

УДК: 550.385

## О СОГЛАСОВАННОЙ ДИНАМИКЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ОБЛАСТИ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

© 2024 г. Н. А. Власова<sup>1, \*</sup>, В. В. Калегаев<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва, Россия

\*e-mail: nav19iv@gmail.com

Поступила в редакцию 17.08.2023

После доработки 15.09.2023

Принята к публикации 15.09.2023

Представлены результаты исследования динамики магнитного поля и потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергией  $>2$  МэВ по данным геостационарного спутника GOES-15 в течение достаточно длительного (16.X.2016–16.II.2017) периода умеренной и слабой геомагнитной активности, вызванной приходом к Земле череды высокоскоростных потоков солнечного ветра. Основные вариации потока электронов в области геостационарной орбиты вызваны перемещением, замедлением и ускорением частиц внешнего радиационного пояса Земли под воздействием геомагнитной активности. Результаты сравнительного анализа вариаций потоков электронов и компонент магнитосферного поля свидетельствуют о преимущественном влиянии величины и структуры магнитосферного поля на динамику потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса. Изменения в компонентах магнитосферного магнитного поля и в потоках электронов – составные части единого процесса, происходящего вместе с изменениями магнитосферы как единого целого.

DOI: 10.31857/S0023420624040058, EDN: JJCCZT

### ВВЕДЕНИЕ

Радиационные пояса Земли – структурное образование в магнитосфере, существующее благодаря наличию достаточно сильного внутреннего, квазидипольного магнитного поля и замкнутости его силовых линий, за счет чего и происходит захват заряженных энергичных частиц. Наряду с внутриземными источниками магнитного поля, магнитосфера содержит крупномасштабные токовые системы (токи на магнитопаузе, токи хвоста, кольцевой ток), сформировавшиеся и меняющиеся под воздействием межпланетной среды: солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) [1]. Структура магнитосферы определяется суперпозицией внутреннего поля и поля внешних источников. Таким образом, магнитосфера – динамичная структура, меняющаяся во времени. Наиболее изменчива внешняя магнитосфера, в которой магнитное поле магнитосферных токов сопоставимо или превышает внутреннее магнитное поле Земли [2]. В то же время, магнитосфера – самосогласованная система, реакция которой на внешнее воздействие зависит от ее текущего состояния и не связана однозначно с мгновенными значениями параметров солнечного ветра: одни

и те же условия в солнечном ветре могут воздействовать на магнитосферу по-разному, в зависимости от предыстории, то есть от ее внутреннего состояния.

Движение заряженных частиц в магнитосфере контролируется магнитным полем. Наиболее стабильны потоки частиц радиационных поясов во внутренней магнитосфере, где доминирует внутриземное магнитное поле, испытывающее медленные, вековые вариации. С удалением от Земли потоки захваченных частиц начинают испытывать вариации, связанные с изменениями в магнитосферных токовых системах.

Сильную изменчивость внешнего электронного радиационного пояса показали результаты исследования уже на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) серии «Электрон» (см., например, [3]). Результаты статистического исследования 276 умеренных и средних магнитных бурь ( $|Dst|_{\max} > 50$  нТл) по данным геостационарных спутников показали, что на фазе восстановления в ~53% бурь поток электронов увеличивается, в 19% – уменьшается и в 28% – остается без изменения [4]. Основные процессы, приводящие к ускорению электронов, происходят во внутренней магнитосфере.

На геостационарной орбите видны только отголоски этих процессов на фоне крупномасштабных вариаций потоков частиц, связанных с возмущениями магнитосферного поля. Аналогичные статистические исследования по 78 бурям на основе данных, полученных в сердцевине внешнего радиационного пояса космическим аппаратом (КА) *Van Allen Probes*, дали следующие результаты: 45%, 32% и 23%, соответственно [5].

Для объяснения уменьшения интенсивности потока энергичных электронов внешнего радиационного пояса Земли на главной фазе магнитной бури в работе [6] был предложен механизм, связанный с адиабатическим расширением дрейфовых оболочек внутренней магнитосферы при сохранении третьего адиабатического инварианта. Сохранение первого инварианта приводит к понижению энергии частиц, попадающих в область с ослабленным магнитным полем. Наряду с процессом переформирования внешнего радиационного пояса под действием вариаций магнитного поля, конечно, действуют и механизмы, приводящие к потерям частиц. Высыпания частиц при взаимодействии с волнами вследствие питч-угловой диффузии и потери электронов при смещении магнитопаузы на главной фазе магнитной бури — основные механизмы потерь частиц [7]. Резонансное взаимодействие частиц с волнами разной природы (электромагнитные ионные циклотронные волны, *англ.* electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves; хоровые волны, *англ.* chorus waves; плазмосферные шипения, *англ.* plasmaspheric hiss), а также с их комбинациями может приводить к их высыпаниям в атмосферу (см., например, [8, 9]). В работе [10] приведены результаты оценки потоков электронов, высыпающихся из внешнего радиационного пояса на  $L = 3.5–6$  19.I.2013, в диапазоне энергий 0.58–1.63 МэВ: 6.8% от общего потока. С самого начала развития теории радиационных поясов, которая основывалась на результатах экспериментальных исследований, выделялось три наиболее фундаментальных процесса, управляющих основной массой частиц: инжекция в область захваченной радиации; радиальная диффузия, сопровождающаяся адиабатическим ускорением, и потери частиц [11]. В теории Б. А. Тверского [7] перенос частиц поперек дрейфовых оболочек может происходить при магнитных возмущениях типа внезапных импульсов, впервые рассмотренных Е. Паркером [12]. Теория радиальной диффузии вследствие возникновения индукционных электрических полей при внезапных импульсах магнитного поля обосновывает существование диффузионных волн потоков релятивистских электронов [7]. По данным КА *ГЛОНАСС* показано, что экспериментально полученная скорость диффузионных волн соответствует теории диффузии под действием внезапных импульсов [13]. Механизм «ударной» инжекции частиц под действием внезапного биполярного

импульса магнитного поля SSC дал возможность объяснить данные КА *CRRES* 24.III.1991 по формированию в течение ~1 мин радиационного пояса электронов с энергией ~15 МэВ с максимумом на  $L = 2.2–2.6$  [14].

Экспериментальное подтверждение зависимости динамики потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли от вариаций магнитного поля во время бурь было представлено в работе [15]. По данным низковысотных полярных спутников была получена эмпирическая зависимость положения максимума пояса инжектированных во время магнитных бурь релятивистских электронов ( $L_{\max}$ ) от максимальной амплитуды бури:  $|Dst|_{\max} = 2.75 \cdot 10^4 \cdot L_{\max}^{-4}$ . Результаты исследования магнитных бурь с возрастанием потоков электронов на фазе восстановления по данным, полученным в сердцевине внешнего радиационного пояса на КА *Van Allen Probes*, показали согласие с этой эмпирической зависимостью [5]. Теоретическое обоснование эмпирической зависимости было представлено в работе [16].

Для пополнения радиационного пояса новыми ускоренными частицами предлагаются несколько механизмов. «Буревая» инжекция — процесс, состоящий из двух этапов и ускоряющий популяции частиц плазменного слоя под воздействием сначала суббуревой активности (до первых сотен кэВ), а затем за счет взаимодействия с волнами до субрелятивистских и релятивистских энергий (см., например, обзор [17] и ссылки в нем). В качестве главных механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий рассматриваются резонансное взаимодействие между электронами и очень низкочастотными (ОНЧ) волнами (см, например, [18, 20]) и радиальная диффузия электронов под воздействием ультранизкочастотных (УНЧ) волн (см, например, [20]). Развиваются идеи локального ускорения электронов волнами типа «хоров» (см., например, [20]).

Основными механизмами потерь частиц на главной фазе геомагнитной бури считаются высыпания частиц при взаимодействии с волнами вследствие питч-угловой диффузии и потери электронов при смещении магнитопаузы [7]. В результате резонансного взаимодействия с волнами разной природы происходит изменение питч-углового распределения захваченных частиц, приводящее к их высыпанию в атмосферу из конуса потерь [8, 9]. Увеличение давления солнечного ветра может привести к компрессии магнитосферы, при этом внешняя часть популяции захваченных электронов может оказаться на разомкнутых  $L$ -оболочках. Результатом такого процесса становится выход энергичных электронов за пределы магнитосферы [21].

Цель данной работы — на основе результатов анализа экспериментальных данных с космических

аппаратов дать объяснение вариациям потоков релятивистских электронов в области геостационарной орбиты (ГСО), которые могут быть инициированы динамическим воздействием меняющегося во время бури магнитосферного магнитного поля.

## ИСТОЧНИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Работа основана на результатах анализа экспериментальных данных по потокам релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с энергией ( $E$ )  $> 2$  МэВ и измерений магнитного поля прибором SEM (англ. Space Environment Monitor) на ИСЗ *GOES-15* (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes>). ИСЗ *GOES-15* находится на геостационарной орбите на  $120^\circ$  з.д.

Для исследования состояния межпланетной среды использовались экспериментальные данные с КА *ACE* (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/>).

Магнитосферная активность Земли характеризовалась магнитными индексами: *Dst*-вариацией, *AE* и *AL* индексами (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>).

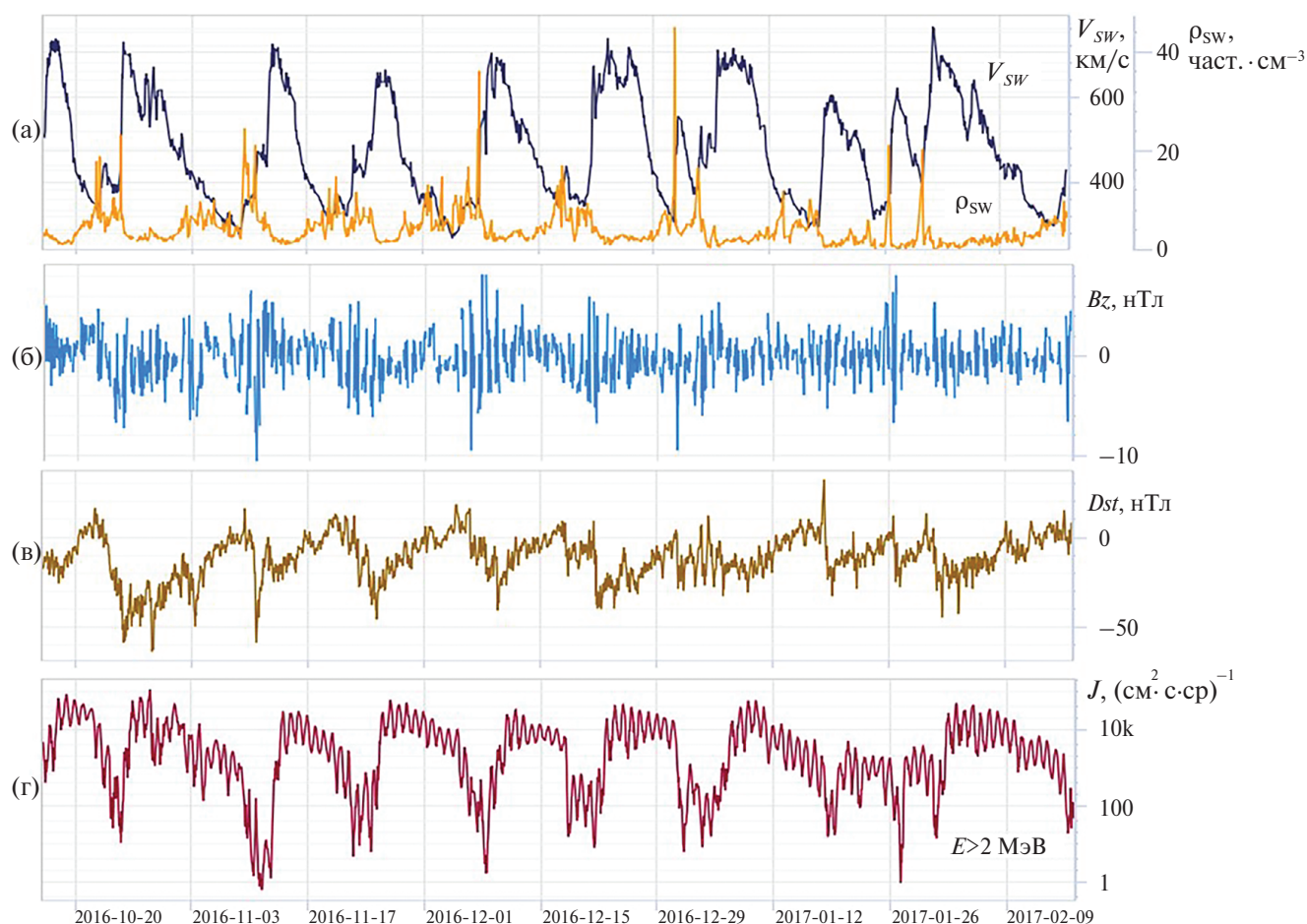
Рисунки для статьи созданы на сайте центра данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ, который обеспечивает доступ к оперативным данным космических экспериментов и моделям оперативного прогнозирования явлений космической погоды. На сайте ЦДОКМ «Космическая погода» (<https://swx.sinp.msu.ru/>) собраны данные, необходимые для оценки и анализа радиационной обстановки не только в околоземном космическом пространстве, но и в межпланетной среде. Усовершенствованные графические приложения дают возможность проводить сравнительный анализ как экспериментальных данных, так и результатов моделирования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика радиационных поясов Земли зависит от состояния магнитосферного магнитного поля, находящегося под воздействием межпланетной среды, меняющейся в зависимости от солнечной активности и от фазы солнечного цикла. На спаде солнечной активности наблюдаемые вариации потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, как правило, связаны с магнитными возмущениями, развивающимися под воздействием высокоскоростных потоков солнечного ветра [22, 13].

Временной интервал с 16.X.2016 по 16.II.2017 приходится на позднюю фазу спада 24-го цикла солнечной активности (2019 г. — последний год цикла) и интересен для исследования динамики релятивистских электронов внешнего радиационного

пояса Земли тем, что в этот период магнитосфера испытала воздействие нескольких высокоскоростных потоков солнечного ветра, откликом на которые стали магнитные возмущения и сильные вариации потоков релятивистских электронов, в частности, на геостационарной орбите. Временные профили некоторых параметров, которые играют основные роли в воздействии межпланетной среды на магнитосферу Земли, представлены на рис. 1: скорость и плотность солнечного ветра (рис. 1а) и  $B_z$ -компонента ММП (рис. 1б). В исследуемый период наблюдались эволюция нескольких корональных дыр, корональные выбросы массы и развитие спорадических явлений в межпланетной среде, ставших причиной высокоскоростных потоков солнечного ветра [23]. Воздействие межпланетной среды в виде ударных волн, импульсов давления СВ, преимущественно при южной ориентации ММП, вызывает сильную реакцию в магнитосфере. В исследуемый период реакцией магнитосферы на сильные вариации межпланетной среды стала последовательность геомагнитных возмущений различной мощности. В начале периода наблюдались три умеренные магнитные бури с  $|Dst|_{\max} \geq 50$  нТл, последующие возмущения были более слабые (рис. 1в). На рис. 1д показан временной профиль потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли с  $E > 2$  МэВ по данным геостационарного ИСЗ *GOES-15*. На всех последующих рисунках будет представлен именно этот энергетический канал для измерения потока электронов по данным ИСЗ *GOES-15*. Можно видеть, что вариации потоков электронов с  $E > 2$  МэВ ярко выраженные, коррелирующие с приходом высокоскоростных потоков, и максимальный поток электронов, практически во всех случаях, превышал  $10^4$  (см<sup>2</sup>·с·ср)<sup>-1</sup>. Причинно-следственные связи явлений в межпланетной среде и магнитосферных процессов наглядно проявляются в очевидных корреляциях представленных на рис. 1 параметров. Чаще всего приход высокоскоростных потоков солнечного ветра предваряется возрастанием плотности солнечного ветра (рис. 1а) и, следовательно, импульсами давления (на рис. 1 не показано), а также переориентацией  $B_z$ -компоненты ММП на южное направление (рис. 1б). Результатом воздействия каждого высокоскоростного потока является депрессия магнитосферного поля — уменьшение *Dst* (рис. 1в) и, как следствие, сначала уменьшение, а потом рост потоков релятивистских электронов, в частности, на геостационарной орбите (рис. 1г). При этом не наблюдается прямой пропорциональности между величиной  $|Dst|_{\max}$  и минимальной и максимальной величинами потоков электронов на геостационарной орбите. Этот эффект присутствует, как в изучаемый интервал времени (рис. 1), так и по результатам исследования 22 магнитных бурь в работе [24]. Сравнивая временные характеристики наблюдаемых параметров, можно видеть,



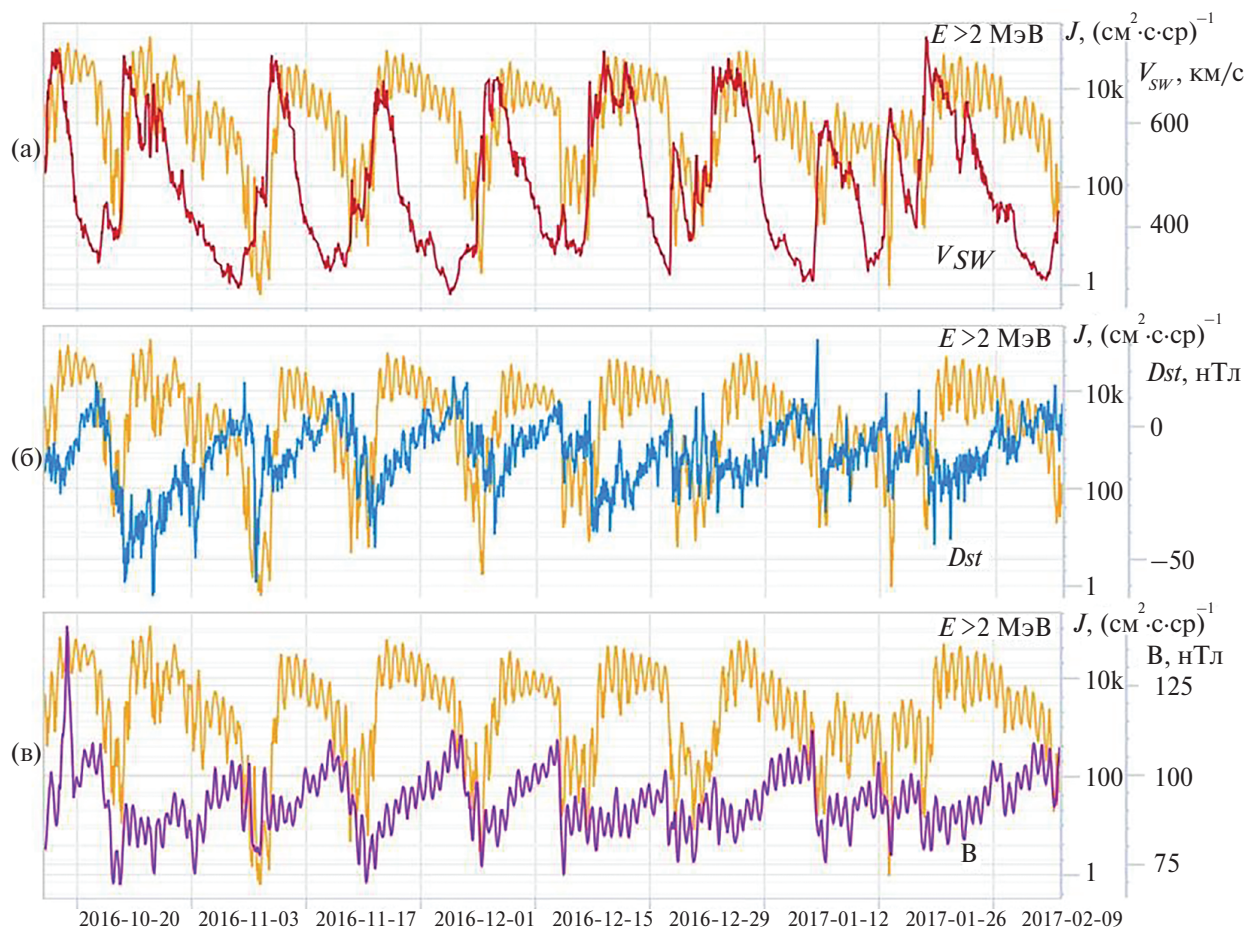
**Рис. 1.** Временные профили скорости —  $V_{sw}$  и плотности —  $\rho_{sw}$  солнечного ветра (а) и  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля (б) по данным КА ACE,  $Dst$ -вариации (в), потока электронов с  $E > 2$  МэВ (г) по данным ИСЗ GOES-15 (16.X.2016–16.II.2017).

что периоды с увеличенной плотностью плазмы солнечного ветра и, соответственно, с увеличенным давлением, и с большими отрицательными величинами  $B_z$ -компоненты ММП существенно короче, чем периоды, когда скорость солнечного ветра близка к максимальным значениям. Каждая новая структура межпланетной среды воздействует на магнитосферу, передавая ей энергию и являясь триггером для развития магнитного возмущения. Отклик магнитосферы можно проследить по временному ходу  $Dst$ -вариации, который имеет свой собственный особый профиль, отличный от временных профилей параметров межпланетной среды (рис. 1).

Постараемся сравнить некоторые временные характеристики, присущие исследуемым параметрам. На рис. 2а на одной панели представлены временные профили скорости солнечного ветра и потоков электронов на геостационарной орбите. Учтена временная поправка, связанная с распространением потока солнечного ветра с орбиты КА ACE на расстоянии 1.5 млн км от Земли до

орбиты Земли (примерно 1 ч). Расчет параметров солнечного ветра на орбите Земли выполняется в ЦДОКМ НИИЯФ МГУ ([https://swx.sinp.msu.ru/apps/solar\\_wind.php?gcm=1](https://swx.sinp.msu.ru/apps/solar_wind.php?gcm=1)) в режиме реального времени. Сравнивая временные профили скорости солнечного ветра и потоков электронов на ГСО (рис. 2а), можно видеть, что, хотя каждому высокоскоростному потоку соответствует сначала спад, а затем возрастание потока электронов, профили существенно разнятся: время спада, минимума и роста потока электронов и время роста скорости СВ в каждом случае различаются. Синусообразные, быстрые (по сравнению с исследуемыми вариациями потоков электронов) вариации величин потоков электронов — суточные вариации, характерные для экспериментальных данных, полученных на геостационарной орбите обусловлены различием величин магнитного поля на дневной и ночной сторонах орбиты: днем больше, ночью меньше.

Длительность периодов возрастания потоков электронов превосходит соответствующую



**Рис. 2.** Временные профили потока электронов и параметров: скорости солнечного ветра (а);  $Dst$ -вариации (б); усредненной величины модуля магнитного поля (в) 16.X.2016–16.II.2017.

длительность периодов регистрации высокоскоростных потоков СВ. Крутизна спадов сравниваемых величин совершенно различна. Можно сделать вывод, что возрастание скорости солнечного ветра является только одним из триггеров развития процессов в магнитосфере, приводящих к росту потока электронов, но форма временного профиля потока электронов, а, следовательно, и динамика потока электронов может определяться другими, в том числе, и внутримagnetосферными параметрами. Среди них можно выделить, как связанные с состоянием magnetосферных токовых систем, так и факторы, связанные с ускорением и потерями частиц под воздействием волновой активности. Наше исследование показывает, что первый набор факторов может играть доминирующую роль на фоне волновой активности.

Одним из таких параметров является  $Dst$ -вариация — геомагнитный индекс, сформированный по измерениям магнитного поля на поверхности Земли и используемый для характеристики магнитной обстановки в magnetосфере. В то же время и формы профилей потока электронов и  $Dst$ -вариации различаются очень существенно (рис. 2б).

Следует отметить, что крутой подъем потока электронов наблюдается вблизи минимума  $Dst$ -вариации, в течение длительного времени (несколько суток) величина потока электронов незначительно уменьшается, после чего происходит резкий спад, совпадающий с началом нового геомагнитного возмущения, новой депрессии магнитного поля (рис. 2б). Таким образом, в течение рассматриваемого периода наблюдаются квазипериодические вариации скорости солнечного ветра, величины магнитного индекса  $Dst$  и потока релятивистских электронов на ГСО. Несмотря на очевидную взаимосвязь этих процессов, можно видеть существенные различия в поведении временных профилей исследуемых параметров.

В работе использовалась экспериментальная информация по измерениям компонент магнитных полей в magnetосфере Земли на ИСЗ *GOES-15* и в межпланетной среде на КА *ACE*. Для выделения долговременных вариаций магнитных полей было применено усреднение данных методом скользящего среднего: значение в каждой точке рассчитывалось как среднее арифметическое значений в десяти предыдущих и в десяти последующих точках.

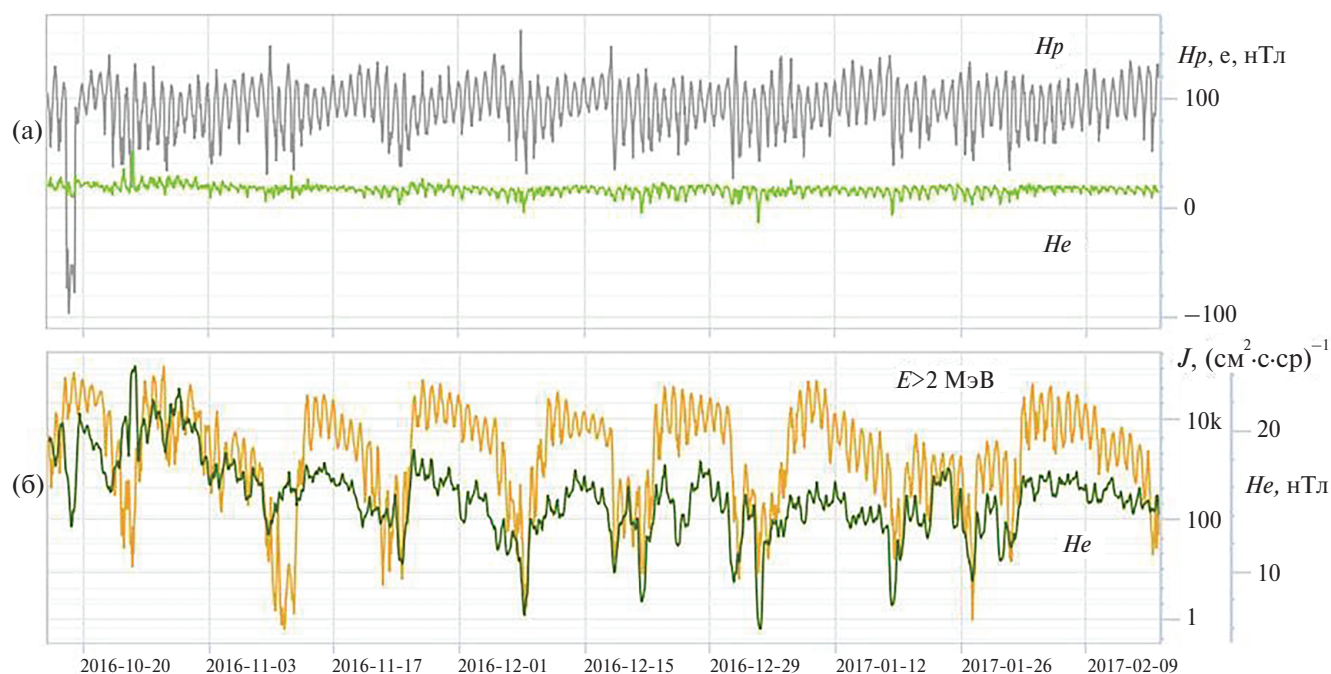


Рис. 3. Временные профили  $H_p$ - и  $H_e$ -компонент магнитного поля по данным ИСЗ GOES-15 (а) и потока электронов и усредненной величины  $H_e$ -компоненты магнитного поля (б) 16.X.2016–16.II.2017.

На рис. 2в представлены одновременные данные по потокам электронов и усредненные величины модуля магнитного поля по данным ИСЗ GOES-15. Можно видеть, что характеры временных профилей потоков электронов и модуля магнитного поля различаются примерно так же, как и при сравнении с  $Dst$ -вариацией (рис. 2б), что закономерно: величина магнитного поля на геостационарной орбите уменьшается на главной фазе бури, а затем постепенно увеличивается на фазе восстановления, до прихода следующей структуры межпланетной среды, вызывающей следующее возмущение. При этом поток электронов резко падает вместе с модулем магнитосферного магнитного поля на ГСО, после чего быстро восстанавливается и держится практически на одном уровне, обычно незначительно уменьшаясь, до быстрого падения с развитием следующей бури.

Наряду с модулем магнитного поля на ГСО рассмотрим вариации направления вектора поля. Спутники GOES измеряют  $H_p$ -,  $H_n$ - и  $H_e$ -компоненты поля, направленные, соответственно, перпендикулярно плоскости ГСО, в азимутальном (на восток) и в радиальном (к Земле) направлениях в плоскости географического экватора. Так как  $H_p$  компонента вносит основной вклад в величину модуля магнитного поля на геостационарной орбите, то выводы при сравнении динамики потоков электронов и модуля магнитного поля (рис. 2в) могут быть полностью отнесены и к  $H_p$ -компоненте. Соотношение величин  $H_p$ - и  $H_e$ -компонент характеризует степень отличия магнитного поля на

геостационарной орбите от дипольного. Представленные на одной панели (рис. 3а) профили величин  $H_p$ - и  $H_e$ -компонент магнитного поля демонстрируют различную динамику.  $H_e$ -компонента имеет существенно меньшую абсолютную величину, но ее роль становится значимой во время магнитных возмущений и особенно в ночном секторе магнитосферы. Здесь  $H_e$ -компонента направлена примерно вдоль оси  $X_{\text{GSM}}$  и характеризует, главным образом, интенсивность токовой системы хвоста магнитосферы. Временные профили потоков электронов и усредненной величины  $H_e$ -компоненты представлены на рис. 3б. Можно видеть, что в отличие от вариаций скорости и плотности солнечного ветра,  $Dst$ -индекса и модуля магнитного поля на ГСО, долговременные вариации усредненной  $H_e$ -компоненты соответствуют изменениям потоков электронов. В исследуемый период в начале каждого магнитосферного возмущения (бури), величина  $H_e$ -компоненты начинает уменьшаться и достигает наименьшего значения, примерно в максимуме бури, после чего быстро восстанавливается. Достигнув максимума, величина  $H_e$ -компоненты постепенно уменьшается. Представленные на одной панели профили  $H_e$ -компоненты магнитного поля и потока электронов свидетельствуют о наличии общих закономерностей в их временной эволюции.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Основы знаний о структуре и динамике радиационных поясов Земли и, в частности, внешнего электронного радиационного пояса, были заложены достаточно быстро после открытия радиационных поясов, в большой степени, благодаря экспериментальным данным, полученным с ИСЗ серии *Электрон*, которые были запущены на эллиптическую орбиту [25]. Уже само название обзора С.Н. Вернова с коллегами: «Потоки частиц во внешнем геомагнитном поле» [25] говорит о приоритетном факторе, влияющем на динамику потоков электронов внешнего радиационного пояса. Результаты анализа динамики потоков электронов внешнего радиационного пояса во время отдельных магнитных бурь в зависимости от вариаций параметров солнечного ветра и ММП свидетельствуют о повторяемости процессов, что можно наглядно видеть и на выбранном для исследования временном интервале: 16.X.2016–16.II.2017 (рис. 1). Наиболее существенное влияние на магнитосферу оказывает вариация скорости солнечного ветра (см., например, [26]). *Bz*-компонента ММП и ее вариации – ключевой фактор, определяющий состояние магнитосферы: поворот ММП к югу является одним из основных условий развития магнитной бури [27]. Южная компонента ММП характеризует темп пересоединения на магнитопаузе и интенсивность глобальной конвекции плазмы из хвоста магнитосферы в область захвата. В свою очередь, динамическое давление солнечного ветра влияет на положение магнитопаузы; возрастание давления при южном направлении ММП обеспечивает более эффективный перенос массы – энергии – импульса из солнечного ветра в магнитосферу.

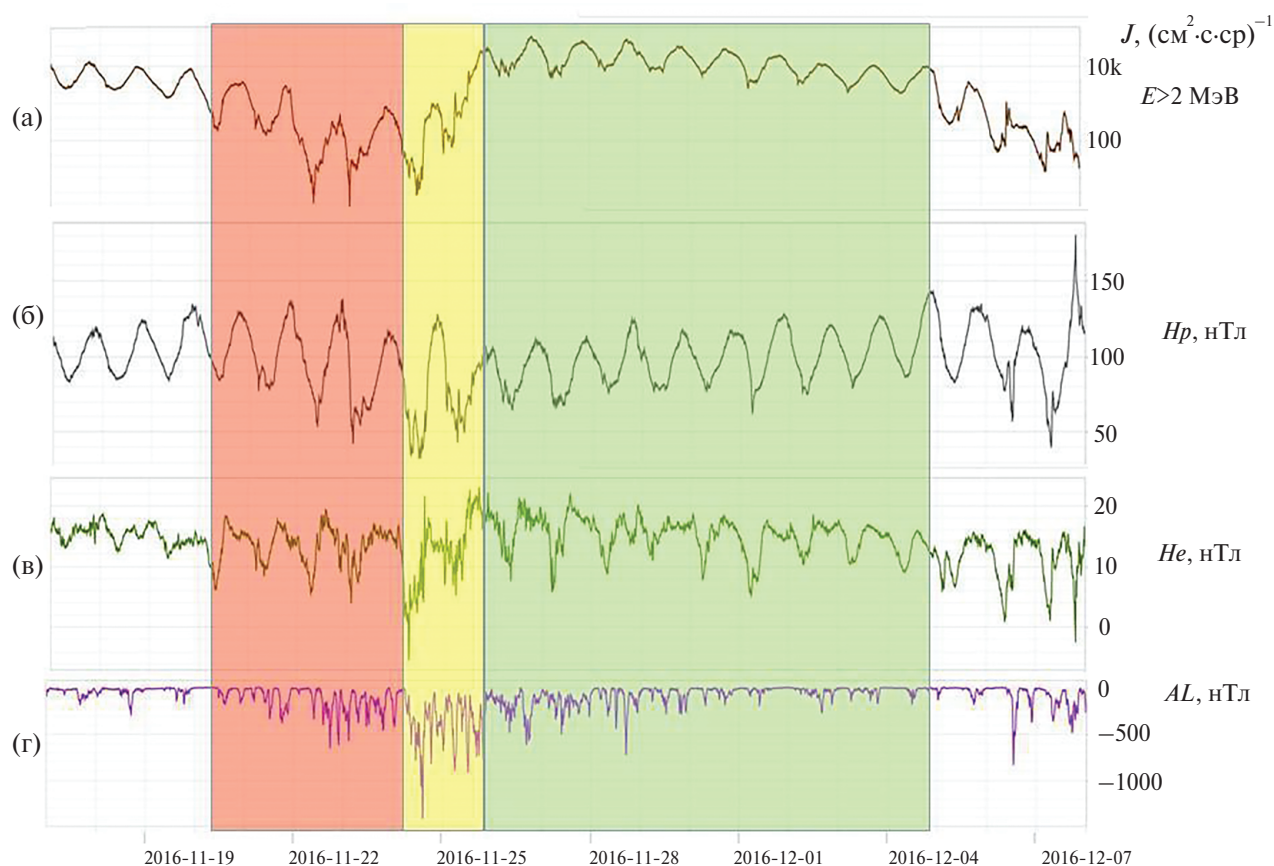
Экспериментальным подтверждением существующих на сегодняшний день представлений о влиянии состояния межпланетной среды на магнитосферу являются представленные на рис. 1 временные профили параметров солнечного ветра и ММП, а также *Dst*-вариации и компонент магнитосферного поля на рис. 3 (16.X.2016–16.II.2017). Сравнительный анализ профилей потоков электронов и величины магнитного поля и его компонент на геостационарной орбите демонстрирует четкую корреляцию исследуемых параметров в условиях многократно повторяющихся магнитных возмущений.

В одной из первых статей по статистическому исследованию особенностей динамики потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли по данным с геостационарных спутников показано, что обычно во время бури происходит уменьшение потока электронов, а затем или восстановление, или превышение над добуревым уровнем, или поток остается без изменений на низком уровне [4]. Магнитосферная буря в своем

развитии имеет несколько фаз. Рассмотрим одну из бурь (25.XI.2016), представленных на рис. 1, более подробно (рис. 4). На временных профилях выделены три интервала с различной динамикой потока электронов: уменьшение потока на главной фазе бури (левая область); минимальное значение потока и быстрый рост в максимуме бури и в самом начале фазы восстановления (центральная область); примерно постоянное значение потока на фазе восстановления бури (правая область). Периодические колебания потока электронов, *H<sub>p</sub>*- и *He*-компонент магнитосферного поля (рис. 4а–в) – суточный ход, обусловленный более вытянутыми силовыми линиями магнитного поля в ночном секторе, что обеспечивает минимальные значения измеряемых величин.

Первый интервал, во время которого происходит уменьшение потока электронов, совпадает с главной фазой магнитной бури. Быстрое уменьшение потока электронов практически одновременно с уменьшением магнитного поля может быть объяснено адиабатическим эффектом, связанным с расширением *L*-оболочек, – *Dst*-эффектом [6]. В работе [7] отмечено, что при усилении потока солнечного ветра в хвосте магнитосферы интенсифицируется крупномасштабная конвекция. Возрастают электрическое поле конвекции и токи поперек хвоста магнитосферы, которые заметно деформируют силовые линии, вытягивая их на ночную сторону. Поток инжектированных из хвоста магнитосферы низкоэнергичных частиц проникает в более глубокие области внутренней магнитосферы. Длина силовых линий заметно возрастает, а напряженность поля в приэкваториальной области падает. В результате во время первой фазы магнитной бури, когда плазма проникает на периферию области захваченной радиации и вытягивает силовые линии в хвост, на соответствующих расстояниях от Земли должно наблюдаться резкое падение интенсивности высокоэнергичных частиц за счет адиабатического замедления частиц и роста объема силовых трубок в  $10^2$ – $10^3$  раз.

Результаты, представленные в нашей работе, согласуются с выводами, сделанными в работе [28] на основе многоточечных наблюдений по данным КА *Van Allen Probes* и моделирования падения потока релятивистских электронов при понижении магнитного поля, связанном с инъекцией протонов. Описана связь между радиационным поясом и кольцевым током на главной фазе бури 27.V.2017. Результаты моделирования свидетельствуют о вытягивании силовых линий магнитного поля наружу в районе экватора на  $\sim 0.5 R_E$  и об ослаблении поля примерно в четыре раза в течение нескольких минут. Вследствие бетатронного и Ферми-замедления при сохранении первого и второго адиабатических инвариантов поток релятивистских электронов



**Рис. 4.** Временные профили потока электронов (а),  $H_p$ - (б) и  $He$ -компонент (в) магнитного поля и  $AL$ -индекса (г) 17.XI – 07.XII.2016.

с энергией в несколько мегаэлектронвольт уменьшается на 2–3 порядка величины с изменением пич-углового распределения с почти плоского в максимуме до распределения с максимумами на  $\sim 30^\circ$  и  $\sim 150^\circ$ .

Предлагаются и другие механизмы влияния топологии магнитосферного поля на динамику потоков электронов во время бури. Так в работе [19] дано следующее объяснение уменьшения потока электронов на главной фазе бури 07.IX.2002: частичный кольцевой ток может приводить к такому изменению топологии магнитного поля, в результате которого на дневной стороне образуется ловушка для электронов, в которой электроны могут быть стабильно захвачены в течение более чем 11 ч. Распад частичного кольцевого тока приводит к исчезновению ловушки и восстановлению движения электронов вокруг Земли. Представленные результаты свидетельствуют о перераспределении потоков электронов по энергии и пространству на главной фазе магнитной бури.

Проведем сравнительный анализ динамики потоков электронов и вариации магнитного поля в максимуме и на ранней фазе восстановления бури 25.XI.2016 (рис. 4, центральная область).

Незначительное увеличение  $H_p$ -компоненты магнитного поля наблюдается преимущественно в ночном секторе магнитосферы – рост минимальных значений (рис. 4б), в то время как на профиле потока электронов виден быстрый рост (рис. 4а). После минимальных значений в максимуме бури величина  $He$ -компоненты магнитного поля на ранней фазе восстановления демонстрирует быстрый рост (рис. 4в), синхронно с потоком электронов (рис. 4а). Как и было отмечено выше, практически во всех наблюдаемых в исследуемый интервал магнитных возмущениях быстрое восстановление потока электронов на ранней фазе восстановления бури совпадает с быстрым увеличением  $He$ -компоненты магнитного поля (рис. 3в). Увеличение  $He$ -компоненты магнитного поля после возмущений означает ослабление эффекта токов хвоста, так что вытянутые в хвост силовые линии втягиваются внутрь магнитосферы, а согласно работе [7] частицы испытывают сильное адиабатическое ускорение, и чем сильнее возмущение, тем более глубокие оболочки затрагиваются данным процессом. Увеличение амплитуды быстрых вариаций величины  $He$ -компоненты магнитного поля в этот период связано с суббуревой активностью, которая

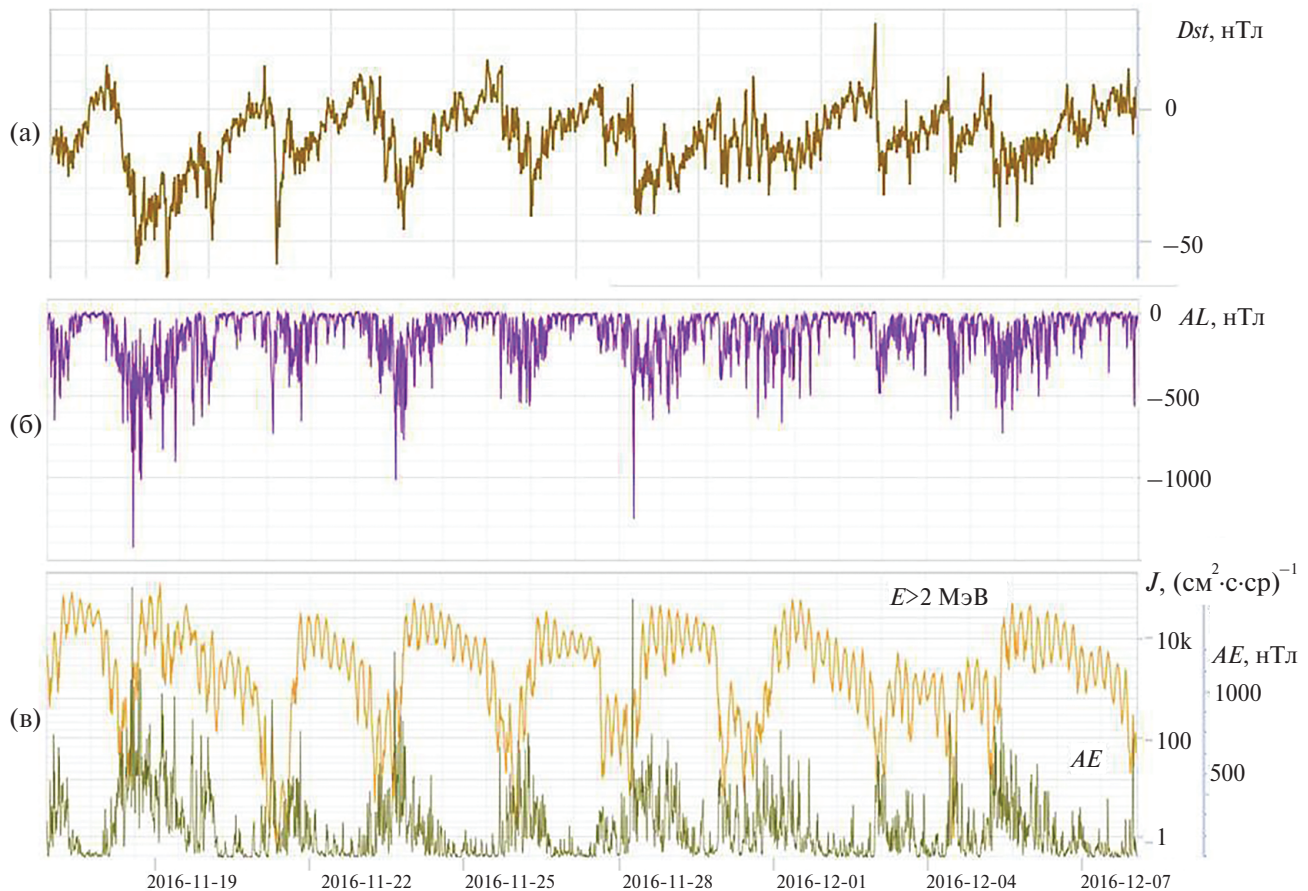


Рис. 5. Временные профили  $Dst$ -вариации (а),  $AL$ -индекса (б), потока электронов и  $AE$ -индекса (в) 16.X.2016–16.II.2017.

в данной буре была именно в максимуме и на ранней фазе восстановления бури (рис. 4г).

Для объяснения потоков энергичных электронов внешнего радиационного пояса, в том числе релятивистских электронов, спорадически появляющихся в магнитосфере, был предложен механизм ускорения этих электронов кратковременными импульсами электрического поля, которые возникают на ночной стороне при суббуревых возмущениях [29]. В работе [30] этот механизм существенно конкретизирован с учетом современных представлений о быстрых плазменных потоках в геомагнитном хвосте, о возникновении диполизационных фронтов, а также о возбуждении локализованных по местному времени продольно-резонансных полоидальных альвеновских колебаний, содержащих сильную компоненту электрического поля в направлении утро – вечер. Показано, что в одном акте адиабатического ускорения электронов с энергией  $\sim 1\text{--}2$  МэВ приращение энергии может составлять  $\sim 200\text{--}500$  кэВ и увеличение потока –  $\sim 100\text{--}300\%$  при экспоненциальной форме спектра с  $E_0 \sim 0.3$  МэВ. Приведенные в статьях [29, 30] выводы согласуются с результатами настоящей работы, но мы предполагаем,

что в процессе диполизации преимущественно ускоряются электроны, замедленные на главной фазе бури.

В работе [31] предполагается, что очень быстрое (ступенчатое) возрастание потоков электронов практически одновременно в широком диапазоне энергий связано с суббуревыми диполизациями магнитного поля в хвосте магнитосферы. В публикации [32] делается вывод, что необходимым условием увеличения потоков релятивистских электронов является рост  $AE$ -индекса. Временные профили потока электронов и магнитных индексов, характеризующих суббуревую активность в магнитосфере ( $AL$ - и  $AE$ -индексы), в исследуемый период (16.X.2016–16.II.2017) представлены на рис. 5. Можно видеть, что суббуревая активность сопровождается каждое уменьшение  $Dst$ -вариации (рис. 5а). Причем максимальная активность (рис. 5б и 5в) наблюдается преимущественно в максимуме и/или на ранней стадии восстановления бури, совпадающих с быстрым ростом потока электронов (рис. 5в).

На поздней фазе восстановления магнитной бури (рис. 4, правая область) происходит процесс постепенного (в течение нескольких дней) восстановления спокойной структуры магнитного поля

в области захваченной радиации, в частности, геостационарной орбиты: величина  $H_p$ -компоненты магнитного поля возрастает (рис. 4б), а  $H_e$ -компоненты уменьшается (рис. 4в). Наблюдается плавное уменьшение потока электронов, которое можно объяснить изменением соотношения  $H_p$ - и  $H_e$ -компонент магнитного поля и диффузией частиц внутрь радиационных поясов.

В обзоре [33] показано, что по эмпирически полученной зависимости положения максимума пояса релятивистских электронов на фазе восстановления магнитной бури от амплитуды этой бури ( $Dst_{\max}$ ) [15] можно предсказать, до каких широт приблизятся к Земле во время бури многие «критические», с точки зрения космической погоды, магнитосферные плазменные структуры, такие как граница области захваченной радиации; ночная экваториальная граница аврорального овала; центр западной электроструи; максимум давления плазмы кольцевого тока. Это доказывает, что возрастание и понижение потоков электронов – повторяющийся регулярный процесс, происходящий вместе с изменениями магнитосферы как единого целого.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования динамики потоков релятивистских электронов в области геостационарной орбиты в зависимости от вариаций магнитного поля в условиях воздействия на магнитосферу Земли гелиосферных структур с высокой скоростью солнечного ветра 16.X.2016–16.II.2017. В результате сравнительного анализа вариаций потоков электронов, параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, компонент магнитосферного поля показано следующее.

– Высокоскоростные потоки солнечного ветра являются одним из факторов, определяющих поступление энергии из межпланетной среды в магнитосферу, и триггером для развития магнитосферных возмущений.

– Уменьшение потока электронов внешнего радиационного пояса Земли на главной фазе магнитной бури преимущественно связано с уменьшением величины магнитного поля (адиабатическое замедление частиц и рост объема силовых трубок [7]).

– Рост потоков электронов в максимуме и на ранней фазе восстановления магнитной бури преимущественно связан с изменением топологии магнитосферного поля, а именно с существенным увеличением радиальной компоненты магнитосферного поля (адиабатическое ускорение, втягивание силовых линий внутрь [7]), а также с суббуревой активностью [29, 30].

– Динамика потоков электронов на поздней фазе восстановления магнитной бури преимущественно

обусловлена постепенным восстановлением топологии силовых линий магнитосферного поля (рост вертикальной и уменьшение радиальной компонент магнитного поля), а также диффузией частиц внутрь радиационных поясов [7].

Результаты исследования свидетельствуют о жесткой причинно-следственной связи процессов в гелиосфере и магнитосфере Земли и их повторяемости в течение рассматриваемого периода 16.X.2016–16.II.2017. Радиационные пояса Земли – структурное образование в магнитосфере, существующее благодаря наличию достаточно сильного квазидипольного магнитного поля. Динамика потоков электронов – процесс, происходящий вместе с вариациями магнитосферы как единого целого. Доминирующий фактор, влияющий на динамику электронов, – вариации и изменения величины и структуры магнитосферного поля.

Полученные результаты свидетельствуют о доминирующем влиянии структуры магнитосферного поля на динамику потоков релятивистских электронов в области геостационарной орбиты. Наряду с этим, несомненно, действуют и процессы, приводящие к реальным потерям и пополнению внешнего электронного радиационного пояса новыми частицами, но они происходят на фоне глобальных изменений во внешнем радиационном поясе, связанных с развитием крупномасштабных буревых токовых систем, приводящим к изменениям структуры магнитосферы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят всех исследователей, представляющих через Интернет свои экспериментальные данные. Данные по магнитным индексам получены в World Data Center C2 for Geomagnetism, Kyoto. Экспериментальные данные измерений на ИСЗ *GOES-15* получены в NASA/GSFC Space Physics Data Facility (SPDF), CDAWeb (the Coordinated Data Analysis Web, <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov>).

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22–62–00048.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohtani S.I. Magnetospheric current systems. Book Series: Geophys. Monograph Series. 2000. V. 118. 401 p.

2. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V. et al. Magnetic storms and magnetotail currents // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 1996. V. 101. Iss. A4. P. 7737–7747. <https://doi.org/10.1029/95JA03509>
3. Вернов С.Н., Кузнецов С.Н., Логачев Ю.И. и др. Радиальная диффузия электронов с энергией больше 100 кэВ во внешнем радиационном поясе // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1968. Т. 8. № 3. С. 401–411.
4. Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W. et al. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Letters*. 2003. V. 30. Iss. 10. P. 1529–1564. <https://doi.org/10.1029/2002GL016513>
5. Moya P.S., Pinto V.A., Sibeck D.G. et al. On the effect of geomagnetic storms on relativistic electrons in the outer radiation belt: Van Allen Probes observations // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 11.100–11.108. <https://doi.org/10.1002/2017JA024735>
6. McIlwain C.E. Ring current effects on trapped particles // *J. Geophys. Res.* 1966. V. 71. Iss. 15. P. 3623–3628. <https://doi.org/10.1029/JZ071i015p03623>
7. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968. 224 с. (Основы теоретической космофизики. Избранные труды. М.: УРСС, 2004. 336 с.)
8. Shprits Y.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P. et al. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: local acceleration and losses // *J. Atmospheric Solar-Terrestrial Physics*. 2008. V. 70. P. 1694–1713. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.014>
9. Xiao F., Yang C., He Z. et al. Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2014. V. 119. P. 3325–3332. <https://doi.org/10.1002/2014JA019822>
10. Zhang K., Li X., Schiller Q. et al. Detailed characteristics of radiation belt electrons revealed by CSSWE/REPTile measurements: Geomagnetic activity response and precipitation observation // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. Iss. 5. P. 8434–8445. <https://doi.org/10.1002/2017JA024309>
11. Tverskoy B.A. Main mechanisms in the formation of the Earth's radiation belts // *Reviews of Geophysics*. 1969. V. 7. Iss. 1–2. С. 219–231. <https://doi.org/10.1029/RG007i001p00219>
12. Parker E.N. Geomagnetic fluctuations and the form of the outer zone of the Van Allen radiation belt // *J. Geophys. Res.* 1960. V. 65. Iss. 10. P. 3117–3130. <https://doi.org/10.1029/JZ065i010p03117>
13. Тверская Л.В., Балашов С.В., Веденькин Н.Н. и др. Внешний радиационный пояс релятивистских электронов в минимуме 23-го цикла солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2012. Т. 52. № 6. С. 779–784.
14. Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А. Вариации энергичных частиц радиационных поясов во время сильной магнитной бури 24–26 марта 1991 года // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1993. Т. 33. № 6. С. 41–45.
15. Тверская Л.В. О границе инжекции электронов в магнитосферу Земли // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1986. Т. 26. С. 864–865.
16. Тверской Б.А. Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1997. Т. 37. № 5. С. 29–34.
17. Baker D.N., Erickson P.J., Fennell J.F. et al. Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. Iss. 17. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
18. Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A. et al. Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2005. V. 110. Art. ID. A03225. <https://doi.org/10.1029/2004JA010811>
19. Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М. и др. Ускорение электронов в магнитосфере свистовыми волнами переменной частоты // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2006. Т. 46. № 6. С. 711–716.
20. Ukhorskiy A.Y., Anderson B.J., Brandt P.C. et al. Storm time evolution of the outer radiation belt: Transport and losses // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2006. V. 111. Art. ID. A11S03. <https://doi.org/10.1029/2006JA011690>
21. Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M. et al. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // *Nature Physics*. 2012. V. 8. P. 208–212. <https://doi.org/10.1038/nphys2185>
22. Baker D.N., McPherron R.L., Cayton T.E., Kebede R.W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 R<sub>E</sub> // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 1990. V. 95. Iss. A9. P. 15133–15140. <https://doi.org/10.1029/JA095iA09p15133>
23. Kalegaev V., Kaportseva K., Myagkova I. et al. Medium-term prediction of the fluence of relativistic electrons in geostationary orbit using solar wind streams forecast based on solar observations // *Advances in Space Research*. 2023. V. 72. Iss. 12. P. 5376–5390. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.08.033>
24. Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С. Динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса во время геомагнитных возмущений разной интенсивности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61. № 3. С. 316–326. <https://doi.org/10.31857/S0016794021030184>
25. Vernov S.N., Gorchakov E.V., Kuznetsov S.N. et al. Particle Fluxes in the Outer Geomagnetic Field // *Reviews of Geophysics*. 1969. V. 7. Iss. 1–2. P. 257–280. <https://doi.org/10.1029/RG007i001p00257>

26. *Paulikas G.A., Blake J.B.* Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in *Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes* // Book Series: Geophysical Monograph Series 1979. V. 21. P. 180–186. <https://doi.org/10.1029/GM021p0180>
27. *Blake J.B., Baker D.N., Turner N. et al.* Correlation of changes in the outer-zone relativistic electron population with upstream solar wind and magnetic field measurements. // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. Iss. 8. P. 927–929. <https://doi.org/10.1029/97GL00859>
28. *Chen Z., Su Z., He Z. et al.* A rapid localized deceleration of Earth's radiation belt relativistic electrons driven by storm proton injection // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. Art. ID. e2022GL098810. <https://doi.org/10.1029/2022GL098810>
29. *Kropotkin A.P.* Relativistic electron transport processes associated with magnetospheric substorms // *Radiation Measurements*. 1996. V. 26. Iss. 3. P. 343–346. [https://doi.org/10.1016/1350-4487\(96\)00009-1](https://doi.org/10.1016/1350-4487(96)00009-1)
30. *Кропоткин А.П.* Об ускорении электронов внешнего радиационного пояса локальными электрическими полями // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61. № 4. С. 411–417. <https://doi.org/10.31857/S0016794021030093>
31. *Kim H.-J., Lee D.-Y., Wolf R. et al.* Rapid injections of MeV electrons and extremely fast step-like outer radiation belt enhancements // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. Art. ID. e2021GL093151. <https://doi.org/10.1029/2021GL093151>
32. *Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Антонова Е.Е. и др.* Анализ ускорения релятивистских электронов для интервала с магнитной бурей и без нее в мае–июне 2017 года // *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLV Annual Seminar. Apatity*. 2022. P. 28–31. <https://doi.org/10.51981/2588–0039.2022.45.006>
33. *Тверская Л.В.* Диагностика магнитосферы по релятивистским электронам внешнего пояса и проникновению солнечных протонов (обзор) // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. Т. 51. № 1. С. 8–24.