

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ НА НИЗКОШИРОТНУЮ ИОНОСФЕРУ

© 2020 г. М. Г. Голубков^{1*}, А. В. Суворова^{2,3}, А. В. Дмитриев^{2,3}, Г. В. Голубков^{1,4}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный центральный университет, Чонгли, Тайвань

³Институт ядерной физики им. Д.В. Скобелевича, Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: golubkov@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 07.05.2020;
после доработки 07.05.2020;
принята в печать 20.05.2020

Спутниковые эксперименты на малых высотах показали, что электроны и протоны с энергией, составляющей десятки кэВ, из радиационного пояса Земли вблизи экватора могут проникать в ионосферу. Вопрос о воздействии потоков этих частиц на верхние слои атмосферы и ионосферу вплоть до настоящего времени остается недостаточно изученным. В данной работе на примере магнитной бури 22 июля 2009 года исследуются локальные изменения концентрации ионосферных ионов в областях инъекций в низкоширотную ионосферу электронов и протонов с энергией, превышающей 30 кэВ. Показано, что увеличение концентрации в F-слое в утреннем секторе связано с дополнительной ионизацией быстрыми электронами. Ионосферные неоднородности, наблюдаемые в ночном секторе в виде сильных флуктуаций концентрации, вызваны воздействием протонов. Приведены результаты анализа солнечно-циклических и годовых вариаций частоты проникновения электронов и протонов из радиационного пояса Земли в низкоширотную ионосферу за период с 1998 по 2019 гг.

Ключевые слова: радиационный пояс Земли, энергичные электроны и протоны, ионосфера, концентрация ионов, низкие широты.

DOI: 10.31857/S0207401X20100064

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационный пояс Земли (РПЗ) является одним из источников ионизации и возбуждения нейтральных атомов и молекул верхней атмосферы [1]. Электроны и протоны с энергиями в десятки и сотни кэВ проникают из магнитосферы в мезосферу и ионосферу на высоты от 50 до 1000 км. Их высыпания из *внешнего* РПЗ на высоких (более 50°) широтах происходят во время геомагнитных возмущений, магнитных бурь и суббурь. Заряженные частицы, двигаясь вдоль магнитных силовых линий, достигают высот порядка 100 км, где быстро теряют энергию из-за эффективного рассеяния на нейтральных частицах среды.

На низких (менее 30°) широтах высыпания частиц постоянно наблюдаются в районе Бразильской магнитной аномалии (БМА) в интервале географических долгот 0°–100° з.д., где магнитное поле Земли ослаблено. Источником этих высыпаний является *внутренний* РПЗ. На долготах вне зоны БМА и

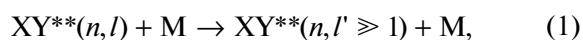
на малых высотах ниже внутренней кромки РПЗ (1000–1200 км) потоки быстрых частиц обычно невелики из-за рассеяния в плотной атмосфере, особенно в зоне БМА. Однако бывают случаи, когда под РПЗ на низких широтах наблюдаются интенсивные потоки таких частиц [2–6], источником которых, как показано в работе [6], является внутренний РПЗ.

Проникновение электронов с энергией, превышающей 30 кэВ, из РПЗ в низкоширотную ионосферу к настоящему времени достаточно подробно исследовано. Было установлено, что такие случаи происходят эпизодически вне зависимости от магнитных бурь [7], а иногда в совершенно спокойных геомагнитных условиях [8]. Этот неожиданный факт был подтвержден на основе 20-летней статистики в работе [9]. Проникновение протонов было исследовано не так подробно, однако в работе [8] было отмечено, что во время некоторых “электронных” событий протонов обнаружено не было.

Стоит отметить, что в низкоширотную зону попадают захваченные частицы в диапазоне энергий 10–300 кэВ [5]. Поскольку это захваченные частицы, а не выпадающие, они дрейфуют поперек геомагнитного поля по долготе в сторону БМА до 20 ч, где их зеркальные точки опускаются на высоты ниже 100 км, что приводит к их гибели — потере кинетической энергии в результате ионизации плотной атмосферы. Поэтому после попадания на высоты ниже РПЗ захваченные частицы становятся квазизахваченными, так как время их жизни ограничено одним оборотом вокруг Земли. В работе [5] было показано, что большие потоки квази-захваченных электронов разных энергий (30–300 кэВ) появляются в ионосфере одновременно, что указывает на действие механизма быстрого радиального переноса в скрещенных электрических и магнитных полях. В то же время этот механизм должен обеспечивать одновременное присутствие протонов, однако в ряде случаев этого по какой-то причине не происходило [8]. В настоящей работе рассматривается пример одновременного проникновения и электронов, и протонов в низкоширотную ионосферу во время геомагнитной бури.

Под воздействием потоков частиц из РПЗ локальные характеристики ионосферы и мезосферы могут существенно изменяться. При этом отклик средней и верхней атмосферы зависит от сорта и энергии частиц [10]. Так, электроны могут быть одним из ключевых факторов формирования ридберговских молекулярных комплексов на высотах 60–110 км [1], поскольку один электрон с энергией в 30 кэВ в процессе ионизации способен выбить порядка 10^3 тепловых электронов.

Ридберговские молекулы XY^{**} обладают одним возбужденным слабосвязанным электроном, состояние которого задается главным квантовым числом n и угловым моментом l относительно ионного остова. Энергии уровней с большими угловыми моментами не зависят от l , т.е. являются орбитально-вырожденными. Процесс, приводящий к образованию орбитально-вырожденных состояний:



называется l -перемешиванием [11]. В нейтральной среде верхней атмосферы реакция (1) протекает быстро и является необратимой, т.е. наибольшее число ридберговских частиц в плазме оказывается в орбитально-вырожденных состояниях. Взаимодействие с молекулами среды приводит к расщеплению уровней энергии этих состояний [12] и образованию ридберговских комплексов $XY^{**} - M$, где M — молекула азота или кислорода.

Как было показано в работе [13], оптические переходы между отщепленными и вырожденными состояниями ридберговских комплексов

$XY^{**} - M$, происходящие без изменения главного квантового числа ($\Delta n = 0$), приводят к сверхфоновому СВЧ-излучению в дециметровом диапазоне. Ридберговские комплексы являются причиной сбоев работы глобальных навигационных спутниковых систем [14–16], поскольку они приводят к задержкам сигнала за счет каскада резонансного перерассеяния на высоковозбужденных частицах среды. В связи с этим исследования особенностей динамики потоков частиц из внутреннего РПЗ на низких широтах становятся крайне актуальными. Также отметим, что выявленные недавно противоречия между классическим представлением об этой динамике и новыми экспериментальными данными привлекли внимание теоретиков [17], пытающихся найти и обосновать возможные механизмы инъекций в глубокие области внутренней магнитосферы, в том числе из внутреннего РПЗ в ионосферу.

Прямая связь между ростом потоков частиц и увеличением скорости ионизации ионосферы была экспериментально обнаружена и детально исследована в серии работ [10, 18–20], в которых на основе спутниковых измерений показана эффективность действия ионизирующих частиц на средних, высоких и полярных широтах, а также в окрестности БМА. Прямых сравнений результатов локальных измерений на низких широтах до сих пор не проводилось. Такой анализ впервые представлен в настоящей работе. Кроме того, исследования, проведенные в работах [4–6, 21, 22], доказали наличие интегрального эффекта от воздействия интенсивных потоков быстрых электронов, проникающих в ионосферу из внутреннего РПЗ, проявляющегося в виде повышения полного электронного содержания (ПЭС) в области низких широт.

В разд. 2 данной работы приведены спутниковые данные и коротко обсуждается методика их обработки. В разд. 3 представлены результаты наблюдений в ионосфере во время геомагнитной бури 22 июля 2009 года. Рассмотрены локальные изменения концентраций ионосферных ионов в областях инъекций в низкоширотную ионосферу электронов и протонов с энергией, превышающей 30 кэВ. В заключительной части разд. 3 приведен анализ солнечно-циклических и годовых вариаций частоты проникновения таких частиц из РПЗ в низкоширотную ионосферу за период с 1998 по 2019 гг.

2. СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Для исследования воздействия потоков частиц из РПЗ на низкоширотную ионосферу и атмосферу было проведено сравнение данных одновременных спутниковых измерений потоков электронов и про-

тонов с энергией, превышающей 30 кэВ, и концентрации ионов в ионосфере. Такие измерения проводились на низкоорбитальных спутниках NOAA/POES и C/NOFS соответственно. Базы данных спутниковых измерений доступны на сайте CDAWEB [23].

Измерения на спутнике C/NOFS проводились в период с 2008 по 2015 гг. Цель эксперимента заключалась в исследовании и прогнозировании сцинтилляций радиосигналов в ионосфере Земли [24]. Спутник C/NOFS был запущен на низкую эллиптическую орбиту с наклоном 13° , перигеем в 400 км и апогеем в 850 км. В настоящей работе использовались данные по локальной плотности заряженных частиц в низкоширотном F-слое, полученные с помощью комплекса научной аппаратуры CINDI, установленного на борту спутника C/NOFS.

Полярные спутники серии NOAA/POES с орбитой на высоте около 850 км проводят непрерывный мониторинг потоков заряженных частиц от экватора до полюса, начиная с 1998 г. и по настоящее время. С 2006 года одновременно летало 5–6 спутников в трех орбитальных плоскостях. На всех спутниках была установлена идентичная аппаратура для регистрации высыпающихся и захваченных электронов и протонов в широком диапазоне энергий (от 30 до нескольких МэВ) [25]. Для анализа были использованы данные по захваченным электронам и протонам с целью набрать статистику за период с 1998 по 2019 гг.

Методика обработки данных по событиям была подробно описана в работах [1, 9]. Здесь только отметим, что для долгосрочного анализа, включая солнечно-циклическую и годовую вариации, в качестве единичного события рассматривались полные сутки, в течение которых наблюдались возрастания потоков частиц в экваториальной ионосфере. А для кратковременного анализа (суточная вариация) рассматривались отдельные 15-минутные экваториальные пролеты спутников в интервале между 30° с.ш. и 30° ю.ш., во время которых наблюдались возрастания потоков частиц. В качестве критерия возрастания потока использовалась интенсивность, превышающая фон на два порядка: в случае электронов — больше 10^4 ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$) $^{-1}$, а в случае протонов — больше 10^3 ($\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$) $^{-1}$. В ходе предварительной обработки данных по протонам было обнаружено, что инжекции протонов происходят в периоды магнитных бурь и сопровождаются повышенным фоновым потоком, что определенно затрудняло отбор событий с инжекцией. Поэтому в анализе суточной вариации частоты протонных событий мы ограничились рассмотрением отдельных случаев с целью выявить основные тенденции.

Данные о потоках частиц сравнивались с поведением солнечной активности, которая характе-

ризуется числом солнечных пятен. Необходимая информация представлена на сайте Королевской обсерватории Бельгии WDC-SILSO. По этим данным можно определить, что период с 1998 по 2019 гг. начинается от фазы роста 23-го солнечного цикла и заканчивается поздней фазой спада 24-го солнечного цикла, т.е. включает в себя два солнечных максимума и аномально низкие солнечные минимумы 2009 и 2019 гг.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ионизирующее воздействие частиц с энергией, превышающей 30 кэВ, на низкоширотную ионосферу рассмотрено на примере геомагнитной бури 22 июля 2009 года. Для сравнения были использованы данные о локальной концентрации положительных ионов плазмы в возмущенный день (22.07.2009) и спокойный день (21.07.2009). Главная фаза магнитной бури развивалась с 2:00 до 6:00 UTC, затем последовала длительная фаза восстановления бури. На рис. 1 показаны временные профили концентрации ионов и соответствующие витки орбит спутника C/NOFS в географических координатах широта–долгота в интервале времени от 4:00 до 9:00 UTC для 22.07.2009 и 21.07.2009. На рис. 2 представлены аналогичные данные в интервале времени от 15:00 до 19:00 UTC.

Следует заметить, что результаты измерений физических параметров, полученные во время последовательных суток на соответствующих витках, можно сравнивать, несмотря на небольшое смещение проекции орбиты по долготе (около 15°). Орбита спутника находилась на высотах выше максимума F-слоя ионосферы. Спутник достигал апогея орбиты (850 км) в северном полушарии на вечерней стороне (около 19:00 LT) и перигея (400 км) в южном полушарии на утренней стороне (около 7:00 LT). Такая конфигурация орбиты позволяла наблюдать окрестности дневного креста экваториальной ионизационной аномалии (ЭИА).

Как видно из рис. 1 и 2, величина и характер вариаций концентрации ионов, наблюдаемых на главной фазе и фазе восстановления бури, имеют характерные отличия от аналогичных параметров для спокойных условий. Во-первых, локальные дневные концентрации в день бури (см. рис. 1а и рис. 2а) превышали соответствующие значения в спокойный день (см. рис. 1б и рис. 2б). Измерения на дневных пролетах отличаются характерным широким максимумом ионизации во временном профиле, тогда как в ночных пролетах наблюдается ярко выраженный минимум. Во-вторых, на главной фазе магнитной бури (рис. 1а) в ночные часы появились протяженные нерегулярные структуры с флуктуациями концентрации ионов на два порядка величины (так называемые ионосферные неоднородности). Подобные неоднородности в спокойный день отсутствовали.

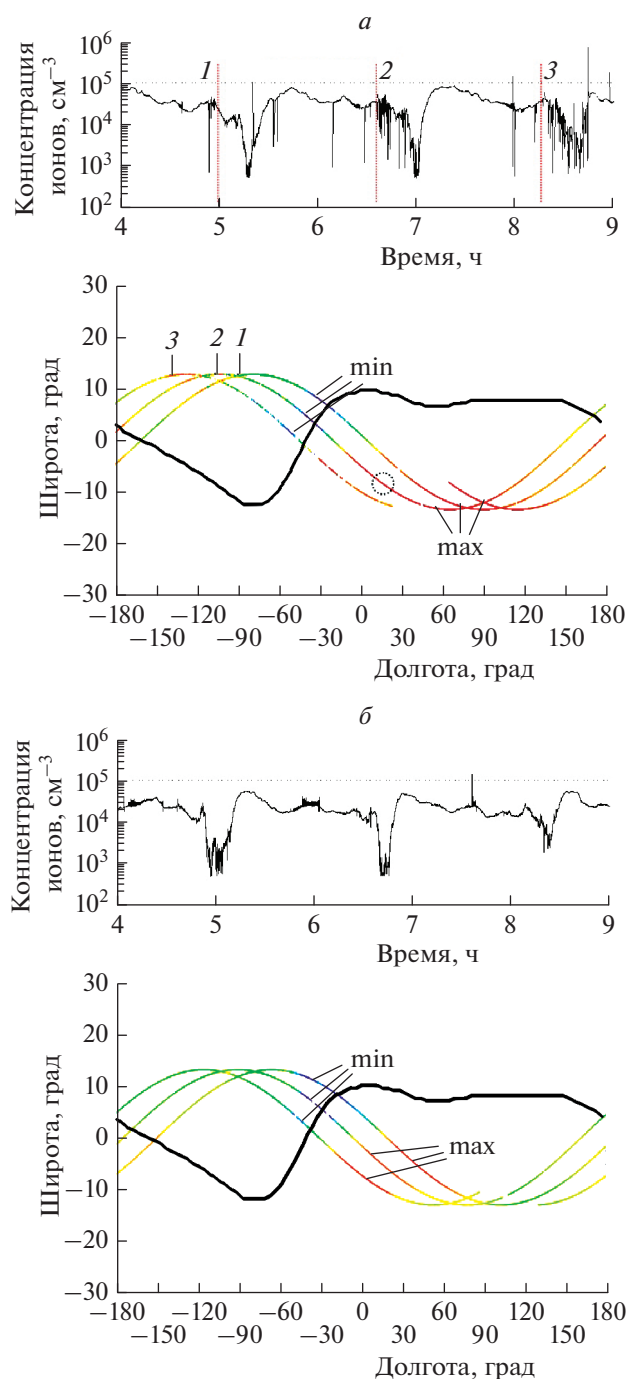


Рис. 1. Значения концентрации ионов плазмы, полученные по измерениям на спутнике C/NOFS в интервале времени от 04:00 до 09:00 UTC: *a* – возмущенный день 22.07.2009, *б* – спокойный день 21.07.2009. Внизу на картах в географических координатах широта–долгота изображены три последовательных витка спутника. В нижней части рисунка указаны области, соответствующие максимальной (max) и минимальной (min) концентрации ионов, измеренной вдоль орбиты спутника. Область максимальной концентрации обозначена кружком. Магнитный экватор обозначен жирной кривой.

Кроме того, они исчезли уже на фазе восстановления бури (рис. 2а).

Отклик ионосферы на магнитную бурю проявляется в развитии ионосферной бури как глобального явления. На низких широтах ионосферная буря начинается со значительного увеличения концентрации ионов n_i на дневной стороне, в основном после полудня. Это так называемая положительная фаза, которая динамично развивается уже на главной фазе магнитной бури и длится в среднем не более шести часов [26]. Согласно результатам исследования [6], буря 22 июля 2009 года имела аномально долгую положительную фазу и значительное протяжение по локальному времени с утра до полуночи. Кроме того, авторы [6] обнаружили продолжительную инжекцию захваченных электронов, совпадающую по времени и месту с развивающейся ионосферной бурей. Проведенные в работе [6] сопоставления указывали на прямое воздействие ионизирующих частиц на ионосферную F-область. Авторы [6] сделали вывод, что электроны с энергией, превышающей 30 кэВ, вызвали дополнительную ионизацию в локальных областях вблизи максимума F-слоя. В утренней и ночной ионосфере ионизация была настолько эффективной, что вполне могла имитировать положительную фазу. Необходимо отметить, что в [6] использовалась информация о вертикальном ПЭС, которую получают различными методами радиозондирования ионосферы с помощью глобальной сети GPS-спутников и наземных GNSS-приемников. Как правило, данные о ПЭС представлены с временным разрешением порядка 1–2 ч, а сама величина ПЭС является интегральной характеристикой по высоте. Поэтому для доказательства прямого ионизационного воздействия электронов с энергией, превышающей 30 кэВ, на ионосферу, проявившегося в виде увеличения ПЭС в утренней и ночной ионосфере, не хватало данных прямых измерений концентрации ионосферных ионов. В настоящей работе этот пробел восполнен путем сопоставления данных одновременных измерений как локальной концентрации ионов, так и потоков электронов и протонов из РПЗ.

3.1. Влияние потоков электронов на концентрацию ионов в ионосфере

Сравним концентрации ионов n_i для пары витков в 7:15 UTC дня возмущенной ионосферы и в 7:00 UTC дня спокойной ионосферы (см. рис. 1). В эти моменты n_i достигала максимальных значений на витке, так как с уменьшением высоты спутник приближался к F-слою, где концентрация ионов максимальна. В спокойных условиях n_i составляла $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$, а на ранней фазе восстановления магнитной бури она увеличилась до

$8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (на карте область выделена кружком). Оба измерения были сделаны в утреннем секторе (7:30–8:00 LT) на высоте около 415 км и долготах от 10° до 20° в.д., т.е. недалеко от восточной границы БМА. Отметим, что и на предыдущем витке в 5:45 UTC 22 июля 2009 года (во время главной фазы бури) также наблюдалось увеличение n_i . Можно предположить, что оно связано с положительной фазой ионосферной бури. В рамках стандартной модели положительная фаза ограничена в пределах послеполуденного и вечернего секторов с хорошо выраженной структурой дневного креста ЭИА [21]. Однако в приведенном примере положительная фаза наблюдалась и в раннем утреннем секторе. Это далеко не единственное противоречие между рассматриваемым событием и классической моделью положительной ионосферной бури.

На рис. 2 показаны результаты измерения n_i в интервале времени от 15:00 до 19:00 UTC на фазе восстановления магнитной бури и в спокойных условиях. В профиле концентрации ионов и на карте в день бури цифрами 4, 5, 6 отмечены моменты времени 15:20, 16:58 и 18:37 UTC, соответствующие максимальным значениям n_i . Причем во всех трех случаях высота спутника варьировалась в диапазоне 415–420 км, а время – в интервале 8:00–8:30 LT, т.е. данные по высоте и локальному времени были приблизительно одинаковыми. Измерения были проведены к западу от зоны БМА в интервале 105° – 150° з.д. (в день спокойной ионосферы – на 15° восточнее). Видно, что концентрация ионов в день бури превышает уровень n_i в спокойной ионосфере в 1.5–2 раза, что характерно для положительной ионосферной бури. Авторы работы [6] отмечали необычную динамику положительной фазы. После максимума магнитной бури в 6:00–8:00 UTC ионосферное возмущение постепенно угасло, но затем, начиная с 14:00 UTC, значения ПЭС снова стали расти в обширной области пространства, развиваясь в полноценную положительную ионосферную бурю. В локальных измерениях n_i (рис. 2а) это можно наблюдать в раннем утреннем секторе во время снижения геомагнитной активности. Полная длительность положительной фазы в этом событии составила около 20 ч, превышая среднюю величину (6 ч) в несколько раз.

Рассмотрим влияние фактора ионизирующих частиц в период развития положительной ионосферной бури 22 июля 2009 года. На рис. 3 и 4 показаны глобальные распределения потоков электронов с энергией, превышающей 30 кэВ, в интервалах времени 04:00–9:00 UTC и 15:00–19:00 UTC в день бури и в спокойный день. Во время магнитной бури (см. рис. 3а и 4а) потоки захваченных электронов за пределами БМА возросли на три порядка. Захваченные электроны регистрировались на высотах выше

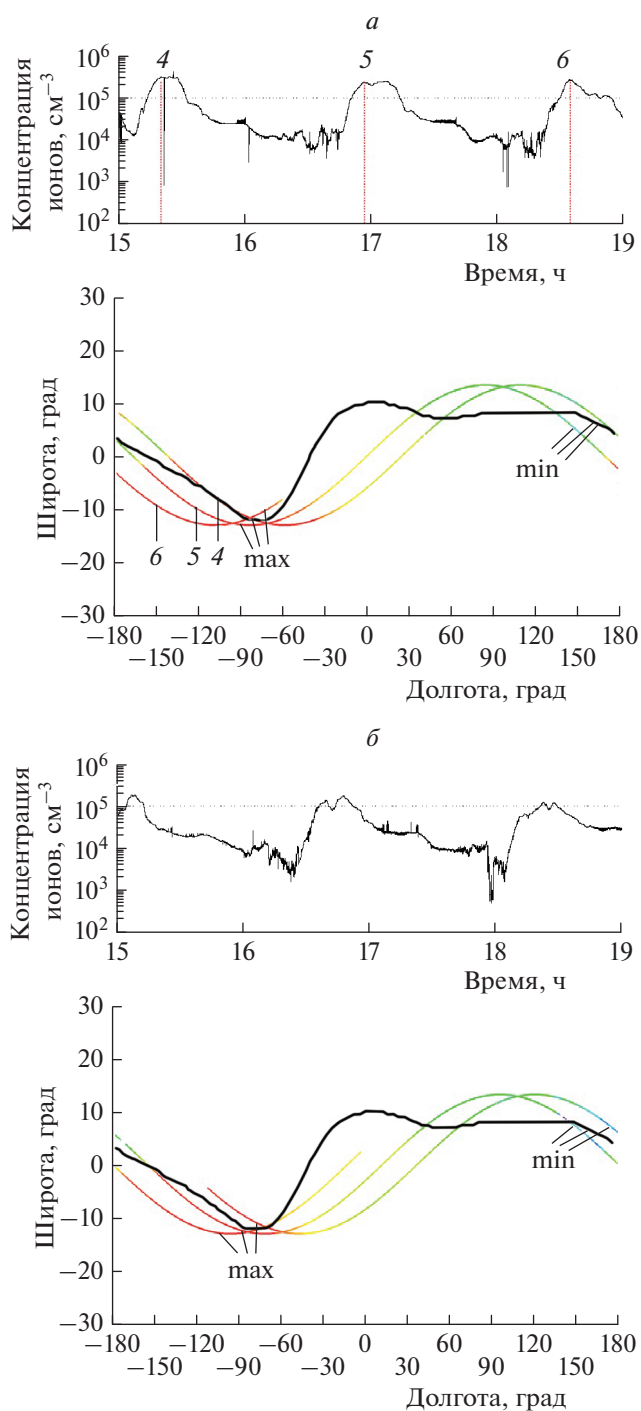


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для интервала времени от 15:00 до 19:00 UTC.

ионосферных измерений, однако какая-то их часть была способна беспрепятственно проникать вглубь до 400 км или даже 200 км, двигаясь вдоль магнитных силовых линий [1, 21].

При сравнении рис. 1а и 3а, а также рис. 2а и 4а видно, что область с увеличенными потоками электронов по времени и в пространстве совпа-

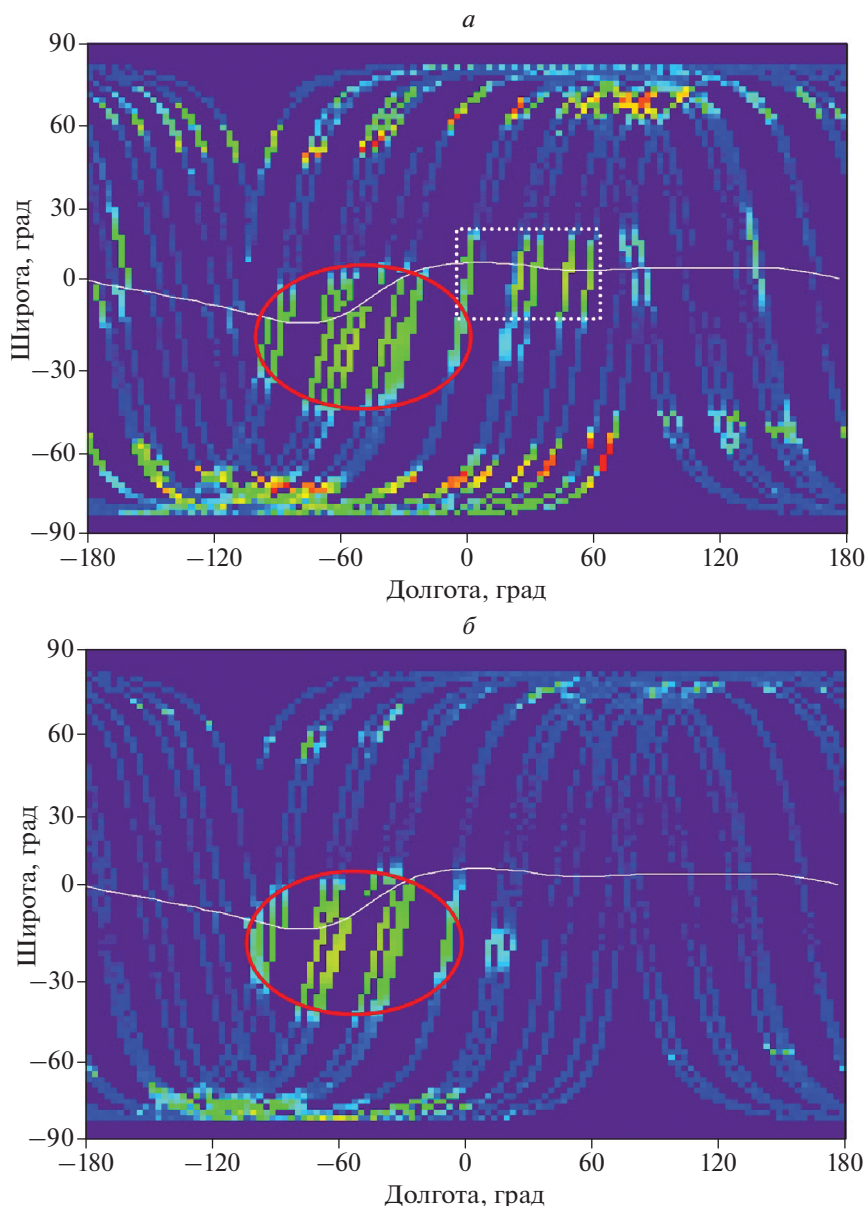


Рис. 3. Распределения потоков электронов с энергией, превышающей 30 кэВ, по измерениям на шести спутниках NOAA/POES на высоте 850 км в период времени с 04:00 до 09:00 UTC: *a* — в день бури 22.07.2009, *б* — в спокойный день 21.07.2009. Магнитный экватор обозначен кривой белого цвета. Интенсивные выпадения на низких широтах в окрестности БМА ограничены сплошным овальным контуром. Область восточнее границы БМА, где высокоэнергетичные электроны во время бури проникали в ионосферу, выделена точечным прямоугольником.

дает с локальной зоной повышенной концентрации ионов. Такое совпадение неслучайно и может служить прямым доказательством того, что увеличение n_i в утреннем секторе было вызвано воздействием интенсивных потоков электронов, проникших в ионосферу из РПЗ. Таким образом, факт дополнительной ионизации F-слоя под прямым воздействием интенсивных потоков электронов, проникающих из РПЗ в низкоширотную ионосферу, можно считать окончательно доказанным.

3.2. Влияние потоков протонов на концентрацию ионов в ионосфере

На рис. 1а в день бури ионосферные неоднородности представлены в виде частых и сильных флуктуаций n_i . Цифрами 1, 2, 3 отмечены моменты времени 05:00, 06:40, 08:15 UTC и соответствующее положение рядом с неоднородными структурами. Дополнительная информация по высоте и местному времени такова: цифре 1 соответствует высота $h = 727$ км и время 22:30 LT; цифре 2 — $h = 687$ км, 23:00 LT; цифре 3 — $h = 720$ км, 22:30 LT.

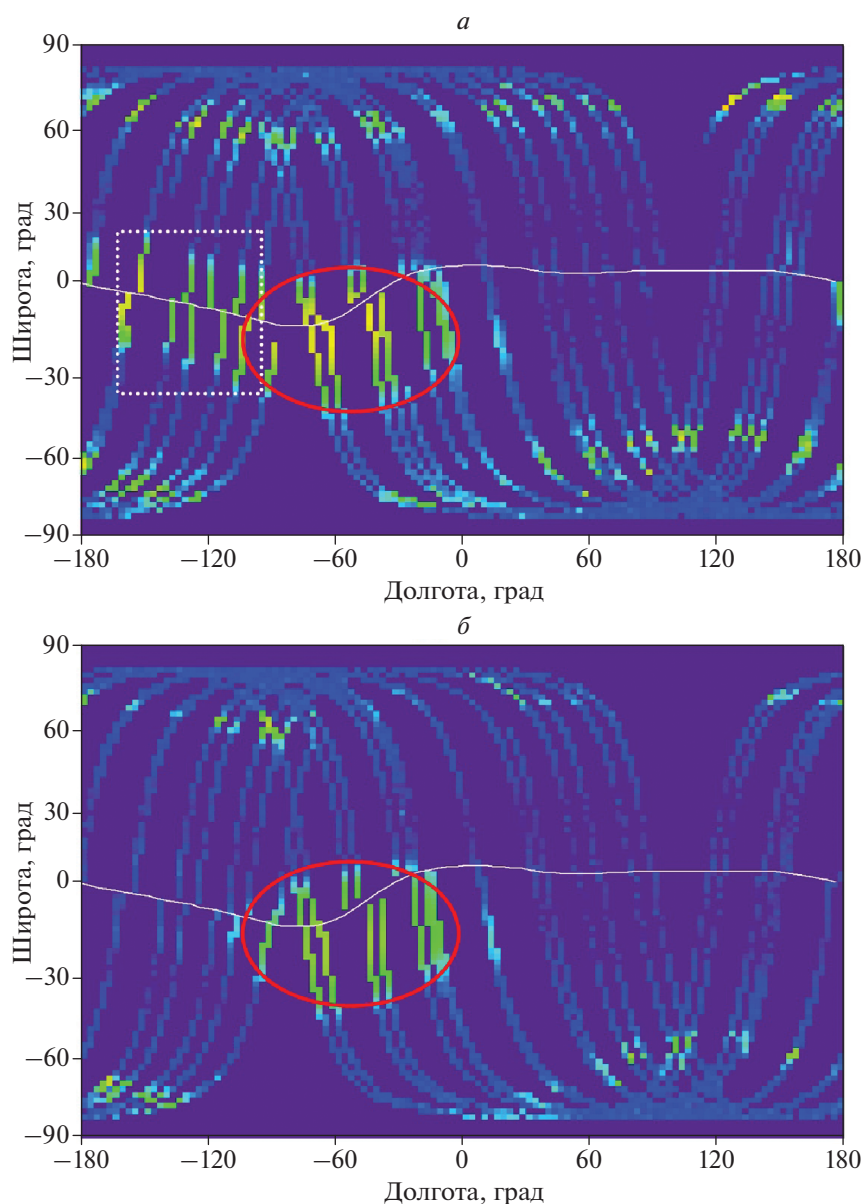


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для периода времени с 15:00 до 19:00 UTC.

Видно, что длительные интенсивные флуктуации регистрировались на участках двух последовательных витков: 2 — в интервале долгот 70° – 105° з.д. и 3 — в интервале долгот 70° – 140° з.д. Неоднородности наблюдались в ночном секторе с 23:00 до 03:00 LT на высотах выше максимума F-слоя (в диапазоне 500–700 км). Важно отметить, что на долготах от границы БМА до 160° з.д. в это время проникающие электроны не наблюдались (рис. 3а). В отличие от электронов, во время главной фазы бури протоны с энергией, превышающей 30 кэВ, проникают в ионосферу на всех широтах. Это связано с действием механизма перезарядки протонов кольцевого тока на нейтральных атомах.

Для анализа использовались данные по выпадающим и захваченным протонам.

На рис. 5 показаны глобальные распределения потоков протонов в интервале времени 04:00–09:00 UTC во время главной фазы бури и в спокойный день. Особое внимание следует обратить на потоки в низких широтах вне БМА. На карте видно, что наиболее интенсивные потоки регистрировались в интервале долгот 105° – 120° з.д. (см. область, выделенную точечной линией на рис. 5а). Согласно базе данных эксперимента измерения этих потоков проводились в интервале времени 5:00–6:00 UTC. Поток чуть меньшей интенсивности наблюдался на долготе 150° з.д. в

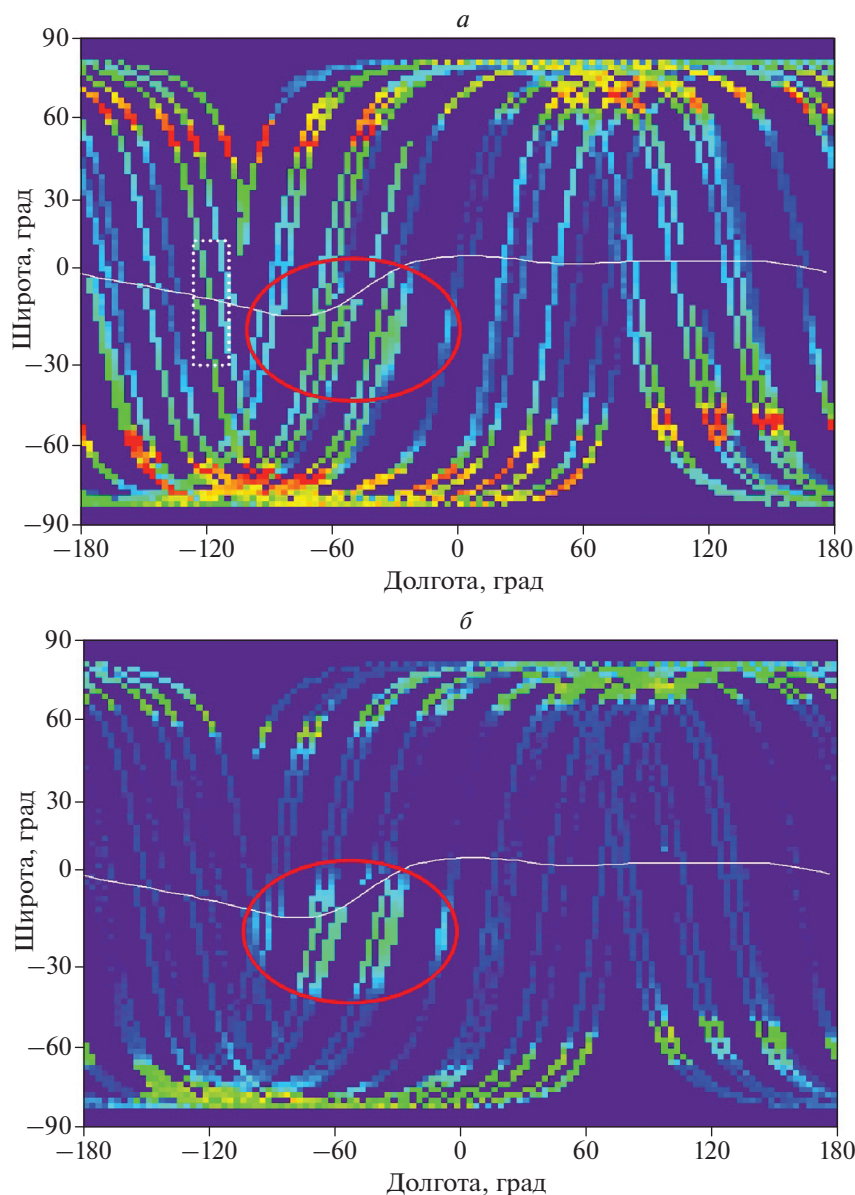


Рис. 5. Распределения потоков протонов с энергией, превышающей 30 кэВ, в период с 04:00 до 09:00 UTC: *a* — во время бури 22.07.2009, *б* — в спокойный день 21.07.2009. Область интенсивных высыпаний на низких широтах в окрестности БМА ограничена красным контуром. Белым пунктиром выделены области наиболее интенсивных потоков протонов вне зоны БМА. Магнитный экватор обозначен кривой белого цвета.

7:00 UTC. Местное время этих измерений соответствует 21:00–22:00 LT. Как видно, пространственные и временные параметры указанных областей с интенсивными потоками протонов согласуются с параметрами наблюдений плазменных неоднородностей (см. рис. 1*a* и рис. 5*a*). Потоки протонов внутри БМА на долготах 60°–70° з.д. в 2:00 LT также немного возросли. Можно предположить, что возросшие потоки протонов способствовали формированию локальных неоднородностей плазмы на высотах 500–700 км в ночном секторе вблизи и внутри БМА.

3.3. Статистика проникающих потоков электронов и протонов

В настоящем разделе приведены результаты статистического анализа проникновения в низкоширотную ионосферу потоков электронов с энергией, превышающей 30 кэВ, за период с 1998 по 2016 гг. [9], которые дополнены новыми данными за период с 2017 по 2019 гг. Кроме того, специально были отобраны аналогичные события для протонов. Полное число событий (суток) с возрастаниями потоков для электронов составило 966, а для протонов — 364. Существенное раз-

личие в статистике, как мы полагаем, связано с принципиально разными механизмами переноса частиц на низкие высоты и разной зависимостью этих механизмов от геомагнитной активности. На рис. 6 показаны *солнечно-циклические* вариации количества событий с возрастаниями потоков электронов и протонов в экваториальной ионосфере за временной период двух солнечных циклов. В частотах электронных и протонных событий сразу можно отметить антикорреляцию, которая сохраняется на протяжении двух циклов. Для электронов характерна следующая солнечно-циклическая закономерность: минимальное количество событий наблюдается во время солнечных максимумов (в периоды 2000–2001 и 2013–2014 гг.). Количество таких событий в обоих максимумах очень близки. Кроме того, следует учитывать, что число спутников в группировке NOAA/POES наращивалось постепенно: с 1 до 6, и в период с 1998 по 2001 гг. было минимальным. С началом фазы спада 23-го и 24-го солнечных циклов (2002 и 2014 гг.) частота электронных событий быстро растет. Приблизительно с середины фазы спада (2005–2006 гг. и 2017 г.) и до фазы минимума циклов (2009 и 2019 гг.) частота событий была наибольшей. Затем на фазе роста 24-го солнечного цикла (2010–2012 гг.) начинается медленное уменьшение частоты событий.

Для протонов, напротив, характерно практически синхронное колебание частоты событий с солнечными циклами. При этом число событий (суток) прямо пропорционально мощности цикла (максимальному числу Вольфа в цикле). Так, в более мощном 23-ем цикле произошло больше протонных событий. Из рис. 6 видно, что в отличие от протонов частота электронных событий с мощностью цикла связана слабо, либо не связана вовсе. Тем не менее стоит отметить, что мощность солнечного цикла оказывает влияние на величину потоков электронов [1]: в более мощном 23-ем цикле наблюдались максимальные потоки (возрастание на пять порядков величины над фоном). Что касается величины потоков протонов, то визуальный просмотр данных показал, что максимальный поток никогда не превышает трех порядков величины над фоном, а поток протонов контролируется исключительно мощностью геомагнитной бури.

Годовые вариации количества электронных и протонных событий (суток) показаны на рис. 7. Видно, что они антикоррелируют между собой. Статистика по электронным событиям была дополнена трехлетними наблюдениями в период 2017–2019 гг., но это привело лишь к несущественным изменениям формы распределения по месяцам [9]. Сохранился широкий главный максимум вероятности для электронных событий в период с мая по сентябрь и второй, более слабый пик в зимние месяцы (декабрь–февраль). Ранее в

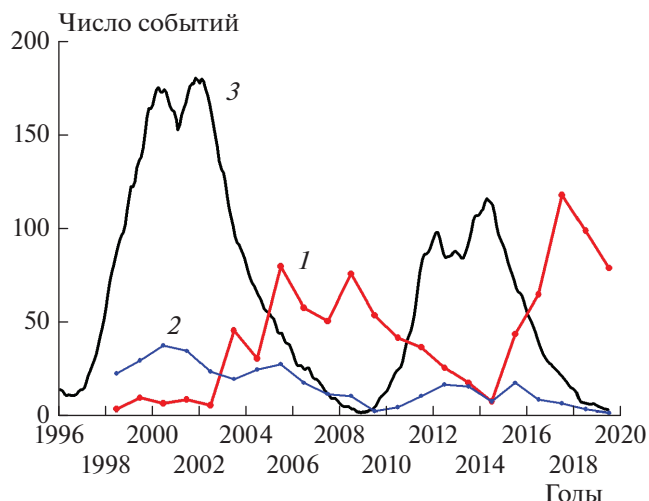


Рис. 6. Частоты возрастаний потоков частиц с энергией, превышающей 30 кэВ, в экваториальной ионосфере в периоды 23-го и 24-го солнечных циклов: 1 — электроны, 2 — протоны, 3 — среднегодовое число солнечных пятен (число Вольфа).

работе [9] было показано, что вероятность инжекций электронов не зависит от уровня геомагнитной активности, например от мощности магнитных бурь или суббурь. Ключевую роль для контроля процессов инжекции электронов из РПЗ в ионосферу играет неравномерное освещение авроральной ионосферы в течение года. Благодаря повышенной проводимости авроральной ионосферы на дневной стороне вероятность инжекции электронов на ночной стороне становится выше. Из-за наклона оси геодиполя и его несимметричности относительно земной оси “летний” максимум частоты событий превосходит “зимний”. Фактор солнечной активности (см. рис. 6) играет здесь роль триггера. Немалый вклад в этот процесс вносит рекуррентная геомагнитная активность на фазе спада солнечного цикла [1].

Из рис. 7 видно, что протонные события имеют два равноценных максимума весной и осенью и два минимума летом и зимой. Хорошо известно, что такая же сезонная зависимость характерна и для геомагнитной активности [27]. Кроме того, из проведенного анализа протонных событий и геомагнитных условий следует, что протоны проникают в ионосферу во время магнитных бурь, причем наиболее интенсивные потоки наблюдаются на главной фазе бури.

Суточные вариации для электронов были исследованы ранее в работе [9], где было показано, что электроны инжектируются в ночном секторе с 2:00 до 7:00 LT. Этот результат сохранился и для новой статистики. В случае с протонами полноценный анализ с автоматической процедурой отбора провести не удалось из-за слишком больших

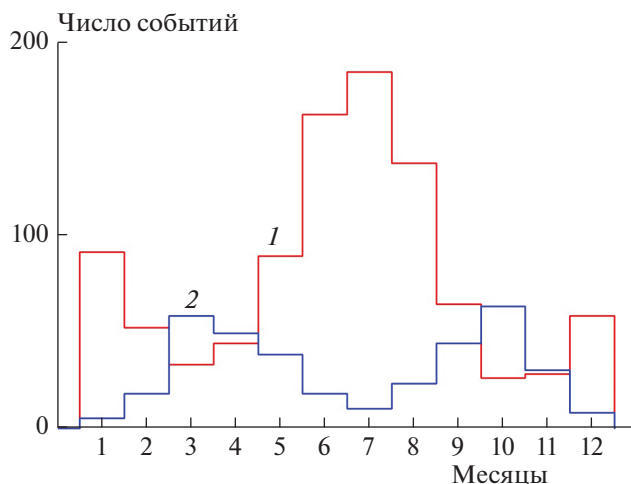


Рис. 7. Гистограммы годовых событий (дней) возрастаний потоков частиц с энергией, превышающей 30 кэВ, в экваториальной ионосфере в периоды 23-го и 24-го солнечных циклов: 1 — электронные события, 2 — протонные события.

фоновых потоков. Поэтому было рассмотрено большое количество отдельных случаев, детальный анализ которых показал, что первые, наиболее интенсивные потоки протонов всегда появлялись в вечернем секторе. Из этого следует, что наблюдаемые протоны связаны с интенсификацией кольцевого тока во время магнитной бури, когда нарастание мощности кольцевого тока, носителем которого являются энергичные протоны, начинается с полуночного сектора и распространяется на вечер, поскольку в поле гео диполя протоны дрейфуют в западном направлении. Поэтому в результате процесса перезарядки протоны достигают высот ионосферы на низких и средних широтах сначала в вечернем секторе.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно последним исследованиям влияния магнитосферы на ионосферу интенсивные потоки заряженных частиц из радиационного пояса Земли могут проникать в ионосферу на низких широтах и играть важную роль в процессах, связанных с ионизацией F-слоя. В данной работе на примере магнитной бури 22 июля 2009 года проведен сравнительный анализ спутниковых данных по измерению концентрации ионов в ионосфере и потоков частиц РПЗ в верхних слоях низкоширотной ионосферы. Во время магнитной бури наблюдалась длительная инжекция электронов с энергией, превышающей 30 кэВ, в раннем утреннем секторе. Одновременно с этим и в той же области концентрация ионов увеличилась по сравнению со спокойными условиями. Таким образом, экспериментальные данные являются прямым

доказательством существования ионизирующего эффекта от интенсивных потоков электронов на низких широтах в утреннем секторе. Подтверждено высказанное ранее предположение, что этот эффект наиболее сильно проявляется на высотах вблизи точек отражения электронов, т.е. вблизи максимума F-слоя (около 400 км). Также исследовано влияние протонов, которые интенсивно высыпались ночью из кольцевого тока и РПЗ в ионосферу на главной фазе бури. Практически одновременно в ионосферных наблюдениях обнаружены обширные области нерегулярных структур. Предполагается, что воздействие на ионосферу протонов с энергией, превышающей 30 кэВ, приводит к возникновению плазменных неоднородностей в ночном секторе на высотах верхней ионосферы (около 700 км). Механизм появления неоднородностей пока не ясен, и требуются его дальнейшие исследования.

Сравнительный анализ солнечно-циклических и годовых вариаций вероятности появления потоков энергичных электронов и протонов в ионосфере показал основные различия между этими двумя видами событий. Установлено, что вероятность протонных событий напрямую связана с частотой геомагнитных бурь и ростом солнечной активности. Однозначная зависимость частоты электронных событий от геомагнитной и солнечной активности нами не выявлена. Определено, что вероятности протонных и электронных событий антикоррелируют между собой.

Авторы благодарят подразделение Полярных орбитальных космических спутников NOAA/POES за предоставление экспериментальных данных об энергетических частицах, ресурс CDAWEB за предоставление данных эксперимента C/NOFS, а также данных об условиях в гелиосфере.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер AAAA-A19-119010990034-5). Работа А.В. Суворовой поддержана грантом MOST 108-2811-M-008-518, работа А.В. Дмитриева поддержана грантом MOST 108-2111-M-008-035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 10. С. 72.
2. Красовский В.И., Кушнир Ю.М., Бордовский Г.А. и др. // Искусств. спутн. Земли. 1958. № 2. С. 59.
3. Asikainen T., Mursula K. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № 16. L16102.
4. Suvarova A.V., Tsai L.-C., Dmitriev A.V. // Planet. Space Sci. 2012. V. 60. № 1. P. 363.
5. Suvarova A.V., Dmitriev A.V., Tsai L.-C. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. № 7. P. 4672.
6. Suvarova A.V., Huang C.-M., Matsumoto H. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2014. V. 119. № 11. P. 9283.

7. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V.* // Cyclonic and Geomagnetic Storms: Predicting Factors, Formation and Environmental Impacts / Ed. Banks V.P. New York: NOVA Sci. Publ. Inc., 2015. P. 19.
8. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Parkhomov V.A.* // Ann. Geophys. 2019. V. 37. № 6. P. 1223.
9. *Suvorova A.V.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 12. P. 12274.
10. *Dmitriev A.V., Yeh H.-C., Chao J.K. et al.* // Ann. Geophys. 2006. V. 24. № 5. P. 1469.
11. *Голубков Г.В., Иванов Г.К., Балашов Е.М. и др.* // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. Вып. 1. С. 100.
12. *Голубков Г.В., Иванов Г.К., Голубков М.Г.* // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 6. С. 3.
13. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // ДАН. 2013. Т. 452. № 5. С. 510.
14. *Голубков Г.В., Манжелей М.И., Карпов И.В.* // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 5. С. 55.
15. *Голубков Г.В., Голубков М.Г., Манжелей М.И.* // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 64.
16. *Kuverova V.V., Adamson S.O., Berlin A.A. et al.* // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1876.
17. *Selesnick R.S., Su Y.-J., Sauvaud J.-A.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2019. V. 124. № 7. P. 5421.
18. *Dmitriev A.V., Yeh H.-C.* // Ann. Geophys. 2008. V. 26. № 4. P. 867.
19. *Dmitriev A.V., Yeh H.-C.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2008. V. 70. № 15. P. 1971.
20. *Dmitriev A.V., Tsai L.-C., Yeh H.-C. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. № 22. L22108.
21. *Suvorova A.V., Huang C.-M., Dmitriev A.V. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. № 6. P. 5880.
22. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Klimenko M.V. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. № 2. P. 2398.
23. URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html>
24. *de La Beaujardière O., Jeong L., Basu B. et al.* // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2004. V. 66. № 17. P. 1573.
25. *Evans D.S., Greer M.S.* Polar orbiting environmental satellite space environment Monitor: 2. Instrument descriptions and archive data documentation. Tech. Memo V. 1.4. Colorado: NOAA Space Environment Laboratory, 2004.
26. *Mendillo M.* // Rev. Geophys. 2006. V. 44. № 4. RG4001.
27. *Russell C.T., McPherron R.L.* // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 1. P. 92.