

Отзыв официального оппонента  
доктора физико-математических наук  
Беленькой Елены Семеновны  
на диссертацию Зинкиной Марины Дмитриевны  
«Высыпания электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу по  
данным бортовых радиационных измерений ИСЗ «МЕТЕОР-3М» №1»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук,  
по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»

Диссертация посвящена исследованию динамики радиационных поясов Земли, определяемой инжекцией заряженных частиц в радиационные пояса, диффузией поперек магнитного поля и утечкой из области захвата. В среднем наблюдается некоторый баланс этих 3-х процессов. Если бы существовала только инжекция, радиационные пояса переполнялись бы захваченными частицами, чего не происходит. Утечка электронов препятствует переполнению. В результате утечки происходит высыпание энергичных электронов в субавроральную атмосферу. Причиной высыпаний электронов из внешнего пояса считается циклотронная неустойчивость. Кроме того, поперечные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля («свисты») переводят электроны внешнего пояса в конус потерь. Рассматриваются разные механизмы потерь в зависимости от высоты расположения от Земли точки отражения.

В работе анализируются данные ИСЗ «Метеор-3М» № 1 с 2002 по 2005 гг. по высыпанию энергичных электронов из внешнего радиационного пояса. Определялись широты высыпаний и зависимость частоты высыпаний от геомагнитной активности. Исследования показали, что в естественных условиях высыпания электронов чаще происходят в спокойных и слабо-возмущенных условиях.

Кроме того, в работе показано, что число высыпаний при невысокой скорости счета выше числа высыпаний при большой скорости счета.

Получен вывод о том, что с ростом геомагнитной активности интенсивность стимулированных работой нагревного стенда высыпаний резонансных электронов с энергией 40 кэВ растет. Стенд был расположен на Аляске ( $\theta = 62.39^\circ$ ). Приемник находился на судне в магнито-сопряженной точке в южном полушарии. «Метеор-3М №1» проводил измерения либо над стендом, либо вблизи магнито-сопряженной точки. Всего таких положений ИСЗ в выбранный период наблюдений с 19 по 26 апреля 2004 г. было 8.

Работа написана грамотным хорошим языком, легко читается.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении описываются проблемы, связанные с динамикой радиационных поясов, обсуждается их актуальность, говорится о задачах, которым посвящена диссертационная работа, отмечается научная новизна работы и ее практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, обозначен личный вклад автора. Также во введении описывается структура диссертации.

В первой главе дается обзор публикаций по теме диссертационной работы, описывается движение заряженных частиц в геомагнитном поле, рассматриваются адиабатические инварианты, связанные с этим движением, условия в радиационных поясах, ОНЧ/КНЧ магнитосферные излучения. Перечисляются источники частиц в радиационных поясах и процессы, обеспечивающие потери частиц из радиационных поясов. Приводится профиль потоков электронов радиационных поясов различных энергий, и описываются атмосферные эффекты их высыпаний.

Во второй главе описываются принципы выделения и отбора событий высыпаний электронов с энергией больше 100 кэВ из внешнего радиационного пояса по данным спутника «Метеор-3М №1» и формулируются результаты статистического анализа этих данных. Обсуждаются полученные особенности высыпания энергичных электронов. Показано, что высыпания чаще происходят в спокойных ( $Dst > -30$  нТл) и слабо-возмущенных условиях ( $-50 < Dst < -30$  нТл) и что число высыпаний при невысокой скорости счета больше, чем при высокой.

В третьей главе анализируется материал по высыпанию электронов под действием нагрева ионосферы установкой HAARP. В этой установке передатчики излучали одноминутные сигналы, повторяющиеся с одноминутным интервалом на частоте 3 – 8 МГц с модуляцией сигнала на более низкой частоте 1 – 2 кГц. Изучались



стимулированные высыпания электронов с энергией более 40 кэВ. Описаны условия отбора состояний магнитосферы Земли, благоприятных для анализа стимулированных высыпаний (слабая геомагнитная активность). Были выбраны моменты, когда «Метеор-3М №1» находился либо над установкой HAARP, либо над точкой, магнито-сопряженной с точкой локализации установки. Всего таких положений спутника было 8. При этом фиксировалось резкое кратковременное (двухсекундное) возрастание скорости счета электронов с энергией больше 40 кэВ. Был сделан вывод о том, что с ростом геомагнитной активности, определяемой по  $a_p$  – индексу, возрастает величина пика скорости счета. Обсуждаются причины наблюдаемого сжатия к продольной оси потоков высыпающихся из внешнего радиационного пояса электронов с энергией  $> 40$  кэВ.

В заключении сформулированы выводы и основные результаты диссертации, а также предложения по применению полученных результатов.

Достоверность работы обеспечивается надежностью аппаратуры для получения данных бортовых измерений электронов внешнего радиационного пояса, установленной на метеорологическом ИСЗ «Метеор-3М №1», и современными методами сбора и обработки спутниковой информации. Кроме того, были использованы представительные выборочные совокупности с достаточной статистикой событий высыпаний высокоэнергичных электронов. Теория, на которой базируется интерпретация результатов спутниковых наблюдений с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» стимулированных экспериментами по нагреву ионосферы 19.04.2004-26.04.2004 высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса, построена на проверенных положениях физики полностью ионизованной плазмы.

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней показано, что по данным 2002-2005 гг. в естественных условиях число (а следовательно и вероятность) высыпаний при небольшой скорости счета выше числа/вероятности высыпаний при большой скорости счета. Это может быть важно для разработчиков космической техники при оценке рисков и определении способов их уменьшения.

Научная новизна работы заключается в том, что обработка многолетних данных, полученных однотипным прибором, позволила констатировать, что электроны с энергией больше 100 кэВ высыпаются из внешнего радиационного пояса, в основном, в спокойные и слабо-возмущенные периоды и что частота регистрации высыпаний экспоненциально зависит от скорости счета. Впервые показано, что с ростом  $a_p$  – индекса интенсивность

высыпаний электронов с энергией  $\geq 40$  кэВ, стимулированных работой нагревного наземного стенда, растет.

Некоторые недостатки диссертационной работы.

1. Рисунки 1, 20-23 демонстрируют число событий в зависимости от параметра Мак-Илвайна  $L$ . На этих кривых наблюдались два максимума в районе  $L \sim 3.1 - 3.9$  и  $5.1 - 5.9$ . Желательно было бы пересчитать  $L$  в широты на ионосферном уровне, тем более что формулы, позволяющие вычислить широту, приведены в диссертации.

2. Стр. 25-27. При описании геомагнитного поля и магнитосферы говорится о вкладе во внешнюю магнитосферу внешних токов, но не объясняется, какие именно токи имеются в виду. Для магнитосферного магнитного поля Земли существенную роль играют токовые системы магнитопаузы и магнитосферного хвоста. Их стоило бы упомянуть в диссертации, даже если для близких к Земле расстояний, рассматриваемых в этой работе, влияние их полей не велико.

3. На стр. 55 обсуждается природа возникновения пиков интенсивности в потоках электронов. Узость пиков объясняется повышением уровня высыпаний электронов внутри узкой магнитной трубки при наличии неоднородности плотности плазмы в ней. Утверждается, что при этом возникают благоприятные условия для циклотронной неустойчивости, что способствует локальному усилению высыпания энергичных электронов из радиационных поясов. Поскольку этот вопрос является ключевым для диссертации, его следовало бы разобрать подробнее: более детально объяснить физические причины этого явления. Это обсуждение повторяется в неизменном виде в диссертации несколько раз (стр. 12, 55, 56), но нигде подробно не рассмотрены физические процессы, возникающие в такой ситуации: почему в трубке возрастает плотность плазмы, почему это приводит к усилению циклотронной неустойчивости (см. например, работу В.Ю. Трахтенгерца, А.Г. Демехова, Циклотронные мазеры, Природа, №4, 2002, <http://www.kosmofizika.ru/popular/mazer.htm>, в которой подробно описаны процессы, связанные с циклотронным резонансом).

4. На стр. 69 говорится о марковском свойстве, характерном для случайных процессов, но не объясняется, почему описанное явление высыпания энергичных электронов из радиационного пояса является случайным процессом.

5. Стр. 99 – 100. Нет обоснования предположения о том, что «Развивающаяся в процессе нагрева турбулентность ионосферной плазмы могла способствовать формированию в зоне нагрева продольных электрических полей», а также выбору одного преимущественного направления этого продольного электрического поля. На основании этого не сделанного вывода базируется заключение о движении плазмы внутрь и расчет области этого движения.



## 6. Замечания по некоторым небрежностям в работе.

В начале диссертации не указаны единицы измерения  $Dst$ , этот индекс выглядит как безразмерная величина, только на 39-й стр. впервые появляется значение  $Dst$  в нТл.

Стр. 28. В формуле (1.3.3) значение  $B_0$  не определено. На стр. 38 появляется  $B_{эк}$  – также не определенная величина. Скорее всего, это поле на экваторе, но на стр. 45 говорится, что  $B_0$  – напряженность магнитного поля на экваторе.

В формуле (1.3.1) на стр. 28  $R_E$  – радиус Земли, а во второй строке снизу на той же стр. 28 появляется вместо него обозначение  $R_3$ .

В формуле (1.3.5) на стр. 29 не уточняется значение параметра  $\alpha_0$ . Параметр  $\alpha$  описан только на стр. 30 в обсуждении формулы (1.3.9). Из этого описания можно сделать вывод, что его значение на экваторе  $\alpha_0$ .

В формуле (1.3.7) на стр. 30 не сказано, что такое  $m$ . На стр. 46 в описании формулы (2.1.3) сказано, что  $m$  – масса электрона.

Уравнение (1.3.8) на стр. 30. В нем не описан параметр  $B_{отр}$ , но по смыслу это магнитное поле в точке отражения. Ниже на той же странице вводится  $B_M$  для поля в максимуме напряженности. Это разные величины или одна с разными обозначениями?

На стр. 46 написано, что  $\omega_B$  – циклотронная частота электрона, а пятью строками ниже возникает уже  $\omega_{Be}$ , что по-видимому, обозначает ту же самую величину. На стр. 47 и далее фигурирует уже только  $\omega_{Be}$ .

Эти небрежности затрудняет восприятие работы, но не умаляют ее значения.


Диссертация выполнена на современном уровне, в ней решаются актуальные проблемы, получены новые и оригинальные результаты, представляющие интерес для широкого круга людей, занимающихся научными и практическими проблемами ближнего космоса.

По материалам диссертации опубликованы 2 работы в журналах из списка ВАК и 4 статьи в изданиях, не вошедших в список ВАК. Результаты диссертации были доложены на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Зинкиной Марины Дмитриевны отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №

842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ),  
доктор физико-математических наук  /Е.С. Беленькая/

119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Тел. +7 495 9393921; e-mail: [elena@dec1.sinp.msu.ru](mailto:elena@dec1.sinp.msu.ru)

21 августа 2015 г.

Подпись руки Е.С. Беленькой заверяю

И.о. директора НИИЯФ МГУ

профессор



/В.И. Саврин/