

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный
исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук»
(ИКФИА СО РАН)

На правах рукописи



Парников Станислав Григорьевич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СУБАВРОРАЛЬНОМ СВЕЧЕНИИ.
НОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ**

Специальность: 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
к.ф.-м.н. Иевенко Игорь Борисович

Якутск-2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СУБАВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ. ЕГО СВЯЗЬ С ОКОЛОЗЕМНОЙ ОБЛАСТЬЮ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ, КОЛЬЦЕВОГО ТОКА И ВНЕШНЕЙ ПЛАЗМОСФЕРОЙ.....	13
1.1 Структура магнитосферы.....	13
1.2 Магнитосферные суббури.....	14
1.3 Особенности излучения основных эмиссий в свечении ночного неба и в полярном сиянии	17
1.4 SAR-дуги и диффузное сияние как следствие динамических процессов во внутренней магнитосфере в периоды магнитных возмущений	18
1.5 Пульсирующие сияния и пульсации свечения в окрестности экваториальной границы диффузного сияния и на широтах SAR-дуги	23
1.6 Развитие субаврорального свечения STEVE во время суббури	29
Выводы к 1 главе	32
ГЛАВА 2. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	34
2.1 Комплекс оптических приборов для регистрации сияний и субаврорального свечения.....	34
2.1.1 Меридиональный сканирующий фотометр.....	34
2.1.2 Зенитный фотометр	35
2.1.3 Камера всего неба «KeoSentry»	36
2.1.4 Четырехканальный фотометр для регистрации пульсаций свечения	37
2.2 Методология обработки оптических данных	38
2.3 Некоторые характеристики спутников, данные которых были использованы в работе	39
Выводы ко 2 главе	41
ГЛАВА 3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ SAR-ДУГИ ВО ВРЕМЯ СУББУРИ. РАЗВИТИЕ ПУЛЬСАЦИЙ СВЕЧЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ГРАНИЦЫ ДИФФУЗНОГО СИЯНИЯ И НА ШИРОТАХ SAR-ДУГИ	43
3.1 Результаты наблюдений. Общй анализ развития явлений 15 февраля 2018 г.....	43

3.2 Динамика сияний и SAR-дуги по данным изображений всего неба во время суббури 15 февраля 2018 г.	46
3.3 Фотометрическая регистрация вариаций свечения в диффузном сиянии и SAR-дуге во время суббури 15 февраля 2018 г.	48
3.4 Регистрация Te пиков на спутнике Swarm-B во время наблюдений SAR-дуги.....	50
3.5.1 Параметры солнечного ветра, динамика сияний и SAR-дуги во время подготовительной и взрывной фаз суббури.....	53
3.5.2 Пульсирующие вариации интенсивности эмиссий 427,8 нм (N_2^+) и 630,0 нм [OI] в зените станции наблюдений.....	54
3.5.3 Сопоставление Te пиков с наземными наблюдениями SAR-дуги.....	55
3.6 Развитие пульсаций свечения на широтах SAR-дуги во время суббури 30 марта 2003 г. Результаты наблюдений.....	55
3.8 Особенности развития пульсаций свечения в Z- и E-направлениях. Долготная задержка.....	58
3.9 Оценка частот ЭМИЦ волн в области внешней плазмосферы.....	59
3.10 Обсуждение результатов наблюдений пульсаций свечения на широтах SAR-дуги во время суббури 30 марта 2003г.	63
Выводы к 3 главе.....	65
ГЛАВА 4. СВЯЗЬ SAR-ДУГИ С ПЛАЗМОПАУЗОЙ И ОКОЛОЗЕМНОЙ ГРАНИЦЕЙ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА.....	67
4.1 Начало магнитной бури и наблюдение SAR-дуги на станции «Маймага» 17 марта 2015 г.	67
4.3 Измерения DMSP- F19 в ионосфере во время наблюдений SAR-дуги.....	73
4.4 Обсуждение результатов наблюдения SAR-дуги во время бури 17 марта 2015 г.....	75
Выводы к 4 главе.....	77
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СУБАВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ STEVE ВО ВРЕМЯ СУББУРИ 1 МАРТА 2017 Г.	79
5.1 Магнитосферная активность во время наблюдений STEVE.....	79
5.2 Динамика и интенсивность STEVE, Picket fence и SAR-дуги.....	81
5.3 Взаимное расположение STEVE и Picket fence. Высота STEVE.....	86
Выводы к 5 главе.....	90

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	92
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	94
ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	95
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	99

ВВЕДЕНИЕ

Субавроральные широты экваториальнее аврорального овала являются областью, на которую проецируются два домена внутренней магнитосферы - внешняя плазмосфера (плазмопауза) и внутренняя граница плазменного слоя. Представленная работа посвящена исследованию динамических явлений в субавроральном свечении на этих широтах во время усиления магнитосферной активности.

Основой работы являются данные оптических наблюдений на субавроральной станции «Маймага» им. В.М. Игнатъева ИКФИА СО РАН.

Актуальность работы

Положение станции «Маймага» на геомагнитной широте $\sim 58^\circ$ является оптимальным для наблюдения стабильных авроральных красных (Stable auroral red (SAR)) дуг и диффузного сияния (ДС), обусловленных магнитосферно-ионосферным взаимодействием в окрестности плазмопаузы и внутренней границы кольцевого тока при умеренном уровне магнитной активности. Исследования по этой проблеме оптическим методом проводятся в обсерватории Millstone Hill/Haystack (США) на более низкой геомагнитной широте $\sim 51^\circ$. Наземные фотометрические наблюдения пульсирующих высыпаний энергичных частиц кольцевого тока на широтах проекции внешней плазмосферы проводятся только на станции «Маймага».

Технологические достижения за последние два десятилетия значительно расширили возможности оптических методов исследования субаврорального свечения и полярных сияний. Камеры всего неба, в которых раньше использовались фотопленки, теперь представляют собой цифровые камеры (All sky imager (ASI)) с твердотельными оптическими детекторами – приборами с зарядовой связью (ПЗС или CCD (Charge-coupled device)). CCD научного класса с технологией электронного умножения (EMCCD) могут регистрировать как очень слабое субавроральное свечение, так и интенсивные сияния с высоким временным

разрешением. Современные камеры всего неба с узкополосными интерференционными светофильтрами позволяют измерять интенсивность отдельных авроральных эмиссий. Новые данные наземных оптических наблюдений на субавроральных и авроральных широтах с привлечением данных спутниковых измерений дают новые возможности в изучении магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Целью работы является исследование таких динамических явлений в субавроральном свечении как: экваториальное расширение ДС и возникновение SAR-дуг, развитие пульсаций свечения на этих широтах, появление свечения STEVE (Strong thermal emission velocity enhancement) во время магнитосферных суббурь и магнитных бурь. Проведение анализа данных наземных наблюдений в комплексе с одновременными спутниковыми измерениями на высотах ионосферы и в магнитосфере.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

Проведены наблюдения субаврорального свечения на оптической станции «Маймага» (58° CGMLat и 202° CGMLon). Выполнены обработка и систематизация данных оптических наблюдений.

Рассмотрены события формирования SAR-дуг в окрестности границы ДС с последующим развитием пульсаций интенсивности свечения молекулярных полос N_2^+ на этих широтах во время изолированных суббурь.

Получены динамические спектры пульсаций свечения. Показана вероятная связь пульсаций свечения с генерацией электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в результате циклотронного резонанса с энергичными ионами кольцевого тока.

Сопоставлены наземные наблюдения SAR-дуго с данными одновременных спутниковых измерений параметров плазмы и потоков энергичных частиц в ионосфере и внутренней магнитосфере.

Выполнен детальный анализ субаврорального свечения STEVE, которое было зарегистрировано в зените станции наблюдений во время суббури.

Научная новизна

В работе впервые представлены следующие результаты исследований на субавроральных широтах:

1. Сопоставлены наземные наблюдения интенсивной SAR-дуги с данными одновременных измерений плазмопаузы и потоков энергичных ионов на борту спутника Van Allen Probe-B в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г.

2. Наземные фотометрические наблюдения пульсирующих высыпаний энергичных частиц кольцевого тока на широтах проекции внешней плазмосферы проводятся только на субавроральной станции «Маймага». Получены динамические спектры пульсаций интенсивности эмиссий N_2^+ на широтах диффузного сияния и SAR-дуги.

3. Показано формирование SAR-дуги во время усиления магнитосферной конвекции, возникновение лучей на экваториальной границе слабого диффузного сияния в эмиссии 557,7 нм и движение к востоку выступов свечения на полярном крае красной дуги на взрывной фазе суббури.

4. Проанализированы первые данные инструментальных наблюдений субаврорального свечения STEVE в долготном секторе Северо-Восточной Азии.

Методология диссертационного исследования

Наземные оптические наблюдения ДС и SAR-дуг являются информативным методом исследования физических процессов в окрестности плазмопаузы и внутренней границы кольцевого тока, обусловленных магнитосферной активностью. В настоящее время в результате наземных и спутниковых исследований установилось представление о ДС как области, отображающей проекцию плазменного слоя на ионосферные высоты вследствие диффузных высыпаний низкоэнергичных (~0,5-2 кэВ) электронов. Также известно, что уже при умеренном уровне магнитной активности экваториальная граница диффузной зоны

высыпаний (ДС) на ночной стороне совпадает с проекцией плазмопаузы. Наблюдение SAR-дуг, которые отображают область перекрытия внешней плазмосферы с кольцевым током, позволяет достаточно однозначно идентифицировать эту область внутренней магнитосферы. Отсюда следует, что по данным наземных оптических наблюдений возможно исследование динамики взаимодействия развивающегося кольцевого тока с плазмосферой.

В диссертационном исследовании использованы оригинальные данные оптических наблюдений на станции «Маймага» и данные измерений на спутниках DMSP, Van Allen Probe B и Swarm.

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечена использованием большого массива экспериментального материала, полученного с помощью высокоточной научной аппаратуры с применением апробированных методик обработки и анализа данных наблюдений. Использование спутниковых измерений верифицируют наземные наблюдения SAR-дуг. Результаты научной работы были представлены и прошли обсуждение на всероссийских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах.

Научная и практическая значимость работы

В ходе выполнения диссертационного исследования были получены новые знания о явлениях на субавроральных широтах. Выявлены ранее неизвестные детали в динамике ДС и SAR-дуг, а также явления STEVE.

Результаты исследования динамических явлений в субавроральном свечении существенно дополняют эмпирическую базу для понимания физики магнитосферно-ионосферного взаимодействия в области околоземной границы плазменного слоя, кольцевого тока и внешней плазмосферы в периоды суббурь и бурь.

Положения, выносимые на защиту:

1. По новым данным наблюдений камерой «Keo Sentry» выявлено, что формирование SAR-дуги начинается в окрестности экваториальной границы диффузного сияния во время усиления магнитосферной конвекции при южном направлении V_z ММП. Взрывная фаза суббури вызывает активизацию красной дуги.

2. В результате сопоставления данных наземных наблюдений SAR-дуги и спутниковых измерений параметров плазмы впервые показано, что полярный и экваториальный края дуги отображают плазмопаузу и границу потока энергичных ионов кольцевого тока внутри плазмосферы, соответственно.

3. Установлено, что структуры субаврорального свечения STEVE и Picket fence происходят на одних и тех же силовых линиях геомагнитного поля. Рассчитанная высота нижней границы свечения STEVE составила 190 км.

Личный вклад автора

Научные результаты в диссертационном исследовании получены автором самостоятельно или при его участии. Автор непосредственно участвовал в получении, первичной обработке, анализе и интерпретации оригинальных данных наблюдений, а также отладке и модернизации научной аппаратуры. Был участником экспедиционных работ на станциях «Маймага», «Жиганск» и «Тикси».

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, обсуждены на всероссийских и международных семинарах, конференциях и симпозиумах:

Международная Байкальская школа по фундаментальной физике. Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом». Иркутск, 2006, 2007, 2013, 2015, 2022; "Problems of Geocosmos", 9th International Conference. St. Petersburg, 2012; «Космические лучи и гелиосфера», всероссийская конференция, посвященная 50-летию ИКФИА СО РАН. Якутск,

2012; 38ой ежегодный семинар "Физика авроральных явлений". Апатиты, 2015, 2023; 13th Russian-Chinese Conference on Space Weather. Yakutsk, 2016; XII Международная Школа молодых ученых им. А.Г. Колесника «Физика окружающей среды». Томск, 2016; VIII международная конференция «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». Паратунка, 2017; Международная конференция «Грингауз 100: Плазма в Солнечной системе». Москва, 2018; XXV Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Новосибирск, Москва, 2019, 2020, 2021; Всероссийская конференция (с международным участием) «Оптические исследования высокоширотной верхней атмосферы». Якутск, 2019; Международная конференция «Климатические риски и космическая погода». Иркутск, 2021; IV Всероссийская конференция с международным участием «Турбулентность, динамика атмосферы и климата». Москва, 2022.

Публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 24 статьях, 5 из которых в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Объем работы составляет 117 страниц, включая 32 рисунка. Список использованной в работе литературы составляет 164 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи, раскрыта методология, научная новизна и практическая ценность проведенного исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Приведен список публикаций по теме диссертации, апробация результатов, личный вклад автора, структура и объем работы.

В первой главе описано современное состояние исследований по теме диссертации. Рассмотрены вопросы касающиеся динамики ДС и SAR-дуг, а также пульсаций свечения на их широтах как следствие процессов во внутренней магнитосфере в периоды магнитосферных возмущений. Заключительная часть главы, посвящена феноменам STEVE и Picket fence. Дано описание новых явлений на основе последних статей в научных журналах.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры и методов обработки и анализа данных наблюдений. Даны краткие технические характеристики оптических приборов, данные которых легли в основу диссертационного исследования.

В третьей главе выполнен детальный анализ ряда динамических явлений в ДС и SAR-дуге на примере современных наблюдений. Это формирование SAR-дуги во время подготовительной фазы суббури (усиления конвекции), возникновение лучей (короны) на экваториальной границе слабого ДС в эмиссии 557,7 нм и движение к востоку выступов свечения на полярном крае красной дуги во время взрывной фазы суббури 15 февраля 2018 г. Во втором примере более ранних наблюдений 30 марта 2003 г. проведен анализ особенностей развития пульсаций свечения в эмиссии 427,8 нм N_2^+ на широтах полосы красного свечения экваториальнее ДС. Рассмотрена вероятная связь пульсаций свечения с генерацией ЭМИЦ волн в результате циклотронного резонанса с энергичными ионами кольцевого тока в области внешней плазмосферы.

В четвертой главе рассмотрена связь SAR-дуги с плазмопаузой и околоземной границей кольцевого тока. Произведено сопоставление наземных наблюдения SAR-дуги с данными одновременных спутниковых измерений параметров плазмы и потоков энергичных частиц в ионосфере и внутренней магнитосфере в время магнитной бури.

В пятой главе исследованы новые явления в субавроральном свечении – феномены STEVE и Picket fence. Рассмотрены динамические, пространственные и спектральные характеристики структур свечения, возникших во время суббури полярнее ранее существовавшей SAR-дуги.

В заключении кратко изложены основные результаты диссертационного исследования.

ГЛАВА 1. Современное состояние исследований субаврорального свечения.

Его связь с околоземной областью плазменного слоя, кольцевого тока и внешней плазмосферой

1.1 Структура магнитосферы

Существование магнитосферы у Земли обусловлено наличием у нее достаточно сильного собственного магнитного поля. При взаимодействии сверхзвукового солнечного ветра (СВ) с магнитным полем Земли формируются ударная волна, магнитопауза, а также магнитосферные токовые системы. Порожденное ими магнитное поле, наряду с собственным магнитным полем Земли, определяет структуру большинства плазменных образований в околоземном космическом пространстве: плазменного слоя, плазмосферы и области захваченной радиации (см. рисунок 1.1). Межпланетное магнитное поле (ММП), вмороженное в плазму СВ, контролирует перенос энергии и импульса внутрь магнитосферы и определяет уровень геомагнитной возмущенности, который существенно возрастает при наличии «южной» компоненты ММП, совпадающей по

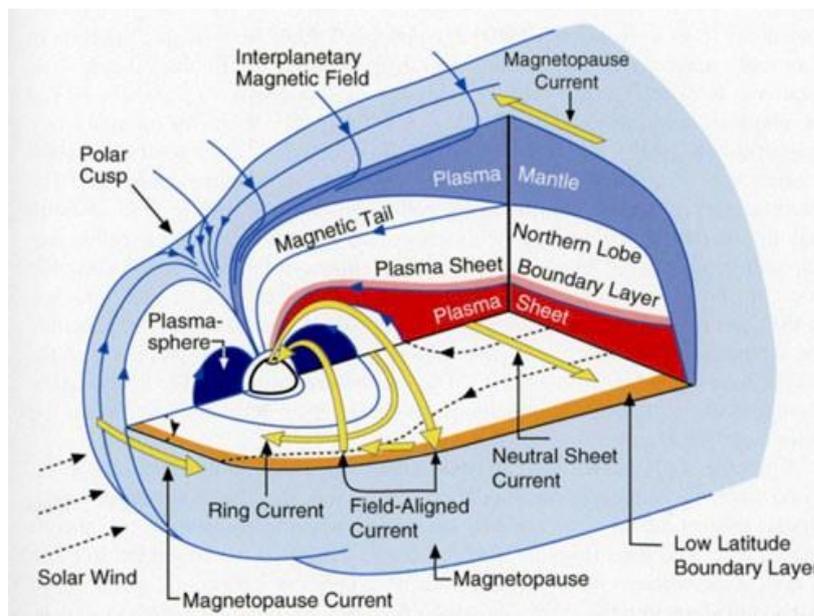


Рисунок 1.1. Схема магнитосферных доменов и токов [из работы Kivelson and Russell, 1995]

направлению с вектором геомагнитного диполя [Нишида, 1980; Сергеев, Цыганенко, 1980; Лайонс, Уильямс, 1987].

В формировании магнитосферы участвуют следующие источники магнитного поля: 1) внутриземные (токи, протекающие в земном ядре), 2) поверхностные токи на магнитопаузе, экранирующие поле внутренних источников, 3) токи поперек хвоста магнитосферы и замыкающие их токи на магнитопаузе, 4) кольцевой ток (симметричный и асимметричный), 5) продольные токи, образующие трехмерные токовые системы вместе с замыкающими их токами в ионосфере и магнитосфере и ММП, проникающее внутрь магнитосферы.

В отличие от внутриземных источников магнитного поля, испытывающим медленные вариации («вековой ход»), магнитосферные токовые системы подвержены резким, внезапным изменениям. Воздействие ускоренной, плотной плазмы СВ, изменение ориентации ММП, влияют на положение в пространстве и интенсивность магнитосферных токовых систем и приводят к развитию магнитных бурь и магнитосферных суббурь – самых значительных возмущений геомагнитного поля, регистрируемых в земной магнитосфере [Калегаев и др., <http://nuclphys.sinp.msu.ru/magn/>].

1.2 Магнитосферные суббури

Одним из наиболее ярких проявлений динамического характера процессов в земной магнитосфере, является распад полярного сияния. Магнитосферные явления, связанные с этим взрывообразным высвобождением энергии, были и есть предметом интенсивных исследований, и для обозначения всех этих явлений в целом был введен термин «магнитосферная суббуря».

Изначально, термин «суббуря» был применен Акасофу в терминологии касающейся закономерностей в полярных сияниях длительностью 1-2 часа [Akasofu, 1964]. Далее, появились новые термины с приставкой суббуря, для обозначения тех или иных явлений связанных с магнитосферной суббурей. Так, «полярная магнитная суббуря» есть проявление магнитосферной суббури в

геомагнитном поле высоких широт. Другие проявления магнитосферной суббури аналогично называют: «авроральная суббуря», «ионосферная суббуря» и т.д. Магнитосферная суббуря представляет собой процесс, при котором происходит ускорение плазмы и генерируется электрический ток за счет энергии магнитного поля (энергии СВ), запасенной в хвосте магнитосферы [Акасофу, 1971; Пудовкин и др., 1977; Пономарев, 1985].

Основным понятием при феноменологическом описании суббурь является овал полярных сияний [Фельдштейн, 1960, 2016; Старков, Фельдштейн, 1971]. Это статистическое понятие, отражающее расположение области наиболее частого появления зенитных форм полярных сияний. Овал полярных сияний окружает геомагнитный полюс непрерывной полосой, а центр его смещен на ночную сторону [Фельдштейн, 1963; Хорошева, 1967; Feldstein, Starkov, 1967]. В рамках открытой модели магнитосферы предполагается, что овал полярных сияний располагается на границе области разомкнутых силовых линий. Полярное сияние на дневной стороне овала создается частицами, которые имеют спектральные характеристики плазмы переходной области [Heikkila et al., 1972]. Наиболее вероятно, что такие частицы достигают высот ионосферы, двигаясь вдоль разомкнутых магнитных силовых линий. С другой стороны, частицы, приводящие к возбуждению дискретных дуг на ночной стороне овала, генерируются во внешних слоях плазменного соля, который, вероятно, ограничен силовыми линиями, пересекающими нейтральную линию в удаленной части хвоста магнитосферы. Широта полярного каспа уменьшается с увеличением направленной на юг компоненты ММП в связи с эрозией дневной части магнитосферы. Было найдено, что широты овала полярных сияний в вечернем и полуночном секторах при этом также уменьшаются. В результате поток разомкнутых магнитных силовых линий увеличивается, что приводит к возрастанию магнитного поля в хвосте магнитосферы под воздействием южной компоненты ММП. Возрастание потока приводит хвост магнитосферы в неустойчивое состояние, и в конце концов начинается процесс, который ликвидирует избыточный поток разомкнутых силовых линий.

Предположение, что магнитосферная суббуря есть следствие импульсного увеличения скорости пересоединения в хвосте магнитосферы, выдвинул в середине 60-х годов Аткинсон [Atkinson, 1966], и с тех пор на основе этих представлений были предложены различные рабочие модели суббури [Нишида, 1980; Пономарев, 1985].

Поскольку энергия, высвобождаемая в хвосте магнитосферы, передается в ионосферу в виде электрического тока и вторгающихся частиц, важную роль в изучении суббурь играет исследование взаимодействия между ионосферой и магнитосферой.

Наземные наблюдения полярных сияний и магнитного поля показывают, что развитие суббури происходит в определенной последовательности. По современным представлениям классическая (или элементарная) изолированная суббуря состоит из трех фаз:

- Подготовительная фаза;
- Взрывная фаза;
- Восстановительная фаза.

Главным звеном этой последовательности является взрывная фаза, во время которой происходит распад дискретных форм сияний и магнитограммы регистрируют возмущения, причем записи вариаций поля напоминают бухты на географических картах. Нужно отметить, что изолированная суббуря - явление редкое; обычно наблюдается суперпозиция суббурь или длительное магнитосферное возмущение, в котором периоды успокоения чередуются с интенсификациями активных форм сияний [Лазутин, 2000].

Быстрые перестройки магнитосферы, особенно на ночной стороне, происходящие при суббуре, порождают всплески сильных электрических полей. Дрейфуя в таких полях, частицы плазменного слоя забрасываются, инжектируются из хвоста во внутреннюю магнитосферу. Перестройки происходят как последовательность коротких импульсов, активизаций, каждая из которых занимает относительно узкий пространственный интервал [Sergeev, 1974].

Суббуревые инжекции поставляют частицы горячей плазмы в квазидипольную зону захвата; там они формируют сначала частично-кольцевой ток, переносимый горячими ионами, дрейфующими в азимутальном направлении в неоднородном магнитном поле. Постепенно растекаясь по долготе, горячее плазменное облако образует в дальнейшем азимутально-симметричный кольцевой ток. Кольцевой ток представляет собой электрический ток в виде тора, текущий вокруг Земли с центром в экваториальной плоскости и на высотах $\sim 2 - 9 R_E$. Основными носителями кольцевого тока являются положительные ионы с энергиями от ~ 1 до нескольких сотен кэВ. Этот ток деформирует геомагнитное поле, т.е. создает сильное планетарное магнитное возмущение на поверхности Земли, при магнитной буре, которая, как правило, возникает в результате ряда сильных суббуревых инжекций [Hess, 1968; Daglis et al., 1999].

1.3 Особенности излучения основных эмиссий в свечении ночного неба и в полярном сиянии

Возбуждение спектра полярного сияния, который испускается атомами и молекулами атмосферы, определяется процессами четырех типов: 1) прямое возбуждение первичными частицами или вторичными электронами, 2) тепловые соударения, приводящие к ионизации или возбуждению атомов, или молекул, 3) возбуждение электронами разогретой ионосферной плазмы, 4) механизмы электрического разряда и разогрев электрическими полями.

Запрещенные линии [OI] 557,7 ($^1D-^1S$) (потенциал возбуждения 4,17 эВ) и 630,0 с 636,4 нм ($^3P-^1D$) (потенциал возбуждения 1,96 эВ) наиболее часто обсуждаются как основные авроральные эмиссии. Возбуждение линии 557,7 нм происходит главным образом в результате непосредственного возбуждения O или диссоциации O_2 первичными частицами или вторичными электронами. Роль дезактивации менее важна, за исключением малых высот.

Для мультиплета 630,0 и 636,4 нм все обстоит иначе. Дезактивация столкновениями очень эффективна на высотах, где большинство других эмиссий

являются сильнейшими ввиду долгого пребывания в возбужденном состоянии (110 с). Поэтому эмиссия 630,0 и 636,4 нм локализована главным образом выше 200 км. Вероятно, это значение весьма условно, так, в работе [Алексеев и др., 1975] сообщалось, что высота максимума свечения красной линии в ДС опускалась до 140 км и лежала в пределах 140-317 км.

Полосы N_2^+ 391,4; 427,8 нм ($B^2e_u+ \rightarrow X^2e_g+$) (потенциал возбуждения 18,8 эВ) первой отрицательной системы, непосредственно связанные с ионизацией молекул N_2 электронами, являются преобладающими в фиолетово-синем участке спектра, наравне с красной и зеленой линией [OI], являются основными в спектре полярных сияний [Чемберлен, 1963; Омхольт, 1974].

1.4 SAR-дуги и диффузное сияние как следствие динамических процессов во внутренней магнитосфере в периоды магнитных возмущений

Одна из наиболее интересных особенностей среднеширотной верхней атмосферы в периоды интенсивных магнитных бурь заключается в появлении SAR-дуг, субвизуального свечения шириной примерно 200-400 км в интервале высот от ~250 до 600 км. Это свечение характеризуется усилением эмиссии атомарного кислорода 630,0 нм над уровнем свечения ночного неба, без заметных изменений интенсивностей других эмиссий. Спектральные характеристики этих дуг указывают, что электронная температура в верхней части области F ионосферы должна быть существенно повышена, чтобы появилась возможность возбуждения атомов кислорода до состояния 1D (2 эВ) при отсутствии возбуждения до уровня 1S (4 эВ) [Barbier, 1960].

SAR-дуги наблюдаются во время магнитных бурь и суббурь, которые определяются по вариации геомагнитного индекса Dst [Rees, Akasofu, 1963; Зайцева и др., 1971; Kozyra et al., 1997]. SAR-дуги возникают вследствие перекрытия кольцевого тока с внешней плазмосферой (плазмопаузой), где потоки энергичных ионов нагревают плазмосферные электроны. Возникающий нисходящий поток сверхтепловых электронов вдоль силовых линий магнитного

поля увеличивает окружающую электронную температуру на высотах области F2 ионосферы в виде субаврорального пика электронной температуры (T_e пика). В результате происходит усиление интенсивности красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге (см. рисунок 1.2) [Kozyra et al., 1997].

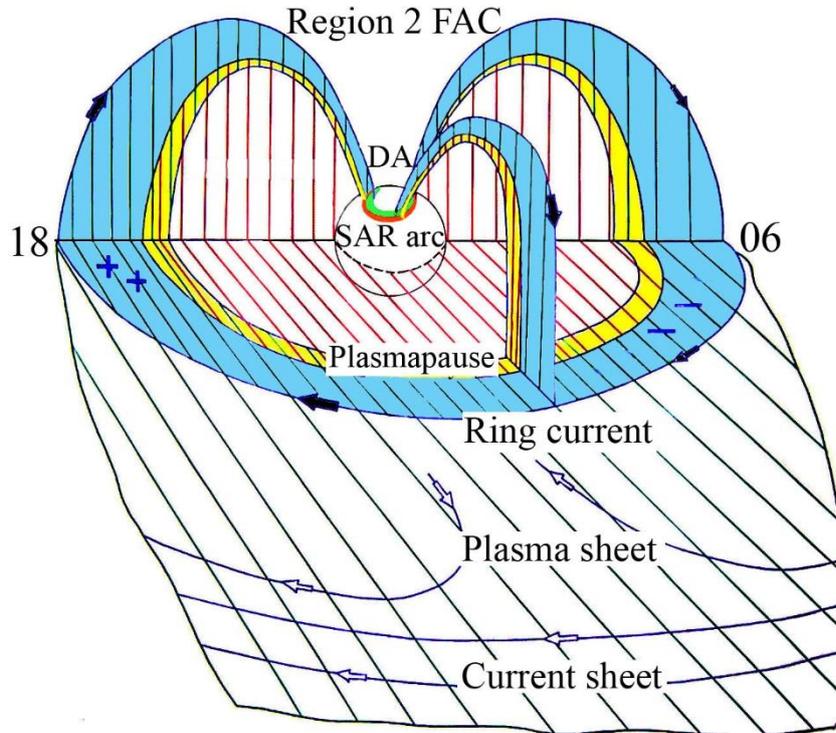


Рисунок 1.2. Связь структуры внутренней магнитосферы с диффузным сиянием и SAR-дугой [из работы Иевенко, 1999]

Диффузное сияние обусловлено высыпанием низкоэнергичных электронов из внутренней области плазменного слоя. SAR-дуга отображает область перекрытия внешней плазмосферы (плазмопаузы) энергичными частицами кольцевого тока, во время магнитных возмущений

Согласно механизму генерации SAR-дуги, предложенному Коулом [Cole, 1965, 1970], передача энергии от энергичных ионов кольцевого тока тепловым электронам внешней плазмосферы происходит в результате кулоновских столкновений. Позже, были предложены альтернативные механизмы нагрева холодных электронов энергичными ионами, например, через резонанс Ландау с ЭМИЦ волнами [Cornwall et al., 1971; Thorne, Horne, 1992; Zhou et al., 2013] или ускорение кинетическими альфвеновскими волнами [Hasegawa, Mima, 1978]. В работах [Kozyra et al., 1987; Fok et al., 1993; Inaba et al., 2020] механизм, предложенный Коулом был признан основным. В обзорной работе [Usanova, 2021]

автор высказывает мнение, что вопрос о роли ЭМИЦ волн в генерации SAR-дуг, несмотря на свою долгую историю, остается открытым. В работе [Зверев и др., 2012] сделан вывод, что SAR-дуги низкой интенсивности (до 1 кРл), могут быть вызваны высыпаниями низкоэнергичных электронов плазменного слоя. Причем такие дуги, должны располагаться вблизи экваториальной границы ДС.

Механизм Коула предполагает, что передача энергии происходит во все времена магнитной бури в процессе развития авроральных возмущений. Этот механизм хорошо соответствовал имеющимся в то время наблюдениям SAR-дуг. После теоретической работы [Cornwall et al., 1971], многие исследователи стали считать, что SAR-дуги должны возникать во время фазы восстановления бури. В этой работе предполагалось, что во время главной фазы магнитной бури плазмопауза смещается на более низкие L-оболочки в направлении Земли. В период фазы восстановления происходит перекрытие расширяющейся плазмосферы с околоземной областью кольцевого тока, где в результате затухания Ландау ионно-циклотронных волн нагреваются холодные электроны. Поток сверхтепловых электронов вдоль магнитно-силовых линий вызывает усиление красной линии атомарного кислорода на высотах области F2 ионосферы в виде среднеширотной красной дуги, которая отображает вновь сформированную границу плазмосферы (плазмопаузу). Однако спутниковые исследования, проведенные в период 1980–1990 гг., иногда указывали на то, что энергичные частицы кольцевого тока проникают во внешнюю плазмосферу во время главной фазы магнитной бури и/или во время отдельных суббурь [Horwitz et al., 1982; Kozyra et al., 1997]. Результаты синхронных измерений на спутниках Dynamic Explorer (DE)1 и DE2 в области плазмосферы и на ионосферных высотах показали, что T_e пик в F-области, характерный для SAR-дуги, сопряжен вдоль магнитного поля с градиентом плотности ионов и максимумом их температуры (плазмопаузой). Градиент плотности часто наблюдается внутри плазмосферы с наиболее вероятным значением $N_i = 10^3 \text{ см}^{-3}$ [Horwitz et al., 1986]. Важный результат по исследованию внутренней магнитосферы на спутниках DE1 и DE2 получен в работе [Kozyra et al.,

1987], где рассмотрено событие нагрева электронов на L-оболочках SAR-дуги (плазмопаузы) в основном потоком энергичных ионов O^+ кольцевого тока.

Недавно опубликованные результаты наблюдений SAR-дуг с помощью цифровых камер всего неба также указывают на проникновение энергичных ионов кольцевого тока во внешнюю плазмосферу в начале главной фазы магнитной бури [Shiokawa et al., 2013; Mendillo et al., 2016]. В работе [Martinis et al., 2019] впервые представлены результаты одновременных наблюдений SAR-дуг в магнитно-сопряженных областях двумя камерами всего неба во время большой магнитной бури. В этом исследовании было отмечено увеличение интенсивности дуг и скорости их экваториального движения в обоих полушариях во время взрывной фазы суббури. Это указывает на увеличение потока энергичных ионов на L-оболочках генерации SAR-дуг (плазмопаузы) как следствия суббуревой инжекции.

Многолетние исследования субаврорального свечения в ИКФИА СО РАН на большом количестве событий детально показали, что SAR-дуги появляются и/или уярчаются во время взрывной фазы суббури. Формирование SAR-дуги начинается в окрестности экваториальной границы ДС. Согласно результатам исследований, энергичной и тепловой плазмы на спутниках DE1 и DE2 такая динамика SAR-дуги может быть следствием быстрого проникновения энергичных ионов и электронов ассиметричного кольцевого тока в область внешней плазмосферы. В случае длительной суббуревой активности SAR-дуга отделяется от ДС и движется в экваториальном направлении [Иевенко, 1993, 1995, 1999; Alexeyev et al., 2009].

В работе [Иевенко, 1999] предложена эмпирическая схема воздействия магнитосферной активности на внешнюю плазмосферу, где экваториальное движение SAR-дуги после отделения от ДС отображает смещение градиента плотности холодной плазмы внутрь плазмосферы. ДС ограничивается положением плазмопаузы до начала длительной активности – остаточной плазмопаузой. Она отображается дополнительным усилением эмиссии 630,0 нм и, иногда, в виде второй SAR-дуги. На основе 700 часов спектрофотометрических наблюдений SAR-дуг на станции «Маймага» в 1989–2000 гг. в работе [Иевенко, Алексеев, 2004] была получена статистически значимая положительная связь интенсивности эмиссии

630,0 нм [OI] в дуге с кольцевым током при значениях $Dst \leq -50$ нТл. Во время слабых магнитных бурь с текущими $Dst \geq -50$ интенсивность дуги имеет значимую зависимость от геомагнитных индексов ASY-H, AL и Kp. Это, вероятнее всего, указывает на значительный вклад в генерацию SAR-дуги асимметричного кольцевого тока, возникающего на взрывной фазе суббурь.

Связь возникновения SAR-дуги с регистрацией инжекции энергичных частиц на геостационарной орбите во время изолированной суббури рассмотрена в работе [Ievenko et al., 2008]. По данным наблюдений субаврорального свечения и ионосферного дрейфа на станции «Маймага» в работе [Ievenko et al., 2009] было показано, что SAR-дуга перекрывается с экваториальным краем субаврорального поляризационного потока (SAPS) согласно [Foster, Vo, 2002]. В статьях [Иевенко, Парников, 2020; Ievenko, 2020] впервые проведено сопоставление наземной регистрации SAR-дуги ASI «Keo Sentry» с данными одновременных измерений параметров плазмы и потоков частиц на борту спутника Van Allen Probe B (VAP-B) в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г. В результате показано, что SAR-дуга в этом событии отображала область перекрытия потоков энергичных ионов кольцевого тока с плазмопаузой в вечернем секторе MLT.

Диффузное сияние (ДС) представляет собой область субвизуального свечения без крупномасштабных структур [Sandford 1968; Lui et al., 1973; Алексеев и др., 1975], не образует лучей и не показывает сдвигового или вращательного движения [Yamamoto, 1988]. ДС, окаймляющее экваториальную границу овала полярных сияний, несмотря на всю свою «тусклость», по сравнению с последним, принимает основную часть (~80%) потока энергии в ионосферу на ночной стороне, что приводит к повышенной ионизации и химическим изменениям [Newell et al., 2009]. ДС вызывается питч-угловой диффузией низкоэнергичных электронов из околоземного плазменного слоя в результате циклотронного резонанса с электростатическими электронно-циклотронными гармониками [Lyons, 1974]. В спектре ДС преобладают зеленая 557,7 и красная 630,0 эмиссии атомарного кислорода [OI]. Причем интенсивность зеленой эмиссии в 2-3 раза выше красной [Иевенко, Парников, 2022]. Такое соотношение этих эмиссий в ДС указывает на

среднюю энергию высыпающихся электронов $E=1-1.4$ кэВ [Rees, Lucey, 1974; Stenbaek-Nielsen, Hallinan, 1979; McEwan et al., 1981].

Уже при умеренном уровне магнитной активности граница плазменного слоя на ночной стороне располагается вблизи плазмопаузы и, соответственно, экваториальная граница ДС может наблюдаться около ее проекции на высотах ионосферы [Horwitz et al., 1982; Fairfield and Vinas, 1984; Feldstein, Galperin, 1985].

1.5 Пульсирующие сияния и пульсации свечения в окрестности экваториальной границы диффузного сияния и на широтах SAR-дуги

Оптические авроральные пульсации можно определить, как вариации интенсивности свечения, обладающие повторяющимися характерными особенностями, которые могут быть временными или пространственными внутри, или вне авроральной формы [Thomas et al., 1973]. В рамках традиционных представлений, сложившихся в физике верхней атмосферы [Jacobs et al., 1964], пульсации сияний классифицированы по диапазону периодов и степени регулярности, аналогично тому, как это сделано в геомагнетизме [Ролдугин, 1974; Распопов и др., 1978]. Так, пульсирующие сияния, рассмотренные в данной работе, относятся к типу пульсаций P1 (0,2-5с).

Связь между пульсирующими сияниями и магнитосферными суббури была описана еще Акасофу более полувека назад. Во время взрывной фазы суббури яркие и динамичные дуги устремляются к полюсу. После этой активности полярное сияние характеризуется наличием тусклых размытых пятен полярного сияния. По прошествии примерно 10–20 минут эти пятна могут пульсировать и продолжать пульсировать в течение нескольких десятков минут или более. Пульсирующее сияние начинается примерно через 10–30 минут после расширения суббури к полюсу и продолжается на протяжении всей остальной части суббури. Общая активность обычно длится примерно 1,5 часа, в то время как события могут длиться много часов из-за продолжительной повышенной геомагнитной активности [Jones, 2011; 2013]. Пульсирующее сияние занимает экваториальную часть аврорального

овала. В полярной части овала полярных сияний преобладают дискретные формы свечения [Чемберлен, 1963; Омхольт, 1974]. В отличие от вариаций свечения в активной области полярных сияний (дискретные формы сияний, авроральные дуги и т.д.) пульсирующие сияния проявляются в виде пятен неправильной формы с квазипериодическими вариациями интенсивности [Royvik, Davis, 1977; Yamamoto, 1988].

В пульсирующем сиянии преобладают эмиссии 557,7 нм [OI] и 427,8 нм N_2^+ . Интенсивность сияния слабее, чем типичное дискретное полярное сияние, но оно видно человеческим глазом в виде мигающих пятен на небе (от нескольких сотен Рэлей (Рл) до десятков кРл в эмиссии 557,7 нм; от нескольких сотен Рл до ~10 кРл в эмиссии 427,8 нм) [McEwen et al., 1981]. Модуляция интенсивности относительно фона колеблется в пределах ~50–100%. По пространственной структуре, пульсирующие сияния имеют различные типы, такие как: струйные, пламенные, распространяющиеся, мерцающие и т.д. [Oguti et al. 1981; Yamamoto, Oguti 1982].

Энергии электронов, связанные с пульсирующими сияниями, были измерены различными методами, начиная с наземных, заканчивая ракетными, и лежат в диапазоне от единиц до сотен кэВ [Stenbaek-Nielsen, Hallinan, 1979; McEwan et al., 1981; Samara et al., 2010]. Этот широкий диапазон указывает на различные типы генерации пульсирующих сияний начиная от плазменных неустойчивостей в экваториальной плоскости магнитосферы заканчивая ионосферными токами и волнами в атмосфере [например, Luhmann, 1979; Davidson, 1986; Demekhov, Trakhtengerts, 1994; Kasahara et al., 2018].

Механизмы формирования пульсирующих сияний тесно связаны с потерями захваченных частиц и их высыпанием в ионосферу. Одним из основных процессов, приводящих к высыпанию частиц, является диффузия по питч-углам. Для возникновения диффузии должен действовать механизм рассеяния частиц, приводящий к изменению питч-угла. В качестве такого механизма привлекаются процессы рассеяния частиц на флуктуациях электрических и магнитных полей, обусловленных развитием плазменных неустойчивостей. Основным механизмом, ведущим к высыпаниям электронов в пульсирующих сияниях, является электрон-

циклотронная неустойчивость на очень низкочастотных (ОНЧ) -волнах свистовой моды [Kennel, Petschek, 1966; Demekhov, Trakhtengerts, 1994; Kasahara et al., 2018].

Изучение полярных сияний в целом и пульсирующих сияний в частности получившее особое ускорение во времена МГГ (1957-1958) продолжается и по сей день. На орбиты выходят новые космические миссии, целью которых является изучение этого сложного и в то же время интересного явления. Координированные наблюдения с Земли и космоса проводились и проводятся по настоящее время (например, проекты THEMIS (<https://www.nasa.gov/themis-and-artemis>) и PWING (<https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/dimr/PWING/en/>)). Теоретическая интерпретация пульсирующих сияний, начатая в 60-х годах прошлого столетия, продолжается и сейчас [Hilliard, Shepherd, 1966]. В свет вышло множество обзорных статей [например, Nishimura et al., 2020] и монографий [например, Распопов и др., 1978; Мизун, 1983]. Но даже в наши дни, представления о полярном сиянии в целом и о пульсирующем в частности далеки от полноты. Так, в работе [Roldugin et al., 2013], авторы отмечают, что пульсирующие сияния диапазона Pc1, рассмотренные в настоящей работе, не упоминались в литературе, за исключением монографии [Распопов и др., 1978]. В работе [Humberst et al., 2016], посвященной статистическому анализу пульсирующих сияний, авторы, отмечая поразительную временную изменчивость явлений, и не отождествив ни одну из наиболее упоминаемых теорий с результатами своих наблюдений, и вовсе предлагают переименовать «пульсирующие сияния» во «флуктуирующие сияния». Таким образом, вопросы касающиеся теории и наблюдения пульсирующего сияния остаются открытыми.

В настоящей диссертационной работе представлены новые результаты наблюдений субвизуальных пульсаций свечения на субавроральных широтах. Исследования пульсаций свечения (субвизуальных пульсирующих сияний) на широтах SAR-дуги, экваториальнее ДС проводятся только на станции «Маймага». В работе [Иевенко, 1995], впервые, было показано, что на широтах SAR-дуги, часто наблюдаются пульсации свечения молекулярных полос N_2^+ (394,1 и 427,8 нм) малой интенсивности, вследствие пульсирующих высыпаний энергичных частиц.

Пульсации с периодами 1-2с, иногда протекающие исключительно на широтах красной дуги, возникают после её формирования во время фазы восстановления суббури и затухают вместе с ней [Ievenko et. al., 2008]. В качестве наиболее подходящего механизма формирования пульсирующих сияний на широтах SAR-дуги, был выбран механизм, предложенный в [Coroniti, Kennel, 1970] – модуляция электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами коэффициента питч-угловой диффузии энергичных электронов, что приводит к квазипериодической модуляции потоков высыпающихся электронов с частотой волны [Ievenko et al., 2012; Ievenko, Parnikov, 2022].

Во внутренней магнитосфере, ЭМИЦ волны представляют собой дискретное электромагнитное излучение диапазона Pc1-2 с левой поляризацией, генерируемое ионами кольцевого тока с энергией 10-100 кэВ с температурной анизотропией ($T_{\perp} > T_{\parallel}$) инжектированными из плазменного слоя во время бурь и суббурь [Cornwall, 1965; Summers, Thorne, 2003; Zhang, et al., 2014]. Генерация ЭМИЦ волн зависит от наличия популяции горячих и холодных ионов. Анизотропия горячих ионов обеспечивает свободную энергию, необходимую для роста волн, а присутствие холодных ионов способствует увеличению скорости роста (инкремента нарастания) волны. Таким образом, плазмопауза является наиболее благоприятным местом генерации ЭМИЦ волн [Cornwall, 1965; Young et al., 1981].

В работе [Wang et al., 2015], посвященной статистическому анализу данных по ЭМИЦ волнам, полученным на борту зондов Van Allen, авторы указывают на то, что область наибольшей скорости генерации ЭМИЦ волн буквально следует за плазмопаузой, приближаясь к земле вслед за ней на дневной стороне и отдаляясь в вечерние часы. Там же, описывается отдаление этой области в районе вечерней выпуклости. Таким образом, авторы подчеркивают важность наличия плотной, холодной плазмы для реализации ионно-циклотронной неустойчивости.

Как результат взаимодействия с ионной компонентой холодной плазмы ЭМИЦ волны разделяются на три диапазона частот: водородную, гелиевую и кислородную. Водородный диапазон находится в пределах гирочастот ионов водорода и гелия, гелиевый диапазон лежит в диапазоне гирочастот ионов гелия и

кислорода, а кислородный диапазон ограничен гирочастотой ионов кислорода на L-оболочках генерации [например, Fraser, 1985]. ЭМИЦ волны водородного диапазона, в основном, наблюдаются вне плазмопаузы, тогда как волны гелиевого и кислородного диапазона наблюдаются как внутри, так и вне плазмопаузы [Fraser and Nguyen, 2001]. ЭМИЦ волны в перечисленных трех диапазонах частот были зарегистрированы на зондах Van Allen [Saikin et al., 2015].

ЭМИЦ волны, генерируемые в экваториальной плоскости магнитосферы, наблюдаются в широком диапазоне L, от L=3 до магнитопаузы с типичными амплитудами от 0,1 до 10 нТл [Meredith et al., 2003; Min et al., 2012; Zhang, et al., 2016; Blum et al., 2017]. Согласно [Fraser, Nguyen, 2001] в качестве основных свойств ЭМИЦ волн можно выделить следующее:

- 1). ЭМИЦ волны возникают на разных секторах MLT, отдавая предпочтение дневному сектору и достигая пика около 14–16 MLT;
- 2). Частота встречаемости увеличивается с увеличением L - оболочки;
- 3). Послеполуденные волновые события регистрируются при фоновых плотностях плазмы 4–300 см⁻³. Такие плотности предполагают связь с вечерней выпуклостью или, возможно, с отделившимися областями плазмосферы;
- 4). ЭМИЦ волны водородного диапазона имеют тенденцию возникать, когда фоновые плотности плазмы малы ($N_e = 2\text{--}30\text{ см}^{-3}$), тогда как более низкочастотные волны (He^+ и O^+ диапазона) наблюдаются при плотностях до 400 см⁻³.

На земле, ЭМИЦ волны проявляют себя в виде Pc1 геомагнитных пульсаций. Основные свойства пульсаций Pc1 в целом согласуются с приведенными выше характеристиками волн, так, частота встречаемости Pc1 максимальна днем в высоких широтах и ночью в низких широтах, время максимума постепенно смещается от дневных к ночным часам через утренний сектор на $\sim 60^\circ$ геомагнитной широты [Troitskaya, 1967; Saito, 1969]. При значениях L от 2 до 6,3 широтное распределение частоты встречаемости Pc1 имеет два максимума, больший при L=5,1 и меньший при L=3,3. [Guglielmi et al., 2006].

Основным механизмом генерации ЭМИЦ волн считается циклотронное взаимодействие волн, преимущественно, с энергичными протонами вблизи

экваториальной плоскости магнитосферы. При этом, рост ЭМИЦ волн приводит к изотропизации изначально анизотропного распределения протонов и к их последующему рассеянию в конус потерь [Cornwall, 1965].

В работе [Erlandson, Ukhorskiy, 2001], авторы сообщают об одновременном появлении ЭМИЦ волн и усиленных потоков протонов в конусе потерь в интервале $3,5 < L < 5$, что указывало на то, что ЭМИЦ волны действительно могут рассеивать протоны в конус потерь. В работе [Yahnina et al., 2000] авторы, сопоставляя наземные геомагнитные данные с данными спутника NOAA также продемонстрировали прямую связь между высыпаниями протонов и наземными пульсациями Pc1.

Высыпание протонов вызывает различные формы протонного сияния, такие как отдельные субавроральные протонные дуги [например, Spasojević, 2004; Sakaguchi et al., 2007; 2008] и субавроральные утренние протонные пятна [Frey et al., 2004; Nomura et al., 2012]. Авторы интерпретируют эти протонные полярные сияния как результат взаимодействия волны с анизотропными потоками энергичных частиц. В работе [Yahnin et al., 2007] показана прямая связь между протонными пятнами и ЭМИЦ волнами, сравнив наблюдения протонных сияний со спутника IMAGE с геомагнитными пульсациями Pc1. Последние работы в этом направлении проводились с активным использованием данных зондов Van Allen и также показали тесную связь между ЭМИЦ волнами и высыпаниями протонов кольцевого тока [например, Ni et al., 2022; Yahnin, 2021].

Помимо высыпаний протонов, ЭМИЦ волны могут модулировать высыпания энергичных электронов с частотой волны [Coroniti, Kennel, 1970; Распопов и др., 1978; Ляцкий, Мальцев, 1983; Tsurutani et al., 2013; Jaynes et al., 2015]. При этом, механизм вызывающий фоновые высыпания энергичных электронов кольцевого тока, в последующем подвергнутый модуляции, вероятно, схож с механизмом высыпаний в области ДС – электрон-циклотронная неустойчивость в результате резонанса с ОНЧ-волнами свистовой моды [Kennel, Petschek, 1966]. Тут нужно отметить, что низкочастотные ЭМИЦ волны способны вступать в резонанс и напрямую рассеивать электроны, так, ЭМИЦ волны, сгенерированные во время

бурь и суббурь на ионах кольцевого тока, способны рассеивать релятивистские электроны внешнего радиационного пояса [например, Horne, Thorne, 1998; Fu et al., 2018; Wang et al., 2016; Capannolo et al., 2021]. Но при этом резонанс происходит только с электронами релятивистских энергий $E \geq 1\text{МэВ}$ [Horne, Thorne, 1998; Miyoshi et al., 2008].

1.6 Развитие субаврорального свечения STEVE во время суббури

С повышением качества и доступности современных фотоаппаратов, число любителей фотографировать полярные сияния неуклонно растет. Вооруженные высокочувствительными камерами и существующими сервисами по прогнозированию авроральных активизаций [например, Пенских и др., 2021; Воробьев и др., 2022], в последнее время, фотографы-авроралы все чаще и чаще стали сообщать о регистрации необычного типа полярных сияний. На фотографиях, полученных на субавроральных широтах, демонстрировалась узкая и вытянутая с востока на запад лента свечения (десятки километров в направлении север-юг и тысячи километров в направлении восток-запад) лилового оттенка и часто сопровождаемая зелеными образованиями, в виде штакетника (в оригинале «Picket fence», далее PF) [Semeter et al., 2020]. Новое явление, по началу, перепутанное с протонными сияниями, получила шуточное название Steve в честь одного из персонажей мультфильма. Вслед за первооткрывателями (фотографами-авроралами), вопросами происхождения прежде неизученного свечения занялись специалисты в области полярных сияний. Они сразу определили, что узкая лента свечения не связана с высыпанием протонов. Далее, был сделан вывод, что новое свечение вовсе не связано с высыпанием частиц, а вызвано сильным повышением скорости теплового излучения (Strong thermal emission velocity enhancement). Так, в первой научной работе, посвященной этому явлению, название Steve превратилось в бэкроним STEVE [MacDonald et al., 2018].

Тут нужно отметить, что это природное явление, по всей вероятности, носит регулярный характер и могло быть зарегистрировано гораздо раньше, чем в наши

дни. В работе [Hunnekuhl and MacDonald, 2020], посвященной пионеру изучения полярных сияний Карлу Штёрмеру, авторы отмечают, что еще в 1930-х годах Штёрмер и его команда наблюдали отдельный вид субавроральных дуг, существующих экваториальнее активных полярных сияний и даже смогли определить высоту этих дуг, сильно превышавшую высоту обычных полярных сияний [Størmer, 1935]. В работах 1960-70-х годов, посвященных SAR-дугам, например, [Barbier, 1960; Schaeffer, Jacka, 1971] также отмечаются редкие случаи кратковременного усиления зеленой эмиссии в пределах границ красных дуг. В работе [Hoch et al., 1971] говорится, что полоса в эмиссия 557,7 нм наблюдалась на широтах SAR-дуги на протяжении ~50 мин, что как выяснилось позже, является характерным временем жизни STEVE. Во время наблюдений субаврорального свечения, регулярно проводимых в ИКФИА СО РАН, также, иногда регистрировалось кратковременное усиление зеленой эмиссии в виде узкой полосы на широтах SAR-дуги. Тем не менее, статья [MacDonald et al., 2018] является первой научной работой, в которой был предложен общепринятый сейчас термин STEVE. В этой работе с привлечением наземной оптической аппаратуры и спутников Swarm Европейского космического агентства, авторы предположили, что новый вид субаврорального свечения является оптическим проявлением SAID (Subauroral Ion Drift) [Spiro et al., 1979] (в российско-советской номенклатуре, это явление имеет свой термин – Поляризационный джет [Galperin et al., 1974; Степанов и др, 2017, монография]).

SAID, являющийся следствием воздействия на ионосферу сильных электрических полей (~100 мВ/м) магнитосферного происхождения, представляет из себя узкую (1-2° широты) струю быстрых (~1км/с) субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах F области ионосферы, которые наиболее заметно проявляются во время суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы. В работе [He et al., 2016] с использованием данных спутников DMSP была обнаружена тонкая структура SAID. Две параллельные полосы, эволюционирующие из/в SAID получили название DSAID (Double SAID). Таким образом, дальнейшее изучение STEVE, который является

оптическим проявлением SAID может дать новое, более детальное представление о тонкой структуре SAID.

В работе [Gallardo-Lacourt, et al., 2018], посвященной вопросам происхождения STEVE, авторы, сопоставив наземные наблюдения с пролетами спутника POES-17 пришли к выводу, что STEVE не связан с высыпаниями частиц. Дальнейшие исследования [Archer et al., 2019] на основе анализа нескольких событий, подтвердили гипотезу Макдональд и показали, что STEVE является сигнатурой чрезвычайно интенсивных SAID. Там же, авторы отметили MLT сектор наибольшей вероятности появления STEVE с 22 до 02 MLT. В работе [Gallardo-Lacourt et al., 2018], посвященной статистическому анализу явления, было показано, что STEVE появляется на субавроральных широтах примерно через 1 час после начала суббури в конце взрывной фазы. Широтная протяженность STEVE составляет ~ 20 км, долготная ~ 2000 км. Средняя продолжительность явления составляет ~ 1 час в течение которой STEVE смещается на ~ 50 км к экватору относительно своего первоначального местоположения.

Основной спектральной характеристикой STEVE, отличающего его от обычных сияний, является усиление континуума на всех длинах волн в диапазоне 400-700 нм с локальным усилением эмиссии 630,0 нм [OI] [Gillies et al., 2019; Harding, et al., 2020]. Усиление красной линии, свидетельствует о высоте свечения ≥ 200 км. В работе [MacDonald et al., 2018] высота STEVE была измерена в диапазоне 170-230 км. В работе [Liang et al., 2019] была измерена высота двухслойного STEVE, авторы делают вывод, что основным источником яркости STEVE является усиление континуума. В полосе, располагавшейся на высоте ≤ 150 км усиления красной линии не наблюдалось. В полосе, располагавшейся выше (~ 250 км) наблюдалось значительное повышение интенсивности красной эмиссии.

Как писалось выше, STEVE часто сопровождает PF, наблюдаемый только в эмиссии 557,7 нм [OI]. В работе [Archer et al., 2019] авторы, сопоставив любительские фотографии, сделанные из разных точек, сообщают, что высота PF составляет 95-150 км, тогда как STEVE простирается на высотах 130-270 км.

Авторы предполагают, что PF и STEVE наблюдаются на очень близких или даже одних и тех же силовых линиях геомагнитного поля.

К новому явлению, обращено пристальное внимание, так в работе [Liang et al., 2021] рассматривается возможная предобуславливающая роль динамики нейтрального ветра в развитии STEVE. Авторы отмечают, что возникновению STEVE предшествует особая динамика ветра, подготавливающая нейтральную компоненту перед воздействием субаврорального дрейфа ионов. Применяются теоретические подходы в решении научных задач, связанных с новым явлением. Мишин и Стрельцов [Mishin, Streltsov, 2021; 2022] выполнили физическое моделирование возникновения Picket Fence и STEVE в области SAID.

Как видно из выше представленного обзора, все статьи, посвященные проблеме феномена STEVE написаны зарубежными авторами. Первой научной статьей в Российской научной периодике, посвященной новому явлению, является статья [Парников и др., 2022]. В статье, рассмотрен пока единственный случай регистрации STEVE во время суббури на станции «Маймага». В работе подробно описаны пространственные, динамические и спектральные характеристики свечения. Помимо феноменологического описания оптического явления, сделана оценка высоты свечения STEVE. Показано, что PF и STEVE протекают на одних силовых линиях.

Несмотря на огромный интерес к новому явлению, практически во всех работах, посвященных STEVE, авторы отмечают, что накопленного наблюдательного материала недостаточно для полного описания и понимания этого явления [Bennett, Bourassa, 2021]. Дальнейшее изучение, которого, приведет к более полному пониманию физики магнитосферно-ионосферного взаимодействия.

Выводы к 1 главе

В первой части представленной главы, даны основные понятия, использованные в диссертации: структура магнитосферы и магнитосферные

суббури, а также особенности основных эмиссий полярных сияний. Далее, рассмотрено современное состояние исследований процессов в субавроральном свечении, являющихся проявлениями магнитосферной активности. Показано, что наблюдения ДС и SAR-дуг являются информативным методом исследования физических процессов в окрестности плазмопаузы и внутренней границы кольцевого тока.

В следующем разделе сделан краткий обзор по исследованиям пульсирующих сияний. Рассмотрены результаты наблюдений на станции «Маймага» пульсирующих вариаций интенсивности молекулярных полос N_2^+ , на широтах ДС и SAR-дугои во время фазы восстановления суббурь вследствие пульсирующих высыпаний энергичных частиц кольцевого тока. Показана вероятная связь субвизуальных пульсаций свечения с ЭМИЦ волнами, магнитозвуковая мода которых эффективно модулирует коэффициент питч-угловой диффузии, и, следовательно, и поток частиц в конус потерь. В свою очередь, ЭМИЦ волны могут возникать вследствие ионно-циклотронного резонанса на энергичных ионах O^+ , которые часто доминируют в составе кольцевого тока.

В заключительной части главы, адресованной феномену STEVE сказано, что это прежде не исследованное явление, по всей вероятности, является сигнатурой SAID. Дано феноменологическое описание явления, такое как: MLT сектор наиболее вероятного возникновения, пространственные, динамические и спектральные характеристики и т.д. PF часто сопровождающий свечение STEVE протекает на более низких высотах и наблюдается только в зеленой эмиссии [OI]. Ниже, в пятой главе, будет показано, что STEVE и PF протекают на одних и тех же силовых линиях геомагнитного поля.

Дальнейшее изучение STEVE, который является оптическим проявлением SAID может дать новое, более детальное представление о тонкой структуре SAID в частности и магнитосферно-ионосферном взаимодействии в целом.

ГЛАВА 2. Аппаратура и методы анализа данных наблюдений

2.1 Комплекс оптических приборов для регистрации сияний и субаврорального свечения

Диссертационная работа основана на анализе оригинальных данных наблюдений, полученных на субавроральной оптической станции «Маймага» им. В.М. Игнатьева ИКФИА СО РАН. Географические координаты станции: 63°N и 130°E. Исправленные геомагнитные координаты: 58°CGMLat и 202°CGMLon на эпоху 2015 года. Полночь магнитного локального времени (MLT) соответствует 00:50 LT или 15:50 UT. Ввиду высокой географической широты, наблюдения на станции проводятся с октября по апрель, в остальные месяцы, наблюдения невозможны из-за наступления «белых ночей».

В работе использованы данные следующих, разработанных в ИКФИА СО РАН оптических приборов: меридиональный сканирующий фотометр, зенитный фотометр и четырехканальный фотометр для регистрации пульсаций свечения. Также использованы данные камеры всего неба «Keo Sentry» производства фирмы «Keo Scientific Ltd».

Все приборы имеют термостатированные корпуса с подогревом и работают автономно в автоматическом режиме с началом и окончанием регистрации в течении ночи по заданным углам высоты Солнца и Луны с возможностью удаленного управления через интернет. Ниже, кратко приведены их технические характеристики.

2.1.1 Меридиональный сканирующий фотометр

Цифровой сканирующий вдоль меридиана фотометр был разработан в ИКФИА СО РАН для регистрации слабого субаврорального свечения и оснащен двумя каналами параллельной регистрации эмиссий 630,0 и 557,7 нм [OI] (см. рисунок 2.1). В фотометре установлены полосовые интерференционные

светофильтры с полушириной ~ 2 нм. Фоновое излучение контролируется полосовыми фильтрами на длине волны 620,0 и 575,0 нм с полушириной ~ 2 нм. Входной объектив фотометра диаметром 100 мм с полем обзора 3° обеспечивает достаточную чувствительность для измерений слабых эмиссий в ночном небе и субавроральном свечении. Динамический диапазон регистрируемых интенсивностей - $50 - 10^4$ Рл. Амплитудное разрешение в начале диапазона ~ 20 Рл. Сканирование от южного горизонта до северного занимает 23с с угловым разрешением 1° . Абсолютная энергетическая калибровка фотометра проводилась методом опорного приемника [Иевенко, 1995б].

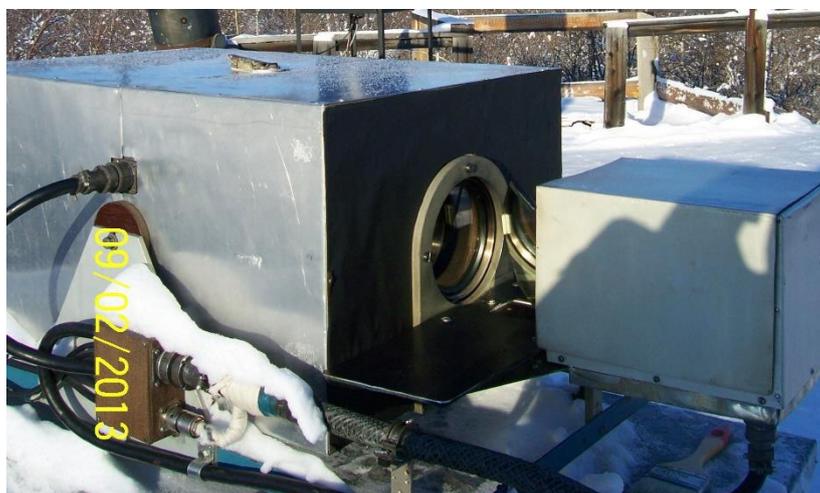


Рисунок 2.1. Меридиональный сканирующий фотометр

2.1.2 Зенитный фотометр

Разработан для исследования вариаций интенсивности эмиссий ночного неба и субаврорального свечения в магнитном зените во время усиления магнитосферной активности (см. рисунок 2.2). Фотометр имеет четыре канала регистрации эмиссий 630,0 и 427,8 нм и континуума в окрестности этих эмиссий. Полуширина пропускания интерференционных светофильтров – 2 нм. Фотометр работает с частотой дискретизации 1 Гц и позволяет проводить абсолютные измерения интенсивности эмиссий в диапазоне 5-10000 Рл. Угол поля зрения каждого канала

составляет 12° , что делает фотометр нечувствительным к звездной составляющей свечения в зенитной области неба.



Рисунок 2.2. Зенитный фотометр

2.1.3 Камера всего неба «KeoSentry»

С 2013 года на станции «Маймага» установлена цифровая камера всего неба «Keo Sentry» производства фирмы «Keo Scientific Ltd» (Канада) (см. рисунок 2.3). Камера оснащена CCD (Charge-coupled device) камерой PI Acton ProEM 1024B и пятиполосными интерференционными светофильтрами с полушириной полосы пропускания 2,0 нм. Фильтры диаметром 3 дюйма центрированы на длины волн 557,7 и 630,0 [OI]; 470,9 (N_2^+); 486,1 (H β); 620,0 (континуум), 480,0 нм (континуум). Угловое разрешение камеры составляет $0,2^\circ$. Диапазон регистрации интенсивности эмиссий: при времени экспозиции 1 с - 100-100000, 10 с - 10-10000 Рл.

Высокая чувствительность CCD камеры с умножителем электронов (EM) позволяет детально изучать субавроральное свечение, широтную и долготную

динамику формирования SAR-дуг, а также электронных и протонных сияний.



Рисунок 2.3. Камера «Keo Sentry» в термостатированном корпусе

2.1.4 Четырехканальный фотометр для регистрации пульсаций свечения

Во время наблюдений на станции «Маймага» также проводится регистрация пульсирующих вариаций интенсивности первой отрицательной системы полос N_2^+ (391,4 и 427,8 нм) в ночном свечении и диффузном сиянии с высоким временным разрешением (частота дискретизации 20 или 100 Гц) проводится фотометрами с полем зрения 20° (см. рисунок 2.4). Фотометры имеют стеклянные светофильтры с максимумом коэффициента пропускания в спектральной области 390-430 нм и

направлены на фиксированные зенитные углы 45°S, 0°(Z), 73°N и 45°E. Амплитудное разрешение регистрации вариаций интенсивности составляет 0,5% от фонового уровня ночного неба.



Рисунок 2.4. Четырехканальный фотометр для регистрации быстрых вариаций интенсивности молекулярных полос N_2^+

2.2 Методология обработки оптических данных

Данные камеры всего неба представлены в этой работе в виде оригинальных снимков, кеограмм, а также обработанных изображений в проекции на поверхность Земли для высот свечения 110 и 250 км для ДС в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм, соответственно и 350 км для SAR-дуги. При построении проекции STEVE, высота свечения была принята 190 км. Проекция изображений всего неба были построены в исправленных геомагнитных координатах CGMLat и CGMLon на основе моделей геомагнитного поля DGRF / IGRF в сервисе NASA (<https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>). При построении отдельных

изображений всего неба и кеограмм, от значений интенсивностей, полученных через эмиссионные фильтры, отнимались значения фоновых (для эмиссий 470,9 и 486,1 фоновым являлся канал 480,0 нм; для 557,7 и 630,0 фон 620,0 нм).

Частотно-временной спектральный анализ данных четырехканального фотометра проводился с использованием многоконусного метода Томсона (MTM).

Наземные оптические наблюдения SAR-дуги были сопоставлены с потоками энергичных ионов с использованием данных измерений инструментами ECT HOPE, усредненных по питч углам на борту спутника Van Allen Probe (B). Местоположение плазмопаузы было получено по градиенту плотности холодных электронов, который также определялся по различным измерениям на спутнике Van Allen Probe (B) (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/). Для определения интервала времени, усиления магнитосферной конвекции, использовались данные измерений параметров СВ с космического аппарата DSCOVR (<https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>). Данные измерений электронной температуры и ионосферного дрейфа на спутнике The DMSP- F19 из Space Sciences at the University of Texas at Dallas были получены в Madrigal database (<http://cedar.openmadrigal.org/single/>).

Интервалы MLT начала развития суббури были определены с помощью магнитограмм низкоширотных станций. Бухтообразные вариации H и D компонент на долготной цепочке низкоширотных станций дают информацию о начале взрывной фазы суббури и ее долготной протяженности [Сергеев и Цыганенко, 1980; Rostoker et al., 1980]. Геомагнитные данные среднеширотных станций были получены на сайте INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>).

2.3 Некоторые характеристики спутников, данные которых были использованы в работе

Миссия RBSP (A, B) (Radiation Belt Storm Probes A, B), позже переименованная в Van Allen Probes (A, B) была запущена NASA (National Aeronautics and Space Administration) в 2012 г. для изучения динамики энергетики

в радиационных поясах Земли (https://www.nasa.gov/pdf/677837main_rbsp_pk_final81712_lores.pdf). Миссия состояла из двух идентичных спутников, двигавшихся одинаковыми высокоэллиптическими орбитами (перигей ~500 км, апогей 30600 км) с не большим интервалом между ними для контроля пространственно-временных вариаций измеряемых величин. Оба спутника были оснащены одинаковыми наборами научных инструментов: ECT (Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma) состоящий из трех измерителей (MagEIS, HOPE, REPT) позволяющий измерять потоки электронов и ионов с энергиями от единиц эВ до десятков МэВ. Измерители электрических и магнитных полей, а также плазменных волн EMFSIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) и EFW (Electric Field and Waves Instrument). Инструмент для изучения кольцевого ока во время магнитных бурь RBSPICE (Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment) и спектрометр релятивистских протонов RPS (Relativistic Proton Spectrometer). Рассчитанная на 2 года службы, миссия Van Allen Probes проработала гораздо дольше и была остановлена в 2019 году.

Программа оборонных метеорологических спутников DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) была запущена по инициативе министерства обороны США еще в 1960х годах (<https://www.ospo.noaa.gov/Operations/DMSP/index.html>). Ежедневное функционирование обеспечивает NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Спутники этой серии находятся на солнечно-синхронных полярных орбитах на номинальной высоте 830 км. Помимо метеорологических и океанографических данных, спутники серии DMSP регистрируют динамику околоземной радиации. Проводятся измерения нисходящих потоков заряженных частиц, магнитного поля, плотности и температуры электронов, скорости дрейфа ионов. Будучи последним в серии, спутник DMSP F19 был выведен на орбиту в 2014 году и перестал функционировать через 2 года по причине поломки.

Миссия Swarm Европейского космического агентства состоящая из трех одинаковых спутников с названиями «Alpha» (A), «Bravo» (B) и «Charlie» (C)

является первой миссией агентства по наблюдению за Землей (https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm). Основной задачей миссии является исследование геомагнитного поля Земли и его эволюции во времени. Спутники были выведены на полярную околоземную орбиту 22 ноября 2013 года. Swarm-A и -C образуют нижнюю пару спутников, летящих бок о бок (разделение $1,4^\circ$ по долготе на экваторе) на высоте 462 км (начальная высота) и с углом наклона $87,35^\circ$, тогда как Swarm-B движется по более высокой орбите 511 км (начальная высота) и с углом наклона $87,75^\circ$. В настоящей работе использованы данные по электронной температуре спутника В полученных с помощью инструмента EFI (Electric field instrument) состоящего из двух компонент: зонда Ленгмюра и тепловизора. Рассчитанная на 4 года работы миссия, действует по настоящее время.

Спутник DSCOVER (Deep Space Climate Observatory) предназначен для исследования космической погоды (<https://www.ngdc.noaa.gov/dscovr/portal/#/vis/summary>). Совместный проект NASA и NOAA, был запущен в космос в 2015 году на смену устаревшего ACE (Advanced Composition Explorer). Помимо измерений параметров СВ и межпланетного магнитного поля, спутник выполняет метеорологические наблюдения с точки либрации.

Выводы ко 2 главе

Все научные результаты, легшие в основу диссертационной работы, были получены с помощью комплекса оптических приборов для регистрации субаврорального свечения и сияний на оптической станции «Маймага» ИКФИА СО РАН. В этот комплекс также входят две идентичные, панхроматические камеры всего неба «Keo Horizon» производства фирмы «Keo Scientific Ltd» для регистрации динамики полярных сияний, установленные на высокоширотных станциях «Жиганск» и «Тикси».

Как видно из описанных характеристик, все приборы обладают достаточным временным, пространственным и спектральным разрешением для решения задач, поставленных в диссертационной работе. Так, камера всего неба «KeoSentry», отвечающая научным требованиям исследований мирового уровня, обладает широким диапазоном регистрации интенсивности эмиссий и способна выделить очень слабое свечение в единицы Рл в широком спектральном диапазоне. Сканирующий и зенитный фотометры, оснащенные узкополосными светофильтрами, также, обладают достаточной чувствительностью для уверенной регистрации как слабого, так и интенсивного свечения. В свою очередь, частотный диапазон пульсирующих вариаций интенсивности свечения молекулярных полос N_2^+ полностью перекрывается частотой дискретизации четырехканального фотометра. Использование спутниковых измерений при анализе данных оптических наблюдений дало возможность получить актуальные научные результаты в диссертационном исследовании.

ГЛАВА 3. Возникновение SAR-дуги во время суббури. Развитие пульсаций свечения в окрестности экваториальной границы диффузного сияния и на широтах SAR-дуги

В качестве первого примера в этой главе, рассмотрено событие возникновения SAR-дуги во время суббури 15 февраля 2018 г. Подготовительная фаза суббури началась после поворота B_z ММП к югу. Минимум SYM-H достигал -20 нТл. Взрывная фаза этой суббури началась в вечернем секторе 20-22 MLT с дальнейшим расширением в послеполуночные часы MLT, где наблюдалось уярчение SAR-дуги от западного горизонта к восточному вблизи границы ДС. В это время также происходило движение на восток выступов свечения на полярном крае SAR-дуги, возникли лучи (корона) и регистрировались пульсации свечения в окрестности границы ДС. Спутник Swarm-B зарегистрировал субавроральные пики электронной температуры на широтах SAR-дуги вблизи меридиана наблюдений во время взрывной и восстановительной фаз суббури.

3.1 Результаты наблюдений. Общий анализ развития явлений 15 февраля 2018

2.

Рисунок 3.1а показывает изменения параметров СВ, а также динамику субаврорального свечения в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм [OI] во время наблюдений 15 февраля 2018 г. В ~1430 UT, через ~10 мин после резкого увеличения электрического поля E_y с направлением «утро-вечер» ($-V_x \times B_z$) до ~2 мВ/м при относительно большой плотности СВ ($\sim 20 \text{ см}^{-3}$), началось расширение ДС в направлении экватора в зеленой и красной линии атомарного кислорода (см. кеограммы в этих эмиссиях на рисунок 3.1 б, в). Во время дальнейшего роста E_y СВ до ~3 мВ/м наблюдалось увеличение интенсивности ДС и началось формирование отдельного максимума свечения в эмиссии 630,0 нм в окрестности экваториальной границы ДС (см. рисунок 3.1в). Такая динамика в красной линии указывает на возникновение SAR-дуги уже во время усиления магнитосферной конвекции.

После начала взрывной фазы суббури продолжалось экваториальное смещение границы ДС, увеличивалась интенсивность красной дуги, происходило расширение и движение дуги через зенит станции на более низкие широты. После перехода электрического поля E_y в область отрицательных значений произошло быстрое затухание ДС в эмиссии 557,7 нм после ~17:30 UT. В это время SAR-дуга имела максимальную яркость ~300 Рл и наблюдалась до ~19 UT с медленным

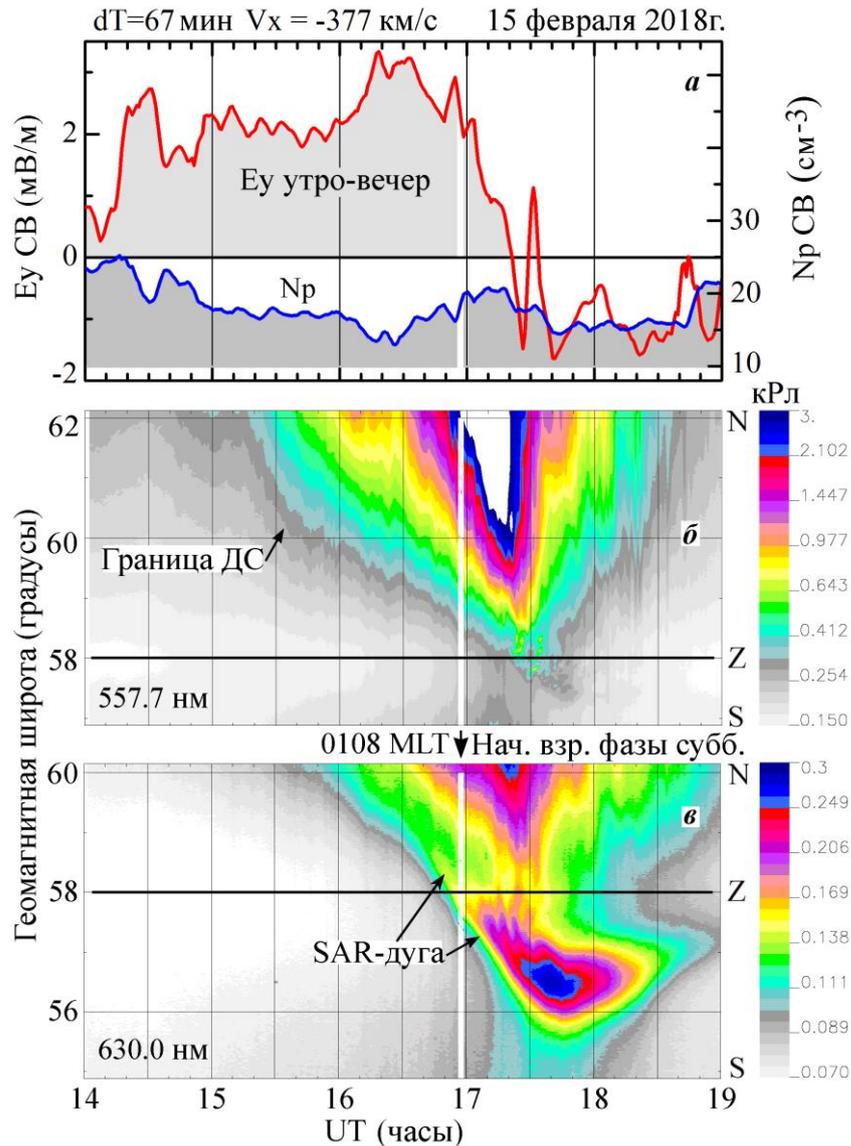


Рисунок 3.1. Динамика солнечного ветра, диффузного сияния и SAR-дуги 15 февраля 2018 г.

(а) - электрическое поле ($E_y = -V_x \times B_z$) и плотность (N_p) солнечного ветра со временем сдвига dT ; Данные ASI в виде кеограмм в эмиссиях 557,7 (б) и 630,0 нм (в) для высот свечения 110 и 250 км, соответственно. Z – зенит станции «Маймага». Шкалы интенсивности эмиссий приведены в килорэлеях (кРл). В зеленой линии установлена шкала до 3 кРл для более детального отображения экваториальной границы ДС [Иевенко и Парников, 2022]

уменьшением интенсивности эмиссии 630,0 нм. Нужно также отметить, что в интервале 17:10-17:30 UT кеограмма в этой эмиссии показывает периодические вариации широты полярного края SAR-дуги. На кеограмме в зеленой линии видны отдельные пятна свечения в 17:20-17:40 UT, которые возникли на экваториальной границе ДС в окрестности зенита станции наблюдений.

Магнитограммы среднеширотных станций на рисунке 3 *а,б,в* дают информацию о секторе MLT начала взрывной фазы суббури в ~16:58 UT.

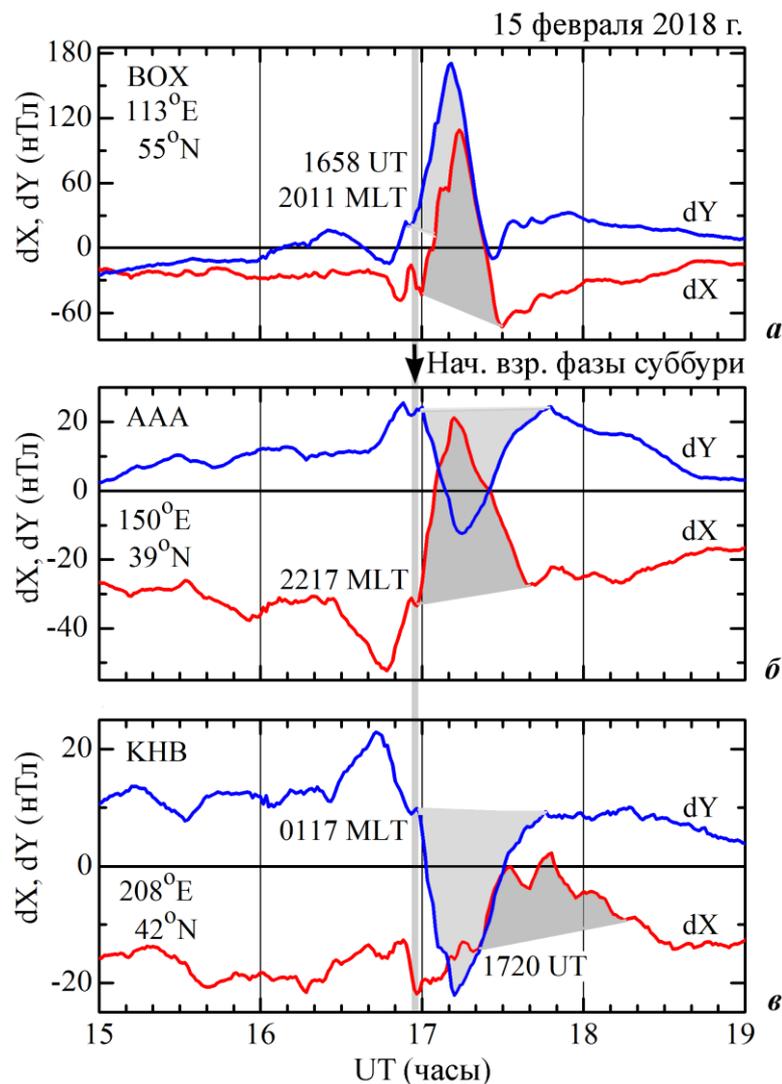


Рисунок 3.2. Среднеширотные магнитные возмущения во время наблюдений 15 февраля 2018 г.

Магнитограммы среднеширотных станций на магнитных меридианах 113° (*а*), 150° (*б*) и 208° (*в*). Приведены вариации X и Y компонент относительно их значений в ближайший магнитоспокойный день. На магнитограммах указано MLT начала взрывной фазы суббури, исправленные геомагнитные координаты и коды станций Борок (*а*), Алма-Ата (*б*) и Хабаровск (*в*), соответственно [Иевенко и Парников, 2022]

Положительные вариации dX , а также положительная и отрицательная бухты в dY на геомагнитных меридианах 113° и 150° , соответственно, указывают на положение центра начала активизации в интервале 20-22 MLT. Далее, активная область суббури расширилась в послеполуночный сектор MLT согласно изменениям dY и dX в $\sim 17:20$ UT на меридиане 208° .

3.2 Динамика сияний и SAR-дуги по данным изображений всего неба во время суббури 15 февраля 2018 г.

На рисунке 3.3 приведены изображения всего неба в красной линии [OI] для двух моментов времени в 16:50:30 и 16:58:30 UT. Видно, что в этом интервале времени регистрировалась однородная SAR-дуга вдоль геомагнитной параллели 58° в окрестности экваториальной границы ДС. SAR-дуга в течение 8 минут прошла зенит станции наблюдений с ростом ее интенсивности до 100-140 Рл. В западном и восточном направлениях интенсивность дуги увеличивается вследствие

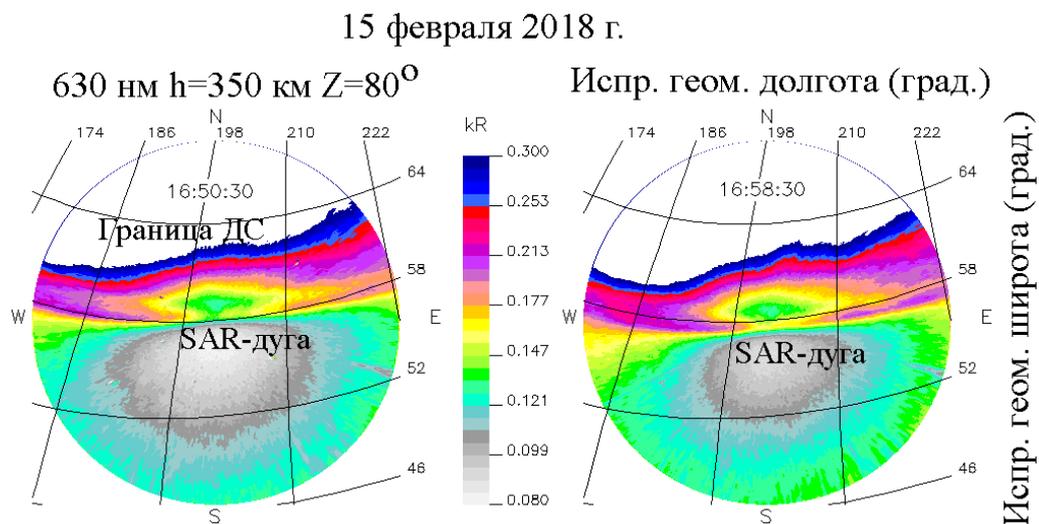


Рисунок 3.3. Наблюдение SAR-дуги во время усиления магнитосферной конвекции 15 февраля 2018 г.

Приведены изображения всего неба в эмиссии 630,0 нм [OI] в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах для высоты свечения 350 км. Шкала интенсивности эмиссии приведена до 0,3 кРл для более детального отображения экваториальной границы ДС и SAR-дуги [Иевенко и Парников, 2022]

эффекта Ван Райна. Результат регистрации камеры всего неба (ASI) показывает, что SAR-дуга сформировалась до начала взрывной фазы суббури.

На рисунке 3.4а представлены оригинальные изображения всего неба с регистрацией ДС и SAR-дуги в 17:25:20 и 17:25:30 UT, соответственно. Изображение в эмиссии 557,7 нм показывает лучи сияний в центральной части кадра. Такая картина сияний в форме короны наблюдается, когда лучи находятся в магнитном зените. Лучи сияний стали появляться с ~17:12 UT в окрестности экваториальной границы ДС, которая до этого была однородной. На оригинальном изображении в эмиссии 630,0 нм видно однородную экваториальную границу SAR-

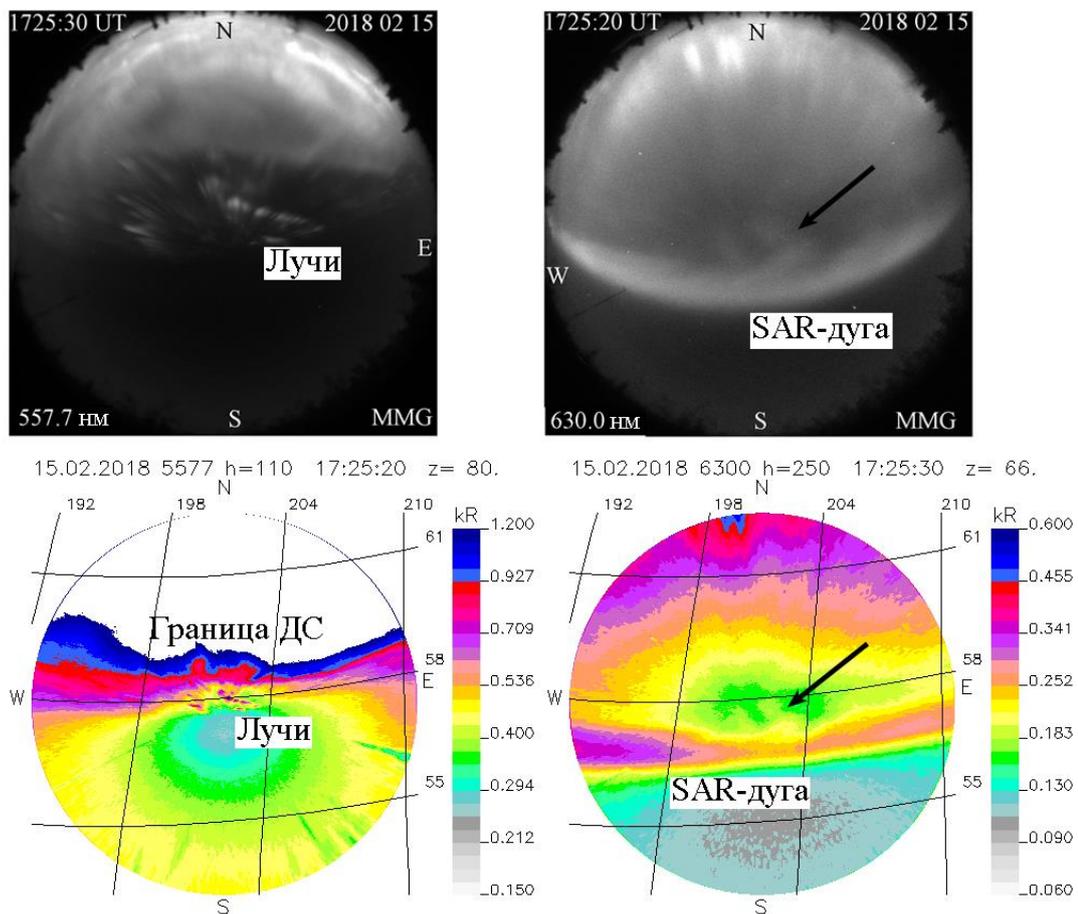


Рисунок 3.4. Динамика свечения на границе диффузного сияния в эмиссии 557,7 нм и в области SAR-дуги во время суббури 15 февраля 2018 г.

(а)-оригинальные изображения всего неба в эмиссиях 630,0 и 557,7 нм [ОИ] в 17:25:20 и 17:25:30 UT, соответственно. (б)- эти же изображения в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах (как на Рис. 3.3) для высоты свечения 250 и 110 км для красной и зеленой линии [ОИ], соответственно. Шкалы интенсивности эмиссий приведены в килорелеях, для зеленой линии до 1,2 кРл с целью более детального отображения экваториальной границы свечения [Иевенко и Парников, 2022]

дуги и выступ свечения на ее полярном крае в центральной области кадра (на изображении показан стрелкой).

На рисунке 3.4б приведены обработанные изображения в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах с одинаковым масштабом. Изображение в зеленой линии хорошо показывает разрыв экваториальной границы ДС на широте $\sim 58^\circ$ лучами сияния (короной) в окрестности магнитного зенита. Лучи двигались с запада на восток и регистрировались до ~ 18 UT. SAR-дуга в 17:25:30 UT в проекции на поверхность Земли имеет однородную экваториальную границу на геомагнитной широте $\sim 56,5^\circ$. Полярный край дуги в проекции неоднороден и имеет выступ свечения с протяженностью $\sim 1^\circ$ широты (указан стрелкой). Серия таких выступов перемещалась вдоль дуги в восточном направлении во время её уярчения и появления лучей на границе ДС в 17:12-18:00 UT.

3.3 Фотометрическая регистрация вариаций свечения в диффузном сиянии и SAR-дуге во время суббури 15 февраля 2018 г.

На рисунке 3.5а приведены графики интенсивности эмиссий 427,8 нм (N_2^+) и 630,0 нм [OI] по данным регистрации фотометра с полем зрения 10° в магнитном зените станции. Медленное увеличение интенсивности обеих эмиссий от 16 UT наблюдалось во время экваториального расширения ДС (см. рисунок 3.1). С $\sim 16:50$ UT начался быстрый рост интенсивности красной линии как результат прихода в магнитный зенит экваториального края возникающей SAR-дуги, что хорошо показывает кеограмма на рисунке 3.1. В 17:10-17:30 UT зенитный фотометр зарегистрировал вариации красной линии с четырьмя максимумами интенсивности. Эти изменения интенсивности эмиссии 630,0 нм [OI] были обусловлены проходом через поле зрения фотометра выступов свечения на полярном крае SAR-дуги (см. рисунок 3.4). В эмиссии 427,8 нм (N_2^+) произошел рост интенсивности до ~ 100 Рл после начала взрывной фазы суббури. Кроме этого, в этой эмиссии наблюдались пульсирующие вариации интенсивности с $\sim 17:05$ UT.

Наибольшая амплитуда пульсаций ~ 20 Рл была во время восстановления суббури в 17:30-18:00 UT.

На рисунке 3.5б,в представлены динамические спектры мощности пульсирующих вариаций интенсивности полос N_2^+ в интервале частот 0,02-0,2 и 0,1-1 Гц. Спектры были получены методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Наиболее интенсивные гармоники пульсаций свечения в окрестности 0,025; 0,04 и

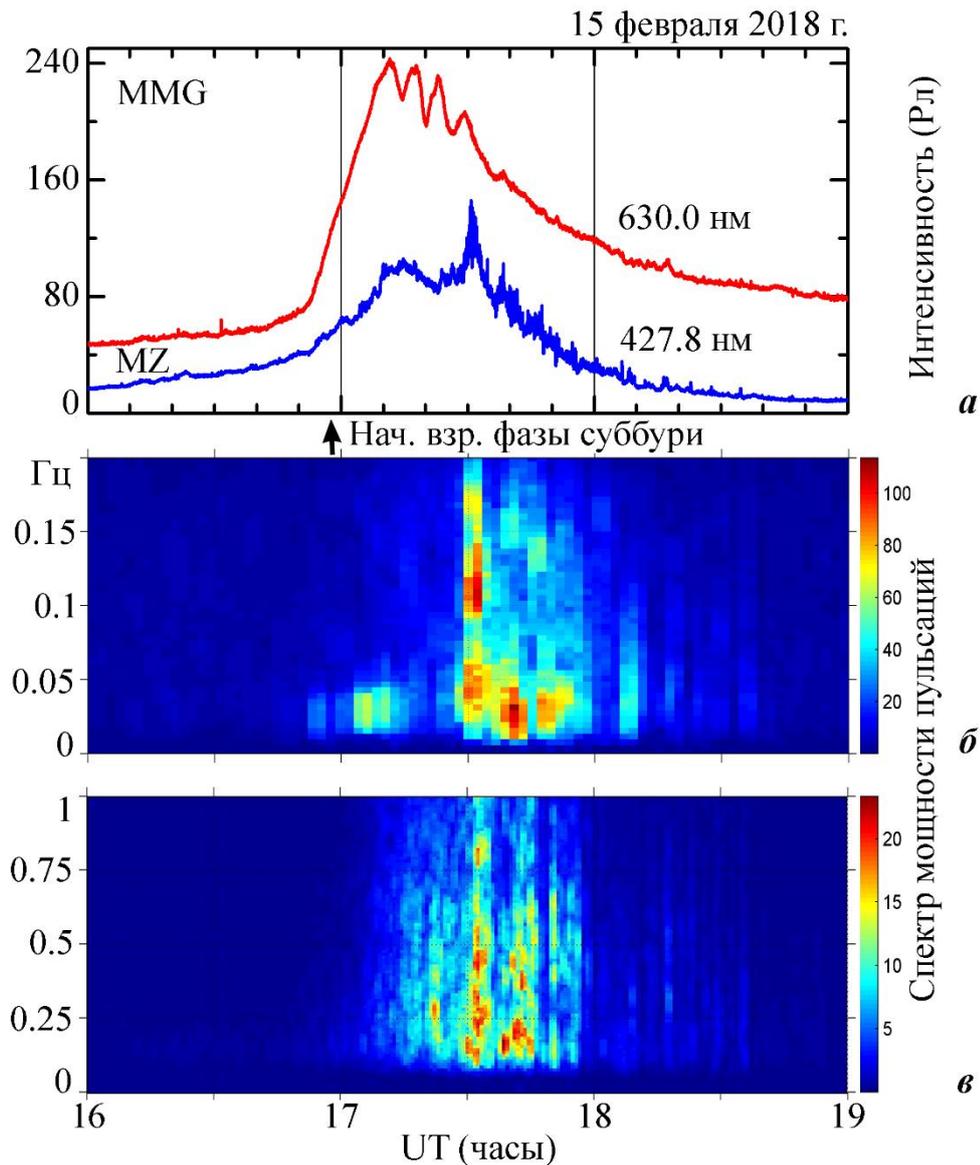


Рисунок 3.5. Вариации интенсивности эмиссий на границе диффузного сияния и в SAR-дуге во время суббури 15 февраля 2018 г.

(а)-Интенсивность эмиссий 630,0 [ОП] и 427,8 нм (N_2^+) в магнитном зените станции «Маймага» ($12^\circ S$); (б)- Динамический спектр мощности пульсаций интенсивности полосы 427,8 нм (N_2^+) в области частот 0,02-0,2 Гц; (в)- Динамический спектр мощности пульсаций интенсивности полос 391,4 и 427,8 нм (N_2^+) в зените станции в области частот 0,2-1 Гц по данным фотометра с полем зрения 20° и частотой дискретизации 20 Гц [Иевенко и Парников, 2022]

0,12 Гц с периодами ~ 40 , ~ 25 и ~ 8 с, соответственно, были зарегистрированы зенитным фотометром с частотой дискретизации 1 Гц. Всплески пульсаций в окрестности частот $\sim 0,25$; $\sim 0,3$; $\sim 0,45$; $\sim 0,5$ и $\sim 0,8$ Гц в интервале периодов 4-1,25 с наблюдались фотометром с частотой дискретизации 20 Гц также в зените станции (см. рисунок 3.5в). Спектрограммы показывают одновременные всплески пульсаций на нескольких частотах. В действительности, короткие всплески пульсаций могут регистрироваться последовательно во времени в пределах ширины одного окна БПФ, которая составляет 251 и 102,4 с для спектров (б) и (в) на рисунке 3.5, соответственно. Такая нерегулярность периодов является характерным свойством пульсаций свечения, наблюдаемых на широтах ДС и SAR-дуги во время суббури [Иевенко, 1995; Ievenko et al., 2008; Иевенко, Парников, 2022].

3.4 Регистрация Те пиков на спутнике Swarm-B во время наблюдений SAR-дуги

Во время наблюдения SAR-дуги 15 февраля 2018 г. спутник Swarm-B в двух проходах вблизи меридиана «Маймаги» измерял электронную температуру на высоте области F2 ионосферы. Рисунок 3.6 показывает два изображения всего неба в эмиссии 630,0 нм вблизи моментов времени регистрации максимумов Те пиков (электронной температуры) на спутнике в первом и втором проходе, соответственно. В 16:59:30 UT Swarm-B пересек широты наблюдения красной дуги на $\sim 9^\circ$ восточнее, а в 18:33:30 UT на $\sim 15^\circ$ (1 час) западнее меридиана оптических наблюдений. Оба пересечения SAR-дуги показаны на изображениях белыми линиями. Во время первого прохода спутника, дуга наблюдалась через 1 минуту после начала взрывной фазы суббури. Второй проход был на фазе восстановления суббури во время затухания ДС и SAR-дуги. Первое изображение на рисунке 3.6 показывает, что красная дуга в конце подготовительной фазы суббури располагалась близко к границе ДС и имела интенсивность в зените ~ 130 Рл.

15 февраля 2018 г.

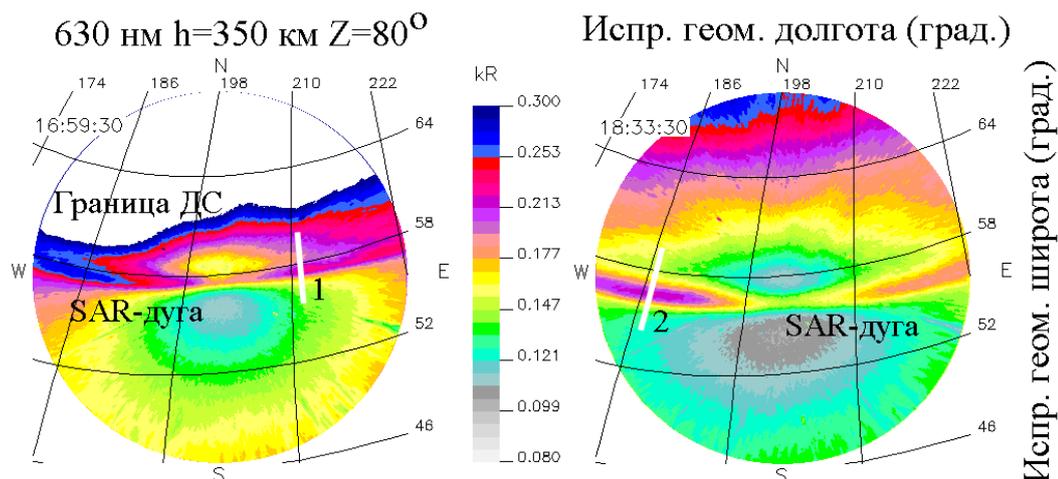


Рисунок 3.6. Регистрация SAR-дуги во время проходов спутника Swarm-B вблизи меридиана станции наблюдений 15 февраля 2018 г.

Приведены изображения всего неба в эмиссии 630,0 нм в проекции на поверхность Земли в геомагнитных координатах для высоты свечения 350 км во время проходов спутника Swarm-B. Шкала интенсивности эмиссии приведена до 0,3 кРл для более детального отображения экваториальной границы ДС и SAR-дуги. Два пересечения SAR-дуги спутником Swarm-B показаны на изображениях белыми линиями [Иевенко и Парников, 2022]

Для сопоставления SAR-дуги с Те пиками были получены широтные распределения интенсивности (сканогаммы) с изображений вдоль географического меридиана станции наблюдений. Проходы спутника Swarm-B в интервале широт наблюдения красной дуги также примерно совпадали с соответствующими географическими меридианами. Географическая широта спутника во время измерений Те пиков на высоте 530 км была пересчитана для высоты красной эмиссии равной 350 км с учетом наклона вектора геомагнитного поля.

Рисунок 3.7 показывает широтное распределение электронной температуры (Те) и интенсивности эмиссии 630,0 нм для проходов 1 и 2 спутника Swarm-B. Можно видеть хорошее совпадение положения SAR-дуги с Те пиком для обоих проходов спутника. При этом в 16:59:30 UT полярная область красной дуги перекрывалась с ДС, а в 18:33:30 UT широтные профили дуги и Те пика стали более подобными во время затухания ДС. Обе сканогаммы показывают рост интенсивности эмиссии 630,0 нм севернее Те пика на широтах ДС вследствие

высыпания низкоэнергичных электронов. На широтах SAR-дуги в области Те пиков возбуждение красной линии атомарного кислорода вызывается сверхтепловыми электронами.

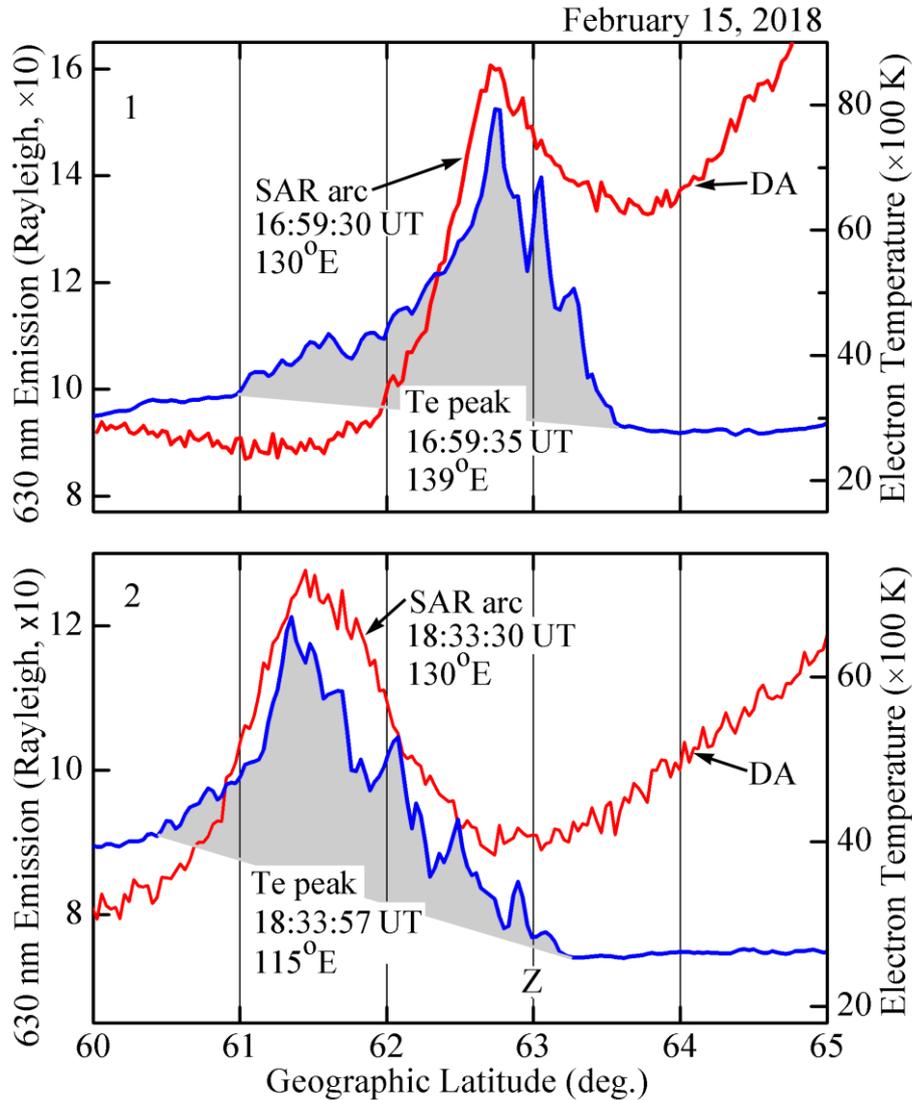


Рисунок 3.7 Сопоставление Те пиков с наблюдениями SAR-дуги 15 февраля 2018 г.

Приведены широтные распределения электронной температуры (Те) и интенсивности эмиссии 630,0 нм [ОI] для двух проходов спутника Swarm-B. Указано время и географическая долгота измерения максимумов в Те пиках для обоих проходов спутника. На сканограммах приведено время наблюдения SAR-дуги и географический меридиан станции оптических наблюдений. Z-зенит станции [Иевенко и Парников, 2022]

3.5 Обсуждение результатов наблюдения динамики субарорального свечения во время суббури 15 февраля 2018 г.

В разделах 3.1-3.2 представлены данные наблюдений ASI динамики ДС и формирования SAR-дуги во время суббури 15 февраля 2018 г. В разделе 3.3 получены спектры пульсирующих вариаций интенсивности первой отрицательной системы полос N_2^+ в области экваториальной границы ДС и SAR-дуги по данным фотометрической регистрации в зените станции «Маймага». В разделе 3.4 наземные наблюдения SAR-дуги сопоставлены с регистрацией T_e пиков на спутнике Swarm-B во время суббури. Далее, рассмотрим главные моменты в результатах наблюдений.

3.5.1 Параметры солнечного ветра, динамика сияний и SAR-дуги во время подготовительной и взрывной фаз суббури

Магнитосферное возмущение в событии 15 февраля 2018 г. началось с SSC (Storm Sudden Commencement) в ~08:38 UT, который был вызван приходом фронта масс инъекции от солнечной вспышки класса C1. ASI «Keo Sentry» регистрировал слабое ДС в эмиссии 557,7 нм в широтном интервале $\sim 3^\circ$ к югу от дискретных сияний. В окрестности границы ДС в эмиссии 630,0 нм началось формирование SAR-дуги.

Взрывная фаза суббури стартовала в вечернем секторе с последующим распространением в послеполуночный сектор MLT согласно магнитным вариациям на средних широтах. В это время продолжалось движение к экватору границы ДС и красной дуги. Рост интенсивности дуги наблюдался и во время быстрого затухания ДС в эмиссии 557,7 нм при отрицательном значении E_u СВ (см. раздел 3.1 и рисунки 3.1-3.3).

На рисунке 3.1 можно видеть, что во время экваториального расширения ДС интенсивность зеленой и красной линии атомарного кислорода на широте $\sim 59^\circ$ в ~16:30 UT была ~ 300 и ~ 120 Рл, соответственно, с отношением ~ 2.5 . Далее, в окрестности экваториальной границы ДС интенсивность красной линии растет

вследствие механизма возбуждения SAR-дуги. Поэтому во время магнитосферных возмущений экваториальная граница диффузных высыпаний низкоэнергичных электронов плазменного слоя более однозначно отображается в эмиссии 557,7 нм [OI].

В событии 15 февраля 2018 г. впервые рассмотрены инструментальные наблюдения возникновения лучей (короны) на экваториальной границе ДС в эмиссии 557,7 нм и появление выступов свечения на полярном крае красной дуги. Лучи сияния наблюдались только в зеленой линии атомарного кислорода, что указывает на среднюю энергию высыпающихся электронов > 2 кэВ [Rees, Lucey, 1974]. Неоднородный край SAR-дуги и лучи в ДС наблюдались одновременно в окрестности зенита станции наблюдений, что исключает большое изменение их взаимного положения в проекции на поверхность Земли для различных высот свечения. Рисунок 3.4б показывает, что лучи на границе ДС наблюдались в области неоднородностей в эмиссии 630,0 нм на полярном крае красной дуги. Такое явление в SAR-дуге может быть обусловлено возникновением неоднородностей электронной плотности на границе внешней плазмосферы.

3.5.2 Пульсирующие вариации интенсивности эмиссий 427,8 нм (N_2^+) и 630,0 нм [OI] в зените станции наблюдений

В разделе 3.3 рассмотрены данные фотометрических наблюдений свечения в окрестности зенита станции наблюдений. Фотометр с частотой дискретизации 1 Гц зарегистрировал в магнитном зените рост интенсивности эмиссии 630,0 нм [OI] как следствие экваториального смещения SAR-дуги. Длиннопериодные, квазипериодические вариации интенсивности красной линии были обусловлены движением в восточном направлении выступов свечения на полярном крае дуги. В этой же области наблюдалось увеличение фона в эмиссии 427,8 нм (N_2^+) с последующим развитием пульсаций интенсивности с амплитудой до ~ 20 Рл (см. рисунок 3.5 а). Динамические спектры мощности пульсаций свечения выявили интенсивные гармоники в интервале частот 0,02-0,2 и 0,2-1 Гц (см. рисунок 3.5 б,

в). Пульсации в эмиссии 427,8 нм были обусловлены пульсирующим высыпанием энергичных частиц на широтах плазмопаузы.

3.5.3 Сопоставление Те пиков с наземными наблюдениями SAR-дуги

Субавроральные пики электронной температуры (Те пики) на высотах области F2 ионосферы являются характерным признаком SAR-дуг. Регистрация Те пиков спутником Swarm-B на широтах красной дуги верифицируют наземные наблюдения дуги во время усиления конвекции и взрывной фазы суббури 15 февраля 2018 г. Кроме этого, широтные распределения Те и интенсивности эмиссии 630,0 нм для двух проходов спутника на рисунке 3.7 показывают разные механизмы возбуждения красной линии атомарного кислорода в SAR-дуге и ДС.

Также следует отметить хорошее подобие широтных профилей Те и красной дуги в окрестности зенита и экваториальнее станции наблюдений в первом и втором проходе спутника Swarm-B.

3.6 Развитие пульсаций свечения на широтах SAR-дуги во время суббури 30 марта 2003 г. Результаты наблюдений

Фотометрические наблюдения на станции «Маймага» показали, что во время восстановительной фазы интенсивных суббурь на широтах SAR-дуги часто наблюдаются пульсирующие вариации интенсивности свечения молекулярных полос N_2^+ с частотами 0,02-1 Гц [Иевенко, 1995; 1999]. Эти пульсации отображают пульсирующие высыпания энергичных частиц кольцевого тока в области внешней плазмосферы [Ievenko et al., 2008; Иевенко, Парников 2022]. Ниже, рассмотрен пример фотометрических наблюдений ДС, SAR-дуги и быстрых вариаций интенсивности свечения N_2^+ на ее широтах. Показана связь пульсаций свечения с формированием SAR-дуги. Описаны феноменологические характеристики пульсаций. Рассчитаны частоты ЭМИЦ волн, возможно, ответственных за пульсирующие потоки высыпающихся частиц из области внешней плазмосферы.

На рисунке 3.8 показан пример наблюдения динамики субаврорального свечения во время суббури 30 марта 2003 г. С самого начала наблюдений (с 13 UT)

происходило расширение экваториальной границы ДС в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм [ОI] на фоне усиления магнитосферной конвекции. После начала взрывной фазы суббури в 15:16 UT на экваториальной границе ДС возникла красная полоса (SAR-дуга без четкой полярной границы [Иевенко, 1999]). По мере усиления активности, экваториальная граница ДС в эмиссии 557,7 нм продолжала свое расширение и достигнув зенита станции наблюдений в 16:00 UT, начала свое обратное движение.

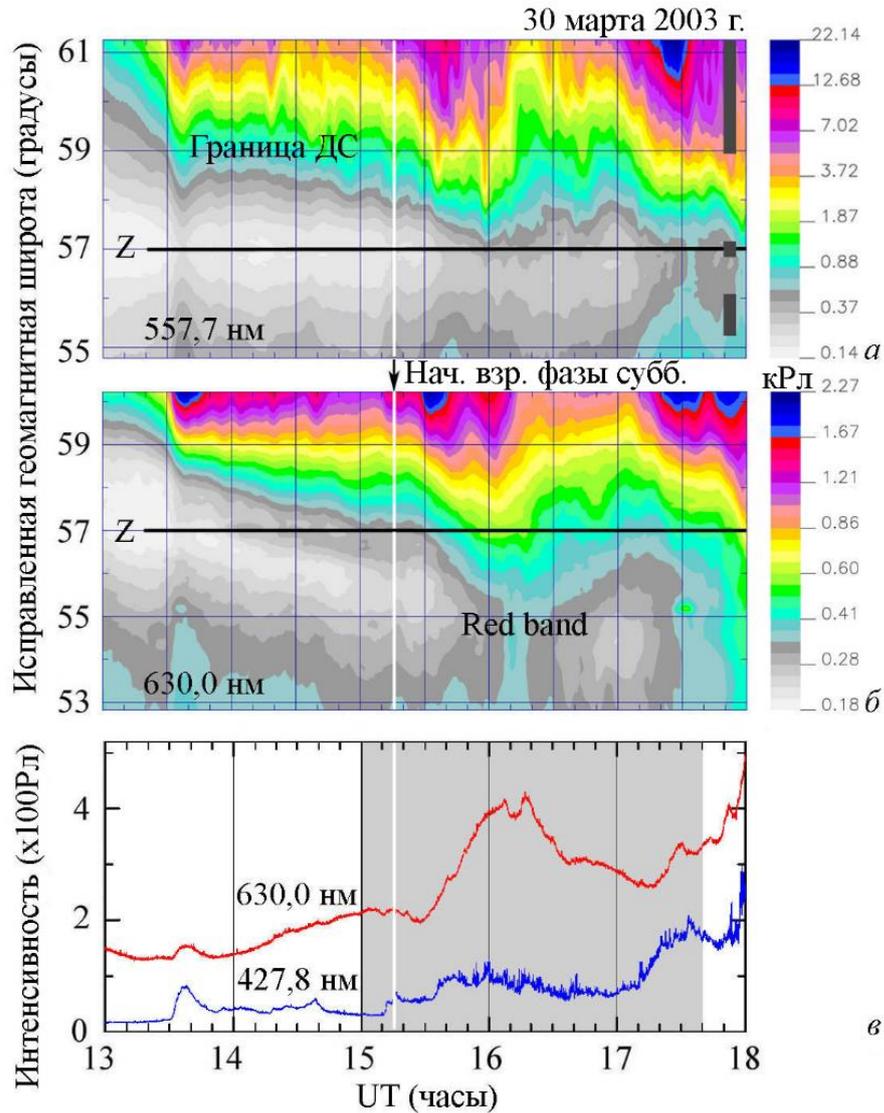


Рисунок 3.8. Динамика субаврорального свечения 30 марта 2003 г.

(а) и (б) - данные меридионального сканирующего фотометра в виде кеограмм в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм [ОI]. На кеограмме в эмиссии 557,7 нм показано положение полей зрения фотометров для регистрации полос N_2^+ . Z – зенит станции наблюдений. (в) - графики интенсивности эмиссий 427,8 и 630,0 нм, зарегистрированных в магнитном зените станции [Ievenko et al., 2012]

В ~16:20 UT на фоне отступающего ДС, полоса в эмиссии 630,0 нм достигла максимума экваториального продвижения и находилась на 2° южнее зенита станции (см. рисунок 3.8 *а, б*). Зенитный фотометр, оснащенный узкополосными светофильтрами с полушириной пропускания 2 нм и частотой дискретизации 1 Гц, регистрировал усиление интенсивности эмиссии 630,0 нм в магнитном зените станции, которое произошло во время возникновения красной полосы. В эмиссии 427,8 нм с ~15:10 UT, во время взрывной фазы суббури, наблюдалось усиление фонового уровня, а с 15:45 UT, после пересечения красной полосой зенита станции, начались всплески интенсивности (пульсации). По мере затухания красной полосы, пульсации ослабевали и к ~17:00 UT прекратились. В эмиссии 630,0 нм эти пульсации не наблюдались (см. рисунок 3.8*в*).

3.7 Результаты спектрального анализа пульсаций свечения на широтах SAR-дуги во время суббури 30 марта 2003 г.

На рисунке 3.9 представлены динамические спектры пульсаций интенсивности полос N_2^+ по данным фотометрических наблюдений в трех направлениях во время суббури 30 марта 2003 г. С ~15:20 UT, после усиления фонового свечения по всем каналам в ~15:10UT, N-фотометр регистрировал пульсации свечения в области активного ДС после начала фазы расширения суббури. Основные частоты пульсаций в этом направлении лежали в области 0,2-0,4 Гц. Во время максимального усиления амплитуды пульсаций в Z- и E-направлениях, пульсации в N-направлении ослабевали. С 15:45 UT, после пересечения красной полосы зенита станции наблюдений, Z- и E-фотометры начали регистрировать всплески квазипериодических пульсаций с дискретными максимумами в спектре мощности в интервале частот 0,2-0,8 Гц. Эти пульсации развились на широтах красной полосы, экваториальнее ДС.

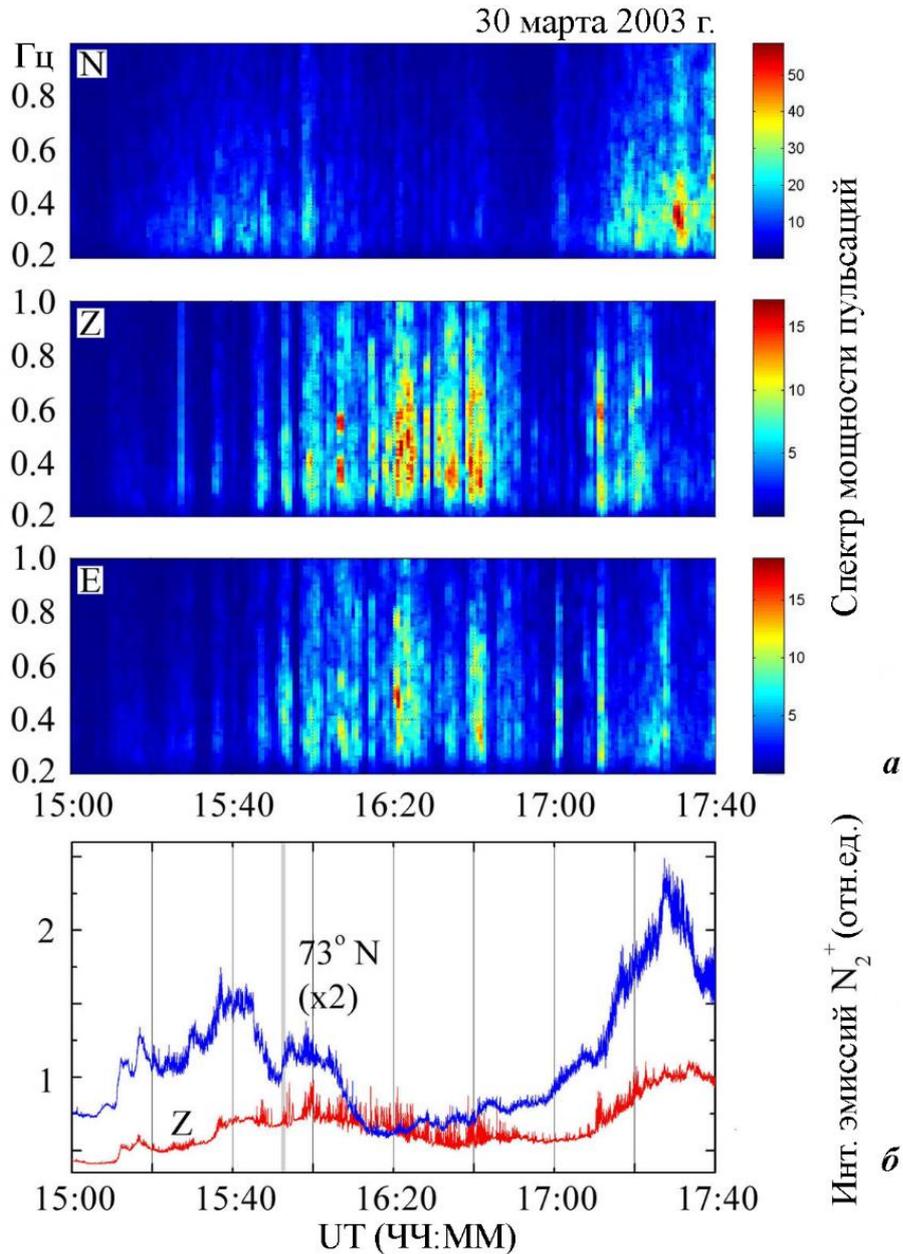


Рисунок 3.9. Динамические спектры пульсаций свечения 30 марта 2003 г.

a – спектр мощности пульсаций свечения в диапазоне частот 0,2-1 Гц; *b* – графики вариаций интенсивности полос N_2^+ для двух направлений регистрации (север и зенит) с частотой дискретизации 20 Гц, полученных 4х канальным фотометром [Ievenko et al., 2012]

3.8 Особенности развития пульсаций свечения в Z- и E-направлениях.

Долготная задержка

На рисунке 3.10 представлен 2х-минутный фрагмент регистрации пульсаций свечения полос N_2^+ для трех направлений регистрации ($0^\circ Z$, $73^\circ N$ и $45^\circ E$) во время

наблюдений 30 марта 2003 г. Время задержки развития пульсаций в зените относительно восточного направления составляет 45с. Это время соответствует скорости магнитного дрейфа $2^\circ/\text{мин}$ положительных ионов с энергией 50 кэВ. После указанной задержки, Z- и E - фотометры начали регистрировать синхронные пульсации с одинаковыми амплитудами. Также, на рисунке видно, что в северном направлении в области активного ДС в это время наблюдались более низкочастотные вариации свечения с большей амплитудой.

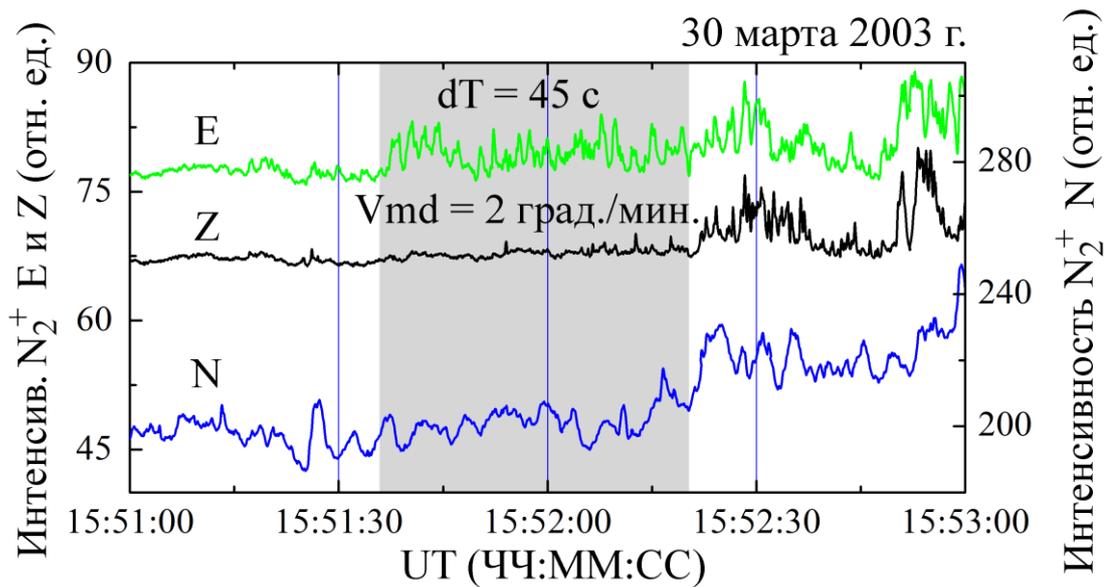


Рисунок 3.10. Пример регистрации задержки в развитии пульсаций свечения N_2^+ вдоль долготы 30 марта 2003г.

Серым столбцом указан интервал задержки [Ievenko et al., 2012]

3.9 Оценка частот ЭМИЦ волн в области внешней плазмосферы

В этом разделе рассмотрен наиболее вероятный механизм генерации субвизуальных пульсаций свечения N_2^+ на широтах ДС и SAR-дуги.

В работе [Coroniti and Kennel, 1970] для пульсирующих сияний был предложен механизм модуляции питч-угловой диффузии энергичных электронов электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами. В результате происходит модуляция потока частиц в конусе потерь с частотой волны. Питч-

угловая диффузия в этом случае должна быть обусловлена электрон-циклотронной неустойчивостью.

Во внутренней магнитосфере на $L=3-4$ возбуждение гидромагнитных волн с частотами 0,2-1 Гц возможно при развитии циклотронной неустойчивости на энергичных ионах O^+ , которые часто доминируют в составе кольцевого тока [Kozyra et al., 1987; Takahashi et al. 2008].

Была сделана количественная оценка частоты ЭМИЦ волн в окрестности плазмопаузы на основе обобщенного уравнения резонансной энергии k -го иона:

$$E_{Rk} = \frac{E_C * M_k}{M_p} * \left(\frac{V_{Rk}}{V_{Ap}} \right)^2$$

(Kennel, Petschek, 1966)

Где,

$$E_C = \frac{B_0^2}{8 * \pi * N_e}$$

$$B_0 = \frac{0,311}{L^3} \text{ [Гс]}$$

$$\frac{V_{Rk}}{V_{Ap}} = \frac{V_{ph}}{V_{Ap}} * \left(\frac{\Omega_k}{\Omega_p} * \frac{1}{x} - 1 \right)$$

$$x = \frac{\omega_k}{\Omega_p}$$

N_e – плотность холодной плазмы

L – параметр Макилвейна

V_{Rk} – резонансная скорость k -го иона

V_{Ap} и V_{ph} – альвеновская и фазовая скорость ЭМИЦ волны, соответственно.

ω_k и ω_p – гирочастоты k -го иона и протона, соответственно.

x – нормированная частота ЭМИЦ волны.

Для чисто протонного состава ионной компоненты холодной плазмы:

$$\frac{V_{ph}}{V_{Ap}} = \sqrt{1 - x} \text{ (Kennel, Petschek, 1966)}$$

Для протонно-гелиевой плазмы:

$$\frac{V_{ph}}{V_{Ap}} = \sqrt{\frac{(0,25-x)*(1-x)}{1-0,75\alpha_p-x}} \quad (\text{Lubchich, Semenova, 2015})$$

α_p -доля холодных протонов в протонно-гелиевой плазме

Для протонно-гелиевой-кислородной плазмы:

$$\frac{V_{ph}}{V_{Ap}} = \sqrt{\frac{x}{\frac{\eta_1}{1-x} + \frac{\eta_2}{1-4x} + \frac{\eta_3}{1-16x} - 1}} \quad (\text{Summers, Thorne, 2003})$$

η_1, η_2, η_3 доли холодных ионов H^+, He^+, O^+ ,

Для численного определения нормированной частоты ЭМИЦ волн выражение для резонансной энергии можно представить в виде:

$$E_{Rk} = \frac{A}{L^6 \times Ne} \times \left(\frac{x}{\frac{n_1}{1-x} + \frac{n_2}{1-4x} + \frac{n_3}{1-16x}} \right) \times \left(\frac{1}{A \times x} - 1 \right)^2 \times 2,4 \times 10^6$$

Численным методом, были рассчитаны зависимости значений, нормированных частот ЭМИЦ волн от L-параметра, сгенерированных на энергичных ионах H^+ и O^+ кольцевого тока при различных значениях плотности и ионного состава холодной плазмы (см. рисунок 3.11)

Из рисунка 3.11 видно, что нормированные частоты ЭМИЦ волн, возбужденных при резонансе с энергичными ионами H^+ и O^+ кольцевого тока, лежат ниже нормированных гирочастот соответствующих ионов. Также видно, что частота ЭМИЦ волн падает с увеличением параметра L, энергии ионов и плотности холодной плазмы.

С увеличением концентрации тяжелых ионов в фоновой плазме, сильно понижается частота возбуждаемых ЭМИЦ волн. Так, при десятипроцентном содержании ионов O^+ в составе холодной плазмы, частоты ЭМИЦ волн, возбужденных на энергичных протонах понижаются до 1 Гц на $L=3,3$. Подобный результат с расчетами положительного инкремента нарастания волны, можно найти в работе [Kozyra et al., 1984]. ЭМИЦ волны с частотами 0,3-0,8 Гц на $L=3,3$ могут быть сгенерированы на циклотронных резонансах с энергичными ионами O^+

кольцевого тока уже при достаточно низких значениях энергии резонирующего иона и плотности фоновой плазмы.

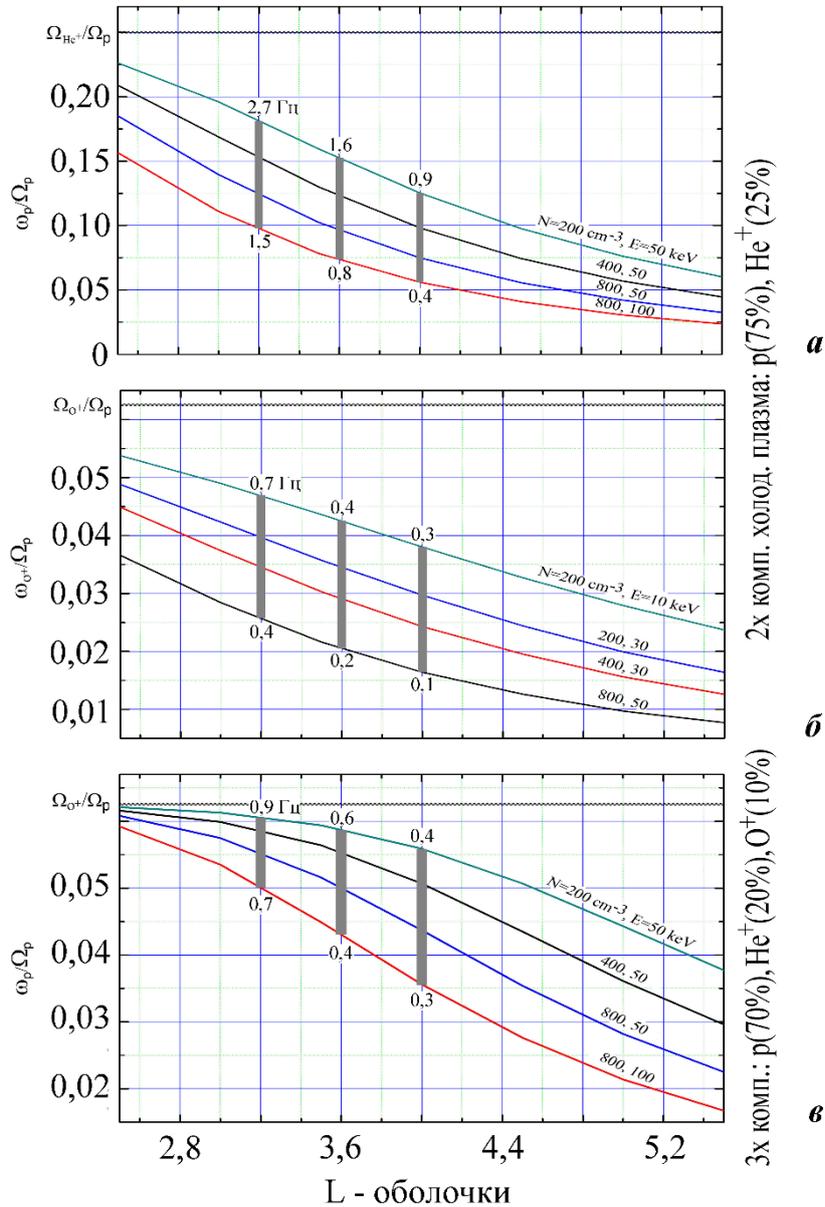


Рисунок 3.11. Рассчитанная зависимость нормированной частоты ЭМИЦ волны от L -параметра при фиксированных значениях энергии ионов и плотности холодной плазмы

a, *b* – зависимость нормированной частоты ЭМИЦ волн, сгенерированных на протонах и ионах O^+ кольцевого тока, соответственно при двухкомпонентной ионной составляющей холодной плазмы (75% p и 25% He⁺).

v - зависимость нормированной частоты ЭМИЦ волн, сгенерированных на протонах кольцевого тока при трехкомпонентной ионной составляющей холодной плазмы (70% p, 20% He⁺ и 10% O⁺).

Черной линией обозначена нормированная гирочастота соответствующего иона. Серыми столбцами, на графиках, показаны частоты (в герцах) ЭМИЦ волн [Ievenko et al., 2012]

3.10 Обсуждение результатов наблюдений пульсаций свечения на широтах SAR-дуги во время суббури 30 марта 2003г.

На большом массиве обработанных данных, феноменологические свойства пульсирующих вариаций свечения молекулярных полос N_2^+ на широтах ДС и SAR-дуг, можно описать следующим образом: возникновению пульсаций предшествует подъем фонового свечения N_2^+ . Пульсации, протекающие на широтах SAR-дуги, возникают в период фазы восстановления суббури на широтах уже существующей красной дуги. Пульсации, протекающие в виде отдельных цугов различной продолжительности, прекращаются с затуханием SAR-дуги. В случае асимметрии интенсивности свечения SAR-дуги вдоль геомагнитной широты, пульсации также показывают схожую асимметрию в интенсивности. В развитии пульсаций иногда наблюдается долготная задержка западного направления (пульсации развиваются на 40-50с раньше в восточном направлении относительно зенита станции), которая соответствует скорости градиентного дрейфа ионов кольцевого тока 2° в минуту на L-оболочке станции наблюдений. Пульсации протекают в виде квазигармонических вариаций в частотном диапазоне 0,02-1 Гц.

В рассмотренном примере пульсирующие вариации интенсивности полос N_2^+ регистрировались в окрестности границы ДС и на широтах полосы свечения в эмиссии 630,0 нм (SAR-дуги без выраженного полярного края) экваториальнее зенита станции наблюдений. В области ДС на геомагнитных широтах $59-61^\circ$ пульсаций свечения с подобным спектром не было. События с регистрацией пульсаций свечения только на широтах SAR-дуги указывают на развитие модуляции потока высыпающихся энергичных электронов на L-оболочках внешней плазмосферы. Рост интенсивности полос N_2^+ на широтах красной дуги до начала развития пульсаций обусловлен увеличением фонового потока высыпающихся электронов в это время.

В событии 30 марта 2003 г. наблюдалась задержка развития пульсаций в зените относительно восточного направления в пределах 45с, вероятно, связанная

с градиентным дрейфом энергичных ионов кольцевого тока на L-оболочке станции наблюдений.

В работах [Иевенко, 1995; Ievenko et al., 2008] полагалось, что пульсации свечения в виде коротких всплесков с частотами 0,5-1 Гц могут быть следствием развития циклотронной неустойчивости с формированием моноэнергичного сгустка электронов, осциллирующего между зеркальными точками. На L~3,3 электроны с энергией 8-30 кэВ с питч-углами вблизи конуса потерь имеют баунс период 2-1с, соответственно. Возможность автомодуляции циклотронной неустойчивости на баунс-резонансе в области холодной плазмы была показана в работе [Беспалов, Трахтенгерц, 1985]. Но дальнейший анализ данных фотометрических наблюдений не выявил кратных частот в пульсациях свечения, которые должны наблюдаться при баунс-резонансе циклотронной неустойчивости.

Расчет частот ЭМИЦ волн в разделе 3.9 показал, что механизм Coroniti and Kennel (1970) модуляции питч-угловой диффузии энергичных электронов может вызывать наблюдаемые пульсации свечения в окрестности плазмопаузы. Дополнительной отсылкой к этому является то, что этот механизм предполагает модуляцию уже заранее сформированного (усиленного) фонового потока высыпающихся электронов. Этому требованию отвечает предварительное усиление эмиссии 427,8 нм N_2^+ перед началом пульсаций (см. рисунок 3.8). Питч-угловая диффузия в этом случае должна быть обусловлена электрон-циклотронной неустойчивостью [Kennel, Petschek, 1966]. В рассмотренном выше событии пульсирующие высыпания энергичных электронов (пульсации свечения) регистрировались на L~3,3 в интервале частот 0,2-0,8 Гц, который находится, в основном, ниже гирочастоты ионов кислорода (~0,8 Гц) на этой L-оболочке. Соответственно, возбуждение ЭМИЦ волн в указанном выше интервале частот на L~3,3 возможно на циклотронном резонансе с энергичными ионами кислорода, которые часто доминируют в составе кольцевого тока во время магнитных бурь и суббурь [Kozyra et al., 1987; Иевенко, Парников, 2020; Ievenko, 2020].

Выводы к 3 главе

В первом примере анализа данных наблюдений динамических явлений в субавроральном свечении рассмотрено событие возникновения SAR-дуги во время суббури 15 февраля 2018 г. при отсутствии выраженного признака магнитной бури с минимумом $SUM-H=-20$ нТл. Основные результаты анализа заключаются в следующем:

1. Усиление магнитосферной конвекции при длительном южном направлении V_z ММП наблюдалось в экваториальном расширении ДС. Отношение интенсивности эмиссий 557,7/630,0 нм [OI] в ДС было $\sim 2,5$. В окрестности границы ДС в эмиссии 630,0 нм началось формирование SAR-дуги до начала взрывной фазы суббури.

2. Увеличение интенсивности и экваториальное расширение SAR-дуги свидетельствовало об увеличении области перекрытия энергичной плазмы с внешней плазмосферой до $L\sim 3,1$ в течение 20-30 мин после начала взрывной фазы суббури. Это указывает на существование процесса быстрого проникновения потоков энергичных ионов на L-оболочки внешней плазмосферы во время инъекции суббури.

3. В событии 15 февраля 2018 г. впервые рассмотрены инструментальные наблюдения возникновения лучей (короны) на экваториальной границе ДС в эмиссии 557,7 нм и появление выступов свечения на полярном крае красной дуги. Лучи сияния наблюдались только в зеленой линии атомарного кислорода, что указывает на среднюю энергию высыпающихся электронов > 2 кэВ [Rees, Luskey, 1974]. Лучи на экваториальной границе ДС в эмиссии 557,7 нм возникали вблизи выступов свечения на полярном крае красной дуги. Выступы на границе SAR-дуги могут быть вызваны возникновением неоднородностей электронной плотности на границе внешней плазмосферы.

4. В области перекрытия ДС и SAR-дуги наблюдались пульсации свечения молекулярных полос N_2^+ , вызванные пульсирующим высыпанием энергичных частиц. Пульсации свечения регистрировались в интервале частот 0,02-0,8 Гц.

5. Спутник Swarm-B зарегистрировал Те пики на широтах SAR-дуги в двух проходах вблизи меридиана станции наблюдений. Данные измерений электронной температуры верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги во время усиления магнитосферной конвекции и взрывной фазы суббури 15 февраля 2018 г.

Во втором примере наблюдений рассмотрен случай развития пульсаций свечения на широтах красной полосы свечения (SAR-дуги без выраженной полярной границы) экваториальнее ДС во время взрывной фазы суббури 30 марта 2003 г. Результаты анализа данных наблюдений для этого события, следующие:

1. Пульсаций свечения регистрировались экваториальнее ДС на широтах SAR-дуги, что указывает на возникновение модуляции потока высыпающихся энергичных электронов на L-оболочках внешней плазмосферы.

2. Динамические спектры выявили всплески квазипериодических пульсаций свечения с дискретными максимумами в интервале частот 0,2-0,8 Гц который находится ниже гирочастоты ионов кислорода ($\sim 0,8$ Гц) на этой L-оболочке.

3. Пульсации свечения возникали с задержкой по времени в зените станции наблюдений относительно восточного направления в пределах 45 с, что могло быть обусловлено градиентным дрейфом энергичных ионов кольцевого тока на L-оболочке станции наблюдений.

4. На основе численного расчета показано, что механизм модуляции питч-угловой диффузии энергичных электронов ЭМИЦ волнами [Coroniti, Kennel, 1970] может вызывать наблюдаемые пульсации свечения в окрестности плазмопаузы.

ГЛАВА 4. Связь SAR-дуги с плазмопаузой и околоземной границей кольцевого тока

В этом разделе сопоставлены наземные наблюдения SAR-дуги с данными одновременных спутниковых измерений параметров плазмы и потоков энергичных частиц в ионосфере и внутренней магнитосфере во время магнитной бури Святого Патрика (17 марта 2015 г.).

4.1 Начало магнитной бури и наблюдение SAR-дуги на станции «Маймага» 17 марта 2015 г.

Магнитная буря 17 марта 2015 г. имела внезапное начало (SSC) в 04:46 UT, вызванное межпланетной ударной волной (IPS на рисунке 4.1а). Главная фаза магнитной бури началась в ~06:24 UT после резкого увеличения электрического поля E_y утро-вечер ($-V_x \times B_z$) до 11 мВ/м при высокой плотности СВ. Во время больших значений E_y утро-вечер произошло уменьшение индекса SYM-H до ~-100 нТл. В это же время был значительный рост AL индекса, который достиг -900 нТл во время суббури в предполуночном секторе MLT по низкоширотным магнитным данным (на рисунке 4.1б не приведены). Во время отрицательного значения электрического поля E_y магнитная активность значительно уменьшилась, по AL индексу до спокойного уровня. Вторая активизация главной фазы магнитной бури началась во время следующего значительного и длительного увеличения E_y утро-вечер после ~12:30 UT.

Оптические наблюдения начались в 11:16 UT во время низкой авроральной активности при значении индекса SYM-H ~ -50 – -40 нТл. На рисунке 4.2 показаны обработанные изображения всего неба в эмиссиях 630,0 и 557,7 нм в интервале времени от начала наблюдений до ~12:30 UT (19:25–20:40 MLT). Видно, что геомагнитная широта полярной границы и интенсивность SAR-дуги увеличивалась с востока на запад. Экваториальная граница дуги наблюдалась на широте ~52–53°N по всему небу. Широта экваториальной границы ДС в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм

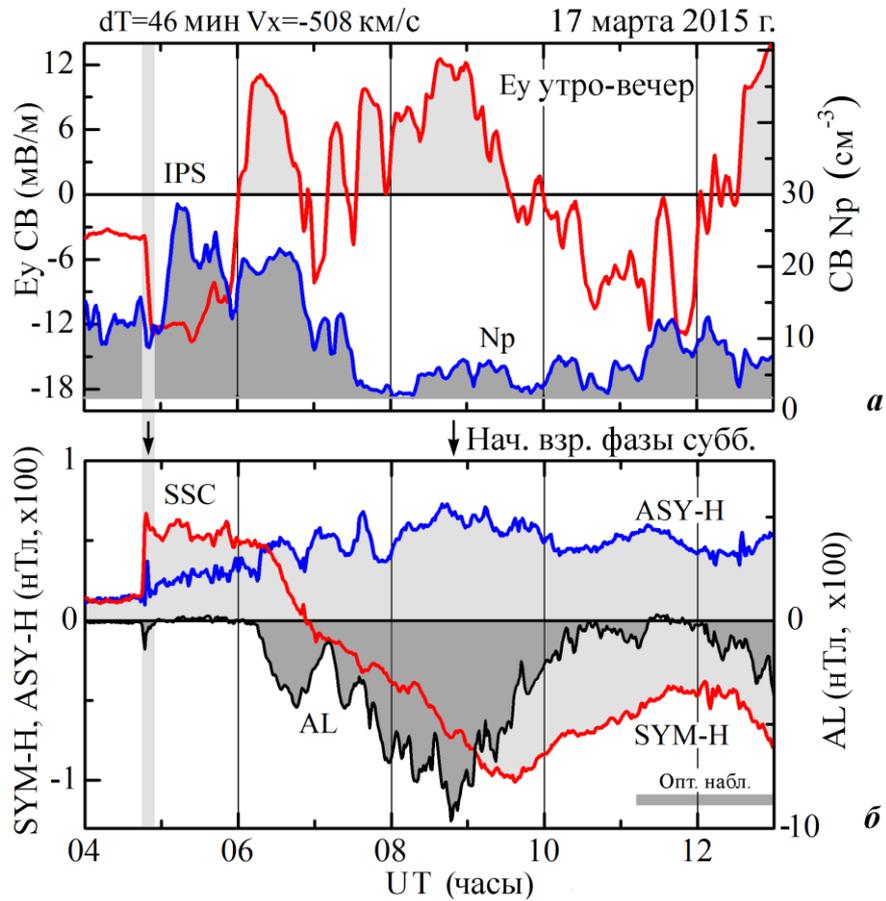


Рисунок 4.1. Динамика солнечного ветра и магнитные возмущения в начале бури 17 марта 2015 г.

a – электрическое поле E_y и плотность солнечного ветра N_p со сдвигом dT ; *b* – магнитные индексы ASY-H, SYM-H и AL. Стрелками указаны SSC и начало взрывной фазы суббури [Иевенко и Парников, 2020]

[OI] также увеличивалась в западном направлении. Граница ДС совпадала, вероятно, с полярной границей красной дуги на широте $\sim 59\text{--}60^\circ$ N на западном горизонте. Интенсивность SAR-дуги в максимуме на западе уменьшалась от ~ 2 в начале до $\sim 1,3$ кРл в конце приведенного интервала времени наблюдений. Интенсивность ДС в эмиссии 557,7 нм на севере достигала ~ 25 кРл в $\sim 12:30$ UT во время нового роста E_y утро - вечер (см. рисунок 4.1*a*) Далее, после ~ 13 UT, ДС быстро расширилось к экватору и SAR-дуга, также сместилась на более низкие широты. Последующая регистрация, вероятно, той же самой SAR-дуги, после ~ 15 UT началась в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (геогр.: 52° N, 103° E; геом.: $47,9^\circ$, $176,9^\circ$) на юге Восточной Сибири [Михалев и др., 2018].

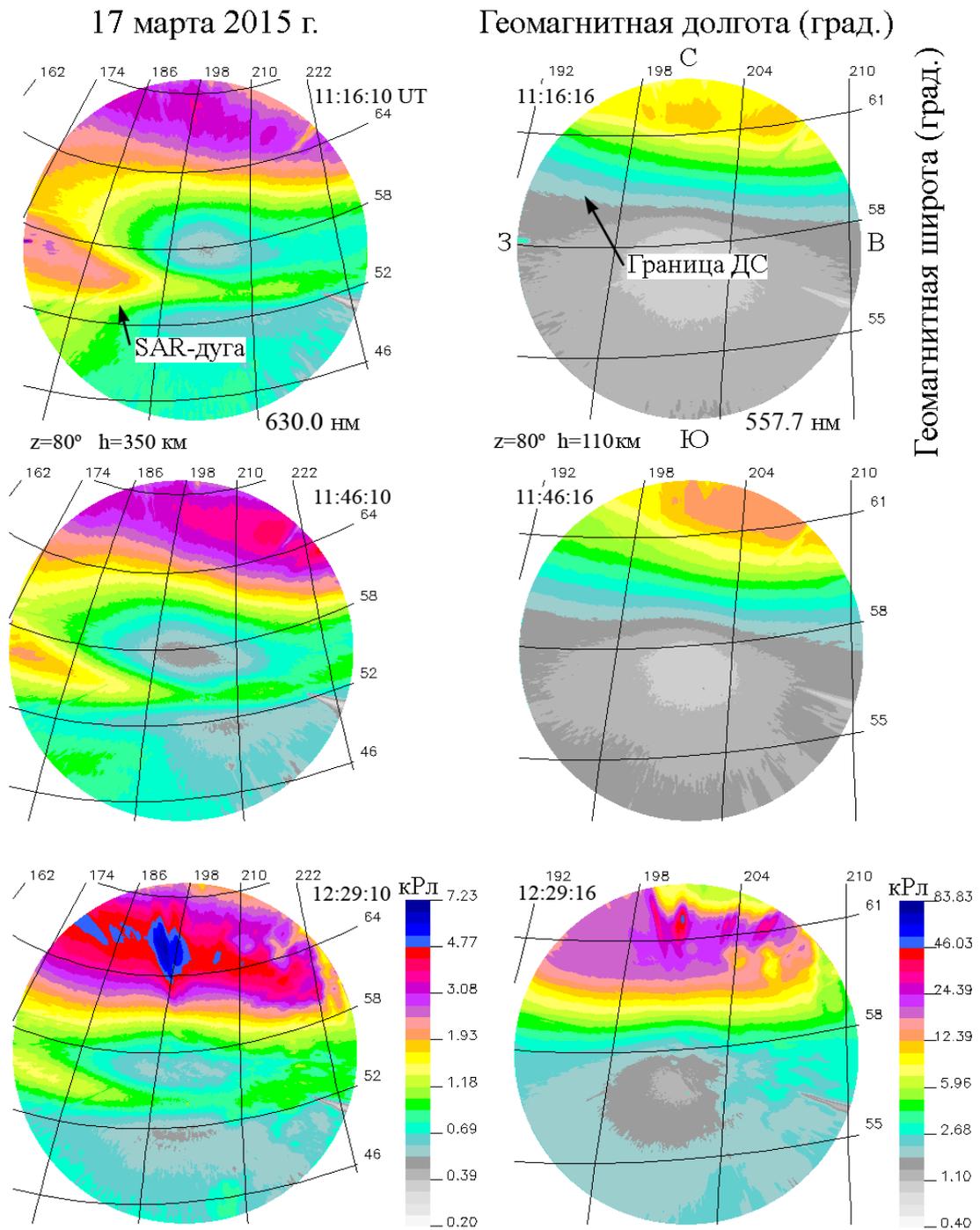


Рисунок 4.2. Изображения всего неба в эмиссиях 630,0 и 557,7 нм [ОI] в начале наблюдений 17 марта 2015 г.

Проекция на поверхность Земли в исправленных геомагнитных координатах для высот свечения 350 и 110 км в красной и зеленой линиях, соответственно. Шкалы интенсивности эмиссий приведены в килорэлях [Иевенко и Парников, 2020]

4.2 Измерения Van Allen Probe (B) в магнитосфере во время наблюдений SAR-дуги

На рисунке 4.3 показана орбита спутника VAP-B в плоскости X, Y GSM во время оптических наблюдений 17 марта 2015 г. в вечернем секторе MLT. Спутник регистрировал границу плазмосферы (плазмопаузу) и потоки энергичных частиц в секторе 17:36–19:08 MLT вблизи меридиана станции наблюдений в 12:10–12:50 UT. Прохождение зонда через плазмопаузу в вечернем секторе MLT показано красной жирной линией.

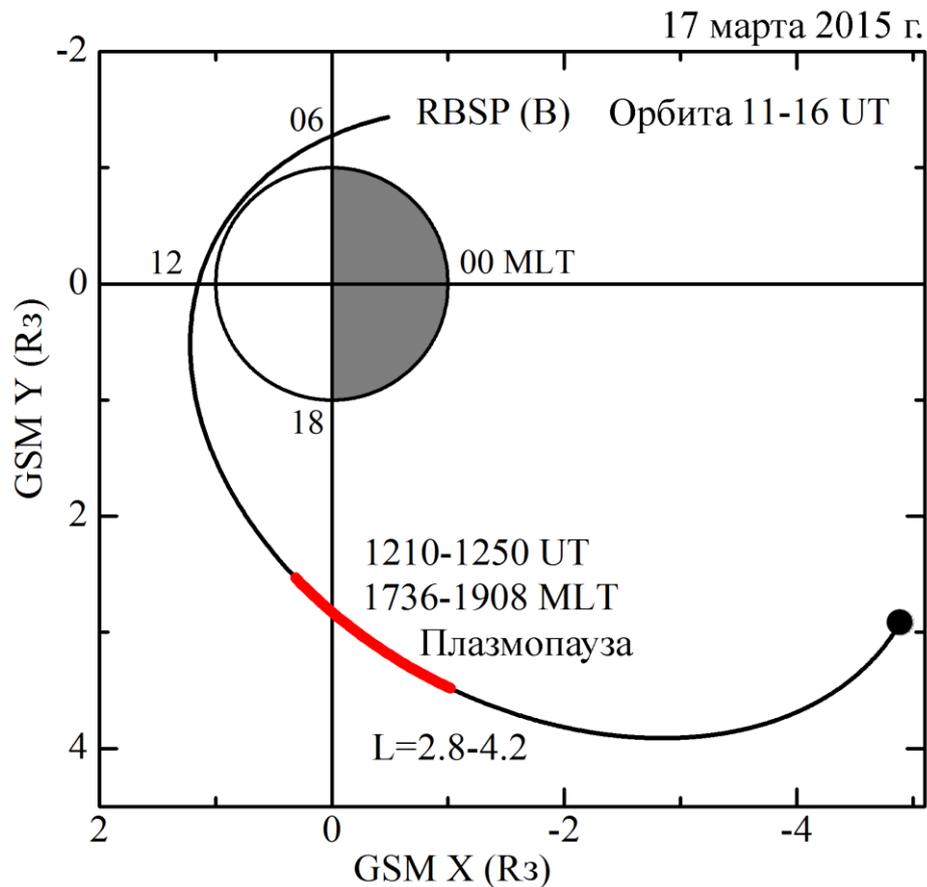


Рисунок 4.3. Орбита VAP-B в плоскости X, Y GSM во время оптических наблюдений на станции «Маймага» 17 марта 2015 г.

Прохождение зонда Van Allen Probe-B (VAP-B) через плазмопаузу в вечернем секторе MLT обозначено красной толстой линией [Иевенко и Парников, 2020]

Рисунок 4.4a показывает положение внутренней границы потоков энергичных ионов относительно плазмопаузы. Измерения спутника указывают на перекрытие

энергичных ионов кольцевого тока O^+ и H^+ с внешней плазмосферой в интервале $L \sim 2,8-4,5$ по расчетным координатам на рисунке 4.4 в. Резкое увеличение потока электронов в интервале энергий 1–7,4 кэВ на рисунке 4.4б совпадает с началом роста плотности холодных электронов. Этот рост потока низкоэнергичных электронов связан с внутренней границей плазменного слоя. На рисунке 4.4 темно-

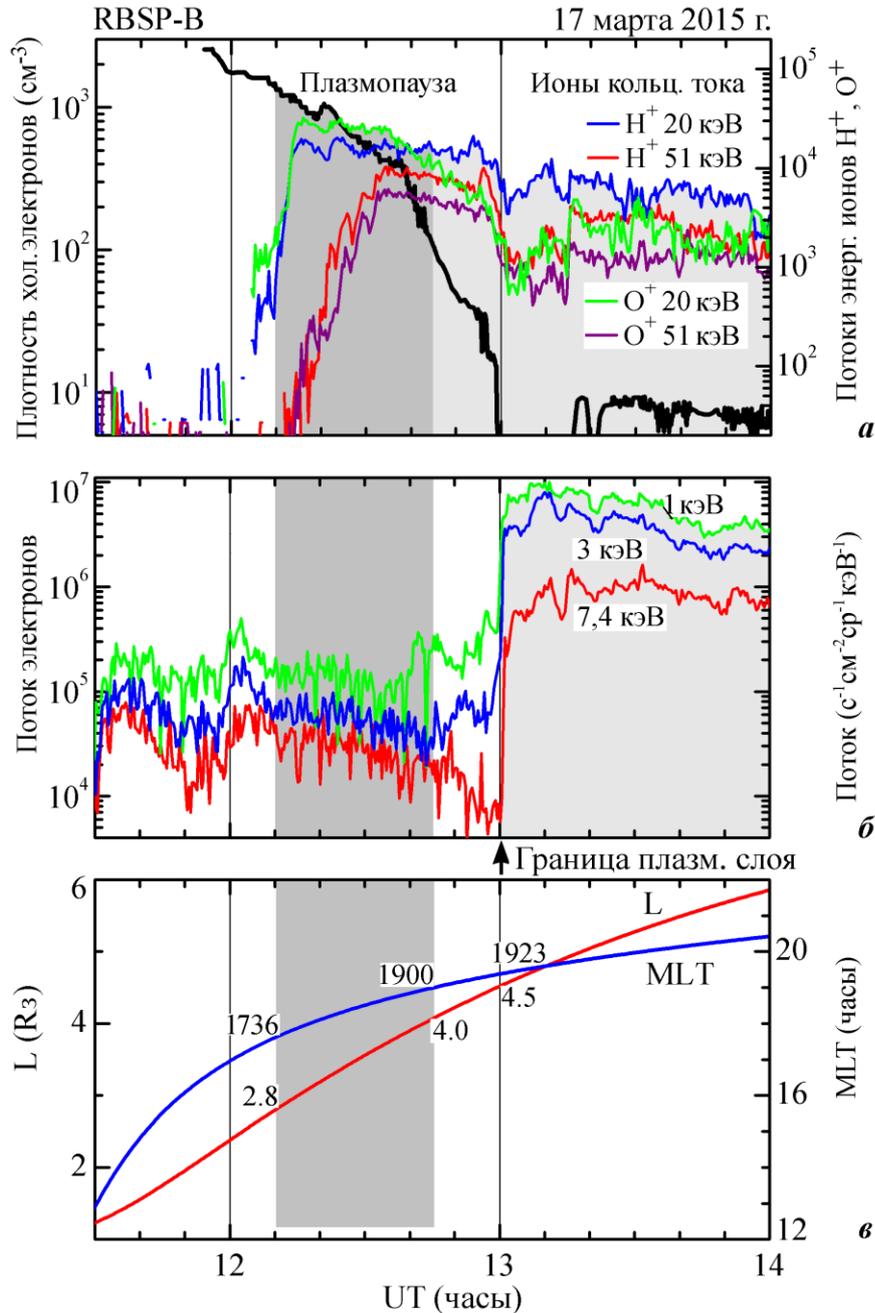


Рисунок 4.4. Регистрация плазмопаузы и потоков энергичных частиц на борту зонда VAP-B во время наблюдения SAR-дуги 17 марта 2015 г.

a – плотность тепловых электронов и потоки энергичных протонов и ионов кислорода; *б* – поток низкоэнергичных электронов; *в* – Расчетные L-параметр и MLT спутника [Иевенко и Парников, 2020]

серый столбик показывает область перекрытия тепловой и энергичной плазмы, которая сопряжена с наблюдаемой SAR-дугой в это время. Спутник проходил внутреннюю и внешнюю границы этой области в 12:10 UT на меридиане 17:36 MLT с параметром $L \sim 2,8$ и в 12:45 UT на меридиане 19:00 MLT с $L \sim 4,0$, соответственно.

Обработанные изображения всего неба с регистрацией SAR-дуги в начале и конце прохода Van Allen Probe-B области перекрытия энергичных ионов с плазмопаузой представлены на рисунке 4.5. На изображении в 12:10 UT черными кружками показана экваториальная граница красной дуги с уровнем интенсивности $\sim 0,9$ кРл. Граница с постоянной широтой $\sim 53^\circ$ N пересекает на западном горизонте геомагнитный меридиан $\sim 180^\circ$ E в 18:52 MLT со значением $L \sim 2,8$ (см. рисунок 4.5). Постоянная широта экваториальной границы дуги может быть обусловлена резким уменьшением потока ионов O^+ и H^+ с энергией 20 кэВ на оболочке $L \sim 2,8$ по измерениям VAP-B на меридиане 17:36 MLT (см. рисунок 4.4a). Следует отметить, что поток энергичных ионов O^+ в этой области в $\sim 1,8$ раза превышал поток энергичных протонов.

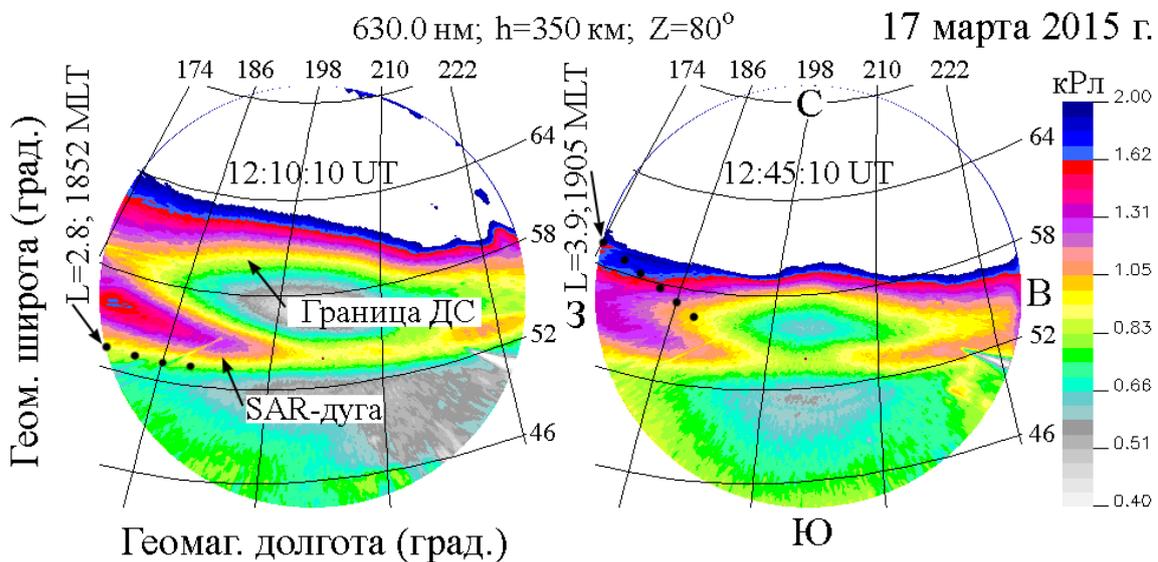


Рисунок 4.5. Изображения всего неба в эмиссии 630,0 нм [OI] во время прохождения VAP-B плазмопаузы 17 марта 2015 г.

Представлены проекции на поверхность Земли для высоты свечения 350 км ($Z \leq 80^\circ$) в исправленных геомагнитных координатах. Изображения показывают свечение с интенсивностью менее 2000 Рл для лучшего отображения SAR-дуги. Шкала интенсивности излучения приведена в килорэлях [Иевенко и Парников, 2020]

Полярная граница SAR-дуги с уровнем интенсивности ~ 1 кРл показана черными кружками на изображении в 12:45 UT на рисунке 4.5. На западном горизонте широта $\sim 59,5^\circ$ N определена по изображению в 12:10 UT. На геомагнитном меридиане $\sim 174^\circ$ E полярная граница дуги имела координаты $L \sim 3,9$ и 19:05 MLT, которые близки к положению внешней границы области перекрытия энергичных ионов с плазмопаузой по измерениям спутника на рисунке 4.4 ($L \sim 4,0$; 19:00 MLT). Следовательно, полярная граница SAR-дуги на меридиане $\sim 174^\circ$ E отображала границу плазмосферы с резким уменьшением электронной плотности до 100 см^{-3} и меньше. Значительное увеличение широты полярного края SAR-дуги в западном направлении может быть обусловлено ростом расстояния от Земли до границы плазмосферы в секторе вечерней выпуклости.

4.3 Измерения DMSP- F19 в ионосфере во время наблюдений SAR-дуги

На рисунке 4.6 показаны два прохода спутника с регистрацией субавроральных T_e пиков в геомагнитных координатах. В первом проходе DMSP-F19 регистрировал широкий T_e пик в $\sim 10:12$ UT в вечернем секторе MLT до начала

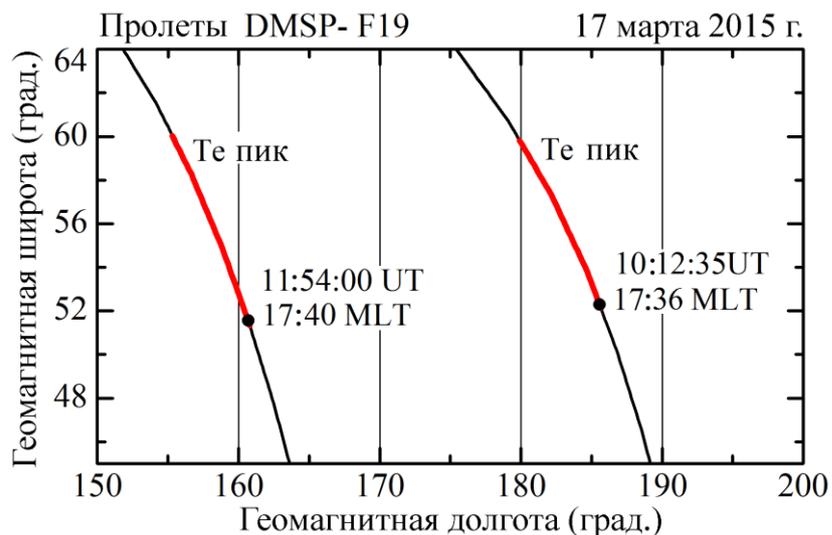


Рисунок 4.6. Пролеты DMSP- F19 в вечернем секторе MLT до и во время регистрации SAR-дуги на станции «Маймага»

Приведены участки орбиты спутника с регистрацией субавроральных пиков электронной температуры в геомагнитных координатах. Те пики показаны толстой красной линией [Иевенко и Парников, 2020]

оптических наблюдений. В ~11:54 UT F19 регистрировал широкий Те пик во время наземных наблюдений SAR-дуги.

Рисунок 4.7 показывает, что экваториальная граница Те пиков располагалась на широте $\sim 52,3^\circ$ N и $\sim 51,3^\circ$ N в $\sim 17:36$ и $17:40$ MLT в первом и втором проходах DMSP-F19, соответственно. Полярная граница Те пиков находилась на широте $\sim 60^\circ$ N и перекрывалась с экваториальным краем широкой полосы ионосферного дрейфа к западу или - SAPS [Foster, Vo, 2002].

Далее, сопоставим измерения субаврорального Те пика на DMSP-F19 в $\sim 11:54$ UT с регистрацией SAR-дуги в $11:46$ и $12:10$ UT на рисунках 4.2 и 4.5, соответственно. Спутник F-19 регистрировал субавроральный Те пик на высоте ~ 850 км, а максимум интенсивности эмиссии $630,0$ нм в SAR-дуге при обработке

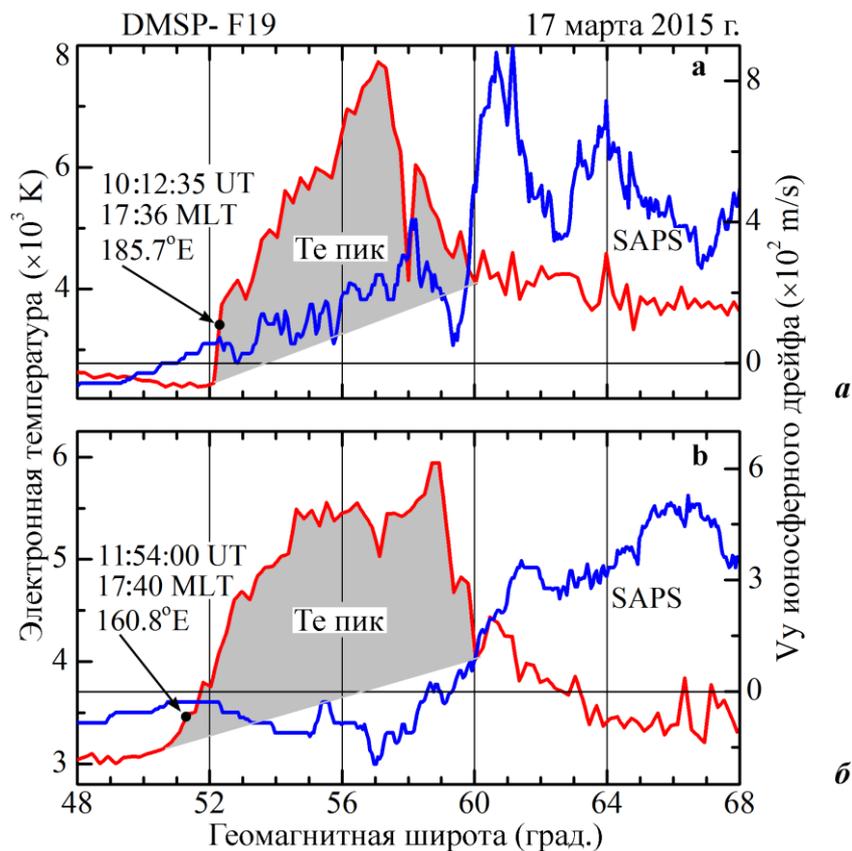


Рисунок 4.7. Регистрация Те пиков на спутнике DMSP- F19 до и во время регистрации SAR-дуги на станции «Маймага»

Приведены широтные распределения электронной температуры Те и скорости горизонтального дрейфа плазмы Vu по измерениям SSIES инструментов для двух проходов F19. Жирной точкой на кривых электронной температуры показано положение экваториальной границы Те пика с указанием магнитной долготы и MLT [Иевенко и Парников, 2020]

был принят равным 350 км. Для сопоставления спутниковых измерений температуры электронов с SAR-дугой в этой работе, исправленная геомагнитная широта экваториальной и полярной границы T_e пика определялась на принятой высоте максимума свечения дуги с учетом наклона вектора геомагнитного поля.

На двух изображениях в эмиссии 630,0 нм в 11:46 и 12:10UT (см. рисунок 4.2 и 4.5) можно видеть, что экваториальная граница SAR-дуги на западном горизонте (крае) по уровню интенсивности $\sim 0,7$ кРл располагалась на широте $\sim 52^\circ$ N в $\sim 18:28$ и $18:52$ MLT, соответственно. Полярную границу красной дуги на этих изображениях можно идентифицировать на широте $59-60^\circ$ N на геомагнитном меридиане $\sim 174^\circ$ E. Таким образом, ширина SAR-дуги $\sim 8^\circ$ широты и положение ее границ на западном горизонте двух изображений всего неба хорошо соответствуют одновременным измерениям интенсивного T_e пика на DMSP-F19 на ~ 1 час MLT к западу. Измерения на спутнике DMSP-F19 надежно верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги.

4.4 Обсуждение результатов наблюдения SAR-дуги во время бури 17 марта 2015 г.

В разделах 4.1-4.3 выполнен анализ наблюдений SAR-дуги в вечернем секторе MLT через ~ 5 часов после первого начала главной фазы большой магнитной бури 17 марта 2015 г. Красная дуга наблюдалась во время низкой авроральной активности, затухания кольцевого тока и отрицательного значения электрического поля E_y СВ. Медленное изменение интенсивности и положения SAR-дуги в течение $\sim 1,5$ часов дали возможность выполнить корректное сопоставление наземных наблюдений со спутниковыми измерениями параметров плазмы и потоков энергичных частиц в магнитосфере и ионосфере.

Измерения Van Allen Probe-B на рисунке 4.4 показали, что широта экваториальной границы дуги была связана с резким уменьшением потока ионов O^+ и H^+ с энергией 20 кэВ на $L \sim 2,8$ внутри плазмопаузы с плотностью электронов

$\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$. Поток энергичных ионов O^+ в этой области был в $\sim 1,8$ раза больше потока энергичных протонов. В этом событии, вероятно, нагрев электронов области SAR-дуги обеспечивается в основном потоком энергичных ионов O^+ кольцевого тока. Аналогичные события были рассмотрены в раннем исследовании [Kozyra et al., 1987] по данным измерений на спутниках Dynamics Explorer 1 и 2. Полярная граница SAR-дуги отображала границу плазмосферы с резким уменьшением электронной плотности до 100 см^{-3} и меньше согласно измерениям Van Allen Probe-V.

Измерения электронной температуры на спутнике DMSP-F19 в двух проходах в раннем вечернем секторе MLT на рисунке 4.7 верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги. Ширина SAR-дуги $\sim 8^\circ$ широты и положение ее границ на западном горизонте изображений всего неба хорошо соответствуют одновременным измерениям интенсивного субаврорального Te пика на борту DMSP-F19 западнее на ~ 1 час MLT. Полярная граница Te пика перекрывалась с экваториальным краем субаврорального поляризационного потока (SAPS) [Foster, Vo, 2002]. Наблюдение перекрытия SAR-дуги с экваториальной областью SAPS показано в исследовании [Ievenko et al., 2009].

Увеличение широты полярного края SAR-дуги в западном направлении вероятнее всего обусловлено ростом расстояния от Земли до границы плазмосферы в секторе вечерней выпуклости. Рисунок 4.8 показывает сечение плазмосферы по границе He^+ в магнитной экваториальной плоскости по данным измерений IMAGE EUV 2 июня 2001 г. в 16:03 UT из работы [Goldstein et al., 2003]. Граница плазмосферы в вечернем секторе MLT находилась на $L > 5$, потому что измерения были сделаны при низкой геомагнитной активности ($K_p=2$). На рисунке темным серым цветом показана возможная область перекрытия внешней плазмосферы с кольцевым током в секторе $\sim 19\text{--}22$ MLT, который соответствует сектору MLT наблюдения SAR-дуги в событии 17 марта 2015 г. (см. рисунок 4.5). Можно видеть, что проекция области перекрытия вдоль магнитного поля в F-слой ионосферы будет подобна наблюдаемой SAR-дуге на рисунке 4.5. Широта проекции внешней границы области перекрытия будет увеличиваться в направлении вечера. Проекция

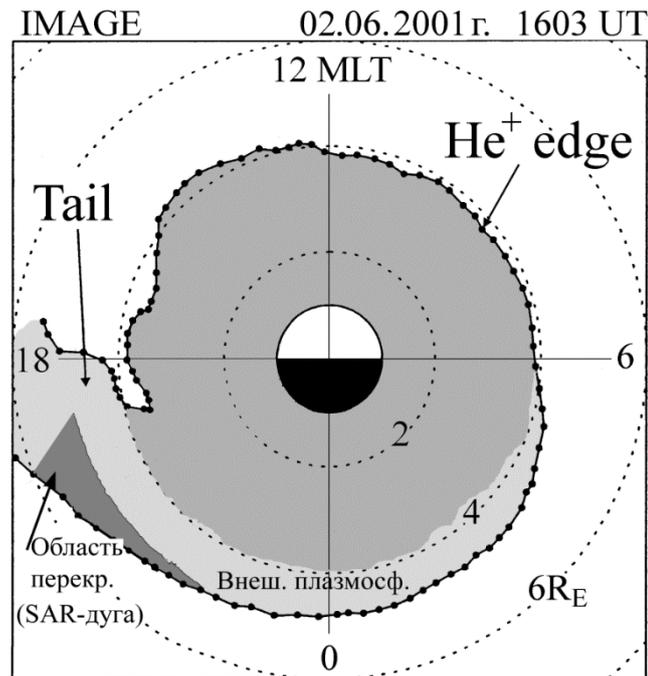


Рисунок 4.8. Экваториальное сечение плазмосферы по границе He^+ 2 июня 2001 г. в 16:03 UT.

Данные измерений IMAGE EUV из работы [Goldstein et al., 2003]

внутренней границы этой области будет иметь постоянную широту в результате магнитного дрейфа к западу энергичных ионов кольцевого тока вдоль постоянной L-оболочки. Таким образом, наблюдавшаяся на станции «Маймага» SAR-дуга в начале бури 17 марта 2015 г. отображала, вероятнее всего, область перекрытия потоков энергичных ионов кольцевого тока с вечерней выпуклостью плазмосферы.

Выводы к 4 главе

Основные результаты анализа наблюдений SAR-дуги на станции «Маймага» в начале большой магнитной бури 17 марта 2015 г. заключаются в следующем:

1. Красная дуга наблюдалась в вечернем секторе MLT во время затухания кольцевого тока при отрицательном значении электрического поля E_y солнечного ветра и низкой авроральной активности.

2. Согласно одновременным измерениям Van Allen Probe-B SAR-дуга отображала область перекрытия энергичных ионов кольцевого тока с плазмопаузой. Поток ионов O^+ с энергией 20 кэВ в этой области был в ~1,8 раза

больше потока энергичных протонов с такой же энергией. Вероятно, нагрев электронов области SAR-дуги в этом событии обеспечивался, в основном, потоком энергичных ионов O^+ кольцевого тока.

3. Ширина и положение границ SAR-дуги соответствовали интенсивному T_e пику по данным одновременных измерений на борту DMSP-F19. Измерения электронной температуры в раннем вечернем секторе MLT верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги.

4. Значительное увеличение ширины SAR-дуги в направлении вечера, вероятно, было обусловлено конфигурацией области перекрытия кольцевого тока с вечерней выпуклостью плазмосферы в магнитной экваториальной плоскости. Полярный край красной дуги отображал границу внешней плазмосферы в вечернем секторе MLT. Экваториальный край дуги с постоянной широтой отображал внутреннюю границу потока энергичных ионов кольцевого тока на постоянной L-оболочке.

ГЛАВА 5. Анализ данных наблюдений субаврорального свечения STEVE во время суббури 1 марта 2017 г.

5.1 Магнитосферная активность во время наблюдений STEVE

Явление STEVE в этом событии наблюдалось в предполуночном секторе MLT при высоком уровне магнитной активности с $K_p=5$ - в интервале 12-15 UT. Суббури происходили до и после рассмотренного периода. Возникновению Picket fence (PF) и STEVE предшествовала кратковременная протонная дуга, которая наблюдалась в зените станции и сопровождалась геомагнитными пульсациями Pc1 [Parnikov et al., 2020; Varlamov et al., 2021].

На рисунке 5.1 представлены данные среднеширотных магнитных станций 1 марта 2017 г. Станции подбирались таким образом, чтобы можно было определить положение центра начала взрывной фазы суббури в $\sim 12:45$ UT, которая предшествовала наблюдениям STEVE. Знак и амплитуда вариаций компонент X и Y указывают на то, что центр этой суббуревой активизации находился восточнее станции оптических наблюдений, в предполуночном секторе MLT, в окрестности магнитного меридиана Магадана с последующим расширением на запад.

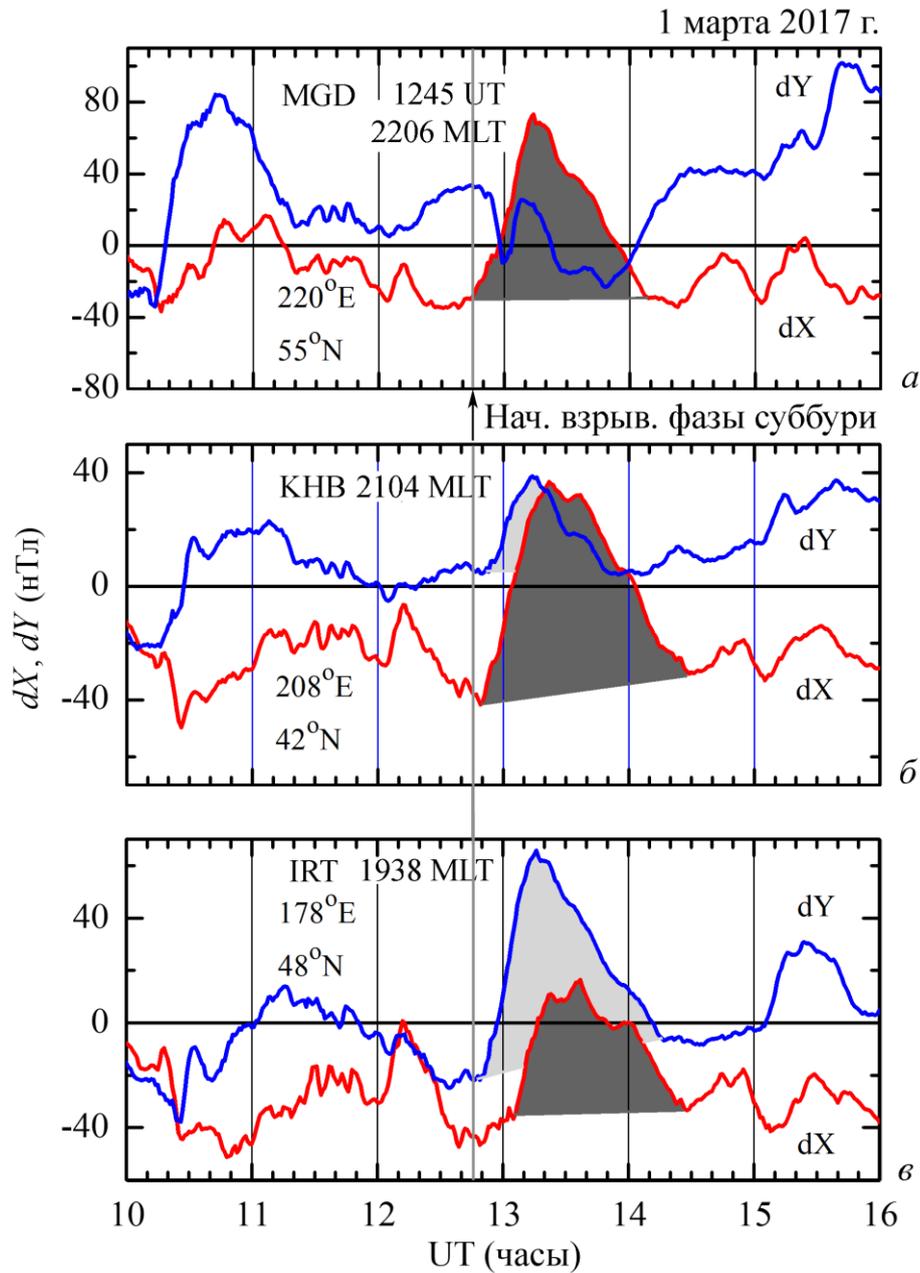


Рисунок 5.1. Среднеширотные магнитные возмущения во время наблюдений 1 марта 2017 г.

Магнитограммы среднеширотных станций на магнитных меридианах 220° (а), 208° (б) и 178° (в). Приведены вариации X и Y компонент относительно их значений в ближайший магнитоспокойный день. На магнитограммах указано MLT начала взрывной фазы суббури, исправленные геомагнитные координаты и коды станций Магадан (а), Хабаровск (б) и Иркутск (в), соответственно [Парников и др., 2022]

5.2 Динамика и интенсивность STEVE, Picket fence и SAR-дуги

На рисунке 5.2 представлены результаты наблюдений динамики субаврорального свечения в виде кеограмм в эмиссиях 630,0 и 557,7 нм [OI] во время регистрации STEVE 1 марта 2017 г. Возникшая в результате более ранней магнитосферной активности SAR-дуга, наблюдалась в красной линии [OI] с начала рассмотренного периода времени. По мере расширения диффузного сияния к экватору, красная дуга смещалась на более низкие широты и в ~12:40 UT пересекла зенит станции наблюдений. Далее, произошла стабилизация широтной динамики дуги экваториальнее зенита станции. На начало суббури в ~12:45 UT, красная дуга отреагировала резким уярчением и зигзагообразным изменением положения. По мере спада активности, дуга сместилась на север, перешла зенит станции и постепенно затухла в ~14:13 UT.

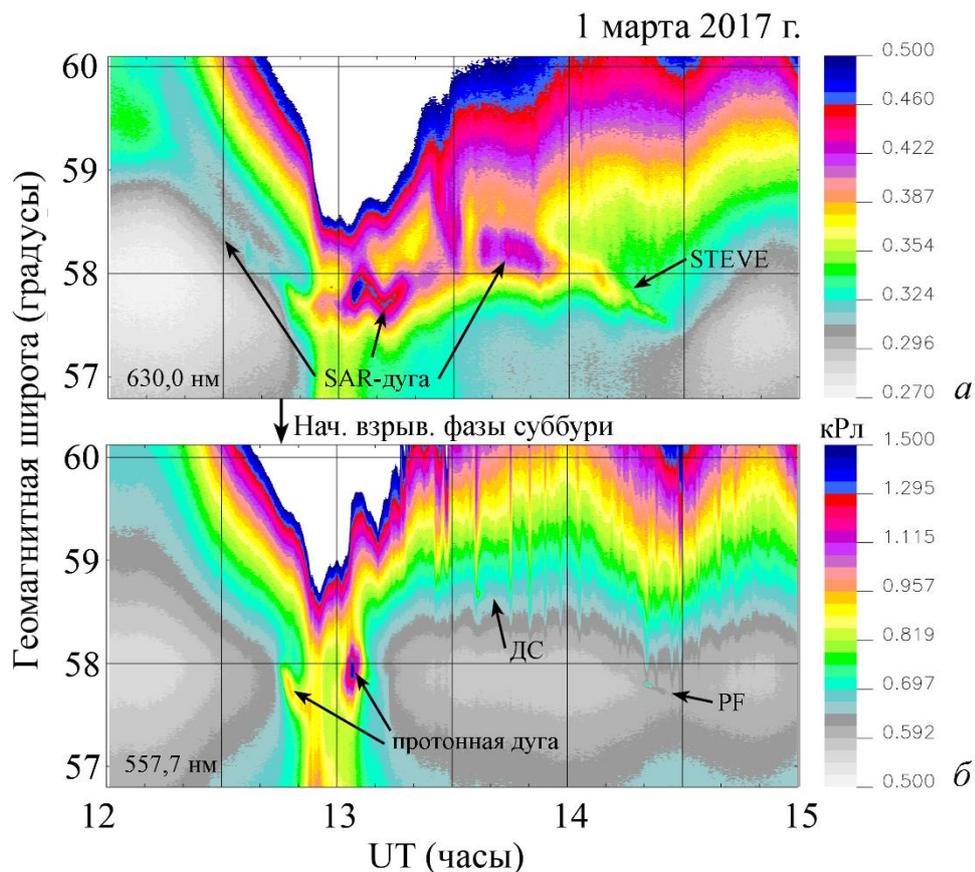


Рисунок 5.2. Широтная динамика STEVE, SAR-дуги и протонного сияния во время наблюдений 1 марта 2017г.

а и *б* – кеограммы свечения в эмиссиях 630,0 и 557,7 нм [OI] соответственно в проекции на поверхность Земли для высоты свечения 190 км. На кеограммах, *Z* – зенит станции наблюдений

Во время взрывной фазы суббури наблюдались усиления интенсивности эмиссии 557,7 нм в виде узкой дуги в окрестности зенита станции в 12:45 и 13:05 UT (см. кеограмму в этой эмиссии на рисунке 5.2). Эти активизации свечения были зарегистрированы в эмиссии 486,1 нм, что указывает на возникновение высыпаний энергичных протонов в области полярного края SAR-дуги в этом событии. На фазе восстановления суббури регистрировались кратковременные возрастания интенсивности зеленой линии в ДС в разных долготных секторах, которые отобразились на кеограмме в виде вертикальных полосок.

Формирование STEVE началось в 13:23 UT с возникновения неоднородностей свечения, зарегистрированных камерой всего неба в шести спектральных областях в течение одной минуты (шести каналах). На рисунке 5.3 приведены шесть изображений всего неба, которые получены в 13:29 UT при последовательной

1 марта 2017 г.

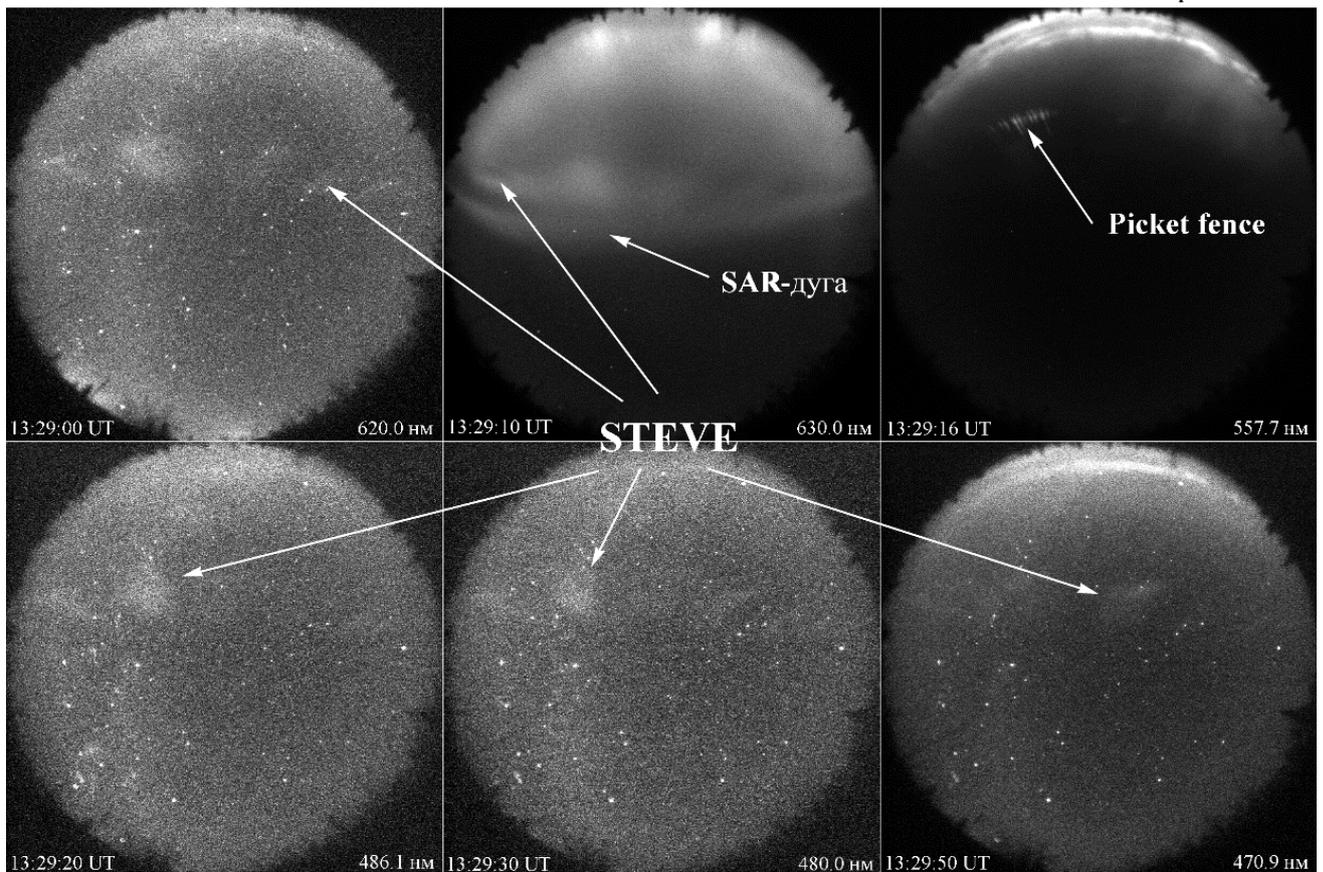


Рисунок 5.3. Оригинальные изображения всего неба в шести эмиссиях во время наблюдений начала формирования STEVE 1 марта 2017 г.

Время и длины волн эмиссий указаны на снимках. Направления сторон света на кадрах: слева – запад, сверху – север

смене шести интерференционных светофильтров. Неоднородности (пятна) двигались с востока на запад со скоростью ~ 840 м/с. Вытянутая вдоль широты полоса, заполненная неоднородностями, плавно смещалась в экваториальном направлении со скоростью ~ 45 м/с. Неоднородности возникли южнее SAR-дуги, которая в это время наблюдалась в окрестности зенита станции. (см. рисунок 5.3). В ходе своего экваториального смещения неоднородности догнали затухающую SAR-дугу. Ширина отдельно взятой неоднородности составляла ~ 80 км. По мере приближения к зениту станции, неоднородности сужались и с $\sim 14:00$ UT образовали непрерывную полосу, а затем и узкую ленту свечения шириной ~ 8 км. В это время увеличилась скорость экваториального смещения STEVE до ~ 55 м/с.

Своей кульминации (максимальной яркости и минимальной ширины) STEVE достиг в $14:20$ UT в окрестности магнитного зенита станции (12° S) (см. рисунок 5.4). В виде узкой ленты свечения STEVE просуществовал совсем не долго, ~ 10

1 марта 2017 г.

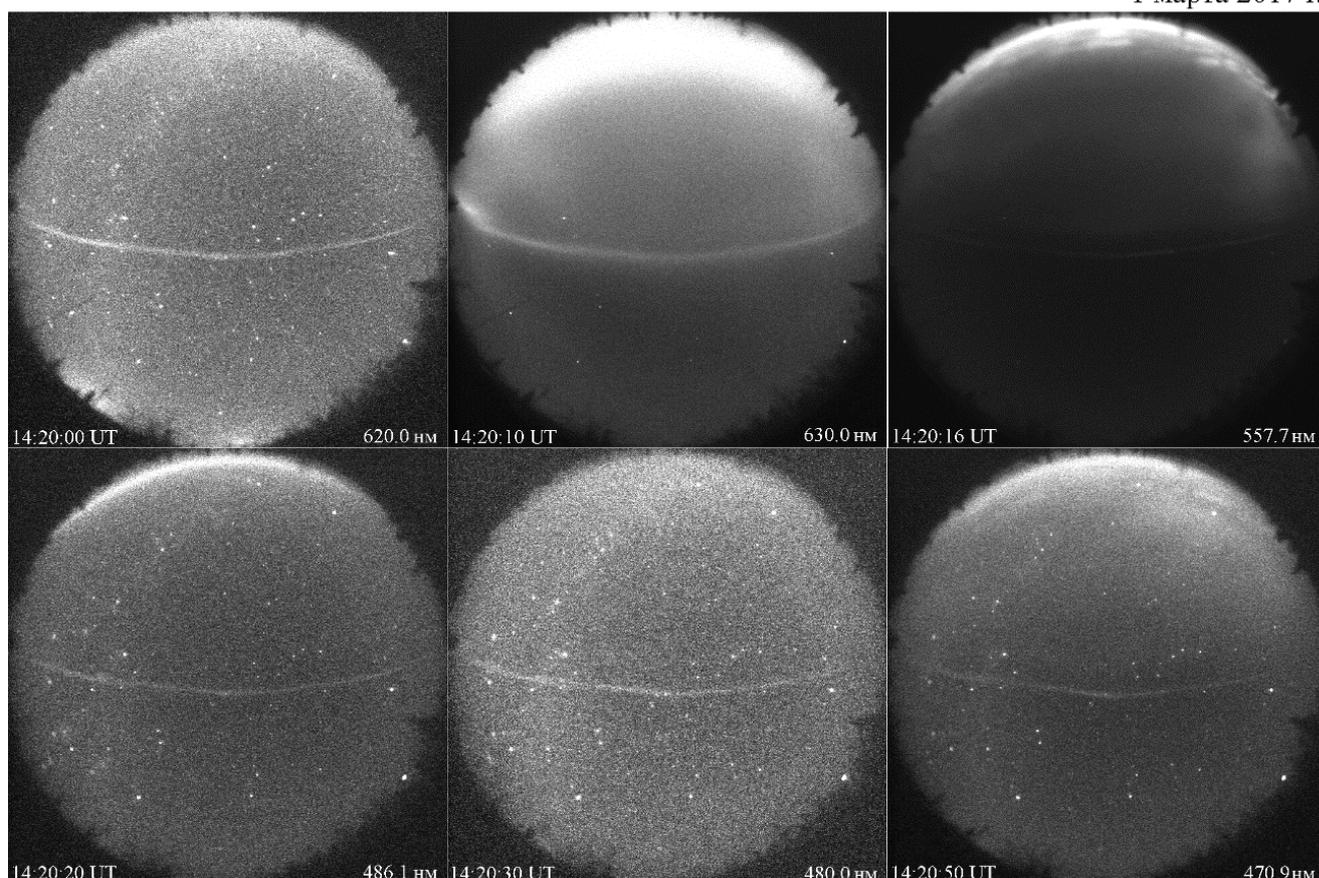


Рисунок 5.4. Оригинальные изображения всего неба в шести эмиссиях во время кульминации развития STEVE 1 марта 2017 г.

Обозначения как на рисунке 5.3

минут. За это время узкая лента сместилась в экваториальном направлении на ~30 км. К 14:30 UT, STEVE резко затухает с востока на запад. За время своего существования (~1 час), STEVE сместился на ~190 км к экватору.

За несколько минут, до начала формирования STEVE (неоднородностей, регистрируемых по всем каналам и движущихся с востока на запад) полярнее широт будущего STEVE в эмиссии 557,7 нм [OI] возникли образования, вытянутые вдоль силовых линий геомагнитного поля, действительно напоминающие штакетник (PF). Серии PF, движущихся с востока на запад, начались в 13:21 UT, после затухания протонной дуги (см. рисунок 5.3). Иногда, серии отдельных PF вытягивались в сплошной ряд, ориентированный вдоль широты. PF сопровождал STEVE в ходе экваториального смещения при этом, находясь полярнее его до пересечения магнитного зенита станции (12° зенитного угла к югу). После затухания STEVE, более яркий PF, регистрировался еще ~10 минут до 14:40 UT.

На рисунке 5.5 представлена широтная динамика STEVE в виде кеограмм с указанием абсолютной интенсивности свечения. Методика построения кеограмм такова, что с интенсивностей, полученных через эмиссионные каналы, отнимаются значения, полученные через фоновые (для эмиссий 557,7 и 630,0 нм, фоновым является канал 620,0 нм; для эмиссий 486,1 и 470,9 нм, фоновым является канал 480,0 нм), поэтому широтно-яркостная динамика особенно хорошо отслеживается фоновых эмиссиях, от которых ничего не отнимается. На кеограммах, в эмиссиях 470,9 и 486,1 нм, после вычитания фона (480,0 нм), STEVE пропадает, что свидетельствует о равномерной интенсивности свечения на длинах волн 470,9; 480,0 и 486,1 нм. В эмиссии 557,7 нм слабое свечение STEVE (единицы Рл) [Gillies et al., 2019] сложно определить из-за высокой интенсивности свечения ночного неба и близости экваториальной границы ДС.

По фоновым каналам видно, что интенсивность отдельных неоднородностей, с которых началось формирование STEVE, а затем и широкой, непрерывной полосы в которую они слились составляла ~1-1,5 Рл/нм относительно фонового уровня. В конце своего существования с 14:20 по 14:30 UT STEVE резко сузился и его интенсивность достигла максимума ~6 Рл/нм. В это же время (14:20 UT), в

зеленой эмиссии наблюдалась непрерывная (сплошная) часть PF с отдельными максимумами вдоль неё. Интегральная интенсивность этой полосы с отдельными максимумами достигала 160 Рл (пример такой структуры хорошо виден на рисунке 5.4.).

На кеограмме в эмиссии 630,0 нм слабое свечение STEVE начало идентифицироваться, на фоне высокого уровня свечения ночного неба [Иевенко и др., 2011], после затухания более яркой SAR-дуги.

При сравнении кеограмм в эмиссиях 620,0 и 630,0 нм, видно, что на всем временном интервале существования STEVE, SAR-дуга находилась экваториальнее. Так, к моменту времени 13:50 UT экваториальная граница STEVE

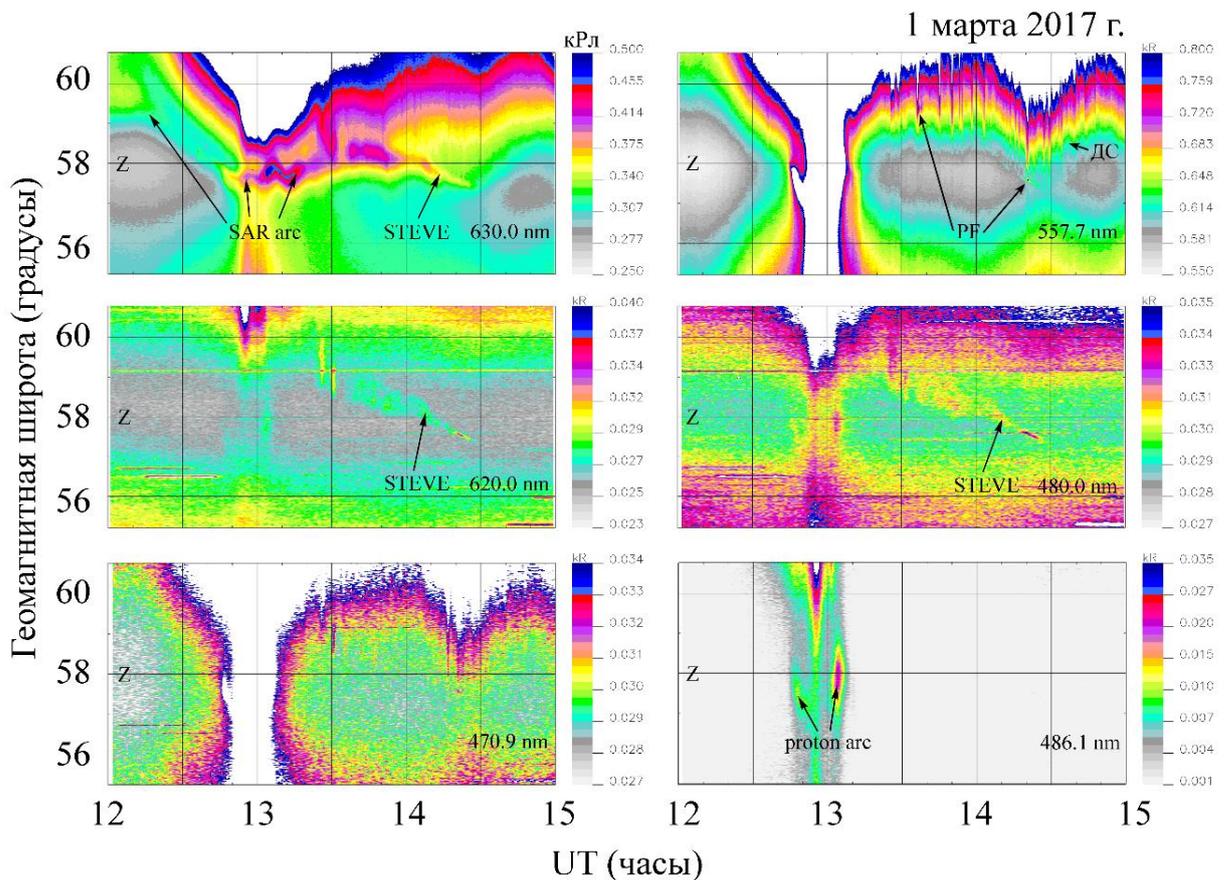


Рисунок 5.5. Широтная и яркостная динамика субаврорального свечения в окрестности зенита станции наблюдений (Z) в разных эмиссиях во время наблюдений 1 марта 2017 г.

Обозначения осей как на Рис. 5.2. В отличие от Рис. 5.2, на этом рисунке в зеленой эмиссии максимум интенсивности был принят за 800 Рл для наилучшей идентификации PF. Кеограммы в эмиссиях 470,9; 486,1; 557,7 и 630,0 нм построены с вычитанием интенсивности континуума в окрестности 480,0 и 620,0 нм

достигла геоцентрического зенита станции. Тогда как та же граница SAR-дуги с начала рассмотренного периода вплоть до самого затухания находилась экваториальнее зенита станции. Скорость экваториального смещения STEVE была выше чем у красной дуги и к моменту её затухания STEVE догоняет дугу. При этом, происходит частичное перекрытие двух форм свечения, но даже к моменту затухания (14:13 UT), южная и северная границы SAR-дуги находились экваториальнее тех же границ STEVE. После затухания красной дуги, динамика и положение максимумов интенсивности STEVE в двух эмиссиях идентична, но нужно отметить, что в эмиссии 630,0 нм, границы STEVE были шире. Интенсивность STEVE в этой же эмиссии была гораздо выше интенсивности континуума и составляла ~20-30 Рл.

5.3 Взаимное расположение STEVE и Picket fence. Высота STEVE

Как отмечалось выше, PF и STEVE протекают на разных высотах (см. раздел 1.6 во введении). На рисунке 5.6 показана схема, объясняющая расхождение и схождение широтных разрезов свечения двух структур вне и в области магнитного зенита (MZ) станции наблюдений. Фиолетовые и зеленые кружки, обозначающие

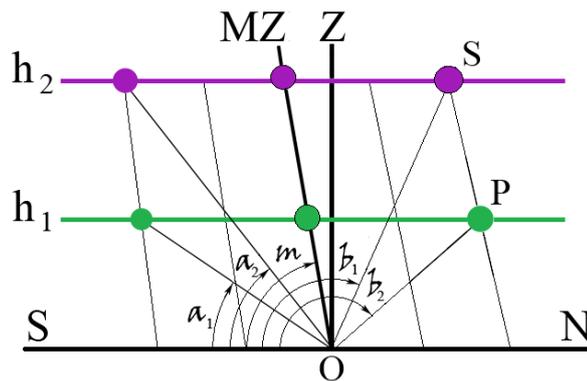


Рисунок 5.6. Схема, демонстрирующая расхождение и схождение светящихся структур, протекающих на одной силовой линии магнитного поля на разных высотах

h_1 и h_2 – высоты свечения структур ($h_1 < h_2$). a_1, a_2, b_1 и b_2 – углы наблюдения структур от южного горизонта. m – угол магнитного зенита. Z и MZ – геоцентрический и магнитный зенит точки наблюдений. O, P и S – вершины треугольника, используемого для вычисления высоты STEVE

STEVE и PF соответственно, будут наблюдаться на разных углах полярнее и южнее MZ. В области MZ обе структуры будут наблюдаться вдоль одной линии.

Рассматривая треугольник с вершинами O , S и P с заданными зенитными углами m , b_1 и b_2 и высотой вершины P , легко рассчитать высоту вершины S . Задав высоту свечения PF равной 110 км, была рассчитана высота свечения STEVE, которая составила ~ 190 км.

На рисунке 5.7 представлены широтные профили интенсивности свечения (сканы) STEVE (620,0 и 630,0 нм) и PF (557,7 нм) в ограниченном интервале высот (в углах) вдоль меридиана наблюдений. На широте станции MZ наклонен к югу от вертикала на $\sim 12^\circ$. Таким образом, угол наклона MZ, отсчитываемый от южного горизонта, составляет $\sim 78^\circ$. На кеограммах построенных в зенитных углах видно, что STEVE достиг MZ в $\sim 14:21$ UT (здесь не представлено). Из этих соображений, сканы (рисунок 5.7) были построены для моментов времени: до, во время и после пересечения STEVE и PF магнитного зенита станции. В 14:18 UT PF находился на 1° севернее STEVE. Его интенсивность составляла ~ 12 Рл. Интенсивность STEVE в это время в континууме 620,0 и эмиссии 630,0 нм была равна ~ 2 Рл/нм и ~ 20 Рл, соответственно. В момент пересечения MZ (14:21 UT), профили свечения STEVE и PF совпали. Интенсивности обеих структур увеличились и достигали значений: STEVE ~ 5 Рл/нм и ~ 25 Рл, соответственно; PF ~ 85 Рл в эмиссии 557,7 нм. После пересечения MZ в 14:25 UT, PF находился на 1° южнее STEVE. Интенсивности структур снова снизились и составляли значения: ~ 3 Рл/нм и ~ 22 Рл (620,0 и 630,0 нм, соответственно), PF ~ 14 Рл. На всех трех сканах видно, что угловые размеры STEVE на длине волны 620,0 нм и PF в эмиссии 557,7 нм были примерно одинаковы. Размеры STEVE в эмиссии 630,0 нм превышали размеры той же структуры на длине волны 620,0 нм.

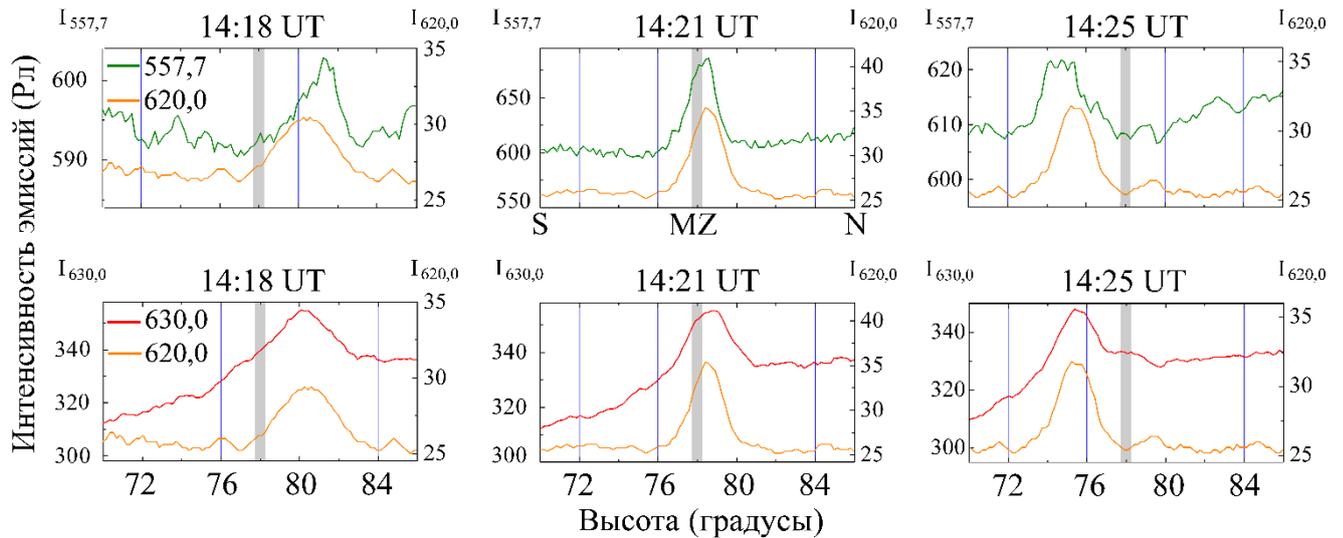


Рисунок 5.7. Меридиональное распределение интенсивности свечения (сканы) STEVE и PF в окрестности магнитного зенита станции наблюдений в эмиссиях 557,7, 630,0 нм и в континууме 620,0 нм.

Время сканов и длины волн эмиссий указаны на рисунках. По горизонтальной оси отложены углы, отсчитываемые с южного горизонта станции наблюдений. По вертикальным шкалам (слева и справа), отложены интенсивности свечения соответствующих эмиссий. Серым столбцом выделена область магнитного зенита (MZ)

5.4 Обсуждение результатов наблюдения STEVE во время суббури 1 марта 2017 г.

Так же, как было отмечено в некоторых работах, [например, Gallardo-Lacourt et al., 2018; Liang. et al., 2019; Martinis et al., 2021] в рассмотренном событии STEVE возник через ~ 40 минут после начала взрывной фазы суббури, полярнее существующей SAR-дуги. Формирование STEVE началось с возникновения неоднородностей, двигавшихся вдоль широты в западном направлении. Неоднородности наблюдались на всех длинах волн, регистрируемых камерой. Ширина отдельно взятой неоднородности составляла ~ 80 км. Скорость западного смещения неоднородностей составляла ~ 840 м/с, что является сигнатурой SAID. По мере приближения к зениту станции наблюдений, неоднородности образовали непрерывную полосу, а затем и узкую ленту свечения шириной ~ 8 км с максимальной яркостью за все время существования структуры. В общей

сложности с момента начала регистрации отдельных неоднородностей до затухания узкой ленты свечения, STEVE просуществовал ~1 час, сместившись за это время на ~190 км к экватору. Скорость экваториального смещения неоднородностей, сплошной полосы и наконец, узкой ленты свечения росла по мере сужения с ~45 до 55 м/с.

Возникший полярнее SAR-дуги STEVE обладал большей скоростью экваториального смещения и в ходе совместного экваториального движения, нагнал красную дугу у зенита станции наблюдений. К моменту затухания красной дуги, произошло частичное наложение широтных границ двух структур свечения. При этом северная и южная границы SAR-дуги были экваториальнее тех же границ STEVE. Тут, можно отметить статью [Martinis et al., 2022], в которой авторы, сопоставив данные камеры всего неба с фотографиями фотографов-авроралов, полученные во время бури святого Патрика, делают вывод, что красная дуга эволюционировала в STEVE.

В спектральных характеристиках STEVE, полученных в меру возможностей камеры всего неба, можно отметить, следующее: Свечение в структуре присутствовало на всех длинах волн, регистрируемых камерой. В области континуума на длинах волн 480,0 и 620,0 нм и вероятно, к ним можно отнести, в отсутствии ярких сияний, и эмиссии 470,9 (N_2^+) и 486,1 (H_β), свечение происходило равномерно с интенсивностью в несколько Рл/нм. Максимальной яркости, по этим каналам, STEVE достиг в конце своего существования, когда его ширина была минимальна.

Интенсивность красной эмиссии [OI] в свечении STEVE составила ~20-30 Рл. Границы структуры в этой эмиссии были шире, чем границы в континууме. Вероятно, это связано с инерционностью красного свечения ввиду долгого пребывания атома кислорода в возбужденном состоянии при переходе с уровня $O(^1D)$ на $O(^3P)$.

В эмиссии 557,7 нм слабое свечение STEVE (единицы Рл) [Gillies et al., 2019], сложно определить из-за высокой интенсивности свечения ночного неба и близости экваториальной границы ДС. Хотя нужно отметить, что попадаются

редкие кадры с одновременной регистрацией STEVE и PF в эмиссии 557,7 нм (здесь не представлено).

В ходе экваториального смещения, STEVE сопровождал PF. Серии кратковременных PF, двигавшихся также в западном направлении, возникли за несколько минут до появления неоднородностей, регистрировавшихся по всем каналам. Широтные границы STEVE и PF совпадали.

Факт схождения границ двух структур в магнитном зените станции, свидетельствует о протекании этих явлений вдоль одних и тех же силовых линий геомагнитного поля. PF регистрировался исключительно в эмиссии 557,7 нм с максимальной интенсивностью ~160 Рл.

Рассчитанная высота свечения STEVE с заданной высотой свечения PF = 110 км составила 190 км. Также, на эту высоту указывает значительное усиление эмиссии 630,0 нм [OI] в свечении STEVE.

Выводы к 5 главе

Основные результаты анализа оптических данных регистрации STEVE в окрестности зенита станции «Маймага» заключаются в следующем:

1. Первые проявления STEVE были зарегистрированы через ~40 минут после начала взрывной фазы суббури.

2. Формирование STEVE началось с возникновения неоднородностей свечения в спектральной области 470-630 нм, которые двигались вдоль широты с востока на запад. Скорость западного движения неоднородностей составляла ~840 м/с.

3. Неоднородности возникли полярнее существовавшей SAR-дуги и догнали её в ходе совместного экваториального смещения. Скорость экваториального смещения неоднородностей составляла ~50 м/с.

4. По мере приближения к зениту станции, неоднородности слились в полосу, а затем и в узкую ленту свечения шириной ~8 км. Интенсивность континуума в

STEVE составляла единицы Рл/нм. В эмиссии 630,0 нм [OI] интенсивность была усилена и составляла ~20-30 Рл.

5. Во время формирования STEVE эпизодически наблюдались структуры свечения picket fence (PF) в эмиссии 557,7 нм [OI]. PF имел максимальную интенсивность ~160 Рл. По данным наблюдений в магнитном зените станции показано, что PF и STEVE возникали на одних и тех же силовых линиях геомагнитного поля. Рассчитанная высота свечения STEVE с заданной высотой свечения PF 110 км в это время была равна 190 км.

6. В общей сложности, начиная с возникновения неоднородностей и заканчивая затуханием узкой полосы STEVE просуществовал ~1 час, сместившись при этом к экватору на ~190 км.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы были проведены оптические наблюдения на станции «Маймага» с целью изучения проявлений магнитосферной активности в субавроральном свечении. В результате комплексного анализа данных наблюдений диффузного сияния (ДС), SAR-дуг, пульсаций свечения в эмиссиях N_2^+ на широтах ДС и SAR-дуги, явлений STEVE и Picket fence получены следующие основные результаты:

1. На примере анализа данных наблюдения SAR-дуги 15 февраля 2018 г. впервые показано, что формирование SAR-дуг начинается в окрестности экваториальной границы ДС во время усиления магнитосферной конвекции при длительном южном направлении V_z ММП до начала взрывной фазы суббури. Впервые рассмотрены данные инструментального наблюдения возникновения лучей (короны) на экваториальной границе ДС в эмиссии 557,7 нм и появление выступов свечения на полярном крае красной дуги во время взрывной фазы суббури.

2. Впервые получены динамические спектры пульсаций свечения молекулярных полос N_2^+ в окрестности экваториальной границы ДС и на широтах SAR-дуги. Показана вероятная связь пульсаций свечения с генерацией электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в результате циклотронного резонанса с энергичными ионами O^+ кольцевого тока на L-оболочках внешней плазмосферы.

3. На основе сопоставления наземных оптических наблюдений с измерениями на спутниках Van Allen Probe-B и DMSP-F19 показано, что полярный край SAR-дуги в событии 17 марта 2015 г. был связан с плазмопаузой. Экваториальный край дуги был обусловлен околоземной границей потока энергичных ионов H^+ и O^+ кольцевого тока внутри плазмосферы.

4. Впервые зарегистрирована динамика формирования субаврорального свечения STEVE в окрестности магнитного зенита станции наблюдения. Показано, что Picket fence и STEVE протекают на одних и тех же силовых линиях

геомагнитного поля. Предложена методика и рассчитана высота нижней границы свечения STEVE которая составила 190 км.

Подводя итог проделанной работы, автор выражает слова глубокой благодарности своему научному руководителю И.Б. Иевенко. Автор искренне благодарен Д.Г. Баишеву, И.И. Колтовскому и всем сотрудникам ИКФИА СО РАН, принимавшим активное участие в обсуждении результатов диссертационного исследования. Автор также сердечно благодарит А.В. Михалева (ИСЗФ СО РАН) за оказанное внимание к работе, а также А.А. Любчича (ПГИ) за консультации в решении задач связанных с оценкой частот ЭМИЦ волн.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БПФ – Быстрое преобразование Фурье

ДС – Диффузное сияние

ММП – Межпланетное магнитное поле

ОНЧ – Очень низкочастотный

Рл - Рэлей

СВ – Солнечный ветер

ЭМИЦ – Электромагнитные ионно-циклотронные

ASI – All sky imager (Камера всего неба)

CCD - Charge-coupled device (Прибор с зарядовой связью)

MLT – Magnetic local time (Местное магнитное время)

MZ – Магнитный зенит

PF – Picket fence (Забор, штакетник)

R_E – Радиус Земли

SAID – Subauroral ion drift (Субавроральный ионный дрейф)

SAPS- -Subauroral polarization stream (Субароральный поляризационный поток)

SAR - Stable auroral red (Стабильная авроральная красная)

SSC - Storm sudden commencement (Внезапное начало бури)

STEVE – Strong thermal emission velocity enhancement (Сильное увеличение скорости теплового излучения)

T_e – Электронная температура

UT – Universal time (Мировое время)

VAP – Van Allen probe (Зонд Ван Аллена)

Z – Зенит

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Парников С.Г., Иевенко И.Б. Фотометрические исследования пульсирующих высыпаний энергичных частиц кольцевого тока на широтах диффузного сияния и SAR-дуги / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды IX Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск: ИСЗФ СО РАН. – 2006. – С. 155-158.
2. Ievenko I.B., S.G. Parnikov and V.N. Alexeyev. Photometric study of pulsating precipitations of the ring current energetic particles at latitudes of the outer plasmasphere / Proceedings of the 7th International Conference "Problems of Geocosmos" (St. Petersburg, May 26-30, 2008), ed. by V.N. Troyan, M. Hayakawa, and V.S. Semenov, SPb, 505 p., – 2008. – P. 96-101.
3. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. Pulsating auroras at the SAR arc latitudes as a result of the generation of ion-cyclotron waves. In Proceedings of the 9th International Conference "Problems of Geocosmos". – SPb., 2012 – 451 p. ISBN 978-5-9651-0685-1. Editors: V. N. Troyan, V. S. Semenov, M. V. Kubyshkina. St. Petersburg. – 2012. – P. 228-232.
4. Парников С.Г., Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Пульсирующие сияния на широтах SAR-дуги вследствие генерации ионно-циклотронных волн / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XIII Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск: ИСЗФ СО РАН. – 2013. – С. 190–192.
5. Иевенко И.Б., С.Г. Парников, В.Н. Алексеев. Наземные и спутниковые наблюдения SAR дуги как отображения вечерней выпуклости плазмосферы / Физика Солнца и околоземного космического пространства: Труды Всероссийской конференции по солнечно-земной физике, посвященной 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова. Иркутск. – 2013. – С. 152-154.

6. Ievenko I.B., Parnikov S.G. Imaging the energetic particle penetration from the substorm injection region up to a plasmopause. In Proceedings of the 10th International Conference "Problems of Geocosmos". SPb., Editors: V. N. Troyan, N. Yu. Bobrov, A. A. Kostrov, A. A. Samsonov, N. A. Smirnova and T. V. Yanovskaya. – 2014. – P. 311-315.
7. Парников С.Г., Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Проявления перекрытия кольцевого тока с внешней плазмосферой в динамике SAR-дуги и пульсирующих сияний / Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XIV Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». Иркутск: ИСЗФ СО РАН. отв. ред. Е.В. Девятова. – 2015. – С. 155–159.
8. Парников С.Г., Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Проявление ЕМІС волн в пульсирующих сияниях на широтах SAR-дуги / Материалы XII Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. Томск: ТМЛ-Пресс. – 2016. – С. 152-155.
9. Ievenko I.B., Parnikov S.G. Observations of the SAR arcs during the overlap detection of energetic ion fluxes with the plasmopause aboard the Van Allen probes / Gringauz 100: Plasmas in the solar system. June 13-15. Moscow: proceedings, – 2018. – P. 120-121.
10. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Baishev D.G. Observation of the SAR arc and proton aurora dynamics as a consequence of eastward propagation of the pc1 waves excitation region along the plasmopause / Gringauz 100: Plasmas in the solar system. June 13-15, 2018. Moscow: proceedings. – 2018. – P. 122-124.
11. Parnikov S.G., Ievenko I.B. Observation of the SAR arcs with pulsating precipitation of energetic particles using the all-sky imager and photometric data / Gringauz 100: Plasmas in the solar system. June 13-15, 2018. Moscow: proceedings. – 2018. – P. 159-161.
12. Parnikov S. G., Ievenko I. B. Optical observations of magnetospheric activity manifestation in the plasmopause vicinity / Proc. SPIE 11208, 25th International

Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. – 2019. – 1120892. doi:10.1117/12.2540594

13. Парников С.Г., Иевенко И.Б. Динамика диффузного свечения и SAR-дуги во время интенсивной суббури / Всероссийская конференция «Оптические исследования высокоширотной верхней атмосферы» Якутск, 20-23 августа 2019 г.: Сборник трудов. Отв. Редактор Николашкин С.В. Изд. Сфера. – 2019. – С. 24-32.

14. Parnikov S. G., Ievenko I. B., Baishev D. G., Koltovskoy I. I. Proton aurora observation as a result of ion cyclotron instability / Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. – 2020. – 1156086. doi:10.1117/12.2575266

15. Парников С.Г., Иевенко И.Б., Баишев Д.Г., Колтовской И.И. Наземные наблюдения протонных сияний и геомагнитных пульсаций одновременно со спутниковой регистрацией ЭМИЦ волн / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVI Международного симпозиума. Электронный ресурс. Томск: Издательство ИОА СО РАН. CD-диск. – 2020. – E43.

16. Парников С.Г. и Иевенко И.Б. Характеристики Стива, впервые зарегистрированного на меридиане Якутска / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVI Международного симпозиума. Электронный ресурс. Томск: Издательство ИОА СО РАН. CD-диск. – 2020. – E44.

17. Парников С.Г., Иевенко И.Б., Колтовской И.И. Динамические характеристики STEVE. Исследование события / Климатические риски и космическая погода: материалы Международной конференции, посвященной памяти Нины Константиновны Кононовой. Иркутск 14-17 июня 2021 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ»; [отв. ред. И.В. Латышева]. –Иркутск: Издательство ИГУ. – 2021. – 1 электронный оптический диск (CD-ROM). – С. 60.

18. Parnikov S. G., Ievenko I. B., Koltovskoy I. I. Comparison of the SAR arc, STEVE and Picket fence dynamics registered at the Maimaga subauroral station on March 1, 2017 / Proc. SPIE 11916, 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics. – 2021. – 119167L. doi:10.1117/12.2603112

19. Varlamov I., Parnikov S., Ievenko I., Baishev D., Shiokawa K. Registration of synchronous geomagnetic pulsations and proton aurora during the substorm on March 1, 2017. / EPJ Web of Conferences. XII International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”. – 2021. – Vol. 254. – id 02012. doi:10.1051/epjconf/202125402012

Публикации по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. Relationship of the diffuse aurora and SAR arc dynamics to substorms and storms // Advances in Space Research (includes Cospar Information Bulletin). – 2008. – Vol. 41. – № 8. – P. 1252-1260. doi:10.1016/j.asr.2007.07.030

2. Alexeyev V.N., I.B. Ievenko, S.G. Parnikov. Occurrence rate of SAR arcs during the 23rd solar activity cycle // Advances in Space Research. – 2009. – Vol. 44. – № 4. – P. 524-527. doi:10.1016/j.asr.2009.04.024

3. Иевенко И.Б., Парников С.Г. Наземные и спутниковые наблюдения SAR-дуги в вечернем секторе MLT в начале магнитной бури 17 марта 2015г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60. – № 6. – С. 751-761. doi:10.31857/S0016794020050090

4. Иевенко И.Б., Парников С.Г. Связь динамики SAR-дуги с суббулевой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 2. – С. 171-188. doi:10.31857/S0016794022020092

5. Парников С. Г., Иевенко И. Б., Колтовской И. И. Субавроральное свечение STEVE над Якутией во время суббури: Анализ события 1 марта 2017г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 518–527. doi:10.31857/S0016794022030130

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акасофу С. И. Полярные и магнитосферные суббури. – М.: Мир, 1971. – 320 с.
2. Алексеев В.Н., Величко В.А., Надубович Ю.А. Исследование высот свечения и положения южной границы фонового свечения 6300 А // Физика верхней атмосферы высоких широт. Якутск. Изд. ЯФ СО АН СССР. – 1975. – Вып. 3. – С. 124–133.
3. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. Автомодаляция циклотронной неустойчивости на баунс-резонансе // Магнитосферные исследования. – М.: ИЗМИРАН, 1985. – № 7. – С. 40.
4. Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний // Солнечно-земная физика. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 93– 100. <https://doi.org/10.12737/szf-82202213>
5. Зайцева С. А., Пудовкин М. И., Дряхлов В. В., Дьяченко В. Н. Динамика пояса DR-токов и среднеширотные красные дуги // Геомагнетизм и аэрономия. – 1971. – Т. 11. – № 5. – С. 853-859.
6. Зверев В.Л., Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г. Авроральное свечение к экватору от овала полярных сияний // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52. – № 1. – С. 64-72.
7. Иевенко И.Б. Динамика диффузного аврорального свечения и SAR-дуги в период суббури // Геомагнетизм и аэрономия. – 1993. – Т. 33. – № 5. – С. 42-57.
8. Иевенко И.Б. Пульсирующие высыпания частиц в области SAR-дуги вследствие суббури // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – № 3. – С.37-46.
9. Иевенко И.Б. Абсолютная энергетическая градуировка спектрофотометров методом опорного приемника. Методическое руководство. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1995. – 22 с.

10. Иевенко И.Б. Воздействие магнитосферной активности на плазмосферу по наблюдениям диффузного сияния и SAR-дуги // Геомагнетизм и аэрономия. – 1999. – Т. 39. – № 6. – С. 26-32.
11. Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Влияние суббури и бури на динамику SAR-дуги. Статистический анализ // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44. – № 5. – С. 643–654.
12. Иевенко И.Б., Алексеев В.Н., Парников С.Г. Влияние солнечного ультрафиолета на возбуждение эмиссии 630 нм в свечении ночного неба // Солнечно-земная физика. – 2011. – Вып. 17. – С. 161-165.
13. Иевенко И.Б., Парников С.Г., Алексеев В.Н. Вариации интенсивности эмиссии ночного неба 557,7 нм в течение 23-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. – 2019. – Т. 59. – №6. – С. 786-790. <https://doi.org/10.1134/S0016794019050055>
14. Иевенко И.Б., Парников С.Г. Наземные и спутниковые наблюдения SAR-дуги в вечернем секторе MLT в начале магнитной бури 17 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60. – № 6. – С. 751-761. <https://doi.org/10.31857/S0016794020050090>
15. Иевенко И. Б., Парников С.Г. Связь динамики SAR-дуги с суббуревой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмопаузы // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 2. – С. 171-188. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020092>
16. Калегаев В.В., Алексеев И.И., Кропоткин А.П. Магнитные бури и магнитосферные суббури. – <http://nuclphys.sinp.msu.ru/magn/>
17. Лазутин Л.Л. Структура авроральной магнитосферы и взрывные процессы магнитосферной суббури / Физика околоземного космического пространства. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН. – 2000. – Т. 2. – С. 145-192.
18. Лайонс Л., Уильямс Д. Физика магнитосферы. Количественный подход. М.: Мир, 1987. – 312 с.

19. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. – 192 с.
20. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Жеребцов Г.А., Подлесный С.В., Тащилин М.А., Артамонов М.Ф. Спектральные и фотометрические характеристики среднеширотного сияния во время магнитной бури 17 марта 2015 г. // Солнечно-земная физика. – 2018. – Т. 4. – № 4. – С. 54–61. <https://doi.org/10.12737/szf-44201806>
21. Мизун Ю.Г. Полярные сияния. М.: Наука, – 1983. – 136 с.
22. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. Ред. Фельдштейн Я.И. М.: Мир, 1980. – 299 с.
23. Омхольт А. Полярные сияния. М.: Мир, – 1974. – 248с.
24. Парников С.Г., Иевенко И.Б., Колтовской И.И. Субавроральное свечение STEVE над Якутией во время суббури: Анализ события 1 марта 2017г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 518–527. <https://doi.org/10.31857/S0016794022030130>
25. Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомагнитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли // Солнечно-земная физика. – 2021. – Т. 7. – № 2. С. 63–76. <https://doi.org/10.12737/szf72202106>
26. Пономарев Е.А. Механизмы магнитосферных суббурь. М.: Наука, 1985. – 150 с.
27. Пудовкин, М.И., Козелов, В.П., Лазутин, Л.Л., Трошичев, О.А., Чертков, А.Д. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, – 1977. 312 с.
28. Распопов О.М., Черноус С.А., Ролдугин В.К., Похотелов О.А. Пульсирующие потоки частиц в магнитосфере и ионосфере. Л.: Наука, 240 с. 1978.
29. Ролдугин В.К. пульсирующие сияния типа P₁ / Высокоширотные геофизические явления. Л.: Наука., 1974. – С. 224-232.
30. Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. Магнитосфера Земли. М.: Наука, 1980. – 174 с.

31. Старков Г.В., Фельдштейн Я.И. Суббурия в полярных сияниях // Геомагнетизм и аэрономия. – 1971. – Т. 11. – С. 560-562.
32. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. – 176 с.
33. Фельдштейн Я.И. Географическое распределение полярных сияний и азимуты дуг // Исследования полярных сияний. – 1960. – № 4. – С. 61–77.
34. Фельдштейн Я.И. Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. – 1963. – Т. 3. – № 2. С. 227–239.
35. Фельдштейн Я.И. Открытие и первые исследования аврорального овала (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. – 2016. – Т.56. – №2. – С. 139-153. <https://doi.org/10.7868/S0016794016020048>
36. Хорошева О. В. Пространственно-временное распределение полярных сияний. М.: Наука, 1967. – 82 с.
37. Чемберлен Дж. Физика полярных сияний и излучения атмосферы. Ред. Красовский В.И. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 777 с.
38. Akasofu S. I. The development of the auroral substorm // Planetary and Space Science. – 1964. – Vol. 12. – № 4. – P. 273-282. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(64\)90151-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(64)90151-5)
39. Archer W.E., Gallardo-Lacourt B., Perry G.W., St.-Maurice J.P., Buchert S.C., Donovan E. Steve: The optical signature of intense subauroral ion drifts // Geophysical Research Letters. – 2019. – Vol. 46. – P. 6279–6286. <https://doi.org/10.1029/2019GL082687>
40. Archer W. E., St.- Maurice J. P., Gallardo-Lacourt B., Perry G. W., Cully C. M., Donovan E., Gillies D. M., Downie R., Smith J., Eurich D. The Vertical Distribution of the Optical Emissions of a Steve and Picket Fence Event // Geophysical Research Letters. – 2019. – Vol. 46. – № 19. – P. 10719-10725. <https://doi.org/10.1029/2019GL084473>

41. Atkinson G. A theory of polar substorms // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – № 21. – P. 5157–5164. <https://doi.org/10.1029/JZ071i021p05157>
42. Barbier D. L'arc Auroral Stable. *Annales Geophysicae*. – 1960. – Vol. 16. – P. 544-549.
43. Bennett C. L., Bourassa N. Improved analysis of STEVE photographs // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126. – № 4. <https://doi.org/10.1029/2020JA027843>
44. Harding B.J., Mende S.B., Triplett C.C., Joanne Wu Y.-J.J. A Mechanism for the STEVE Continuum Emission // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – Vol. 47. e2020GL087102. <https://doi.org/10.1029/2020GL087102>
45. Blum L.W., Bonnell J.W, Agapitov O., Paulson K., Kletzing C. EMIC wave scale size in the inner magnetosphere: observations from the dual Van Allen Probes // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – Vol. 44. – №3. – P. 1227-1233. <https://doi.org/10.1002/2016GL072316>
46. Capannolo L., Li W., Spence H., Johnson A. T., Shumko M., Sample J., Klumpar D. Energetic Electron Precipitation Observed by FIREBIRD-II Potentially Driven by EMIC Waves: Location, Extent, and Energy Range from a Multievent Analysis // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol. 48. – №5. e2020GL091564. <https://doi.org/10.1029/2020GL091564>
47. Cole K.D. Stable auroral red arcs, sinks for energy of Dst Main phase // *Journal of Geophysical Research*. – 1965. – Vol. 70. – № 7. – P. 1689–1706. <https://doi.org/10.1029/JZ070i007p01689>
48. Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude auroras // *Annales de Geophysique*. – 1970. – Vol. 26. – № 1. – P. 187-193.
49. Cornwall J. M. Cyclotron instabilities and electromagnetic emissions in the ultra low frequency and very low frequency ranges // *Journal of Geophysical Research*. – 1965. – Vol. 70. – № 1. – P. 61–69. <https://doi.org/10.1029/JZ070i001p00061>
50. Cornwall J.M., Coroniti F.V., Thorne R.M. Unified theory of SAR arc formation at the plasmopause // *Journal of Geophysical Research* – 1971. – Vol. 76. – №.19. – P. 4428-4445. <https://doi.org/10.1029/JA076i019p04428>

51. Coroniti F.V., Kennel C.F. Auroral micropulsation instability // *Journal of Geophysical Research*. – 1970. – Vol. 75. – № 10. – P. 1863-1878. <https://doi.org/10.1029/JA075i010p01863>
52. Daglis I.A., Thorne R.M., Baumjohann W., Orsini S. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay // *Reviews of Geophysics*. – 1999. – Vol. 37. – № 9. – P. 407-438. <https://doi.org/10.1029/1999RG900009>
53. Davidson G. T. Pitch angle diffusion in morningside aurorae: 2. The formation of repetitive auroral pulsations. *Journal of Geophysical Research*. – 1986. – Vol. 91. – № A4. – P. 4429–4436. <https://doi.org/10.1029/JA091iA04p04429>
54. Demekhov A. G., Trakhtengerts V. Y. A mechanism of formation of pulsating aurorae // *Journal of Geophysical Research*. – 1994. – Vol. 99. – № A4. – P. 5831–5841. <https://doi.org/10.1029/93JA01804>
55. Eather R.H., Mende S.B., Judge R.J.R. Plasma Injection at Synchronous Orbit and Temporal Auroral Morphology // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – Vol. 81. – № 16. – P.2805-2824. <https://doi.org/10.1029/JA081i016p02805>
56. Erlandson R.E., Ukhorskiy A.J. Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering // *Journal of Geophysical Research*. – 2001. – Vol. 106. – № A3. – P. 3883–3896. <https://doi.org/10.1029/2000JA000083>
57. Fairfield D. H., Vinas A. F. The inner edge of the plasma sheet and the diffuse aurora // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – Vol. 89. – № A2. – P. 841-854. <https://doi.org/10.1029/JA089iA02p00841>
58. Feldstein Ya. I., Galperin Yu. I. The auroral luminosity structure in the high-latitude upper atmosphere: Its dynamics and relationship to the large-scale structure of the Earth's magnetosphere // *Reviews of Geophysics*. – 1985. – Vol. 23. – № 3. – P. 217-275. <https://doi.org/10.1029/RG023i003p00217>
59. Feldstein Ya. I., Starkov G. V. Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // *Planetary and Space Science*. – 1967. – Vol. 15. – № 2. – P. 209–229. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(67\)90190-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(67)90190-0)

60. Fok M.-C., Kozyra J. U., Nagy A. F., Rasmussen C. E., Khazanov G. V. Decay of equatorial ring current ions and associated aeronomical consequences // *Journal of Geophysical Research*. – 1993. – Vol. 98. – № A11. – P. 19381–19393. <https://doi.org/10.1029/93JA01848>
61. Forsyth C., Sergeev V.A., Henderson M.G., Nishimura Y., Gallardo-Lacourt B. Physical Processes of Meso-Scale, Dynamic Auroral Forms // *Space Science Reviews*. – 2020. – Vol. 216. – №46. <https://doi.org/10.1007/s11214-020-00665-y>
62. Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // *Journal of Geophysical Research*. – 2002. – Vol. 107. – № A12. – P. 1475–1484. <https://doi.org/10.1029/2002JA009409>
63. Fraser B. J. Observations of ion cyclotron waves near synchronous orbit and on the ground // *Space Science Reviews*. – 1985. – Vol. 42. – № 3. – P. 357–374. <https://doi.org/10.1007/BF00214993>
64. Fraser B. J., Nguyen, T. S. Is the Plasmapause a preferred source region of electromagnetic ion cyclotron waves in the magnetosphere? // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2001. – Vol. 63. – № 11. – P. 1225–1247. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00225-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00225-X)
65. Frey H.U., Haerendel G., Mende S.B., Forrester W.T., Immel T.J., Østgaard N. Subauroral morning proton spots (SAMPS) as a result of plasmapause-ring-current interaction // *Journal of Geophysical Research*. – 2004. – Vol. 109. – № A10305. <https://doi.org/10.1029/2004JA010516>
66. Fu S., Ni B., Lou Y., Bortnik J., Ge Y., Tao X., et al. Resonant scattering of near-equatorially mirroring electrons by Landau resonance with H⁺ band EMIC waves // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – Vol. 45. – № 20. – P. 10,866–10,873. <https://doi.org/10.1029/2018GL079718>
67. Fujii R., Hoffman R.A., Sugiura M. Spatial Relationship Between Region 2 field-aligned currents and electron and ion precipitation in the evening sector // *Journal of Geophysical Research*. – 1990. – Vol. 95. – № A11. – P. 18939-18947. <https://doi.org/10.1029/JA095iA11p18939>

68. Gallardo-Lacourt B., Liang J., Nishimura Y., Donovan E. On the origin of STEVE: Particle precipitation or ionospheric skyglow? // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – Vol. 45. – P. 7968–7973. <https://doi.org/10.1029/2018GL078509>
69. Gallardo-Lacourt B., Nishimura Y., Donovan E., Gillies D. M., Perry G. W., Archer W. E., Nava O. A., Spanswick E. L. A statistical analysis of STEVE // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2018. – Vol. 123. – P. 9893–9905. <https://doi.org/10.1029/2018JA025368>
70. Galperin Yu. L., Ponomarev V. N., Zosimova A. G. Plasma convection in the polar ionosphere // *Annales de Geophysique*. – 1974. – Vol. 30. – № 1. – P. 1-7.
71. Gillies D. M., Donovan E., Hampton D., Liang J., Connors M., Nishimura Y., B. Gallardo-Lacourt, E. Spanswick. First observations from the TREx spectrograph: The optical spectrum of STEVE and the picket fence phenomena // *Geophysical Research Letters*. – 2019. – V. 46. – № 13. – P. 7207–7213. <https://doi.org/10.1029/2019GL083272>
72. Goldstein J., Spasojević M., Reiff P.H., Sandel B.R., Forrester W.T., Gallagher D.L., Reinisch B.W. Identifying the plasma pause in IMAGE EUV data using IMAGE RPI in situ steep density gradients // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2003. – Vol. 108. – № A4. <https://doi.org/10.1029/2002JA009475>
73. Guglielmi A., Potapov A., Matveyeva E., Polyushkina T., Kangas J. Temporal and spatial characteristics of Pc1 geomagnetic pulsations // *Advances in Space Research*. – 2006. – Vol. 38. – № 8. – P. 1572–1575. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.05.027>
74. Harding B. J., Mende S. B., Triplett C. C., Wu Y.-J. J. A mechanism for the STEVE continuum emission // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – Vol. 47. – № 7. e2020GL087102. <https://doi.org/10.1029/2020GL087102>
75. Hasegawa A., Mima K. Anomalous transport produced by kinetic Alfvén wave turbulence // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1978. – Vol. 83. – № A3. – P. 1117–1123. <https://doi.org/10.1029/JA083iA03p01117>
76. He F., Zhang X.-X., Wang W., Chen B. Double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs) // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43. – № 11. – P. 5554–5562. <https://doi.org/10.1002/2016GL069133>

77. He F., Guo R. L., Dunn W.R et al. Plasmapause surface wave oscillates the magnetosphere and diffuse aurora // *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11. – № 1668. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15506-3>
78. Heikkila W.H., Winningham J.D., Eather R.H., Akasofu S.-I. Auroral emissions and particle precipitation in the noon sector // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1972. – Vol. 77. – № 22. – P. 4100-4115.
79. Hess W. N. The radiation belt and magnetosphere // *Blaisdell Pub. Co.*, – 1968. – 548 p. <https://doi.org/10.1063/1.3035208>
80. Hilliard R.L., Shepherd G.G. Upper atmospheric temperatures from Doppler line widths—IV: A detailed study using the OI 5577 Å auroral and nightglow emission // *Planetary and Space Science*. – 1966. – Vol. 14. – № 5. – P. 383-406. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(66\)90011-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(66)90011-0)
81. Hoch R.J., Smith L.L., Clark K.C. $\lambda 5577$ [OI] and $\lambda 4278$ N₂⁺ emissions in a SAR arc // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1971. – Vol.76. – №31. – P.7663-7668. <https://doi.org/10.1029/JA076i031p07663>
82. Horne R. B., Thorne R. M. Potential Waves for Relativistic Electron Scattering and Stochastic Acceleration during Magnetic Storms // *Geophysical Research Letters*. – 1998. – Vol. 25. – № 15. – P. 3011–3014. <https://doi.org/10.1029/98GL01002>
83. Horwitz J.L., Cobb W.K., Baugner C.A. et al. On the relationship of the plasmapause to the equatorward boundary of the auroral oval and the inner edge of the plasma sheet // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1982. Vol. 87. – № A11. – P. 9059-9069. <https://doi.org/10.1029/JA087iA11p09059>
84. Horwitz J.L., Brace L.H., Comfort R.H., Chappell C.R. Dual-spacecraft measurements of plasma-ionosphere coupling // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1986. – Vol. 91. – № A10. – P. 11203-11216. <https://doi.org/10.1029/JA091iA10p11203>
85. Humberst B.K., Gjerloev J.W., Samara M., Michell R.G., Mann I.R. Temporal characteristics and energy deposition of pulsating auroral patches // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2016. – Vol. 121. – №7. – P. 7087-7107. <https://doi.org/10.1002/2016JA022921>

86. Hunnekuhl M., MacDonald E. Early ground-based work by auroral pioneer Carl Størmer on the high-altitude detached subauroral arcs now known as “STEVE” // *Space Weather*. – 2020. – Vol. 18. – e2019SW002384. <https://doi.org/10.1029/2019SW002384>
87. Ievenko I.B. SAR arc observation during the overlap registration of an energetic plasma with a plasmopause aboard the Van Allen probe // *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. – 2020. – Vol. 209. – 105386. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105386>
88. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. Relationship of the diffuse aurora and SAR arc dynamics to substorms and storms // *Advances in Space Research*. – 2008. – Vol. 41. – № 8. – P. 1252-1260. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.030>
89. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N., Pulsating auroras at the SAR arc latitudes as a result of the generation of ion-cyclotron waves / In *Proceedings of the 9th International Conference "Problems of Geocosmos"*. – SPb., 2012 – 451 p. ISBN 978-5-9651-0685-1. Editors: V. N. Troyan, V. S. Semenov, M. V. Kubyshkina. St. Petersburg, – 2012. – P. 228-232, (http://geo.phys.spbu.ru/materials_of_a_conference_2012/Geocosmos2012proceedings.pdf)
90. Ievenko I.B., A.E. Stepanov, V.N. Alexeyev, V.F. Smirnov. Dynamics of the convection in the inner magnetosphere by observations of the diffuse aurora, SAR arc and ionospheric drift // *Advances in Space Research*. – 2009. – Vol. 43. – № 7. – P. 1130-1134. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.003>
91. Inaba Y., Shiokawa K., Oyama, S.-i., Otsuka, Y., Oksanen, A., Shinbori, A., et al. Plasma and field observations in the magnetospheric source region of a stable auroral red (SAR) arc by the Arase satellite on 28 March 2017 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2020. – Vol. 125. – e2020JA028068. <https://doi.org/10.1029/2020JA028068>
92. Jacobs J.A., Kato Y., Matsushita S, Troitskaya V.A. Classification of geomagnetic micropulsations // *Journal of Geophysical Research*. – 1964. – Vol. 69. – № 1. – P. 180-181. <https://doi.org/10.1029/JZ069i001p00180>

93. Jaynes N, Lessard M.R., Takahashi K. et al. Correlated Pc4–5 ULF waves, whistler-mode chorus, and pulsating aurora observed by the Van Allen Probes and ground-based systems // *Journal of Geophysical Research: Space physics*. – 2015. – Vol. 120. – № 10. – P. 8749–8761 <https://doi.org/10.1002/2015JA021380>
94. Jones S.L., Lessard M.R., Rychert K., Spanswick E., Donovan E. Large-scale aspects and temporal evolution of pulsating aurora // *Journal of Geophysical Research: Space physics*. – 2011. – Vol. 116. – № A03214. <https://doi.org/10.1029/2010ja015840>
95. Jones S.L., Lessard M.R., Rychert K., Spanswick E., Donovan E., Jaynes A.N. Persistent, widespread pulsating aurora: a case study // *Journal of Geophysical Research: Space physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 6. – P. 2998–3006. <https://doi.org/10.1002/jgra.50301>
96. Kasahara S., Miyoshi Y., Yokota S. et al. Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves // *Nature*. – 2018. – V. 554. – № 7692. – P. 337–340. <https://doi.org/10.1038/nature25505>
97. Kennel C.F., Petschek H.E. Limits on stably trapped particle fluxes. *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Vol. 71. – № 1. – P. 1–28. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00001>
98. Kivelson M., Russell C. (Eds.). *Introduction to Space Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, – 1995. – 568 p. <https://doi.org/10.1017/9781139878296>
99. Kozyra J. U., Cravens T. E., Nagy A. F., Fontheim E. G., Ong R. S. B. Effects of energetic heavy ions on electromagnetic ion cyclotron wave generation in the plasmopause region // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – Vol. 89. – № A4. – P. 2217–2233. <https://doi.org/10.1029/JA089iA04p02217>
100. Kozyra J. U., Shelley E. G., Comfort R. H. et al. The role of ring current O⁺ in the formation of stable auroral red arcs // *Journal of Geophysical Research*. – 1987. – Vol. 92. – № A7. – P. 7487–7502. <https://doi.org/10.1029/JA092iA07p07487>
101. Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W. High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs // *Reviews of Geophysics*. – 1997. – Vol. 35. – № 2. – P. 155–190. <https://doi.org/10.1029/96RG03194>

102. Liang J., Donovan E., Connors M. Gillies D., St-Maurice J. P., Jackel B., Gallardo-Lacourt B., Spanswick E., Chu X. Optical spectra and emission altitudes of double-layer STEVE: A case study // *Geophysical Research Letters*. – 2019. – Vol. 46. – № 23. – P. 13630-13639. <https://doi.org/10.1029/2019GL085639>
103. Liang J., Zou Y., Nishimura Y., Donovan E., Spanswick E., Conde M. Neutral wind dynamics preceding the STEVE occurrence and their possible preconditioning role in STEVE formation // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126. – № 3. – e2020JA028505. <https://doi.org/10.1029/2020JA028505>
104. Lubchich A.A., Semenova N.V. Modeling of the electromagnetic ion cyclotron wave generation in the H^+ - He^+ plasma of the inner magnetosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2015. – Vol. 125-126. – P. 21-37. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.02.004>
105. Lui A.T.Y., Perreault P., Akasofu S.I., Anger C.D. The diffuse aurora // *Planetary and Space Science*. – 1973. – Vol. 21. – № 5. – P. 857–858. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(73\)90102-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(73)90102-5)
106. Luhmann J. Auroral pulsations from atmospheric waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1979. – Vol. 84. – № A8. – P. 4224–4228. <https://doi:10.1029/JA084iA08p04224>
107. Lyons R. Electron diffusion driven by magnetospheric electrostatic waves // *Journal of Geophysical Research*. – 1974. – Vol. 79. – № 4. – P. 575–580. <https://doi.org/10.1029/JA079i004p00575>
108. MacDonald E.A., Donovan E., Nishimura Y. et al. New science in plain sight: Citizen scientists lead to the discovery of optical structure in the upper atmosphere // *Science Advances*. – 2018. – Vol. 4. – № 3. – eaaq0030. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaq0030>
109. Martinis C., Baumgardner J., Mendillo M. Taylor M.J., Moffat-Griffin T., Wroten J., Sullivan C., Macinnis R., Alford B., Nishimura Y. First ground-based conjugate observations of stable auroral red (SAR) arcs // *Journal of Geophysical*

Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124. – № 6. – P. 4658–4671.
<https://doi.org/10.1029/2018JA026017>

110. Martinis C., Nishimura Y., Wroten J., Bhatt A., Dyer A., Baumgardner J., Gallardo-Lacourt B. First simultaneous observation of STEVE and SAR arc combining data from citizen scientists, 630.0 nm all-sky images, and satellites // *Geophysical Research Letters*. – 2021. – Vol. 48. – № 8. – e2020GL092169.
<https://doi.org/10.1029/2020GL092169>

111. Martinis C., Griffin I., Gallardo-Lacourt B., Wroten J., Nishimura Y., Baumgardner J., Knudsen, D. J. Rainbow of the night: First direct observation of a SAR arc evolving into STEVE // *Geophysical Research Letters*. – 2022. – Vol. 49. – № 11. – e2022GL098511. <https://doi.org/10.1029/2022GL098511>

112. McEwen D.J., Yee E., Whalen B.A., Yau A.W. Electron energy measurements in pulsating auroras // *Canadian Journal of Physics*. – 1981. – Vol. 59. – № 8. – P. 1106–1115. <https://doi.org/10.1139/p81-146>

113. Mendillo M., Baumgardner J., Wroten J., Martinis C., Smith S., Merenda K.-D., Fritz T., Hairston M., Heelis R., Barbieri C. Imaging magnetospheric boundaries at ionospheric heights // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 11. – P. 7294-7305. <https://doi.org/10.1002/2013JA019267>

114. Mendillo M., Baumgardner J., Wroten J. SAR arcs we have seen: Evidence for variability in stable auroral red arcs // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2016. – Vol. 121. – №. 1. – P. 245-262. <https://doi.org/10.1002/2015JA021722>

115. Meredith N.P., Thorne R.M., Horne R.B. et al. Statistical analysis of relativistic electron energies for cyclotron resonance with EMIC waves observed on CRRES // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2003. – Vol. 108. – № A6. – P. 1250. <https://doi.org/10.1029/2002JA009700>

116. Min K., Lee J., Keika K., Li W. Global distribution of EMIC waves derived from THEMIS observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2012. – Vol. 117. – № A5. – P. A05219. <https://doi.org/10.1029/2012JA017515>

117. Mishin E., Streltsov A. Nonlinear wave and plasma structures in the auroral and subauroral geospace. Elsevier, – 2021. – 621 p. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02456-9>
118. Mishin E., Streltsov A. On the kinetic theory of subauroral arcs // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2022. – Vol. 127. – № 8. – e2022JA030667. <https://doi.org/10.1029/2022JA030667>
119. Miyoshi Y., Sakaguchi K., Shiokawa K., Evans D., Albert J., Connors M., Jordanova V. Precipitation of radiation belt electrons by EMIC waves, observed from ground and space // *Geophysical Research Letters*. – 2008. – Vol. 35. – № 23. <https://doi.org/10.1029/2008GL035727>
120. Newell P. T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2009. – Vol. 114. – № 9. <https://doi.org/10.1029/2009JA014326>
121. Ni B., Zhang Y., Gu X. Identification of ring current proton precipitation driven by scattering of electromagnetic ion cyclotron waves // *Fundamental Research*. – 2023. – Vol. 3. – № 2. – P. 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.12.018>
122. Nishimura Y., Lessard M.R., Katoh Y. et al. Diffuse and Pulsating Aurora *Space Science Reviews*. – 2020. – Vol. 216. – № 4. <https://doi.org/10.1007/s11214-019-0629-3>
123. Nomura R., Shiokawa K., Sakaguchi K., Otsuka Y., Connors M. Polarization of Pc1/EMIC waves and related proton auroras observed at subauroral latitudes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2012. – Vol. 117. – № A02318. <https://doi.org/10.1029/2011JA017241>
124. Oguti T., Kokubun S., Hayashi K., Tsuruda K., Machida S., Kitamura T., Saka O., Watanabe T. Statistics of pulsating auroras on the basis of all-sky TV data from five stations. I. Occurrence frequency // *Canadian Journal of Physics*. – 1981. – Vol. 59. – № 8. – P. 1150–1157. <https://doi.org/10.1139/p81-152>
125. Parnikov S. G., Ievenko I. B., Baishev D. G., Koltovskoy I. I. Proton aurora observation as a result of ion cyclotron instability / *Proc. SPIE 11560. 26th International*

Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 1156086, 12 November 2020. <https://doi.org/10.1117/12.2575266>

126. Rees M.H., Akasofu S. On the association between subvisual red arcs and Dst (H) decrease // *Planetary and Space Science*. – 1963. – Vol. 11. – № 1. – P. 105-107. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(63\)90225-3](https://doi.org/10.1016/0032-0633(63)90225-3)

127. Rees M.H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions. 1. Model computations // *Journal of Geophysical Research*. – 1974. – Vol. 79. – № A34. – P. 5181-5186. <https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181>

128. Roldugin V.C., Roldugin A.V., Pilgaev S.V. Pc1–2 auroral pulsations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 1. – P. 74–81. <https://doi.org/10.1029/2012JA017861>

129. Rostoker G., Akasofu S.I., Foster J., Greenwald R.A., Kamide Y., Kawasaki K., Lui A.T.Y., McPherron R.L., Russell C.T. Magnetospheric substorm - Definition and signatures // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1980. – Vol. 85. – № A4. – P. 1663-1668. <https://doi.org/10.1029/JA085iA04p01663>

130. Royrvik O., Davis T.N. Pulsating aurora: local and global morphology. *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82. – № 29. – P. 4720–4740. <https://doi.org/10.1029/JA082i029p04720>

131. Saikin A. A., Zhang J.-C., Allen R. C., Smith C. W., Kistler L. M., Spence H. E., Torbert R. B., Kletzing C. A., Jordanova V. K. The occurrence and wave properties of H⁺-, He⁺-, and O⁺-band EMIC waves observed by the Van Allen Probes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2015. – Vol. 120. – № 9. – P. 7477–7492. <https://doi.org/10.1002/2015JA021358>

132. Saito T. Geomagnetic pulsations. // *Space Science Reviews*. – 1969. – Vol. 10. – № 3. – P. 319–412. <https://doi.org/10.1007/BF00203620>

133. Sakaguchi K., Shiokawa K., Ieda A., Miyoshi Y., Otsuka Y., Ogawa T., Connors M., Donovan E. F., Rich F. J. Simultaneous ground and satellite observations of an isolated proton arc at subauroral latitude // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2007. – Vol. 112. – № A04202. <https://doi.org/10.1029/2006JA012135>

134. Sakaguchi K., Shiokawa K., Miyoshi Y., Otsuka Y., Ogawa T., Asamura K., and Connors M. Simultaneous appearance of isolated auroral arcs and Pc 1 geomagnetic pulsations at subauroral latitudes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2008. – Vol. 113. – № A05201. <https://doi.org/10.1029/2007JA012888>
135. Samara M., Michell R.G., Asamura K., Hirahara M., Hampton D.L., Stenbaek-Nielsen H.C. Ground-based observations of diffuse auroral structures in conjunction with Reimei measurements // *Annales Geophysicae*. – 2010. – Vol. 28. – № 3. – P. 873–881. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-873-2010>
136. Sandford, P. B. Variations of auroral emissions with time, magnetic activity and the solar cycle // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1968. – Vol. 30. – № 12. – P. 1921-1942. [https://doi:10.1016/0021-9169\(68\)90001-9](https://doi:10.1016/0021-9169(68)90001-9)
137. Schaeffer R.C., Jacka F. Stable auroral red arc observed from Adelaide during 1967-69 // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1971. – Vol. 33. – №2. – P. 237-250. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(71\)90200-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90200-5)
138. Semeter J., Hunnekuhl M., MacDonald E., Hirsch M., Zeller N., Chernenkoff A., Wang J. The mysterious green streaks below STEVE // *AGU Advances*. – 2020. – Vol. 1. – № 4. e2020AV000183. <https://doi.org/10.1029/2020AV000183>
139. Sergeev V.A. On the longitudinal localization of the substorm active region and its changes during the substorm // *Planetary and Space Science*. – 1974. – V. 22. – № 9. – P. 1341-1343. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(74\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(74)90055-5)
140. Shiokawa K., Miyoshi Y., Brandt P. C., Evans D. S., Frey H. U., Goldstein J., Yumoto K. Ground and satellite observations of low-latitude red auroras at the initial phase of magnetic storms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 1. – P. 256-270. <https://doi.org/10.1029/2012JA018001>
141. Slater D.W., Smith L.L., Kleckner E.W. Correlated Observations of the Equatorward Diffuse Auroral Boundary // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1980. – Vol. 85. – № A2. – P. 531-542. <https://doi.org/10.1029/JA085iA02p00531>
142. Spasojević M., Frey H.U., Thomsen M.F., Fuselier S.A., Gary S.P., Sandel B.R., Inan U.S. The link between adetached subauroral proton arc and a plasmaspheric

plume // *Geophysical Research Letters*. – 2004. – Vol. 31. – № 4.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018389>

143. Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C // *Geophysical Research Letters*. – 1979. – Vol. 6. – № 8. – P. 657–660. <https://doi.org/10.1029/GL006i008p00657>

144. Stenbaek-Nielsen H.C., Hallinan T.J. Pulsating auroras evidence for noncollisional thermalization of precipitating electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1979. – Vol. 84. – № A7. – P. 3257–3271. <https://doi.org/10.1029/JA084iA07p03257>

145. Størmer C. Remarkable aurora-forms from southern Norway. I, Feeble homogeneous arcs of great altitude // *Geofysiske Publikasjoner*. – 1935. – Vol. 11. – № 5. – P.68.

146. Størmer C. The polar aurora. London: Oxford University Press, –1955. – 403 p. <https://doi.org/10.1002/qj.49708235123>

147. Summers D. and R. M. Thorne. Relativistic electron pitch angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2003. – Vol. 108. – № A4. – 1143. <https://doi.org/10.1029/2002JA009489>

148. Thorne R.M., Horne R.B. The contribution of ion-cyclotron waves to electron heating and SAR-arc excitation near the storm-time plasmapause // *Geophysical Research Letters*. – 1992. – Vol. 19. – № 4. – P. 417-420. <https://doi.org/10.1029/92GL00089>

149. Thomas I.L., Scourfield M.W., Parsons N.R. Classification of optical auroral pulsations // *Canadian Journal of Physics*. – 1973. – Vol. 51. – № 20. – P. 2209-2215. <https://doi.org/10.1139/p73-288>

150. Troitskaya, V.A., Gul'elmi, A.V. Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // *Space Science Reviews*. – 1967. – Vol. 7. – P. 689–768. <https://doi.org/10.1007/BF00542894>

151. Tsurutani B. T., Lakhina G. S., Verkhoglyadova O. P. Energetic electron (>10 keV) microburst precipitation, 5–15 s X-ray pulsations, chorus, and wave-particle

interactions: A review // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 5. – P. 2296–2312. <https://doi.org/10.1002/jgra.50264>

152. Usanova M.E. Energy Exchange Between Electromagnetic Ion Cyclotron (EMIC) Waves and Thermal Plasma: From Theory to Observations // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. – 2021. – Vol. 8. – № 744344. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.744344>

153. Varlamov I., Parnikov S., Ievenko I., Baishev D., Shiokawa K. Registration of synchronous geomagnetic pulsations and proton aurora during the substorm on March 1, 2017 02012 / *EPJ Web of Conferences*. XII International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”. – 2021. – Vol. 254. – id. 02012. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202125402012>

154. Wang D., Yuan Z., Yu X. et al. Statistical characteristics of EMIC waves: Van Allen Probe observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2015. – Vol. 120. – № 6. <https://doi.org/10.1002/2015JA021089>

155. Wang B., Su Z., Zhang Y., Shi S. and Wang G. Nonlinear Landau resonant scattering of near equatorially mirroring radiation belt electrons by oblique EMIC waves // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43. – № 8. – P. 3628–3636. <https://doi.org/10.1002/2016GL068467>

156. Yahnina T.A., Yahnin A.G. Kangas J., Manninen J. Proton precipitation related to Pc1 pulsations // *Geophysical Research Letters*. – 2000. – Vol. 27. – № 21. – P. 3575–3578. <https://doi.org/10.1029/2000GL003763>

157. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Frey H.U. Subauroral proton spots visualize the Pc1 source // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2007. – Vol. 112. – № A10223. <https://doi.org/10.1029/2007JA012501>

158. Yahnin A. G., Popova T. A., Demekhov A. G. et al. Evening side EMIC waves and related proton precipitation induced by a substorm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126. – № 7. – e2020JA029091. <https://doi.org/10.1029/2020JA029091>

159. Yamamoto T. On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1988. – Vol. 93. – № A2. – P. 897–911. <https://doi.org/10.1029/JA093iA02p00897>
160. Yamamoto T., Oguti T. Recurrent fast motions of pulsating auroral patches: 1. A case study on optical and quantitative characteristics during a slightly active period // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1982. – Vol. 87. – № A9. – P. 7603–7614. <https://doi.org/10.1029/JA087iA09p07603>
161. Young D. T., Perraut S., Roux A., de Villedary C., Gendrin R., Korth A., Kremser G., Jones D. Wave-particle interactions near Ω_{He^+} observed on GEOS 1 and 2. Propagation of ion cyclotron waves in He⁺-rich plasma // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1981. – Vol. 86. – № A8. – P. 6755–6772. <https://doi.org/10.1029/JA086iA08p06755>
162. Zhang J.-C., Saikin A.A., Kistler L.M. et al. Excitation of EMIC waves detected by the Van Allen Probes on 28 April 2013 // *Geophysical Research Letters*. – 2014. – Vol. 41. – № 12. – P. 4101–4108. <https://doi.org/10.1002/2014GL060621>
163. Zhang X.-J., Li W., Thorne R. M., Angelopoulos V., Bortnik J., Kletzing C. A., Kurth W. S., Hospodarsky G. B. Statistical distribution of EMIC wave spectra: observations from Van Allen Probes // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43. – № 24. – P. 12,348–12,355 <https://doi.org/10.1002/2016GL071158>
164. Zhou Q., Xiao F., Yang C., He Y., Tang L. Observation and modeling of magnetospheric cold electron heating by electromagnetic ion cyclotron waves // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2013. – Vol. 118. – № 11. – P. 6907–6914. <https://doi.org/10.1002/2013JA019263>