

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»

На правах рукописи

УДК 550.388



Парников Станислав Григорьевич

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

Специальность: 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Якутск-2023

Работа выполнена в Институте космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИКФИА СО РАН)

Научный руководитель:

Иевенко Игорь Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптики атмосферы ИКФИА СО РАН

Официальные оппоненты:

Васильев Роман Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией физики нижней и средней атмосферы.

Клименко Максим Владимирович, доктор физико-математических наук, Калининградский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, ведущий научный сотрудник, заместитель директора по науке.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт».

Защита состоится "9" апреля 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.197.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИСЗФ СО РАН, <http://iszf.irk.ru>.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф.-м.н.



Ясюкевич Ю.В.

Общая характеристика работы

Субавроральные широты экваториальнее аврорального овала являются областью, на которую проецируются два домена внутренней магнитосферы - внешняя плазмосфера (плазмопауза) и внутренняя граница плазменного слоя. Диссертационная 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. Игнатьева ИКФИА СО РАН. Географические координаты станции 63° с.ш. и 130° в.д. Исправленные геомагнитные координаты: 58°CGMLat и 202°CGMLon на эпоху 2015 года.

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 с твердотельными оптическими детекторами – приборами с зарядовой связью (ПЗС или CCD (Charge-coupled device)). CCD научного класса с умножением электронов (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.

Проведен анализ событий формирования SAR-дуг в окрестности границы ДС с последующим развитием пульсаций интенсивности 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.

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 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 Probes и Swarm.

Научная новизна

В работе впервые получены следующие результаты исследований на субавроральных широтах:

1. Сопоставлены наземные наблюдения интенсивной SAR-дуго 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. 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-дуго.

3. Показано формирование SAR-дуго 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 дуго на взрывной фазе суббури.

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

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.

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.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 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. Санкт-Петербург, 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. Якутск, 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 «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.

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».

Публикации по теме диссертации

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.

Основное содержание работы:

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи, раскрыта методология, научная новизна, научная и практическая значимость проведенного исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, оценена степень достоверности полученных результатов, приведен список публикаций по теме диссертации, опубликованных в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, приведен список научных мероприятий на которых прошла апробация результатов диссертационного исследования, оценен личный вклад автора, указаны структура и объем диссертации, кратко представлено содержание работы по главам.

В первой главе описана динамика ДС и SAR-дуг, а также пульсаций свечения на их широтах и дана их интерпретация как проявление процессов во внутренней магнитосфере в периоды магнитных возмущений. Заключительная часть главы посвящена явлению STEVE. Дано описание этого явления на основе последних статей в научных журналах.

В разделах 1.1 – 1.4 даны основные понятия о структуре магнитосферы и магнитосферной суббури. Рассмотрены особенности основных эмиссий полярных сияний. Описано современное состояние методов и результатов исследований явлений в субавроральном свечении. SAR-дуго являются следствием взаимодействия внешней плазмосферы с энергичными ионами кольцевого тока во

время магнитных бурь [Cole, 1970; Kozyra et al., 1987]. Согласно результатам исследований субаврорального свечения в ИКФИА СО РАН красные дуги появляются и/или уярчаются во время магнитосферных суббурь [Иевенко, 1999]. Диффузное сияние (ДС) вызвано высыпанием низкоэнергичных электронов из околоземного плазменного слоя. 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].

Раздел 1.5 посвящен пульсирующим сияниям на субавроральных широтах. Фотометрические наблюдения на станции «Маймага» показали, что во время фазы восстановления суббурь на широтах ДС и SAR-дуг часто наблюдаются пульсирующие вариации интенсивности молекулярных полос N_2^+ вследствие пульсирующих высыпаний энергичных электронов [Иевенко, 1995, 1999; Ieveno et al., 2008; Иевенко и Парников, 2022].

В разделе 1.6 первой главы дан обзор результатов недавних исследований явлений STEVE и Picket fence (PF). STEVE является следствием сильного повышения скорости теплового излучения (Strong thermal emission velocity enhancement (STEVE)) и является оптическим проявлением интенсивных SAID (Subauroral ion drift) [MacDonald et al., 2018]. Основной спектральной характеристикой STEVE является усиление континуума в интервале 400-700 нм, иногда с локальным усилением эмиссии 630,0 нм [OI] [Gillies et al., 2019]. STEVE часто сопровождается образованиями в виде «штaketника» (Picket fence) в эмиссии 557,7 нм [OI]. PF имеет не регулярный, эпизодический характер и протекает на высотах ниже STEVE.

Вторая глава посвящена описанию аппаратуры и методов анализа данных наблюдений. Все научные результаты в диссертационной работе были получены на основе анализа оригинальных данных наблюдений на субавроральной оптической станции «Маймага» им. В.М. Игнатьева ИКФИА СО РАН. 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 новые данные камеры всего неба «Keo Sentry» производства фирмы «Keo Scientific Ltd» (Канада), которая внедрена в практику наблюдений с февраля 2013 г.

Данные наземных наблюдений SAR-дуг были сопоставлены с данными измерений потоков энергичных ионов и параметров плазмы на борту спутника Van Allen Probe-B (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp_public/). Также, наблюдения SAR-дуг были верифицированы данными измерений электронной температуры (Te пиков) на спутниках DMSP-F19 (<http://cedar.openmadrigoal.org/single/>) и Swarm-B (https://swarm-diss.eo.esa.int/#swarm%2FAdvanced%2FPlasma_Data). Для определения интервала времени, усиления магнитосферной конвекции, использованы данные измерений параметров солнечного ветра (CB) с космического аппарата DSCOVR (<https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind>).

В третьей главе рассмотрены результаты исследований динамических явлений в ДС и SAR-дуге на двух примерах наблюдений. На рисунке 1 представлены параметры СВ, а также динамика субаврорального свечения в эмиссиях 557,7 и 630,0 нм [OI] во время наблюдений 15 февраля 2018 г. Усиление магнитосферной конвекции после резкого увеличения электрического поля E_y утро-вечер ($V_x B_z$) наблюдалось в экваториальном расширении ДС. В окрестности границы ДС в эмиссии 630,0 нм началось формирование SAR-дуги до начала взрывной фазы суббури. Формирование красной дуги в этом случае свидетельствовало о перекрытии потоков энергичных ионов с плазмопаузой как следствие усиления конвекции. В данных наблюдениях с использованием камеры всего неба «Keo Sentry» такое явление регистрировалось и в других событиях. Это стало возможно благодаря высокой чувствительности и большому угловому разрешению новой камеры всего неба.

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. Такая динамика SAR-дуги свидетельствовала о возникновении перекрытия энергичной плазмы с внешней плазмосферой до $L \sim 3,1$ в это время. В области перекрытия ДС и SAR-дуги наблюдались пульсации свечения в эмиссии $427,8 \text{ нм}$ (N_2^+) в

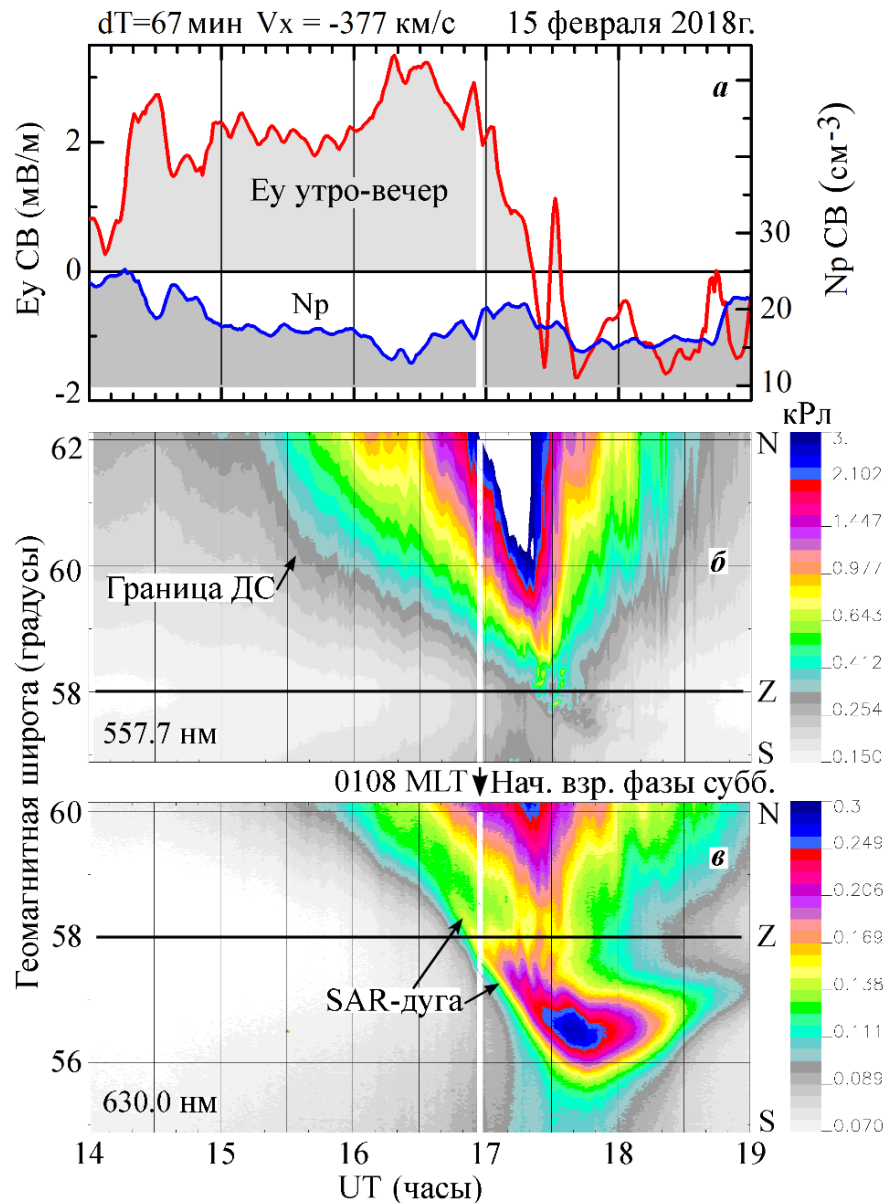


Рисунок 1. Динамика солнечного ветра, диффузного сияния и SAR-дуги 15 февраля 2018 г.

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

интервале частот 0,02-0,8 Гц, вызванные пульсирующим высыпанием энергичных частиц. При отрицательном E_u произошло быстрое затухание ДС с 17:30 UT. В это время SAR-дуга имела максимальную яркость ~ 300 Рэлей (Рл) и наблюдалась до ~ 19 UT с медленным уменьшением интенсивности.

В этом событии спутник Swarm-B измерял электронную температуру на высоте области F2 ионосферы в двух проходах вблизи меридиана оптических наблюдений. Рисунок 2 показывает два изображения всего неба в эмиссии 630,0 нм вблизи моментов времени регистрации максимумов T_e пиков (электронной температуры) на спутнике Swarm-B в первом и втором проходе, соответственно.

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 2 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.

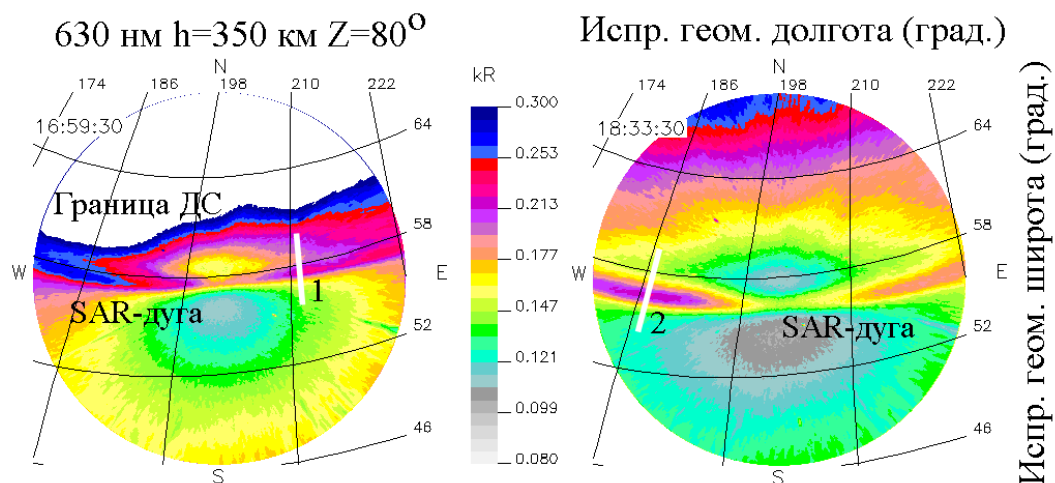


Рисунок 2. Регистрация SAR-дуги во время проходов спутника Swarm-B вблизи меридиана станции наблюдений 15 февраля 2018 г.

Обработанные 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]

Рисунок 3 показывает широтное распределение электронной температуры (T_e) 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. Данные измерений электронной температуры верифицируют наземные наблюдения SAR-дуги во время усиления магнитосферной конвекции и фазы восстановления суббури 15 февраля 2018 г.

При анализе этого события также были впервые выявлены такие явления в субавроральном свечении, как возникновение лучей (короны) на экваториальной

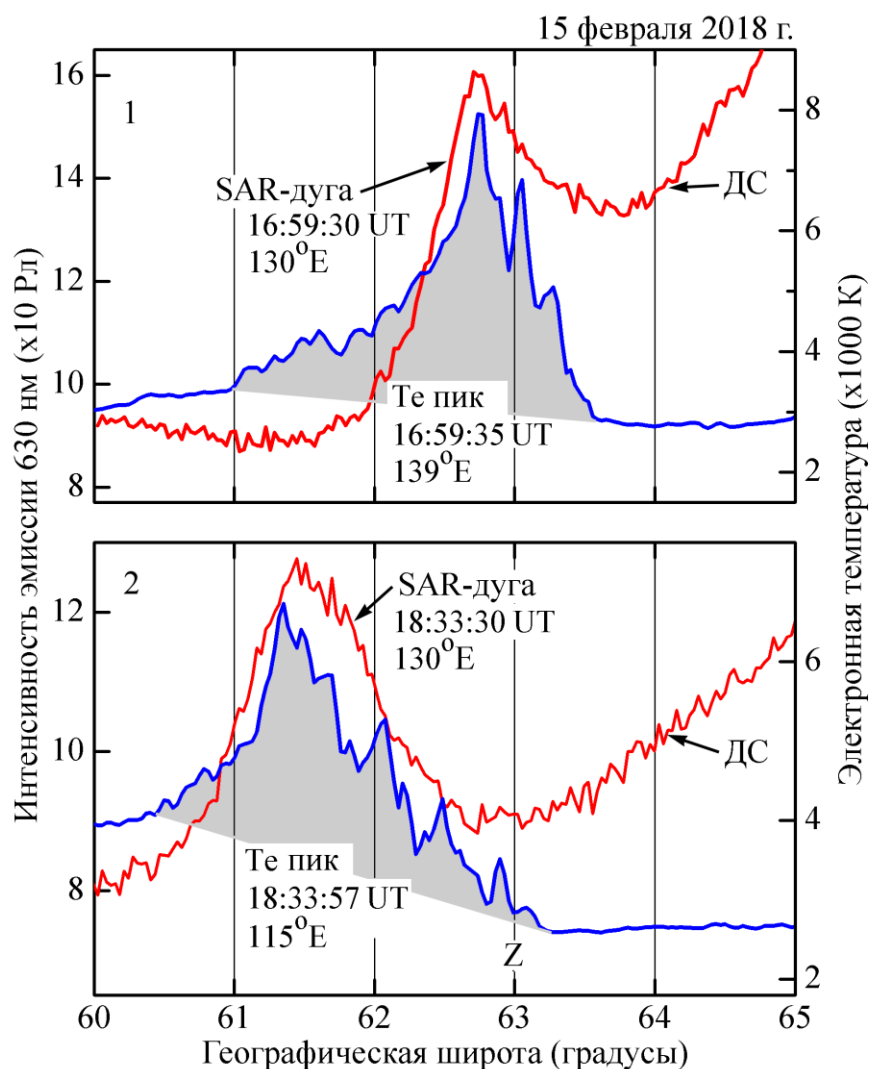


Рисунок 3. Сопоставление Те пиков с наблюдениями SAR-дуги 15 февраля 2018 г.

Приведены широтные распределения электронной температуры (Те) и интенсивности эмиссии 630,0 нм 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]

границе ДС в эмиссии 557,7 нм и появление выступов свечения на полярном крае красной дуги.

Во втором примере более ранних наблюдений рассмотрен случай развития пульсаций свечения на широтах возникающей красной полосы свечения (SAR-дуги без выраженной полярной границы) экваториальнее ДС во время взрывной фазы суббури 30 марта 2003 г. В области ДС на геомагнитных широтах 59-61° пульсаций свечения с подобным спектром не было. На рисунке 4 приведены графики фотометрической регистрации пульсаций свечения в эмиссиях N_2^+ в ДС (N) и на широтах SAR-дуги (Z), а также их динамические спектры в событии 30 марта 2003 г. Можно видеть, что в интервале ~16-17 UT интенсивные пульсации наблюдались только в зените станции экваториальнее ДС. В этом направлении происходили всплески квазипериодических пульсаций с дискретными максимумами в спектре мощности в интервале частот 0,2-0,8 Гц. Регистрация пульсаций свечения только на широтах SAR-дуги указывает на возникновение модуляции потока высыпающихся энергичных электронов на L-оболочках внешней плазмосферы. При этом увеличение фонового потока высыпающихся электронов в это время вызывает рост интенсивности эмиссий N_2^+ на широтах красной дуги.

Известно, что пульсирующие высыпания энергичных электронов могут быть вызваны электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами в результате модуляции питч-угловой диффузии и, соответственно, потока частиц в конусе потерь с частотой волны. Питч-угловая диффузия в этом случае должна быть обусловлена электрон-циклотронной неустойчивостью [Coroniti, Kennel; 1970]. 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 могут доминировать в составе

кольцевого тока во время магнитной бури [Kozyra et al., 1987; Иевенко и Парников, 2020].

На основе численного расчета в разделе 3.9 диссертации показано, что механизм Coroniti, Kennel модуляции питч-угловой диффузии энергичных электронов ЭМИЦ волнами может вызывать наблюдаемые пульсации свечения на широтах проекции плазмопаузы (SAR-дуги).

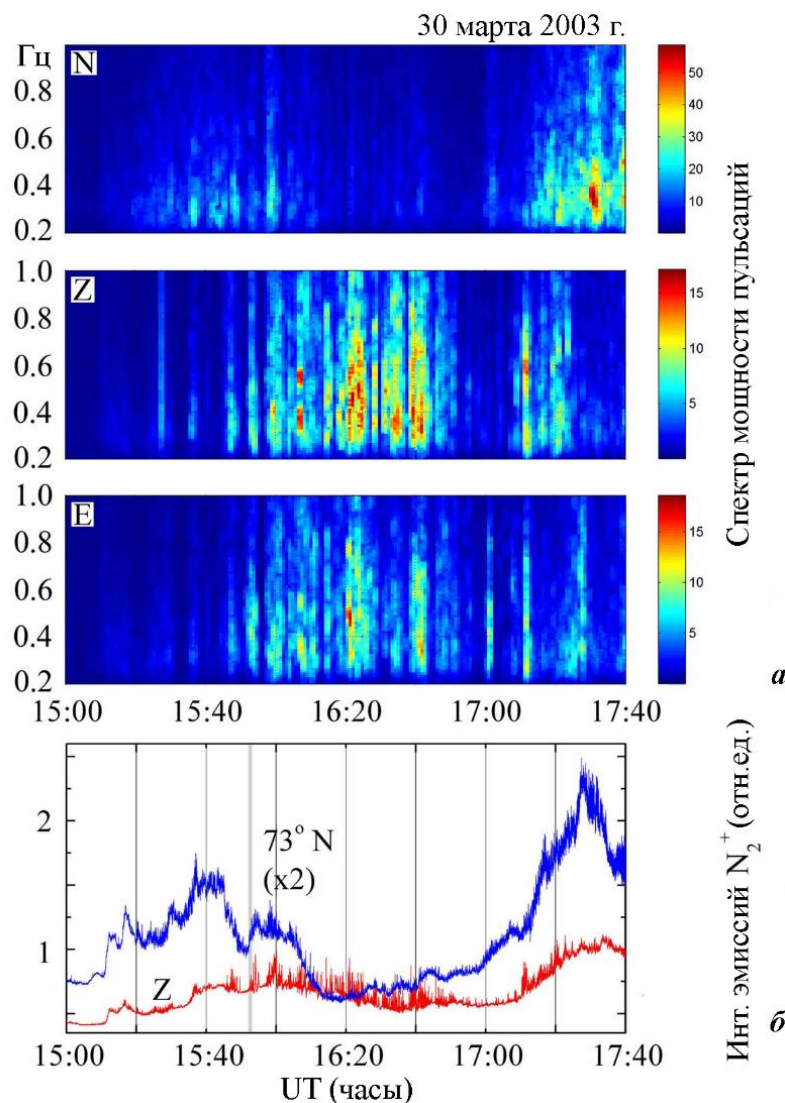


Рисунок 4. Динамические спектры пульсаций свечения 30 марта 2003 г.

a – спектр мощности пульсаций свечения в 3х направлениях в диапазоне частот 0,2-1 Гц; *б* – графики вариаций интенсивности эмиссии N_2^+ для двух направлений регистрации (север и зенит) с частотой дискретизации 20 Гц, полученных 4х канальным фотометром [Ievenko et al., 2012]

В четвертой главе рассмотрена связь SAR-дуги с плазмопаузой и околоземной границей кольцевого тока во время большой магнитной бури Святого Патрика 17 марта 2015 г. Красная дуга наблюдалась в вечернем секторе MLT через ~5 часов после начала главной фазы бури. В это время была низкая авроральная активность и происходило затухание кольцевого тока при отрицательном значении электрического поля E_y СВ. Медленное изменение интенсивности и положения SAR-дуги в течение ~1,5 часов дали возможность выполнить корректное сопоставление наземных наблюдений со спутниковыми измерениями параметров плазмы и потоков энергичных частиц в магнитосфере и ионосфере.

Рисунок 5а,б показывает положение внутренней границы потоков энергичных ионов и низкоэнергичных электронов относительно плазмопаузы по измерениям на борту Van Allen Probe-B во время наблюдений SAR-дуги 17 марта 2015 г. Измерения спутника указывают на перекрытие энергичных ионов кольцевого тока O^+ и H^+ с внешней плазмосферой в интервале $L \sim 2,8-4,5$. Резкое увеличение потока электронов в интервале энергий 1–7,4 кэВ на рисунке 5б совпадает с началом роста плотности холодных электронов и, вероятно, связано с внутренней границей плазменного слоя. Темно-серый столбик на рисунке показывает область перекрытия тепловой и энергичной плазмы, которая была сопряжена с наблюдаемой SAR-дугой в это время. Спутник проходил внутреннюю и внешнюю границы этой области в 12:10 и 12:45 UT, соответственно. Расчетные значения L и MLT двух границ указаны на рисунке 5в.

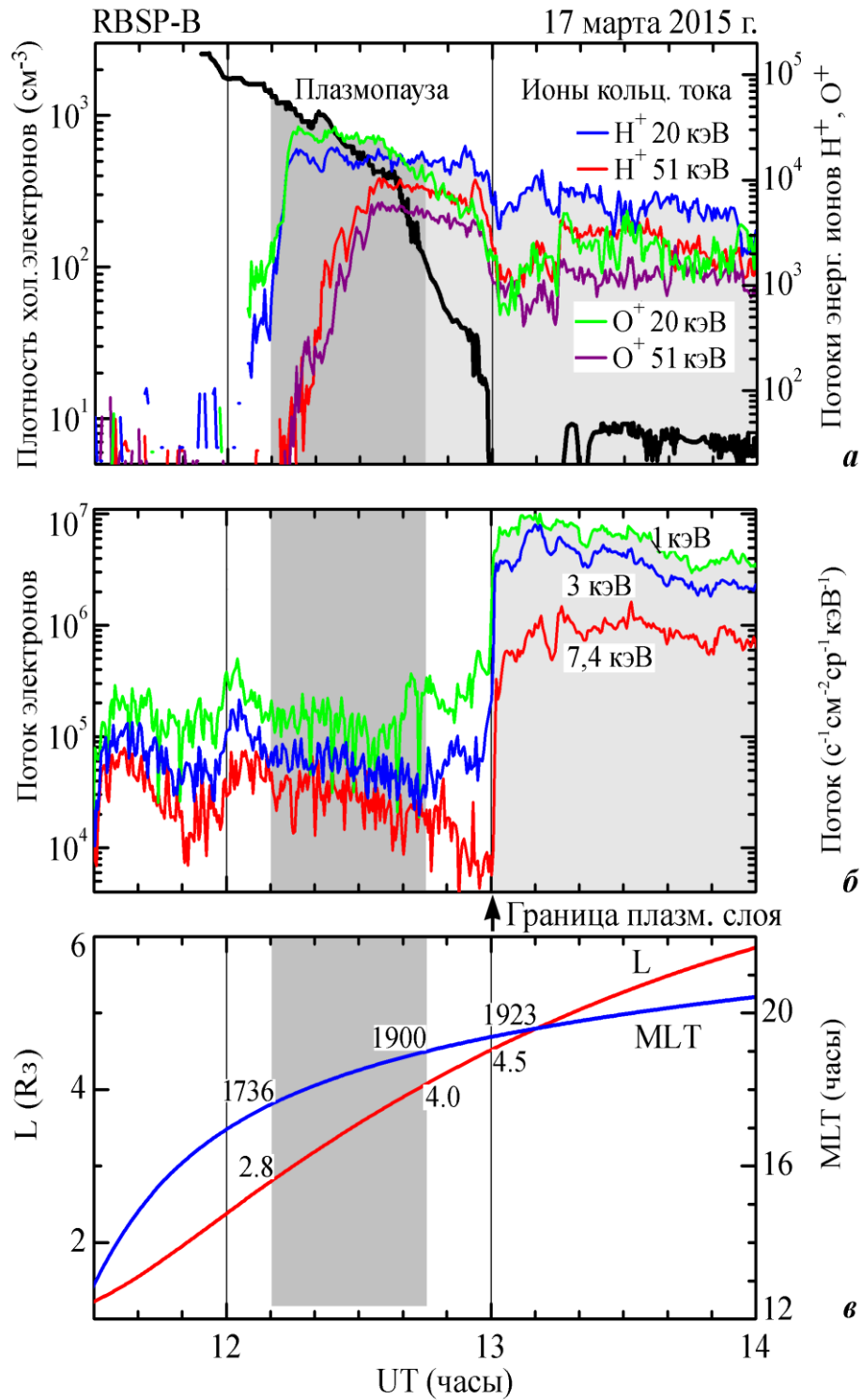


Рисунок 5. Регистрация плазмопаузы и потоков энергичных частиц на борту зонда Van Allen Probes-B во время наблюдения SAR-дуги 17 марта 2015 г.

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

На рисунке 6 представлены обработанные изображения всего неба с регистрацией SAR-дуги в начале и конце прохода Van Allen Probe-B области перекрытия энергичных ионов с внешней плазмосферой. На изображениях черными кружками показана экваториальная и полярная граница красной дуги с уровнем интенсивности $\sim 0,9$ и 1 кРл, соответственно. На западном крае изображений приведены значения L и MLT для геомагнитных координат обеих границ. В разделе 4.2 диссертации показано, что полярный край красной дуги в этом событии отображал границу плазмосферы в вечернем секторе MLT . Экваториальный край дуги с постоянной широтой отображал внутреннюю границу потока энергичных ионов кольцевого тока O^+ и H^+ с энергией 20 кэВ на постоянной L -оболочке. В разделе 4.3 наземные наблюдения SAR-дуги были верифицированы данными измерений электронной температуры на спутнике DMSP-F19 в двух проходах в раннем вечернем секторе MLT .

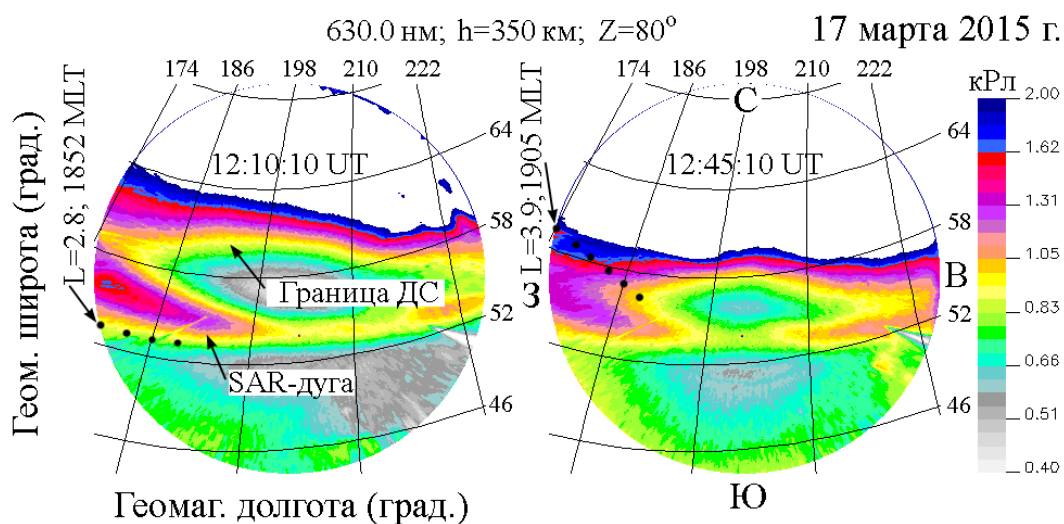


Рисунок 6. Изображения всего неба в эмиссии $630,0$ нм [OI] во время прохождения VAP-B плазмопаузы 17 марта 2015 г.

Обработанные изображения в 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 килорэляях [Иевенко, Парников, 2020]

В пятой главе рассмотрены результаты наблюдений субаврорального свечения STEVE в окрестности зенита станции «Маймага» в событии 1 марта 2017 г. Верхняя панель рисунка 7 показывает начало формирования STEVE в виде неоднородностей (пятен) свечения в континууме 620,0 нм и в эмиссии 630,0 нм [OI]. Неоднородности свечения возникли полярнее существовавшей SAR-дуги и двигались с востока на запад со скоростью ~ 840 м/с. Через ~ 50 минут неоднородности слились в узкую ленту свечения шириной ~ 8 км (см. нижнюю панель рисунка 7). В течение этого времени эпизодически регистрировались структуры Picket fence (PF) в эмиссии 557,7 нм [OI].

ст. «Маймага» 1 марта 2017 г.

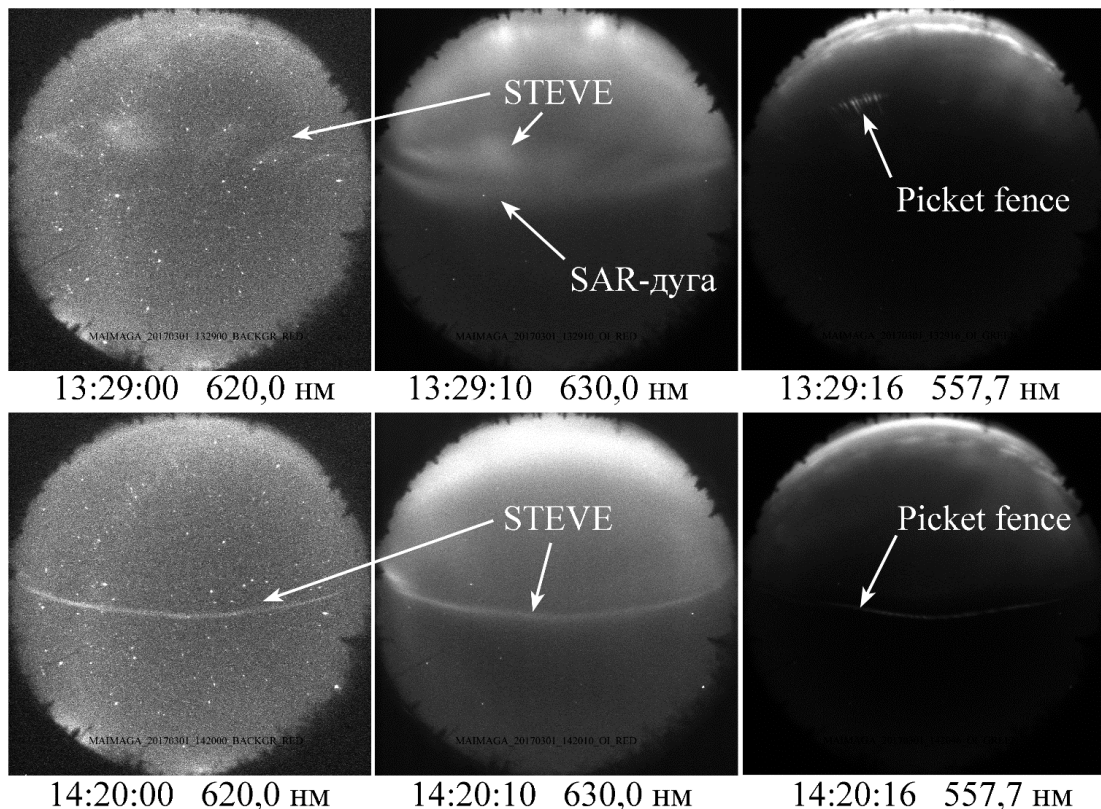


Рисунок 7. Оригинальные изображения всего неба в трех эмиссиях во время наблюдений 1 марта 2017 г.

Время и длины волн эмиссий указаны на снимках. Направления сторон света на кадрах: слева – запад, сверху – север [Парников и др., 2022]

Рисунок 8 показывает изменение распределения интенсивности свечения STEVE в эмиссии 630,0 нм и в континууме 620,0 нм и PF в эмиссии 557,7 нм вдоль меридиана (сканы) в окрестности магнитного зенита станции наблюдений

для трех моментов времени. Совпадение сканов STEVE (620,0 нм) и PF (557,7 нм) в магнитном зените станции свидетельствует о возникновении этих структур свечения на одних и тех же силовых линиях геомагнитного поля. В свою очередь, совпадение максимумов сканов на нижней панели рисунка 8 указывает на усиление континуума 620,0 и эмиссии 630,0 нм на одной высоте.

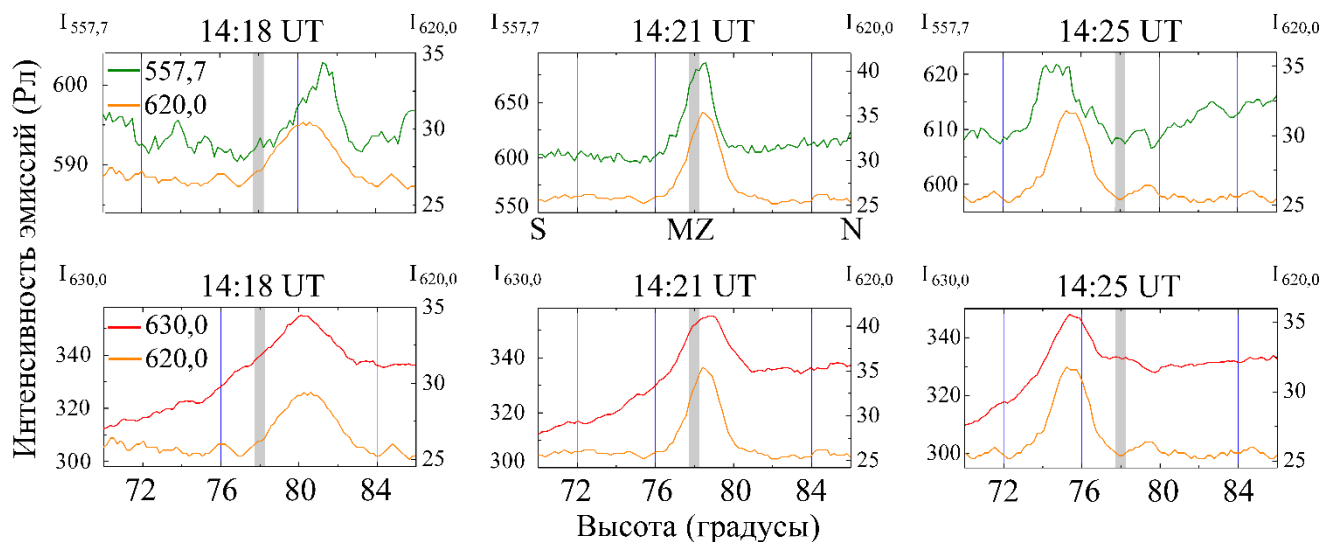


Рисунок 8. Меридиональное распределение интенсивности свечения (сканы) STEVE и Picket fence в окрестности магнитного зенита станции наблюдений в эмиссиях 630,0 и 557,7 нм [OI] и в континууме 620,0 нм.

Серым столбцом показана область магнитного зенита (MZ). Время сканов и длины волн указаны на рисунках. По горизонтальной оси отложены углы от южного горизонта. По вертикальным шкалам отложены интенсивности свечения соответствующих эмиссий [Парников и др., 2022]

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые заключаются в следующем:

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.

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., Parnikov S.G. and Alexeyev V.N. 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. B. 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. – Е43.
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. – Е44.
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 суббуревой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмоспаузы // *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. Иевенко И.Б. Пульсирующие высыпания частиц в области SAR-дуги вследствие суббури // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1995. – Т. 35. – № 3. – С. 37-46.
2. 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.
3. 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>
4. Иевенко И. Б., Парников С.Г. Связь динамики SAR-дуги с суббуревой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмоспаузы // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2022. – Т. 62. – № 2. – С. 171-188. <https://doi.org/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.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022030130>

6. Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude auroras // *Annales de Geophysique*. – 1970. – Vol. 26. – № 1. – P. 187-193.

7. 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>

8. 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>

9. 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>

10. 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. Vol. 46. № 13. P. 7207–7213.
<https://doi.org/10.1029/2019GL083272>

11. Horwitz J.L., Cobb W.K., Baugner C.A. et al. On the relationship of the plasmopause 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>

12. 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>

13. 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>

14. 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.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aag0030>