УДК 550.383

ФОРМИРОВАНИЕ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ И АДИАБАТИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ПАДЕНИЯ И ВОЗРАСТАНИЯ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2021 г. Н. В. Сотников¹, Е. Е. Антонова^{1, 2, *}, И. Л. Овчинников¹, В. Г. Воробьев³, О. И. Ягодкина³, М. С. Пулинец¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова", Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное научное учреждение

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия *E-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Проведен анализ данных российского спутника МЕТЕОР-М № 2 и миссии RBSP/Van Allen Probes во время ряда сильных магнитных бурь с $D_{st} < -100$ нТл. Показано, что высокоширотная граница захвата электронов с энергией >100 кэВ располагается внутри области авроральных высыпаний, а в некоторые периоды ее положение примерно совпадает с приполюсной границей овала сияний. Выделен вклад адиабатического эффекта в падении потоков релятивистских электронов на главной фазе бури и их увеличении на фазе восстановления.

DOI: 10.31857/S0367676521030297

введение

Потоки релятивистских электронов внешнего радиационного пояса могут увеличиваться на порядки величины во время магнитных бурь. Такие увеличения приводят к сбоям в работе космических аппаратов. Длительная история исследований внешнего радиационного пояса не привела к решению проблемы выделения основных механизмов ускорения и потерь релятивистских электронов, несмотря на реализацию многих космических проектов [1]. Последняя наиболее подробная информация по электромагнитным полям и спектрам частиц на высокоапогейных орбитах была получена спутниками миссии RBSP/Van Allen probes [1]. В работах [2-4] было показано, что при анализе результатов наблюдений этой миссии не рассматривались два эффекта, приводящие к существенным изменениям подходов к решению проблем определения механизмов ускорения и потерь релятивистских электронов внешнего пояса сдвиг аврорального овала на низкие широты во время магнитной бури и действие адиабатического

механизма замедления и ускорения электронов при развитии буревого кольцевого тока.

В настоящей работе приведены предварительные результаты исследования ряда больших магнитных бурь с минимальным $D_{st} < -100$ нТл, во время которых проводились одновременные измерения на спутнике Метеор-М № 2 на полярных орбитах с целью определения положения полярной границы потоков электронов с энергией >100 кэВ относительно овала полярных сияний и спутниками миссии RBSP/Van Allen probes на высокоапогейных орбитах с целью прояснения роли адиабатических механизмов в изменениях потоков релятивистских электронов.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНОЙ МЕТОДИКИ

В работе использованы данные спутника Метеор-М № 2, на котором проводились измерения потоков низкоэнергичных электронов с энергиями от 0.13 до 16.64 кэВ и энергичных электронов с энергиями от 0.1 до 13 МэВ (http://smdc.sinp.msu.ru/

index.py?nav=meteor m2). Спутник Метеор-М № 2 проводил измерения на полярной солнечно-синхронной круговой орбите с высотой ~825 км, периодом ~100 мин и наклонением 98.8°. Анализ высыпаний электронов с энергиями 0.13-16.64 кэВ позволяет выделить авроральный овал. Нижней границей энергий электронов внешнего радиационного пояса является энергия ~100 кэВ. В работах [5, 6] описана методика анализа одновременных изменений потоков электронов с энергией >100 кэВ и потоков авроральных частиц. Широта, при которой поток электронов с энергией >100 кэВ падет с увеличением геомагнитной широты до уровня фона рассматривалась в качестве высокоширотной границы захвата. При этом фоновый поток вычислялся отдельно для каждой орбиты по измерению потока в полярной шапке и его стандартного отклонения. Считалось, что измеряемый поток может рассматриваться как поток частиц радиационного пояса, если разница между эти потоком и фоновым потоком в 5 раз превышает стандартное отклонение в течении интервала времени более 1 мин для отделения импульсных выбросов [5].

Одновременно со спутником Метеор-М № 2 проводились измерения на высокоапогейных эллиптических орбитах с перигеем 1.1 R_E, апогеем 5.8 R_E (где R_E – радиус Земли) и наклонением 10° миссией RBSP/Van Allen probes. Одновременность периодов наблюдений на спутниках обеспечила возможность отслеживать для каждой бури положение потоков захваченных частиц относительно аврорального овала, в проекции которого на экваториальную плоскость магнитное поле значительно отличается от дипольного. Анализировались данные прибора ECT-REPT [7, 8], регистрирующего потоки и питч-угловое распределение электронов с энергиями 1.8-4.5 МэВ (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov). Методика анализа описана в работе [9]. По измерениям на спутнике RBSP-А определялась форма спектра релятивистских электронов вблизи максимума радиационного пояса на геоцентрическом расстоянии ~4 R_F. Выделение области максимума пояса, образующегося после магнитной бури, было основано на результатах работы [10], в которой суммированы результаты исследований зависимости положения максимума радиационного пояса, формирующегося после бури, от модуля минимального значения Dst вариации. Параметры солнечного ветра и геомагнитной активности брались из баз данных OMNI (https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov) и WDC for Geomagnetism, Kyoto (http:// wdc.kugi.kvoto-u.ac.jp).

За время работы спутника Метеор-М № 2 произошло несколько магнитных бурь с $D_{st} < -100$ нТл. Рассмотрены бури: 19–22 декабря 2015 г. с $D_{st} =$ = -155 нТл; 31 декабря 2015 г.-2 января 2016 г. с $D_{st} = -137$ нТл; 20–22 января 2016 г. с $D_{st} = -104$ нТл и 13—14 октября 2016 г. с $D_{st} = -105$ нТл. Проведен анализ положения геомагнитной широты, на которой потоки захваченных электронов с энергией >100 кэВ падали до уровня фона. Эта широта в соответствии с [11] рассматривается в настоящей работе как высокоширотная граница захвата. Исследования положения границы захвата относительно аврорального овала и вариации спектров релятивистских электронов проводились ранее только для магнитной бури 19—22 декабря 2015 г. [6, 9].

ПОЛОЖЕНИЕ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ГРАНИЦЫ ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ БОЛЕЕ 100 кэВ ОТНОСИТЕЛЬНО АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

В работе [6] определено положение приполюсной границы, на которой поток энергичных электронов с энергией >100 кэВ падает до уровня фона во время большой магнитной бури 19-22 декабря 2015 г. Было показано, что во время всех пересечений овала во время бури высокоширотная граница захвата была локализована внутри аврорального овала. Анализ пересечений аврорального овала спутником Метеор-М № 2 во время всех выделенных за период работы спутника больших магнитных бурь также показывает, что рассматриваемая граница локализуется внутри аврорального овала, подтверждая вывод работы [6]. Такая локализация, по нашему мнению, может означать частичное перекрывание аврорального овала и внешнего радиационного пояса.

Однако, как отмечалось в работе [5], положение высокоширотной границы захвата сильно зависит от чувствительности детектора и величины потока электронов с энергией >100 кэВ (*I_{RE}*). Поэтому особый интерес представляют выделенные в работе [6] пересечения овала, при которых граница захвата энергичных электронов совпадала с полярной границей овала (см. рис. 6 в [6]). Такое совпадение с учетом точности определения положений границы захвата, и полярной границы овала может означать перекрытие внешней части радиационного пояса и почти всего аврорального овала, что соответствует результатам морфологического проецирования основной части аврорального овала на внешнюю часть кольцевого тока (см. обзор [3]).

Проведенный анализ больших магнитных бурь позволил выделить пересечения овала, при которых высокоширотная граница захвата располагалась в области приполюсной границы овала. Пример такого события во время магнитной бури 13–14 октября 2016 г. показан на рис. 1. На рис. 1*а* приведены вариации D_{st} , *AE* и *AL* индексов геомагнитной активности. В верхней части рис. 1*б* показана спектрограмма авроральных электронов. Цветная шкала показывает поток в



Рис. 1. Вариации D_{st} , *AE* и *AL* индексов в нТл во время бури 13–14 октября 2016 г., вертикальная линия – момент пересечения аврорального овала спутником Метеор-М № 2 (*a*); спектрограмма авроральных электронов (верхняя панель), потоки энергии авроральных электронов J_{Eint} в эрг · см⁻² · с⁻¹ и потоки электронов с энергией >100 кэВ I_{RE} в см⁻² · с⁻¹ ср⁻¹ (нижняя панель) (б); пунктирные линии – положения экваториальной и полярной границ овала.

единицах $lg(cm^{-2}c^{-1}cp^{-1}\kappa)B^{-1}$). В нижней части рисунка показаны потоки энергии авроральных электронов J_{Eint} и электронов с энергией >100 кэВ, I_{RE} . Пересечение овала (красная вертикальная линия на рис. 1а) происходило в период относительного уменьшения магнитной активности в авроральной зоне, т.е. не в период основных суббуревых инжекций. Потоки электронов с энергией >100 кэВ уменьшились до уровня фона в районе полярной границе овала в 23:35 UT в утреннем секторе и в 23:48 UT в вечернем секторе. Уменьшение потоков электронов в утреннем секторе имело плавный характер, в то время как в вечернем секторе сопровождалось появлением локальных увеличений потоков захваченных частиц, амплитуды которых были намного меньше уровня потока электронов с энергией >100 кэВ в тот же момент времени. Такие всплески могут быть обусловлены процессами, связанными с диполизацией в области внешнего радиационного пояса. Существование таких событий, по нашему мнению, свидетельствует о возможности развития авроральных процессов в той области космического пространства, где дрейфовые траектории частиц замыкаются внутри магнитосферы [11], что, в свою очередь, обеспечивает возможность действия адиабатического механизма.

ВАРИАЦИИ СПЕКТРОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВБЛИЗИ МАКСИМУМА РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

В соответствии с работами [4, 12, 13] все магнитные бури по динамике потоков электронов внешнего пояса могут быть разделены на 3 типа, которые наблюдаются в 53–58, 17–19 и 25–28% случаев соответственно. После бурь первого типа происходит значительное возрастание потоков релятивистских электронов, после бурь второго типа регистрируется падение потоков, а после бурь третьего типа потоки восстанавливаются до уровня, примерно равного потокам до бури. Резкое снижение потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури наблюдается при всех типах магнитных бурь. Такое падение участники проекта RBSP/Van Allen probes связывают либо с затенением магнитопаузой (magnetopause shadowing – изменением магнитного поля, при котором дрейфовые траектории частиц радиационного пояса пересекают магнитопаузу и выходят из магнитосферы), либо с резким усилением питч-угловой диффузии на циклотронных волнах и высыпаниями электронов в ионосферу [1]. Действие этих механизмов связывается с развитием магнитосферных суббурь, так как суббуревые инжекции приводят к развитию кольцевого тока и изменениям магнитного поля, а анизотропия инжектированных ионов вызывает развитие циклотронных волн. Одновременно регистрируется увеличение уровня хоровых излучений, взаимодействие с которыми рассматривается в качестве основного механизма ускорения релятивистских электронов. Необходимо отметить, что суббури регистрируются во время главных фаз практически всех магнитных бурь. При этом, развитие суббурь происходит и во время фазы восстановления магнитных бурь первого типа, но суббури с большими |AL| (>400-500 нТл) не регистрируются по данным [4] во время фаз восстановления магнитных бурь второго и третьего типа.

Механизмы потерь за счет затенения магнитопаузой и усиления питч-угловой диффузии не





Рис. 2. Вариации *D_{st}, AE* и *AL* индексов во время бури 13–14 октября 2016 г., вертикальные линии – моменты определения спектров (*a*); спектры электронов с энергиями 1.8–4.5 МэВ во время главной фазы магнитной бури (*б*).

позволяют объяснить падение потоков релятивистских электронов во время бурь третьего типа, так как приводят к необратимым потерям релятивистских электронов. Восстановления потоков на предбуревом уровне при бурях третьего типа означает действие механизмов ускорения согласованных с механизмом потерь, что представляется маловероятным при необратимых потерях во время главной фазы. Олнако, такое паление и восстановление можно объяснить действием адиабатического замедления и ускорения релятивистских электронов, что не рассматривалось при анализе данных миссии RBSP/Van Allen probes. Адиабатический механизм вариаций потоков предполагает сохранение адиабатических инвариантов при движении релятивистских электронов. Падение величины магнитного поля в экваториальной плоскости в области максимума пояса приводит при сохранении магнитного момента к уменьшению энергии электрона. Сохранение третьего инварианта, равного потоку магнитного поля внутри дрейфовой орбиты, должно приводить к смещению частиц на большие геоцентрические расстояния и к соответствующему падению потоков частиц с фиксированной энергией. Восстановление магнитного поля после магнитной бури, если за время бури не произошло заметных потерь и ускорения частиц, приведет к восстановлению пояса до предбуревого уровня. Отметим, что в отличии от адиабатического ускорения, для турбулентного ускорения характерно увеличение жесткости спектра частиц.

Для определения вклада адиабатического механизма в изменения потока релятивистских электронов необходимо отслеживать изменения магнитного поля вблизи экваториальной плоскости, что не было предусмотрено при планировании миссии RBSP/Van Allen probes (угол наклона орбиты к экваториальной плоскости составлял 10°), так как не учитывалось смещение аврорального овала на низкие широты во время бури. Поэтому при анализе данных в работе [14] использовалась усредненная модель магнитного поля TS-2005 с фиксированной геометрией токовых систем (см. анализ в [3]), что привело к выводу о незначительности адиабатического эффекта.

Однако хорошо известно, что в области проекции аврорального овала на экваториальную плоскость магнитное поле значительно отличается от дипольного, а во время суббурь эти отличия нарастают. Поэтому полученные в [5, 6] и выше результаты о локализации внешней части внешнего радиационного пояса внутри аврорального овала говорят о сильном искажении магнитного поля, что требует учета роли адиабатического эффекта в динамике внешнего пояса. При отсутствии измерений вблизи экваториальной плоскости, роль адиабатического эффекта можно прояснить при анализе изменений наклонов спектров релятивистских электронов [9], так как процессы адиабатического замедления и ускорения почти не влияют на наклон спектра.

Анализ в работе [9] показал, что адиабатический механизм мог внести доминирующий вклад в наблюдаемые изменения потока релятивистских электронов во время большой магнитной бури 19-22 декабря 2015 г. Анализ изменений спектров электронов с энергиями 1.8-4.5 МэВ вблизи максимума пояса во время магнитных бурь позволяет оценить вклад адиабатического эффекта во время сильных бурь. На рис. 2 и 3 приведен пример такого анализа. На рис. 2а и 3а показаны изменения параметров D_{st} , AE и AL во время бури 13-14 октября 2016 г., которые показывают. что большие суббури наблюдались как во время главной фазы бури, так и во время фазы восстановления. На рис. 26 и 36 показаны вариации спектра электронов с энергиями 1.8-4.5 МэВ во время этих фаз. Цифрами и значками обозначены выделенные на графиках геомагнитной активности моменты измерений спектров вблизи максимума радиационного пояса. На



Рис. 3. Вариации *D_{st}*, *AE* и *AL* индексов во время бури 13–14 октября 2016 г., вертикальные линии – моменты определения спектров (*a*); спектры электронов с энергиями 1.8–4.5 МэВ во время фазы восстановления магнитной бури (*б*).

рисунках Ј – дифференциальный поток электронов в см⁻² · c⁻¹ · cp⁻¹ · МэВ⁻¹, E – энергия в МэВ. Наблюдаемые спектры релятивистских электронов близки к степенным (рис. 26 и 36). Во время главной фазы бури наблюдались суббури с интенсивностью до 2000 нТл и падение потоков электронов всех энергий. При этом, спектры 2, 3, 4 почти не изменяют свой наклон при энергиях более 2.5 МэВ, что хорошо соответствует адиабатическому механизму уменьшения потоков. На фазе восстановления бури также наблюдались суббури, но с интенсивностью меньшей, чем на главной фазе бури. При этом между моментами 6 и 7 спектр релятивистских электронов почти не изменяется. Между моментами 7, 8 и 9 потоки возрастают в несколько раз. После бури 13-14 октября 2016 г. потоки релятивистских электронов на порядок превысили потоки до бури. В целом, увеличения жесткости спектров за счет механизмов турбулентного ускорения невелики, и динамика потоков на фазе восстановления бури близка к возрастаниям потоков за счет адиабатического механизма ускорения. Близкие результаты получены и во время остальных, исследованных в работе магнитных бурь.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Анализ данных спутника МЕТЕОР-М № 2 и миссии RBSP/Van Allen Probes во время ряда магнитных бурь показывает, что суммированный в [1] подход к решению проблемы формирования и динамики внешнего радиационного пояса требует существенной модификации, так как не учитывает предполагаемого в настоящем исследовании совпадения основной части аврорального овала и внешней части внешнего радиационного пояса. Традиционно считается (см. ссылки в работе [5]), что внешняя граница внешнего радиационного пояса совпадает с экваториальной границей овала, а авроральный овал проецируется на плазменный слой, в котором дрейфовые траектории энергичных электронов не замкнуты внутри магнитосферы, а пересекают магнитопаузу. В результате суббуревых инжекций образуется затравочная популяция электронов, которая затем ускоряется в результате взаимодействия с хоровыми излучениями (см. ссылки в обзоре [1]). Действие адиабатического эффекта не принималось во внимание, так как считалось, что магнитное поле в области ускорения не испытывает значительных искажений во время магнитных бурь. Полученные в работах [2–4, 6, 9] и в настоящем исследовании результаты дают возможность авторам рассмотреть альтернативный сценарий. Во время магнитной бури развиваются суббури. происходит инжекция ионов и формируются асимметричные и симметричные кольцевые токи. Максимум кольцевого тока образуется на геоцентрическом расстоянии, определяемом соотношением, приведенном в [10] (~4 R_E для магнитных бурь с $D_{st} \sim -100$ нТл). Одновременно инжектируется затравочная популяция электронов в область кольцевого тока. Эффективное ускорение инжектированных электронов до энергий в несколько МэВ возможно только если их дрейфовые траектории замкнуты внутри магнитосферы, что имеет место во время фазы восстановления магнитной бури. Суббуревые инжекции в область симметричного кольцевого тока создают захваченную популяцию электронов, которые адиабатически ускоряются при распаде кольцевого тока и возвращению магнитного поля к предбуревому уровню. В целом, результаты проведенного исследования согласуются с теоретическим подходом формирования внешнего радиационного пояса, описанным [15, 16].

Авторы благодарны командам проектов МЕТЕОР и RBSP/Van Allen за возможность использовать данные, выставленные в Интернет и находящиеся в открытом доступе. Работа H.B.C., Е.Е.А. И.Л.О. и М.С.П. поддержана РФФИ (проект № 18-05-00362).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ripoll J.-F, Claudepierre S.G., Ukhorskiy S.Y. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 125. Art. No. e2019-JA026735.
- Antonova E.E., Stepanova M.V. // Earth Planets Space. 2015. V. 67. Art. No. 148.
- 3. Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P. et al. // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 177. P. 103.
- 4. Antonova E.E., Stepanova M.V., Moya P.S. et al. // Earth Planets Space. 2018. V. 70. Art. No. 127.
- Riazanteseva M.O., Antonova E.E., Stepanova M.V. et al. // Ann. Geophys. 2018. V. 36. P. 1131.
- 6. Сотников Н.В., Антонова Е.Е., Рязанцева М.О. и др. // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 2. С. 148; Sotnikov N.V., Antonova E.E., Ryazantseva M.O. et al. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 2. Р. 136.
- Spence H.E., Reeves G.D., Baker D.N. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. P. 311.

- Baker D.N., Kanekal S.G., Hoxie V.C. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. No. 1–4. P. 337.
- 9. Сотников Н.В., Антонова Е.Е., Рязанцева М.О. и др. // Геомагн. и аэроном. Т. 59. № 6. С. 696; Sotnikov N.V., Antonova E.E., Ryazantseva M.O. et al. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 6. P. 651.
- 10. *Тверская Л.В.* // Геомагн. и аэроном. 2011. Т. 51. № 1. C. 8; *Tverskaya L.V.* // Geomagn. Aeron. 2011. V. 51. No. 1. P. 6.
- 11. *Roederer J.G.* Dynamics of geomagnetically trapped radiation, in Physics and Chemistry in Space. V. 2. Berlin: Springer, 1970.
- Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. No. 10. P. 1529.
- Turner D.L., Angelopoulos V., Li W. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 2196.
- 14. *Reeves G.D., Spence H.E., Henderson M.G. et al.* // Science. 2013. V. 341. P. 991.
- Тверской Б.А. // Геомагн. и аэроном. 1997. Т. 37. № 5. С. 555; Tverskoy B.A. // Geomagn. Aeron. 1997. V. 37. Р. 555.
- 16. Antonova E.E. // Adv. Space Res. V. 38. P. 1626.

Outer radiation belt formation during geomagnetic storms and adiabatic mechanism of dropouts and increases of relativistic electron fluxes

N. V. Sotnikov^{*a*}, E. E. Antonova^{*a*, *b*, *, I. L. Ovchinnikov^{*a*}, V. G. Vorobjev^{*c*}, O. I. Yagodkina^{*c*}, M. S. Pulinets^{*a*}}

^a Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia ^bSpace Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia ^cPolar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia *e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

Analysis of data from the Russian METEOR-M No. 2 spacecraft and the RBSP/Van Allen Probes mission during a number of magnetic storms with $D_{st} \le -100 \text{ HT}\pi$ is prodused. It is shown that the high latitude trapping boundary of electrons with energy >100 keV is localized inside the region of auroral precipitations and sometimes coincide with near to pole boundary of auroral precipitations. The contribution of the adiabatic effect to the dropouts of relativistic electron flows in the main phase of the storm and their increase in the recovery phase is highlighted.