



УДК 550.388.2; 550.388.8; 551.594.5

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ С ОРБИТЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ СТАНЦИИ РОС

А. К. Кузьмин¹, А. Д. Соколов²¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Получение и анализ изображений конкретных авроральных эмиссий с разных орбит КА — один из информативных методов исследований и контроля динамики характеристик полярной ионосферы, так как в них отображаются многообразные авроральные структуры в E - и F -области. На основе изображений эмиссий, полученных с разных высот, и рассчитанных из них карт пространственных распределений энергетических характеристик потоков высыпающихся частиц возможно дистанционно контролировать электродинамическую обстановку ионосферы как в глобальном, так и в локальных масштабах. Актуальность этой методики со временем только увеличивается по мере развития технологий диагностики мгновенных условий в полярной ионосфере и особенно на пространственных масштабах ~ 1 -5 км. Возникает необходимость создания системы контроля этих условий, и особенно там, где возникают мелкомасштабные градиенты Ne на разных высотах в разных секторах MLT, которые, в конечном счете, приводят к генерации процессов неустойчивостей в плазме полярной ионосферы, и, как следствие, в результате которых могут появляться фазовые и амплитудные сцинтилляции трансполярных навигационных и других сигналов. Теоретические основы такой системы были заложены в работах (см., например, [Tsunoda, 1988; Vasu et al., 2002; Kintner et al., 2007]). В данной статье рассматриваются элементы методики получения и картографирования конкретных авроральных эмиссий, нацеленные на исследования процессов в плазме на «нижнем этаже» магнитосферно-ионосферной системы при наблюдениях с высоты орбиты перспективной орбитальной станции РОС. Планируемые характеристики орбиты РОС и ее ориентации позволят проводить измерения локальных характеристик плазмы в F -слое ионосферы вокруг РОС, и одновременно проводить дистанционные измерения интенсивностей конкретных авроральных эмиссий в F - и E -слое, включая как неосвещенную, так и освещенную полярную ионосферу, и верхнюю атмосферу. Готовящийся эксперимент на РОС, в конечном счете, может стать частью комплексного проекта, нацеленного на координированные измерения разномасштабных характеристик полярной ионосферы одновременно с разных высот, в котором будут одновременно использоваться КА на разных орбитах; платформы, отделяемые от зондирующих ракет на разных высотах, БПЛА, летающие выше облаков; измерения авроральных эмиссий с помощью сети наземных изображающих камер, магнитометров и риометров, расположенных вдоль всей полярной части территории России, а также радиобуи, работающие на разных частотах. Первые попытки создания основ такой сети были сделаны геофизиками в СССР и других странах еще в 1957-1958 гг. т.е. в период МГТ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полярная ионосфера, авроральные эмиссии, неоднородности электронной концентрации, авроральные имаджеры, орбитальная диагностика, методология контроля состояния характеристик, условия распространения трансполярных сигналов

EDN ULVTCY

Электронная почта авторов для переписки:

Кузьмин Александр Константинович, e-mail: alkuzmin@mail.ru
Соколов Алексей Дмитриевич, e-mail: sokolov.ad@phystech.eduАдрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

В результате высыпаний энергичных заряженных частиц вдоль магнитных силовых линий из магнитосферы в полярную ионосферу и верхнюю атмосферу, их взаимодействий с волнами в скрещенных магнитном и электрическом полях в различных MLT секторах аврорального овала в полярной ионосфере возбуждаются разнообразные авроральные структуры, тематическое собрание (Аннотированный атлас) типов которых авторы этой работы вместе с коллегами создавали в 2022 и 2023 г. [Кузьмин и др., 2022, 2023], и продолжают создавать далее, включающий их морфологические и спектральные характеристики, а также краткий обзор известных к настоящему времени физических механизмов, приводящих к их генерации. Процессы генерации авроральных структур в разных секторах MLT аврорального овала могут сопровождаться появлением неоднородностей электронной концентрации δN_e , и неустойчивостей в плазме в различных высотных слоях полярной ионосферы. Эти неоднородности влияют на условия распространения сигналов навигационных систем, пересекающих их, при этом могут возникать флуктуации фазы и амплитуды, называемые сцинтилляциями [Aarons, 1982; Basu et al., 2002; Smith et al., 2008; Jin, 2016]. Условия и причины генераций механизмов сцинтилляций в полярной ионосфере пока недостаточно изучены, и поэтому результаты наблюдений интенсивности эмиссий в полярных областях с орбиты РОС, одновременно с измерениями энергетических характеристик высыпающихся частиц и других характеристик плазмы при ее пересечении разномасштабных авроральных структур, могут иметь как научную, так и практическую значимость для исследований и контроля электродинамической обстановки в полярной ионосфере.

Развитие методологии диагностики условий в полярной ионосфере, стимулирующих генерацию авроральных структур, на основе фотометрических наблюдений происходило в течение 20 века, и особенно с начала космической эры, когда стартовали орбитальные проекты, в которых геофизики научились получать изображения конкретных авроральных эмиссий не только в видимом спектральном диапазоне [Shepherd, 2002], но и в спектральном диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) [Huffman et al., 1981]. Моделирование эмиссий и эксперименты с орбитальными имаджерами позволили выбрать для наблюдений ряд конкретных интенсивных авроральных эмиссий в нескольких спектральных поддиапазонах, включающий и поддиапазон, который попадает в область поглощения молекулярным кислородом фоновой интенсивности ВУФ-излучения на освещенной солнцем стороне, а именно полосы Лаймана-Бирджа-Хопфелда (Lyman-Birge-Hopfield /LBHs/). Получение изображений ВУФ-эмиссий во всем авроральном овале с орбит КА типа Молния, и его отдельных участках с низких полярных орбит с контрастом не менее 2 даже на освещенных сторонах (при наблюдениях в направлениях близких к нормали к Земле), стало современным инструментом диагностики состояния магнитосферы и полярной ионосферы. Методика этих измерений была впервые проверена при наблюдениях с орбиты КА КЮОККО в 1978 г. [Kaneda, 1979], а позднее ее преимущества подтверждены результатами наблюдений с орбиты КА DE-1 [Frank et al., 1988]. Наибольший прогресс в развитии методики получения и использования изображений авроральных эмиссий для диагностики состояния полярной ионосферы был достигнут в орбитальных проектах POLAR [Germany et al., 1998], IMAGE [Frey et al., 2003], HILAT [Huffman and Meng, 1981], Polar Bear [Paxton and Meng, 1989]. Особо хочется упомянуть китайский проект на орбите КА Fengyun-3D [Zhang et al., 2019, см. Fig.3], в котором авторы выбрали вариант поперечной (относительно направления полета) схемы строчной развертки в двух независимых каналах изображающего спектрографа, и получения авроральных ВУФ-эмиссий, с взаимодополняющими друг друга углами поля зрения. Примерно такой вариант схемы наблюдений с использованием двух взаимодополняющих (по углу) имаджеров, оптические оси которых расположены в плоскости, перпендикулярной направлению полета, ранее был предложен в (рис. 4 в [Кузьмин и Чиков, 1995]).

Методически наиболее информативными интервалами времени для исследований авроральных процессов с орбит нескольких КА на разных высотах являются те, когда происходят квази-одновременные пересечения ими окрестностей одной и той же магнитной силовой линии в конкретном секторе MLT аврорального овала [Кузьмин и Чиков, 2007]. Даже когда один из КА находится на орбите типа Молния, и имаджер, установленный на нем, «видит» весь авроральный овал целиком с большей части его орбиты, то вероятность одновременного получения и отслеживания мелкомасштабных изображений авроральных эмиссий с относительно низких орбит невелика по причине трудностей координации программ работы разных спутников, и особенно в ситуациях, в которых проекция

магнитной силовой линии, пересекаемой разными КА, во время их экспозиции, находилась бы в поле зрения «разновысотных» имаджеров. Тем не менее такой эксперимент реален, и может обеспечить получение новых данных о процессах в магнитосферно-ионосферной системе.

Получение изображений авроральных структур в конкретных эмиссиях, вкуче с одновременными измерениями потоков высыпающихся частиц и градиентов магнитного поля, проводились с относительно низких полярных орбит: КА REIMEI (авроральный имаджер MAC) [Obuchi et al., 2008], КА e-POP (авроральный имаджер FAI) [Cogger et al., 2014] и КА Fengyun-3D (широкоугольный авроральный ВУФ-имаджер WFAI) [Zhang et al., 2019]. Обзор этих результатов был сделан в [Кузьмин и Мерзлый, 2019]. Обратим внимание на то, что в проекте REIMEI было использовано активное управление ориентацией строительных осей КА, так, чтобы в поле зрения каналов имаджера MAC, имеющих угол поля зрения $7,6^\circ$, всегда попадала проекция магнитной силовой линии (м.с.л.) на высотах авроральных эмиссий, а угол поля зрения оптических каналов FAI (26°) на КА e-POP позволял всегда «видеть» области проекций м.с.л. на высотах эмиссий.

Изображения авроральных структур в конкретных ВУФ-эмиссиях, до сих пор получаемые с помощью построчной развертки в сканирующих спектрографах SSUSI вдоль орбит КА серии DMSP, позволяют последовательно контролировать их динамику в конкретных секторах MLT значительной части аврорального овала, происходящую в различных геомагнитных условиях [Paxton et al., 1992, 2002]. Эти изображения уже много лет используются геофизиками разных стран для контроля состояния полярной ионосферы. Проекция магнитной силовой линии (м.с.л.) на высоту свечения, которую пересекают эти КА во время поперечного пространственного сканирования изображающих спектрографов SSUSI, не проецируется моментно в текущую строку развертки, перпендикулярную вектору скорости КА. Эта проекция или «отстает» или «опережает» текущую строку развертки на 10 или более сек [Sotirelis et al., 2013]. За это время КА пролетает более 70 км. Этот методический недостаток, т. е. несинхронность измерений интенсивности ВУФ-эмиссий (SSUSI) и энергетических характеристик высыпающихся частиц (SSJ) в авроральных структурах, и пространственное разрешение (>5 км/пиксель) регистрируемого излучения не позволяют с помощью данных SSUSI исследовать характеристики мелкомасштабных процессов в пределах от 1 до 5 км в наблюдаемых структурах.

Удачная попытка построить информативную методику одновременных измерений энергетических спектров высыпающихся электронов и одновременных наблюдений ВУФ-эмиссий в подножной точке м.с.л. (на высоте наблюдаемой эмиссии), пересекаемой спутником, была осуществлена в комплексном эксперименте, проведенном на корейском КА STSAT-1, ориентированном по 3 осям [Lee et al., 2010, 2011]. В эксперименте с изображающим спектрографом FIMS (Far-Ultraviolet Imaging Spectrograph) на орбите этого КА была использована регулярная коррекция направления наблюдений так, чтобы проекция магнитной силовой линии, пересекаемой КА в полярной зоне, попадала в строку развертки спектрографа (рис. 1-1). Этот КА работал на круговой орбите с высотой ~ 685 км, и углом наклона плоскости орбиты к плоскости экватора $98,2^\circ$. Кроме FIMS, измеряющих ВУФ-эмиссии на этом КА были установлены приборы, измеряющие характеристики плазмы ESA и SST. Геометрия наблюдений авроральных структур, проводимых спектрографом, при которой м.с.л. проецируется в наблюдаемую полосу изображения, а также ход лучей (ray tracing) в FIMS показаны в верхней части рисунка 1-1. На нижней части рисунка вверху слева показаны энергетические спектры (в разных событиях: от диффузных до дискретных «inverted-V») в диапазоне энергий от 1 кэВ до >10 кэВ. Они были измерены одновременно с ВУФ-спектрами (FIMS) на орбите КА STSAT-1.

На рисунке 1-2 друг под другом показаны, энергетическая спектрограмма электронов, полученная с FIMS 02-04-2004 в интервале 22.23.30 UT – 22.26.00 UT (с орбиты КА STSAT-1), и полученная с помощью анализатора ESA (верхняя панель). Под ней – профили потока энергии, направленного вниз (красный цвет), и направленного вверх (черный цвет). На нижней панели показана интегрированная по спектру пространственная развертка интенсивности (в единицах Рэлей) с изображающего спектрографа UFIMS, полученная в рамках его угла поля зрения в пределах $\pm 3^\circ$ от оси спектрографа. Пространственные шкалы показаны в верхнем левом углу черным цветом (10 км – поперек направления полёта и 70 км вдоль направления полёта). На этом изображении хорошо видна мелкомасштабная структура внутри авроральных дуг.

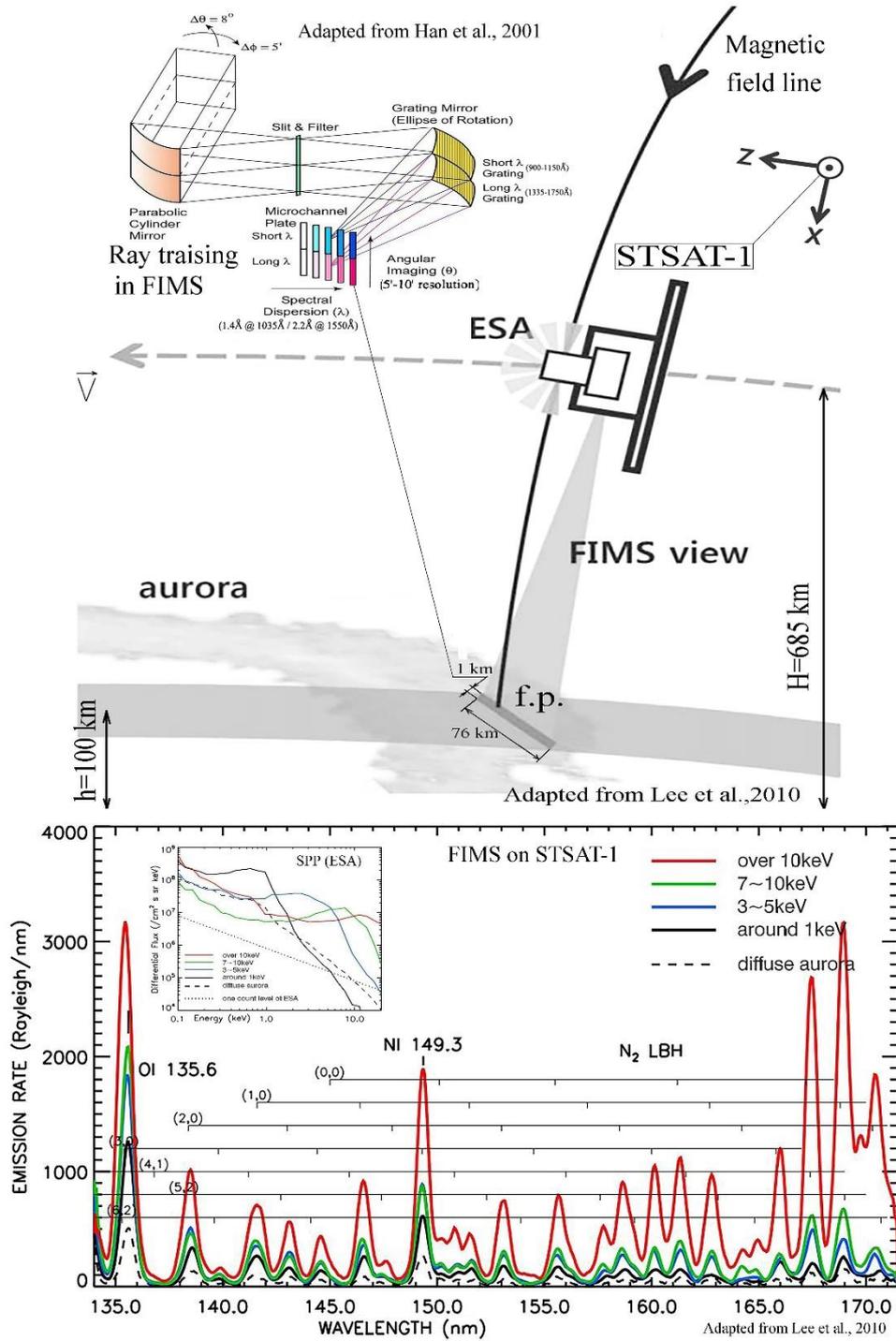


Рис. 1-1. На верхней панели показана геометрия наблюдений авроральных ВУФ-эмиссий с помощью изображающего спектрографа FIMS (Far Ultraviolet Imaging Spectrograph), работавшего в 2003-2004 г. на КА STSAT-1, созданным в Южной Корее (характеристики орбиты см. в тексте). Слева сверху показан ход лучей в оптической схеме FIMS. На нижней панели показаны спектры ВУФ эмиссий, полученные в феврале и октябре 2004 г, когда спектрометром ESA наблюдались inverted-V события в спектрах потоков высыпавшихся электронов, имеющими максимумы на разных энергиях (маркированы разными цветами), которые показаны в левом верхнем углу нижней панели

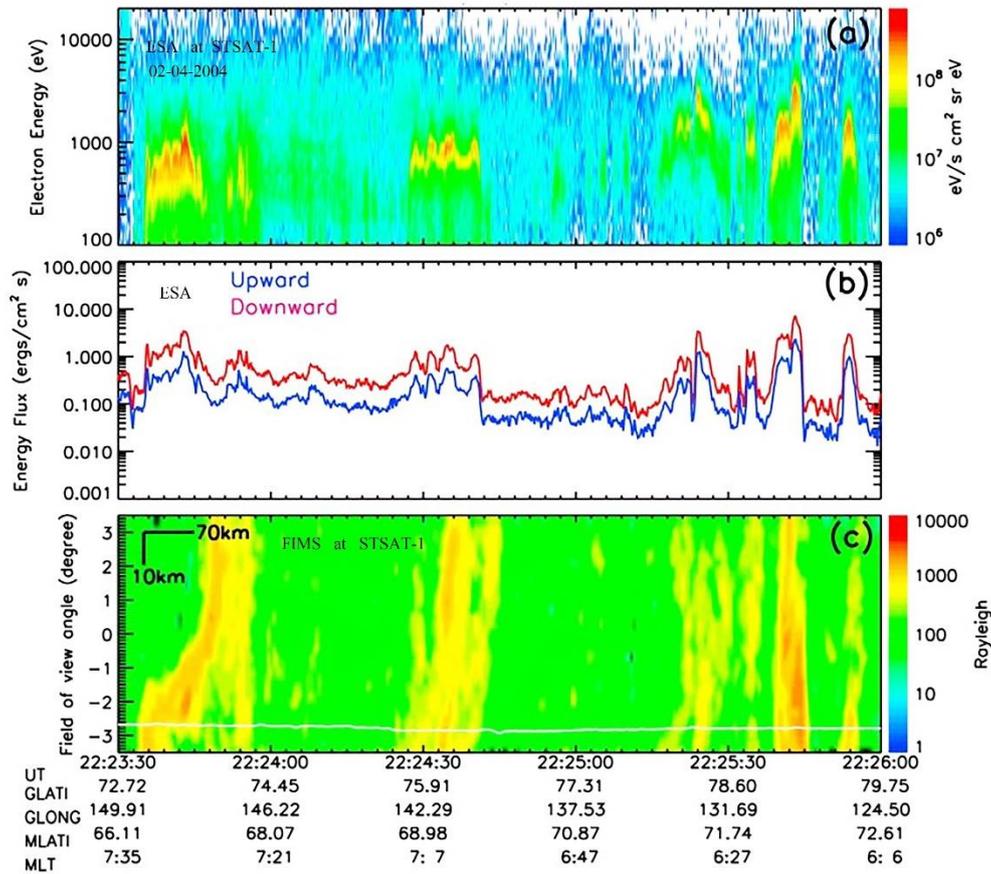


Рис. 1-2 (адаптирован из [Lee et al., 2010]). Рисунок построен на данных, полученных с приборов ESA и FIMS на орбитах КА STSAT-1 02-04-2004, характеристики которых приведены в тексте. На верхней панели (а) в интервале 22.23.30÷22.26.00 UT показана развертка средней энергии (шкала справа) и потока энергии (цветовая шкала справа) высыпавшихся электронов. Под ней показана панель (b), на которой изображены два профиля потока энергии: красным цветом поток энергии высыпавшихся электронов, а черным цветом поток вверх. На панели (c) показана развертка по пространству (в поле углов FIMS, шкала слева), интегрированной по спектру в диапазоне от 134,0 до 171,5 нм интенсивности (шкала в Рэляях справа), измеренной FIMS. Этот рисунок демонстрирует тонкую структуру внутри трех авроральных дуг, пересекаемых, которая отчасти видна и в структуре средней энергии и потока энергии высыпавшихся электронов на верхней панели

2. ЭКСПЕРИМЕНТ АВРОВИЗОР-РОС НА ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ РОС

В ИКИ РАН началась подготовка материалов эскизного проекта эксперимента, связанного с наблюдениями распределений интенсивности конкретных авроральных эмиссий в полярной зоне с помощью комплекса изображающих камер с орбиты РОС [Кузьмин, 2024], названный «Авровизор-РОС». В этом проекте предполагается использование геометрии наблюдений авроральных эмиссий с помощью изображающих камер, направленных в нади, угол поля зрения которых позволит им всегда захватывать проекцию магнитной силовой линии на высотах измеряемых эмиссий, пересекаемой РОС в момент экспозиции изображений. Это возможно при условии построения орбитальной ориентации строительных осей РОС, когда одна из них направлена на центр Земли. Предложение этого проекта было сделано после того, как стало известно об особенности, относительно МКС, одной из планируемых характеристик ее орбиты, т.е. — угол наклона плоскости орбиты РОС к плоскости экватора $i \sim 98^\circ$ (характеристики орбиты РОС см. в Таблице 1). Именно это предложение и доклад на конференции [Соколов и Кузьмин, 2024] послужили основой для мотивации подготовки данной работы. Т.к. при таком угле i орбитальная станция на каждом витке будет пересекать полярные шапки и дважды - авроральные овалы как на севере, так и на юге в разных секторах MLT, предложенный эксперимент может стать источником данных о мелкомасштабных характеристиках полярной ионосферы в различных геомагнитных условиях, а в долгосрочном периоде и при разных уровнях солнечной активности. Такой режим наблюдений с орбиты РОС позволит собрать статистический

материал изображений эмиссий в E- и F-слое полярной ионосферы в многообразных авроральных структурах в разных геофизических и геомагнитных условиях при одновременных измерениях характеристик плазмы в окрестности РОС и фиксации сцинтилляций сигналов навигационных систем, возникающих чаще всего в условиях повышенной геомагнитной активности.

На рисунке 2 условно показан пролет РОС на участке орбиты, пересекающей северный авроральный овал. Станция показана в трех позициях на участке длиной ~400 км в режиме орбитальной ориентации строительной оси (-Z) на центр Земли с точностью $\sim 1,5 \div 2^\circ$. Рисунок построен на фоне лучистой структуры одного из секторов северного аврорального овала над кольским полуостровом (фоновое изображение авроральной структуры взято из опубликованной фотографии, сделанной сотрудником ПГИ РАН В.Ю. Жигановым). В позиции 2 в соответствии со шкалой высот (справа) показана геометрия наблюдений эмиссий двумя монохроматическими авроральными камерами в видимой области спектра, входящими в состав аппаратуры «Авровизор-РОС». Размер наблюдаемой области, обозначен тонкими линиями на двух высотах конкретных: ~110 км (вблизи высоты максимума интенсивности эмиссии $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) первой отрицательной системы в E-слое и ~250÷270 км (вблизи высоты максимума интенсивности эмиссии атомарного кислорода $\lambda 630,0$ нм [OI]) в F-слое. Предварительные характеристики орбиты РОС приведены в табл.1. Спектральные диапазоны изображающих камер, входящих в состав аппаратуры Авровизор-РОС приведены в табл. 2.

Таблица 1. Предварительные характеристики орбиты РОС

Высота орбиты	300÷370 км
Угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора	$\approx 97-98^\circ$
Период обращения	≈ 90 мин
Витков в сутки	15 или 16

Таблица 2. Спектральные диапазоны изображающих камер, входящих в состав аппаратуры Авровизор-РОС

Изображающая камера 1	$\lambda\lambda 140 \div 155$ нм, LBHs (N_2)
Изображающая камера 2	$\lambda\lambda 140 \div 155$ нм, LBHs (N_2)
Изображающая камера 3	$\lambda 427,8$ нм (N_2^+)
Изображающая камера 4	$\lambda 630,0$ нм [OI]

В состав аппаратуры Авровизор-РОС планируется включить: две изображающих камеры в двух поддиапазонах вакуумного ультрафиолета (не показаны на рис. 2) и две изображающих камеры в видимой области спектра, все оптические оси которых соосны и параллельны (рис. 3). Обе ВУФ-камеры имеют угол поля зрения в диапазоне $20^\circ \div 118^\circ$, а обе камеры в видимом диапазоне - $2\omega = 30^\circ$, что говорит о том, что проекция м.с.л. на высоту эмиссий всегда будет находиться в поле зрения камер [Christensen et al., 1987]. Спектральный диапазон измерений одной из ВУФ камер будет находиться в области поглощения нижележащим молекулярным кислородом «фоновых» квантов от возбужденных молекул N_2 солнечным ультрафиолетом на освещенной стороне орбиты, а второй камеры - вне этой области в более длинноволновой области спектра. Эмиссии LBH (в двух спектральных поддиапазонах) условно наблюдаются на высоте ~150 км. Эти диапазоны выбраны в соответствии с методикой дистанционного картографирования потока энергии и средней энергии высыпавшихся электронов по пространственному распределению интенсивностей авроральных эмиссий, рассматриваемой далее (рис. 4, 5). Наблюдения «видимых» эмиссий $\lambda 630,0$ нм и $\lambda 427,8$ нм показаны на высотах 250-270 км и 105 км соответственно на рисунках 2, 3.

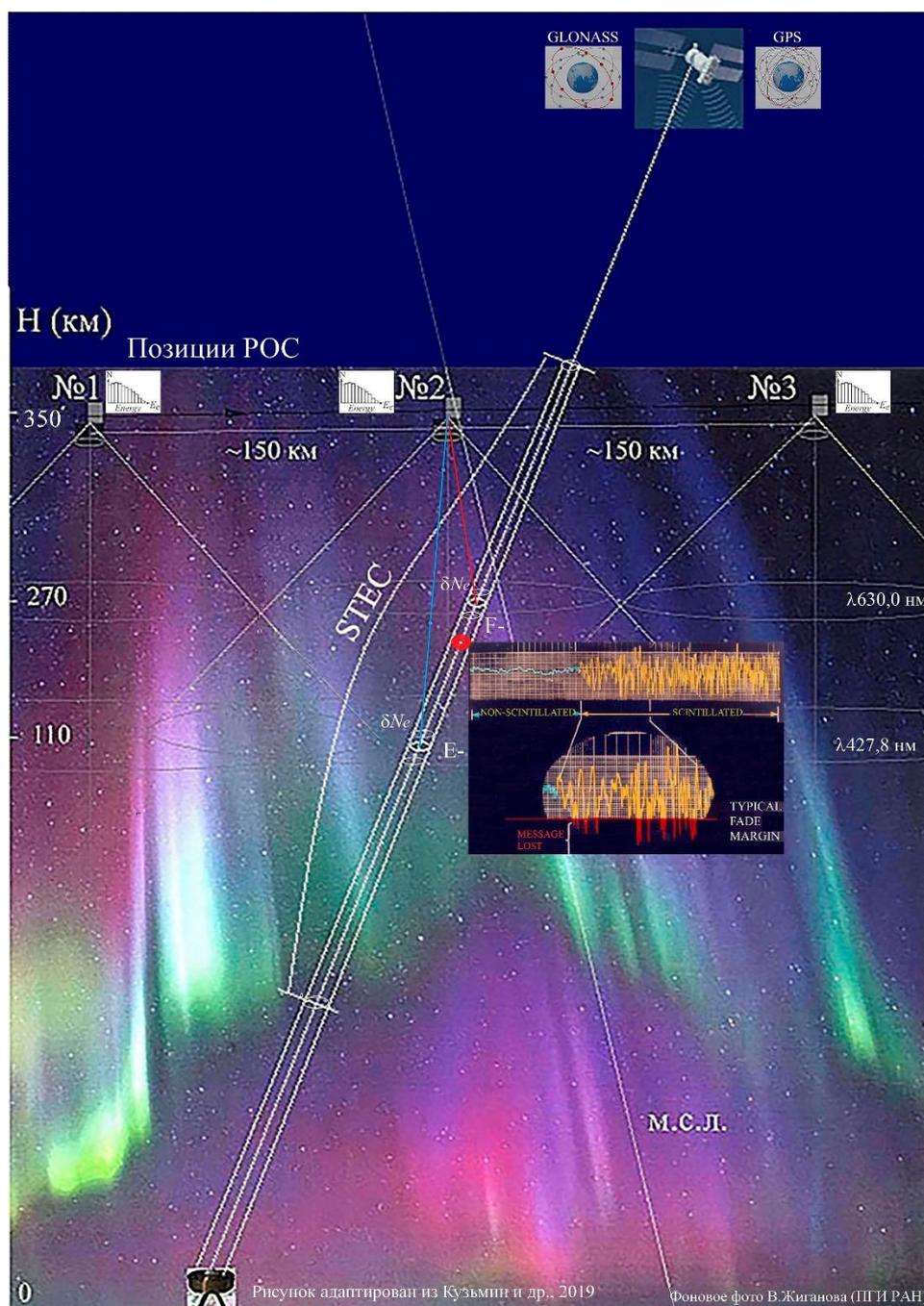


Рис. 2. Схематичное изображение пересечения авроральной структуры перспективной российской орбитальной станцией (РОС), летящей на высоте ~ 350 км, в трех последовательных позициях приблизительно на расстоянии 150 км друг от друга. Показана геометрия наблюдений пространственного распределения интенсивности структур авроральных эмиссий двумя монохроматическими изображающими камерами, входящими в состав аппаратуры «Авровизор-РОС». Условно показаны поля зрения имаджеров авроральных эмиссий $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) на высоте 110 км, и $\lambda 630,0$ нм [OI] на высоте 270 км. Поля зрения двух изображающих камер в ВУФ-эмиссиях не показаны. В каждой позиции рядом с РОС показан спектр высыпающих электронов. В позиции 2 в поля зрения камер попадают проекции радиолуча навигационной системы GLONASS (или GPS), распространяющегося в цилиндре STEC с сечением 1 м^2 (см. текст). Высота навигационных КА показана условно. При пересечении радиолучом градиентов δN_e в авроральной структуре, попадающих в поле зрения изображающих камер, происходят скинтиляции сигналов, распространяющихся между передатчиком и приемником навигационной системы. Момент скинтиляций сигнала отображен условно красным пятнышком в окрестности цилиндра STEC. Направление проекции магнитной силовой линии, пересекаемой РОС в момент экспозиции изображений эмиссий, примерно совпадает с направлением авроральных лучей

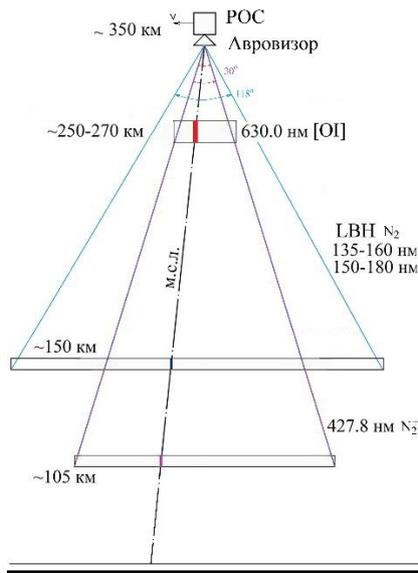


Рис. 3. Схематичное изображение полей зрения изображающих камер Авровизор-РОС, настроенных на авроральные эмиссии. Показаны углы полей зрения четырех изображающих камер, входящих в состав аппаратуры. Две спектрально-узкополосных (полуширина пропускания наблюдаемой эмиссии $\delta\lambda \sim 2$ нм) изображающих камеры в видимой области спектра ($\lambda 427,8$ нм (N_2^+) и $\lambda 630,0$ нм [OI]), имеющих угол поля зрения $2\omega=30^\circ$, и две четырёх-зеркальных изображающих камеры в спектральных поддиапазонах вакуумного ультрафиолета: $\lambda 140 \div 155$ нм (LBH) и $\lambda 150 \div 180$ нм (LBH), имеющих угол поля зрения $2\omega=118^\circ$. Оптические оси всех четырех изображающих камеры параллельны и направлены в надир во время режима орбитальной ориентации строительных осей РОС, когда одна из них «смотрит» в надир. На рисунке показаны высотные диапазоны наблюдаемых эмиссий. Условно показана проекция магнитной силовой линии в области аврорального овала, а также разными цветами маркированы пересечения ею столбиков интенсивности наблюдаемых слоев излучения эмиссий, проектируемых на конкретные единичные пиксели матрицы, установленных в каждой изображающей камере

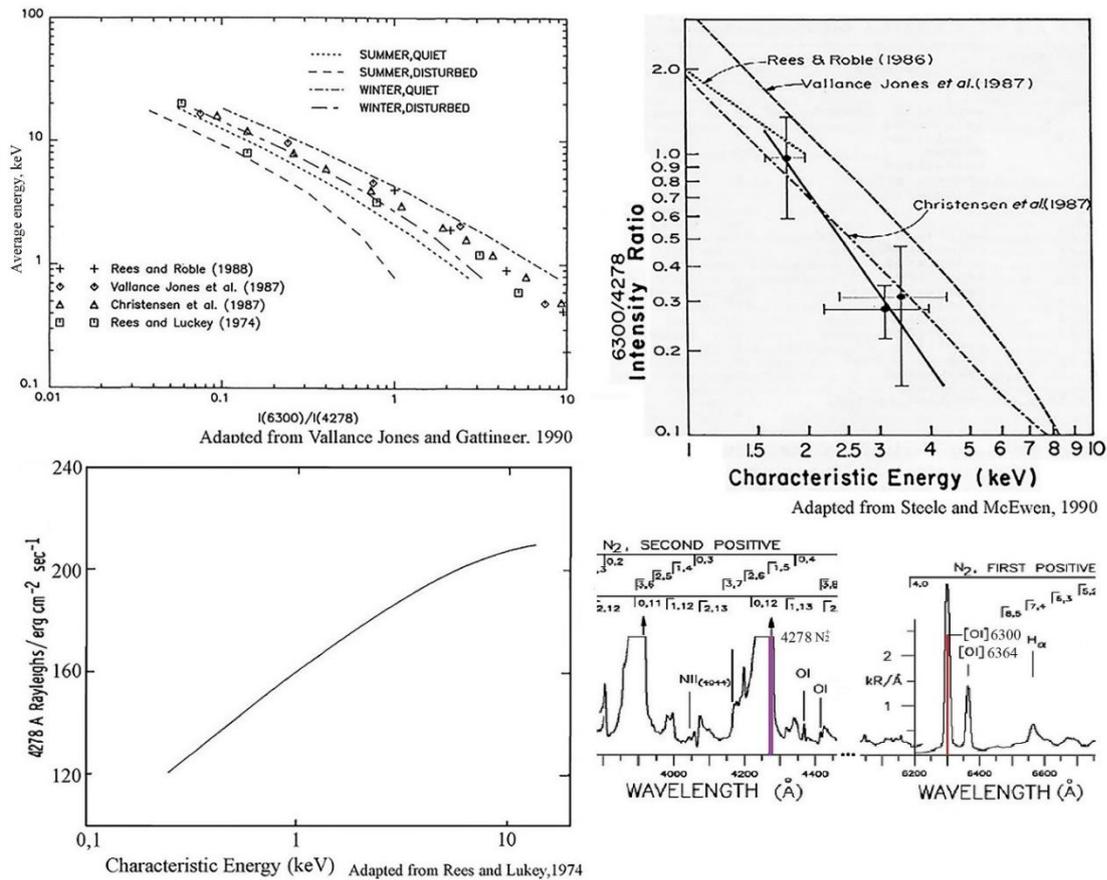


Рис. 4. На нижней левой панели показана зависимость интенсивности авроральной эмиссии $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) от характеристической энергии высыпающих электронов, нормированная на их единичный поток энергии $1 \text{ эрг см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ [Rees and Luckey, 1974]. Эта эмиссия имеет максимум интенсивности на высотах E -области полярной ионосферы. На верхних левой и правой панелях показано две функциональные связи отношений интенсивностей эмиссий $I_{\lambda 630,0}/I_{\lambda 427,8}$ с характеристической энергией высыпающих электронов (справа), и с их средней энергией (слева), полученные в разных модельных работах [Vallance Jones and Gattinger, 1990] и в [Steele et al., 1990] соответственно. Четырьмя различными видами линий показаны [Fig. 12 in Vallance Jones and Gattinger, 1990], соотношения для $I_{\lambda 630,0}/I_{\lambda 427,8} = f(E_{\text{average}})$, полученные при использовании модели, описанной в [Vallance Jones, 1975]. Точками различной формы показаны значения этой зависимости, полученные с помощью других моделей, а соответствующие им ссылки указаны внутри рисунка

На рисунке 2 показано расположение навигационного спутника (GLONASS или GPS), приемника навигационных сигналов на поверхности Земли (высота не в масштабе), и условный локальный цилиндрический объем, в котором распространяется навигационный сигнал и в котором присутствует наклонное полное электронное содержание, получаемое интегрированием вдоль конкретного вектора между источником и приемником сигнала /straight path/, заключенного в наклонном (относительно вертикали к земле) цилиндре с единичным сечением (1 м^2) вдоль луча распространения (STEC, т.е. slant TEC, [Sparks et al., 2000]). Цветом выделены вектора наблюдений изображающими камерами Авровизор-РОС (в пределах угла поля зрения), пересекающие слой эмиссии $\lambda 630,0 \text{ нм}$ (красный), и слой эмиссии $\lambda 427,8 \text{ нм}$ (синий). Градиенты электронной концентрации на каждой из этих высот, обозначенные δNe , условно показаны на пересечении лучей зрения камер и луча распространения сигнала между передатчиком и приемником GLONASS (или GPS). Красным пятнышком обозначено место, где в момент распространения возникали сцинтилляции сигнала (typical fade mergin) или его локальная кратковременная потеря (message lost). В момент экспозиции изображений эмиссий РОС пересекала магнитную силовую линию, обозначенную м.с.л. В маленьких прямоугольниках около каждой позиции РОС условно показаны спектры высыпающихся электронов, измеренные электростатическим анализатором в диапазоне энергий 50 эВ – 20 кэВ. Кроме того, предполагается, что на РОС будет установлен комплекс приборов, измеряющих характеристики плазмы в окрестности станции: трехосный феррозондовый магнитометр в диапазоне $0,5 \div 50 \text{ нТ}$, измеритель электрического поля в диапазоне $\pm 500 \text{ мВ/м}$, а также когерентный радиомаяк на разных частотах в диапазоне 350-1250 МГц.

Справка. ГЛОНАСС — глобальная навигационная спутниковая система, обеспечивающая определение местоположения и скорости в режиме реального времени для пользователей. 24 спутника расположены на круговых орбитах с высотой 19 100 км, углом наклона 64,8 °, и периодом обращения 11 часов 16 минут. Группировка развёрнута в трёх орбитальных плоскостях, с 8-ю равномерно распределёнными спутниками в каждой плоскости.

3. СВЯЗь ИНТЕНСИВНОСТИ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

3.1. Краткий экскурс в авроральную аэронию

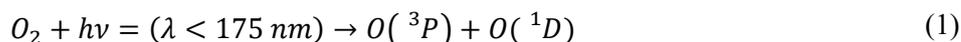
Частицы солнечного ветра (электроны и протоны), увеличив свою энергию в ближней магнитосфере, высыпаются в верхнюю атмосферу и ионосферу и сталкиваются с атомами, молекулами или их ионами. В результате этих столкновений часть компонент на конкретных высотах переходят в возбуждённое состояние, в котором остаются в течение интервала времени, длительность которого зависит: от конкретной компоненты, от высоты, а также от конкретной реакции дезактивации (гашения). «Время жизни» возбужденного состояния, длительность которого у разных компонент может быть от наносекунд, как например у $(\text{N}_2^+)^*$, до нескольких десятков и даже сотен сек, как например $[\text{OI}]^*$. По прошествии этого времени объект столкновения с частицей возвращается в своё нормальное состояние, и при этом испускается фотон. Фотоны, излучаемые в авроральных овалах, составляют структуры свечения на конкретных длинах волн конкретных авроральных эмиссий. В этом процессе могут участвовать и ряд фотохимических реакций, например диссоциативная рекомбинация и др. (см. [Иванов и Сергиенко, 1992]). Из-за того, что атомы, молекулы и их ионы имеют разную концентрацию на разных высотах, на которых могут происходить разные фотохимические реакции, интенсивности авроральных эмиссий имеют максимумы в разных интервалах высот до того, как произойдет дезактивация при столкновении с «гасящими» компонентами верхней атмосферы. (см. монографию [Chamberlain J.W.,1961], переведённую на русский язык под редакцией проф. Красовского В.И. в 1963 г., и [Козелов и др., 2002]. С множеством фотохимических реакций, приводящих компоненты верхней атмосферы и ионосферы в возбужденное состояние, а также реакций дезактивации (гашения) можно ознакомиться в [Solomon et al.,1988; Иванов, 2001; Dashkevich et al., 2017].

3.2. Функциональная связь потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов с интенсивностями конкретных авроральных эмиссий

Базовый алгоритм оценки энергетических характеристик высыпающихся электронов по интенсивности конкретных авроральных эмиссий в видимой и ВУФ-областях спектра построен на том, что средняя энергия потока высыпающихся электронов может определяться через механизм потерь энергии, который зависит от высоты. Методика дистанционного картографирования энергетических характеристик высыпающихся электронов основывается на функциональной связи интенсивности конкретных авроральных эмиссий (как видимой, так и в ВУФ-областях спектра) с потоком энергии высыпающихся электронов, а отношений интенсивности этих эмиссий — со средней энергией электронов. Эта методика была многократно проверена во многих зарубежных орбитальных проектах, например: HILAT; DE-1; Polar; Image и др., а также на советских спутниках «Ореол-3» и «ИК-Болгария-1300», ссылки на которые приведены в [Кузьмин и др., 2018; 2019; 2021].

Зависимости, с помощью которых можно получать значения потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов из величин интенсивностей конкретных эмиссий, были выведены в моделях транспорта высыпающихся из ближней магнитосферы заряженных частиц, проходящих через полярную верхнюю атмосферу и ионосферу [Rees and Luckey, 1974; Strickland et al., 1983; Solomon et al., 1988; Steele and McEwen, 1990; Vallance Jones and Gattinger, 1990; Иванов и Сергиенко, 1992; Germany et al., 1998; Козелов и др, 2002]. В этих модельных соотношениях рассматриваются конкретные авроральные эмиссии в видимой и ВУФ-области спектра. На рисунке 4 (левая верхняя панель), адаптированным из [Vallance Jones and Gattinger, 1990], показана серия зависимостей $I_{630} [OI] / I_{427,8} (N_2^+)$ от средней энергии $E_{average}$ (кэВ) высыпающихся электронов, смоделированных с использованием Rees-type model [Vallance Jones, 1975]. Они рассчитаны для четырех видов геофизических условий (спокойных летом; возмущенных летом; спокойных зимой; возмущенных зимой) при Максвелловском распределении высыпающихся электронов, для которого $E_{average} = 2 \cdot E_{characteristic}$. На правой верхней панели показаны зависимости $I(6300)/I(4278) = f(E_{characteristic})$ из [Steele et al., 1990], которые были адаптированы из приведенных в [Кузьмин и Мёрзлый, 2019]. На нижней панели слева показана зависимость интенсивности авроральной эмиссии $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) от характеристической энергии высыпающихся электронов, нормированная на их единичный поток энергии Fe в единицах $\text{эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ [Rees and Luckey, 1974]. Максимум интенсивности этой эмиссии находится на высотах E-области полярной ионосферы. Внизу справа показаны участки спектра видимой области, где расположены эмиссии $\lambda 630,0 [OI]$ и $\lambda 4278 N_2^+$, используемые для диагностики энергетических характеристик высыпающихся электронов, т.е. потока энергии Fe и средней энергии E_{av} .

Зависимость потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов от интенсивностей ВУФ-эмиссий показана на рисунке 5. В работе [Strickland et al., 1983] были смоделированы зависимости интенсивностей авроральных эмиссий в ВУФ-области спектра от E_{av} и Fe высыпающихся электронов, которые позднее сравнивались с экспериментальными данными, полученными в проектах на орбитах КА Polar, Image, DMSP, Fengyun. Авроральный спектр в области вакуумного ультрафиолета в диапазоне 117,5÷152,5 нм, полученный с платформы зондирующей ракеты, адаптированный из [Strickland et al., 1983], показан на рисунке 5 (вторая панель сверху в левой колонке). Пунктиром обозначена зависимость от длины волны сечения поглощения молекулярным кислородом ВУФ-квантов, возбужденных солнечным ультрафиолетом в спектральной области континуума. Это поглощение носит имя Шумана-Рунге (Schumann-Runge), открытого немецкими учеными Victor Schumann and Carl Runge, максимум которого расположен примерно на длине волны 140 нм в соответствии с реакцией, изображенной на рисунке 5 (вторые сверху правая и левая панели) [Nicolet M., 1981; Gies et al., 1982].



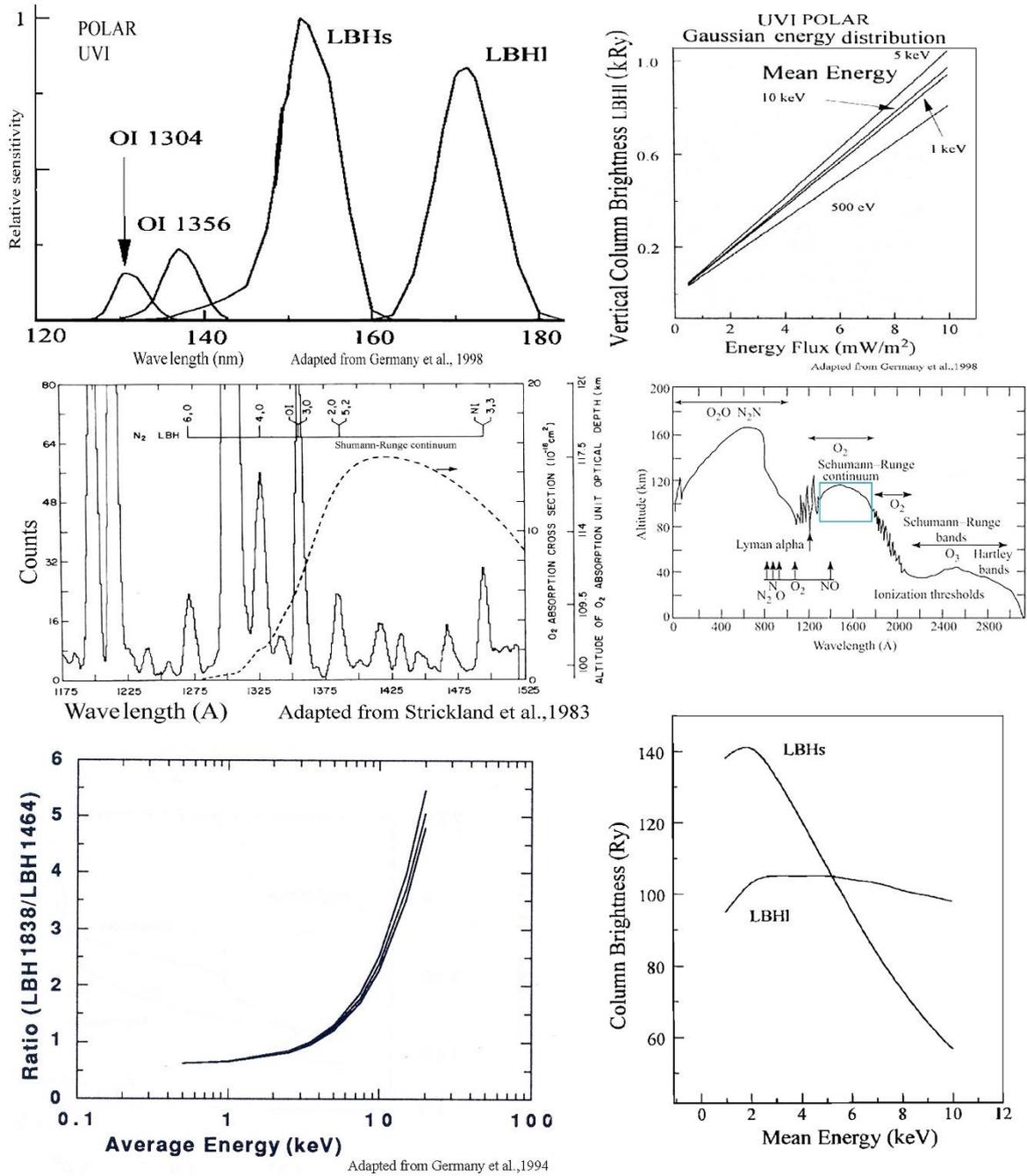


Рис. 5. На средней левой панели показан спектр полярного сияния в ВУФ-диапазоне, полученный Feldman P.D. (частное сообщение, 1981), в эксперименте со спектрометром, установленном на ракете, направленным вниз на излучающую область. Пунктирной кривой обозначена зависимость от длины волны континуума поперечного сечения поглощения фоновых ВУФ-фотонов молекулами O₂ в масштабе шкалы высот оптической глубины в км. Его позиция на графике обведена синим прямоугольником на правой средней панели, где показаны все области поглощений. Здесь же показана зависимость от длины волны сечений поглощений различных компонент атмосферы во всей ВУФ-области, включая и область континуума Шумана-Рунге, обведенной синим цветом. На верхней левой панели показаны полосы пропускания оптической системы аврорального ВУФ-имажера UVI, работавшего на орбите КА POLAR. На правой верхней панели показана функциональная связь потока энергии с интенсивностью полос LBHI для различных средних энергий высыпающихся электронов (с Гауссовским распределением по энергии) в диапазоне средних энергий от 500 эВ до 10 кэВ. На левой нижней панели – функциональная связь отношения интенсивностей конкретных полос LBH ($\lambda 138$ нм)/LBH ($\lambda 146,4$ нм) со средней энергией электронов

Именно это свойство подстилающего слоя молекулярного кислорода позволяло (с контрастом >2) наблюдать динамику состояния всего аврорального овала, включая его освещенную часть, с орбит КА: DE-1, Viking, Polar и Image [Frank and Craven, 1988; Anger et al., 1987; Huffman, 1992; Germany et al., 1998; Frey et al., 2003]. С более низких орбит с полярным углом i наклона плоскости орбиты к плоскости экватора измерялись интенсивности ВУФ эмиссий в локальных освещенных секторах MLT (Magnetic Local Time) в проектах на КА HILAT, Polar Bear др. На правой верхней панели рисунка 5 приведены зависимости энергетических характеристик высыпающих электронов в логарифмическом масштабе для трех значений $F_{10,7}$ (плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см (частота 2800 М Гц), и индекса A_p (показатель среднесуточного уровня геомагнитной активности): $F_{10,7}=75, A_p=4$; $F_{10,7}=110, A_p=20$; $F_{10,7}=200, A_p=100$. На правой нижней панели – смоделированная функциональная связь интенсивностей в поддиапазонах L_{BH_s} и L_{BH_l} (в единицах Рэлей) и средней энергии высыпающих электронов в линейном масштабе. На правой верхней панели показана функциональная связь интенсивности эмиссии L_{BH_l} с потоком энергии высыпающих электронов для разных средних энергий от 500 эВ до 10 кэВ. На левой нижней панели – зависимости отношения эмиссий $I_{L_{BH_l}} / I_{L_{BH_s}}$ от средней энергии для Гауссовского распределения высыпающих электронов, а также на правой нижней панели зависимости $I_{L_{BH_l}}$ и $I_{L_{BH_s}}$ от средней энергии (в кэВ) для сравнения, выведенные при помощи модели [Strickland et al., 1983] в [Germany et al., 1998] и [Germany et al., 1994a]. Полосы пропускания фильтров имаджера UVI на КА POLAR для справки показаны на верхней левой панели рисунка 5. Обратим внимание, что более длинноволновая часть полос L_{BH} , т.е. L_{BH_l} находится вне области поглощения Шумана-Рунге, а более коротковолновая часть – в области максимума поглощения (см. средние панели на рисунке 5 слева и справа).

3.3. Мелкомасштабные авроральные структуры и ионосферные проводимости

Пример фотографий тонких структур полярных сияний ($0,1 \div 1$ км), которые, скорее всего, связаны с нелинейными инерционными волновыми структурами Альфвена был приведен на Fig.1 в [Stasiewicz et al., 2000]). При этом характерный размер ~ 100 м соответствует типичной инерции электронов в верхней части полярной ионосферы. Ранее результаты оптических наблюдений толщин структур полярных сияний с высоким разрешением в [Maggs and Davis, 1968] показали, что наиболее вероятное их значение в авроральных дугах составляет около 100 м. Эти результаты были подтверждены наблюдениями, опубликованными в [Trondsen et al., 1997; Trondsen and Cogger, 1998], которые нашли аналогичное среднее значение толщин дуг.

Для того чтобы оценивать состояние мгновенной трёхмерной токовой системы в полярной ионосфере как в глобальном масштабе (рис. 6 средняя панель справа), так и в локальных секторах, а также пространственное распределение Джоулева нагрева, динамично меняющихся в течение суббурь, необходимо знание мгновенных ионосферных проводимостей в разных масштабах как по всей полярной области, так и в ее отдельных секторах MLT [Coumans et al., 2004]. Поэтому результаты картографирования значений ионосферных проводимостей могут обеспечивать возможность исследований природы взаимовлияния ионосферы, термосферы и магнитосферы в различных условиях. Это можно видеть и из моделей ионосферной электродинамики и конвекции, в которых в качестве начальных условий требуются данные изменений распределений проводимости [см. например, Richmond and Kamide, 1988].

Проводимости могут быть выведены, как из данных наземных радарных наблюдений (см., например, [Robinson et al., 1987, 1989, 1992]), так и из данных, полученных с орбит (см. например [Watermann et al., 1993]). Чтобы определять интегрированные по высоте проводимости дистанционно, необходимо знание энергетических характеристик потока высыпающих электронов. В [Germany et al. 1994a] было показано что, т.к. интенсивности авроральных эмиссий, нечувствительны к выбору энергетического распределения, то принципиальным элементом методики является оценка потока энергии и характеристической энергии высыпающих частиц.

Далее приводим формулы проводимостей, и покажем возможность картографирования интегрированных по высоте проводимостей дистанционно с помощью технологии получения изображений авроральных эмиссий, получаемых с разных орбит через пространственные распределения энергетических характеристик высыпающих частиц, которые картографируются по данным интенсивности конкретных эмиссий.

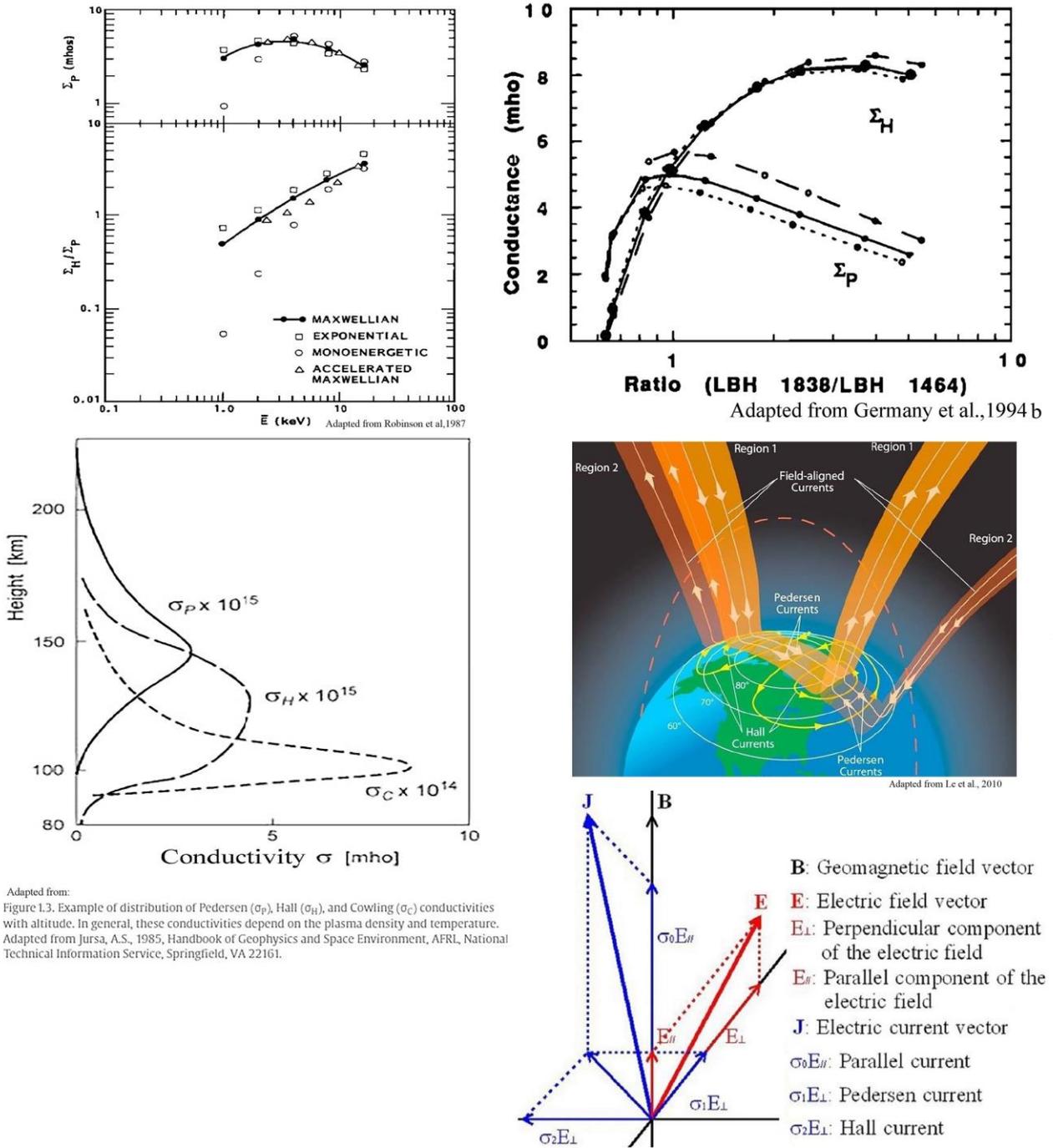


Рис. 6. На левой панели верхней панели друг под другом – модельные зависимости интегрированных по высоте проводимостей Σ_p (в сименсах) и отношения Σ_p / Σ_H от средней энергии \bar{E} выпадающих электронов, а на правой верхней панели – функциональная связь Σ_p и Σ_H с отношением интенсивностей интенсивностей полос $I_{LBH}(183.8 \text{ нм})/I_{LBH}(146.4 \text{ нм})$, рассчитанная специально для ВУФ-имаджера UVI в орбитальном проекте Polar [Germany et al., 1994b]. Внизу слева – высотные профили проводимостей, взятые из справочника 1985 г. Справа в середине схема токов в Педерсена и Холла в полярной ионосфере [Le et al., 2010], внизу справа расположение единичных векторов тока в пространстве полярной ионосферы, связанного с электрическим и магнитным полями

3.3.1 Формулы проводимостей

В работе [Germany et al., 1994b], посвящённой определению ионосферных проводимостей, интегрированных по высоте из авроральных ВУФ-изображений, сделан акцент на том, что ключевым аспектом методики дистанционной диагностики их состояния стала возможность контролировать энергетические характеристики (поток энергии и среднюю энергию электронов) по распределениям авроральных эмиссий. В англоязычной литературе принято называть проводимости в единице объёма – conductivity (Siemens/m), а интегрированные по высоте – conductance (Siemens) в ед. SI (S – англ., см – русск.).

Рассмотрим формулы проводимостей:

$$\sigma_P = \frac{e}{B} \left[n_e k_p^e + \sum_i n_i k_p^i \right] \quad (2)$$

$$\sigma_H = \frac{e}{B} \left[n_e k_H^e - \sum_i n_i k_H^i \right] \quad (3)$$

где коэффициенты подвижностей k являются функциями отношений частоты столкновений ν и гирочастоты $\Omega = eB/m$ электронов и ионов, ν_{ek} – частота столкновений электронов с нейтралами; ν_{ik} – частота столкновений ионов с нейтралами; а ν_{ei} – частота столкновений электронов с ионами, n_i – концентрация ионов, n_e – концентрация электронов:

$$k_p^e = \frac{(\sum_k \nu_{ek} + \sum_i \nu_{ei})/|\Omega_e|}{1 + [(\sum_k \nu_{ek} + \sum_i \nu_{ei})/|\Omega_e|]^2} \quad (4-1)$$

$$k_p^i = \frac{\sum_k \nu_{ik}/\Omega_i}{1 + (\sum_k \nu_{ik}/\Omega_i)^2} \quad (4-2)$$

$$k_H^e = \frac{1}{1 + [(\sum_k \nu_{ek} + \sum_i \nu_{ei})/|\Omega_e|]^2} \quad (4-3)$$

$$k_H^i = \frac{1}{1 + (\sum_k \nu_{ik}/\Omega_i)^2} \quad (4-4)$$

Поперечные проводимости, интегрированные по высоте, определяются как:

$$\Sigma_{P,H} = \int \sigma_{P,H} dz \quad (5)$$

Интегрирование в (5) перекрывает весь диапазон доступных данных (от 90 до 500 км).

На практике ниже 250 км доминирует частота столкновений ионов с нейтралами, а частота столкновений электронов с ионами начинает давать вклад выше 250 км.

В [Кузьмин и Чиков, 2007] были приведены подробные обзоры эмпирических соотношений для интегрированных по высоте поперечных проводимостей ионосферы, образующихся благодаря потокам как высыпающих электронов (см.(6) и (7)), так и высыпающих протонов (см.(8) и (9)) [Coimans et al., 2004] соответственно, а также анализ вклада энергии электронов и протонов в зависимости от высоты:

$$\Sigma_P^e = \left[\frac{40E_{cp}^e}{16} + (E_{cp}^e)^2 \right] (F_e^e)^{0,5} \quad (6)$$

$$\Sigma_H^e = \left[\frac{18(E_{cp}^e)^{1,85}}{16} + (E_{cp}^e)^2 \right] (F_e)^{0,5} \quad (7)$$

$$\Sigma_P^p = 5,7(F_p)^{0,5} \quad (8)$$

$$\Sigma_H^p = 2,6(E_{cp}^p)^{0,3} (F_p)^{0,5} \quad (9)$$

Проводимости Педерсена и Холла, интегрированные по высоте, с учетом вклада электронов и протонов на ночной стороне тогда можно выразить:

$$\Sigma_P^{e+p} = \left[\frac{40E_{cp}^e}{16} + (E_{cp}^e)^2 \right] (F_e)^{0,5} + 5,7(F_p)^{0,5} \quad (10)$$

$$\Sigma_H^{e+p} = \left[\frac{18(E_{cp}^e)^{1,85}}{16} + (E_{cp}^e)^2 \right] (F_e)^{0,5} + 2,6(E_{cp}^p)^{0,3} (F_p)^{0,5} \quad (11)$$

где выражения E_{cp}^e и E_{cp}^p даны в (4) в кэВ, причем E_{cp}^e может изменяться от 0,5 до 20 кэВ, а E_{cp}^p может изменяться от 2 до 40 кэВ, $\Sigma_P^e, \Sigma_H^e, \Sigma_P^p, \Sigma_H^p$ – в См, а F_e и F_p – в мВт·м².

Солнечная EUV радиация является главным источником ионизации на дневной стороне ионосферы. Вклад EUV радиации добавляется в карты проводимостей, интегрированных по высоте. Определение этих эмпирических формул основывается на фотохимической модели (равновесия) ионосферных проводимостей по данным измерений радаров в Chatanika [Vickrey et al., 1981].

$$\Sigma_P^{sun} = \frac{4,5}{B} (1 - 0,85v^2)(1 + 0,15u + 0,05u^2) \quad (12)$$

$$\Sigma_H^{sun} = \frac{5,6}{B} (1 - 0,9v^2)(1 + 0,15u + 0,05u^2) \quad (13)$$

где $v = \chi/90^\circ$, $u = F_{10,7}/90^\circ$. Солнечный зенитный угол в градусах, поток солнечного излучения 10,7 см в ед. 10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹, магнитное поле в Гауссах, а проводимость в См. Эти формулы нормально работают для $0 \leq \chi \leq 85^\circ$ и $70 \leq F_{10,7} \leq 250$. Тогда на дневной стороне полная проводимость, интегрированная по высоте, будет:

$$\Sigma_{total} = (\Sigma_{sun}^2 + \Sigma_{particles}^2)^{1/2} \quad (14)$$

3.4. Функциональная связь потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов с проводимостями полярной ионосферы, интегрированными по высоте

На рисунке 6 слева внизу показаны высотные профили проводимости ионосферы, адаптированные из Fig.1.3 в справочнике по геофизике и окружающему космическому пространству 1985 г., а справа внизу направления единичных векторов токов в ионосфере по отношению к векторам магнитного (**B**) и электрического (**E**) поля. На левой верхней панели сверху различными значками, соответствующими различным типам спектров высыпающихся электронов, показаны зависимости интегрированной по высоте проводимости Педерсена Σ_P от средней энергии высыпающихся электронов в кэВ, нормированные на единичный поток их энергии, смоделированные в [Robinson et al., 1987], под ней — зависимость отношения Σ_P/Σ_H от их средней энергии. Справа сверху — функциональная связь интегрированных по высоте проводимостей Холла (Σ_H) и Педерсена (Σ_P) с отношением интенсивностей полос LBH, выведенная по результатам, полученным с ВУФ-имаджера UVI на орбите КА POLAR [Germany et al., 1994b].

Примеры глобальных распределений интегрированных по высоте проводимостей в северной полярной зоне показаны на рисунке 7 (левая и правая панели), в координатах MLAT-MLT, рассчитанных на основе ВУФ-изображений авроральных эмиссий, полученных с помощью изображающей камеры WIC и спектрографического имаджера SI с орбиты КА IMAGE как во время

спокойных условий (23.12.2000), так и во время возмущенных условий (12.08.2000). Один из важных результатов, продемонстрированных на рисунке 7 в том, что в спокойных геомагнитных условиях возрастание ионосферных проводимостей вследствие высыпаний протонов может достигать ~50 % (в глобальном масштабе) и до 100% - в отдельных локальных местах аврорального овала. Этот результат стал возможным благодаря изображениям распределений доплеровски сдвинутой линии Ly- α , полученным с орбиты КА IMAGE с помощью спектрографического имаджера SI.

Пример мелкомасштабных проводимостей, интегрированных по высоте, показан на рисунке 8 (см. нижнюю панель справа). Эти проводимости рассчитаны из распределений потока энергии и средней энергии (средняя панель справа), выведенных на основе изображений авроральных эмиссий в видимой области спектра, а именно $\lambda 557,7$ нм [OI] и $\lambda 427,8$ нм (N_2^+), полученных 03-03-2014 на станции Poker Flat (Alaska) в 11.09.50 UT с помощью наземных имаджеров с углами поля зрения 19° и пространственным разрешением 340×340 м пикселей на высоте 110 км, расположенными в Venetie севернее Poker Flat [Grubbs et al., 2018]. Это место показано на карте Аляски (левая панель рисунка 8). На эту карту наложено изображение ВУФ-эмиссии в диапазоне LBH/, полученное с помощью спектрографического имаджера SSUSI с орбиты 53520 КА DMSP F16 03-03-2014 в 10.55 UT (время соответствует примерно середине изображения) с разрешением $\sim 10 \times 10$ км/пиксель. Это изображение демонстрирует состояние большей части аврорального овала. Т.к. SSUSI не предназначен для селекции изображений доплеровски сдвинутой Ly- α , а «картографирует ее интегральную интенсивность, т.е. фоновая + доплеровски сдвинутая, то полученные со SSUSI изображения Ly- α не позволяют сделать корректную оценку вклада высыпавшихся протонов в изображения овала, полученные в других эмиссиях. Условия, соответствующие времени получения изображений авроральных эмиссий, можно видеть на нижней левой панели рисунка (AE-индекс). Это время соответствует началу очередной суббури 03-03-2014.

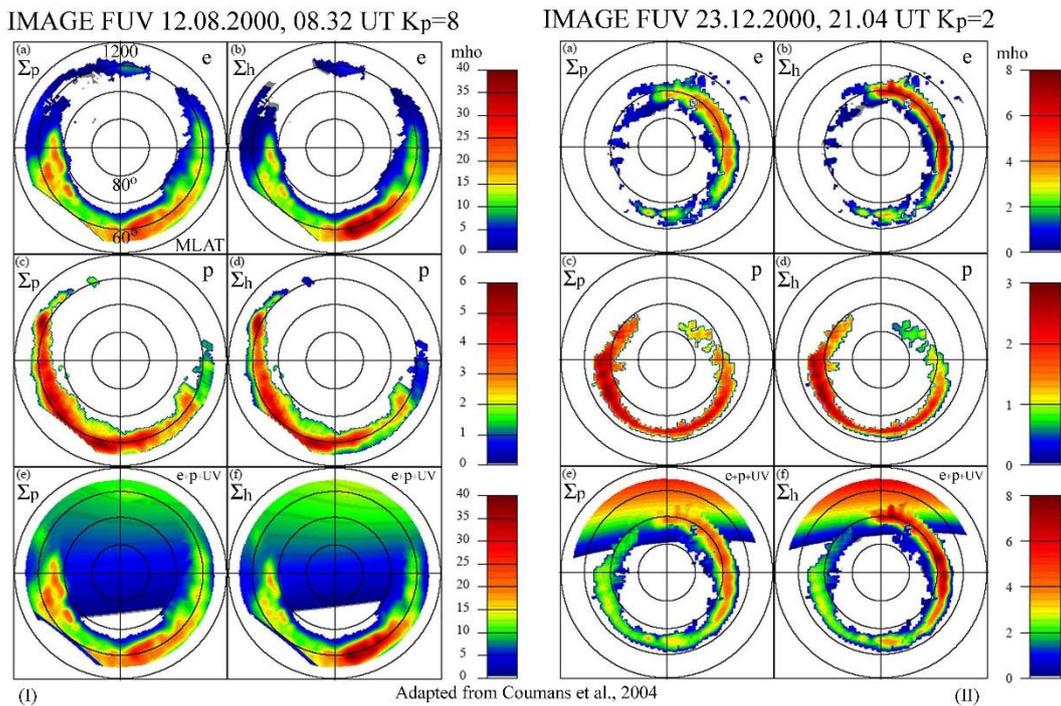


Рис. 7. Как на левой, так и на правой панелях (a)-(f) приведены распределения проводимостей (интегрированных по высоте) в авроральном овале (по данным изображающей ВУФ камеры WIC и изображающего спектрографа SI) 12-08-2000 слева и 23-12-2000 справа, индуцированных высыпаниями авроральных электронов и протонов, полученных как в спокойных геомагнитных условиях (справа), так и в сильно возмущенных геомагнитных условиях (слева) с учетом вклада фоновых проводимостей от экстремального ультрафиолета, на панелях (c) и (d) – проводимости, индуцированные только высыпавшимися протонами, а на панелях (a) и (b) – проводимости, индуцированные только электронами

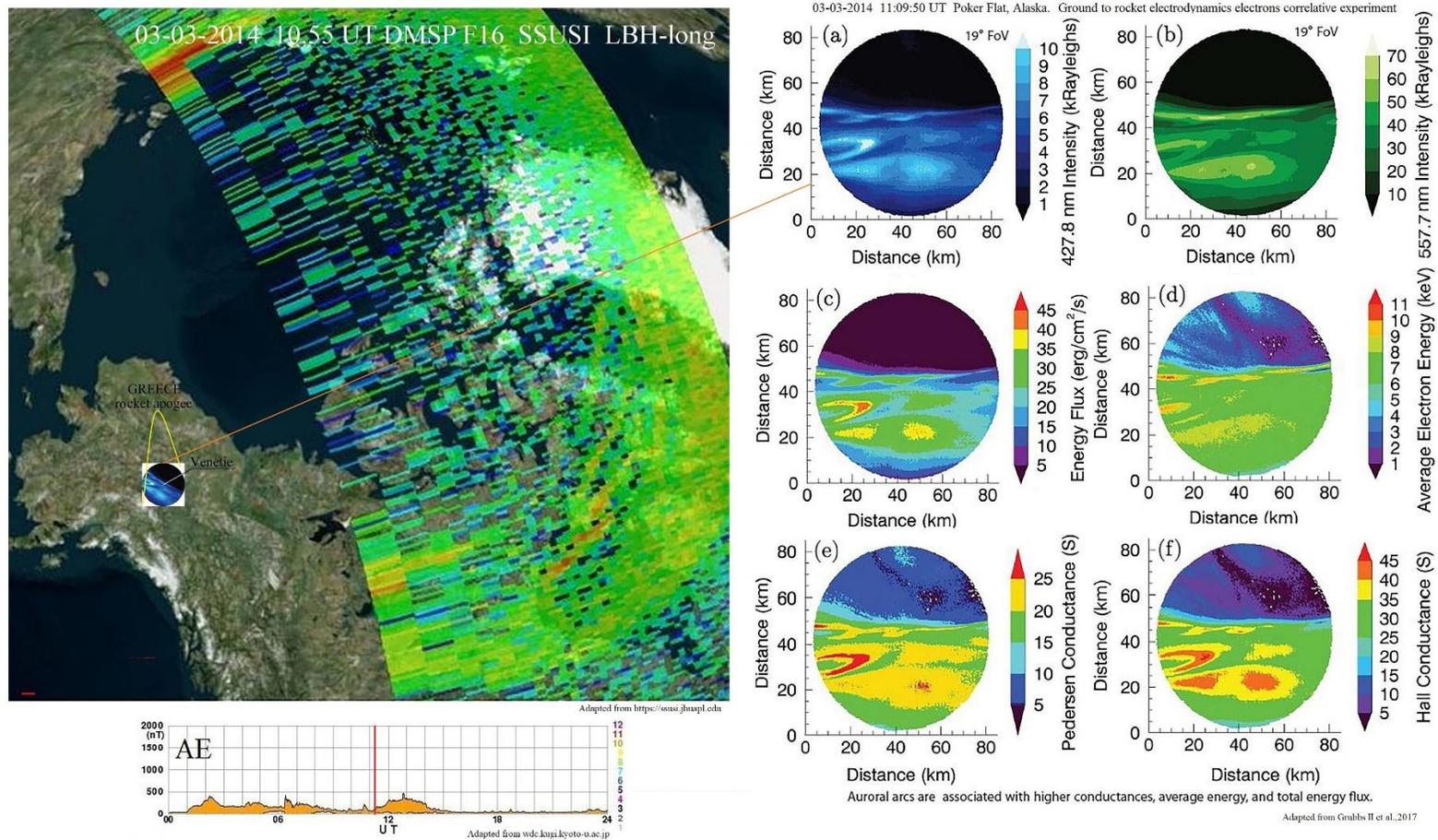


Рис. 8. На левой панели показана карта северной полярной области, включая Аляску, где был проведен комплексный эксперимент, проведенный 3 марта 2014 г. С полигона в Poker Flat была запущена зондирующая ракета, апогей которой (~335 км) был расположен приблизительно над пос. Venetie, откуда наблюдались авроральные эмиссии, изображения интенсивности эмиссий $\lambda 427,8$ нм (N_2^+) и $\lambda 557,7$ нм [OI], которые показаны на панели справа сверху. Под ними - изображения, рассчитанных из них потока энергии Fe и средней энергии высыпавшихся электронов E_{av} ; и ниже - изображения поперечных проводимостей, интегрированных по высоте Σ_p и Σ_h (см. формулы (6) и (7), рассчитанные на основе изображений Fe и E_{av}) (см. текст). На левой панели траектория ракеты условно показана тонкой перевернутой параболой над п. Venetie. На карту левой панели наложено изображение авроральной ВУФ-эмиссии LBH, полученное в относительно близкое время с помощью изображающего спектрографа SSUSI на борту КА DMSP F16, пролетавшего над Аляской в ~10.55 UT 03-03-2014

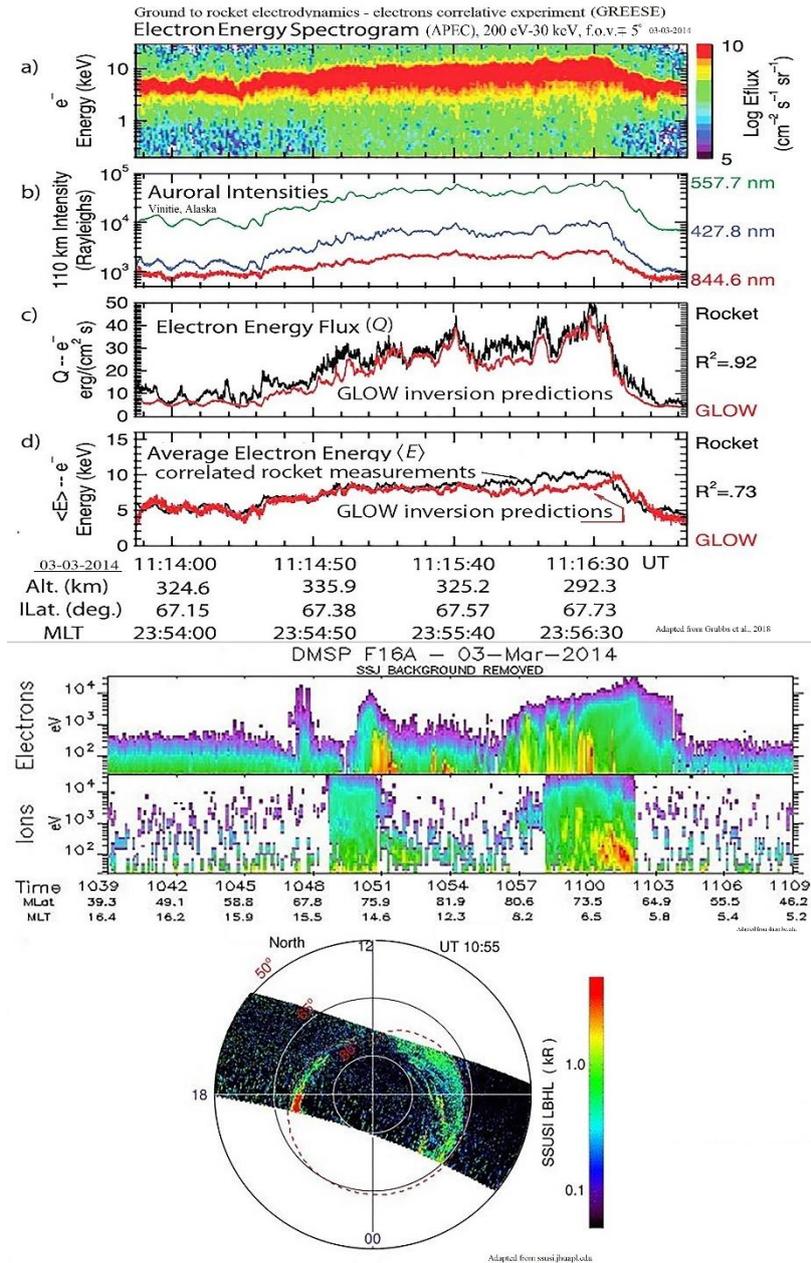


Рис. 9. На панели (b) показаны результаты измерений интенсивности эмиссий полярных сияний, полученные из данных имаджеров, расположенных в пос. Venetie (Alaska), позиция которого примерно соответствовала точке проецирования с высоты апогея ракеты GREESE на землю. На панели (a) – средняя энергия выпадающих электронов (шкала слева), измеренная электростатическим анализатором, дифференциальные потоки энергии выделены цветом (шкала справа). Эти данные получены с помощью спектрометра APES (Acute Precipitating Electron Spectrometer), установленного на платформе зондирующей ракеты [Michell et al., 2016]. Распределения электронов были аппроксимированы как максвелловские с низкоэнергетическими хвостами (по результатам моделирования). На панелях (c) и (d) сравниваются профили общего потока энергии (Q) и средней энергии (E), полученные с ракетной платформы (черный цвет), и предсказанные (с использованием инверсии), а также интенсивности свечения эмиссий (красный цвет). Значения Q и E имеют коэффициенты корреляции 0,92 и 0,73 соответственно. В данных очевидны качественные взаимосвязи между спектральной интенсивностью и характеристиками электронной популяции. Под этими данными показаны развертки спектрограмм электронов и ионов, полученных 03-03-2014 в относительно близкое время с КА DMSP F16, а под ними изображения интенсивности эмиссии в полосах LBHL, полученные в северной полярной области изображающим ВУФ-спектрографом SSUSI в координатах инв.широта-MLT. Экваториальная граница аврорального овала маркирована пунктиром. Позиция пос. Venetie маркирована фиолетовым кружком

Представленные изображения эмиссий, энергетических характеристик высыпающихся электронов и проводимостей интересны еще и потому, что именно в это время 3 марта 2014 года в 11:09:50 UT в Poker Flat была запущена зондирующая ракета GREECE, которая достигла апогея над пос. Venetie, штат Аляска, на высоте примерно 335 км. Набор приборов на платформе состоял из двух электронных спектрометров (Acute Precipitating Electron Spectrometer (APES) [Michell и др., 2016] и электронного спектрометра средних энергий (MESP) [Ogasawara и др., 2017], магнитометра и датчиков электрического поля. На платформе ракеты использовалась система ориентации, позволяющая поддерживать оси полей зрения приборов, измеряющих потоки частиц в пределах 5° от силовой линии магнитного поля на протяжении всего полета. В этой работе использовался набор данных с платформы ракеты, представляющий собой разностный поток энергии электронов, полученный с помощью APES, который измерял поток высыпающихся электронов вдоль магнитного поля. Этот спектрометр измерял электроны в диапазоне от 200 эВ до 30 кэВ с углом обзора $\pm 5^\circ$ и временным разрешением ≈ 10 мс. Горизонтальная составляющая скорости ракеты составляла ≈ 560 м/с, что позволило получить пространственное разрешение $\sim 5,6$ м при измерении электронного спектра на протяжении большей части полёта. Данные, полученные с этой ракеты, отражены на рисунке 9. На четырех панелях этого рисунка друг по другом в одном масштабе времени показаны спектрограмма потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов; профили интенсивности трёх авроральных эмиссий, наблюдавшихся из Venetie (Аляска) 03-03-2014; а также поток энергии и средней энергии, рассчитанные из профилей этих эмиссий. На средней панели рисунка 9 друг под другом показаны спектрограммы высыпающихся электронов и ионов, полученные анализатором SSJ5 с орбиты 53520 КА DMSP F16, пролетевшего над северной полярной областью 03-03-2014 в интервале времени 10.47-11.03 UT. На нижней панели в координатах Λ_0 – MLT показано распределение интенсивности эмиссии LBH, которое прямо пропорционально потоку энергии высыпающихся электронов (см. верхнюю правую панель рисунка 5). Методический опыт, полученный в рассмотренном комплексном эксперименте над Аляской, несомненно, интересен для развития перспективного комплексного эксперимента.

Средняя энергия, $\langle E \rangle$, определялась как:

$$\langle E \rangle = \frac{\int F(E) E dE}{\int F(E) dE} \quad (15)$$

где $F(E)$ дифференциальный поток энергии электронов. В этом исследовании средняя энергия $\langle E \rangle$ используется вместо характеристической энергии E_0 для сравнения, т.к. она может быть легко выведена для всех видов распределений (Kaerpler et al., 2014; Strickland et al., 1989).

Стоит заметить, что изображения (карты) проводимостей Педерсена и Холла, интегрированных по высоте, включают информацию не только о градиентах локальных концентраций электронов и ионов в объемах конкретных магнитных силовых трубок в полярной ионосфере в соответствующих диапазонах высот, но и об их подвижностях k , что представляется важным при дифференциальном анализе высотных распределений Ne в локальных столбах общего электронного содержания (ТЕС или STEС), которые используются при исследованиях причин сцинтилляций сигналов навигационных систем, распространяющихся в толщах слоев ионосферы в различных геомагнитных условиях.

3.5. Корреляция и косвенная связь интенсивностей авроральных эмиссий и полного электронного содержания (ТЕС)

В работе [Nisicjewski, 1987] бы рассмотрен ряда адаптированных профилей интенсивности авроральных эмиссий, полученных с помощью фотометров с наземной станции в Churchill auroral observatory, Manitoba, Canada и обнаружена корреляция ТЕС с интенсивностями авроральных эмиссий в E - и F -области полярной ионосферы. Эти профили были измерены при разных геомагнитных условиях. Одновременно измерялись профили полного электронного содержания (ТЕС) с помощью двух радиомаяков, установленных на КА HILAT методом дифференциальной фазы. Этот метод построен на том, что оба радиомаяка передают сигналы на разных гармонически взаимосвязанных частотах. Общее содержание электронов определяется по частотной зависимости фазы сигналов. Ионосфера имеет тенденцию по-разному изменять фазовую длину пути передаваемых частот, так что две частоты, которые первоначально передавались по фазе, больше не совпадают после

распространения через ионосферу. Следовательно, разница в длине двух путей (ΔP) будет связана с общим содержанием электронов на величину:

$$\Delta P \sim \int N_e ds \text{ радиан} \quad (16)$$

Один из результатов, полученный в этом эксперименте, состоял в том, что градиенты ТЕС практически полностью «отслеживали» градиенты авроральных эмиссий, наблюдаемых фотометрами с Земли во время зон прямой видимости спутника HILAT, пролетавшего над наземной станции Churchill. Корреляция не точна только когда не было использовано наведение приемной антенны на прогнозируемое положение спутника, как например показано на нижней панели справа рисунка 10.

На каждой из 8-и панелей рисунка 10, скомпонованы интенсивности двух авроральных эмиссий: $\lambda 427,8$ нм (N_2^+), имеющей максимум на высотах E-слоя, и $\lambda 630,0$ нм [OI], максимум интенсивности которой находится на высотах F-слоя, полученные с помощью сканирующих по пространству фотометров в Канаде на станции Churchill (Manitoba, Canada) в ноябре и декабре 1984 г. и профили ТЕС с указанием даты и местного времени, полученные одновременно с помощью радиомаяков, установленных на КА HILAT). Метод (называемый методом дифференциальной фазы) получения профилей ТЕС с КА, имеющих угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора более 80° , на которых должны быть установлены не менее двух радиомаяков, основан на том, что радиомаяки передают сигналы на разных гармонически взаимосвязанных частотах. Общее содержание электронов в столбе между приемником и передатчиком определялось с помощью частотной зависимости фазы сигналов. Т.к. ионосфера имеет тенденцию по-разному изменять фазовую длину пути передаваемых частот, то две (минимально) частоты, которые первоначально передавались по фазе, больше не совпадают после распространения через ионосферу. Поэтому разница в длине путей ΔP будет связана с общим содержанием электронов, (см. детали в [Burns and Fremouw, 1970; Niciejewski, 1987; Bassiri, 1990]). Эти профили получены в различных геомагнитных условиях, и тем не менее их корреляция свидетельствует об относительной связи ТЕС с интенсивностью авроральных эмиссий в E- и F-области полярной ионосферы. Следует отметить особенность, наблюдавшуюся на правой нижней панели в отличие от всех других (рис. 10). Она заключается в том, что профиль интенсивности эмиссии $\lambda 427,8$ нм в середине рисунка и ближе к северу не коррелирует с ТЕС в отличие от всех других панелей. В целом профиль ТЕС указывает на значительное увеличение к югу примерно на $1,5 \times 10^{17} \text{ м}^{-2}$ выше фонового содержания электронов в неструктурированной области авроры, наблюдавшегося к северу. В отличие от профиля ТЕС, профиль интенсивности эмиссии $\lambda 427,8 \text{ \AA}$ в E-области имеет пик интенсивности, составляющий около 3 kR., что скорее всего отображает пересечение авроральной дуги осью фотометра. При этом, направление фотометра было почти строго на запад примерно в десяти градусах от линии прямой видимости спутника HILAT и соответственно от направления сигнала радиомаяка, который был установлен на нем. Результат, полученный в этом эксперименте, состоял в том, что градиенты ТЕС практически полностью «отслеживали» градиенты авроральных эмиссий, наблюдаемых фотометрами с Земли во время зон прямой видимости спутника HILAT, пролетавшего над наземной станции Churchill. Корреляция была не точна только когда не было использовано наведение приемной антенны на прогнозируемое положение спутника, как например показано на нижней панели рисунка 10.

ТЕС – это количество электронов в столбе между наземным наблюдателем и спутником на единицу площади поперечного сечения. Общее содержание электронов может быть получено из данных радиомаяков методом дифференциальной фазы. Поэтому на борту РОС должны быть установлены по меньшей мере два радиомаяка, которые передают сигналы на разных частотах, гармонически взаимосвязанных. Общее содержание электронов определяется по частотной зависимости фазы сигналов. Ионосфера имеет тенденцию по-разному изменять фазовую длину пути передаваемых частот, так что две частоты, которые первоначально передавались по фазе, больше не будут совпадать после распространения через ионосферу. Следовательно, разница в длине двух путей (ΔP) будет связана с общим содержанием электронов на пути.

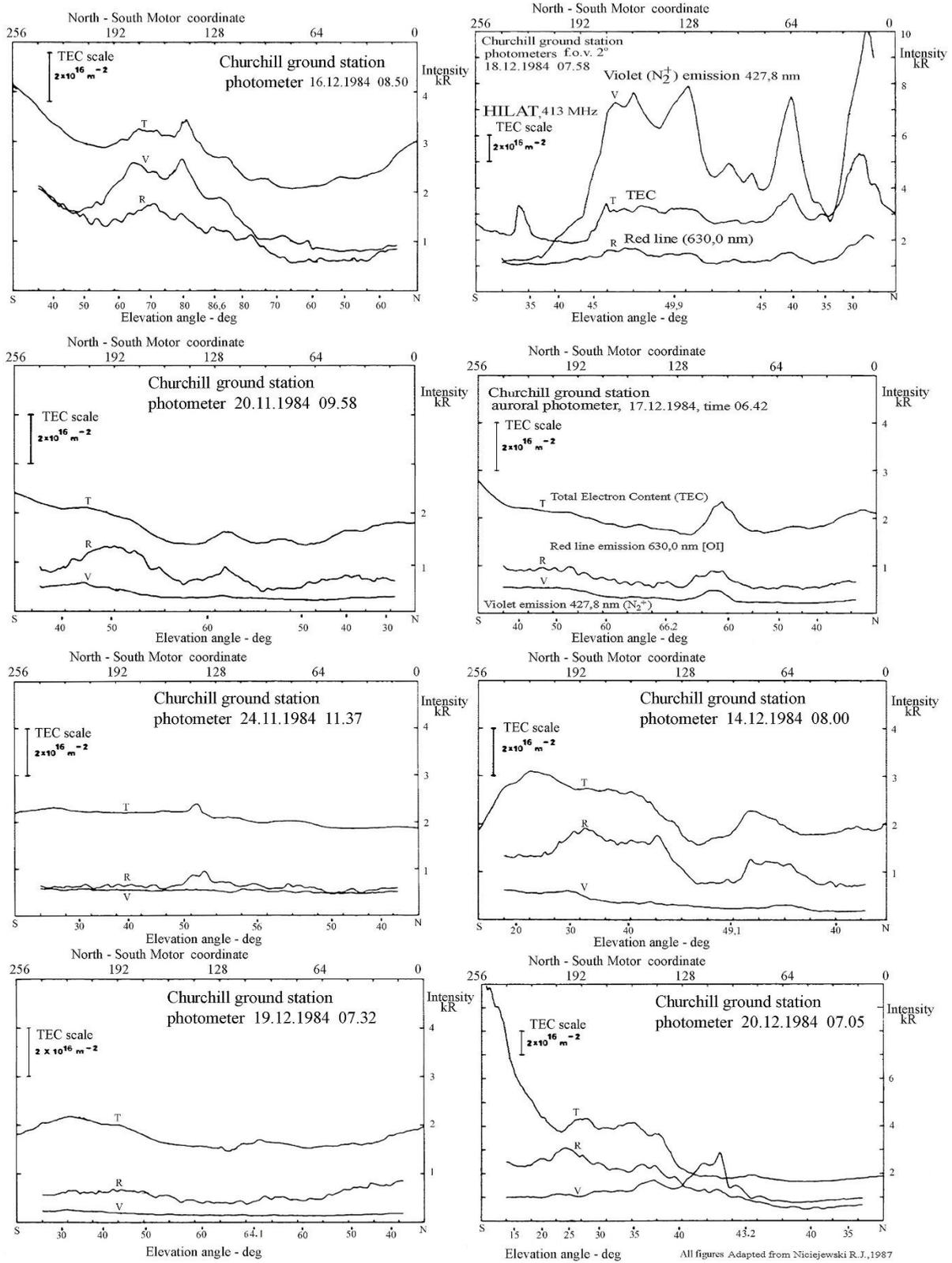


Рис. 10. Фотометрические профили интенсивностей авроральных эмиссий, полученные с наземной станции Churchill, Manitoba, Canada для восьми дат пролетов спутника HILAT над станцией (на рисунке профили не упорядочены по датам): получены 20 ноября; 24 ноября; 14 декабря; 16 декабря; 17 декабря; 18 декабря; 19 декабря; и 20 декабря 1984 г. На каждой панели с интенсивностями эмиссий нанесен профиль ТЕС (реально STEC), полученный синхронно с фотометрическими профилями с помощью двух радиомаяков, установленных на КА HILAT (см. текст)

На картах интенсивности измеряемых эмиссий, которые будут построены по данным, получаемым с изображающих камер аппаратуры Авровизор-РОС с борта перспективной российской орбитальной станции (РОС) будут нанесены проекции позиций измерений (в прямой видимости) абсолютных значений ТЕС на высотах эмиссий с двух радиомаяков, установленных на РОС, которые позволят регулярно получать абсолютную величину ТЕС. При этом при обработке данных и построении этих карт будет показана позиция соответствующего сектора MLT статистического аврорального овала при конкретных геомагнитных условиях во время наблюдений авроральных эмиссий и ТЕС.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ИМАДЖЕРОВ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ В ВУФ-ОБЛАСТИ СПЕКТРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ ИЗОБРАЖАЮЩИМИ КАМЕРАМИ 1 И 2 С ОРБИТЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РОССИЙСКОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ (РОС)

Как уже упоминалось выше в состав аппаратуры Авровизор-РОС входят 4 изображающих камеры: 1, 2, 3 и 4. Первые две камеры (1 и 2), имеющие угол поля зрения $2\omega=20^\circ\div 118^\circ$, относительно широкополосные по спектру. Их оптические схемы подобны, они построены на четырех сферических зеркалах с многослойными оптическими покрытиями, настроенными на отражение ВУФ-излучения в диапазонах полос ЛВН: $\lambda\lambda 150\div 180$ нм, и $\lambda\lambda 140\div 155$ нм соответственно, но отличаются в некоторых деталях. Предварительные варианты зеркальных оптических схем камер 1 и 2 построены с использованием асферических зеркальных элементов, позволяющих повысить разрешение на больших углах от оптической оси [Braunecker et al. (eds.), 2008]. На рисунке 11 показана только оптическая схема изображающей камеры 2 (для $\lambda\lambda 140\div 155$ нм) Абберрационные характеристики варианта схемы для камеры 1 показаны на рисунке 12. Кривизна поля рассчитана для полос ЛВН $\lambda 160$ нм (слева вверху) и $\lambda 180$ нм (справа вверху) рисунок 12 соответственно, а под ними разность хода лучей на разных углах от оптической оси.

Детектор изображений сборный, он состоит из сферического фотокатода в диапазоне ВУФ, люминесцентного экрана, фокона и матрицы. На рисунке 11 конструкция детектора ВУФ-изображений показана условно в виде копии схемы детектора, использованного в изображающей камере WIC в проекте IMAGE [Mende et al., 2000].

Изображающие камеры 3 и 4, настроенные на авроральные эмиссии в видимой области спектра, имеют угол поля зрения $2\omega=30^\circ$. Их оптические схемы аналогичны, разработанным для имаджера «Летиция» в перспективном КА Зонд (программа Геофизика) [Доброленский и др., 2015] показаны на рисунке 11 (средняя и нижняя панель). Оптическая схема камеры 3 включает узкополосный ($\delta\lambda\sim 2$ нм) интерференционный фильтра, максимум, полосы пропускания которого настроен на длину волны авроральной эмиссии $\lambda 427,8$ нм (N_2^+), а камера 4 включает узкополосный ($\delta\lambda\sim 2$ нм) интерференционный фильтр, максимум пропускания которого соответствует длине волны авроральной эмиссии $\lambda 630,0$ нм [OI]. В процессе разработки аппаратуры Авровизор-РОС эти схемы возможно будут модернизированы, а углы поля зрения изображающих камер 3 и 4 расширены до $2\omega\sim 35^\circ$. Предполагается, что регистрация изображений в камерах 3 и 4 будет осуществляться с помощью активно охлаждаемых матриц, имеющих 1024×1024 пикселей, а число бит градаций интенсивности будет увеличено до 14.

Предварительные оптические схемы изображающих камер, настроенных на эмиссии в видимом диапазоне спектра (эмиссии $\lambda 427,8$ нм и $\lambda 630,0$ нм) показаны на рисунке 11 внизу друг под другом, а их характеристики см. в [Доброленский и др., 2015].

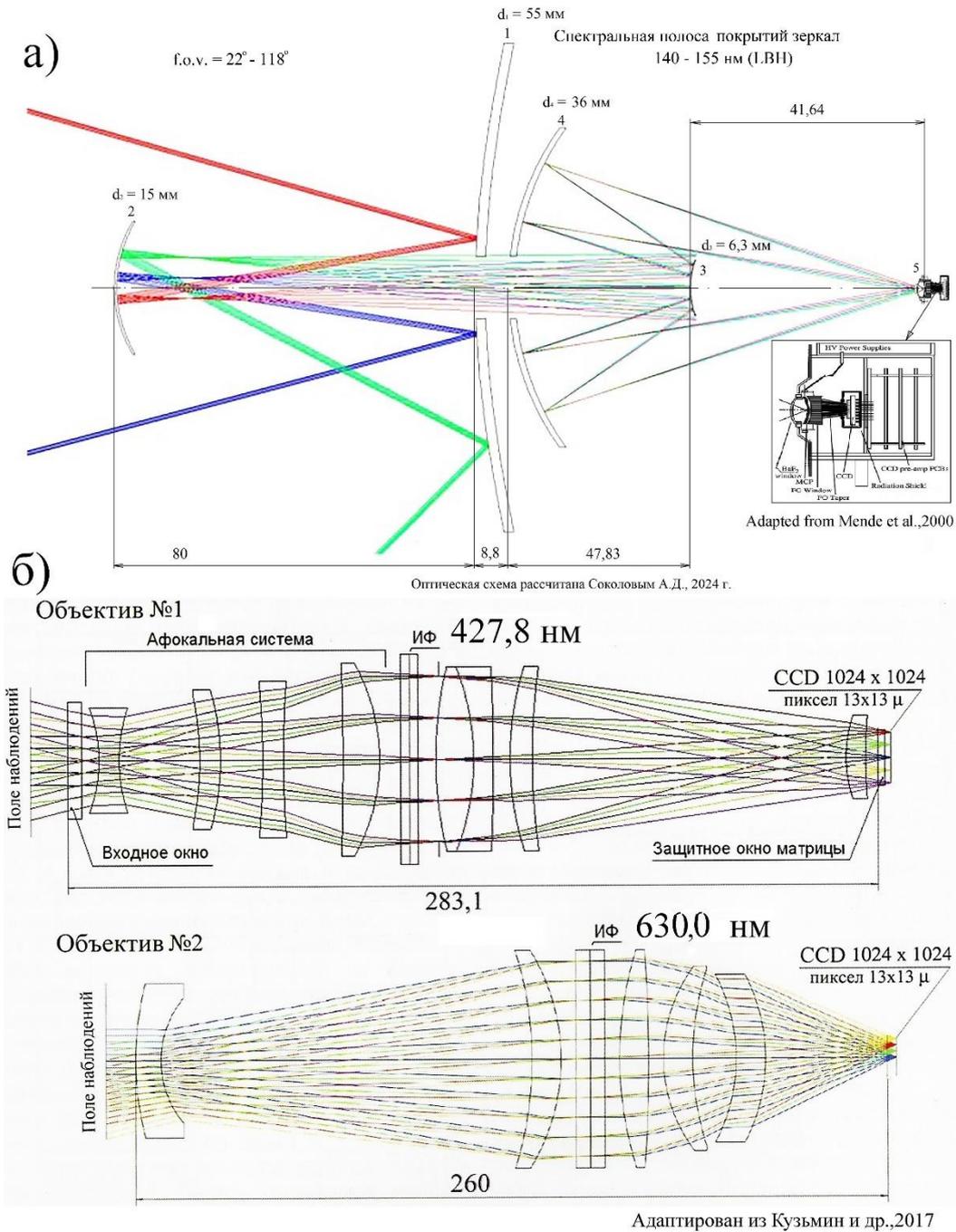


Рис. 11. Предварительные оптические схемы изображающих камер, входящих в состав аппаратуры Авровизор-РОС. На верхней панели показана зеркальная схема изображающей камеры 2 ($\lambda\lambda 140\div 155 \text{ нм}$) с размерами оптических элементов и расстояниями между ними. Угол поля зрения камеры 118° . Регистратор изображений (детектор) показан условно на примере детектора, использованного в ВУФ-камере WIC в орбитальном проекте IMAGE [Mende et al., 2000]. Оптическая схема изображающей камеры 1 ($\lambda\lambda 150\div 180 \text{ нм}$) не показана. Она также имеет угол поля зрения 118° и несколько отличающиеся размеры оптических элементов и размеров между ними от камеры 2. На второй панели показана оптическая схема изображающей камеры 3, имеющей угол поля зрения 30° , интерференционный фильтр ИФ, полоса пропускания которого имеет максимум на длине волны эмиссии $\lambda 427,8 \text{ нм}$ (N_2^+), и матричный детектор изображений 1024×1024 элемента. На третьей панели показана оптическая схема изображающей камеры 4, имеющей угол поля зрения 30° , интерференционный фильтр ИФ, полоса пропускания которого имеет максимум на длине волны эмиссии $\lambda 630,0 \text{ нм}$ [OI], и матричный детектор изображений 1024×1024 элемента. Оптические оси всех четырех камер параллельны

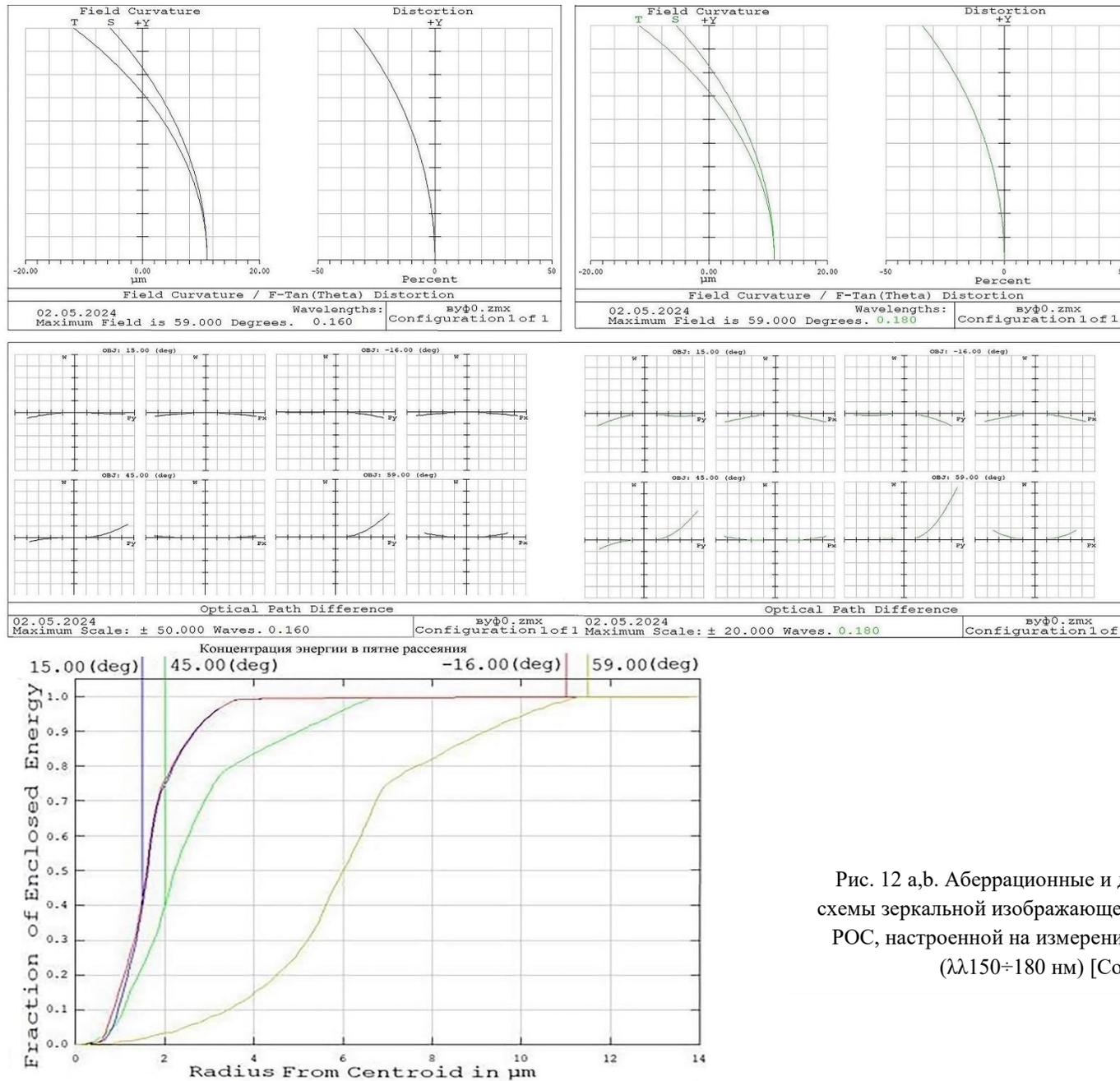


Рис. 12 а,б. Аберрационные и другие характеристики оптической схемы зеркальной изображающей камеры 1 в аппаратуре Авровизор-РОС, настроенной на измерения авроральной ВУФ-эмиссии LBN/ ($\lambda 150 \div 180$ нм) [Соколов и Кузьмин, 2024]

5. СОЗДАНИЕ ПО «ВЕКТОР-М2» ДЛЯ РАСЧЕТОВ СОПУТСТВУЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИИ КАК ВДОЛЬ ОРБИТ КА, ТАК И ДЛЯ ВЕКТОРОВ ДИСТАНЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ С ПОМОЩЬЮ АВРОРАЛЬНЫХ ИМАДЖЕРОВ

ПО «Вектор-М» [Баньщикова и др., 2012] было разработано на основе [Гальперин и др., 1980] по ТЗ ИКИ РАН для расчётов справочных и сопутствующих данных вдоль орбит нескольких околоземных КА (для ц.м.), летающих на разных орбитах одновременно. Высота, широта и долгота в географической и геомагнитной системах координат, имеющих угол наклона плоскости к плоскости экватора, как менее, так и более 90° , а также координат (азимут и склонение) Солнца и Луны.

Дальнейшее развитие ПО «Вектор-Авроризор-РОС» позволит проводить:

1. Расчеты географических и геомагнитных координат позиций ц.м. КА, и направлений строительных осей КА в пространстве с учетом текущих углов отклонения строительных осей КА от направления в надира с использованием данных звездных ориентаторов, установленных на КА и карты звездного неба.
2. Расчеты данных, сопутствующих позициям на орбите РОС (с учетом отклонений мгновенной ориентации строительных осей КА) для множеств векторов дистанционных наблюдений (в рамках заданных углов полей зрения изображающих камер) направленных на разные высоты, соответствующие измеряемым эмиссиям. Эти сопутствующие данные будут включать географические и геомагнитные координаты на заданных высотах и время MLT (magnetic local time), а также углы азимута и склонения Солнца и Луны в точках пересечения векторов с заданными высотами.
3. На теневых участках орбиты расчет интенсивности фоновой засветки имаджеров, установленных на КА, от «света» Луны (при разных фазовых углах Луны) на основе функции Ружье, а также в точках проецирования векторов наблюдений до высот подстилающей поверхности, освещенных Луной, и интенсивности засветки от отраженного света Луны в конкретных точках на основе функции Ружье [Кузьмин, 2020].
4. Расчет сопутствующих данных для конкретных точек расположения различных обсерваторий и научных станций, расположенных на поверхности Земли.
5. Расчеты сопутствующей информации для построения карт (в различных системах координат) дистанционных наблюдений авроральных эмиссий, потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов, ТЕС, и проводимостей, интегрированных по высоте. Блок-схема следующего поколения ПО «Вектор-М» показана на рисунке 13, адаптированном из [Кузьмин и др., 2017].
6. Расчеты прогнозируемой сопутствующей информации вдоль орбит разных КА, предназначенной для планирования одновременных измерений с нескольких КА в разных точках пространства, включая подножные точки ($f.p.$) магнитных силовых линий (пересекаемых КА) на заданных высотах.
7. Поиск, расчет и выбор (по заданным критериям) наиболее информативных ситуаций взаимного расположения нескольких КА для исследований разномасштабных процессов в плазме, и с целью проведения координированных наблюдений.

6. УСЛОВНАЯ СХЕМА ПЕРСПЕКТИВНОГО КОМПЛЕКСНОГО ОРБИТАЛЬНОГО-РАКЕТНОГО-НАЗЕМНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РАЗНОМАСШТАБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В БЛИЖНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ И ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ

В последние десятилетия понимание механизмов и процессов возникновения мелкомасштабных и динамичных структур полярных сияний улучшилось с помощью моделирования и использования современных достижений в построении приборов для наблюдений. Эти достижения включают и развитие методики комплексных измерений, которые базируются на современной технологии построения изображающих камер и получения изображений авроральных эмиссий в

Таблица 3. Параметры орбиты КА Арктика-М:

период обращения вокруг Земли	719,6 минут (12 часов)
тип орбиты	высокоэллиптическая
угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора i	$63,3^\circ$
апоцентр	39424,4 км
перигеум	1036,4 км

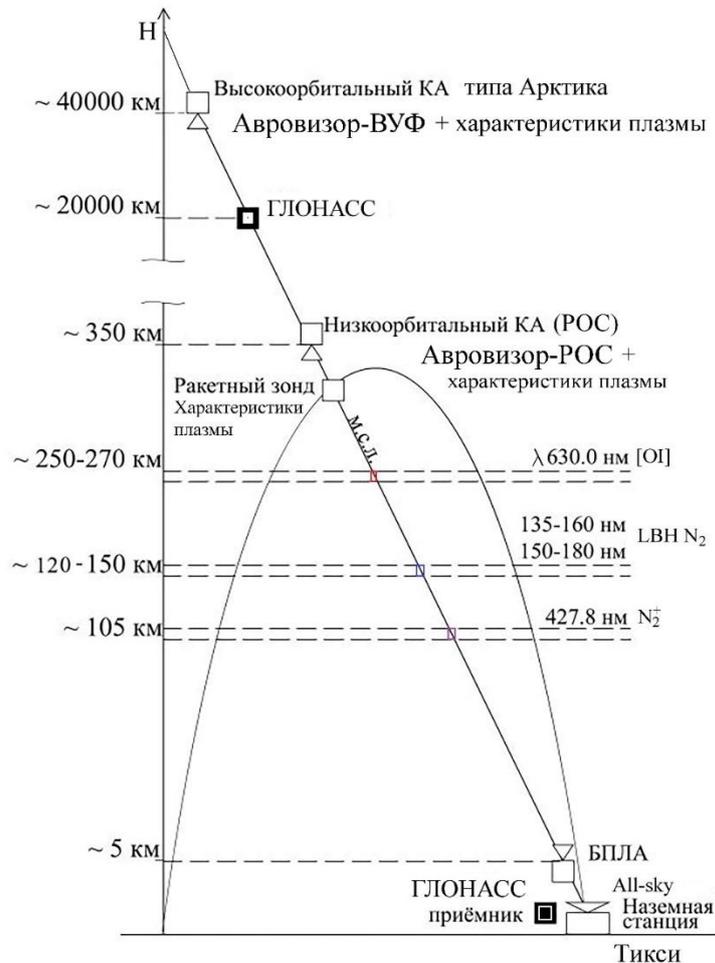


Рис. 14. Условная геометрия орбитальных, ракетного и наземного одновременных измерений и экспериментов, нацеленных на исследования процессов в авроральных структурах полярной ионосферы. Представлена вероятная конкретная ситуация одновременных наблюдений: границ и крупномасштабной структуры ВУФ-эмиссий аврорального овала с орбиты типа Молния (КА Арктика-М) и мелкомасштабных структур авроральных эмиссий в видимом и ВУФ-диапазонах спектра с высоты ~ 350 км российской орбитальной станции РОС, когда пересекаемая ею магнитная силовая линия проецируется в авроральный овал в конкретном секторе MLT в окрестности точки расположения пос. Тикси (Якутия). При скоординированном эксперименте в это же время платформа, отделившаяся от зондирующей ракеты, запущенной с полигона Тикси, пересекает окрестность этой же м.с.л. на высотах 250-300 км. На этой платформе установлен ряд приборов, измеряющих характеристики плазмы на этих высотах. All-sky камера, установленная на БПЛА, летающем над Тикси, настроена на измерения эмиссии $\lambda 557,7$ нм [OI] и «смотрит» в зенит, а пара наземных All-sky камер настроена на измерения эмиссий $\lambda 630,0$ нм [OI], и $\lambda 427,8$ нм (N_2^+).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены элементы методики измерений авроральных эмиссий с орбиты перспективной Российской Орбитальной Станции (РОС), подготавливаемой с целью исследований условий для генерации механизмов сцинтилляций трансполярных сигналов навигационных и других систем, и контроля состояния мелкомасштабных характеристик полярной ионосферы. Показаны эмпирические функциональные связи интенсивностей конкретных авроральных эмиссий в видимой и ближней ВУФ-области с энергетическими характеристиками высыпавшихся из магнитосферы электронов: потоком энергии и средней энергией. Представлены формулы зависимостей проводимостей Холла и Педерсена ионосферы от подвижностей электронов и ионов, а также связи проводимостей, интегрированных по высоте полярной ионосферы с энергетическими характеристиками высыпавшихся электронов, определяемых дистанционно по распределениям интенсивности конкретных авроральных эмиссий. На конкретных примерах показана корреляция изменений общего электронного содержания (STEC) в северной полярной области с градиентами интенсивности конкретных эмиссий. Рассмотрены детали схем пространственных сопряжений при измерениях характеристик потоков высыпавшихся электронов и ВУФ-эмиссий с построчной разверткой, использованных в спектрографических имаджерах SSUSI (DMSP) и FIMS (STSAT-1). На схематичных примерах проанализированы преимущества характеристик орбиты РОС для одновременных наблюдений «видимых» и ВУФ авроральных эмиссий в E- и F-слое полярной ионосферы и планируемая геометрия наблюдений авроральных структур при пересечении аврорального овала. Представлены первые варианты рассчитанных оптических схем имаджеров авроральных эмиссий в видимой и ВУФ-области спектра и их характеристики, которые в дальнейшем будут улучшены при проектировании аппаратуры «Авровизор-РОС». На схематичном примере показана идеальная геометрия одновременных комплексных разномасштабных дистанционных измерений интенсивностей авроральных эмиссий и характеристик плазмы в окрестности двух КА: типа Арктика-М и РОС, с траектории платформы, отделившейся от зондирующей ракеты, с трассы БПЛА, и с поверхности Земли. Данные, полученные в подобных ситуациях, возникающих при пересечении полями зрения имаджеров на разных высотах и навигационными сигналами окрестности одной и той же магнитной силовой трубки на высотах конкретных эмиссий, в разных секторах MLT аврорального овала, позволят более детально исследовать физические процессы, происходящие в полярной ионосфере, приводящие к эпизодическим искажениям распространяющихся сигналов ГЛОНАСС и других радиосистем, которые регулярно пересекают авроральные структуры во время геомагнитных возмущений и суббурь [Черноус и др., 2016].

Фотометрические и плазменные измерения на орбите РОС и других КА могут стать началом создания перспективной комплексной методики по изучению мелкомасштабных характеристик эмиссий в F- и E-слое полярной ионосферы. В результате появится возможность проводить сопряженные разномасштабные измерения характеристик плазмы и интенсивностей авроральных эмиссий на разных высотах, а их результаты позволят проводить анализ процессов, приводящих к градиентам N_e и многообразным авроральным явлениям в околоземной полярной плазме, приводящих к генерации разных авроральных структур, результаты которых позволят приблизиться к пониманию их влияния на условия распространения радиосигналов, пересекающих их.

Статья предназначена для специалистов, студентов и аспирантов, которым интересны исследования плазменных процессов, приводящих к полярным сияниям, и их прикладное значение, связанное с диагностикой состояния полярной ионосферы как среды распространения радиоволн.

ЛИТЕРАТУРА

- Баныщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте «Авровизор-ВИС/МП» на КА «Метеор-МП» на перспективном КА «Метеор-МП», Известия вузов. Физика. М.: ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», №10/2, с.106-111, 2012.
- Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.И., Сеницын В.М. Некоторые алгоритмы расчета справочной геофизической информации вдоль орбит околоземных спутников, Программа-справочник КАДР-2, ИКИ АН СССР, М., Пр-544, 1980, 40 с.

- *Иванов В.Е.* Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли, Рос. АН. Кольский науч. центр. ПГИ РАН. Г. Апатиты, 2001, 260 с.
- *Иванов В.Е., Сергиенко Т.И.* Взаимодействие авроральных электронов с атмосферными газами (статистическое моделирование), Изд-во «Наука», С.-Петербургское отделение, 1992, 144 с.
- *Козелов Б.В., Иванов В.Е., Сергиенко Т.И.* Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных высыпаний электронов и протонов: возможности диагностики параметров потока частиц, Геомagnetизм и аэрономия, т.42, №4, с.513-518, 2002.
- *Кузьмин А. К., Чиков К. Н.* Спектрофотометрическая диагностика энергетических характеристик и проводимости авроральной ионосферы с ИСЗ. 1. Методические особенности, вопросы точности, требования к характеристикам экспериментальной аппаратуры, Космические исследования, т. 45, № 3, С. 211-225, 2007.
- *Кузьмин А.К. и Чиков К.Н.,* Панорамные изображающие монохроматические камеры для дистанционной диагностики характеристик ионосферы и верхней атмосферы с ИСЗ, Оптика атмосферы и океана, том 8, №6, 1995, стр. 897-909.
- *Кузьмин А.К.* Научно-техническое обоснование проведения целевой работы «Авровизор-РОС», приложение к Заявке на ЦР, 14 с., 2024.
- *Кузьмин А.К., Баныщикова М.А., Крученицкий Г.М., Маслов И.А., Потанин Ю.Н.* Варианты и выбор оптической схемы, оптимизация характеристик орбитального аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП», сравнение с зарубежными аналогами, Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, Том 160, №5, С.20-36, 2017.
- *Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Мёрзлый А.М., Петрукович А.А., Крученицкий Г.М., Баныщикова М.А.* Орбитальная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы, как часть системного контроля космической погоды // Гелиогеофизические исследования, вып.24, с.35-60, 2019.
- *Кузьмин А.К., и Мёрзлый А.М.* Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 1. (ВУФ-диапазон), Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Том 167, №6, с.9-41, 2018.
- *Кузьмин А.К., и Мёрзлый А.М.* Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 2. (видимый и ВУФ-диапазон), Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Том 168, №1, с.19-43, 2019.
- *Кузьмин А.К., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Баныщикова М.А.* Экспериментальный опыт и перспективы развития авроральной оптической диагностики состояния полярной ионосферы // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, Т.163, №2, С.12-28, 2018.
- *Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Соколов А.Д., Янаков А.Т.,* Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами и изображающими спектрографами с разных орбит и поверхности земли. Часть 1. Авроральные структуры, возбужденные природными источниками, включая Альфвеновские волны, Гелиогеофизические исследования, вып. 36, стр. 3-34, 2022, DOI 10.5425/2304-7380_2022_36_3.
- *Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Соколов А.Д., Янаков А.Т.* Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами и изображающими спектрографами с разных орбит и поверхности земли. Часть 2. Авроральные аврора-подобные структуры, возбужденные природными источниками, включая волны нескольких типов, Гелиогеофизические исследования, вып. 40, стр. 15-67, 2023, DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_15.
- *Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Садовский А.М., Позин А.А., Щукин Ю.А., Потанин Ю.Н.,* Основы перспективной методики комплексных исследований влияния авроральных характеристик полярной ионосферы на условия распространения трансполярных сигналов, Гелиогеофизические исследования, вып. 32, С.3-60, 2021.
- *Кузьмин А.К.* Фоновые условия и влияние различных световых факторов на изображения распределений интенсивности авроральных эмиссий, получаемые с орбит космических аппаратов, Вопросы электромеханики, Труды ВНИИЭМ, том 175, №2, с.14-41, 2020.

- Соколов А.Д., Кузьмин А.К. Исследование характеристик полярной ионосферы с помощью получения изображений авроральных эмиссий с орбиты перспективной станции РОС, Презентация на конференции «Физика плазмы в солнечной системе», ИКИ РАН, февраль 2024.
- Черноус С.А., Шагмуратов И.И., Вульфович Б.А., Калитенков Н.В. Навигация GPS/Глонасс в Арктике и полярные сияния, Вестник МГТУ, т.19, №4, с.806-812, 2016, doi:10.21443/1560-9278-2016-4-806-812.
- Aarons, J. Global morphology of ionospheric scintillations, Proc. IEEE, 70(4), 360–378, 1982.
- Anger C. D., Murphree, J. S., Vallance Jones, A., King R. A., Broadfoot A. L., Cogger L. L., Creutzberg F., Gattinger R. L., Gustafsson G., Harris F. R., Haslett J. W., Llewellyn E. J., McConnell J. C., McEwen D. J., Richardson E. H., Rostoker G., Sandel B. R., Shepherd G. G., Venkatesan D., Wallis D. D. and Witt G. Scientific Results from the Viking Ultraviolet Imager: an Introduction, *Geophys. Res. Lett.* – 1987, V.14. Pp. 383 – 386. <https://doi.org/10.1029/GL014i004p00383>.
- Bassiri S. Three-frequency ranging systems and their applications to ionospheric delay calibration, TDA Progress Report, 42-103, 15 Nov.1990, Pp.14-20.
- Basu S., Groves K.M., Basu S., Sultan P.J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, V.64, Pp.1745-1754, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00124-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00124-4).
- Braunecker B., Hentschel R., Tiziani H.I. (eds.) *Advanced Optics using aspherical elements*, SPIE press, 2008, p.219, ISBN:0819467499, <https://doi.org/10.1117/3.741689>.
- Burns A.A., and Fremouw E. J. A real-time correction technique for transionospheric ranging error, *IEEE Trans. on Antennas and propagation*, v.18, №6, Pp.785-790, Nov.1970.
- Chamberlain J.W. *Physics of the aurora and airglow*, Academic Press, 1961., 704 p. ISBN: 1483222535.
- Christensen A.B., Lyons L.R., Hecht J.H., Sivjee G.G., Meier R.R., Strickland D.J. Magnetic field-aligned electric field acceleration and the characteristics of the optical aurora, *Journ. Geophys. Res.*, V.92, Pp. 6163-6167, 1987. <https://doi.org/10.1029/JA092iA06p06163>.
- Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // *Space Sci. Rev.*, V.189., P.15–25, 2014. doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
- Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., Mende S.B. Global auroral conductance distribution due to electron and proton precipitation from IMAGE-FUV observations. *Annales Geophysicae*, 22: 1595-1611, 2004. <https://doi.org/10.5194/ungeo-22-1595-2004>.
- Dashkevich Zh.V., Sergienko T.I., Kozelov B.V. Physicochemical model of the auroral ionosphere, *Cosmic Research*, V.55, №2, Pp. 88-100, 2017. doi:10.1134/s0010952517020022.
- Frank L. A., Craven J. D. Imaging results from Dynamics Explorer 1 // *Rev. Geophys.* – 1988. – V. 26. – Pp. 249–283. <https://doi.org/10.1029/RG026i002p00249>.
- Frey H. U., Mende S. B., Immel T. J., Gerard J.-C., Hubert B., Habraken S., Spann J., Gladstone G. R., Bisikalo D. V., Shematovich V. I. Summary of quantitative of IMAGE far ultraviolet auroral data // *Space Sci. Reviews.* – 2003. V. 109. – Issue 1 – 4. – Pp. 255 – 283. Doi:10.1023/B: SPAC.0000007521.39348.a5.
- Germany G.A., Spann J.F., Parks G.K., Brittnacher M.J., Elsen R., Chen L., Lummerzheim D., Rees M.H. Auroral Observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI) // *Geospace Mass and Energy Flow: Results From the International Solar-Terrestrial Physics Program*, *Geophys.Monogr. Ser.*, vol. 104, edited by J. L. Horwitz, D. L. Gallagher, and W. K. Peterson, AGU, 1998, Pp. 149-160, ISBN 9781118664162. DOI: <https://doi.org/10.1029/GM104p0149>.
- Germany G.A., Torr D.G., Richards P.G., Torr M.R., John S. Determination of ionospheric conductivities from FUV auroral emissions, *Journ. Geophys. Res.*, V.99, A12, Pp.23297-23305, 1994b <https://doi.org/10.1029/94JA02038>.
- Germany G.A., Torr M.R., Torr D.G., Richards P.G. Use of FUV emissions as diagnostic indicators, *Journ. Geophys. Res.* V.99, A1, Pp. 383-388, 1994a <https://doi.org/10.1029/93JA02357>.
- Gies H.P.F., Gibson S.T., Blake A.J., McCoy D.G. The Shumann-Runge continuum of oxygen at wavelength greater than 175 nm, *Gourn. Geophys. Res.*, V.87, A10, Pp. 8307-8310, 1982. <https://doi.org/10.1029/JA087iA10p08307>.

- Grubbs II G., Michell R., Samara M., Hampton D., Jahn J.-M. Predicting Electron Population Characteristics in 2-D Using Multispectral Ground-Based Imaging, *Geophysical Research Letters*, 45, 15–20. 2018 <https://doi.org/10.1002/2017GL075873>
- Huffman R.E. Atmospheric ultraviolet remote sensing, 1992, Academic Press Inc., 317 p.
- Huffman R.E., Meng C.I. Ultraviolet imaging of sunlit auroras from HILAT, *John Hopkins APL Technical Digest*, V.20, №4, Pp.138-142, 1981.
- Huffman R.E., Paulsen D.E., Le Blanc F.J., Larrabee J.C. Ionospheric and auroral measurements from space using vacuum ultraviolet emission, in the “Effect of the ionosphere on radiowave system”, ed. By J.M. Goodman, Washington D.C., Pp.364-371, 1981.
- Jenner L.A., Wood A.G., Dorrian G.D., Oksavik K., Yeoman T.K., Fogg A.R., Coster A.J. Plasma density gradients at the edge of polar ionospheric holes: the absence of phase scintillation, *Annales Geophysicae*, 38, 575-590, 2020, <https://doi.org/10.5194/angeo-38-575-2020>.
- Jin Y. Characterization of GPS Scintillations in the Polar Ionosphere, Thesis submitted for the degree of Philosophiae Doctor, Department of Physics University of Oslo, May 2016.
- Kaeppler S.R., Nicolls M.J., Strømme A., Kletzing C.A., Bounds S.R. Observations in the E-regions ionosphere of kappa distribution functions associated with precipitating auroral electrons and discrete aurorae, *Journ. Geophys. Res. Space physics*, 119, Pp.10164-10183, doi:10.1002/2014JA020356
- Kaneda E. Auroral TV observation by KYOKKO // Proc. International Workshop of selected topics of magnetospheric physics, 1979, Pp.15-19, 1979.
- Kataoka R., Chaston Ch., Knudsen D., Lynch K.A., Lysak R.L., Song Y., Rankin R., Murase K., Sakanoi T., Semeter J., Watanabe T.-H., Whiter D. Small-Scale Dynamic Aurora, *Space Sci Rev*, 217(1):17, 2021, <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w>.
- Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. GPS and ionospheric scintillations, *Space Weather*, V.5, 2007, S09003, Pp.1-23, doi:10.1029/2006SW000260.
- Lee C.N., Min K.W., Lee J.J., Parks G.K., Fillingim M.O., Lummerzheim D., Cho K.S., Kim K.H., Kim Y.H., Park Y.D., Han W., Edelstein J., Korpela E. Spectral observations of FUV auroral arcs and comparison with inverted-V precipitating electrons, *Journal of Geophysical Research*, V. 115, A09223, 2010, doi:10.1029/2009JA015071.
- Lee C.N., Min K.W., Lee J.-J., Hwang J.A., Park J., Edelstein J., Han W. FUV spectrum in the polar region during slightly disturbed geomagnetic conditions. *Journal of Geophysical Research*, 116, A10319, 2011, DOI: 10.1029/2011JA016898.
- Maggs J. E. and Davis T. N. Measurements of the Thickness of Auroral Structures, *Planet.Space Sci.* **16**, issue 2, 205-209. 1968, [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(68\)90069-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(68)90069-X).
- Mende S.B., Heeterds H., Frey H.U., Lampton M., Geller S.P., Abiad R., Siegmund O.H.W., Tremsin A.S., Spann J., Dougani H., Fuselier S.A., Magoncelli A.L., Bumala M.P., Murphree S., Trondsen T. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 2. Wideband FUV imaging, *Space Sci. Reviews*, 91, Pp.271-285, 2000. Doi:10.1023/A:1005227915363.
- Michell, R. G., Samara M., Grubbs II G., Ogasawara K., Miller G., Trevino J.A., Webster J., Stange J. Apes: Acute precipitating electron spectrometer: A high time-resolution mono-directional magnetic deflection electron spectrometer. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v.121, Pp.5959–5965. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022637>.
- Niciejewski R.J. Total electron content during auroral conditions, Digitized theses, 1606, <https://ir.lib.uwo.ca/digitizedtheses/1606>, 1987, 238 p.
- Nicolet M. The Solar spectral irradiance and its action in the atmospheric photodissociation processes, *Planet. Space Sci.*, V.29, №9, Pp. 951-974, 1981. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(81\)90056-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90056-8).
- Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite // *Earth Planet Space*. 2008. V.60 (8), P.827-835. Doi:10.1186/BF03352834.
- Ogasawara K., Livadiotis G., Grubbs G.A., Jahn J.-M., Michell R., Samara M., Scharber J.R., Winningham J.D. Properties of suprathermal electrons associated with discrete auroral arcs, *Geophys. Res. Lett.*, 44, Pp.3475-3484, 2017. doi:10.1002/2017GL072715

- Paxton L.J., Meng C.-I. Auroral imaging and space-based optical remote sensing, John Hopkins APL Technical Digest, V.20, №4, Pp.556-569, 1989.
- Paxton, L. J., Meng, C.-I., Fountain, G. H., Ogorzalek, B. S., Darlington, E. H., et al. “SSUSI-Horizon-to-Horizon and Limb-Viewing Spectrographic Imager for Remote Sensing of Environmental Parameters,” in *Ultraviolet Technology IV*, SPIE Proceedings Vol. 1764, R. E. Huffman (ed.), SPIE, Bellingham, WA, pp. 161–176, 1992. <https://doi.org/10.1117/12.140846>.
- Paxton, L. J., Morrison, D., Zhang, Y., Kil, H., Wolven, B., Ogorzalek, B. S., Humm, D. C., and Meng, C.-I. Validation of remote sensing products produced by the Special Sensor Ultraviolet Scanning Imager (SSUSI): a far UV-imaging spectrograph on DMSP F-16, in: *Optical Spectroscopic Techniques, Remote Sensing, and Instrumentation for Atmospheric and Space Research IV*, edited by Larar, A. M. and Mlynczak, M. G., SPIE, <https://doi.org/10.1117/12.454268>, 2002.
- Rees M. H., Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations // *Journal of Geophysical Research*, V.79, Issue 34. Pp. 5181-5186. 1974, DOI: <https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181>.
- Rees M.H., Roble R.G. Excitation of the O(1D) atoms in aurorae and emission of the [OI] 6300 – A line, *Can.J.Phys.*, 64, Pp.1602-1613, 1988. <https://doi.org/10.1139/p86-284>.
- Richmond A.D., and Kamide Y. Mapping electrodynamic features of the high-latitude ionosphere from localized observations: Technique. *Journ. Geophys. Res.*, v.93, p.5741, 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA06p05741>
- Robinson R.M., Dabbs T., Vickrey J., Eastes R., Del Greco F., Huffman R., Meng C., Daniell R., Strickland D., and Vondrak R. Coordinated measurements made by the Sondrestrom radar and the Polar Bear ultraviolet imager, *Journ. Geophys. Res.*, 97, 2863, 1992. <https://doi.org/10.1029/91JA02803>.
- Robinson R.M., Vondrak R.R., Craven J.D., Frank L.A. and Miller K. A comparison of ionospheric conductances and auroral luminosities observed simultaneously with the Chatanika radar and the DE-1 auroral imagers, *Journ. Geophys. Res.*, 94, 5382, 1989 <https://doi.org/10.1029/JA094iA05p05382>.
- Robinson R.M., Vondrak R.R., Miller K., Dabbs T., Hardy T. On calculating ionospheric conductances from the flux and energy of precipitating electrons // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. V.92, A3, Pp.2565-2569, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA092iA03p02565>.
- Shepherd G.G., *Spectral imaging of the atmosphere*, Academic Press, 2002, International Geophysics Series, v.82, 320 p., ISBN 0-12-639481-4.
- Smith A.M., Mitchell C.N., Watson R.J., Meggs R.W., Kintner P.M., Kauristie K., Honary F. GPS scintillation in the high Arctic associated with an auroral arc, *Space Weather*. 2008. V. 6. P. S03D01.
- Solomon S.C., Hays P.B., Abreu V.J. The auroral 6300 A emission: observations and modeling, *Journ. Geophys. Res.*, V.93, No. A9, Pp.9867-9882, 1988. <https://doi.org/10.1029/JA093iA09p09867>
- Sotirelis E., Korth H., Hsieh S.-Y., Zhang Y., Morrison D., Larry Paxton L. Empirical relationship between electron precipitation and far ultraviolet auroral emissions from DMSP observations, *Journ. Geophys. Res., Space Phys.*, V.118, Issue 3, Pp. 1203–1209, 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50157>
- Sparks L., Iijima B.A., Mannucci A.J., Pi X., Wilson B.D. A New Model for Retrieving Slant TEC Corrections for Wide Area Differential GPS, *Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 26-29 Jan. 2000, Pp. 464-473, Anaheim, CA.
- Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C., Kletzing C., Lysak R., Maggs J., Pokhotelov O., Seyler C., Shukla P., Stenflo L., Streltsov A., Wahlund J.-E. Small scale Alfvénic structure in the aurora, *Space Science reviews*, v.92, Pp.423-533, 2000. DOI: 10.1023/A:1005207202143.
- Steele D.P., McEwen D.J., Electron auroral excitation efficiencies and intensity ratios, *Journ. Geophys. Res.* V.95, A7, Pp.10321-10326, 1990. <https://doi.org/10.1029/JA095iA07p10321>
- Strickland, D.J., Meier, R.R., Hecht, J.H., Christensen, A.B. Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: theory and model results. *Journal of Geophysical Research*, v.94, Pp.13,527–13,539, 1989. DOI:10.1029/JA094iA10p13527
- Strickland D.J., Jasperse J.R., Whalen J.A. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere, *Journ. Geophys. Res. Space Physics.*, V.88, A10, Pp.8051-8062, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA088iA10p08051>.

- *Trondsen T.S. and Cogger, L.L.* A survey of small-scale spatially periodic distortions of auroral forms, *Journ., Geophys. Res.*, v.103, Pp. 9405-9415, 1998. <https://doi.org/10.1029/98JA0061>.
- *Trondsen T.S., Cogger L.L. and Samson J.* Asymmetric multiple auroral arcs and inertial Alfvén waves', *Geophys. Res. Lett.* V.24, Pp. 2945-2948, 1997. <https://doi.org/10.1029/97GL52855>.
- *Tsunoda R.T.*, High latitude F-region irregularities: a review and synthesis. *Reviews of Geophysics*, 26, 4, 719-760, 1988. <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00719>.
- *Vallance Jones A.* A model for the excitation of electron aurora and some applications, *Can. J. Phys.*, 53(20). 2267, 1975. [Doi:10.1139/p75-273](https://doi.org/10.1139/p75-273).
- *Vallance Jones A., Gattinger R.L.* Auroral spectroscopy and its application to the characterization of primary particle fluxes, *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, Pp. 1385-1410, 1990. <https://doi.org/10.5636/jgg.42.1385>.
- *Vickrey J.F., Vondrak R.R., Matthews S.J.* The diurnal and latitudinal variation of auroral zone ionospheric conductivity, *Journ. Geophys. Res.*, v.86, № A1, Pp.65-75, 1981. <https://doi.org/10.1029/JA086iA01p00065>.
- *Watermann J., O. de la Beaujardiere and Rich F.J.* Comparison of ionospheric electrical conductances inferred from coincident radar and spacecraft measurements and photoionization models. *J. Atmos. Terr.Phys.*, v.55, p.1513, 1993. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(93\)90127-K](https://doi.org/10.1016/0021-9169(93)90127-K).
- *Zhang X.X., Chen B., He F., Song K.-F., He L.-P., Liu S.-J., Guo Q.-F., Li J.-W., Wang X.-D., Zhang H.-J., Wang H.-F., Han Z.-W., Sun L., Zhang P.-J., Dai Sh., Ding G.-X., Chen L.-H., Wang Z.-S., Shi G.-W., Zhang X., Yu Ch., Yang Z.-D.* Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite, *Science&Applications*, 8:47, c.1-12, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41377-019-0157-7>.

THE MAIN ELEMENTS OF THE METHODOLOGY FOR MEASURING THE CHARACTERISTICS OF THE POLAR IONOSPHERE BY OBTAINING IMAGES OF AURORAL EMISSIONS FROM THE ORBIT OF THE PROMISING ROS STATION

Kuzmin A.K., Sokolov A.D.

Obtaining and analyzing images of specific auroral emissions from different spacecraft orbits is one of the informative methods for studying and monitoring the dynamics of the characteristics of the polar ionosphere, since they display diverse auroral structures in the E and F regions. Based on emission images obtained from different heights and maps of spatial distributions of the energy characteristics of the fluxes of precipitating particles calculated from them, it is possible to remotely control the electrodynamic situation of the ionosphere on both global and local scales. The relevance of this technique only increases over time with the development of technologies for diagnosing instantaneous conditions in the polar ionosphere and especially at spatial scales of ~ 1-5 km. There is a need to create a control system for these conditions, and especially where small-scale *Ne* gradients occur at different heights in different MLT sectors, which ultimately lead to the generation of instability processes in the plasma of the polar ionosphere, and, as a result of which phase and amplitude scintillations of transpolar navigation and other signals may appear. The theoretical foundations of such a system were laid in the works (see, for example [Tsunoda, 1988; Basu et al., 2002; Kintner et al., 2007]). This article discusses the elements of a technique for obtaining and mapping specific auroral emissions aimed at studying plasma processes on the "lower floor" of the magnetospheric-ionospheric system during observations from the height of the orbit of the promising ROS orbital station. The planned characteristics of the ROS orbit and its orientation will allow measurements of local plasma characteristics in the F-layer of the ionosphere around the ROS, and at the same time remote measurements of the intensities of specific auroral emissions in the F- and E-layer, including both the unlit and illuminated polar ionosphere and the upper atmosphere. The upcoming experiment at ROS may eventually become part of a comprehensive project aimed at coordinated measurements of the multi-scale characteristics of the polar ionosphere simultaneously from different altitudes, which will simultaneously use spacecraft in different orbits; platforms separated from sounding rockets at different altitudes, drones flying above the clouds; measurements of auroral emissions using a network ground-based imaging cameras, magnetometers and riometers located along the entire polar part of the territory of Russia, as well as radio beacons operating at different frequencies. The first attempts to create the foundations of such a network were made by geophysicists in the USSR and other countries back in 1957-1958, i.e. during the MGG period.

KEYWORDS: POLAR IONOSPHERE, AURORAL EMISSIONS, INHOMOGENETIES OF ELECTRON CONCENTRATION, AURORAL IMAGERS, ORBITAL DIAGNOSTICS, METHODOLOGY FOR MONITORING THE STATE OF CHARACTERISTICS, CONDITIONS FOR THE PROPAGATION OF TRANSPOLAR SIGNALS.