

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук Сотникова Никиты Вадимовича –

на тему: «Граница захвата энергичных электронов во время магнитных бурь и роль адиабатических процессов в формировании внешнего радиационного пояса»

по специальности 01.03.03 — «физика Солнца»

Вопросы формирования и динамики внешнего радиационного пояса магнитосферы Земли уже долгие годы привлекают пристальное внимание специалистов в области физики Солнца, солнечно-земных связей, магнитосферы и атмосферы Земли. Возрастания потоков релятивистских электронов после магнитных бурь приводят к сбоям в работе и выходу из строя космических аппаратов. Они также приводят к увеличению ионизации в верхней атмосфере, что существенно сказывается на ходе химических реакций и атмосферной динамике. Несмотря на длительную историю исследований и создание моделей формирования внешнего радиационного пояса, не удалось описать процессы ускорения и потерь релятивистских электронов внешнего пояса, что существенно затрудняет предсказание возрастания на несколько порядков потоков релятивистских электронов, часто называемых – «киллерами спутников». Подробно разрабатываемый механизм ускорения релятивистских электронов, основанный на предположении о квазилинейном взаимодействии с хоровыми волнами, столкнулся с принципиальными трудностями, так как не удалось объяснить динамику процессов во время трех наблюдаемых типов бурь (бурь, приводящих к значительному увеличению потоков электронов, бурь после которых потоки электронов уменьшались до уровня фона и бурь, после

которых потоки восстанавливались до предбуревого уровня). Кроме того, вычисленное время ускорения релятивистских электронов значительно – превышало экспериментально наблюдаемое. Поэтому актуальность избранной темы исследования не вызывает сомнений.

Целью работы Никиты Вадимовича Сотникова был поиск ответов на накопившиеся вопросы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Полный объем работы составляет 119 страниц.

Во введении определяется актуальность и степень разработанности избранной темы, описаны цели и задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология диссертационного исследования. Приведены положения, выносимые на защиту. Рассмотрены степень достоверности и апробация результатов, личный вклад автора, объем и структура работы.

Первая глава является вводной и содержит достаточно подробный обзор исследований, связанных с физикой процессов формирования радиационных поясов Земли, включая формирование внешнего радиационного пояса. Здесь суммированы результаты, полученные, в основном, в НИИЯФ МГУ с момента открытия внешнего радиационного пояса, и полученные за последнее время при непосредственном участии автора диссертации. Автору удалось показать, что проблема формирования радиационных поясов непосредственно связана с исследованиями топологии магнитосферных доменов, структуры внешней части кольцевого тока и проецирования аврорального овала на экваториальную плоскость. Суммированы результаты, демонстрирующие непосредственную связь процессов на широтах аврорального овала с формированием внешнего радиационного пояса и его динамикой. Отмечены принципиальные трудности, с которыми сталкиваются модели, основанные на анализе радиальной, питч-угловой диффузии и диффузии по энергии при описании динамики внешнего пояса. Выделены проблемы вычисления плотности

частиц в фазовом пространстве при использовании стандартных моделей магнитного поля. Описаны результаты, полученные при статистической обработке данных проектов METEOR в магнитоспокойных условиях и RBSP/Van Allen probes во время магнитных бурь с участием аврора диссертации. Показано, что полученные на первых этапах работы результаты потребовали проведение одновременных наблюдений на низковысотных орбитах и вблизи экваториальной плоскости.

Вторая глава посвящена решению проблемы положения внешнего радиационного пояса относительно аврорального овала во время больших магнитных бурь. Глава содержит результаты работ, в которых вклад автора диссертации является определяющим. Энергия в 100 кэВ считается минимальной энергией частиц внешнего радиационного пояса. Отечественный спутник Метеор-М №2 измерял как потоки авроральных электронов (с энергией до 20 кэВ), так и потоки энергичных электронов с энергиями, превышающими 100 кэВ, что позволяло отслеживать положение границы внешнего радиационного пояса относительно аврорального овала. Считалось, что положение внешней границы пояса соответствует широте, на которой наблюдается резкое падение потоков электронов с энергиями >100 кэВ. Следует отметить, что доминирующие ранее представления о совпадении полярной границы внешнего радиационного пояса с экваториальной границей овала были основаны на статистическом сопоставлении наземных и спутниковых измерений. Прямого сопоставления положения границ по измерениям на одном космическом аппарате до этого не проводилось.

За время работы спутника Метеор-М №2 произошло четыре сравнительно больших магнитных бури ($|Dst/SYM-H| \sim > 100$ нТл), для которых было проведено как автоматическое выделение границ с использованием разработанного алгоритма, так и визуальный анализ результатов измерений во время каждого пересечения аврорального овала (4 пересечения на каждой орбите). Проведен анализ вариаций параметров

солнечного ветра и геомагнитной активности во время каждой исследованной бури. Показано, что во время всех рассмотренных магнитных бурь наблюдалось положение внешней границы пояса внутри аврорального овала. Прослежена динамика положения границ овала и границы захвата во время каждой бури. В ряде случаев наблюдалось совпадение полярной границы овала с полярной границей пояса. Полученные результаты показали, что авроральные процессы могут играть существенную роль в ускорении релятивистских электронов. Так как дрейфовые траектории энергичных электронов должны быть замкнуты внутри магнитосферы, полученные результаты подтвердили ранее сделанный вывод о том, что основная часть аврорального овала не является проекцией геомагнитного хвоста на ионосферные высоты.

Третья глава диссертации посвящена анализу находящихся в открытом доступе результатов измерений потоков релятивистских электронов прибором ECT-REPT в ходе миссии RBSP/Van Allen probes для тех же магнитных бурь, которые были исследованы во второй главе. Такой выбор гарантировал локализацию суббуревых диполизаций во время фаз восстановления исследованных бурь внутри кольцевого тока в области уменьшенного магнитного поля. Восстановление магнитного поля после бури обеспечивало возрастание потоков релятивистских электронов за счет действия бетатронного механизма ускорения. Вклад автора диссертации в получении изложенных в главе результатов является определяющим.

Были определены потоки релятивистских электронов вдоль траектории полета спутника RBSP-A и проведено сравнение спектров в области максимума формирующегося нового радиационного пояса при последовательном пересечении спутником области максимума. Учитывалась полученная во многих работах зависимость положения максимума формирующегося радиационного пояса от величины модуля $Dst/SYM-H$ вариации, предварительно подтвержденная в ходе анализа. Были исследованы изменения наклонов спектров релятивистских электронов во

время бури. Учитывалось сохранение наклона спектра при адиабатических процессах и увеличение жесткости спектра в процессе стохастического ускорения. Получила подтверждение концепция доминирующей роли адиабатических процессов в резком падении потоков релятивистских электронов во время главной фазы бури. Анализ эволюции спектров релятивистских электронов без увеличения жесткости спектров показал, что адиабатическое ускорение вносит доминирующий вклад в ускорение электронов во время фазы восстановления бури между суббурями.

В заключении сформулированы основные результаты исследования, среди которых можно выделить подтверждение доминирующей роли адиабатического эффекта в динамике электронов внешнего пояса. Процесс появления потоков электронов на порядки превышающих добуревые потоки удалось связать с теоретически предсказанной суббуревой инжекцией энергичных электронов в область ослабленного поля во время фазы восстановления магнитной бури с последующим действием адиабатического эффекта при восстановлении магнитного поля.

В целом, интересные и важные результаты работы могли бы быть дополнены, если бы удалось исследовать большее число магнитных бурь с разными Dst.

Вместе с тем, указанное замечание не умаляет значимости диссертационного исследования. В диссертации сформулированы обоснованные научные положения. Выводы и рекомендации диссертации достоверны и обладают высокой степенью научной новизны. Результаты работы опубликованы в рецензируемых журналах индексируемых Web of Science и RSCI, доложены на российских и международных научных конференциях. Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.03.03 – «физика Солнца» (по физико-математическим

наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Опираясь на вышесказанное можно заключить, что соискатель Сотников Никита Вадимович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «физика Солнца».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,

ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория. ЦАО,

заведующий лабораторией химии и динамики атмосферы (ЛХДА)

Криволуцкий Алексей Александрович

27

06.06.2022

Контактные данные:

тел.: e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Адрес места работы:

141701, г. Долгопрудный Московской области, ул. Первомайская, д. 3,
ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория. ЦАО

Тел.: ; e-mail:

Подпись сотрудника ФГБУ Центральная аэрологическая обсерватория. ЦАО
Криволуцкого Алексея Александровича удостоверяю:

Ученый секретарь ФГБУ «ЦАО» кандидат географических наук

Н.А. Безрукова
07.06.2022