ann. Geophys. V. 12. № 10–11. P. 1085–1090. 1994. <https://doi.org/10.1007/s00585-994-1085-1>
- Pavlov A.V. Ion chemistry of the ionosphere at E- and F-region altitudes: A review // Surv.-Geophys. V. 33. № 5. P. 1133–1172. 2012. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9189-8>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Comparison of NmE measured by the Boulder ionosonde with model predictions near the spring equinox // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 102. № 1. P. 39–47. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.006>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Long-term monthly statistics of mid-latitude NmF2 in the northern geographic hemisphere during geomagnetically quiet and steadily low solar activity conditions // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 142. № 5. P. 83–97. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.03.001>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Long-term monthly statistics of the mid-latitude ionospheric E-layer peak electron density in the Northern geographic hemisphere during geomagnetically quiet and steadily low solar activity conditions // Ann. Geophys. — Italy. V. 60. № 2. ID A0327. 2017. <https://doi.org/10.4401/ag-6969>

- Pellinen-Wannberg A.K., Häggström I., Sánchez J.D.C., Plane J.M.C., Westman A. Strong *E* region ionization caused by the 1767 trail during the 2002 Leonids // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 119. № 9. P. 7880–7888. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA020290>
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 107. № 12. ID 1468. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
- Ross S.M. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 624 p. 2004.
- Rumsey D.J. Statistics II. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 423 p. 2022.
- Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomical calculations // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 99. № 5. P. 8981–8992. 1994. <https://doi.org/10.1029/94JA00518>
- Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres. Physics, plasma physics, and chemistry. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 628 p. 2009.
- Sengupta P.R. Solar X-ray control of the *E*-layer of the ionosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 32. № 7. P. 1273–1282. 1970. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(70\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(70)90057-7)
- Sojka J.J., Jensen J.B., David M., Schunk R.W., Woods T., Eparvier F., Sulzer M.P., Gonzalez S.A., Eccles J.V. Ionospheric model-observation comparisons: *E* layer at Arecibo incorporation of SDO-EVE solar irradiances // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 119. № 5. P. 3844–3856. 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JA019528>
- Titterton D.M., Smith A.F.M., Makov U.E. Statistical analysis of finite mixture distributions. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 243 p. 1985.
- Verma J.P., Verma P. Determining sample size and power in research studies. Singapore: Springer, 127 p. 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-5204-5>
- Whitehead J.D. Production and prediction of sporadic *E* // *Rev. Geophys.* V. 8. № 1. P. 65–144. 1970. <https://doi.org/10.1029/RG008i001p00065>

Influence of Solar Activity Variations on the Day-to-Day *NmE* Variability During Geomagnetically Quiet Conditions According to the Ground-Based Dourbes Ionosonde Data

A. V. Pavlov¹, *, N. M. Pavlova¹

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia
e-mail*: pavlov@izmiran.ru*

A study of day-to-day variations in the statistical characteristics of the ionospheric *E* layer electron number density *NmE* for each month in the year under geomagnetically quiet conditions at low and middle solar activity was carried out according to the hourly ground-based Dourbes ionosonde measurements of the ionospheric *E* layer critical frequency during the time periods from 1957 to 2023. The *NmE* statistical parameters under calculations are the mathematical expectation $NmE_{E'}$, the most probable NmE_{MP} , the arithmetical mean monthly median NmE_{MED} , the standard deviations $\sigma_{E'}$, σ_{MP} , σ_{MED} , and the variation coefficients $CV_{E'}$, CV_{MP} , and CV_{MED} of *NmE* relative to $NmE_{E'}$, NmE_{MP} , and NmE_{MED} , respectively. It was shown that the value of $NmE_{E'}$ provides the best description of a set of observations of *NmE* by one parameter due to the lower day-to-day variability of *NmE* compared to NmE_{MP} or NmE_{MED} . It was proven for the first time that the transition from low to middle solar activity leads to significant changes in the day-to-day variability of *NmE* with the longest periods of increases and decreases in the studied variability in March and December, respectively.

УДК 550.385.4

СООТВЕТСТВИЕ ВАРИАЦИЙ AE И Apo ИНДЕКСОВ В 23–24-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2024 г. Т. Л. Гуляева^{1, *}¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троцк, Россия

*e-mail: gulyaeva@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 03.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Индекс авроральной электроструи AE часто используется в прогностических моделях как характеристика источника распространения возмущения в геосфере от полюса к средним и низким широтам. Однако эти данные не предоставляются в цифровом виде с января 2020 г. Вместо AE -индекса в данной работе предлагается использовать недавно введенный 1-часовой Apo -индекс, учитывая близкое расположение сетей магнитометров для этих индексов в высоких широтах и наличие Apo -индекса в реальном времени. С этой целью проанализирована их корреляция во время 276 интенсивных бурь за 1995–2017 гг. Профили бурь построены методом совмещения эпох с началом отсчета $t_0 = 0$ при пороговом значении $AE \geq 1000$ нТл. Проведено сравнение профилей бурь $AE(t)$, $Apo(t)$, межпланетного электрического поля $E(t)$ и скорости солнечного ветра $V_{sw}(t)$ в течение 72 ч: 24 ч до пика бури t_0 , и 48 ч после него. Получено хорошее соответствие между рядами $AE(t)$ и $Apo(t)$ с коэффициентом корреляции 0.70. Сравнение с межпланетными параметрами показало корреляцию $AE(t)$ и $Apo(t)$ с электрическим полем $E(t)$ и отсутствие их прямой связи со скоростью солнечного ветра $V_{sw}(t)$. Выведена двухпараметрическая формула зависимости индекса авроральной электроструи $AE(t)$ от межпланетного электрического поля $E(t)$ и геомагнитного индекса $Apo(t)$ для использования в прогнозах геомагнитных бурь. В случае отсутствия данных $E(t)$ предложены формулы прямой зависимости $AE(t)$ от $Apo(t)$ для применения в реальном времени и обратной зависимости $Apo(t)$ от $AE(t)$ для реконструкции 1ч Apo -индекса до 1995 г. Проверка предложенных моделей по данным 5 интенсивных бурь в 2018 г. показала соответствие модельных расчетов наблюдательным данным AE -индекса с высоким коэффициентом определенности R^2 в пределах от 0.62 до 0.81.

DOI: 10.31857/S0016794024030091, EDN: SMJ OCD

1. ВВЕДЕНИЕ

Во время геомагнитных бурь электрическое поле магнитосферной конвекции усиливается, проникает во внешние L -оболочки и движется по силовым линиям к экватору. Наиболее подвержены влиянию космической погоды полярные и экваториальные зоны в магнитосфере и ионосфере [Tsurutani et al., 1990; Gulyaeva and Stanislawska, 2010; Gu et al., 2019; Prikrýl et al., 2022]. Это, в частности, подтверждается широким использованием в операционных системах мониторинга и прогноза космической погоды индексов авроральной электроструи AE и кольцевого тока, представленного экваториальным Dst -индексом. AE -индекс был введен для измерений вариаций горизонтальной компоненты H геомагнитного поля в вы-

бранных 10–13 обсерваториях [Davis and Sugiura, 1966]. Верхняя граница отклонений H от спокойного уровня обозначена как AU -индекс, нижняя граница как AL -индекс, представляющие соответственно интенсивности восточной и западной авроральной электроструи. AE -индекс представляет собой разность AU и AL ($AE = AU - AL$). Наряду с другими известными параметрами, индексы AE , AU и AL широко используются в исследованиях влияния космической погоды на космические и телекоммуникационные системы [Schrijver, 2015], авиационную безопасность [Göker, 2023] и другие технологии.

AE -индекс широко применяется для исследования морфологии суббурь, ионосферных бурь, радио мерцаний и взаимосвязи межпланетного

магнитного поля с магнитосферой Земли [Echer et al., 2006; Klimenko et al., 2011; Luo et al., 2013; Nesse Tyssøy et al., 2021; Белюченко и др., 2022]. Его практическое применение в ионосферных прогнозах [Li et al., 2015; Yenen et al., 2015; Гуляева, 2016а, б] затруднено из-за отсутствия этих данных в числовом формате с января 2020 г. на сайте провайдера (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>).

Отсутствие данных AE в реальном времени частично компенсируется прогнозами AE -индекса, основанными на измерениях параметров солнечного ветра [Luo et al., 2013; Gu et al., 2019]. Корреляции аврорального AE -индекса с другими индикаторами магнитосферных возмущений исследовались ранее в ряде работ [Rostoker, 1991; Cade III et al., 1995; Fares Saba et al., 1997; Шубин и др., 1998; Adebesin, 2016; Bergin et al., 2020; Гуляева, 2023]. В них использовались сравнения AE с трехчасовыми ap и Kp -индексами, минутными SME и SMR -индексами и часовыми Dst -индексами. Было показано, что более плотная сеть магнитометров SuperMAG позволяет улучшить оценку эффектов ионосферно-магнитосферных возмущений с помощью индексов SME , рассчитанных по методике AE , и измерений кольцевого тока SMR , подобных Dst [Bergin et al., 2020]. Однако данные SuperMAG имеются только до конца 2022 г., они не предоставляются в реальном времени и поэтому не используются в прогнозах.

Недавно ряды трехчасовых геомагнитных индексов Kp и ap пополнились 1-часовыми ($Hr60$ и $ar60$) и 30-минутными ($Hr30$ и $ar30$) индексами, измеряемыми на их общей сети магнитометров вблизи аврорального овала [Yamazaki et al., 2022]. Обозначим для краткости 1-часовые индексы $Hr60 = Hr60$ и $Ar60 = ar60$ соответственно. Индексы $Hr60$ и $Ar60$ доступны с 1995 г. на сайте (<https://kp.gfz-potsdam.de/en/hp30-hr60>) и продолжают регулярно пополняться в режиме реального времени. В данной работе впервые исследуются взаимосвязи между AE - и $Ar60$ -индексами во время интенсивных геомагнитных бурь, с целью использования нового ряда 1-часовых $Ar60$ индексов в прогнозах эффектов геомагнитных бурь вместо отсутствующих цифровых данных AE -индекса.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Прежде чем перейти к сравнению поведения геомагнитных AE и $Ar60$ индексов во время интенсивных геомагнитных бурь, рассмотрим расположение сетей магнитометров, на основе измерений которых вычисляются эти индексы (рис. 1). Видно близкое расположение источ-

ников данных в высоких широтах. Сеть магнитометров для AE -индекса располагается выше 60° магнитной широты в Северном полушарии, а сеть для $Ar60$ -индекса, совпадающая с сетью 3-часовых ap - и Kp -индексов, — вблизи 60° магнитной широты в Северном полушарии и двух станций в Южном полушарии.

Сравнение профилей бури для AE и $Ar60$ -индексов выполнено методом совмещения эпох для 276 интенсивных бурь, с началом отсчета $t_0 = 0$ при пороговом значении $AE \geq 1000$ нТл за 1995–2017 гг. При наличии ряда значений $AE \geq 1000$ нТл в течение бури, начало отсчета $t_0 = 0$ отнесено к наибольшему значению AE . Профили бурь вычислены в течение 72 ч: 24 ч до пика бури t_0 , и 48 ч после него. Результаты показаны на рис. 2а – профили бурь $AE(t)$ и рис. 2б – профили бурь $Ar60(t)$. В работе [Куражковская и Куражковский, 2023] показана зависимость Ar - и Dst -индексов от индикаторов солнечной активности, а также от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Межпланетное электрическое поле показывает наилучшую корреляцию с геомагнитными индексами и отрицательными ионосферными возмущениями [Crooker and Gringauz, 1993; Kim and Chang, 2014; Gulyaeva, 2024]. В данной работе профили параметров межпланетного электрического поля $E(t)$ (рис. 2в) и скорости солнечного ветра $V_{sw}(t)$ (рис. 2г) посчитаны для сравнения с вариациями $AE(t)$ и $Ar60(t)$ во время 276 интенсивных бурь. Электрическое поле солнечного ветра E (в единицах мВ/м) вычисляется как произведение южной компоненты Межпланетного магнитного поля, B_z (нТл) на скорость солнечного ветра V_{sw} (км/с) с обратным знаком и предоставляется на сайте (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html):

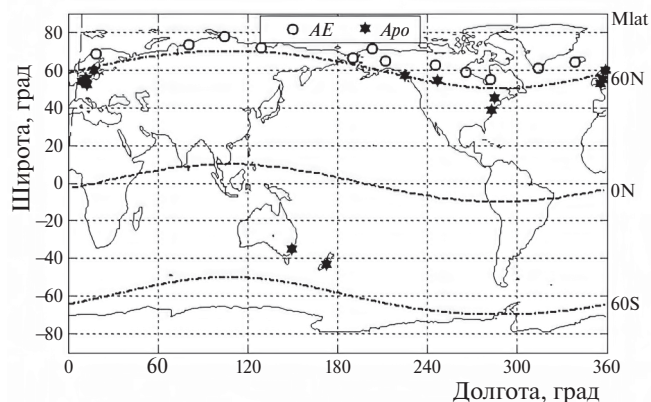


Рис. 1. Сети магнитометров, поставляющие данные для производства AE - и $Ar60$ -индексов.

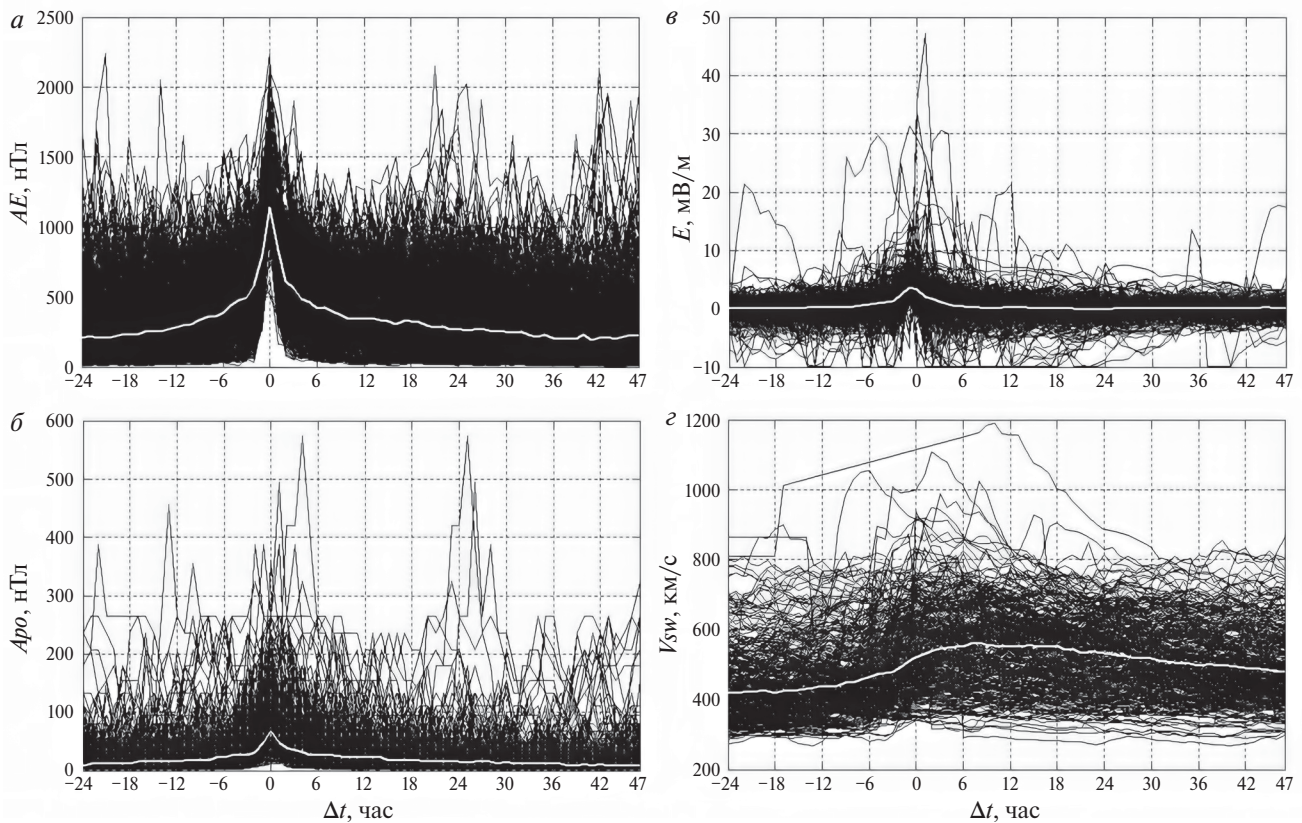


Рис. 2. Профили интенсивных бурь за 1995–2017 гг., центрированные к моменту пика AE -индекса: (а) профили $AE(t)$; (б) $Apo(t)$; (в) $E(t)$; (г) $Vsw(t)$. Индивидуальные профили – черные линии, медиана – белая кривая.

$$E = -B_z V_{sw} 10^{-3}. \quad (1)$$

Индивидуальные профили бурь показаны на рис. 2а–г черными линиями, медиана – белая кривая. В медианах, в частности, хорошо видно совпадение пика бурь Apo с пиком бурь AE . Видно, что пик $E_{\max}$ опережает на 1 ч t_0 , в то время как $V_{sw_{\max}}$ запаздывает на 8 ч после t_0 . Пик $E_{\max}$ отражает момент пика южной компоненты B_z при возросшей скорости V_{sw} (уравнение (1)). Визуально вариации профиля бурь $E(t)$ соответствуют вариациям $AE(t)$ и $Apo(t)$, что подтверждает изменения в AE под влиянием конвекции электрического поля солнечного ветра [Gu et al., 2019]. Исследование корреляций различных параметров космической погоды с геомагнитным Dst -индексом также показали его наилучшее соответствие произведению $[V_{sw} B_z]$, пропорциональному электрическому полю [Samwel and Miteva, 2023]. Запаздывание по времени скорости солнечного ветра в максимуме, $V_{sw_{\max}}$, после t_0 свидетельствует о том, что скорость солнечного ветра V_{sw} не пригодна для использования в прогнозах интенсивных бурь AE - и Apo -индексов, развитие которых предшествует пика V_{sw} .

Таблица 1. Коэффициент корреляции между значениями 4-х рассмотренных индексов во время интенсивных геомагнитных бурь

Индекс	V_{sw}	E	AE	Apo
V_{sw}	1	0.02	0.29	0.36
E		1	0.58	0.50
AE			1	0.70
Apo				1

Качественное сравнение профилей бурь на рис. 2а–г подтверждается коэффициентом корреляции между рассмотренными параметрами, представленным в табл. 1. Заметим, что в эти сравнения включены все моменты профилей бури – за 24 ч до ее пика t_0 и 48 ч в фазе восстановления. Из табл. 1 видно, что корреляция отсутствует между V_{sw} и E , слабая корреляция наблюдается между V_{sw} и AE и между V_{sw} и Apo . Коэффициент корреляции улучшается между

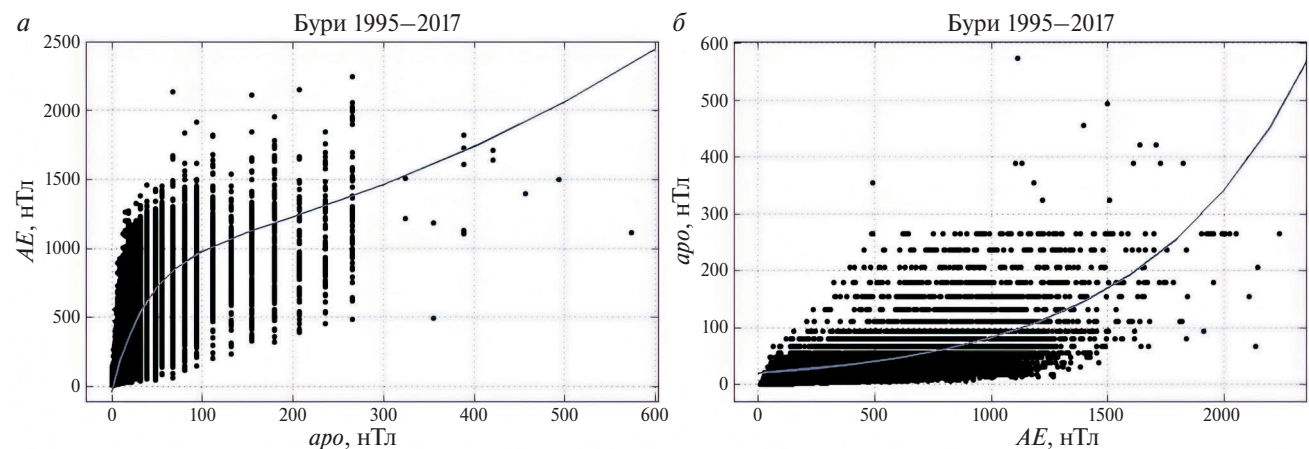


Рис. 3. Регрессионные зависимости между индексами *AE* и *Aro*: (а) зависимость *AE* от *Aro*; (б) зависимость *Aro* от *AE*.

индексами *E* и *AE* и между *E* и *Aro*. Наилучшая корреляция наблюдается между *AE*- и *Aro*-индексами с коэффициентом корреляции, равным 0.70. Это свойство мы используем для вывода уравнений связи между исследуемыми индексами.

На рис. 3а приведена зависимость индекса *AE* от *Aro*, и на рис. 3б — обратная ей зависимость *Aro* от *AE*, построенная по данным профилей бурь, приведенных на рис. 2а, б. Точками показаны исходные данные, сплошная кривая — экспоненциальная модель, построенная по методу наименьших квадратов:

$$AE = a e^{bAro} \tag{2}$$

$$Aro = a_1 e^{b_1AE} \tag{3}$$

Коэффициенты аппроксимаций (2–3) приведены в табл. 2 с указанием меры определенности *R*². Полученные значения *R*² показывают хорошее приближение модели к данным.

Таблица 2. Коэффициенты экспоненциальных выражений (2–3) и мера определенности *R*²

Модель	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i> ₁	<i>b</i> ₁	<i>R</i> ²
<i>AE</i> (<i>Aro</i>)	316.0014	0.0053			0.453
<i>Aro</i> (<i>AE</i>)			12.9814	0.0017	0.476

Выражения (2–3) включают все точки профилей бурь. При наличии данных межпланетного электрического поля профиль бурь *AE*-индекса можно представить в зависимости от двух параметров: *E* и *Aro*. Такая двухпараметрическая зависимость представлена на рис. 4 и в уравнении (4):

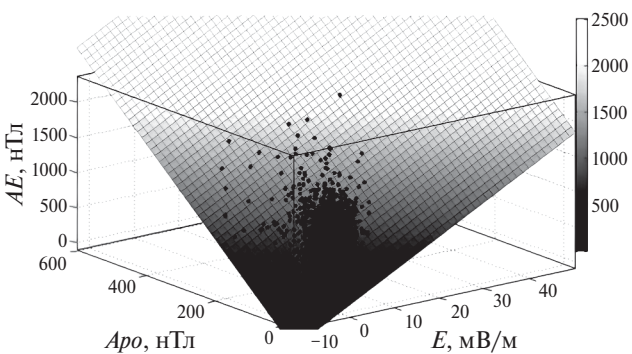


Рис. 4. Двухпараметрическая зависимость профиля бурь *AE*-индекса от параметров *E* и *Aro*.

$$AE = p_{00} + p_{10}E + p_{01}^{Aro} \tag{4}$$

Коэффициенты уравнения (4) представлены в табл. 3 с указанием меры определенности *R*². Параметр *R*² показывает высокую точность модели.

Таблица 3. Коэффициенты двухпараметрической модели (4) и мера определенности *R*²

Модель	<i>p</i> ₀₀	<i>p</i> ₁₀	<i>p</i> ₀₁	<i>R</i> ²
<i>AE</i> (<i>E</i> , <i>Aro</i>)	219.1	34.88	4.955	0.561

Как указано выше, мы исследовали все интенсивные бури за время имеющегося ряда часовых *Aro*- и *AE*-индексов с 1995 по 2017 гг. Данные *AE*-индекса в цифровом виде имеются по март 2019 г. С января 2018 г. по декабрь 2019 г. наблюдалось 12 интенсивных бурь с *AE*-индексом, превышающим 1000 нТл, 5 из которых перечислены в табл. 4.

Таблица 4. Проверка моделей (2) и (4) для 5 бурь в 2018 г.

Дата	$AE_{\max}$, нТл	$Apo_{\max}$, нТл	$E_{\max}$, мВ/м	R^2 (2)	R^2 (4)
18.03.2018 г.	1113	111	3.56	0.62	0.71
20.04.2018 г.	1001	111	5.76	0.81	0.72
01.06.2018 г.	1001	56	3.86	0.71	0.77
26.08.2018 г.	1210	179	6.56	0.74	0.75
05.11.2018 г.	1045	94	3.66	0.64	0.72

Эти события относятся к минимуму солнечной активности, но интенсивность геомагнитных возмущений в них выбрана по тому же критерию $AE \geq 1000$ нТл, что и в списке проанализированных бурь. Мы используем профили этих 5 бурь, не включенных в данные при анализе, для проверки предложенных моделей. Сравнение проводилось для каждого события в течение 3-х календарных дней: один день до пика бури $AE_{\max}$, день пика бури, указанный в 1-м столбце табл. 4, и один день, следующий за пиком бури. Всего сравнение проводилось в течение 72 ч для каждого события. Результаты представлены на рис. 5 и рис. 6 и в табл. 4.

На рис. 5 и рис. 6 (верхняя панель) представлены данные наблюдаемого АЕ-индекса (кривая 1), результаты расчета по модели (2) – кривая 2, и расчета по модели (4) – кривая 3. Исходные данные для расчетов показаны на средней

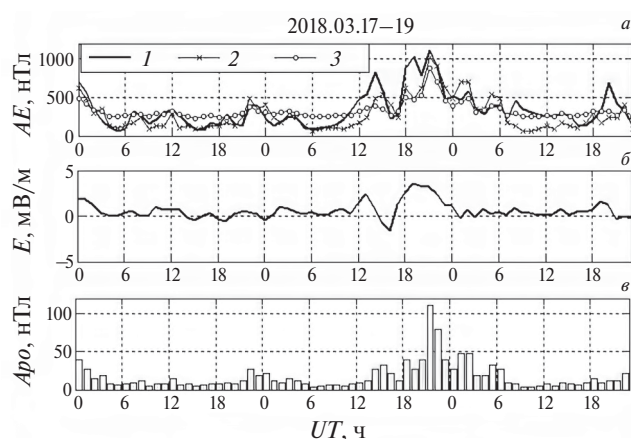


Рис. 5. Данные наблюдений и расчеты по модели во время бури с 17 по 19 марта 2018 г. (а) 1 – наблюдения АЕ-индекса; 2 – расчет по модели (2); 3 – расчет по модели (4); (б) наблюдения электрического поля E ; (в) наблюдения индекса Apo .

панели (электрическое поле E) и на нижней панели (планетарный Apo -индекс). На верхней панели видно близкое соответствие модельных расчетов данным наблюдений. На рис. 5 представлена буря с 17 по 19 марта 2018 г., при этом модели близко воспроизводят наблюдательный профиль бури АЕ-индекса. Пример на рис. 6 относится к буре с 25 по 27 августа 2018 г. На рис. 6 видно хорошее воспроизведение моделями вариаций АЕ-индекса, несмотря на сложную колебательную структуру его изменений во время бури.

Количественные оценки расчетов по моделям (2) и (4) для 5 контрольных примеров представлены в табл. 4. Здесь указаны максимальные значения наблюдаемых индексов во время бури ($AE_{\max}$, $Apo_{\max}$ и $E_{\max}$) и коэффициент определенности R^2 для моделей (2) и (4). Видно высокое значение коэффициента R^2 , с лучшими результатами для модели (4) по сравнению с моделью (2), за исключением 2-го события с 19 по 21 апреля 2018 г. В рассмотренных случаях коэффициент определенности R^2 меняется от 0.62 до 0.81.

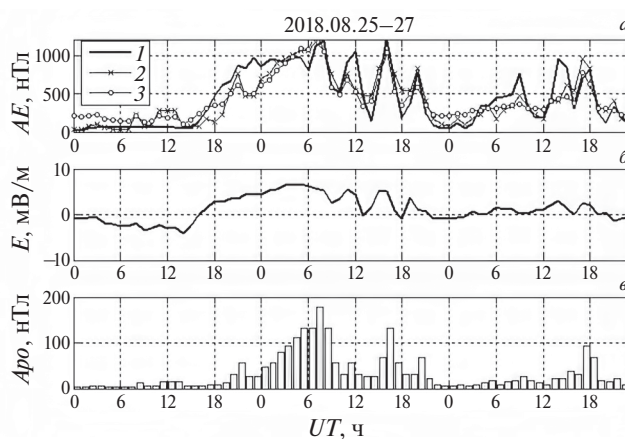


Рис. 6. Аналогично рис. 5 для бури с 25 по 27 августа 2018 г.

3. ВЫВОДЫ

Применение аврорального AE -индекса в прогностических моделях затруднено, так как с января 2020 г. данные AE приведены только в виде рисунков на сайте в Киото (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>). Учитывая близкое расположение источников данных для AE - и Apo -индексов, наличие цифровых данных Apo по адресу (<https://kp.gfz-potsdam.de/en/hp30-hp60>) и отсутствие таких данных AE в реальном времени, можно рекомендовать использование Apo -индекса в качестве управляющего параметра в геосферных моделях.

Этот вывод подтверждается проведенным исследованием корреляции $AE(t)$ и $Apo(t)$ индексов во время 276 интенсивных бурь за 1995–2017 гг. Профили бурь построены методом совмещения эпох с началом отсчета $t_0 = 0$ при пороговом значении $AE \geq 1000$ нТл. Проведено сравнение профилей бурь $AE(t)$, $Apo(t)$, межпланетного электрического поля $E(t)$ и скорости солнечного ветра $V_{sw}(t)$ в течение 72 ч: 24 ч до пика бури t_0 , и 48 ч после него. Получено хорошее соответствие между рядами $AE(t)$ и $Apo(t)$ с коэффициентом корреляции 0.70. Сравнение с межпланетными параметрами показало корреляцию $AE(t)$ и $Apo(t)$ с электрическим полем $E(t)$ и отсутствие их прямой связи со скоростью солнечного ветра $V_{sw}(t)$.

Выведена двухпараметрическая формула зависимости индекса авроральной электроструи $AE(t)$ от межпланетного электрического поля $E(t)$ и геомагнитного индекса $Apo(t)$ для использования в прогнозах геомагнитных бурь. В случае отсутствия данных $E(t)$ предложены формулы прямой зависимости $AE(t)$ от $Apo(t)$ для применения в реальном времени и обратной зависимости $Apo(t)$ от $AE(t)$ для реконструкции 1-часового Apo -индекса до 1995 г.

Проверка предложенных моделей по данным 5 интенсивных бурь в 2018 г. показала ее соответствие наблюдательным данным AE -индекса с высоким коэффициентом определенности R^2 в пределах от 0.62 до 0.81.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белюченко К.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г. Связь возмущений полного электронного содержания с AE -индексом геомагнитной активности во время геомагнитной бури в марте 2015 г. // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 3. С. 41–48. 2022. <https://doi.org/10.12737/szf-83202206>
- Гуляева Т.Л. Прогноз глобального электронного содержания в ионосфере в процессе развития геомагнитной бури / Тр. XX Всероссийской ежегодной конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2016”. СПб, 10–14 октября 2016 г. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. С. 85–88. 2016а.
- Гуляева Т.Л. Идентичность AE и Apo индексов в 23–24 циклах солнечной активности / Тр. XXVII Всероссийской ежегодной конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2023”. СПб, 9–13 октября 2023 г. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. С. 85–88. 2016б. <https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-85-88>
- Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Эффект гистерезиса между индексами геомагнитной активности (Ap , Dst) и параметрами межпланетной среды в 21–24 циклах солнечной активности // Солнечно-земная физика. Т. 9. № 3. С. 73–82. 2023. <https://doi.org/10.12737/szf-93202308>
- Шубин В.Н., Иванов-Холодный Г.С., Ситнов Ю.С. Использование интегральных индексов для описания динамики магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 4. С. 16–23. 1998.
- Adebesein B.O. Investigation into the linear relationship between the AE , Dst and ap indices during different magnetic and solar activity conditions // Acta Geod. Geophys. V. 51. № 2. P. 315–331. 2016. <https://doi.org/10.1007/s40328-015-0128-2>
- Bergin A., Chapman S.C., Gjerloev J.W. AE , DST , and their SuperMAG counterparts: The effect of improved spatial resolution in geomagnetic indices // J. Geophys. Res. – Space. V. 125. № 5. ID e2020JA027828. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA027828>
- Cade III W.B., Sojka J.J., Zhu L. A correlative comparison of the ring current and auroral electrojets using geomagnetic indices // J. Geophys. Res. – Space. V. 100. № 1. P. 97–105. 1995. <https://doi.org/10.1029/94JA02347>
- Crooker N.U., Gringauz K.I. On the low correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity after 1976 // J. Geophys. Res. – Space. V. 98. № 1. P. 59–62. 1993. <https://doi.org/10.1029/92JA01978>
- Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. V. 71. № 3. P. 785–801. 1966. <https://doi.org/10.1029/jz071i003p00785>
- Echer E., Gonzalez W.D., Alves M.V. On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures // Space Weather. V. 4. № 6. ID S06001. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005SW000200>
- Fares Saba M.M., Gonzalez W.D., Cluúa de Gonzalez A.L. Relationships between the AE , ap and Dst indices near solar minimum (1974) and at solar maximum (1979) // Ann. Geophys. V. 15. № 10. P. 1265–1270. 1997. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-1265-x>
- Göker Ü.D. Short- and long-term changes in the neurophysiological status of pilots due to radiation exposure caused by geomagnetic storms // Medical Research Archives. V.11. № 9. 2023. <https://doi.org/10.18103/mra.v11i9.4395>
- Gu Y., Wei H.-L., Boynton R.J., Walker S.N., Balikhin M.A. System identification and data-driven forecasting of AE index and prediction uncertainty analysis using a new cloud-

- NARX model // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 124. № 1. P. 248–263. 2019. <https://doi.org/10.1029/1018JA025957>
- Gulyaeva T.L., Stanislawski I. Magnetosphere associated storms and autonomous storms in the ionosphere–plasmasphere environment // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 72. № 1. P. 90–96. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.10.012>
- Gulyaeva T.L. Interaction of global electron content with the Sun and solar wind during intense geomagnetic storms // *Planet. Space Sci.* 2024. V. 240. ID 105830. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105830>
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Vesnin A.M. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // *Radio Sci.* V. 46. № 3. ID RS0D03. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010RS004590>
- Li Sh., Galas R., Ewert D., Peng J. An empirical model for the ionospheric global electron content storm-time response // *Acta Geophys.* V. 51. № 1. P. 253–269. 2015. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0067>
- Luo B., Li X., Temerin M., Liu S. Prediction of the AU, AL, and AE indices using solar wind parameters // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 118. № 12. P. 7683–7694. 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JA019188>
- Nesse Tysøy H., Partamies N., Babu E.M., Smith-Johnsen C., Salice J.A. The predictive capabilities of the Auroral Electrojet index for medium energy electron precipitation // *Front. Astron. Space Sci.* V. 8. ID 714146. 2021. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.714146>
- Prikryl P., Gillies R.G., Themens D.R., Weygand J.M., Thomas E.G., Chakraborty S. Multi-instrument observations of polar cap patches and traveling ionospheric disturbances generated by solar wind Alfvén waves coupling to the dayside magnetosphere // *Ann. Geophys.* V. 40. № 6. P. 619–639. 2022. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-619-2022>
- Rostoker G. A quantitative relationship between AE and Kp // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 96. № 4. P. 5853–5857. 1991. <https://doi.org/10.1029/90JA02752>
- Samwel S., Miteva R. Correlations between space weather parameters during intense geomagnetic storms: Analytical study // *Adv. Space Res.* V. 72. № 8. P. 3440–3453. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.053>
- Schrijver C.J. Socio-economic hazards and impacts of space weather: The important range between mild and extreme // *Space Weather*. V. 13. № 9. P. 524–528. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015SW001252>
- Tsurutani B.T., Goldstein B.E., Smith E.J., Gonzales W.D., Tang F., Akasofu S.I., Anderson R.R. The interplanetary and solar causes of geomagnetic activity // *Planet. Space Sci.* V. 38. № 1. P. 109–126. 1990. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(90\)90010-N](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90010-N)
- Yamazaki Y., Matzka J., Stolle C., Kervalishvili G., Rauberg J., Bronkalla O., Morschhauser A., Bruinsma S., Shprits Y.Y., Jackson D.R. Geomagnetic activity index Hpo // *Geophys. Res. Lett.* V. 49. № 10. 2022. <https://doi.org/10.1029/2022GL098860>
- Yenén S.D., Gulyaeva T.L., Arian F., Arian O. Association of ionospheric storms and substorms of Global Electron Content with proxy AE index // *Adv. Space Res.* V. 56. № 7. P. 1343–1353. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.025>

Correspondence of Variations of *AE* and *Apo* Indices in 23–24 Solar Cycles

T. L. Gulyaeva^{1, *}

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

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

The auroral electrojet index *AE* is often used in forecasting models as a characteristic of a source of the disturbance propagation in the geosphere from the pole to middle and low latitudes. However, these data are no longer available digitally since January 2020. Instead of the *AE*-index, we suggest using the recently introduced 1 h *Apo*-index, given the close proximity of magnetometer networks for these indices at high latitudes and the availability of the *Apo*-index in real time. To this end their correlation is analyzed during 276 intense storms for 1995–2017. Storm profiles are constructed by method of superposed epoch with zero epoch time $t_0 = 0$ taken at the threshold value of $AE \geq 1000$ nT. A comparison is made of the storm profiles of $AE(t)$, $Apo(t)$, the interplanetary electric field $E(t)$ and the solar wind speed $V_{sw}(t)$ within 72 hours: 24 hours before the storm peak t_0 , and 48 hours after it. A good agreement is obtained between the sets $AE(t)$ and $Apo(t)$ with a correlation coefficient of 0.70. Comparison with the interplanetary parameters testifies on the correlation of $AE(t)$ and $Apo(t)$ with the electric field $E(t)$ but absence of their coupling with the solar wind speed $V_{sw}(t)$. A two-parametric formula is derived for dependence of the auroral electrojet index $AE(t)$ on the interplanetary electric field $E(t)$ and the geomagnetic $Apo(t)$ index for the geomagnetic storm forecasting. In the absence of $E(t)$ data, formulae for the dependence of $AE(t)$ on $Apo(t)$ is introduced for implementation in real time and the inverse dependence of $Apo(t)$ on $AE(t)$ for reconstruction of the 1 h *Apo*-index before 1995. Validation of the proposed models with data for 5 intense storms in 2018 has shown a close resemblance of the model with observation data of the *AE*-index with a high coefficient of determination R^2 ranging from 0.62 to 0.81.

УДК 537.591.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ УРОВНЯ ВОЗМУЩЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО K_p -ИНДЕКСУ

© 2024 г. И. М. Гаджиев¹, *, О. Г. Баринов¹, **, И. Н. Мягкова¹, ***, С. А. Доленко¹, ****

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

*e-mail: ismailgadzhievff@gmail.com

**e-mail: obar@sinp.msu.ru

***e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru

****e-mail: dolenko@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 01.02.2023 г.

После доработки 28.11.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

В работе исследуются возможности использования методов классификации данных при прогнозировании временного ряда геомагнитного K_p -индекса методами машинного обучения. Для классификации категорий K_p -индекса по степени возмущения используются линейная и логистическая регрессия, случайный лес, градиентный бустинг поверх деревьев решений и искусственные нейронные сети различных архитектур. Результаты работы данных методов сравниваются с тривиальным инерционным прогнозом (статистические показатели которого на задачах такого типа всегда высокие) на горизонтах от трех часов до суток с шагом в 3 часа. Исследуются вопрос выбора схемы кросс-валидации для подбора гиперпараметров моделей, способы преодоления несбалансированности категорий, относительная существенность входных признаков, а также зависимость результатов на тестовой выборке (начало 25 цикла солнечной активности) от включения в обучающую выборку данных 23 и 24 либо только 24 цикла. По результатам работы делаются выводы о предпочтительных методах классификации значений индекса K_p по уровню геомагнитного возмущения. Намечены пути дальнейших исследований и возможного улучшения качества классификации, в том числе для решения задачи определения характерных скрытых состояний магнитосферы Земли как динамической системы с целью улучшения качества прогнозирования геомагнитных индексов.

DOI: 10.31857/S0016794024030104, EDN: SMIGMY

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные возмущения — это один из важнейших факторов космической погоды, роль которого будет возрастать с развитием космической отрасли и глобальной цифровой индустрии как на Земле, так и в околоземном космическом пространстве [Daglis, 2001; Cole, 2003; Vassiliadis, 2007; Kudela, 2013; Schrijver et al., 2015; McGranaghan et al., 2021]. На Земле магнитные бури могут вызывать сбои в работе радиосвязи, трубопроводов, линий электропередач и электрических сетей, а также вызывать проблемы со здоровьем человека [Лазутин, 2012; Qiu et al., 2015; Белаховский и др., 2023].

Помимо этого, геомагнитные возмущения опосредованно оказывают заметное влияние на состояние околоземного космического пространства за счет того, что после примерно половины магнитных бурь поток релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли (РПЗ) увеличивается на порядок и более (см., например, [Kataoka et al., 2008; Мягкова и др., 2013]). Резкий рост потоков электронов внешнего РПЗ несет существенную опасность для аппаратуры, находящейся на борту космических аппаратов, поскольку экстремальные потоки электронов могут привести к сбоям в электронных микросхемах [Белов и др., 2004; Романова и др., 2005; Iucci et al., 2005].

Учитывая сказанное выше, задача прогнозирования геомагнитных возмущений имеет очень большое практическое значение.

Геомагнитную активность принято характеризовать специальными индексами. Одним из наиболее распространенных геомагнитных индексов является K_p -индекс, впервые введенный Юлиусом Бартельсом в 1939 году [Bartels et al., 1939; Bartels, 1949].

Как известно, K_p — планетарный индекс, характеризующий глобальную возмущенность магнитного поля Земли в трехчасовом интервале времени. Индекс K_p определяется как среднее значение уровней возмущения двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых на 13 магнитных обсерваториях, расположенных в субавроральной зоне между 48 и 63 градусами северной и южной геомагнитных широт. Для определения K_p -индекса используются стандартизованные значения локальных K -индексов этих 13 обсерваторий.

Также известно, что основной причиной, которая вызывает возмущения в магнитосфере Земли, являются процессы, происходящие на Солнце и в гелиосфере [Akasofu et al., 1974]. Источниками возмущений магнитосферы Земли могут служить как высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ) из корональных дыр, так и корональные выбросы массы (КВМ), сопровождающие солнечные вспышки и достигающие орбиты Земли (например, [Ермолаев и др., 2009]). ВСП СВ играют основную роль в периоды минимумов солнечной активности, когда нет ни вспышек, ни связанных с ними мощных КВМ. Существование связи интенсивности геомагнитных возмущений (а, следовательно, и амплитуды K_p -индекса) с параметрами солнечного ветра (СВ), в частности с его скоростью, а также с параметрами межпланетного магнитного поля (ММП), известна достаточно давно [Nishida, 1972]. Детально данная связь исследовалась в работах [Elliott et al., 2013; Voroyev et al., 2020] и др.

K_p -индекс имеет самую долговременную историю наблюдения после aa -индекса (первый доступен с 1932, а второй с 1868 г.). Это дает возможность исследовать связь геомагнитной активности с процессами в межпланетном пространстве, солнечном ветре и магнитосфере Земли и прогнозировать K_p на основе этой связи (например, [Wang et al., 2015]). Также наличие столь долговременной истории измерений K_p -индекса позволяет предположить, что другим достаточно перспективным подходом к его прогнозированию является применение методов машинного обучения, в том числе искусственных нейронных

сетей [Boberg et al., 2000; Bala et al., 2012; Ji, E. Y. et al., 2013; Tan et al., 2018].

Авторами данной работы — сотрудниками лаборатории адаптивных методов обработки данных НИИЯФ МГУ — также достаточно давно ведутся работы по прогнозированию геомагнитных возмущений, а именно, амплитуды Dst -индекса, методами машинного обучения. Было показано, что лучшее качество прогноза Dst -индекса достигается при построении нейросетевой модели, использующей в качестве входных данных как историю Dst -индекса, так и параметры СВ (скорость) и ММП (компонента B_z) [Dolenko et al., 2005]. В относительно недавних работах лаборатории [Myagkova et al., 2017; Ефиторов и др., 2018; Мягкова и др., 2021] каждый пример также содержал среднечасовые значения нескольких основных параметров СВ и ММП и самого прогнозируемого параметра (в данном случае индекса Dst) за последние 24 ч, что позволило улучшить качество прогноза. Использование подобного подхода стало возможным только в последнее время, когда накопились достаточно длинные однородные временные ряды спутниковых измерений параметров СВ и ММП, полученные в экспериментах на космическом аппарате (КА) АСЕ (подробнее о входных данных см. ниже). Но поскольку в большинстве прикладных моделей, касающихся явлений космической погоды, требуется прогноз не Dst , а K_p -индекса, было принято решение распространить имеющиеся наработки на задачу прогнозирования K_p -индекса.

В настоящей работе исследуется задача классификации — прогнозирования категорий геомагнитных возмущений по уровню индекса K_p на разных горизонтах. Выбранные категории условно соответствуют состояниям “невозмущенная магнитосфера” (K_p от 0 до 2-), “слабые геомагнитные возмущения” (K_p от 2 до 3+) и “умеренные и сильные геомагнитные возмущения” (K_p от 4-).

В работе [Gadzhiev I. et al., 2023] исследовалась возможность классификации категорий индекса K_p с другим разбиением по классам, что привело к более выраженной несбалансированности классов — в результате качество работы моделей на последних горизонтах для наиболее важных для прогнозирования небольших классов получалось неудовлетворительным из-за недостатка данных для обучения. Поэтому было принято решение использовать указанные выше границы категорий.

Для классификации используются предыдущие значения K_p и двенадцати других физических величин, о которых будет подробно рассказано в следующем разделе. Классификация ин-

декса K_p выполняется на восьми горизонтах с интервалом три часа (то есть первый прогноз категории выполняется на три часа вперед, а последний на сутки вперед). Очевидно, что сложность задачи классификации увеличивается с увеличением горизонта.

Таким образом, цель настоящей работы состоит в выработке метода построения модели машинного обучения, наилучшим образом выполняющей поставленную задачу классификации состояний магнитосферы Земли по категориям геомагнитной возмущенности, определяемым по уровню индекса K_p . Для достижения этой цели решаются следующие задачи: сравнение результатов различных методов машинного обучения; исследование возможности использования специальных методик для преодоления несбалансированности категорий и выбора оптимальных гиперпараметров моделей; сравнение результатов, получаемых при включении в обучающую выборку данных 23 и 24 циклов солнечной активности либо только 24 цикла; анализ входных признаков, оказавшихся наиболее существенными с точки зрения метода-победителя.

2. ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ K_p -ИНДЕКСА

Магнитосфера Земли представляет собой сложную динамическую систему, состояние которой зависит как от внешнего воздействия (прежде всего со стороны СВ), так и от собственной предыстории. По этой причине в число входных признаков при использовании методов машинного обучения в качестве индикаторов внешнего воздействия включают обычно параметры СВ и ММП. Требование алгоритмов машинного обучения к стационарности или хотя бы квазистационарности используемых временных рядов приводит к необходимости использования данных космических аппаратов, находящихся на гало-орбитах вокруг точки Лагранжа $L1$ между Солнцем и Землей, влиянием изменения положения которых на результаты измерений в первом приближении можно пренебречь. Помимо этого, время полета солнечного ветра от точки $L1$ до Земли составляет порядка 40 минут, что позволяет повысить качество прогнозирования при небольших горизонтах прогноза.

Ключевым условием эффективного поступления энергии СВ в магнитосферу Земли является отрицательное значение B_z -компоненты ММП (в системе GSM) [Калегаев В.В. и др.]. Существенное влияние на возможное возникновение геомагнитных возмущений оказывает также значение общей амплитуды ММП. B_y - и в осо-

бенности B_x -компонента ММП практически не оказывают влияния на возмущение магнитосферы Земли. Как правило, авторы настоящей статьи включают значения этих признаков в число входных признаков создаваемых моделей для того, чтобы проверить способность используемых методов отбора и/или оценки существенности входных признаков обнаруживать это.

Ключевыми параметрами СВ, оказывающими влияние на состояние магнитосферы Земли, являются скорость СВ и плотность протонов в СВ. Третьим по значимости среди параметров СВ принято считать его температуру, которая, впрочем, имеет высокую корреляцию со скоростью СВ. По этой причине в данной работе авторами было принято решение среди параметров СВ ограничиться скоростью и плотностью.

Различные используемые в литературе геомагнитные индексы, хотя и все характеризуют возмущение магнитосферы Земли, несут в себе несколько отличную информацию, и по этой причине имеют разные области применения. Планетарный индекс K_p , как указано выше, вычисляется на основе измерений в субавроральной зоне; прогноз именно этого индекса является наиболее востребованным космической отраслью и другими практическими потребителями геофизической информации.

В то же время, для физических и геофизических исследований используется экваториальный индекс Dst , вычисляемый на основе измерений в приэкваториальной зоне и характеризующий динамику кольцевого тока. Специфика и динамика этого индекса таковы, что использование его значения в качестве входного признака при прогнозировании значения индекса K_p позволяет повысить качество прогноза. По этой причине он используется и в настоящей работе.

Иные признаки за пределами этого базового состава, хотя и используются в некоторых работах, на данный момент не стали общепринятыми. Из их числа авторы обычно используют гармонические функции времени с суточным и годовым периодами, позволяющие методу машинного обучения учесть корреляции изменений геомагнитных индексов с вращением Земли вокруг Солнца и вокруг своей оси (разумеется, подобные корреляции не обязаны иметь причинно-следственный характер).

В работе используются данные о параметрах СВ и ММП с КА ACE, [ACE Browse Hourly Averages 1997-2023], полученные при помощи приборов SWEPAM (*Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor*) и MAG, а также значения геомаг-

нитных индексов с сайта Мирового Центра данных в Киото [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, 1997-2023].

Приведем полный список используемых в данной работе переменных:

- 1) данные о величине ММП в системе единиц GSM — покомпонентно (B_x , B_y , B_z) и $|B|$ (модуль ММП), нТл;
- 2) данные о параметрах плазмы СВ: скорость СВ (v), км/с и плотность протонов (np), см⁻³;
- 3) данные о значении прогнозируемого индекса K_p ;
- 4) данные о значении геомагнитного индекса Dst .

Все перечисленные переменные используются в виде временных рядов с шагом в 3 часа.

5) Для учета изменений индекса K_p , связанных с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, на вход алгоритмов машинного обучения подается также информация о часе суток и часе года, представленная в виде значений синуса и косинуса с суточным ($hourSin$, $hourCos$) и годовым ($daySin$, $dayCos$) периодами.

Для обеспечения возможности учета истории изменения параметров в работе исследуется возможность использования т.н. погружения временных рядов, т.е. помимо текущих значений параметров, алгоритм машинного обучения принимает на вход данные о значениях указанных параметров за последние сутки с шагом в 3 часа.

3. ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ГРАНИЦ КАТЕГОРИЙ

Как правило, при рассмотрении задачи прогнозирования значений того или иного геомагнитного индекса используется регрессионная постановка задачи, в рамках которой прогнозируется конкретное значение индекса в тот или иной момент времени, а оценка качества решения задачи основана на той или иной мере погрешности прогноза, т.е. отличия спрогнозированного значения от реального. Поэтому постановка задачи прогнозирования уровня возмущенности геомагнитного поля, т.е. задачи классификации по определению попадания значения K_p -индекса в тот или иной диапазон, нуждается в дополнительном разъяснении.

Одно из объяснений состоит в том, что наибольший интерес представляет прогнозирование наступления события, представляющего собой магнитную бурю значительной амплитуды, ха-

рактеризующуюся появлением значений индекса K_p , превышающего определенный порог. В простейшем варианте такая постановка представляет собой задачу бинарной классификации. Несколько более сложный вариант состоит в рассмотрении нескольких категорий (уровней возмущенности геомагнитного поля) — например, в настоящей работе их три, две из которых соответствуют геомагнитным возмущениям разной интенсивности.

Однако есть и еще одна мотивация. Достаточно часто сложные динамические системы характеризуются наличием нескольких характерных скрытых состояний (ХСС), каждое из которых характеризуется своей определенной динамикой; при этом значительную долю времени рассмотрения система проводит в одном из ХСС, а переходы между ними совершаются сравнительно быстро. В этом случае имеет смысл разработать для каждого ХСС свою модель прогнозирования, которая для данного ХСС может оказаться более точной, чем общая модель, которая пытается описать динамику системы (осуществлять прогнозирование) на протяжении всего времени рассмотрения. Однако в этом случае возникают две дополнительные (по отношению к собственно осуществлению прогнозирования) проблемы: а) определение рассматриваемых ХСС, т.е. разделение фазового пространства системы на несколько областей, каждая из которых соответствует одному из ХСС, и б) решение задачи классификации по определению нахождения системы в данный момент времени в области конкретного ХСС. После того, как эти две проблемы решены, остается решить регрессионную задачу по построению своей прогнозирующей модели для каждого ХСС, что обычно делается теми же методами, что и при чисто регрессионной постановке задачи прогнозирования во всем рассматриваемом интервале времени.

Ясно, что успешность подхода, связанного с рассмотрением ХСС, напрямую связана с качеством решения задачи классификации, которое, в свою очередь, напрямую связано с адекватностью алгоритмов (правил) выделения ХСС. В данной работе мы рассматриваем самый простой вариант, который может не обязательно оказаться оптимальным — выделение ХСС только по уровню индекса K_p . При этом правильность установок границ между категориями является критически важной.

В своих предыдущих работах авторы использовали в качестве тренировочного набора данные, начиная с ноября 1997 года, то есть с начала работы КА ACE. Но проведенный анализ пока-

зывает, что уровень геомагнитной возмущенности в последнем из завершенных циклов солнечной активности (СА) – 24-м, существенно снизился. Особенно хорошо это заметно на экстремальных магнитных бурях с $Kp = 9$ – последняя такая буря наблюдалась в 2003 году, то есть почти двадцать лет назад. На рис. 1 представлено распределение Kp -индекса по его величине с 21.10.1997 г. по 07.01.2023 г., а также отдельно для 23, 24 и части

25 цикла СА. Из приведенных гистограмм видно, что число интервалов с $Kp = 5$ составляет 0.83% для полного массива данных, но если смотреть отдельно 23 и 24 цикл СА, то получается 1.2% для $Kp = 5$ в 23 цикле и 0.57% в 24 цикле. Для значений Kp , соответствующих невозмущенным периодам, ситуация обратная – например, для $Kp = 1$ – 10.25% для всего набора данных, 8.97% – для 23 цикла СА, 11.23% – для 24 цикла СА.

971021-230107 Все данные			971021-081231 23 цикл			090101-191231 24 цикл			200101-230107 25 цикл		
Среднее	17.76		Среднее	20.62		Среднее	15.51		Среднее	15.31	
СтОткл	13.48		СтОткл	14.34		СтОткл	12.42		СтОткл	11.79	
Медиана	17		Медиана	20		Медиана	13		Медиана	13	
Мин	0		Мин	0		Мин	0		Мин	0	
Макс	90		Макс	90		Макс	83		Макс	77	
Kp	Примеров	Доля	Kp	Примеров	Доля	Kp	Примеров	Доля	Kp	Примеров	Доля
0	5360	7.27%	0	1699	5.19%	0	2959	9.21%	0	702	7.96%
0+	7982	10.83%	0+	2646	8.09%	0+	4136	12.87%	0+	1200	13.60%
1-	8378	11.37%	1-	3068	9.38%	1-	4152	12.92%	1-	1158	13.12%
1	7550	10.25%	1	2936	8.97%	1	3618	11.26%	1	996	11.29%
1+	6877	9.33%	1+	2883	8.81%	1+	3105	9.66%	1+	889	10.07%
2-	6408	8.70%	2-	2783	8.51%	2-	2847	8.86%	2-	778	8.82%
2	6021	8.17%	2	2778	8.49%	2	2538	7.90%	2	705	7.99%
2+	5260	7.14%	2+	2539	7.76%	2+	2106	6.55%	2+	615	6.97%
3-	4495	6.10%	3-	2298	7.02%	3-	1730	5.38%	3-	467	5.29%
3	3921	5.32%	3	2108	6.44%	3	1388	4.32%	3	425	4.82%
3+	3116	4.23%	3+	1849	5.65%	3+	989	3.08%	3+	278	3.15%
4-	2421	3.29%	4-	1390	4.25%	4-	842	2.62%	4-	189	2.14%
4	1794	2.43%	4	1101	3.36%	4	515	1.60%	4	178	2.02%
4+	1229	1.67%	4+	774	2.37%	4+	371	1.15%	4+	84	0.95%
5-	929	1.26%	5-	558	1.71%	5-	294	0.91%	5-	77	0.87%
5	611	0.83%	5	393	1.20%	5	182	0.57%	5	36	0.41%
5+	404	0.55%	5+	252	0.77%	5+	135	0.42%	5+	17	0.19%
6-	301	0.41%	6-	190	0.58%	6-	96	0.30%	6-	15	0.17%
6	198	0.27%	6	152	0.46%	6	42	0.13%	6	4	0.05%
6+	132	0.18%	6+	76	0.23%	6+	51	0.16%	6+	5	0.06%
7-	81	0.11%	7-	63	0.19%	7-	15	0.05%	7-	3	0.03%
7	57	0.08%	7	48	0.15%	7	7	0.02%	7	2	0.02%
7+	52	0.07%	7+	46	0.14%	7+	6	0.02%	7+	0	0.00%
8-	41	0.06%	8-	32	0.10%	8-	8	0.02%	8-	1	0.01%
8	17	0.02%	8	15	0.05%	8	2	0.01%	8	0	0.00%
8+	22	0.03%	8+	20	0.06%	8+	2	0.01%	8+	0	0.00%
9-	19	0.03%	9-	19	0.06%	9-	0	0.00%	9-	0	0.00%
9	4	0.01%	9	4	0.01%	9	0	0.00%	9	0	0.00%
Всего	73680		Всего	32720		Всего	32136		Всего	8824	
0-2	42555	57.76%	0-2	16015	48.95%	0-2	20817	64.78%	0-2	5723	64.86%
2-3+	22813	30.96%	2-3+	11572	35.37%	2-3+	8751	27.23%	2-3+	2490	28.22%
4-9	8312	11.28%	4-9	5133	15.69%	4-9	2568	7.99%	4-9	611	6.92%

Рис. 1. Гистограммы индекса Kp для разных циклов солнечной активности.

Из четвертого столбца рис. 1, где приведены распределения для текущего, 25 цикла СА, можно увидеть, что для упомянутых выше значений Kp доли составляют 0.41% и 1.29% соответственно, и все распределение в целом повторяет распределение 24-го цикла. Поэтому нами было принято решение создать два набора классификационных моделей: один построен на данных 23 и 24 циклов СА, другой — на данных только 24 цикла.

Диаграммы, приведенные на рис. 1, объясняют выбор границ для “спокойного”, “слабо возмущенного” и “возмущенного” периода. Если, как это было принято в 23 цикле, считать буревыми значения Kp , начиная с 5, то в текущем цикле СА мы получим всего 15 бурь. Поэтому были установлены следующие границы “категорий” индекса Kp — “спокойная магнитосфера” — от 0 до 2-, “слабо возмущенная магнитосфера” — от 2 до 3+, и “возмущенная магнитосфера” — 4- и выше.

4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КЛАССИФИКАЦИИ

Для построения моделей первого типа в качестве тренировочного набора был использован интервал значений всех переменных с 1997 по 2019 годы.

В качестве тестового набора для оценки качества работы всех моделей был использован интервал значений всех переменных (в том числе и индекса Kp) за 2020–2022 гг. На рис. 2 изображена динамика индекса Kp для моделей первого типа с разбиением на тренировочный и тестовый наборы.

Для построения моделей второго типа в качестве тренировочного набора был использован интервал значений всех переменных с 2009 по 2019 годы.

Для оценки качества построенных моделей для каждого класса была выбрана метрика F_1 , которая вычисляется по формуле:

$$F_1 = 2 (Precision \times Recall) / (Precision + Recall),$$

где *Precision* (точность) — доля примеров, для которых модель правильно выбрала данную катего-

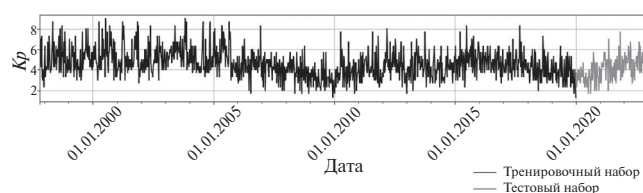


Рис. 2. Недельные максимумы индекса Kp с 1997 года с разбиением на тренировочный и тестовый наборы.

рию, от всех примеров, для которых модель выбрала данную категорию; *Recall* (полнота) — доля примеров, распознанных моделью как пример данной категории, от всех примеров данной категории.

Для оценки результатов мы используем точность и полноту отдельно для каждого класса (категории). Однако в качестве финальной метрики качества классификации использовалась усредненная по всем классам метрика F_1 .

Отдельным вопросом является правильный выбор весов при усреднении метрики качества по классам — веса должны соответствовать тому, насколько в решаемой задаче важно качество работы модели при классификации каждой отдельной категории (иными словами, насколько велики риски плохого качества классификации каждой категории). В силу достаточной общности задачи прогнозирования, исследуемой в данной работе, веса выбираются равными, и вопрос далее не рассматривается. В дальнейшем планируется оптимизация весов в сторону повышения весов для классов (категорий), соответствующих более сильному возмущению магнитосферы.

5. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В настоящей работе тестировались различные модели классификации для предсказания категории геомагнитного индекса Kp на двух уровнях погружения — 0 (на вход подается вектор признаков в предыдущий момент времени) и 8 (соответствует 24 часам, на вход подается вектор признаков с погружением за все предыдущие 8 отсчетов). Шаг временного ряда во всех случаях составляет 3 часа.

Перечислим методы, использованные для решения задачи классификации категории геомагнитного индекса Kp :

1) Две различных реализации алгоритма градиентного бустинга (GB) [Friedman, J. H., 2001] (*CatBoost* [Prokhorenkova, L., et al., 2018], *LightGBM* [Ke G., et al., 2017]), реализации которых могут существенно различаться в силу используемых эвристик, различных приближений, а также большого количества гиперпараметров, для которых в этих реализациях устанавливаются различные значения по умолчанию.

2) Случайный лес (RF) [Breiman, L., 2001].

3) Логистическая регрессия (LR) [Cox, D.R., 1958].

4) Линейная регрессия с регуляризацией: L1 (*Lasso*), L2 (*Ridge*) [Hoerl, A. E., Kennard, R. W., 1970] и L1+L2 (*Elastic Net*).

5) Многослойный персептрон (*Perceptron*) [Rumelhart, D.E., et al., 1986].

6) Дополнительно для уровня погружения 8 тестируются две рекуррентные нейронные сети — GRU [Cho, K., et al., 2014] и LSTM [Hochreiter S., Schmidhuber J., 1997]. Для GRU и LSTM на вход подавалась последовательность из векторов длиной 8, сформированная скользящим окном.

7) Тривиальная модель (ТМ) — инерционный прогноз, для которого прогнозируемое значение категории индекса Kp равно последнему известному значению.

В скобках даны кодовые обозначения моделей, которые будут использованы далее на рисунках. Для обучения всех нейронных сетей использовался метод оптимизации *Adam* [Kingma D.P., Ba J., 2015] и ранняя остановка по валидационному набору данных.

Для преодоления основной проблемы задачи — несбалансированности данных использована методика выравнивания классов-меньшинств за счет генерации синтетических примеров — SMOTE [Chawla N.V., et al., 2002]. Все перечисленные модели (кроме персептрона, GRU и LSTM) протестированы с использованием SMOTE и без для оценки применимости методики в задаче.

Для всех моделей (в конфигурациях со SMOTE и без) также был протестирован специальная методика кросс-валидации для временных рядов в целях выбора оптимальных гиперпараметров каждой модели (TSS). Осуществлялось разбиение тренировочного набора на блоки для кросс-валидации, после чего модель с лучшими параметрами обучалась заново на полном тренировочном наборе. Размер всех блоков при кросс-валидации был выбран одинаковым, для того чтобы значения метрики качества классификации можно было корректно усреднять по всем наборам (так как при изменении количества данных качество классификации в большинстве случаев должно изменяться). Общая схема кросс-валидации изображена на рис. 3.

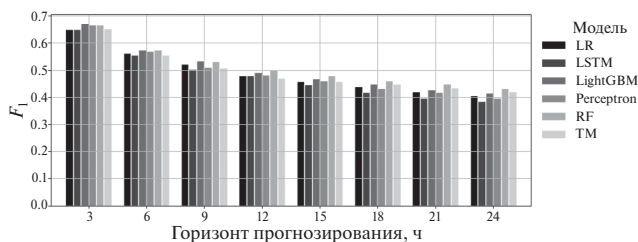


Рис. 3. Общая схема кросс-валидации.

Количество разбиений при кросс-валидации $K = 5$.

Перечисленные модели протестированы со значениями гиперпараметров по умолчанию и после кросс-валидации.

Проверка применимости выбранной методики кросс-валидации и методики *SMOTE* представляет отдельный интерес, так как ранее не удалось подтвердить эффективность этих методов при ином разбиении индекса Kp на категории с более выраженной несбалансированностью классов [Gadzhiev I. et al, 2023].

Вывод об эффективности работы каждой из моделей строится на основании сравнения качества классификации по усредненной метрике F_1 с другими моделями и с тривиальной моделью.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, для каждого из рассматриваемых методов машинного обучения было построено по 8 моделей: с использованием и без использования SMOTE, с использованием и без использования подбора оптимальных параметров на основе кросс-валидации для временных рядов, с использованием и без использования погружения временного ряда на 8 отсчетов (24 часа). Следует также отметить, что для градиентного бустинга и для рекуррентных нейронных сетей использовались по две различных реализации. Для каждого метода мы приведем только наилучший результат. Отметим также, что все реализации линейной регрессии показали устойчиво более низкие результаты, чем логистическая регрессия, в связи с чем мы их не приводим.

На рис. 4 изображена метрика качества классификации F_1 для всех моделей первого типа (обученных на данных 23 и 24 циклов) на всех горизонтах. Последний столбец (ТМ) — метрика качества для тривиальной модели. Видно, что наилучшей модели превзойти тривиальную модель удастся на всех горизонтах.

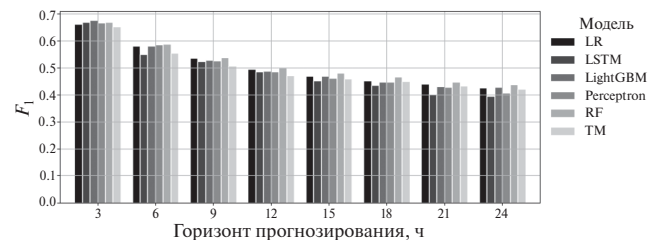


Рис. 4. Метрика F_1 на разных горизонтах для моделей первого типа.

Использование методики SMOTE (выравнивание представительности категорий) и подбор гиперпараметров при помощи кросс-валидации временных рядов дали положительный эффект на всех горизонтах. При этом на первом горизонте (3 часа) лучшие результаты показал градиентный бустинг в реализации *LightGBM* ($F_1 = 0.677$), на остальных горизонтах — случайный лес (метрика F_1 монотонно убывает от 0.589 для горизонта в 6 часов, 0.540 для горизонта в 9 часов и 0.500 для горизонта в 12 часов до 0.438 для горизонта в 24 часа).

Отметим, что использование погружения не дало прироста по качеству работы моделей. Среди возможных причин, почему качество могло не улучшиться, можно отметить следующие:

1) Слишком большая размерность входных данных, что особенно существенно для перцептронов.

2) Характерное время изменения некоторых переменных (например, B_z) составляет меньше трех часов, что не может быть учтено при шаге временного ряда в 3 часа.

На следующих этапах исследования предполагается проверить последнее предположение путем использования при погружении для всех параметров, кроме самого индекса Kp , временных рядов с шагом в один час.

На рис. 5 представлены результаты, аналогичные результатам рис. 4, однако полученные для моделей второго типа, обученных только на данных 24 цикла СА. Для большинства горизонтов результаты моделей второго типа оказались несколько хуже, чем результаты моделей первого типа: метрика F_1 от 0.672 при горизонте в 3 часа и 0.576 при горизонте в 6 часов до 0.432 для горизонта в 24 часа.

В то же время, для моделей второго типа справедливы два основных вывода, сделанных для моделей первого типа. Совместное использование методики SMOTE и выбор гиперпараметров моделей с помощью кросс-валидации временных

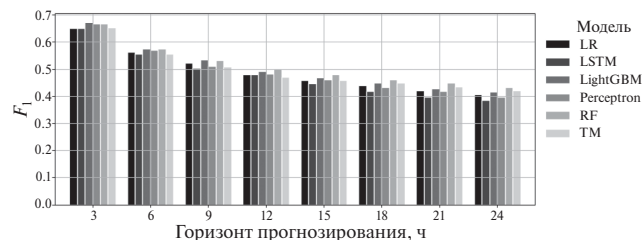


Рис. 5. Метрика F_1 на разных горизонтах для моделей второго типа.

рядов позволяет превзойти результаты тривиальной модели на всех горизонтах. При этом, использование погружения не дает прироста по качеству работы моделей.

Более интересными являются выводы, которые можно сделать при сравнении лучших результатов, полученных для моделей первого и второго типа (рис. 6). Видно, что для всех горизонтов прогнозирования модели второго типа уступили моделям первого типа. Это означает, что при переходе от моделей первого типа к моделям второго типа негативный эффект от двукратного уменьшения размера обучающей выборки оказался более существенным, чем позитивный эффект от приближения распределения данных в обучающей выборке к распределению данных в тестовом наборе и от устранения части данных, которые могут отличаться от данных тестового набора по динамике изменения основных признаков (если предположить, что магнитосфера Земли, представляющая собой сложную динамическую систему, во время разных циклов СА находится в разных характерных состояниях).

Стоит отметить, что этот результат согласуется с результатами, полученными авторами в их предыдущих работах [Dolenko et al., 2014; Доленко и др., 2016; Myagkova et al., 2016]. Предположение о том, что разбиение полного массива данных на части с построением отдельной модели для каждой из частей может привести к улучшению результатов прогнозирования по сравнению с единой моделью, построенной на полном массиве данных, проверялось несколькими способами: при разбиении массива данных по наличию или отсутствию геомагнитного возмущения, при его разбиении путем кластеризации, а также при его разбиении по уровню СА. Во всех случаях оказывалось, что единая модель, обученная на полном массиве данных с максимально возможным количеством примеров, показывала наилучшие ре-

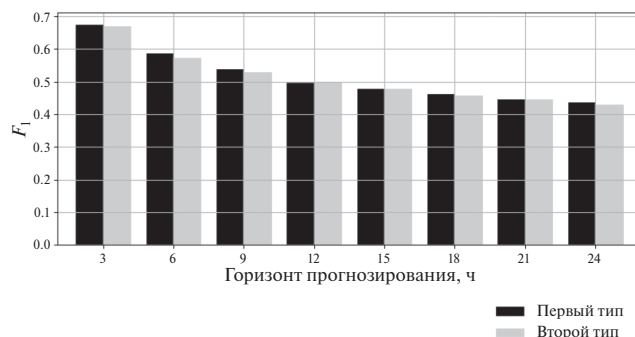


Рис. 6. Сравнение лучших результатов моделей первого и второго типа.

зультаты. В этом смысле результат, полученный в данной работе, согласуется с нашими предыдущими исследованиями. Однако исследования в этом направлении следует продолжить, прежде всего в направлении оптимизации методов выделения характерных скрытых состояний.

На рис. 7 представлена точность, а на рис. 8 — полнота модели-победителя первого и второго типа для каждого горизонта в разрезе по категориям. Видно, что при монотонном убывании обеих метрик для каждой из категорий с увеличением горизонта прогнозирования наблюдается также вполне ожидаемый эффект, связанный с разной представительностью категорий. Несмотря на использование методики SMOTE для частичного выравнивания представительности, точность и полнота для категорий 2 и 3, соответствующих возмущенной магнитосфере, оказываются кратно

ниже соответствующих показателей для категории 1, представительность которой намного выше.

При этом низкие значения точности (рис. 7) означают повышенное количество ошибок 1 рода (“ложных тревог”, т.е. ситуаций, когда модель ошибочно отнесла пример к категории, соответствующей возбужденному состоянию магнитосферы). Более критичными являются низкие значения полноты (рис. 8) — повышенное количество ошибок 2 рода (“пропусков цели”, т.е. ситуаций, когда модель не смогла правильно идентифицировать принадлежность примера к категории, соответствующей возбужденному состоянию магнитосферы). Наблюдаемая картина означает, что следует изменить относительные веса точности и полноты в используемой F -мере, т.е. перейти от метрики F_1 , например, к метрике F_2 — как для оценки качества модели, так и для

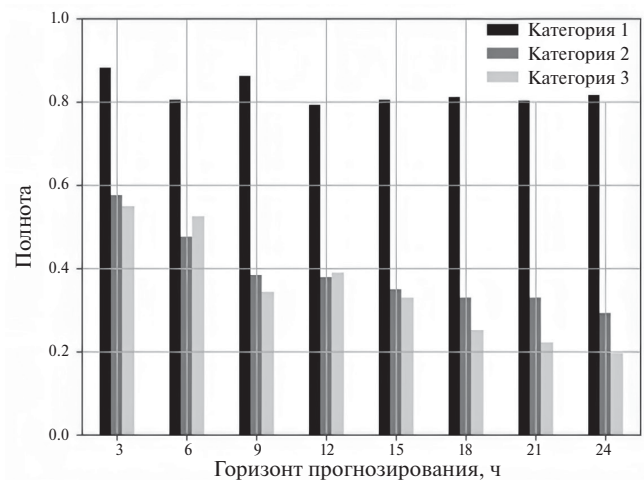
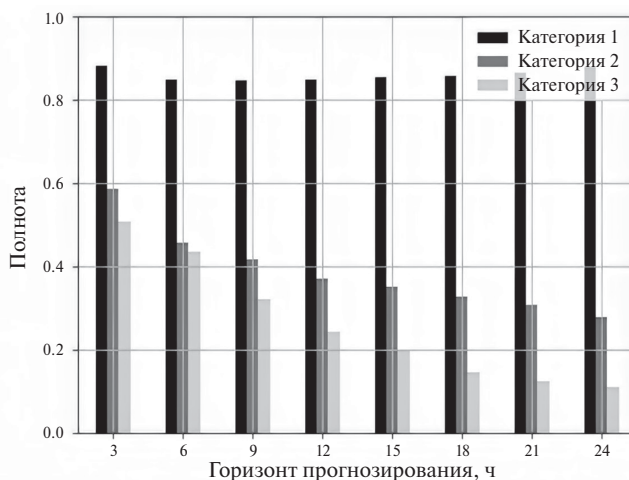
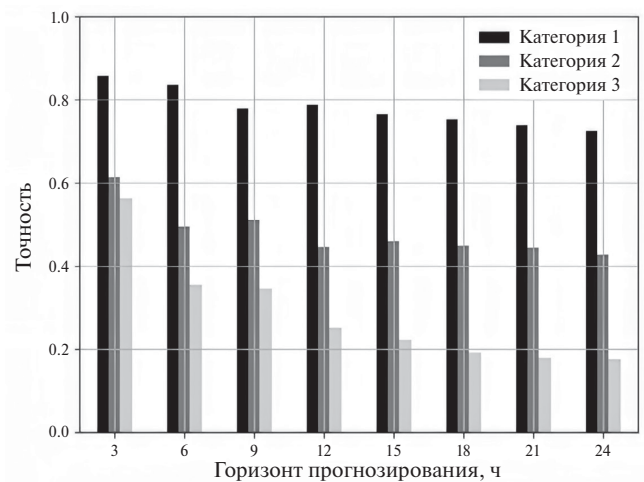
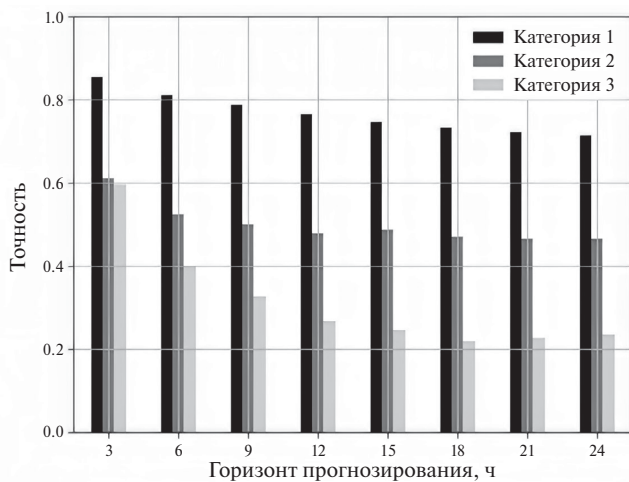


Рис. 7. Точность по категориям для моделей первого типа (слева) и второго типа (справа).

Рис. 8. Полнота по категориям для моделей первого типа (слева) и второго типа (справа).

отбора и сравнения моделей. Авторы планируют сделать это в своей следующей работе.

Обращает на себя внимание существенное повышение значений полноты для категории 2, соответствующей возмущенной магнитосфере, при переходе от моделей первого типа к моделям второго типа, обученным только на данных 24-го солнечного цикла (за счет некоторого ухудшения этого показателя для категории 1 — невозмущенная магнитосфера, а также за счет некоторого ухудшения точности). Результаты моделей второго типа по показателю полноты на всех горизонтах превышают результаты тривиальной модели, что уже неплохо по той причине, что переходы между категориями случаются сравнительно редко, и поэтому результаты тривиальной модели оказываются достаточно высокими. Все это может свидетельствовать о различиях во взаимосвязях между процессами на Солнце, в солнечном ветре и магнитосфере Земли в “сильном” 23-м цикле СА, с одной стороны, и в “слабых” 24-м и 25-м циклах, с другой. Из этого следует, что необходимо более тщательно подходить к выбору временного диапазона данных, на котором строятся модели.

С точки зрения анализа взаимосвязей между параметрами СВ и ММП, значением Dst -индекса и вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, с одной стороны, и возмущением магнитосферы в терминах Kp -индекса, с другой стороны, представляет интерес сравнение относительных значений значимости (существенности) входных признаков задачи, получаемых из модели-победителя.

На рис. 9 показана относительная значимость входных признаков для лучшей модели с горизонтом прогнозирования 3 часа (градиентный бустинг в реализации *LightGBM* с использованием

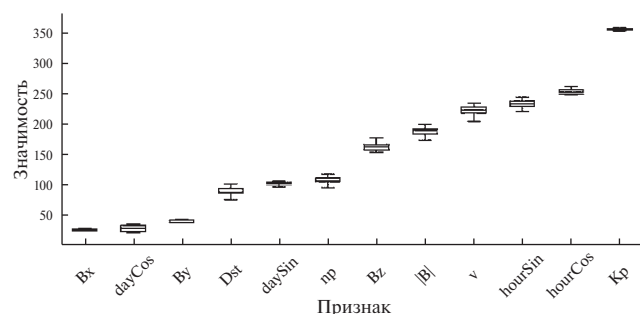


Рис. 9. Относительная значимость входных признаков для лучшей модели с горизонтом прогнозирования 3 часа (градиентный бустинг в реализации *LightGBM* с использованием SMOTE и подбора параметров на основе кросс-валидации).

SMOTE и подбора параметров на основе кросс-валидации). Распределения значимости, показанные на рис. 9 в виде “ящиков с усами”, получены из анализа полного набора деревьев в методе градиентного бустинга. (Средняя линия “ящика” соответствует медианному значению значимости, нижняя и верхняя границы “ящика” — 1-му и 3-му квартилям, краевые засечки нижнего и верхнего “усов” — 5-му и 95-му процентиллям.)

Как видно из рис. 9, максимально значимым является сам индекс Kp , что полностью ожидаемо. Далее по значимости идут две фазы ($\cos$ и $\sin$) гармонической функции, соответствующей часу суток, что является не настолько очевидным, но отражает влияние на планетарный индекс распределения наземных станций, которые используются для его определения, по земному шару. Далее по значимости следуют скорость СВ, а также амплитуда и Bz -компонента ММП, что также является объяснимым с точки зрения физики — к Земле приходит корональный выброс массы или высокоскоростной поток СВ, возрастают скорость и плотность, а в случае южного направления ММП развивается геомагнитное возмущение. Относительно низкое (шестое по списку) место Bz может быть объяснено тем, что в данном исследовании используется трехчасовое усреднение временных рядов, а южное (отрицательное) Bz , как правило, сохраняется в течение существенно меньшего времени. Низкие величины значимости для компонент ММП Bx и By полностью согласуются с физическими представлениями и подтверждают правильность методики проведения настоящего исследования.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были протестированы различные методы классификации при прогнозировании категории геомагнитного индекса Kp по предыдущим значениям самого индекса Kp , параметров СВ и ММП и амплитуды Dst -индекса, а также по значениям времени и даты прогнозирования. Было показано, что методика кросс-валидации временных рядов и методика SMOTE для преодоления несбалансированности классов позволяют превзойти качество предсказания тривиальной инерционной модели (значение прогноза равно предыдущему известному значению категории индекса Kp) на горизонте до 24 часов (с шагом 3 часа), что показывает эффективность применения данных методик в задаче классификации геомагнитного индекса Kp при использовании выбранного разбиения индекса на категории. Модели градиентного бустинга (реализация *LightGBM*) и случайного леса с использованием

этих методик показывают лучшие результаты по сравнению со всеми остальными моделями.

Было показано, что использование погружения (подачи на вход модели предыдущих данных) на 24 часа не дает прироста качества работы моделей. Причиной этому может быть слишком большая размерность входных данных; следовательно, одним из направлений дальнейших исследований должно являться использование отбора признаков. Кроме того, следует протестировать использование часового шага при погружении некоторых переменных, для того чтобы точнее учесть характерное время их изменения.

Ограничение набора входных данных только данными 24 цикла СА, более близкого по статистическим показателям (доли категорий по количеству примеров, условные среднее и медианное значения индекса K_p) к тестовому набору данных (начало 25 цикла СА, 2020–2022 гг.) по сравнению с полным набором и тем более 23 циклом СА, не привело к улучшению результатов прогнозирования в терминах метрики F_1 , использованной в данной работе как основная метрика для оценки качества модели. Однако при более детальном рассмотрении результатов в терминах точности и полноты оказалось, что при ограничении набора входных данных 24-м циклом солнечной активности полнота модели существенно увеличивается на всех горизонтах, превышая полноту тривиальной модели. Это может свидетельствовать о том, что различие внешних проявлений СА в 23 и 24 циклах означает изменение некоторых закономерностей и взаимосвязей между процессами на Солнце, в солнечном ветре и магнитосфере Земли.

В целом низкие значения полноты моделей-победителей на всех горизонтах прогнозирования свидетельствуют о необходимости перехода к F -метрике с иными весами точности и полноты по сравнению с метрикой F_1 , использованной в настоящей работе.

Результаты анализа относительной значимости входных признаков для лучшей модели с горизонтом прогнозирования 3 часа (градиентный бустинг в реализации *LightGBM* с использованием SMOTE и подбора параметров на основе кросс-валидации) согласуются с физическими представлениями о существенности параметров СВ и ММП и других переменных для прогнозирования геомагнитных индексов. Была также обнаружена существенная взаимосвязь измеряемого уровня геомагнитного возмущения (измеряемого индекса K_p) с вращением Земли вокруг своей оси. Учитывая то обстоятельство, что при получении оценок значимости входных призна-

ков задачи не использовалась какая-либо априорная информация об их физическом смысле, их совпадение с физическими представлениями свидетельствует об адекватности построенных моделей.

В контексте исследования подхода, связанного с выделением характерных скрытых состояний (ХСС) магнитосферы Земли как динамической системы и отдельным прогнозированием значения геомагнитного индекса в рамках каждого состояния, в ходе дальнейших исследований следует сравнить между собой качество прогнозирования значений индекса K_p методами машинного обучения следующими способами: а) при построении единой прогнозирующей модели без выделения ХСС; б) при построении отдельной прогнозирующей модели в рамках каждой целевой категории, определяемой текущим значением индекса K_p так, как это было сделано в настоящей работе; в) при построении отдельной прогнозирующей модели в рамках каждого состояния, определяемого алгоритмом классификации так, как это было сделано в настоящей работе. Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о необходимости разработки и использования более изощренных методов выделения ХСС магнитосферы Земли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет Российского научного фонда, грант № 23-21-00237, (<https://rscf.ru/project/23-21-00237/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н.* Рост геомагнитно-индуцированных токов во время геомагнитных бурь, вызванных корональным выбросом массы и высокоскоростным потоком солнечного ветра в 2021 году. // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 87. № 2. С. 271–277. 2023. <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=izvfiz&y=2023&v=87&n=2&a=IzvFiz2270047Belakhovsky>
- *Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др.* Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 4. С. 502–510. 2004.
- *Доленко С.А., Мягкова И.Н., Персианцев И.Г.* Использование нейросетевой сегментации многомерных временных рядов для анализа геомагнитных возмущений. Вестн. Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. № 4. С. 106–115. 2016.
- *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: Аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. Т. 8. № 1. С. 5–35. 2009.

- Ефиторов А.О., Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Доленко С.А. Прогнозирование Dst-индекса, основанное на методах машинного обучения // Космич. исслед. Т. 56. № 6. С. 353–364. 2018. <http://doi.org/10.31857/S002342060002493-0>
- Калегав В.В., Алексеев И.И., Кропоткин А.П. Магнитные бури и магнитосферные суббури. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/magn/index.html>
- Лазутин Л.Л. Мировые и полярные магнитные бури. МГУ, 2012.
- Мягкова И.Н., Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Яковчук О.С. Сравнительный анализ влияния рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на радиационное состояние околоземного космического пространства в апреле – июле 2010 года // Астрон. вестн. Т. 47. № 2. С. 141–155. 2013. <http://doi.org/10.7868/S0320930X13020060>
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В., Белов А.В. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов // Космич. исслед. Т. 43. № 3. С. 186–193. 2005.
- ACE Browse Hourly Averages https://izw1.caltech.edu/cgi-bin/dib/rundibviewbr/ACE/ASC/DATA/browse_data?ACE_BROWSE.HDF!hdfref;tag=1962,ref=3,s=0
- Akasofu S.-I. and Chapman S. Solar-Terrestrial Physics. Clarendon Press, Oxford. 889 pp. 1972.
- Bala R., & Reiff P. Improvements in short-term forecasting of geomagnetic activity // Space Weather, 10, S06001. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012SW000779>
- Bartels J., et al. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity // Journal of Geophysical Research. V. 44. № 4. P. 411–454. 1939. <https://doi.org/10.1029/TE044i004p00411>
- Bartels J.R. The standardized index, Ks and the planetary index, Kp. IATME, Bull., 12b. P. 97–120. 1949.
- Breiman L. Random Forests // Machine Learning V. 45. P. 5–32. 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Boberg F., Wintoft P., & Lundstedt H. Real time Kp predictions from solar wind data using neural networks // Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science., 25(4). P. 275–280. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(00\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(00)00016-7)
- Boroyev R.N., Vasiliev M.S., Baishev D.G. The relationship between geomagnetic indices and the interplanetary medium parameters in magnetic storm main phases during CIR and ICME events. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 204. 105290. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105290>
- Cho K., et al. On the properties of neural machine translation: encoder-decoder approaches / Proceedings of SSST-8, Eighth Workshop on Syntax, Semantics and Structure in Statistical Translation. P. 103–111. Association for Computational Linguistics, Doha, Qatar. 2014. <https://doi.org/10.3115/v1/W14-4012>
- Chawla N.V., et al. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique // Journal of Artificial Intelligence Research. V. 16. P. 321–357. 2002. <http://dx.doi.org/10.1613/jair.953>
- Cole D.G. Space weather: Its effects and predictability // Space Sci. Rev. V. 107. P. 295–302. 2003. <http://doi.org/10.1023/A:1025500513499>
- Cox D.R. The regression analysis of binary sequences // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). V. 20. № 2. P. 215–242. 1958. <https://www.nuffield.ox.ac.uk/users/cox/cox48.pdf>
- Daglis I.A. Space Storms and Space Weather Hazards. Kluwer, Dordrecht, Boston, 2001. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0983-6>
- Dolenko S.A., Orlov Yu.V., Persiantsev I.G., and Shugai Ju.S. Neural network algorithm for events forecasting and its application to space physics data // Lecture Notes in Computer Science. V. 3697. P. 527–532. 2005. http://doi.org/10.1007/11550907_83
- Dolenko S.A., Myagkova I.N., Shiroky V.R., Persiantsev I.G. Objective discrimination of geomagnetic disturbances and prediction of Dst index by artificial neural networks // Proc.10th Intl. Conf. “Problems of Geocosmos” (Oct. 6–10, 2014, St.Petersburgh, Russia). P. 270–275. 2014.
- Elliott H.A., Jahn J.M., and McComas D.J. The Kp index and solar wind speed relationship: Insights for improving space weather forecasts // Space Weather. V. 11. P. 339–349. 2013. <https://doi.org/10.1002/swe.20053>
- Friedman J.H. Greedy function approximation: a gradient boosting machine // Annals of Statistics. V. 29 № 5. P. 1189–1232. 2002. <https://www.jstor.org/stable/2699986?origin=JSTOR-pdf>
- Gadzhiev, I., Myagkova, I., Dolenko, S. Use of Classification Algorithms to Predict the Grade of Geomagnetic Disturbance. In: Kryzhanovsky, B., Dunin-Barkowski, W., Redko, V., Tiumentsev, Y. (eds) Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research VI. NEUROINFORMATICS 2022. Studies in Computational Intelligence. Springer. Cham. V. 1064. P. 426–435. 2023. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19032-2_44
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // Neural. Comput. V. 9. № 8. P. 1735–1780. 1997. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hoerl A.E., Kennard R.W. Ridge regression: Biased estimation to nonorthogonal problems // Technometrics. V. 12. P. 56–67. 1970.
- Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V., et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space Weather. V. 3. №1. P. S01001. 2005. <https://doi.org/10.1029/2003SW000056>
- Ji E.Y., Moon Y.J., Park J., Lee J.Y., & Lee D.H. Comparison of neural network and support vector machine methods for Kp forecasting. Journal of Geophysical Research: Space Physics. V. 118. P. 5109–5117. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50500>
- Kataoka R. and Miyoshi Y. Average profiles of the solar wind and outer radiation belt during the extreme flux enhancement of relativistic electrons at geosynchronous

- orbit // *Ann. Geophys.* V. 26. P. 1335–1339. 2008. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1335-2008>
- Ke G., et al.: LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree // *Advances in neural information processing systems*. V. 30. P. 3149–3157. 2017.
- Kingma D.P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization / *Proceedings of International Conference on Learning Representations*. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>
- Kudela K. Space weather near Earth and energetic particles: selected results // *Journal of Physics: Conf. Series*. V. 409. Is. 1. Article id. 012017. 2013. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012017>
- McGranaghan R.M., Camporeale E., Georgoulis M., Anastasiadis A. Space Weather research in the Digital Age and across the full data lifecycle: Introduction to the Topical Issue // *J. Space Weather Space Clim.* V. 11. P. 50. 2021. <https://doi.org/10.1051/swsc/2021037>
- Myagkova I.N., Shugay Yu.S., Veselovsky I.S., and Yakovchouk O.S. Comparative analysis of recurrent high-speed solar wind streams influence on the radiation environment of near-earth space in April–July 2010. // *Solar System Research*. V. 47. № 2. P. 141–155. 2013. <http://doi.org/10.1134/S0038094613020068>
- Myagkova I.N. and S.A. Dolenko. Comparative analysis of the quality of prediction for fluences of relativistic electrons of the outer radiation belt of the Earth at different phases of the solar activity cycle. / In 11th International Conference “PROBLEMS OF GEOCOSMOS”. P. 79. St. Petersburg. 2016.
- Myagkova I., Shiroky V., and Dolenko S. Prediction of geomagnetic indexes with the help of artificial neural networks. *E3S Web of Conferences*, 20, art. 02011. 2017. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/20172002011>
- Nishida A. *Geomagnetic Diagnosis of the Magnetosphere*. Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin, 256 pp. 1978. <https://doi.org/10.1093/gji/61.3.680>
- Prokhorenkova L., et al. *CatBoost: unbiased boosting with categorical features* / 32nd Conference on Neural Information Processing Systems. P. 6638–6648. Montreal, Canada. 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.09516>
- Qiu Q., Fleeman J.A., Ball D.R. Geomagnetic disturbance: A comprehensive approach by American electric power to address the impacts // *IEEE Elect. Mag.* V. 3. № 4. P. 22–33. 2015. <https://doi.org/10.1109/MELE.2015.2480615>
- Rumelhart D.E., et al. *Learning internal Representations by Error Propagation* / *Paralleled Distributed Processing*, V. 1. P. 318–362. MIT Press, Cambridge. 1986.
- Schrijver Carolus J., et al. Understanding space weather to shield society: A global road map 772 for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS // *Adv. in Space Res.* V. 55. P. 2745–2807. 2015. <http://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
- Tan Y., Hu Q., Wang Z., Zhong Q. Geomagnetic index Kp forecasting with LSTM // *Space Weather*. V. 16. P. 406–416. 2018. <https://doi.org/10.1002/2017SW001764>
- Vassiliadis D. *Forecasting space weather* / *Space Weather – Physics and Effects* // Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg. 2007. http://doi.org/10.1007/978-3-540-34578-7_14
- Wang J., Zhong Q., Liu S., Miao J., Liu F., Li Z., & Tang W. Statistical analysis and verification of 3-hourly geomagnetic activity probability predictions. // *Space Weather*. V. 13. P. 831–852. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015SW001251>
- *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto* <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

Using Classification Methods in Forecasting the Level of Geomagnetic Field Disturbance Based on the *Kp*-Index

I. M. Gadzhiev^{1, *}, O. G. Barinov^{1, **}, I. N. Myagkova^{1, ***}, S. A. Dolenko^{1, ****}

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

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

***e-mail: obar@sinp.msu.ru*

****e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru*

*****e-mail: dolenko@srd.sinp.msu.ru*

The paper explores the possibilities of using data classification methods when forecasting time series of the geomagnetic *Kp*-index by machine learning methods. To classify categories of the *Kp*-index based on the degree of disturbance, linear and logistic regression, random forest, gradient boosting on top of decision trees, and artificial neural networks of various architectures are used. The results of these methods are compared with a trivial inertial forecast (the statistical indicators of which for problems of this type are always high) at horizons from 3 h to 1 day in 3-h increments. The problem of choosing a cross-validation scheme for selecting the model hyperparameters, ways to overcome the imbalance of categories, the relative importance of input features, as well as the dependence of the results on the test sample (beginning of the 25th solar activity cycle) on inclusion in the training sample of data from the 23rd and 24th cycles or only the 24th cycles are studied. Based on the results, conclusions are drawn about the preferred methods for classifying values of the *Kp*-index based on the level of geomagnetic disturbance. Ways for further research and possible improvement of the classification quality are outlined, including for determining the characteristic hidden states of Earth's magnetosphere as a dynamic system in order to improve the quality of forecasting geomagnetic indices.