

УДК 550.385

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ БАЛЛОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЯРНЫХ СПУТНИКОВ 1–6.II.2015

© 2021 г. А. Д. Кугушева<sup>1</sup> \*, В. В. Калегает<sup>1</sup>, Н. А. Власова<sup>1</sup>, К. А. Петров<sup>1</sup>,  
Г. А. Базилевская<sup>2</sup>, В. С. Махмутов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

\*kugusheva.ad@gmail.com

Поступила в редакцию 03.03.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Представлены результаты анализа пространственно-временных характеристик и динамики высыпаний магнитосферных электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ. По данным о потоках электронов, измеренных вертикальным и горизонтальным детекторами на спутниках *Meteor M2*, *POES-18* и *POES-19*, были идентифицированы высыпания частиц, соответствующие событию, зарегистрированному в ходе баллонного эксперимента ФИАН 2.II.2015. Высыпания обнаружены на *L*-оболочках от 4 до 8 в широком диапазоне *MLT*. Определены области в приэкваториальной магнитосфере, где преимущественно действуют механизмы, ответственные за рассеяние электронов и их вторжение в атмосферу Земли в ходе исследуемого события.

DOI: 10.31857/S0023420621060054

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из проявлений динамики магнитосферы Земли являются высыпания в атмосферу энергичных электронов внешнего радиационного пояса. Как правило, высыпания наблюдаются во время геомагнитных возмущений, в ходе которых происходит, как ускорение заряженных частиц, так и рассеяние захваченных электронов внешнего радиационного пояса и их высыпание в конус потерь [1–3]. Оба этих процесса могут быть результатом развития волновой активности в магнитосфере [4, 5].

Вариации внешнего электронного РП могут происходить при сохранении адиабатических инвариантов при условии относительно медленных изменений геомагнитного поля по сравнению с характерными временами движения электронов. При этом могут регистрироваться изменения потоков электронов, не связанные с реальными потерями или ускорением частиц.

Наряду с адиабатическим механизмом вариаций потоков захваченных электронов в радиационных поясах присутствуют и процессы, приводящие к реальным потерям. Понижение потока электронов внешнего радиационного пояса может происходить либо за счет потерь на магнито-

паузе, либо, при рассеянии в конус потерь и высыпания в атмосферу [6, 7].

Рассеяние электронов в конус потерь связано с нарушением адиабатичности движения частиц либо в области малого радиуса кривизны магнитного поля [8], либо при взаимодействии с низкочастотными волнами. Резонансное взаимодействие между электронами и ОНЧ волнами [9] и быстрая, меняющаяся во времени, радиальная диффузия электронов под воздействием УНЧ волн [10] рассматриваются в качестве главных механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий.

Потери частиц во время геомагнитной бури происходят вследствие питч-угловой диффузии при взаимодействии частиц с волнами [11]. Изменение питч-углового распределения захваченных частиц, приводящее к их высыпанию в атмосферу из конуса потерь, происходит в результате резонансного взаимодействия с низкочастотными волнами: магнитосферными хорами, плазмасферными шипениями, электромагнитными ионно-циклотронными волнами и др. [13–15].

Высыпания энергичных электронов могут регистрироваться непосредственно на полярных низковисотных ИСЗ, например на аппаратах серий *POES* и *Meteor*. В то же время баллонные

эксперименты также позволяют обнаруживать вторжения энергичных электронов по рентгеновскому тормозному излучению на высотах 20–30 км [16, 17].

Физический институт им. П.Н. Лебедева регистрирует высыпания магнитосферных электронов ( $E > \sim 100$  кэВ) в атмосферу Земли с 1961 г. по настоящее время в ходе долговременного аэростатного эксперимента по изучению потоков заряженных частиц в Мурманской области ( $L = 5.5$ ) [17]. Эти данные являются самым длинным однородным рядом подобных измерений и позволяют исследовать долговременные вариации высыпаний энергичных электронов в атмосферу. В то же время, в связи с тем, что аэростатные эксперименты, как правило, кратковременны, нерегулярны, и привязаны к долготно-ограниченной области над земной поверхностью, они регистрируют события, магнитосферные источники которых располагаются в узком секторе MLT. Таким образом, остаются непонятными магнитосферные источники высыпаний, их пространственные и временные характеристики. Спутниковые измерения потоков высыпавшихся энергичных электронов на полярных орбитах позволяют существенно обогатить и дополнить данные аэростатных экспериментов. Одновременные наблюдения высыпаний энергичных электронов в разных секторах MLT на разных высотах, их сопоставление с характеристиками межпланетной среды и геомагнитными вариациями позволяют лучше понять физические механизмы этого явления, установить магнитосферные источники высыпаний и их связь с параметрами солнечного ветра и состоянием магнитосферы.

В настоящей работе было выполнено детальное исследование события из базы данных ФИАН, зарегистрированного 2.II.2015. С использованием данных измерений потоков электронов на ИСЗ *Meteor M2*, *POES-18* и *POES-19* были определены пространственные масштабы и истинная длительность этого события и восстановлена глобальная динамика высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ в течение периода 1–6.II.2015.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения пространственно-временных характеристик высыпаний энергичных электронов были использованы данные одновременных измерений полярных низкоорбитальных космических аппаратов *Meteor M2* (Росгидромет РФ) и *POES* (NOAA, USA). Орбиты спутников – солнечно-синхронные, что означает, что в течение всей их работы в космическом пространстве плоскость орбиты сохраняет ориентацию по локальному времени.

### 1) *Meteor M2*

Российский ИСЗ, движется по круговой солнечно-синхронной орбите высотой 825 км и наклонением  $98.8^\circ$ . Период обращения спутника составляет 101.4 мин, таким образом, за сутки совершается 14 оборотов вокруг Земли. Орбита спутника располагается в предполуденном-предполуночном секторе по локальному времени.

На спутнике установлены несколько детекторов заряженных частиц, в том числе, горизонтальный MGS1-M (ДАС4,  $90^\circ$ ) и вертикальный SKL-M (ДАС4,  $0^\circ$ ). Эти детекторы предоставляют данные о потоках электронов с энергиями от 100 кэВ до 8 МэВ. На высоких широтах вертикальный детектор направлен, примерно, вдоль магнитного поля, на приэкваториальных широтах – ортогонально полю. С изменением широты меняется относительная ориентация детекторов и магнитной силовой линии. На высоких широтах горизонтальный детектор регистрирует, преимущественно, захваченные частицы, вертикальный – высыпавшиеся.

Обычно, в области внешнего радиационного пояса наблюдается анизотропное распределение частиц, когда вертикальный детектор регистрирует потоки, на 4–5 порядков ниже, чем горизонтальный. Рассеяние частиц в магнитосфере, связанное с геомагнитной и волновой активностью, приводит к изотропизации потоков частиц, при этом оба детектора регистрируют близкие потоки. Характеристики орбиты позволяют получать данные о потоках электронов внешнего радиационного пояса (на  $L \sim 4-7$ ) четыре раза за каждый оборот. На рис. 1 приведен пример измерений потоков электронов с энергиями выше 100 кэВ за полный оборот спутника вертикальным и горизонтальным детекторами. Можно видеть четыре пересечения внешнего радиационного пояса и возрастания потоков по измерениям вертикального детектора, свидетельствующие о высыпаниях электронов.

### 2) *Polar Operational Environmental Satellites (POES)*

POES представляет собой группу полярно-орбитальных спутников (на данный момент функционируют три из них: *POES-15*, *POES-18*, *POES-19*), движущихся по круговым солнечно-синхронным орбитам.

В настоящей работе использованы данные от двух спутников: *POES-18* и *POES-19*. Их орбиты расположены на высоте 854 км над Землей, период обращения составляет 102 мин, наклонение  $\sim 100^\circ$ . Положение плоскости орбиты – послеполуденное – послеполуночное (*POES-19*) и утреннее – вечернее (*POES-18*). Таким образом, вместе с *Meteor M2* эти спутники обеспечивают полный и приблизительно-равномерный охват по секторам MLT.

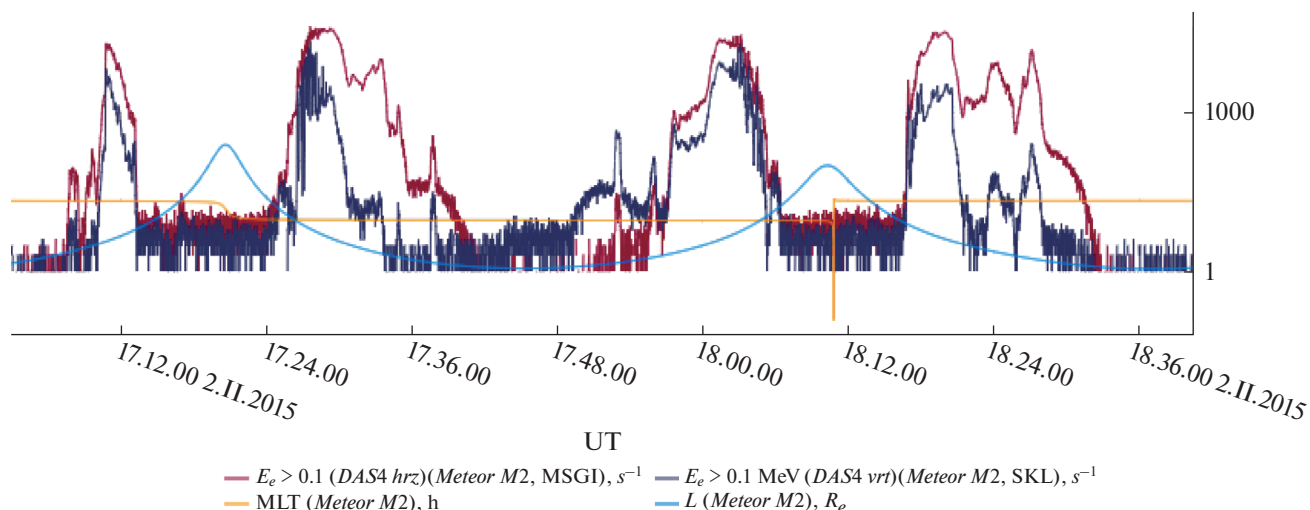


Рис. 1. График потоков электронов, измеренных ИСЗ *Метеор М2* за полный оборот.

На спутниках установлен детектор *MEPED*, регистрирующий потоки электронов в диапазоне энергий 30 кэВ–2.5 МэВ по горизонтальному и вертикальному направлениям.

Одновременные измерения *Метеор М2*, *POES-18* и *POES-19* позволяют за 100 мин обследовать состояние внешнего радиационного пояса в 6 разрезах по *MLT* (приблизительно, вблизи направлений на 2, 6, 10, 14, 18 и 22 ч).

### 3) *ACE*

Американский космический аппарат находится в точке Лагранжа *L1* между Солнцем и Землей. Комплекс инструментов на аппарате позволяет осуществлять широкий набор наблюдений, в том числе, параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Одновременные измерения полярных КА и спутника *ACE* позволяют выяснить причинно-следственные связи между состоянием межпланетной среды и потоками электронов внешнего РПЗ. В настоящее время, для измерений параметров солнечного ветра используется аппарат *DISCOVER*, также располагающийся в окрестности точки *L1*.

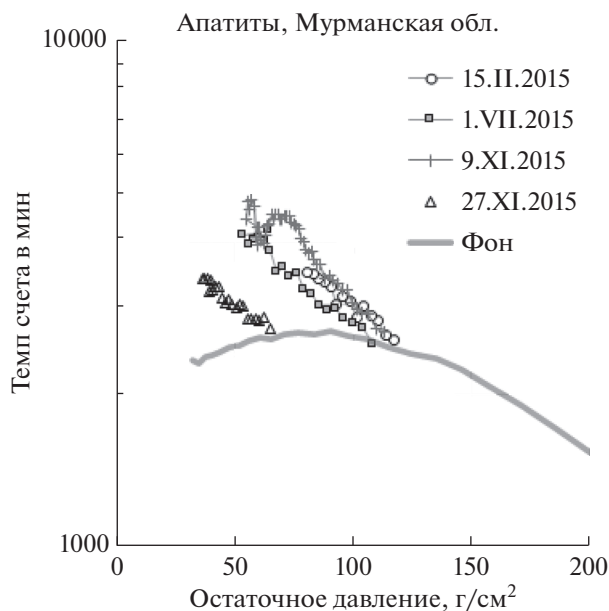
### 4) Аэростатные данные

Физический институт им. П.Н. Лебедева регистрирует высыпания магнитосферных электронов ( $E > \sim 100$  кэВ) в атмосферу Земли с 1961 г. по настоящее время в ходе длительного эксперимента по изучению высыпаний заряженных частиц в верхней атмосфере [17, 18]. На высотах выше 20 км возможна регистрация тормозного рентгеновского излучения, вызванного взаимодействием энергичных электронов с атомами атмосферы. Ниже 20 км рентгеновское излучение поглощается атмосферой, поэтому такие наблюдения можно осуществить только на больших высотах, например, с помощью аэро-

ставов. Интенсивность излучения позволяет косвенно регистрировать события, приводящие к формированию потоков высыпающихся из магнитосферы электронов.

Измерения в атмосфере Земли проводятся стандартным радиозондом космических лучей. Детекторами служат гейгеровский счетчик и телескоп из двух счетчиков. Электроны, высыпающиеся из магнитосферы, поглощаются на высоте более 50 км, но они генерируют тормозное излучение, которое регистрируется одиночным счетчиком, чувствительным к рентгеновскому излучению ( $E > 20$  кэВ) с эффективностью  $\sim 1\%$ . Повышение темпа счета радиозонда во время высыпаний электронов отличается от эффекта вторжения в атмосферу солнечных протонов отсутствием возрастания на телескопе и сильными вариациями потока частиц. Повышение темпа счета, как правило, начинается при подъеме зонда на высоты более 20 км. Вычитая из данных одиночного счетчика фон, образованный галактическими космическими лучами, оцененный по результатам предыдущих полетов радиозонда, можно получить зависимость темпа счета от давления остаточной атмосферы. На рис. 2 приведены примеры высыпаний, зарегистрированных в ходе экспериментов в феврале, июле и ноябре 2015 г.

В настоящей работе использовалась база данных, созданная сотрудниками ФИАН по высыпаниям электронов внешнего радиационного пояса Земли [18], зарегистрированным в 2015–2017 гг. в ходе аэростатных экспериментов в Мурманской области ( $L = 5.5$ ). Для детального анализа магнитосферных источников высыпаний было отобрано событие 2.11.2015. Критериями отбора были: интенсивный характер высыпаний, высокие энергии электронов, наличие моментов времени,



**Рис. 2.** Наблюдения высыпаний на баллонах в атмосфере над Мурманской областью в 2015 г. Серым цветом показан фон от галактических космических лучей, возрастания над фоном соответствуют нескольким событиям, зарегистрированным в 2015 г.

при которых ИСЗ *Метеор М2* в момент регистрации высыпаний находился вблизи Мурманской области или в магнитосопряженной точке.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

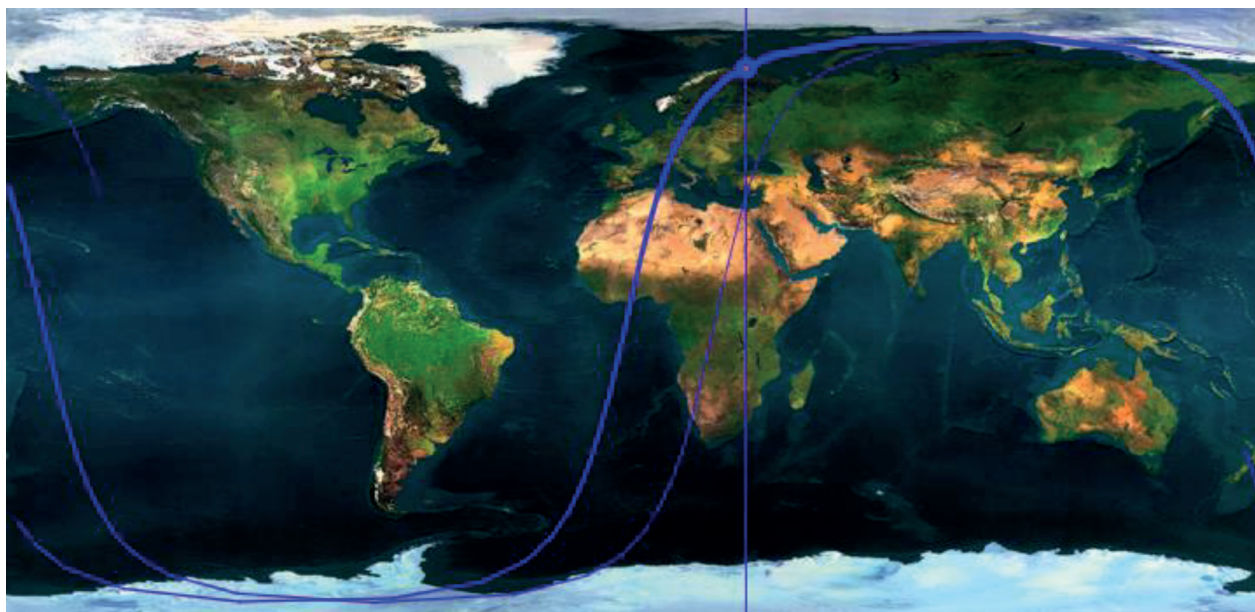
Согласно информации, приведенной в базе данных физического института им. П.Н. Лебеде-

ва, 2.II.2015 в диапазоне от 12.59 до 13.12 UT над территорией Мурманской области (на  $L = 5.5$ ) в ходе баллонного эксперимента было зарегистрировано рентгеновское излучение, предположительно связанное с рассеянием захваченных электронов в конус потерь и их высыпанием в атмосферу из внешнего радиационного пояса. Магнитное локальное время точки наблюдений в 13.00 UT составляло  $\sim 16$  ч.

По регистрации возрастаний потоков электронов, измеренных вертикальным детектором на ИСЗ *Метеор М2*, были идентифицированы высыпания частиц, происходившие в течение нескольких дней, и, предположительно соответствующие событию, обнаруженному в ходе аэростатных наблюдений. Следует ожидать, что рентгеновское излучение, зарегистрированное 2.II.2015, является частью глобального события в период от 16.38 UT 1.II.2015 до 14.26 UT 6.II.2015, в ходе которого высыпания регистрировались ИСЗ *Метеор М2* на  $L$ -оболочках от 4 до 7.

В ходе данного события наблюдались локализованные по широте возрастания потоков электронов с энергиями от 100 до 700 кэВ, измеренные вертикальным детектором SKL.

При помощи данных об орбите спутника были найдены максимально близкие к событию баллонной регистрации рентгеновского излучения моменты времени для ИСЗ *Метеор М2*, когда он находился непосредственно над областью регистрации высыпаний в ходе баллонного эксперимента, при этом на самом спутнике также наблюдались высыпания электронов. Рис. 3 показывает положение спутника в 08.56 UT 2.II.2015.



**Рис. 3.** Положение спутника *Метеор М2* 2.II.2015 в 08.56 UT.

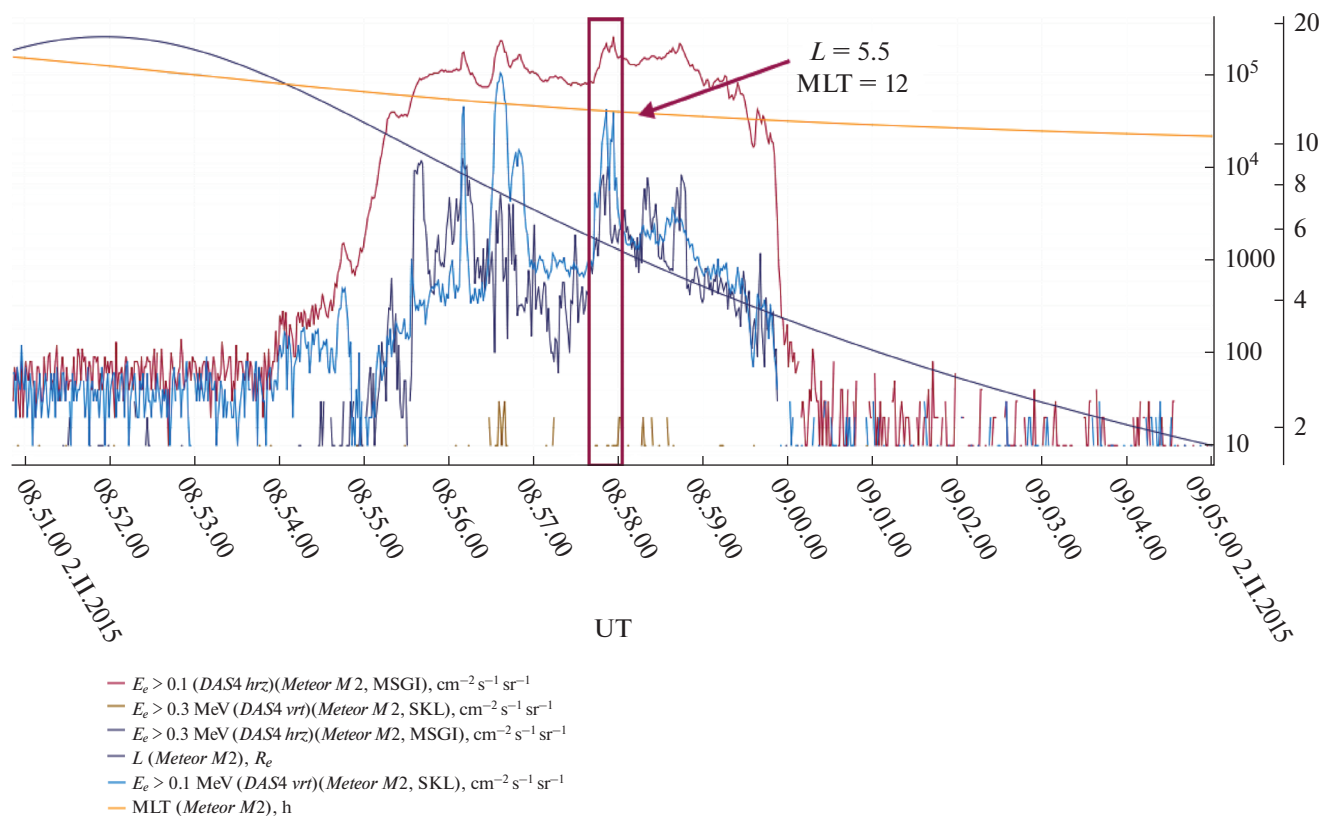


Рис. 4. Данные о потоках электронов в этот же момент времени.

На рис. 4 представлен временной профиль потоков частиц 0.1 и 0.3 МэВ, измеряемых детекторами MSGI и SKL на ИСЗ *Meteor M2*. Можно видеть возрастания потоков высыпавшихся электронов на магнитной оболочке  $L = 5.5$  в 08.56 UT 2.11.2015, до наблюдений на баллоне. Следует отметить, что из-за особенностей солнечно-синхронной орбиты ИСЗ *Meteor M2*, ему, в принципе, невозможно оказаться над Мурманской областью в момент запуска аэростата UT = 13 ч. Как уже упоминалось, его орбита лежит в плоскости предполуденных-предполуденных MLT.

Для лучшего понимания причин и источников высыпаний рассмотрим условия в околоземном пространстве. Из графиков (рис. 5) видно, что вечером 1.11.2015 началось понижение индекса  $Dst$ , который достиг минимального значения  $-46$  нТл в 19.00 UT 2.11.2015, что свидетельствует о развитии слабого геомагнитного возмущения. Можно видеть, что триггером возмущения стала вариация  $B_z$ -компоненты ММП, которая вечером 1.11.2015 приняла южное направление.

В солнечном ветре регистрируется скачок давления, и происходит возрастание скорости солнечного ветра с 400 до 700 км/с, которое затем спадает в течение трех суток. Эти события и повлекли за собой развитие бури, фаза восстановления которой длилась 4 дня. Также наблюдаются

флуктуации аврорального  $AE$ -индекса, соответствующие началу высыпаний.

По данным низкоорбитальных спутников высыпания электронов начались уже на начальной фазе бури. На рис. 6а представлены координаты источников высыпаний электронов с энергиями выше 0.1 и выше 0.3 МэВ, зарегистрированных ИСЗ *Meteor M2*, в течение начальной фазы возмущения. Используется полярная система координат, где в качестве радиальной переменной выступает  $L$ , в качестве угловой – MLT. Каждая точка на графике является проекцией координат высыпаний, зарегистрированных на орбите по измерениям спутников, на плоскость геомагнитного экватора. Фактически, это области в магнитосфере, где произошло рассеяние частиц радиационного пояса (питч-угловая диффузия), связанное, предположительно, с волновой активностью. При проецировании на экваториальную область мы пренебрегаем возмущением геомагнитного поля вследствие развития магнитосферных токов, что приведет к изменению положения экваториальной проекции высыпаний. Мы предполагаем, что слабое геомагнитное возмущение 2.11.2015 не внесло значительных изменений в структуру силовых линий магнитосферы.

Спутник *Meteor M2* позволяет выполнять измерения вдоль меридиана  $\sim 09$  и  $\sim 21$  MLT. Можно

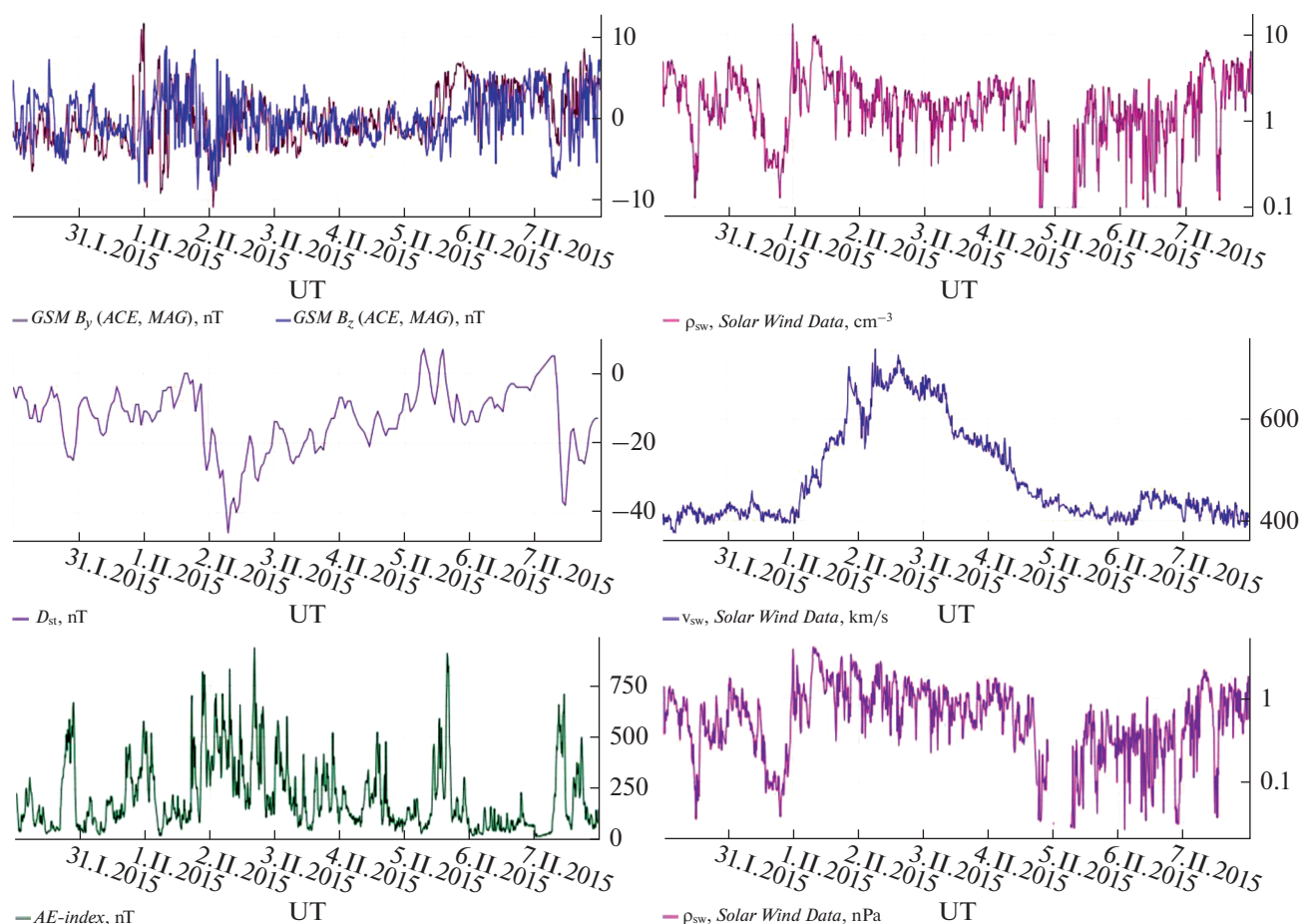


Рис. 5. Параметры магнитного поля и солнечного ветра в период с 30.1 по 7.11.2015.

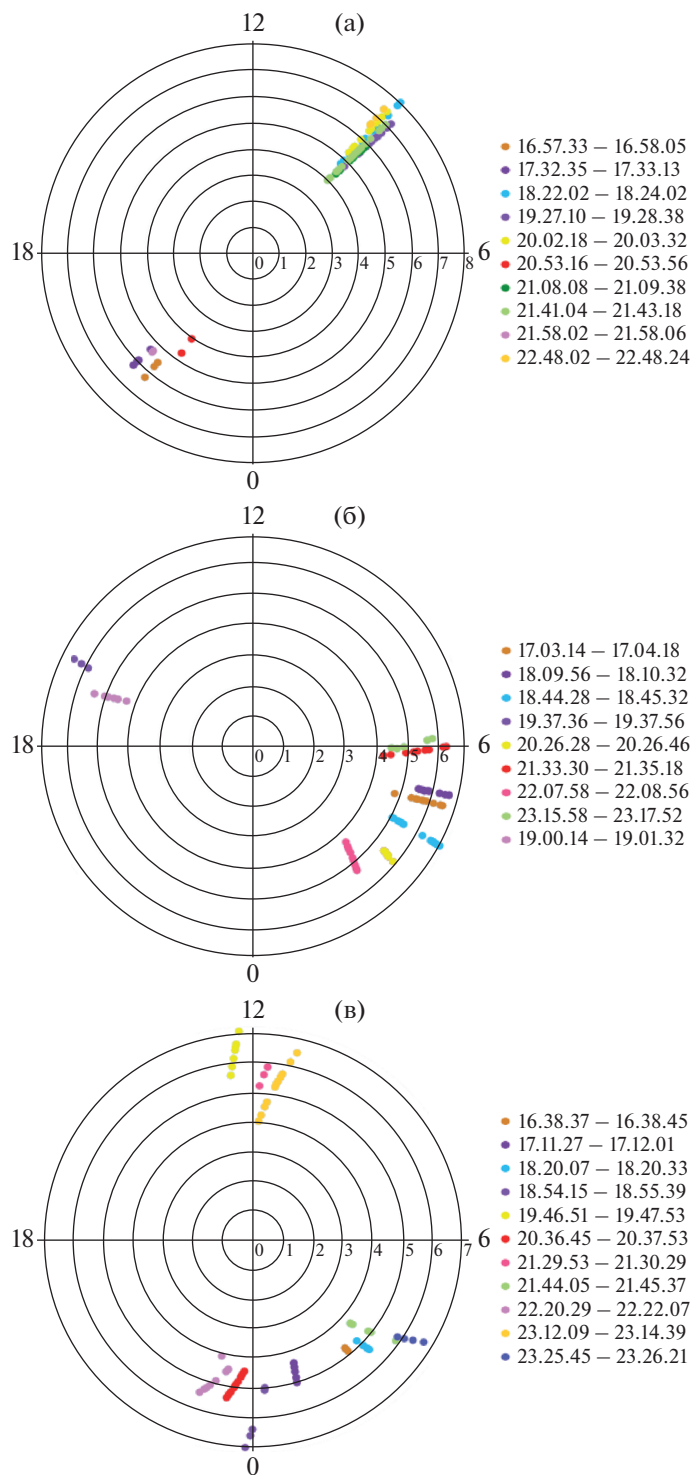
видеть, что высыпания, главным образом, инициированы процессами в предполуденном секторе. Полученные на разных витках спутника данные свидетельствуют о вероятной продолжительности события, зарегистрированного в ходе аэростатного эксперимента, а также о радиальных размерах, но не позволяют судить о его азимутальной протяженности. Для этого требуются данные измерений других спутников с траекториями, расположенными в других секторах локального времени.

Источниками дополнительной информации были выбраны КА *POES-18* и *POES-19*, которые обеспечили максимальный разброс по значениям MLT. На нижних графиках рис. 6б, 6в представлены координаты источников высыпаний в послеполуночном и утреннем секторах 1.11.2015. Можно видеть, что первые высыпания зарегистрированы в период 16.30–17.00 UT, когда началось геомагнитное возмущение.

По данным *Meteor M2* событие началось в 16.57 UT 1.11.2015. Первое наблюдение высыпаний произошло в южном полушарии на MLT = 21.3. Потoki электронов с энергиями от 100 кэВ, зарегистрированные вертикальным детектором, приоб-

рели значения  $5540 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . На следующем пролете спутника (17.32–17.33) уже над северным полушарием наблюдаются высыпания электронов тех же энергий, на близких MLT = 20.95, значения величин “вертикальных” потоков электронов увеличились ( $7820 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ). На рис. 7а приведено первое наблюдение высыпаний в предполуночном секторе. Можно видеть изотропизацию потоков 100 кэВ электронов на  $L = 5.5$  и  $L = 7$ . Высыпания имеют радиально-локализованную структуру.

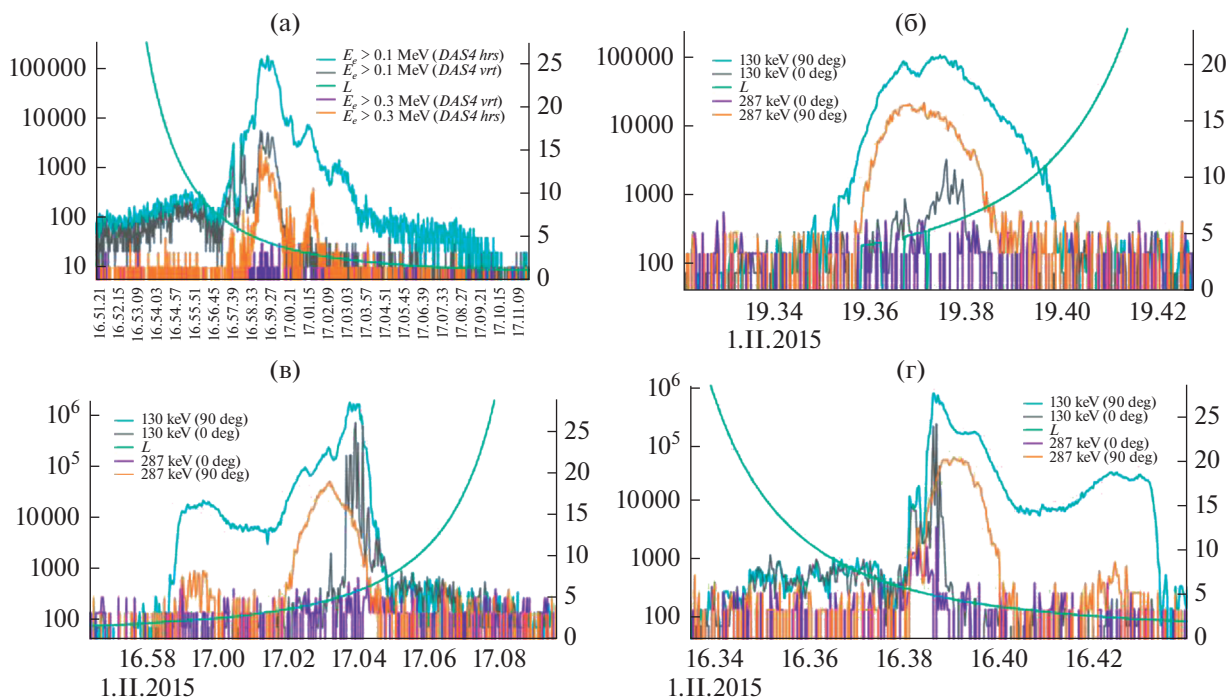
Дальнейшие пролеты спутника показали, что высыпания происходили также и при утренних значениях MLT ( $\sim 9$ ), причем именно в утреннем секторе события имели наиболее интенсивный характер, происходили с большей частотой (практически непрерывно одно за другим), имеют обширную область распространения ( $L = 4–7$ ), значения величин потоков имеют порядок сотен тысяч  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . В то же время, в вечернем секторе наблюдаются разреженные единичные события, которые занимают меньшую область:  $L = 4–6.5$ , значения величин потоков порядка десятков тысяч  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . Это можно наблюдать и



**Рис. 6.** Координаты источников высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ 1.И.2015. (а) по данным КА *Метеор М2*, (б) по данным КА *POES-18*, (в) по данным КА *POES-19*.

на рис. 6а: плотность точек в утреннем секторе гораздо выше. При дальнейших пролетах спутника в течение 1.И.2015 мы видим похожую картину высыпаний, как в северном полушарии, так и в южном, при этом потоки высыпающихся частиц возрастают.

Первое наблюдение высыпаний на ИСЗ *POES-18* произошло в 17.03 UT 1.И.2015 (рис. 76). Событие наблюдалось в южном полушарии на  $MLT = 4.8$ ,  $L = 5-6.5$ . Потоки высыпающихся частиц сразу же приняли высокие значения –  $728854 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . В послеполуденных секторах



**Рис. 7.** Потоки электронов. (а) *Memeop M2* первое наблюдение высыпаний (предполуночный сектор). (б) *POES-18* первое наблюдение высыпаний. (в) *POES-18* зарождение высыпаний в вечернем секторе. (г) *POES-19* первое наблюдение высыпаний.

MLT ( $\sim 17$ ) высыпания сначала отсутствовали. Они появились лишь спустя несколько пролетов КА в 19.37 UT (рис. 7в) и имели небольшие значения потоков ( $\sim 3$  тыс.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ ), которые постепенно увеличивались со временем, достигая значений порядка сотен тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$  2. II. 2015 и далее. Для утреннего сектора MLT наблюдаются профили высыпаний, похожие на те, что были зарегистрированы в утреннем секторе ИСЗ *Memeop M2*.

Из рассмотрения данных на ИСЗ *POES-19* было установлено более точное время начала события – 16.38 UT 1. II. 2015. Оно впервые было зарегистрировано в южном полушарии на MLT = 2.7,  $L=5.6$  (см. рис. 7г). Как и в “ночных” высыпаниях по данным *Memeop M2* наблюдается пространственная локализация потоков высыпающихся электронов. Их величины достигли значение  $\sim 250$  тыс.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ . На последующих пролетах наблюдались также высыпания и в дневном секторе (MLT  $\sim 12$ ), но менее интенсивные – величина потоков составляла порядка десятков тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ . В вечернем секторе 1. II. 2015 высыпаний не наблюдалось.

На рис. 8 в координатах  $L$ -MLT представлена пространственная структура областей в приэкваториальной магнитосфере – источников высыпаний энергичных электронов во время возмущенного периода 1–6. II. 2015, построенная по дан-

ными трех ИСЗ: *Memeop M2*, *POES-18* и *POES-19*. Можно видеть (рис. 8а) что к вечеру 1. II. 2015, в начальный период возмущений область высыпаний захватила, главным образом утренний, ночной и, отчасти, дневной сектора. Также, появились первые высыпания на послеполуночных MLT.

На рис. 8б представлена карта высыпаний на главной фазе геомагнитного возмущения. Можно видеть, что высыпания захватили почти все сектора магнитосферы и регистрируются в широком диапазоне  $L$  (от 4 до 7) и на всех долготах.

Событие закончилось утром 6. II. 2015. К этому времени потоки высыпающихся электронов стали более локализованными по  $L$ , а величина потоков понизилась и достигла значений порядка 10 тыс.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$  в конце события. На графике (рис. 8в) представлено распределение источников высыпаний по данным трех спутников по MLT и  $L$  за период от 00.00 по 14.26 UT 6. II. 2015. Из этого графика видно, что занимаемая область высыпаний охватывает все MLT, но событий наблюдалось значительно меньше, они располагаются на более удаленных MLT  $> 5$  и носят более “изолированный характер”.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля установлено, что



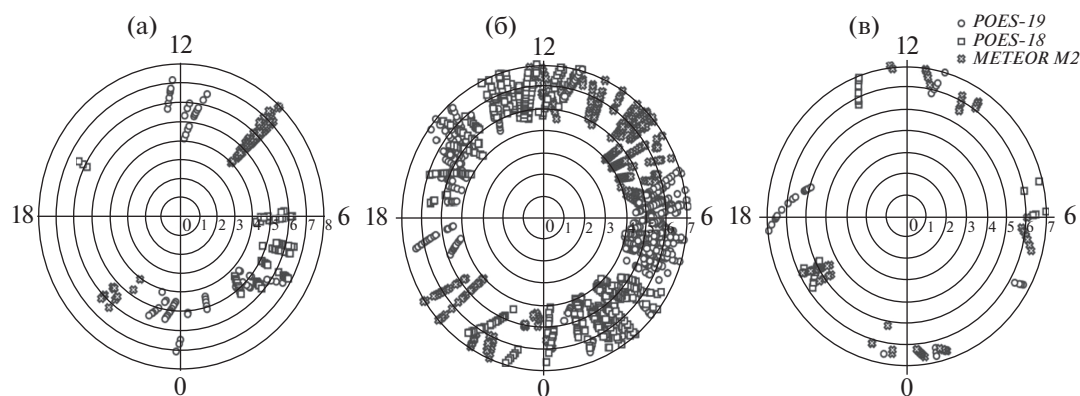


Рис. 8. Координаты источников высыпаний по данным трех спутников. (а) 1.11.2015 – начало события, (б) 2.11.2015, (в) 6.11.2015 – конец события.

высыпания электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ и выше происходили в геомагнитно-возмущенной магнитосфере. Наблюдения спутников позволили приблизительно определить начало события (16.38 UT 1.11.2015) и пространственно-временные характеристики области высыпаний в течение всего периода магнитосферных возмущений.

Обобщая данные наблюдений трех полярных ИСЗ, можно сделать вывод о том, что на начальном этапе возмущения высыпания развивались на  $L > 5$  в ночном секторе MLT и имели изолированный характер. Поток электронов составляли сотни тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Постепенно высыпания перешли на утреннюю область магнитосферы и, на главной фазе геомагнитного возмущения, заполнили весь сектор 0–12 MLT. Профили высыпаний отличались от высыпаний в ночной магнитосфере. Они имели вид множественных всплесков на относительно широком интервале  $L$  от 4 до 7.

На главной фазе и начальной стадии фазы восстановления (2.11.2015) высыпания заняли и дневной, и вечерний сектора, таким образом, охватив все значения MLT, но в вечернем секторе высыпания имели более “спокойный” характер, потоки частиц составляли величину порядка десяти тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Можно утверждать, что в ходе баллонного эксперимента 2.11.2015 наблюдалось рентгеновское тормозное излучение, связанное именно с этими потоками электронов.

По положению и характеру высыпаний можно сделать предположение о том, что механизмы ускорения и рассеяния частиц имели разную природу в разных областях магнитосферы. Высыпания в ночной магнитосфере имели изолированный, радиально-локализованный характер на относительно высоких широтах ( $L > 5$ ). По-видимому, эти события связаны с рассеянием электронов в сильно-искривленном магнитном поле геомагнитного хвоста и могут быть отнесены к “Группе 1” высы-

паний по классификации [8]. Генерация таких высыпаний связана с приближением токового слоя хвоста магнитосферы во время геомагнитного возмущения. Высыпания в секторе с MLT в диапазоне от 0 до 12 связаны с генерацией ОНЧ-волн: авроральных хорв и свистов (wistler mode chorus), — которые обуславливают, как ускорение электронов, так и рассеяние их в конус потерь [19].

Падение  $Dst$ -индекса до значения  $-46$  нТл и отрицательное значение  $B_z$ -компоненты магнитного поля указывает на развитие умеренной геомагнитной бури, на фазе восстановления которой и наблюдались основные высыпания электронов. Вариации  $AE$ -индекса в момент, когда  $B_z$ -компонента ММП приняла южное направление, и значения  $AE$ -индекса порядка сотен нТл в период начала и на фазе восстановления бури указывают на последовательность суббурь, которые послужили причиной рассеяния высокоэнергичных электронов в конус потерь и дальнейших высыпаний в атмосферу в секторе от 0 до 12 MLT, что является важным фактором для появления ОНЧ-хорв и других низкочастотных волн в авроральной магнитосфере [20]. Также суббури привели к генерации электромагнитных экваториальных шумов и шипений (ОНЧ) в послеполуденном секторе, ответственных за высыпания на дневных и вечерних MLT. Высыпания имели широкую протяженность по MLT и максимум вероятности наблюдения в ночные и утренние часы. Согласно классификации высыпаний электронов в работах [8, 21] ночные высыпания принадлежат первому типу. Высыпания в утреннем секторе, по-видимому, связаны с множественными суббуревыми активациями на главной фазе бури и последующем рассеянии частиц в конус потерь [20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью данных ИСЗ серий *POES* и *Meteor* был проведен пространственно-временной

анализ и рассмотрена динамика события 1–6.11.2015 высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ в атмосферу Земли, соответствующего событию 2.11.2015 из базы данных ФИАН. Установлена связь между данными о потоках частиц и данными магнитного поля и солнечного ветра, которая позволила сделать предположение о механизмах возникновения высыпаний и объяснить их наблюдаемую динамику, а также классифицировать данное событие.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 19–05–00960).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thorne R.M.* Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. Is. 22.
2. *Baker D.N., Erickson P.J., Fennell J.F. et al.* Space weather effects in the Earth's radiation belts // *Space Science Reviews.* 2018. V. 214. № 17. Article number 17. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
3. *Wu H., Chen T., Kalegaev V.V., Panasyuk M.I., Vlasova N.A., Duan S.* Long-term dropout of relativistic electrons in the outer radiation belt during two sequential geomagnetic storms // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2020. V. 125. № 10. <https://doi.org/10.1029/2020JA028098>
4. *Horne R.B., Thorne R.M.* Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 15. P. 3011–3014.
5. *Lazutin L.L., Dmitriev A.V., Suvorova A.V.* Electron radiation belt dynamics during magnetic storms and in quiet time // *Solar-Terrestrial Physics.* 2018. V. 4. № 1. P. 59–71.
6. *Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R. et al.* Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A11214. <https://doi.org/10.1029/2006JA011657>
7. *Blum L.W., Breneman A.W.* Observations of radiation belt losses due to cyclotron wave-particle interactions. Loss in the Magnetosphere to Particle Precipitation in the Atmosphere. Amsterdam: Netherlands Elsevier, 2020.
8. *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V. et al.* Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. V. 121. P. 46–50. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>
9. *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.* 2005. V. 110. P. A03225. <https://doi.org/10.1029/2004HA010811>
10. *Ukhorskiy A.Y., Anderson B.J., Brandt P.C., Tsyganenko N.A.* Storm time evolution of the outer radiation belt: transport and losses // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2006. V. 111. P. A11S03. <https://doi.org/10.1029/2006JA011690>
11. *Тверской Б.А.* Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968.
12. *Основы теоретической космофизики. Избранные труды.* М.: УРСС, 2004.
13. *Meredith N.P., Horne R.B., Lam M.M. et al.* Energetic electron precipitation during high-speed solar wind stream driven storms // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A05223. <https://doi.org/10.1029/2010JA016293>
14. *Shprits Y.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S.* Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: local acceleration and losses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 1694–1713. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.014>
15. *Xiao F., Chang Yang, Zhaoguo He et al.* Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. P. 3325–3332. <https://doi.org/10.1002/2014JA019822>
16. *Лазутин Л.Л.* Рентгеновское излучение авроральных электронов и динамика магнитосферы. Ленинград: Наука, 1979.
17. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al.* Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2016. V. 149. P. 258–276.
18. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др.* Высыпания магнитосферных электронов в атмосферу Земли и электроны внешнего радиационного пояса // *Известия РАН. Серия физическая.* 2017. Т. 81. № 2. С. 235–238.
19. *Omura Y., Nunn D., Summers D.* Generation processes of whistler-mode chorus emissions: Current status of nonlinear wave growth theory. Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere. Washington: American Geophysical Union, 2012.
20. *Tsurutani B.T. et al.* Are high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events substorm expansion events? // *J. Atmospheric and Solar-terrestrial physics.* 2004. V. 66. № 2. P. 167–176.
21. *Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Семенова Н.В.* Связь высыпаний релятивистских электронов с геомагнитной активностью. Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. 2015. P. 75–78.