

Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

На правах рукописи
УДК 523.9-332, 551.521.3

Зинкина Марина Дмитриевна

**Высыпания электронов внешнего радиационного пояса в
атмосферу по данным бортовых радиационных измерений ИСЗ
«МЕТЕОР-3М №1».**

Специальность 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
Доктор физико-математических наук
Ю.В. Писанко

Москва – 2015 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова»

Научный руководитель: Писанко Юрий Владимирович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией ФГБУ «ИПГ»

Официальные оппоненты: Беленькая Елена Семеновна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ
Шувалов Вячеслав Александрович, кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГУП ЦНИИмаш

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический Институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится «07» _октября_ 2015 года в _14_ часов на заседании диссертационного совета Д 327.008.01 при Институте прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова под адресу: 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д.9

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ФГБУ «ИПГ» по адресу: 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д.9, <http://ipg.geospace.ru>

Автореферат разослан « » _____ 2015 года

Ученый секретарь диссертационного совета:

к.ф.-м.н.

Е.Н. Хотенко

Общая характеристика исследования

Формулировка проблемы и её актуальность. Одной из актуальных проблем физики околоземного космического пространства является исследование динамики радиационных поясов Земли и сопутствующих геофизических явлений. Структуру и динамику радиационных поясов определяют три процесса: инжекция заряженных частиц в область захвата, диффузия таких частиц поперёк магнитного поля и их утечка из области захвата, которая, в конце концов, реализуется как высыпание энергичных частиц в атмосферу. В высоких широтах энергичные электроны из внешнего радиационного пояса вдоль геомагнитных силовых линий способны проникать в среднюю атмосферу, где они теряют энергию на образование локальных трасс повышенной ионизации. Высыпающиеся электроны представляют собой основной источник ночной ионизации на высотах 70-90 км. Высыпание энергичных частиц радиационных поясов в атмосферу меняет её состав на больших высотах, а, следовательно, и прозрачность в различных участках спектра. Считается, что высыпания – это доминирующий прямой источник окислов азота в субавроральных широтах мезосферы. Таким образом, высыпания электронов из внешнего радиационного пояса – это один из агентов, обеспечивающих магнитосферно-атмосферные связи.

В течение четырёх лет с 2002 по 2005 годы на околоземной квазикруговой полярной орбите на высоте ~ 1000 км функционировал отечественный ИСЗ «Метеор-3М №1» гидрометеорологического назначения. На борту спутника был установлен комплекс аппаратуры гелиогеофизических измерений в составе комплекса геофизических измерений КГИ-4С и аппаратуры измерения геоактивных излучений МСГИ-5ЕИ. Анализ данных наблюдений за электронами внешнего радиационного пояса на орбите спутника, выполненных с помощью этой аппаратуры, выявил большое количество событий высыпаний таких электронов.

Задачи диссертационной работы. Исходя из изложенного выше, задачи диссертационной работы формулировались следующим образом:

1. На большом экспериментальном материале, полученном с бортового комплекса аппаратуры гелиогеофизических измерений ИСЗ «Метеор-3М №1» в 2002-2005 годах, выяснить на каких широтах (при каких значениях параметра Мак-Илвайна) высыпания электронов из внешнего радиационного пояса наблюдались чаще всего; установить связь частоты высыпаний с уровнем геомагнитной активности.
2. В широтных зонах наибольшей встречаемости событий высыпаний по данным бортовых измерений ИСЗ «Метеор-3М №1» собрать статистику о частоте встречаемости различных значений скорости счёта электронов, и рассчитать вероятность высыпания, характеризующегося скоростью счёта энергичных электронов, попадающей в заданный интервал, т.е. дать оценку вероятности высыпания при скорости счёта, попадающей в заданный интервал.

3. За период 19.04.2004-26.04.2004 проведения экспериментов по нагреву ионосферы установкой НААРР исследовать по данным о скоростях счёта резонансных (с энергией ~ 40 кэВ) электронов с дискретностью 5 измерений в секунду с прибора МИП-1 из состава, разработанного в НИИЯФ МГУ, комплекса аппаратуры МСГИ-5ЕИ стимулированные высыпания резонансных электронов над установкой и в районе магнито-сопряжённой точки; на доступном материале (19.04.2004-26.04.2004) исследовать зависимость характеристик стимулированных высыпаний от уровня геомагнитной активности.
4. Дать интерпретацию результатов наблюдений стимулированных высыпаний электронов в атмосфере в терминах продольных (направленных вдоль геомагнитной силовой линии) электрических полей и продольных токов; оценить связь интенсивности стимулированного высыпания и его пространственно-временных характеристик.

Научная новизна работы. Впервые на большом экспериментальном материале по результатам обработки данных орбитальных измерений, выполненных однотипным прибором за длительный период времени (2002-2005 годы), установлено, что, по большей части, высыпания электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу наблюдались в спокойных и слабо возмущённых геомагнитных условиях (2005 год - более 92% всех событий; 2004 год - более 73% всех событий; 2003 – более 93% всех событий; 2002 год - более 60% всех событий).

Впервые за длительный (более трёх лет) период наблюдений на околоземной орбите собрана статистика о частоте встречаемости высыпаний при различной скорости счёта в широтных зонах, где высыпания наблюдались чаще всего. Установлено, что частота появления событий высыпаний высокоэнергичных электронов в зависимости от наблюдаемой в процессе высыпания скорости счёта распределена по экспоненциальному закону, и на этой основе вычислены вероятности событий высыпаний при скорости счёта, попадающей в заданный интервал. Марковское свойство для экспоненциального распределения позволяет утверждать, что интенсивность следующего высыпания всегда распределена экспоненциально (с одним и тем же параметром) независимо от интенсивности предыдущего высыпания.

Впервые по данным о скоростях счёта резонансных (с энергией ~ 40 кэВ) электронов с дискретностью 5 измерений в секунду с прибора МИП-1 из состава, разработанного в НИИЯФ МГУ, комплекса аппаратуры МСГИ-5ЕИ исследована зависимость характеристик стимулированных работой нагревного стенда высыпаний резонансных электронов от уровня геомагнитной активности на доступном материале (19.04.2004-26.04.2004). С ростом геомагнитной активности (по a_p -индексу) интенсивность высыпания возрастает. В рамках модели электрического дрейфа в продольном электрическом поле и магнитном поле продольного тока объяснена

тенденция сжатия к продольной оси потока высыпавшихся резонансных электронов. Получено удовлетворительное (по порядку величины) согласие между теоретической оценкой пространственного размера стимулированного высыпания и оценкой этого размера по данным бортовых измерений ИСЗ «Метеор-3М №1».

Научная и практическая ценность работы. Научную и практическую ценность работы можно сформулировать следующим образом:

1. Статистика наблюдавшихся на орбите ИСЗ «Метеор-3М №1» в 2002-2005 годах высыпаний электронов из внешнего радиационного пояса в атмосферу свидетельствует о том, что чаще всего такие высыпания наблюдаются в спокойных и слабо возмущённых геомагнитных условиях. Это представляет интерес для разработки моделей отклика динамики внешнего радиационного пояса на изменения уровня геомагнитной активности.
2. Статистика о частоте встречаемости высыпаний различной скорости счета и статистические оценки вероятности событий высыпаний при скорости счета, попадающей в заданный интервал, важны для разработчиков космической техники, поскольку они позволяют оценивать различные риски и разрабатывать стратегии по снижению рисков. Практический результат состоит в том, что, как показано в работе, вероятность высыпаний при невысокой скорости счета существенно выше вероятности высыпаний при очень высокой скорости счета. И если на современном уровне нашего понимания динамики внешнего радиационного пояса нельзя спрогнозировать интенсивность данного конкретного события высыпания электронов, то можно сделать оценку вероятности высыпания с интенсивностью, попадающей в заданный интервал.
3. Марковское свойство экспоненциального закона распределения встречаемости высыпаний, характеризующихся различной скоростью счета, позволяет утверждать, что интенсивность любого высыпания не зависит от интенсивности предыдущих высыпаний. Этот результат позволяет по-новому осветить утечку заряженных частиц из области захвата.
4. Обнаружение по данным бортовых измерений ИСЗ «Метеор-3М №1» сжимающихся к продольной оси в результате электрического дрейфа в продольном электрическом поле и магнитном поле продольного тока высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса, стимулированных нагревными экспериментами в ионосфере, вносит вклад в интерпретацию результатов исследований ионосферно-магнитосферных связей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Статистический результат о том, что высыпания электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу, зафиксированные

бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1», гораздо чаще наблюдаются в спокойных и слабо возмущённых геомагнитных условиях (2005 год - более 92% всех событий; 2004 год - более 73% всех событий; 2003 – более 93% всех событий; 2002 год - более 60% всех событий).

2. Статистический результат о том, что частота появления событий высыпаний высокоэнергичных электронов, зафиксированных бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1», в зависимости от наблюдаемой в процессе высыпания скорости счёта распределена по экспоненциальному закону. Вывод о том, что в 2002-2005 годах вероятность высыпаний при невысокой скорости счёта была существенно выше вероятности высыпаний при очень высокой скорости счёта.
3. Полученный по данным спутниковых наблюдений с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» во время экспериментов по нагреву ионосферы, проводившихся 19.04.2004-26.04.2004, результат о том, что с ростом геомагнитной активности (по a_p -индексу) интенсивность стимулированного высыпания резонансных электронов из внешнего радиационного пояса возрастает.
4. Интерпретация результатов спутниковых наблюдений с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» стимулированных высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса о тенденции сжатия к продольной оси потока высыпающихся резонансных электронов в рамках модели электрического дрейфа в продольном электрическом поле и магнитном поле продольного тока.

Апробация диссертационной работы. Результаты, полученные и описанные в диссертации, докладывались и обсуждались на конференции молодых учёных Росгидромета, посвящённой 100-летию со дня рождения Героя Советского союза академика Е.К. Фёдорова (Москва, 2009), всероссийской с международным участием конференции «Применение космических технологий для развития арктических регионов» (Архангельск, 2013 г.), The 40th COSPAR Scientific Assembly (Moscow, 2014).

Основные результаты, изложенные в диссертации, были опубликованы в журналах из списка ВАК. Список публикаций приведен в конце автореферата. Общее количество публикаций по теме – 8.

Личный вклад автора. Все представленные к защите результаты, а именно:

1. Статистический результат о том, что высыпания электронов внешнего радиационного пояса в атмосферу, зафиксированные бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1», гораздо чаще наблюдаются в спокойных и слабо возмущённых геомагнитных условиях (2005 год - более 92% всех событий; 2004 год - более 73% всех событий; 2003 – более 93% всех событий; 2002 год - более 60% всех событий).

2. Статистический результат о том, что частота появления событий высыпаний высокоэнергичных электронов, зафиксированных бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1», в зависимости от наблюдаемой в процессе высыпания скорости счёта распределена по экспоненциальному закону. Вывод о том, что в 2002-2005 годах вероятность высыпаний при невысокой скорости счета была существенно выше вероятности высыпаний при очень высокой скорости счета.
3. Полученный по данным спутниковых наблюдений с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» во время экспериментов по нагреву ионосферы, проводившихся 19.04.2004-26.04.2004, результат о том, что с ростом геомагнитной активности (по a_p -индексу) интенсивность стимулированного высыпания резонансных электронов из внешнего радиационного пояса возрастает.
4. Интерпретация результатов спутниковых наблюдений с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» стимулированных высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса о тенденции сжатия к продольной оси потока высыпающихся электронов в рамках модели электрического дрейфа в продольном электрическом поле и магнитном поле продольного тока.

получены лично автором. В публикации, подготовленные в соавторстве, все соавторы внесли одинаковый вклад.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения, содержит 112 страниц, 45 рисунков, 3 таблицы. Список литературы насчитывает 101 наименование.

Краткое содержание работы

Во введении сформулирована тема диссертации, обоснована её актуальность, обозначены задачи работы, направления исследований и основные положения, выносимые на защиту. Отражена новизна полученных результатов, их научная и практическая ценность. Описана структура диссертационной работы.

Первая глава диссертации представляет собой обзор литературы, относящейся к теме диссертации. Рассмотрено движение заряженных частиц в геомагнитном поле и адиабатические инварианты такого движения. Приводятся необходимые сведения о свистящих атмосфериках и магнитосферных излучениях в ОНЧ/КНЧ диапазоне – шипениях, хорах, дискретных излучениях. Перечислены особенности структуры радиационных поясов, которая определяется взаимодействием источников и стоков частиц. Что касается стоков, то для протонов и ионов радиационных поясов основными являются ионизационные потери: частицы теряют свою энергию при ионизации и возбуждении атомов и ионов верхней атмосферы. Для

электронов более эффективно кулоновское рассеяние. Оно определяет время жизни электронов внутреннего пояса. Основным механизмом утечек электронов внешнего пояса считается циклотронная неустойчивость. В высоких широтах энергичные электроны из внешнего радиационного пояса вдоль геомагнитных силовых линий способны проникать в среднюю атмосферу, где они теряют энергию на образование локальных трасс повышенной ионизации. Высыпающиеся электроны представляют собой основной источник ночной ионизации на высотах 70-90 км. Высыпание энергичных частиц радиационных поясов в атмосферу меняет её состав на больших высотах, а, следовательно, и прозрачность в различных участках спектра. Считается, что высыпания – это доминирующий прямой источник окислов азота в субавроральных широтах мезосферы. Таким образом, высыпания электронов из внешнего радиационного пояса – это один из агентов, обеспечивающих магнитосферно-атмосферные связи.

Во второй главе диссертации проведён статистический анализ данных наблюдений высыпаний энергичных электронов из внешнего пояса с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» за 2002-2005 годы. В случае если зеркальная точка отражения находится выше 200 км, преобладающим механизмом потерь является рассеяние электронов на электромагнитных волнах свистового диапазона, которое приводит к диффузии по питч-углам и высыпаниям в атмосферу. Измерения с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» подтвердили, что на малых (~1000 км) высотах высыпания электронов из внешнего радиационного пояса проявляются в форме очень узких пиков на более или менее плавных контурах потоков электронов. Скорость счёта электронов в пике в два или более раз выше скорости счёта электронов по соседству с пиком. Типичная ширина пиков во времени - несколько секунд, что соответствует $\Delta L \sim 0,1$. Это позволяет считать, что в данном случае мы наблюдаем поток энергичных электронов, высыпающихся в узкой трубке магнитных силовых линий; такое возможно при наличии в данной трубке неоднородности в распределении концентрации магнитосферной плазмы – дакта, когда локально могут сформироваться благоприятные условия для развития циклотронной неустойчивости, что приводит к генерации и усилению электромагнитного излучения свистового диапазона, а также к локальному высыпанию энергичных электронов из радиационных поясов.

В данных бортовых радиационных измерений ИСЗ «Метеор-3М» №1 за 2002 г. было отобрано 955 событий высыпаний, за 2003 г. – 1155 событий высыпаний, 2004 г. – 999 событий высыпаний, 2005 г. – 386 событий высыпаний. Для выявления широтных зон, в которых высыпания электронов из внешнего радиационного пояса фиксировались бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1» наиболее часто, были построены гистограммы частоты появления событий высыпаний в зависимости от параметра Мак-Илвайна L . На рисунке 1 приведён пример такой гистограммы (по оси абсцисс – параметр L , по оси ординат – число событий) за 2003 год.



Рисунок 1 - Гистограмма событий высыпаний энергичных электронов от параметра L за 2003 год.

Анализ геомагнитной активности (Dst -индексы) в периоды времени, соответствующие событиям высыпаний электронов, показал, что высыпания чаще наблюдались в спокойных и слабо возмущённых геомагнитных условиях. Геомагнитные условия считались спокойными, когда значения Dst-индексов были больше -30, слабо возмущёнными от -30 до -50, умеренно возмущёнными от -50 до -100, сильно возмущёнными меньше -100. Были просмотрены значения Dst-индексов для событий высыпаний за 2002-2005 гг., попадающих в интервалы по L от 3.1 до 3.9 и от 5.1 до 5.9. В 2005 году в интервале по L от 3.1 до 3.9 76% всех событий наблюдалось в спокойных условиях, 16% - в слабо возмущённых геомагнитных условиях, 8% - в умеренно возмущённых условиях. В интервале по L от 5.1 до 5.9 89% всех событий наблюдалось в спокойных условиях, 5.5% - в слабо возмущённых условиях, 5.5% - в умеренно возмущённых геомагнитных условиях. В 2004 году в интервале по L от 3.1 до 3.9 53% всех событий наблюдалось в спокойных геомагнитных условиях, 20% - в слабо возмущённых условиях, 13.5% - в умеренно возмущённых условиях, 13.5% - в сильно возмущённых условиях. В интервале по L от 5.1 до 5.9 96% всех событий наблюдалось в спокойных геомагнитных условиях, 4% - в сильно возмущённых геомагнитных условиях. В 2003 году в интервале по L от 3.1 до 3.9 86% всех событий наблюдалось в спокойных геомагнитных условиях, 14% - в слабо возмущённых геомагнитных условиях. В интервале по L от 5.1 до 5.9 53% всех событий наблюдалось в спокойных условиях, 40% - в слабо возмущённых условиях, 7% - в умеренно возмущённых геомагнитных условиях. В 2002 году в интервале по L от 3.1 до 3.9 53% наблюдалось в спокойных геомагнитных условиях, 7% - в слабо возмущённых условиях, 40% - в умеренно возмущённых условиях. В интервале по L от 5.1 до 5.9 60%

всех событий наблюдалось в спокойных геомагнитных условиях, 13% - в слабо возмущенных условиях, 20% - в умеренно возмущенных условиях и 7% - в сильно возмущенных условиях.

Была исследована статистическая зависимость частоты появления событий высыпаний от скорости счёта электронов во время события высыпания. Частота появления событий нормировалась на максимальное значение частоты появления событий для данного года, а скорость счёта, которая изменялась в пределах от 0 до 65000, нормировалась на величину 28000. Пример соответствующих гистограмм приводится на рисунке 2.

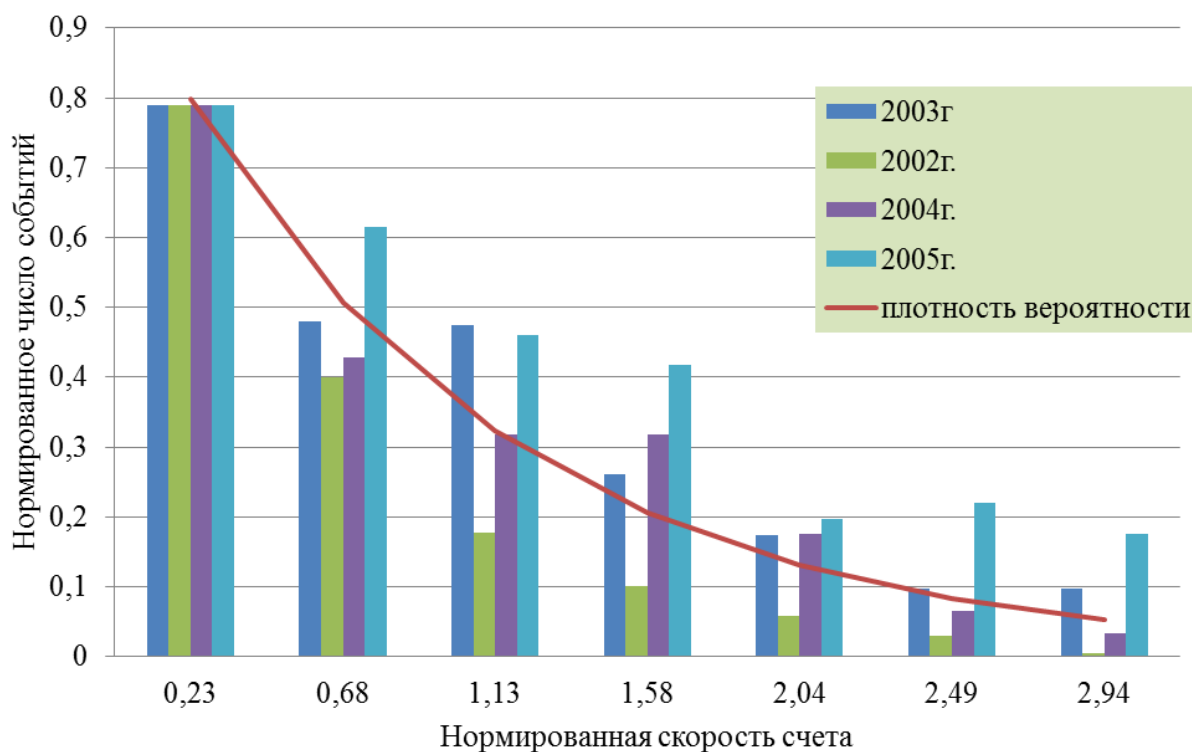


Рисунок 2 - Нормированные гистограммы для скоростей счёта за 2002-2005 гг. для L от 5.1 до 5.9. Красная кривая - это плотность вероятности подобранного экспоненциального распределения.

Наилучшим образом эти гистограммы аппроксимирует экспоненциальная функция с параметром $\lambda=1.3$, то есть экспоненциальная функция плотности вероятности вида $y = 1.3e^{-1.3x}$. Это позволяет вычислять вероятность события высыпания с заданной скоростью счёта. На рисунке 3 показана вероятность обнаружения в событии высыпания скорости счёта электронов в заданном интервале.

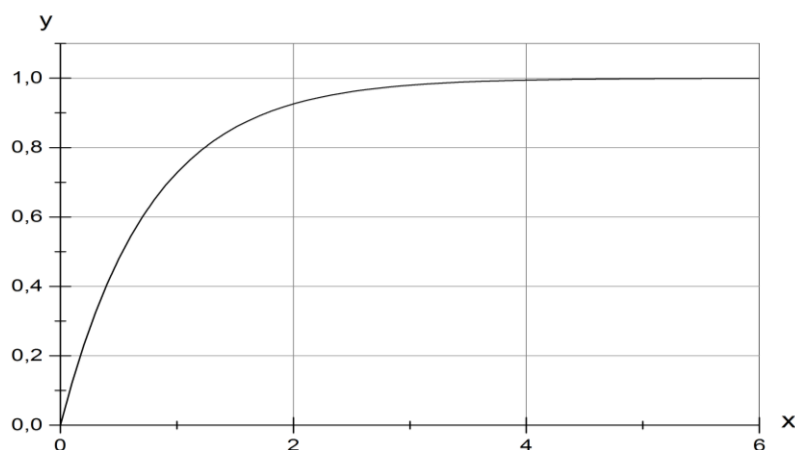


Рисунок 3 - Вероятность появления событий высыпаний электронов в зависимости от скорости счёта (вероятность $y=1-\exp(-1.3x)$, где $x=I/28000$, I – скорость счёта)

Например, вероятность события высыпания высокоэнергичных электронов при скорости счёта, попадающей в интервал от 10000 до 15000 равна 0,1.

Поскольку частота появления событий высыпаний высокоэнергичных электронов в зависимости от наблюдаемой в процессе высыпания скорости счёта распределена по экспоненциальному закону, а экспоненциальное распределение обладает марковским свойством, это позволяет утверждать, что интенсивность любого высыпания не зависит от интенсивности предыдущих высыпаний.

В третьей главе диссертации детально исследуются наблюдавшиеся бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1» события высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса за период 19.04.2004-26.04.2004 проведения экспериментов по нагреву ионосферы установкой НААРР. В экспериментах по высокочастотному нагреву используют направленное в ионосферу излучение передатчиков, работающих на частоте $\sim 3-8$ МГц с модуляцией на более низкой частоте. Это может приводить к генерации ОНЧ-КНЧ волн в магнитосфере. При этом могут возникать и эффекты, связанные с высыпанием потоков частиц из радиационных поясов в атмосферу. Поперечные электромагнитные волны, которые распространяются вдоль силовых линий магнитного поля («свисты»), способны перевести захваченные электроны в конус потерь. Наиболее эффективно этот процесс идёт для электронов внешнего радиационного пояса с энергией 30-40 кэВ.

Данные о скоростях счёта электронов с энергией более 40 кэВ на орбите ИСЗ «Метеор-3М №1» поставлял прибор МИП-1 из состава, разработанного в НИИЯФ МГУ, комплекса аппаратуры МСГИ-5ЕИ, предназначенного для измерения дифференциальных спектров как электронной, так и протонной компонент корпускулярных излучений.

Гейгеровский счётчик, входивший в комплект датчиков МИП-1, обеспечивал измерение скорости счёта электронов с энергией более 40 кэВ с дискретностью 5 измерений в секунду. Поскольку в нашем распоряжении имеются данные наблюдений радиационной обстановки на орбите ИСЗ «Метеор-3М №1» только за 2002-2005 годы, для детального изучения был выбран временной интервал 19.04-26.04.2004, когда проводились эксперименты по нагреву ионосферы с помощью стенда HAARP. Стенд HAARP расположен в Гаконе на Аляске под 62.39° с.ш. и 145.15° з.д. в области дипольного геомагнитного поля ($L \approx 4.9$). Эксперименты 19.04-26.04.2004 по исследованию сверхдальнего распространения в космической плазме вдоль силовых линий геомагнитного поля КНЧ/ОНЧ сигналов, генерированных при воздействии модулированного радиоизлучения на область протекания ионосферного тока, описаны в [Inan U.S., Golkowski M., Carpenter D.L., Reddell N., Moore R.C., Bell T.F. Paschal E., Kossey P., Kennedy E. And Meth S.Z. Multi-hop whistler-mode ELF//VLF signals and triggered emissions excited by the HAARPHF heater // Geophys. Res. Letters, 2004, V.31, L24805, doi:10.1029/2004GL021647]. Приёмник был установлен на судне в магнито-сопряжённой точке в южном полушарии. Были выбраны моменты времени, когда в период проведения этих экспериментов ИСЗ «Метеор-3М №1» находился либо над стендом HAARP, либо в районе магнито-сопряжённой точки. Всего удалось найти 8 таких пролётов спутника. 19.04.2004-26.04.2004 стенд HAARP работал каждый день с 02:00-15:00 UT. Несущая частота менялась каждые полчаса с 3.25 МГц на 5.8 МГц, излучаемая мощность составляла 960 кВт. Режим излучения – односторонние повторяющиеся с односторонним интервалом сигналы, модулированные синусоидальным сигналом на частоте 1-2 кГц. Диаграмма направленности строилась в вертикальной плоскости. Энергия резонансных электронов оценивается авторами эксперимента в несколько десятков кэВ. В моменты, когда спутник «Метеор-3М № 1» находился над работающим стендом HAARP или в районе магнито-сопряжённой точки, прибором МИП-1 были 8 раз зафиксированы характерные эффекты в виде резкого (более чем на порядок величины) кратковременного повышения скорости счёта электронов с энергией более 40 кэВ (рисунок 4).

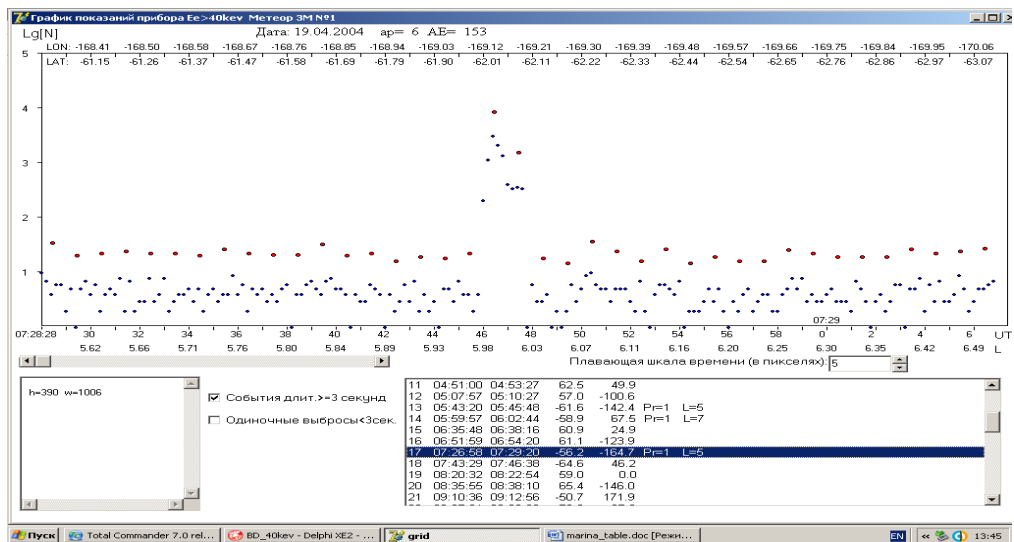


Рисунок 4 - Эффект кратковременного повышения скорости счета электронов с энергией более 40 кэВ по данным с прибора МИП-1

Данные бортовых измерений были привязаны поминутно к повторяющимся одноминутным сигналам HAARP. Даты, когда спутник «Метеор 3М № 1» пролетал над работающим стендом HAARP: 19.04.2004 в 04:00-04:01, в 05:44-05:45, в 07:28-07:29; 24.04.2004 в 08:32-08:33; 25.04.2004 в 08:32-08:33, в 10:16-10:17; 26.04.2004 в 05:36-05:37, в 07:20-07:21. Во всех случаях пролёта ИСЗ «Метеор-3М №1» над работающим нагревным стендом или в районе магнито-сопряжённой точки наблюдался узкий по времени (двухсекундный) пик скорости счёта электронов с энергией свыше 40 кэВ. Скорость счёта в этом пике как минимум на порядок превосходила своё фоновое значение. Амплитуда пика скорости счёта возрастала с ростом a_p - индекса геомагнитной активности.

Для интерпретации данных спутниковых наблюдений потоков высыпающихся при нагреве ионосферы в эксперименте 19.04.2004-26.04.2004 резонансных электронов с энергией более 40 кэВ можно предложить следующий сценарий. Нагрев E-области ионосферы, где протекают SQ-токи, модулированным радиоизлучением (несущая частота 3.25-5.8 МГц, частота модуляции 1-2 кГц) приводил к изменениям проводимости E-области ионосферы на частоте модуляции. Это, в свою очередь, приводило к изменениям электрического тока на частоте модуляции, и переменный ток излучал в магнитосфере электромагнитные волны на частоте модуляции (1-2 кГц). Связанная с распространяющимся в плазмосферном дакте вдоль силовых линий геомагнитного поля низкочастотным электромагнитным излучением питч-угловая диффузия резонансных (~ 40 кэВ) электронов внешнего радиационного пояса в конус потерь приводила к высыпанию этих электронов вдоль геомагнитных силовых линий в атмосферу над районом нагрева ионосферы и в районе магнито-сопряжённой точки. Развивающаяся в процессе нагрева

турбулентность ионосферной плазмы могла способствовать формированию в зоне нагрева продольных электрических полей. О такой возможности свидетельствуют прямые измерения продольных электрических полей с борта ИСЗ «DEMETER» в другом эксперименте по нагреву ионосферы с использованием стенда HAARP. Присутствие продольных электрических полей и привело к сжатию (за счёт электрического дрейфа) к продольной оси потоков высыпающихся из внешнего радиационного пояса резонансных электронов с энергией свыше 40 кэВ, зафиксированному по данным бортовых радиометрических измерений ИСЗ «Метеор-3М №1».

В модели цилиндра с электрическим полем, направленным по оси z, и бессиловым магнитным полем с ϕ - и z-компонентами, которое может вызываться как продольным током I_z , создаваемым электронами с энергией более 40 кэВ и текущим в плазме, так и за счёт внешних источников, характерный размер в радиальном направлении определяется значением параметра $l=B_0c/(4\pi i_0)$ (где B_0 – напряжённость поля на оси, i_0 – максимальная плотность тока). Если направления электрического поля и тока совпадают, то под влиянием электрического поля происходит дрейф плазмы внутрь по радиусу со скоростью:

$$\vec{v} = \frac{c}{B^2} [\vec{E} \times \vec{B}] \rightarrow v_r = -\frac{cE_z B_\phi}{(B_z^2 + B_\phi^2)} \quad (1)$$

Если электрическое поле антипараллельно току, то дрейф направлен наружу по радиусу. Если же электрическое поле отсутствует, то магнитное поле и не способствует и не противодействует сжатию тока, так как в бессиловом поле сила Ампера равна нулю.

Полученная на этой основе теоретическая оценка $l = 18.6$ км удовлетворительно (по порядку величины) согласуется с оценкой 7.35 км/сек $\times 2$ сек = 14.7 км, вытекающей непосредственно из орбитальных измерений характерного размера высыпаний. Этот механизм сжатия, предложенный первоначально для объяснения волокнистых структур, которые являются весьма распространённым явлением в космической плазме (волокнистые межзвёздные облака, корональные волокна, протуберанцы и т.д.), объясняет также и тенденцию сжатия к продольной оси потоков высыпающихся из внешнего радиационного пояса резонансных электронов с энергией свыше 40 кэВ.

В заключении содержатся выводы и основные результаты диссертации. Сформулированы предложения о возможном применении результатов, полученных в диссертации.

Основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. На большом экспериментальном материале, полученном с бортового комплекса аппаратуры гелиогеофизических измерений ИСЗ «Метеор-

- 3М №1» в 2002-2005 годах, выяснено на каких широтах (при каких значениях параметра Мак-Илвайна) высыпания электронов из внешнего радиационного пояса наблюдаются чаще всего; установлена связь частоты высыпаний с уровнем геомагнитной активности.
2. В широтных зонах наибольшей встречаемости событий высыпаний по данным бортовых измерений ИСЗ «Метеор-3М №1» собрана статистика о частоте встречаемости различных значений скорости счёта электронов, и рассчитана вероятность высыпания, при скорости счёта энергичных электронов, попадающей в заданный интервал, т.е. дана оценка вероятности высыпания при скорости счёта, попадающей в заданный интервал.
 3. За период 19.04.2004-26.04.2004 проведения экспериментов по нагреву ионосферы установкой HAARP исследованы по данным о скоростях счёта резонансных (с энергией ~ 40 кэВ) электронов с дискретностью 5 измерений в секунду с прибора МИП-1 из состава, разработанного в НИИЯФ МГУ, комплекса аппаратуры МСГИ-5ЕИ стимулированные высыпания резонансных электронов над установкой и в районе магнито-сопряжённой точки; на доступном материале (19.04.2004-26.04.2004) исследованы зависимости характеристик стимулированных высыпаний от уровня геомагнитной активности.
 4. Дана интерпретация результатов наблюдений стимулированных высыпаний электронов в атмосферу в терминах продольных (направленных вдоль геомагнитной силовой линии) электрических полей и продольных токов; оценена связь интенсивности стимулированного высыпания и его пространственно-временных характеристик.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих журналах из списка ВАК:

1. Авдюшин С. И., Важенин А. А., Гинзбург Е. А., Зинкина М. Д., Минлигареев В. Т., Нусинов А. А., Пегоев А. Н., Писанко Ю. В., Свидский П. М., Юдкевич И. С. Измерения характеристик потоков ионизирующих излучений околоземного космического пространства на космическом аппарате «Метеор-3М» // *Специальная техника*, 2014, №2, С.44-53.

2. Зинкина М. Д. Вероятность высыпаний электронов из радиационных поясов по наблюдениям с ИСЗ «Метеор – 3М» №1 за 2002-2005 гг. // *В мире научных открытий*, 2014, № 4(52) С.172-178.

А также:

1. Zinkina M. D. The «Meteor – 3M» Satellite № 1 Observations of Electron Precipitation Events to Outer Terrestrial Atmosphere for 2002-2005. // *The 40th COSPAR Scientific Assembly 2–10 August 2014, Program Book*, P.233.

2. Зинкина М. Д. Статистика высыпаний релятивистских электронов из внешнего радиационного пояса Земли вблизи зоны полярных сияний // Всероссийская научная конференция с международным участием «Применение космических технологий для развития арктических регионов» 17-19 сентября 2013 г.

3. Зинкина М. Д. Оценка вероятности высыпания высокоэнергичных электронов из внешнего радиационного пояса Земли по данным спутника «Метеор 3М» № 1 за 2002-2005 гг. // Гелиогеофизические исследования, 2013, выпуск 5, С.110-114, 2013, <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=147>.

4. Зинкина М. Д. Статистика высыпаний электронов из радиационных поясов Земли //Сборник трудов института прикладной геофизики им. ак. Е. К. Федорова , 2013 г., вып. 91, С. 128-137.

5. Антипина М. Д. Оценка потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе с учетом поправки на «мертвое время» счетчиков Гейгера // Гелиогеофизические исследования, 2010, выпуск 88, С. 20-24.

6. Давыдов В.Е., Зинкина М. Д., Писанко Ю.В. Наблюдения с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса во время эксперимента по нагреву ионосферы 19.04.2004-26.04.2004 // Гелиогеофизические исследования, 2015, выпуск 12, С. 11–20.