

ДИСТАНЦИОННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОРБИТАЛЬНОГО АВРОРАЛЬНОГО ИМАДЖИНГА. ЧАСТЬ 2 (ВИДИМЫЙ И ВУФ-ДИАПАЗОН)

А. К. Кузьмин, А. М. Мёрзлый

В аспекте подготовки методики перспективных российских орбитальных экспериментов, нацеленных на получение изображений фрагментов аврорального овала в эмиссиях видимой и ВУФ-области спектра, на конкретных примерах анализируется мировой экспериментальный и методический опыт наблюдений авроральных характеристик с орбит низкоорбитальных КА. Какие авроральные эмиссии необходимо измерять и с каким пространственным и временным разрешением, какие методические задачи необходимо решать для получения и обработки авроральных изображений, какие сопутствующие измерения характеристик плазмы необходимы для повышения эффективности измерений и диагностики состояния характеристик полярной ионосферы с орбит, какую информацию авроральный имаджинг может обеспечить для исследований влияния полярной ионосферы на характеристики трансполярного распространения сигналов – вот далеко не полный перечень рассматриваемых в данной работе вопросов.

***Ключевые слова:** дистанционная диагностика состояния полярной ионосферы, авроральные эмиссии, видимый и ВУФ-диапазон, фрагменты аврорального овала, авроральные имаджеры.*

Введение

В начале XXI века продолжились исследования плазменных процессов в околоземном пространстве, приводящих к высыпаниям заряженных частиц в полярную ионосферу и их следствиям: продольным токам, генерации электрических полей, образованиям градиентов электронной концентрации и неоднородностей поперечных проводимостей в ионосфере, а также диссипации волн из магнитосферы и возбуждению эмиссий в разнообразных по форме и размерам авроральных структурах. Авроральное «магнитосферно-ионосферное телевидение» [1] как в глобальном, так и в локальных масштабах становится всё более востребованным инструментом диагностики состояния полярной ионосферы, в котором верхняя атмосфера и ионосфера «служат» природным экраном, отображающим динамические характеристики высыпающихся электронов и ионов, модулированных на разных высотах в магнитосфере [2]. Орбитальный авроральный имаджинг, ставший одним из инструментов исследований магнитосферно-ионосферной системы (м. и. с.), увеличил возможности дистанционной диагностики околоземных плазменных процессов, а авроральные имаджеры стали обеспечивать необходимую информацию о её состоянии в сопряжении: с орбитальными измерениями характеристик плазмы, измерениями характеристик ионосферы наземными приборами, включая фотометрическую сеть, магнитометры, риометры и радары, и моделями магнитосферно-ионосферной электродинамической системы и транспорта заряженных частиц из магнитосферы в ионосферу. Результаты ряда орбитальных авроральных наблюдений внесли свой вклад в от-

крытия новых явлений в околоземном космическом пространстве, которые не могли быть идентифицированы с помощью других методов [3, 4]. С развитием орбитальных навигационных и других радиоволновых систем, использующих полярную ионосферу в качестве среды распространения трансполярных сигналов, появилась необходимость мультимасштабного онлайн-контроля состояния её характеристик в разных масштабах, от глобального до локального [5]. Хотя воздействие процессов в м. и. с. на характеристики полярной ионосферы исследуются уже несколько десятков лет, причинно-следственные связи, влияющие на условия распространения, до сих пор остаются до конца не выясненными [6, 7]. Необходимость продолжения исследований этих связей и орбитального контроля характеристик полярной ионосферы стимулирует подготовку новых орбитальных наблюдений, проектирования новой аппаратуры, совершенствование методики одновременных орбитальных и наземных исследовательских и мониторинговых измерений эмиссий авроры и характеристик ионосферы разных масштабов с пространственным разрешением от сотен-десятков километров (глобальные измерения) до километров (локальные измерения).

1. Развитие аврорального имаджинга с полярных орбит низкоорбитальных КА в видимой и ВУФ-областях спектра. В части 1 [8] рассмотрены типы физических механизмов в магнитосфере, приводящих к ускорению высыпающихся заряженных частиц и возбуждению авроральных эмиссий в верхней атмосфере и ионосфере, хронология развития имаджинга, методические особенности

вычисления и картографирования энергетических характеристик выпадающих частиц по изображениям ВУФ-эмиссий и результатам измерений характеристик плазмы полярной ионосферы с орбит типа «Молния». Показаны преимущества глобального аврорального имаджинга с перспективных российских КА, таких как «Арктика-М», которые имеют постоянную ориентацию строительной оси на центр Земли.

В данной работе рассматриваются методические особенности и обзор результатов экспериментов и наблюдений свечения полярной ионосферы в видимой и ВУФ-областях спектра с полярных орбит с высотой до 1000 км, а также перспективных российских экспериментов, нацеленных на получение изображений авроральных эмиссий в видимой и ВУФ-области спектра.

Так как в период начала космической эры еще не было чувствительных матричных детекторов изображений, то все авроральные фотометры, построенные с использованием фотоумножителей в качестве детекторов излучения, имели угол поля зрения в пределах нескольких градусов, а в отдельных случаях для увеличения поля наблюдения распределений интенсивности эмиссий использовались механические сканеры (см. примеры 1, 2 и 3). До настоящего времени ВУФ-спектрометры SSUSI со сканирующим зеркалом [9] работают на орбитах КА серии DMSP (см. пример 3). Авроральные имаджеры (MAC и FAI) с матричными фотоприёмниками в видимой области спектра впервые работали на орбитах малых КА REIMEI [10] и e-POP [11] (см. примеры 4 и 5 соответственно). Перспективные российские имаджеры авроральных эмиссий для низкоорбитальных КА, включая МКА, разрабатываются с учётом деталей методик экспериментов и опыта наблюдений с аппаратурой MAC и FAI.

Рассмотрим ряд примеров:

Пример 1. Сканирующий канал аврорального фотометра ЭМО-5 с углом поля зрения 3° [12, 13] был направлен в надир параллельно строительной оси ($-Z$) КА «ИК-Болгария-1300», запущенном на орбиту 07.08.1981. Развёртка сканерного изображения эмиссии $\lambda 630,0$ нм [OI] на высотах ~ 250 км осуществлялась с помощью плоского зеркала, качающегося в плоскости, перпендикулярной направлению полёта на угол $\pm 15^\circ$ от направления в надир с периодом 1 с туда и 1 с обратно, т. е. учитывая угол наклона плоскости орбиты КА ($i = 81,3^\circ$), сканирование осуществлялось примерно вдоль аврорального овала, при этом каждая «строка» изображения, имеющая размеры $\sim 31 \times 321$ км, переключалась с соседней на 0,75 ширины. За 2 с

КА «ИК-Болгария-1300» пролетал $\sim 14,9$ км, поэтому реальное пространственное разрешение сканерного изображения на высоте 250 км составляло ~ 31 км (вдоль направления полёта) \times 46 км (поперёк направления полёта), а временное – $\sim 0,15$ с. Второй параллельный фотометрический канал (с встроенным диском интерференционных фильтров: $\lambda 557,7$ нм [OI]; $\lambda 732,0 - 733,0$ нм [OI]; 630,0 нм [OI]; 620 нм (фон)) имел меньший угол поля зрения ($\sim 1,6^\circ$) и был направлен строго в надир. На рис. 1 показан пример сканерного изображения, полученного, когда КА 26.02.1982 пересёк неосвещённую часть аврорального овала в вечерне-полуночном секторе MLT над районом Гренландии во время возмущённых геомагнитных условий ($Kp = 4^+$) на этапе фазы развития суббури (магнитограмма станции показана на правой нижней панели). ЭМО-5 зарегистрировал яркую дискретную дугу (с максимальной интенсивностью эмиссии более 8 кР), и затем, после промежутка с относительно низкой интенсивностью, пересёк широкую диффузную авроральную зону. В работах [14, 15] была детально рассмотрена ситуация координированных одновременных фотометрических наблюдений и плазменных измерений одного и того же вечернего сектора аврорального овала во время максимальной фазы суббури над островом Врангеля с двух КА «Ореол-3» и «ИК-Болгария-1300», когда они последовательно в интервале трёх минут (10.47 – 10.50 UT) 26.02.1982 пересекли окрестность одной и той же магнитной силовой трубки (м. с. л.) на разных высотах. Это произошло на витке 2868 «ИК-Болгария-300» (см. правую среднюю панель). И хотя то, что именно в этом интервале времени суббури достигла максимальной стадии (breakup) было случайным, результаты почти одновременных комплексных измерений с двух КА подтвердили, что развитие методики диагностики плазменных процессов в локальных секторах полярной ионосферы должно идти именно в направлении получения данных в объёмах конкретных м. с. л. Эти результаты косвенно привели к последующим разработкам новых схем и созданию орбитальной изображающей аппаратуры [16, 17, 11, 64, 41, 53, 30], позволяющей с помощью параллельных изображающих каналов, настроенных на разные авроральные эмиссии, мгновенно «видеть» отображения многообразных эффектов выпадений заряженных частиц сразу на высотах E - и F -слоя ионосферы во всём наблюдаемом поле, имеющем диаметр несколько десятков-сотен км, а также стимулировали следующие шаги развития методики.

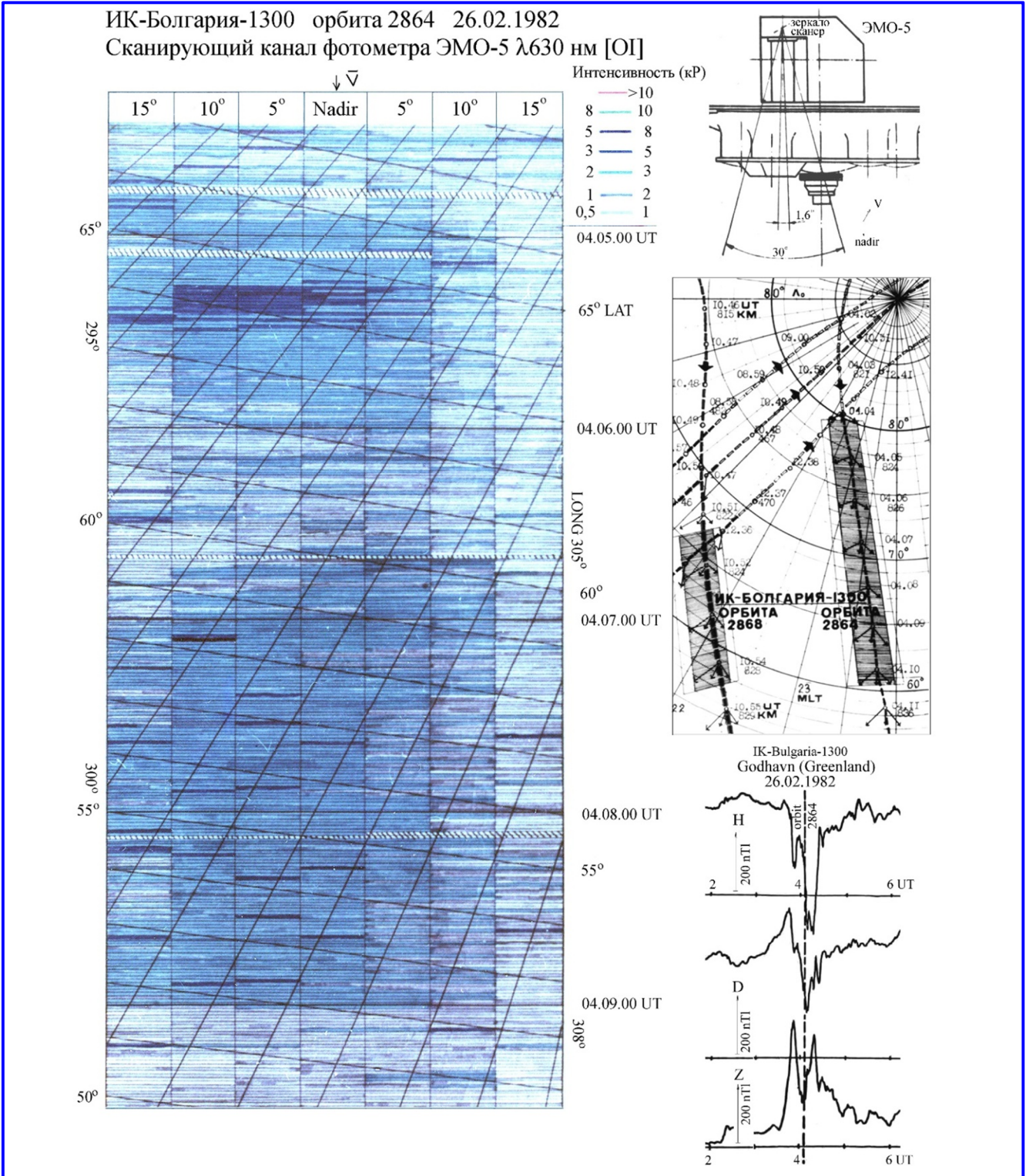


Рис. 1. Сканерное изображение авроральной эмиссии $\lambda 630,0$ нм [OI], полученное с помощью фотометра ЭМО-5 при пересечении КА «ИК-Болгария-1300» вечернего сектора аврорального овала над районом Гренландии 26.02.1982 в интервале времени $04.04 \div 04.10$ UT, показано в географической сетке координат. Направление полёта отмечено стрелкой вектора скорости V . Справа сверху показана компоновка расположения ЭМО-5 на КА «ИК-Болгария-1300» и угол, в пределах которого осуществлялось сканирование в пределах $\pm 15^\circ$ от направления в надир в плоскости перпендикулярной направлению полёта КА. Проекция орбит в координатах инвариантная широта Λ_0 – MLT и развёртки сканирования вдоль неё показаны на правой панели в середине. Справочный материал по геомагнитной и инвариантной (дипольной) системам координат см. в [44]

Пример 2. На рис. 2 представлено ВУФ-изображение участка аврорального овала, полученное в условиях малой суббури с орбиты КА HILAT над территорией России 16.07.1983 в 15.55.41 – 16.00 UT с помощью спектрометра AIM (Auroral Ionospheric Mapper) [19]. Спектрометр был построен по схеме внеосевого параболического телескопа Ebert-Fastie, входная щель которого (~1,5 мм) позволяла получать спектральное разрешение ~3 нм. Пространственное разрешение спектрометра в направлении в надир было 20 км (вдоль направления полёта) × 4 км (перпендикулярно направлению полёта). Сканирование входным зеркалом проводилось попеременно направления полёта в диапазоне углов ±67,2° с периодом 3 с влево и 3 с вправо. Развёртка строки изображения, регистрировалась на ФЭУ EMR 510G с фотокатодом CsJ, напылённым на окно из MgF₂ [20]. Изображение на рис. 2 получено на освещённой стороне ионосферы в линии атомарного азота λ149,3 нм (см. авроральный спектр на рис. 6), которая находится вблизи максимума поглощения O₂ (см. часть 1 [8]), при этом максимальная интенсивность, которая наблюдалась в линии была ~ 2 кР. Параметры орбиты КА HILAT, запущенного 27.06.1983, были близки к параметрам КА «ИК-Болгария-1300», т. е. *H* ~ 830 км, *i* ~ 82°.

Пример 3. Изображающий ВУФ-спектрограф SSUSI работает на серии спутников DMSP, начиная с F16. Он был создан на основе спектрометра GUVI, который был использован в орбитальном проекте TIMED [22, 9]. Селективный спектральный диапазон пропускания спектрометра разделён на 5 интервалов, включая λ130,4 нм [OI], λ135,6 нм [OI], LBHs и LBH/ N₂ и линию Ly-α (без селекции линии λ121,6 нм, возбуждённой солнечным ультрафиолетом и доплеровски сдвинутой линии λ121,8 нм, возбуждённой при перезарядке пар высвобождающихся протонов и атомов водорода). Сканирование входным зеркалом осуществляется попеременно направления полёта от горизонта до горизонта за 22 с (см. Fig 4 в [22], ширина строки (полосы изображения) вдоль полёта ~153 км, строка проецируется на 16 пикселей позиционно-чувствительного анода, перед которым стоит микроканальная пластина для усиления интенсивности. Свет, падающий на каждый из 16 «пространственных» пикселей, спектрографом раскладывается по длине волны и проецируется на 160 пикселей анода по второй координате. Итоговое пространственное разрешение спектрографа ~ 10 × 10 км. На рис. 3 показан пример ВУФ-изображения участка двойного аврорального овала, полученный в спектральной полосе кислородной

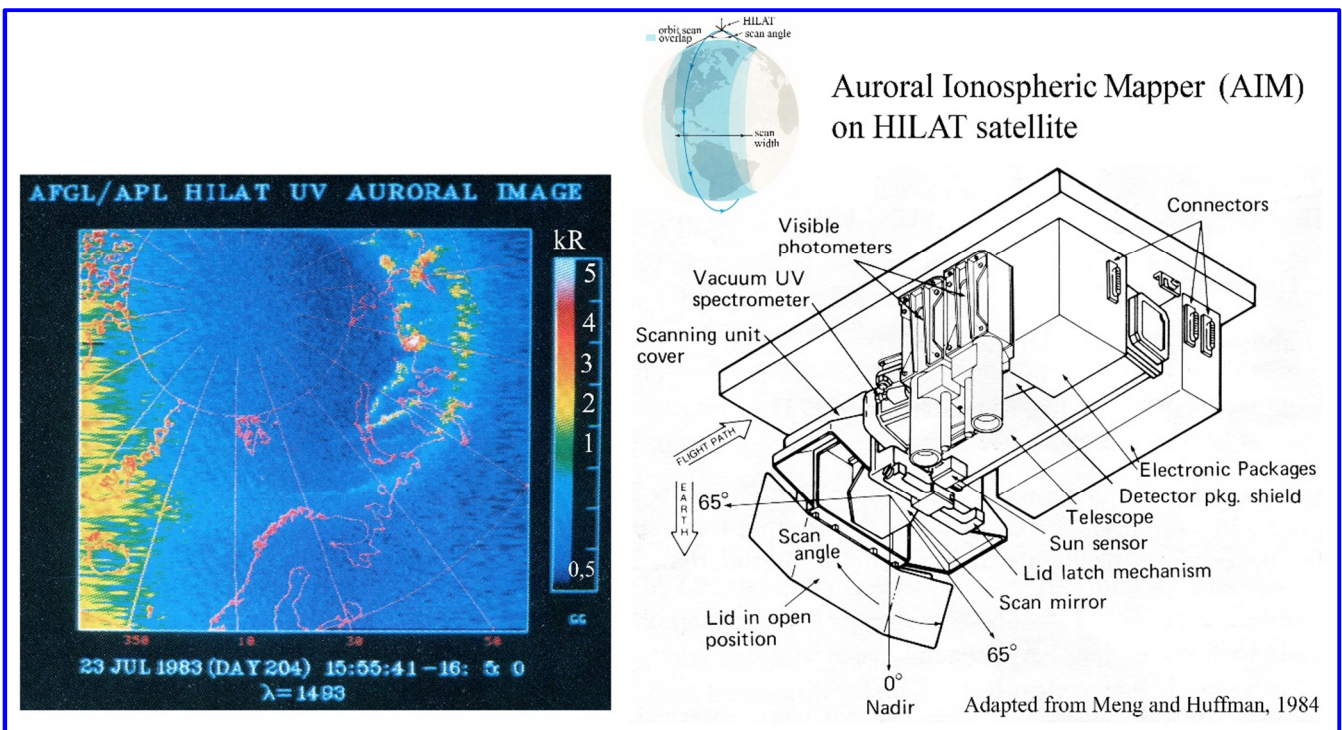


Рис. 2. Изображение освещённого участка аврорального овала, полученное с орбиты КА HILAT с помощью ВУФ-спектрометра AIM в линии λ149,3 нм [NI] над территорией России 23.07.1983. Справа показана внутренняя компоновка элементов оптической схемы AIM и двух узкоугольных фотометров в линиях видимого диапазона спектра λ₁ = 391,4 нм (N₂⁺) и λ₂ = 630,0 нм [OI]. Вверху представлена ширина проекции полосы сканирования AIM вдоль орбиты КА HILAT [19]

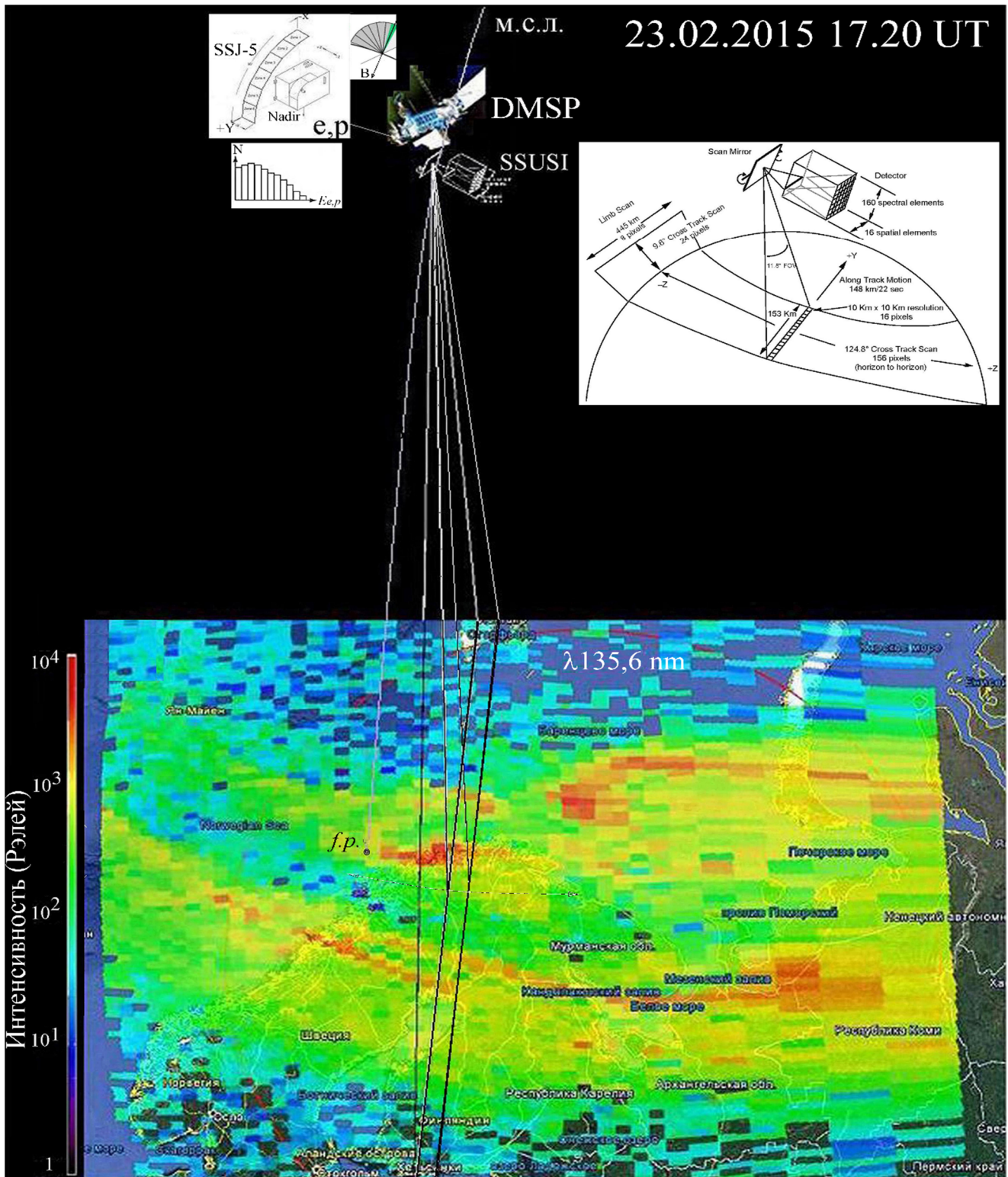


Рис. 3. Геометрия наблюдений, логистика сканирования и пример сканерного изображения интенсивности кислородной эмиссии $\lambda 135,6 \text{ nm}$ участка вечернего сектора аврорального овала, наложенного на контурную географическую карту [45]. Изображение получено 23.02.2015 с орбиты КА DMSP F18 с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI. Вверху схематично показан веер направлений измерений потоков высыпающихся частиц с помощью электростатического анализатора SSJ-5 и их энергетический спектр (условно), вектор B указывает направление магнитного поля, $f.p.$ – положение подножной точки магнитной силовой линии, которую пересекает КА F18 в момент экспозиции строки на высоте максимума интенсивности эмиссии ($h \sim 130 \text{ km}$)

линии $\lambda 135,6$ нм при пролёте КА DMSP F18 23.02.2015 над Кольским полуостровом в ~ 17.20 UT. *Комментарии:* 1. Явление двойного аврорального овала возникает только при специфичных условиях в солнечном ветре, см. например [23, 24]. 2. Методический аспект определения потока энергии и средней энергии высыпавшихся электронов с учётом вклада высыпавшихся протонов по интенсивностям LBH α и LBH γ (N_2) был рассмотрен в [21, 25] на примере глобальных авроральных ВУФ-изображений, полученных имаджером UVI с орбиты КА Polar. Следует сказать, что для учёта вклада в освещённую ионосферу энергии высыпавшихся протонов необходимо выделение интенсивности доплеровски сдвинутой линии Ly- α над «фоновой» Ly- α , возбуждённой солнечным ультрафиолетом, которое в UVI и изображающем спектрографе SSUSI не было реализовано. Впервые эта селекция осуществлена на КА IMAGE с помощью спектрографического имаджера SI12 [8, 26, 27].

Казалось бы, для диагностики состояния авроральной ионосферы эффективно (если не брать в расчёт относительно низкое пространственное разрешение SSUSI для высоты орбиты ~ 850 км) разворачивать сканерные изображения пространственных полос по длине волны, получая одновременно их изображения в выбранных эмиссиях. При этом преимущество авроральных сканирующих систем, таких как SSUSI, разработанных для низкоорбитальных КА, состоит именно в широком пространственном охвате за десятки секунд, но их существенный недостаток заключается в том, что за этот промежуток времени в локальных секторах аврорального овала и полярной шапки могут происходить события значительно более короткие и мелкомасштабные, которые таким прибором не будут зарегистрированы. Кроме того, проекция м. с. л., которую пересекает КА в момент экспозиции строки, практически никогда не попадает в поле мгновенно наблюдаемого SSUSI пространственного объёма ионосферы, проецируемого в строку (см. рис. 3), и этот аспект «не позволяет» экспериментаторам диагностировать процесс во всём объёме м. с. л. на высотах E - и F -слоя ионосферы, который пересекают сигналы конкретных PRN GPS и GLONASS. Этого недостатка лишены разрабатываемые российские приборы, включающие параллельные изображающие фильтровые камеры с конусными углами полей зрения $\sim 30^\circ$ (см. далее), спектральные полосы которых настроены на селекцию конкретных авроральных эмиссий. Их преимущество в том, что проекция м. с. л. на высоты максимумов интенсивности эмиссий ($f. p.$) всегда в поле полу-

чаемых изображений. Более узкоугольные имаджеры, такие как MAC на МКА REIMEI тоже могли «видеть» проекцию м. с. л. на высотах трёх эмиссий, но для этого требовалось поддержание специального режима ориентации осей КА REIMEI, заключающегося в регулярном повороте МКА на рассчитанные углы (см. пример 4).

Ещё раз обратим внимание, что для практической диагностики состояния полярной ионосферы необходимы два типа орбитальных измерений одновременно: глобальные измерения с орбиты типа «Молния» на основе ВУФ-изображений всего аврорального овала, отображающих его позицию и «мгновенные» границы в пространстве с относительно грубым пространственным разрешением $\sim 100 - 150$ км и временным разрешением $\sim 0,5 - 1$ мин (см. часть 1 [8]), и локальные измерения в различных секторах MLT с серии низкоорбитальных КА на основе ВУФ- и «видимых» изображений с пространственным разрешением $\sim 1 - 2$ км и временным $0,05 - 0,2$ с (см. далее).

Пример 4. Трёхканальная мультиспектральная ($\lambda 427,8$ нм N_2^+ , $\lambda 557,7$ нм [OI] и $\lambda 670$ нм N_2) авроральная камера MAC была разработана в университете Киото (Япония) для малого КА REIMEI (INDEX), запущенного в 2005 г. на круговую полярную орбиту с высотой ~ 605 км [10]. Ориентация этого КА строилась с помощью гироскопических микромаховиков так, чтобы проекция подножной точки м. с. л. всегда попадала в поле наблюдения эмиссии. Угол поля зрения каждого изображающего канала был $\sim 7,6^\circ$, что на высоте 100 км позволяло наблюдать площадку размером $\sim 70 \times 70$ км с разрешением $\sim 1,2 \times 1,2$ км. Минимальное время экспозиции было 60 м/с. На рис. 4 [16], показаны серии изображений авроральных эмиссий, полученных имаджером MAC в полуночно-утреннем секторе южного аврорального овала 24.04.2006 в интервале 11.55.00 – 11.55.40 UT (нижняя панель), и сопутствующие спектрограммы авроральных электронов, полученных одновременно электростатическим анализатором EISA в разных диапазонах питч-углов, включая диапазон $0 \div 60^\circ$ (высыпавшиеся электроны). Белыми маленькими квадратиками на каждом изображении отмечены локации подножной точки м. с. л. ($f. p.$), которую пересекал КА REIMEI во время экспозиции эмиссий. В период 11.55.25 – 11.55.27 UT на изображениях видны параллельные авроральные структуры (дуги), поперечный размер которых $\sim 3 - 5$ км.

Пример 5. Двухканальный авроральный имаджер FAI (Fast Auroral Imager) был разработан для малого КА e-POP из серии Cassiope [11], запущенного

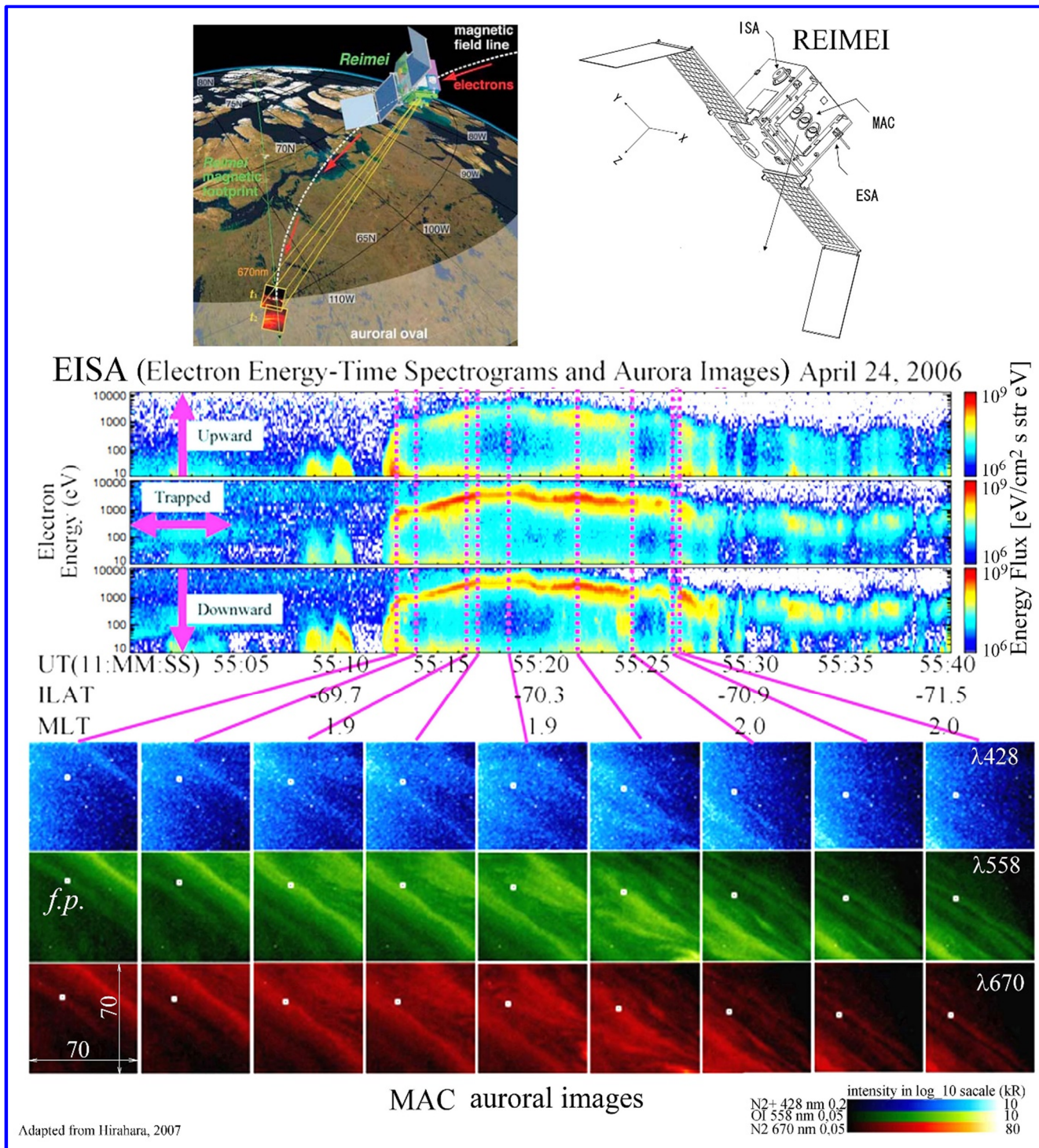


Рис. 4. На нижней панели приведены серии изображений авроральных эмиссий $\lambda 427,8$ нм N_2^+ , $\lambda 557,7$ нм [OI], и $\lambda 670$ нм N_2 1PG (сверху вниз), полученных одновременно 24.04.2006 в интервале 11.55.00 – 11.55.40 UT в южной полярной зоне авроральным имаджером MAC с орбиты МКА REIMEI. Шкалы интенсивности эмиссий в каждом канале (в Рэлях) показаны цветом ниже. На средней панели цветом показаны спектрограммы потока энергии авроральных электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 10 кэВ для трёх диапазонов пич-углов, включая $0 \div 60^\circ$ высышающиеся (downward), полученных анализатором EISA в окрестности КА REIMEI одновременно с изображениями авроральных эмиссий. На верхних панелях показаны слева – геометрия наблюдений авроральных эмиссий имаджером MAC с орбиты МКА REIMEI, а справа – компоновка приборов MAC, ESA, и ISA на МКА REIMEI и вектор осей полей зрения каналов имаджера MAC

в сентябре 2013 г. Существенно важной характеристикой этого прибора стал угол поля зрения каждого канала $\sim 26^\circ$, благодаря которому при ориентации оси КА на Землю в поле зрения двух изображающих каналов практически всегда попадала проекция м. с. л., которую пересекал КА во время экспозиции изображений авроральных эмиссий $\lambda 630,0$ нм [OI] и $\lambda 670 - 1100$ нм N_2 . На рис. 5 показана серия изображений авроральной эмиссии N_2 , полученных имаджером FAI (с временем экспозиции 0,05 с) с орбиты e-POP 19.02.2014 в интервале 07.31.06 – 07.37.04 UT в утреннем секторе MLT над территорией Канады. В изображениях присутствуют пульсирующие авроральные структуры в авроральной выпуклости, образовавшейся во время максимальной стадии суббури за несколько часов до наблюдений [18]. «Момент» наблюдений отмечен вертикальной пунктирной линией на развёртке Ap и AL -индексов (см. правую верхнюю панель рис. 5).

Комментарий. Справку об индексах AL и AU , характеризующих магнитную возмущённость в зоне полярных сияний, обусловленную усилением токов в ионосфере, протекающих вдоль границы аврорального овала (восточного и западного токов полярного электроджета), можно получить на сайте мирового центра данных по солнечно-земной физике (Мировой центр данных по солнечно-земной физике [сайт] : URL: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_AU_AL_AE_AO_ind.ru.html).

Эти изображения пульсирующих авроральных структур были получены с орбиты впервые за всю историю авроральных наблюдений. Параметры орбиты МКА e-POP были: апогей 1500 и перигей 325 км, $i = 81^\circ$, в момент экспозиции изображений высота КА была ~ 665 км. Период пульсаций интенсивности $\lambda 670 - 1100$ нм N_2 (1PG), наблюдавшихся в секторе 2.02 – 2.06 MLT и широт

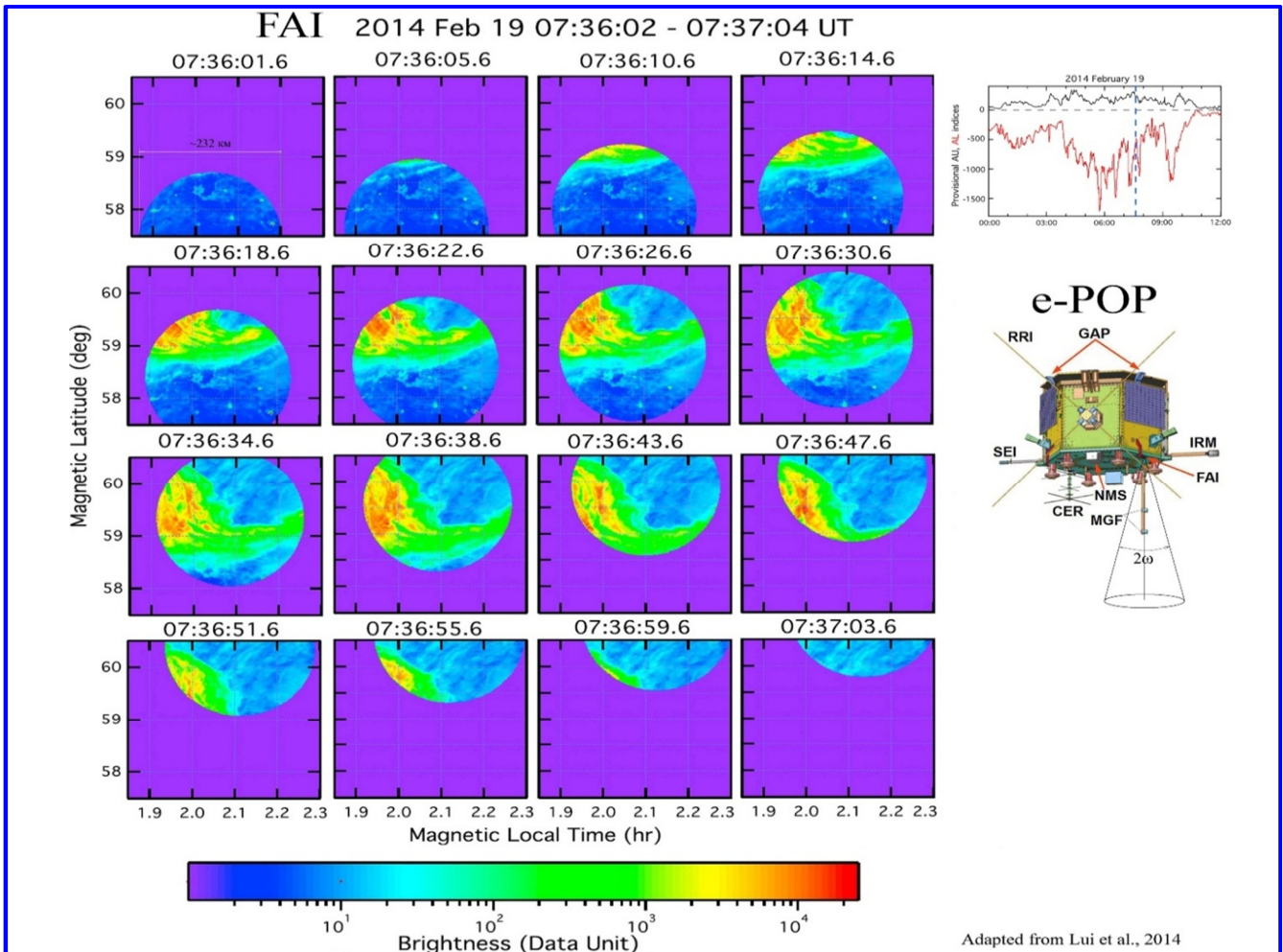


Рис. 5. Прореженная последовательность изображений авроральной эмиссии N_2 1PG в спектральной полосе $\lambda 670 - 1100$ нм в координатах MLAT-MLT, отображающих пульсирующие авроральные структуры, из серии полученных авроральным имаджером FAI с орбиты КА e-POP 19.02.2014. На правой верхней панели показана развёртка AU - и AL -индексов в период наблюдений. На правой нижней панели показано расположение аврорального имаджера FAI на борту КА e-POP и его угол поля зрения $2\omega = 26^\circ$

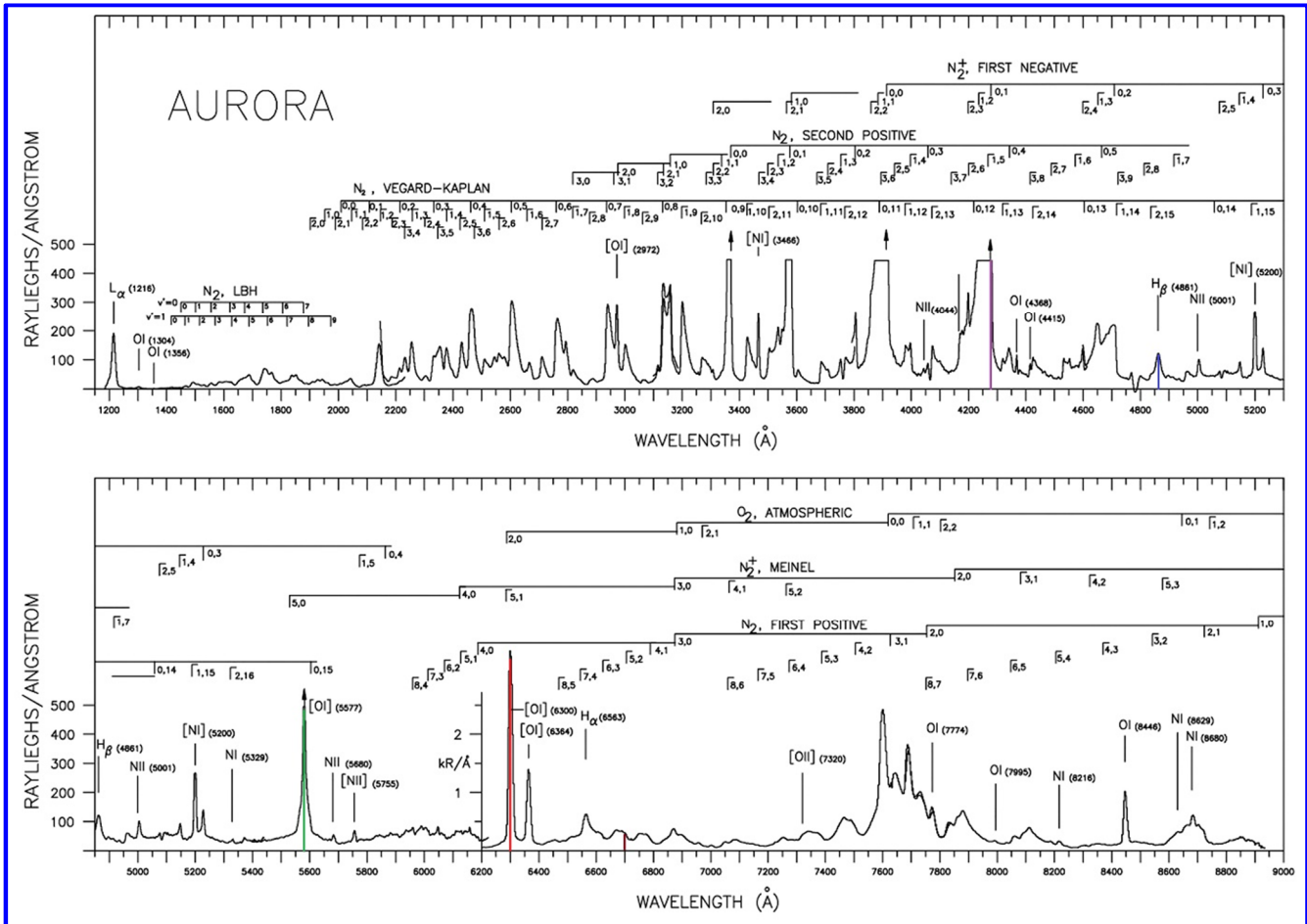


Рис. 6. Авроральный спектр в диапазоне длин волн 120 – 900 нм, измеренный в тангенциальной геометрии спектрометром AIS с орбиты STS-9, разработанным (PI) A.L. Broadfoot [32]. Цветом помечены эмиссионные линии, используемые для диагностики состояния полярной ионосферы в перспективных российских приборах, разрабатываемых для наблюдений с орбит перспективных КА «Метеор-МП» и «Зонд»

MLAT 59,00° – 59,14°, был ~30 с, а в секторе 59,39° – 59,09° – ~2 – 4 с. Авторы предположили, что источником пульсирующих структур могло быть рассеяние энергичных электронов на волнах в районе экваториальной плоскости ионосферы [28]. Факты регистрации авроральной эмиссии N_2 (1PG) в пульсирующих структурах с орбиты e-POP показали принципиальную возможность орбитального аврорального имаджинга для исследований их характеристик. Влияние пульсирующих структур на распространение сигналов навигационных систем в полярной ионосфере ещё предстоит исследовать (см. [29]) и п. 4.

2. Методические особенности наблюдений авроральных эмиссий с низкоорбитальных КА, обработки авроральных изображений, полученных сверху, и связь эмиссий видимой части спектра с энергетическими характеристиками высыпающихся частиц. Задачей перспективных

российских авроральных имаджеров на полярных орбитах с высотой <1000 км является получение «мгновенных» изображений свечения авроральных эмиссий в полярных областях с целью идентификации мелкомасштабных авроральных структур (~1,5 × 1,5 км) в подспутниковых локальных областях, имеющих диаметр в несколько сотен км на высотах *E*- и *F*-области ионосферы, и измерений распределений интенсивности во всех секторах MLT, попадающих в поле наблюдений. На каждом суточном витке низкоорбитального КА съёмка конкретных авроральных эмиссий позволяет дистанционно контролировать мгновенное состояние электродинамической обстановки полярной ионосферы, возникающее под воздействием высыпающихся частиц, а именно вносимый ими поток энергии и их среднюю энергию, а также электронную концентрацию и поперечные проводимости ионосферы, интегрированные по высоте [1, 16, 30, 53].

Эти характеристики, наряду с ТЕС, и особенно в 3D-варианте необходимы для картографирования, идентификации и оценки условий распространения трансионосферных сигналов радио- и навигационных систем над территорией России в режиме, близком к реальному времени [5].

На рис. 6 (в Р/Ангстрем, $10 \text{ \AA} = 1 \text{ нм}$) показан спектр авроральных эмиссий, полученный в тангенциальном направлении к слою свечения с помощью спектрометра AIS с орбиты STS-39 в апреле 1991 г. [32], в ВУФ-видимой и ближней инфракрасной областях (в диапазоне 120 – 900 нм). Спектр позволяет сориентироваться в относительных интенсивностях основных авроральных эмиссий, включая выбранные для измерений. Панели рис. 6 частично перекрываются по шкале длин волн примерно на 45 нм. Цветными вертикальными линиями на спектре отмечены эмиссии видимого диапазона ($\lambda_{427,8} \text{ N}_2^+ \text{ 1NG}$; $\lambda_{486,1} (H_\beta)$; $\lambda_{557,7} [\text{OI}]$; $\lambda_{630,0} [\text{OI}]$ и $\lambda_{670} \text{ N}_2 \text{ 1PG}$ в нм), используемые для дистанционной оптической диагно-

стики энергетических характеристик высыпавшихся в ионосферу частиц с низкоорбитальных КА и наземных станций (см. рис. 4 и 5), а также [30, 38].

Так как функциональные связи интенсивности эмиссий в ВУФ-области спектра с энергетическими характеристиками высыпавшихся частиц были рассмотрены в части 1 [8], то на рис. 7 рассмотрим эти функции для конкретных авроральных эмиссий в видимой области, т. е. поток энергии электронов $F_e = f(I_{\lambda_{427,8}})$ и средние энергии протонов $E_{\text{cp}}^p = f(I_{H_\beta})$ и электронов $E_{\text{cp}}^e = f(I_{\lambda_{630,0}}/I_{\lambda_{427,8}})$ и $E_{\text{cp}}^e = f(I_{\lambda_{630,0}}/I_{\lambda_{557,7}})$ (не показана на рис. 7). На верхней правой панели представлена зависимость потока энергии высыпавшихся электронов от интенсивности N_2^+ эмиссии $\lambda_{427,8} \text{ нм}$ (справа), а на нижней панели (справа) – зависимость отношения интенсивностей эмиссий $I(630,0)/I(427,8)$ от средней энергии электронов, введенные в [33] и уточненные в ряду работ [34 – 37].

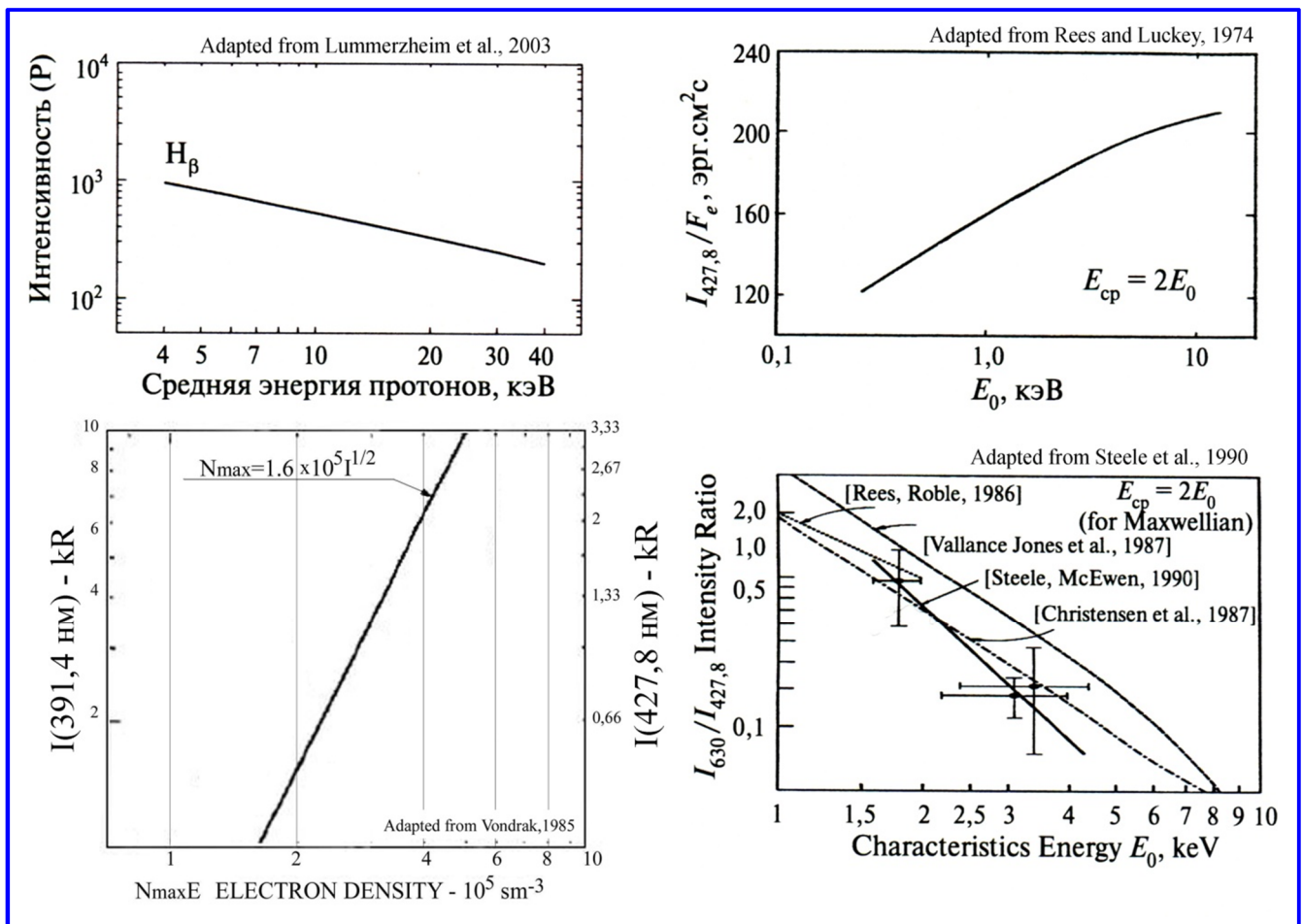


Рис. 7. Графические изображения функциональных связей интенсивностей авроральных эмиссий: $\lambda_{630,0} \text{ нм} [\text{OI}]$; $\lambda_{427,8} \text{ нм} \text{ N}_2^+$; и $\lambda_{486,1} \text{ нм} (H_\beta)$ с энергетическими характеристиками высыпавшихся частиц и электронной концентрацией в E-области ионосферы (рис. 5; [1])

Реальные высотные профили отношений $I(630,0)/I(427,8)$ и $I630/I557,7$, измеренные с помощью сети all-sky камер ALIS, показаны на правой верхней панели рис. 8 [38]. Эмпирическая связь интенсивности N_2^+ эмиссии $I(\lambda 391,4 \text{ NG})$ с электронной концентрацией в максимуме E -области ионосферы, выведенная в [39], показана на левой нижней панели. Согласно [40], интенсивности эмиссий $\lambda 391,4 \text{ нм } N_2^+$ и $\lambda 427,8 \text{ нм } N_2^+$ связаны точным соотношением $I(\lambda 391,4) N_2^+ = 3I(\lambda 427,8) N_2^+$. Это соотношение при переходе от интенсивности эмиссии $\lambda 391,4 \text{ нм}$ к измеряемой интенсивности эмиссии $\lambda 427,8 \text{ нм}$ позволяет просто заменить шкалу. Функция интенсивности водородной линии H_β от средней энергии высыпающихся протонов показана слева вверху. Обратим внимание, что при измерениях с орбиты на ночной стороне аврорального овала нет необходимости в спектральной селекции интенсивности доплеровски сдвинутой линии H_β , возбуждаемой при перезарядках высыпающихся протонов, в отличие от измерений интенсивности линии Ly- α на освещённой стороне (см. часть 1 [8]), так как практически вся интенсивность света, проходящего через узкополосный ($\delta\lambda \sim 2 \text{ нм}$) интерференционный фильтр [30, 41], приходится на линию H_β , возбуждённую при перезарядке протонов (см. реакции (3) в [8]) за исключением фоновых квантов света, рассеянных от подстилающей поверхности.

В [42] представлены примеры сравнений интегрированных по высоте проводимостей ионосферы Σp и Σh , выведенных по данным фотометра (с полем зрения $\Omega \sim 1,2^\circ$) с использованием функциональных связей средней энергии высыпающихся электронов с отношением интенсивностей эмиссий $I(630,0)/I(427,8) \sim 3,3 E_0^{-2,1}$ и потока энергии электронов $Fe = 0,29 \pm I(427,8)$ в [37], с Σp и Σh , измеренными радаром UHF EISCAT ($\Omega \sim 0,7^\circ$) в Tromsø (Норвегия) 10 и 11 февраля 2002 г., воспользовавшись соотношениями Σp и Σh с E_0 (см. (13) и (14) в [8]). Сравнения показали высокую корреляцию (0,8 для Σp) и (0,86 для Σh) в диффузной авроре, но в структурах авроральных дуг корреляция была существенно меньше. В [64 – 66, 43] была многократно подтверждена эффективность оптического метода оценок проводимостей ионосферы с орбит, а в [67] было предложено его использовать для орбитальных наблюдений с российских КА.

Основным методическим требованием к перспективным российским приборам, изображающим авроральные эмиссии, является угол поля зрения каждого спектрального канала, который согласно [30, 54] должен быть $2\omega = 30^\circ$ для того, чтобы проекция

м. с. л. магнитной силовой линии, пересекаемой КА в момент экспозиции изображения, попадала в поле изображения при условии, что КА имеет постоянную трёхосную ориентацию с направлением одной из строительных осей на Землю. Пространственное разрешение $1,5 \times 1,5 \text{ км}$ на высоте $\sim 100 \text{ км}$ необходимо для идентификации мелких авроральных структур в E -области ионосферы, которые могут отображать неоднородности N_e в том же масштабе. Выполнение этих требований позволит обеспечить мгновенный контроль интенсивности наблюдаемых эмиссий в подножной точке м. с. л. на высотах максимумов их излучения, а при использовании модели транспорта заряженных частиц, высыпающихся в ионосферу из магнитосферы [46, 47] и энергетических спектров, измеряемых анализатором энергичных частиц в диапазоне энергий от 100 эВ до 15 кэВ в окрестности КА, позволит валидировать измеряемые значения интенсивности эмиссий в точках $f. p.$ Методику дистанционной диагностики энергетических характеристик высыпающихся частиц по распределениям интенсивности конкретных эмиссий (см. далее) предполагается реализовать на основе данных с перспективных КА «Метеор-МП» [30] и МКА «Зонд» и др. [1], а возможно и ранее на орбите МКА [48].

В работе [49] показано существенное влияние сопряжения изображений эмиссий $I630$ и $I427,8$ на точность расчёта средней энергии высыпающихся электронов $E_{\text{ср}} = I630/I427,8$. Эта функция была впервые предложена в [33], а затем аппроксимирована аналитически в [37, 50]. При анализе наземных All-sky изображений эмиссий в авроральной дуге (в которых видны и мелкомасштабные структуры), полученных на станции Amundsen-Scott на Южном полюсе 09.08.2010 [49], сравнивались два варианта отношений $I630/I427,8$. В первом варианте было использовано геометрическое сопряжение пикселей в матричных приёмниках излучения этих эмиссий, т. е. в конусе поля зрения, а во втором варианте элементы изображений были сопряжены по м. с. л. Расчёт осуществлялся с помощью алгоритма трассирования вдоль м. с. л. в ПО «Вектор-М» [51, 52]. Физически правильное отношение интенсивностей разновысотных эмиссий, взятых в элементах матриц, сопряжённых вдоль м. с. л., позволяет уточнять значения средней энергии электронов на несколько кэВ, что немаловажно для анализа процессов в полярной ионосфере.

Технология обработки изображений авроральных эмиссий в видимой области спектра на предварительном этапе (до вычислений распределений энергетических характеристик частиц и электронной

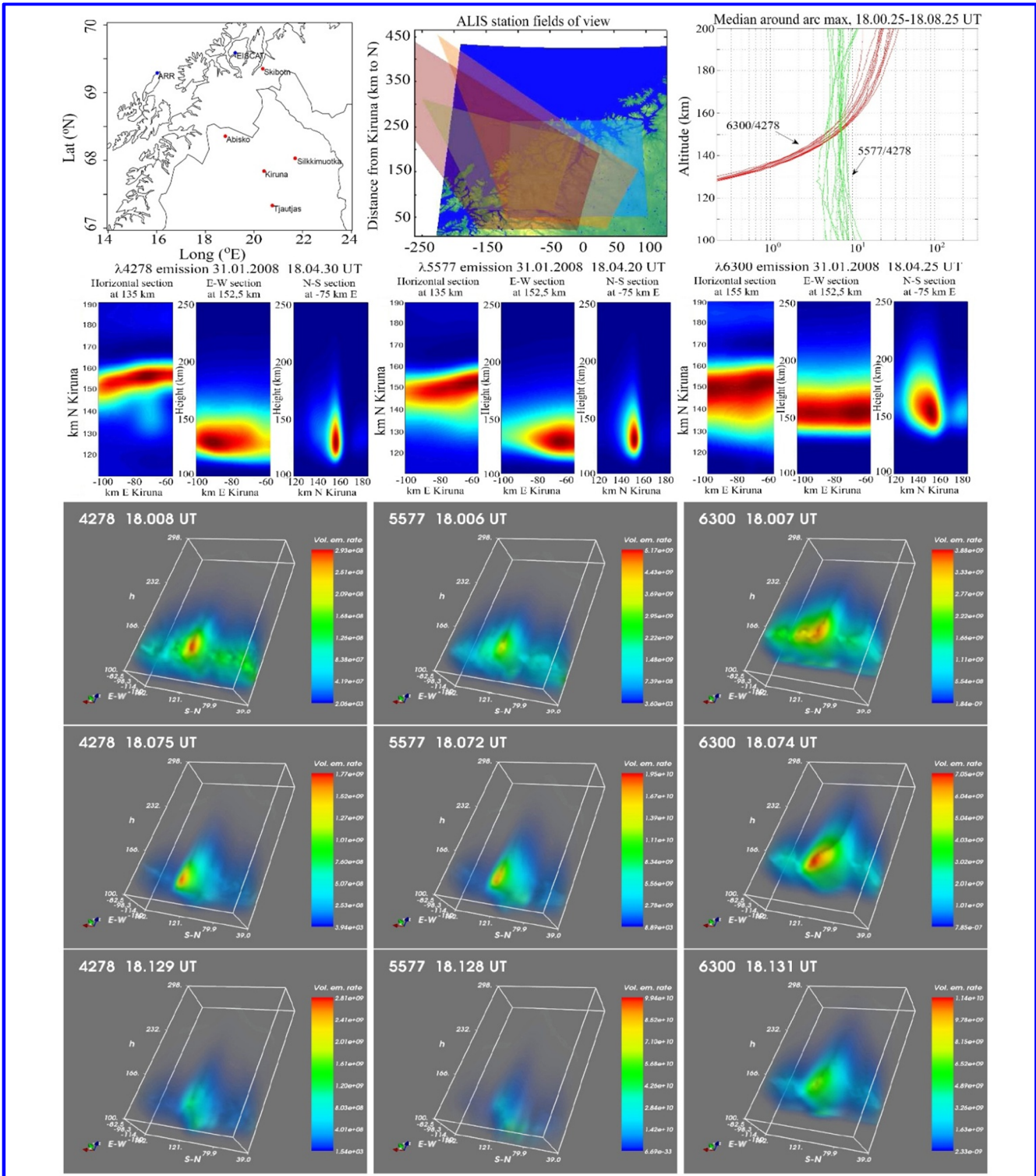


Рис. 8. На нижних панелях представлен пример 3D-реконструкций серий изображений структуры авроральных эмиссий $\lambda 427,8$ нм N_2^+ , $\lambda 630,0$ нм [OI] и $\lambda 557,7$ нм [OI], полученных 31.01.2008 с помощью авроральных изображающих камер триангуляционной скандинавской сети ALIS в интервале 18.04.20 – 18.04.30 UT. На второй панели сверху показаны 2D-изображения, полученные на станции в Кируне в плоскостях: горизонтальной, восток – запад, и север – юг. На верхних панелях: карта расположения изображающих камер и некогерентного радара обратного рассеяния EISCAT (слева); карта перекрытий полей зрения камер сети ALIS в километровом масштабе дальности от Кируны (в середине); высотные профили (в интервале 100 – 200 км) отношений интенсивности эмиссий $I(630,0)/I(427,8)$ и $I(557,7)/I(427,8)$, полученные в интервале 18.00.25 – 18.08.25 UT 31.01.2008. Профили выделены красным и зелёным цветом соответственно (справа) (Fig.1 – 5 [38])

концентрации в E -области полярной ионосферы) включает ряд пунктов, перечисленных в п. 2.5 для ВУФ-эмиссий [8]). Кроме того, в дополнительном эскизном проекте (ДЭП) аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП» [53] был рассмотрен ряд коррекций изображений: на «смаз» при экспозиции за счёт скорости КА, на тангенциальное усиление (эффект Ван – Райна), а также рассмотрены алгоритмы учёта ряда паразитных факторов: альbedo эффекта авроральных структур от подстилающей поверхности; влияния вклада «света» Луны, отражённого от подстилающей поверхности; паразитного вклада в сигнал рассеянного света от звёздного неба, и вклада от источников света на поверхности Земли. С деталями алгоритмов этих коррекций можно ознакомиться в [30, 53, и ссылки в них].

3. Методическая возможность авроральных наблюдений с орбит двух КА и поверхности Земли одновременно в разных ракурсах, реконструкций плоских изображений и получения локальной 3D-структуры эмиссий и электронной концентрации. Ситуация, спрогнозированная с помощью ПО «Вектор-М» [55] и геометрия одновременных наблюдений авроральных эмиссий в одной и той же авроральной структуре при разных ракурсах двумя авроральными имаджерами «Авровизор-ВИС» и «Летиция» с двух перспективных КА «Метеор-МП» и «Зонд» (соответственно) проиллюстрирована на рис. 3 в [31] и здесь не показана. Эта геометрия расположения КА в северной полярной зоне была смоделирована на основе предварительных начальных условий орбит, когда стало известно об одновременном (предварительно) запуске КА «Метеор-МП» и КА «Зонд». Оказалось, что такие наблюдения могут проводиться с разной степенью перекрытия изображений эмиссий несколько раз в неделю. Подобная методика прогнозирования ситуаций и наблюдений авроральных эмиссий локальных авроральных структурах в разных ракурсах одновременно с измерениями потоков высыпавшихся электронов и протонов может быть использована и на сериях (группировках) ориентированных на Землю МКА [48, 54]. Варианты возможных алгоритмов реконструкции локальных 3D-распределений интенсивности эмиссий из полученных с орбит КА плоских изображений, и, как следствие, реконструкции 3D-распределений электронной концентрации в E -области ионосферы были детально рассмотрены в [31].

Пример 6. Результаты расчётов с использованием одного из алгоритмов показан на рис. 8. Это пример реконструкции 3D-распределений интенсивности трёх эмиссий $\lambda 427,8$ нм N_2^+ , $\lambda 630,0$ нм [OI] и $\lambda 557,7$ нм [OI] из плоских изображений, по-

лученных 31.01.2008 с авроральных изображающих камер триангуляционной скандинавской сети ALIS [56], в интервале 18.04.20 – 18.04.30 UT. Эти результаты (нижняя панель) были получены с использованием алгоритма MSIRT в [38]. На второй панели снизу показаны двумерные изображения эмиссий в плоскостях N-S и E-W. На первой панели сверху показаны карты расположения изображающих камер сети ALIS (слева) и углы полей зрения изображающих камер сети на фоне поверхности Земли (в середине). На правой верхней панели рис. 8 показана серия высотных профилей отношений интенсивностей эмиссий $I_{630}/I_{427,8}$ и $I_{557,7}/I_{427,8}$, полученных в интервале 18.00.25 – 18.08.25 UT. Аналитическая функциональная связь отношений интенсивностей эмиссий с характеристической энергией E_0 высыпавшихся электронов при Максвелловском энергетическом распределении была аппроксимирована в [50] для сети ASC MIRACLE с рядом ограничений и допущений. Рассмотренные алгоритмы могут быть адаптированы для реконструкций изображений авроральных эмиссий, которые предполагается получать с орбит МКА [48, 54].

4. Пространственная корреляция сцинтилляций сигналов навигационных систем в полярной ионосфере с высыпаниями заряженных частиц и структурой авроральных форм. Исследования влияния динамики неоднородностей электронной концентрации в полярной ионосфере на качество распространения сигналов навигационных систем проводятся уже более двух десятков лет. Структуры плазмы и её динамики в области аврорального овала и полярной шапки настолько разнообразны, что по-видимому ещё немало комплексных (орбитальных и наземных) экспериментов будет проведено, чтобы разобраться в причинах и механизмах воздействия среды полярной ионосферы на распространение сигналов [57]. Эти эксперименты проводятся со всё более высоким пространственным и временным разрешением во всех локальных секторах MLT в различных геомагнитных условиях. Как уже упоминалось выше, принципиальная роль измерений распределений авроральных эмиссий в том, что они отображают морфологию и размеры структур высыпавшихся заряженных частиц и их энергетические характеристики на разных высотах ионосферы, но корреляция уровней сцинтилляций с интенсивностью эмиссий далеко неоднозначная. На рис. 9 показан пример использования авроральных изображений, получаемых all-sky камерами с наземных станций в полярных областях. Для анализа пространственной корреляций сигналов GPS и авроральных структур в окрестности станции во время относительно малой

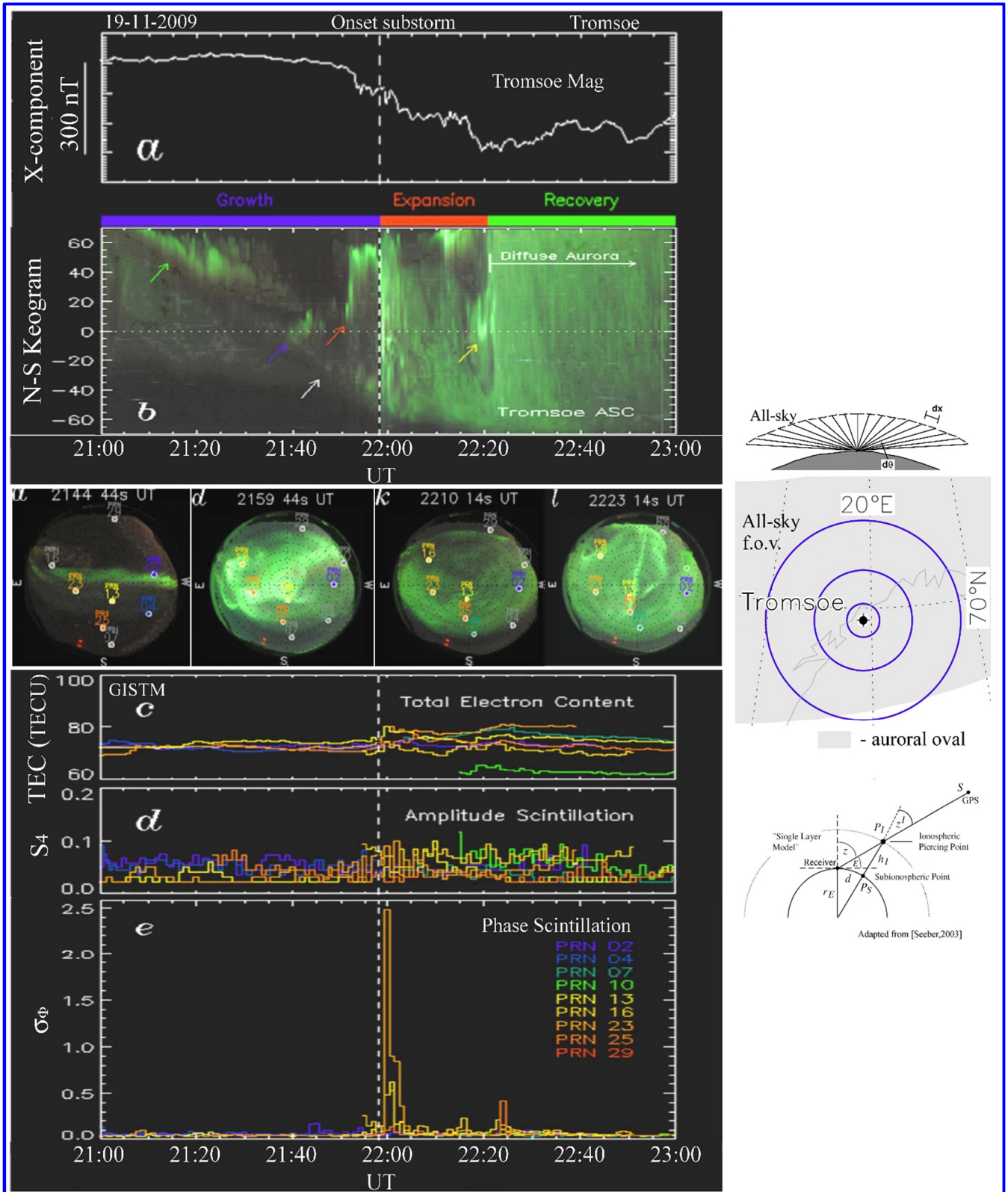


Рис. 9. На панели (b) показана N-S кеограмма интенсивности, полученная 19.11.2009 во время слабой суббури в Тромсе на основе all-sky изображений, полученных в широкой спектральной полосе, четыре из которых (на разных стадиях суббури) выборочно показаны ниже. X-компонента магнитометра в Тромсе (верхняя панель) свидетельствует о фазе суббури. Развёртка данных монитора GISTM показывает хронологию значений TEC, развёртка значений индекса S_4 показывает малые амплитудные скинтиляции ($S_4 \leq 0,1$), и вспышку фазовых скинтилляций ($\sigma_\phi \sim 2,5$ рад) в 22.00.02 UT сразу после начала фазы расширения суббури [58]

суббури 19.11.2009, использованы авроральные изображения, полученные интегральной (по спектру) all-sky камерой, установленной на станции Тромсе в Норвегии.

Пример 7. Результаты наблюдений, показанных на рис. 9 [58]. Задачей этих исследований было проследить, как изменяются характеристики сцинтилляций сигналов при протыкании ими структур свечения в авроральном овале на разных стадиях суббури. В течение фазы роста (см. магнитограмму на верхней панели рис. 9), индекс фазовой сцинтилляции не превышал $\sigma_\phi < 0,2 \text{ rad}$, т. е. слабые фазовые сцинтилляции идентифицировались время от времени, когда дискретные авроральные дуги появлялись на пути сигнала GPS. Это свидетельство того, что относительная позиция GPS спутника по отношению к дискретной дуге является важным фактором контроля возникновения фазовых сцинтилляций, что соответствовало более ранним наблюдениям [59, 60]. Сразу после начала фазы расширения суббури примерно в 21.57 UT фазовые сцинтилляции ($\sigma_\phi > 0,5 \text{ rad}$) были зарегистрированы в почти в половине GPS-сигналов на пути к приёмнику, а индекс амплитудных сцинтилляций (отношение стандартного отклонения мощности сигнала к средней мощности сигнала, вычисленное за определенный промежуток времени) остался примерно на том же уровне ($S_4 < 0,1$). Это происходило, когда поле приёмника было полностью покрыто яркими авроральными движущимися структурами. Резкое возрастание фазовой сцинтилляции продолжалось ~5 мин после начала фазы расширения, а потом уровень фазовой сцинтилляции вновь уменьшился до начального уровня, как только структура протыкаемых авроральных форм стала более диффузной. Из рис. 9 видно, что уровень фазовой сцинтилляции во время фазы восстановления в основном был низкий, причём слабые фазовые сцинтилляции появлялись и в локальных объёмах, где дискретные авроральные дуги видны на фоне диффузных структур. Время «вспышки» фазовых сцинтилляций коррелирует с началом фазы расширения суббури, когда значения индекса σ_ϕ увеличиваются до величины 2,5 rad. На средней панели показаны 4 All-sky изображения в течение развития суббури (одно на фазе роста в 21.44.44 UT, одно в момент вспышки в 22.59.44 UT, одно на фазе расширения в 22.10.14 UT, и одно на фазе восстановления в 22.23.14 UT). Положения точек протыкания авроральных структур сигналами конкретных PRN спутников GPS замаркированы цветными кружочками на левой панели, серые точки означают, что сигнал принимался при возвышении спутника ме-

нее порога 30° . Расположение точки протыкания P_1 сигналом от спутника GPS в простой однослойной модели (single layer model) показана внизу справа. Справа вверху – положение географической точки Тромсе в авроральном овале 19.11.2009 и границы поля наблюдения All-sky камеры на высоте 110 км кругами вокруг центра положения в зависимости от угла отклонения от зенита: 30° , 60° , 75° .

Результат наблюдений в Тромсе свидетельствуют, что фазовые сцинтилляции возникают, когда сигналы спутников GPS проходят сквозь области неоднородной электронной плотности, сопутствующие дискретному структурированному свечению, возникающему при структурированных высыпаниях электронов (не показаны), причём уровень индексов как амплитудной, так и фазовой сцинтилляции не зависит от интенсивности эмиссий.

Отметим, что факты сцинтилляций сигналов с КА GPS при протыкании авроральных структур во время суббури, проиллюстрированные на рис. 9 и в ряду других работ (см. ссылки в [30]), свидетельствуют об эффективности использования методики локальной оптической диагностики состояния полярной ионосферы с наземных станций, обеспечивающей возможность координатной привязки точек протыкания к структурам свечения, а следовательно и структурам высыпаний частиц. Подобные корреляции фазовых сцинтилляций сигналов GPS при протыкании ими авроральных структур наблюдались во время геомагнитных возмущений и на станции Южный Полюс [59, 60], а также в Американском секторе [61]. Для наземной авроральной имаджелогии главной проблемой являются плохие погодные условия в зимний период. Особенно сложны для анализа корреляций ситуации, когда на пути сигнала встречается множество мелкомасштабных структур высыпаний электронов и возникающих неоднородностей ионосферы, причём в E - и F -области практически одновременно. Это можно видеть по данным в [29].

Пример 8. В работах [29, 62] проведены статистические исследования корреляций GPS-сцинтилляций (GNSS-приёмники сигналов в Осло) с авроральными эмиссиями $\lambda 630,0$ и $\lambda 557,7$ нм, измеренными наземными All-sky камерами, установленными в Ny-Alesund в Норвегии. В этих работах впервые была проведена селекция корреляций индекса фазовых сцинтилляций с пятнами в полярной шапке, авроральными дугами и авроральными блобами (высокоплотными сгустками N_e) и показано, что самые сильные сцинтилляции случаются вблизи полуночи MLT на границах авроральных блобов, дрейфующих из полярной шапки в сторону

ночного аврорального овала. Авторы [29] выделили два типа блобов: BT-1 и BT-2. BT-1 (blob type 1) связан с высокоплотной неоднородной плазмой, «пришедшей» в результате дрейфа в авроральный овал из полярной шапки, а BT-2 – относится к усилениям электронной плотности, которые были сгенерированы локальными высыпаниями частиц. Они показали (рис. 10), что самый высокий уровень фазовых сцинтилляций сигналов GPS возникает, когда BT-1, двигаясь из полярной шапки, достигает аврорального овала с авроральными дугами. Наблюдения All-sky камерами с фильтрами, настроенными на кислородные эмиссии $\lambda 630,0$ и $\lambda 557,7$ нм, проводились с ноября 2010 по февраль 2014 гг. с 18.30 по 04.50 MLT.

Заключение

На конкретных иллюстрированных примерах рассмотрены диагностические возможности имажинга авроральных эмиссий с низкоорбитальных КА и поверхности Земли. Пространственные характеристики авроральных структур разных масштабов, энергетические характеристики высыпающихся заряженных частиц, градиенты электронной концентрации отображаются в распределениях интенсивности авроральных эмиссий как в видимом и ближнем ИК, так и в ВУФ-диапазонах спектра. Методические особенности получения локальных изображений секторов аврорального овала и полярной шапки в видимой и ВУФ-эмиссиях с низкоорбитальных КА различны, но дополняют друг друга. Показан пример, демонстрирующий

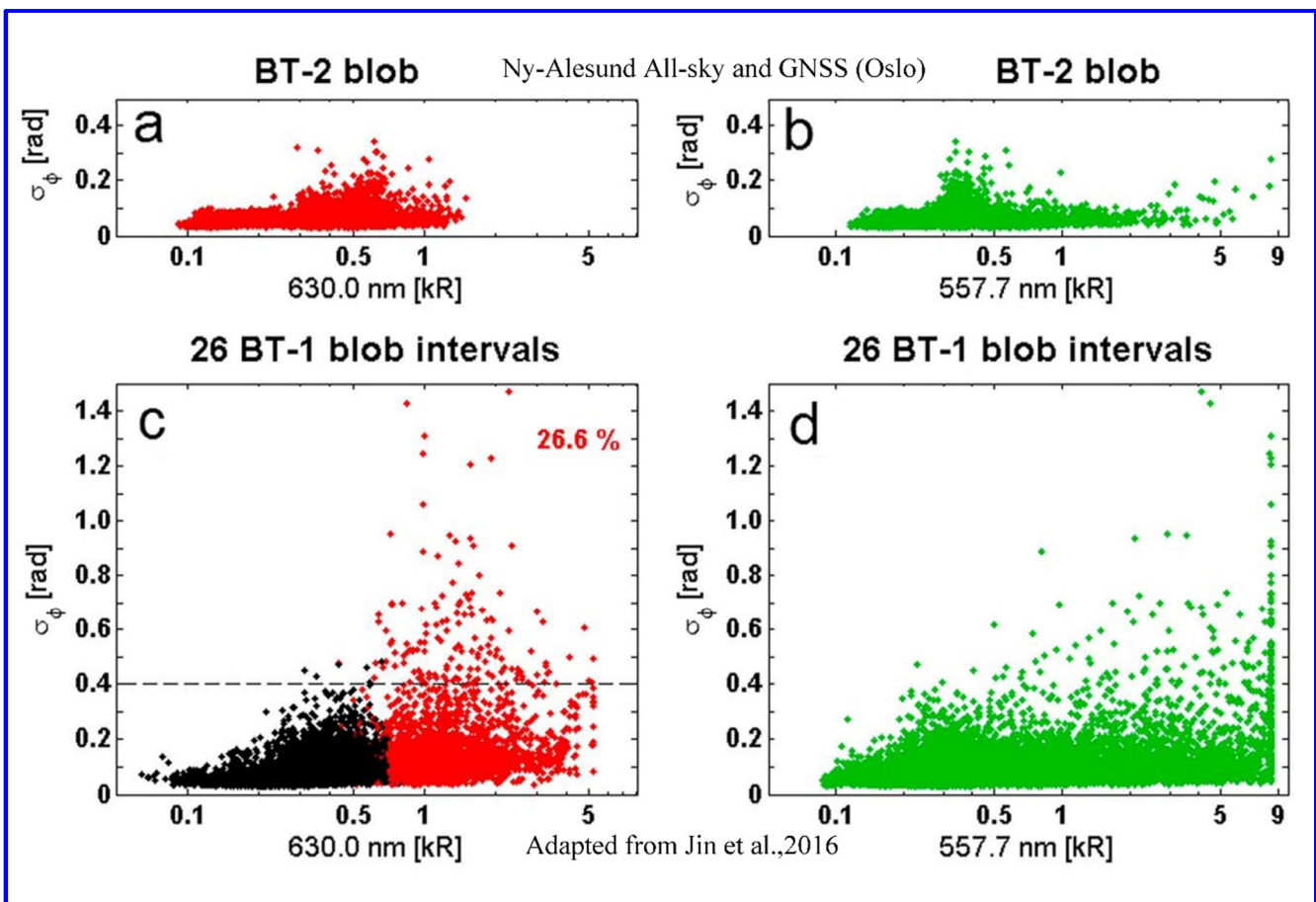


Рис. 10: *a* – зависимость разброса индекса фазовых сцинтилляций σ_ϕ сигналов GPS от интенсивности авроральной эмиссии 630 нм по данным All-sky камер за 20 часов при авроре без пятен (т. е. блобы BT-2); *b* – та же зависимость только для эмиссии 557,7 нм; *c* – зависимость разброса индекса фазовых сцинтилляций сигналов GPS по данным за 41,4 часа для авроры с пятнами (т. е. блобы BT-1). Красными точками маркированы измерения, которые были в авроральной области, а чёрными измерения, которые были в полярной шапке (из пятен или фона). 26,6% точек, когда индекс сцинтилляций $\sigma_\phi > 0,4$ rad в авроральной области; *d* – зависимость разброса индекса фазовых сцинтилляций сигналов GPS по данным за 41,4 часа для авроры с пятнами (т. е. блобы BT-1). Зелёными точками маркированы измерения, которые были в авроральной области для эмиссии 557,7 нм

возможность наблюдений с орбиты МКА e-POP пульсирующих авроральных структур. Отмечены преимущества перспективных российских имаджеров для наблюдений авроральных эмиссий перед использованными в зарубежных орбитальных проектах. Поток энергии частиц и их средняя энергия, и как следствие, градиенты N_e и поперечные магнитному полю проводимости полярной ионосферы, интегрированные по высоте, могут картографироваться по распределениям интенсивности конкретных эмиссий и их отношений, которые вычисляются при анализе изображений. Представлены некоторые детали методик проектируемых экспериментов с авроральными имаджерами на перспективных российских КА с учётом опыта измерений, проведённых на орбитах советских и зарубежных КА. Проанализированы возможности одновременных наблюдений фрагментов одних и тех же авроральных структур и возможности 3D-реконструкций изображений авроральных эмиссий, полученных в разных ракурсах, как с орбит КА, так и с поверхности Земли. Развитие алгоритмов реконструкций позволит серийно получать локальные объёмные распределения энергетических характеристик высыпавшихся электронов и электронной концентрации в ограниченном интервале высот полярной ионосферы.

В изображениях авроральных эмиссий, полученных с поверхности Земли в полярных областях, при координированных наблюдениях с измерениями характеристик сцинтилляций сигналов навигационных спутников регулярно фиксируются пространственные корреляции интенсивности сцинтилляций сигналов, регистрируемых мониторами GISTM, при пересечении (протыкании) ими авроральных структур разных масштабов в авроральном овале и полярной шапке. Пример таких наблюдений рассмотрен в условиях развития суббури 19.11.2009. Рассмотрены результаты статистических исследований (2010 – 2014 гг.) корреляций индекса фазовых сцинтилляций сигналов GPS в Норвегии с распределениями интенсивности авроральных эмиссий $\lambda 630,0$ и $\lambda 557,7$ нм в авроральном овале и полярной шапке [29], которые показали, что индекс фазовых сцинтилляций не зависит от интенсивности эмиссий, а зависит от пространственной авроральной структуры или последовательности структур, а следовательно и от структуры высыпаний частиц. Самые высокие значения индекса сцинтилляций наблюдаются в условиях, когда дрейфующие высокоплотные сгустки плазмы (блобы) из дневной полярной шапки достигают полуночного аврорального овала. Исследования и

анализ причинно-следственных связей этих явлений в различных секторах MLT продолжаются. Основной причиной сцинтилляций являются мелкомасштабные неоднородности N_e в полярной ионосфере, структурированные высыпаниями заряженных частиц, и условия, приводящие к генерации неустойчивостей в плазме [63]. Всё ещё не ясны детали механизмов возникновения и отсутствия сцинтилляций при прохождении сигнала через подобные структуры, динамики и временной эволюции в течение различных фаз суббури в различных секторах MLT. Результаты, полученные в ряду рассмотренных экспериментальных работ, стали основой для мотивации необходимости продолжений исследований в различных геомагнитных условиях на основе данных координированной орбитальной прямой диагностики характеристик высыпавшихся частиц, дистанционных измерений распределений интенсивности авроральных эмиссий с помощью имаджеров высокого пространственного и временного разрешения одновременно с диагностикой уровней сцинтилляций сигналов навигационных систем, включая ГЛОНАСС и GPS. Для постановки и реализации экспериментов необходимо дальнейшее совершенствование средств диагностики, т. е. орбитального и наземного комплексов аппаратуры на основе современных изображающих детекторов и новых методик. Необходимо дальнейшее развитие моделей транспорта заряженных частиц в верхней атмосфере и ионосфере, ионизации составляющих и возбуждения авроральных эмиссий, использующих как входные данные измерений потоков заряженных частиц, получаемых одновременно с изображениями эмиссий, а также моделей распространения радиоволн в полярных широтах, использующих результаты измерений локальной электродинамической обстановки в ионосфере. Предполагается, что в перспективе развития станет возможным, чтобы модели полярной ионосферы интерактивно обменивались данными с моделями распространения радиоволн в рамках системы [5] дистанционного контроля состояния характеристик полярной ионосферы с различных орбит, трасс БПЛА, и поверхности Земли в различных масштабах (от глобального до километровых локальных) и радарных средств диагностики на разных высотах в конкретных секторах, что несомненно обеспечит возможность решения задачи краткосрочного прогнозирования влияния полярной ионосферы на качество трансionoсферных сигналов и точность позиционирования в конкретных секторах полярной ионосферы.

Сокращения

БПЛА – беспилотный летательный аппарат
 ВУФ – вакуумный ультрафиолет
 КА – космический аппарат
 кР – килоРэлей, 1 Рэлей = 10^6 фотон/см²·с·стер
 МКА – малый/микрокосмический аппарат
 м. и. с. – магнитосферно-ионосферная система
 м. с. л. – магнитная силовая линия
 AIM – Auroral Ionospheric Mapper
 ALIS – Auroral Large Imaging System
 DMSP – Defense Meteorological Satellite Program
 e-POP – Enhanced Polar Outflow Probe satellite
 FAI – Fast Auroral Imager
 f.p. – foot point
 FUV – far ultraviolet
 GISTM – GPS station Ionospheric Scintillation and
 TEC Monitor receiver
 GPS – Global Positioning System
 GNSS – Global Navigation Satellite Systems
 IMAGE – Imager for Magnetopause-to-Aurora
 Global Exploration
 kRay (or kRy) – kilo Rayleigh,
 1 Rayleigh = 10^6 photon/sm²·s·ster
 LBH – Lyman-Birdge-Hopfield bands of N₂
 MAC – Multispectral Auroral Imager
 MLAT – инвариантная широта Λ₀
 MLT – Magnetic Local Time
 MSIRT – Multiplicative Simultaneous
 Iterative Reconstruction
 PI – principal investigator
 PRN – Pseudorandom noise codes
 SI – spectrographic imager
 SSUSI – Special Sensor Ultraviolet
 Spectrographic Imager
 STS – Space Transportation System
 TEC – Total Electron Content
 VUV – Vacuum Ultraviolet

Литература

1. Кузьмин А. К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит перспективных российских космических аппаратов / ИКИ РАН // Пр. 2161. – 2011. – 49 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [iki.rssi.ru>books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf).
2. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables // Journ. Geophys. Res.: Space Physics. – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10623 – 10637. – Doi:10.1002/2016/JA022607.
3. Paschmann G., Haaland S., Treumann R., Auroral plasma physics // Space Sci. Rev. – 2002. – V. 103. – № 1 – 4. – 485 p. – Doi:10.1023/A:1023030716698.
4. Zhang Y., Paxton L. J. (eds.), Auroral dynamics and space weather // AGU, J. Wiley&Sons, Inc. Geophys. Monograph series 215, Washington, D. C. – 2016. – 312 p. – ISBN: 9781118978702.
5. Аксёнов О. Ю., Аникин В. А., Борисов Ю. А., Кузьмин А. К. Основы развития перспективной системы контроля состояния фоновой обстановки в полярной ионосфере и её краткосрочного прогноза с помощью комплексного мониторинга магнитосферно-ионосферного взаимодействия в части авроральной активности с орбит КА и поверхности Земли / О. Ю. Аксёнов, В. А. Аникин, Ю. А. Борисов, А. К. Кузьмин, В. Б. Лапшин, Ляхов А. Н. [и др.]. // Препринт 2015-1. – 2015. – Москва. – ЦАО. – МФТИ. – 37 с. – 8 рис. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201501.pdf>.
6. Hunsaker R. D., Hargreaves J. K. The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation // Cambridge Univ., UK. – 2003. – 617 pages. – ISBN: 9780511535758. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535758>.
7. Basu S., Grovesa K., Basu S., Sultana P. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans // Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2002. – V. 64. – Pp. 1745 – 1754.
8. Кузьмин А. К., Мерзлый А. М. Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 1 (ВУФ-диапазон) / А. К. Кузьмин, А. М. Мерзлый // Вопросы электромеханики. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2018. – Т. 167. – № 6. – С. 9 – 41.
9. Paxton L. J., and Meng C-I. Auroral imaging and space-based optical remote sensing // Johns Hop-kins APL Technical Digest. – 1999. – V. 20. – N 4. – Pp. 556 – 569.
10. 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 Planets Space. – 2008. – V. 60. – Pp. 827 – 835.
11. 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. – 2014. – V. 189. – Pp. 15 – 25. – Doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
12. Gogoshev M., Petkov N., Kuzmin N., Gogosheva Ts., Spasov S., Kostadinov I. Airglow atmospheric imager on board the «IK-Bulgaria-1300» satellite // Adv. Space. Res. – 1983. – V. 1.2. – № 7. – Pp. 115 – 120. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198801.pdf>.
13. Balebanov V. M., Kuzmin A. K., Gogoshev M. M., Gogosheva Ts. N., Petkov N. P., Kinev K. Some results of scanner spectrophotometric measurements of aurora and airglow from IK-Bulgaria-1300 sat-ellite and prospects of similar measurements, in Results of the ARCAD 3 project and of the recent programmes in magnetospheric and ionospheric physics // Toulouse 84, CNES. – 1984. – Pp.747 – 764.
14. Балебанов В. М., Кузьмин А. К., Пономарёв Ю. Н., Сеницын В. М. О некоторых аспектах планирования геофизических экспериментов на примере фотометрических измерений с двух ИСЗ // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1033, 1985. – 19 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198502.pdf>.
15. Кузьмин А. К., Крученицкий Г. М., Потанин Ю. Н., Баныщикова М. А. Экспериментальный опыт и перспек-

- тивы развития авроральной оптической диагностики состояния полярной ионосферы с орбит // Вопросы электромеханики. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2018. – Т. 163. – № 2. – С. 12 – 28.
16. Hirahara M., Miyashita Y., Ebihara Y., Seki K. Introduction of Plasma Particle Data Analysis for Reimei Observations // Presentation. – 2010. – URL:http://www.iugonet.org/meetings/2010-02-25/05_Reimei_EISA_Hirahara_20100225.pdf
17. Frey H. U., Amm O., Chaston C. C., Fu S., Haerendel G. [at all]. Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc // *Journ. Geophys. Res.* – 2010. – V. 115. – A10209. – doi:10.1029/2010JA015537.
18. Lui A. T. Y., Cogger L. L., Howarth A. and Yau A. W. First satellite imaging of auroral pulsations by the Fast Auroral Imager on e-POP // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – Pp. 6877 – 6882. – doi:10.1002/2015GL065331.
19. Meng C.-I. and Huffman R. E. Ultraviolet imaging from space of the aurora under full sunlight // *Geophys. Res. Lett.* – 1984. – V. 11. – Issue 4. – Pp. 315 – 318. – <https://doi.org/10.1029/GL011i004p00315>.
20. Schenkel F. W. and Ogorzalek B. S. The HILAT vacuum ultraviolet auroral imager // *John Hopkins Apl Technical Digest.* – 1984. – 5(2). – Pp. 131 – 137.
21. Germany G. A., Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators // *Journ. Geophys. Res.* – 1994. – V. 99. – Issue A1. – Pp. 383 – 388. – <https://doi.org/10.1029/93JA02357>
22. Paxton L. J., Meng C.-I., Fountain G. H., Ogorzalek B. S. [at all]. SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters // *Proc. SPIE Ultraviolet Technology IV.* – 1992. – V. 1764. – Pp. 161 – 176. – doi:10.1117/12.140846.
23. Henderson M. G., Reeves G. D., Skoug R., Thomsen M. F. [at all]. Magnetospheric and auroral activity during the 18 April 2002 sawtooth event // *Journ. Geophys. Res.* – 2006. – V. 111. – A06206. – doi:10.1029/2005JA011366.
24. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M., Shadrin D. G. [at all]. Methodological particularities of creating of remote mapping diagnostical system of ionospheric characteristics from the orbits of three perspective Russian satellites // Preprint of Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2014. – 24 pages. – 7 Figures and 1 Table, on materials of the report COSPAR 40. – Moscow. – 3 – 9 August 2014 SCC section (Space Studies of the Upper Atmosphere of the Earth and Planets including Reference Atmospheres) C.02 Advances in Remote Sensing of the Middle and Upper Atmospheres and Ionosphere from the Ground and from Space, including Sounding Rockets and Multi-instrument Studies (poster presentation C.02 TFS-S-009). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201401.pdf>.
25. Strickland D. J., Jasperse J. R., and Whalen J. A. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – Issue A10. – Pp. 8051 – 8062. – <https://doi.org/10.1029/JA088iA10p08051>
26. Mende S. B., Heeterks H., Frey H. U., Stock J. M. [at all] Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 3. Spectral imaging of Lyman- α and OI 135.6 nm // *Space Sci. Res.* – 2000. – V. 91. – Issue 1 – 2. – Pp. 287 – 318. – <https://doi.org/10.1023/A:1005292301251>
27. Frey H. U., Mende S. B., Immel T. J., Gerard J.-C. [at all] Summary of quantitative of IMAGE far ultraviolet auroral data // *Space Sci. Reviews.* – 2003. – V. 109. – Issue 1. – 4. – Pp. 255 – 283. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000007521.39348.a5>.
28. Nishimura Y., Bortnik J., Li W., Thorne R. M., Lyons L. R. [at all]. Identifying the Driver of Pulsating Aurora // *Science.* – 2010. – V. 330(6000). – Pp. 81 – 84. – doi: 10.1126/science.1193186
29. Jin, Y., Moen, J. I., Miloch, W. J., Clausen, L. B. N., Oksavik, K. Statistical study of the GNSS phase scintillation associated with two types of auroral blobs // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. – V. 121. – Pp. 4679 – 4697. – <https://doi.org/10.1002/2016JA022613>.
30. Кузьмин А. К., Мерзлый А. М., Баныщикова М. А. [и др.] Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА «Метеор-МП» // Вопросы электромеханики, Труды ВНИИЭМ за 2016 год. Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2016. – С. 325 – 341. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201702.pdf>.
31. Кузьмин А. К., Баныщикова М. А., Чувашов И. Н., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Преимущества наблюдений авроральных структур с двух орбит и возможности для реконструкции 3D-распределений эмиссий, получаемых с разных позиций имаджеров // Вопросы электромеханики. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – Т. 158. – № 3. – С. 7 – 21.
32. Shepherd G. G. Spectral imaging of the atmosphere // Volume 82 in the International Geophysics Series / Eds. by R. Dmowska, J. R. Holton and H. T. Rossby // Academic Press., An Elsevier Science Imprint. – 2002. – 324 p. – ISBN: 0126394814.
33. Rees M. H., and Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations // *Journ. Geophys. Res.* – 1974. – V. 79. – Issue 34. – Pp. 5181–5186. – <https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181>
34. Rees M. H., and Roble R. G. Excitation of O(1D) atoms and emission of the [OI] 6300-Å line // *Can. Journ. Phys.* – 1986. – V. 64. – Issue 12. – Pp. 1608 – 1613. – <https://doi.org/10.1139/p86-284>
35. Vallance Jones A., Gattinger R.L., Creutzberg F., King R.A., Prikryl P., Cogger L.L., McEwen D.J., Harris F.R., Anger C.D., Murphree J.S., Koehler R.A. A comparison of CANOPUS ground optical data with images from the Viking UV camera // *Geophys. Res. Lett.* – 1987. – V. 14. – Issue 4. – Pp. 391 – 394. – Doi: 10.1029/GL014i004p00391.
36. 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.* – 1987. – V. 92. – Issue A6. – Pp. 6163 – 6167. – <https://doi.org/10.1029/JA092iA06p06163>.

37. Steel D. P., and McEwen D. J. Electron auroral excitation efficiencies and ratios // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – V. 95. – Issue A7. – Pp. 10321 – 10336. – <https://doi.org/10.1029/JA095iA07p10321>.
38. Enell C.-F., Gustavsson B., B. U. E. Brandstrom B.U.E. [at all] Tomography-like retrieval of auroral volume emission ratios for the 31 January 2008 Hotel Payload 2 event // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss.* – 2012. – V. 2. – Pp. 1–21. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.geosci-instrum-method-data-syst-discuss.net/2/1/2012/doi:10.5194/gid-2-1-2012.
39. Vondrak R. R., Murphree J. S., Anger C. D., Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS-2 auroral scanning photometer // *Radio Science.* – 1985. – V. 20. – N 3. – Pp. 439 – 446.
40. Chamberlain J. W. Physics of aurora and airglow, v.2 of International Geophysics Series / ed. By J. Van Mieghem, Academic pres. – New York and London, 1961. – 704 p.
41. Кузьмин А. К., Баньщикова 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. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – Т. 160. – № 5. – С. 20–36.
42. Adachi K., Nazawa S., Ogawa Y. [at all] Evaluation of a method to derive ionospheric conductivities using two auroral emissions (428 and 630 nm) measured with a photometer at Tromso (69° .6N) // *Earth, Planets and Space.* – 2017. – V. 69:90. – Pp. 1 – 19. – <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0677-4>.
43. Robinson R. M., Vondrak R. R., Validation of techniques for space based remote sensing of auroral precipitation and its ionospheric effects. *Space Sci. Rev.* – 1994. – V. 69. – Issue 3-4. – Pp. 331-407. DOI:10.1007/BF02101699.
44. Плазменная гелиогеофизика: том II / под ред. Л. М. Зеленого и И. С. Веселовского. – М. : Физматлит, 2008. – 557 с.
45. Никифоров О. В., Петрукович А. А., Уваров И. А. Функциональные возможности информационной системы «Аврора-Арктика». – ИКИ РАН. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aurora.geosmis.ru>.
46. Козелов Б. В., Иванов В. Е., Сергиенко Т. И. Вариации интенсивности эмиссий полярных сияний в области совместных высыпаний электронов и протонов: возможности диагностики параметров потоков частиц // *Геомагн. Аэроном.* – 2002. – Т. 42. – № 4. – С. 513 – 518.
47. Дашкевич Ж. В. Фотометрия и моделирование излучений полярных сияний // *Дисс. канд. физ.-мат. наук.* – 2005. – спец. ВАК РФ 25.00.09, Физика атмосферы и гидросферы. – ПГИ РАН. – Апатиты. – 145 с.
48. Кузьмин А. К., Вайсберг О. Л., Шестаков А. Ю., Шувалов С. Д., Моисеев П. П. : доклад (презентация) Авроральные эмиссии, высыпаящиеся электроны и ионы и градиенты магнитного поля как объекты исследований малым комплексом «Аврора» на малом КА и локальной диагностики состояния полярной ионосферы // *Доклад (презентация) на Симпозиуме «Современные проблемы создания российских малых космических аппаратов и их использования для решения социально-экономических задач, секция А.* – 18 – 19 сентября 2018. – Калуга.
49. Bانشchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K., Kruchenitskii G. M. Influence of magnetically conjugate fragments of auroral emission images of the accuracy of determining Eav of precipitating electrons // *Russian Physics Journal.* 2018. – V. 61. – No. 1. – Pp. 150 – 156. – doi:10.1007/s 11182018-1378-6.
50. Janhunen P. Reconstruction of electron precipitation characteristics from a set of multiwavelength digital all-sky auroral images // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 101. – Issue A9. – Pp. 18505 – 18516. <https://doi.org/10.1029/2000JA000263>
51. Баньщикова, М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчёта сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте «Авровизор-ВИС/МП» на КА Метеор-МП // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2012. – № 10/2. – С. 106 – 111.
52. Баньщикова, М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К. Предварительные результаты расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для эксперимента с прибором «Авровизор-ВИС/МП» на перспективном КА Метеор-МП // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2013. – № 10/2. – С. 174 – 180.
53. Дополнение к эскизному проекту на ГГК-МП в части трехканального имаджера видимого диапазона «Авровизор-ВИС/МП». Пояснительная записка ЦИНВ.412125.005, 2015. – 163 с.
54. Доброленский Ю. С., Козелов Б. В., Кузьмин А. К. [и др.] Исследования авроральных характеристик и высотной структуры эмиссий верхней атмосферы и ионосферы Земли с использованием метода пространственных реконструкций изображений, полученных с высоты орбиты перспективного микроспутника // *Сб. «Исследования солнечно-земных связей на микро-нано и пикоспутниках, Материалы научной сессии Секции солнечно-земных связей совета по космосу РАН.* – 2015. – Москва, ИКИ РАН. – С. 77 – 89.
55. Avdyushev V. A., Bانشchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Capabilities of software «Vector-M» for a diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from the different orbits as a part of the system of control of space weather // *Tomsk State University. – Russian Federation.* – V. 11. – EPSC2017-834-1. – 2017. – European Planetary Science Congress 2017.
56. Brändström U. The auroral Large Imaging System – Design, operation, and scientific results // *Ph. D thesis, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, IRF Scientific Report.* 279. – ISBN 91-7305-405-4, 2003.3
57. Kintner P. M., Ledvina B. M., and de Paula E. R. GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather.* – 2007. – V. 5. – S09003. – doi:10.1029/2006SW000260.
58. Hosokawa K., Otsuka Y., Ogawa Y. and Tsugawa T. Observations of GPS scintillation during an isolated auroral substorm // *Prog. Earth Planet. Sci.* – 2014. – V. 1(1). – Pp. 1 – 16.
59. Prikryl, P., Y. Zhang, Y. Ebihara, R. Ghoddousi-Fard, P. T. Jayachandran, et al., An interhemispheric comparison of GPS phase scintillation with auroral emission observed at the

- South Pole and from the DMSP satellite // *Ann. Geophys.* – 2013. – V. 56. – 2. – R0216. – Doi:10.4401/ag-6227.
60. Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Kunduri B.S.R., Thomas E.G., Coster A.J., Jayachandran P.T., Spanswick E., Danskin D.W. GPS phase scintillation and proxy index at high latitudes during a moderate geomagnetic storm // *Ann. Geophys.* – 2013. – V. 31. – Pp. 805 – 816.
61. P. Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Thomas E. G. [at all] GPS phase scintillation at high latitudes during geomagnetic storms of 7–17 March 2012 – Part 1: The North American sector. *Ann. Geophys.* – 2015. – V. 33. – Pp. 637 – 656. – www-ann-geophys.net/33/637/2015/doi:10.5194/angeo-33-637-2015.
62. Jin Y., Moen, J., & Miloch, W. J. GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: Direct comparison // *Journal of Space Weather and Space Climate.* – 2014. – V. 4. – A 23. – <https://doi.org/10.1051/SWSC/2014019>
63. Tsunoda R. T. High-latitude F region irregularity: A review and synthesis // *Reviews of Geophysics.* – 1988. – V. 26. – No.4. – Pp. 719 – 760.
64. Mende S.B., Eather R.H., Rees M.H. [at all] Optical mapping of ionospheric conductance // *Journ. Geophys. Res.* – 1984. – V. 89. – Issue A3. – Pp. 1755 – 1763. <https://doi.org/10.1029/JA089iA03p01755>
65. Frank L. A., Craven J. D., Imaging results from Dynamics Explorer 1 // *Reviews of Geophysics.* – 1988. – V. 26. – Pp. 249 – 283.
66. Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., and Mende S. B. Global auroral conductance distribution due to electron and proton precipitation from IMAGE-FUV observations // *Annales Geophysicae.* – 2004. – V. 22. – Pp. 1595 – 1611. – Sref-ID:1432-0576/ag/2004-22-1595.
67. Kuzmin A. K., Chikov K. N. Spectrophotometric diagnostics of energy characteristics and conductance of the auroral ionosphere from satellite: 1. Specific methods, accuracy problems, and instrumentation requirements // *Cosmic Research.* – 2007. – V. 45. – No.3. – Pp. 196 – 209.
68. Seeber G. Satellite geodesy. // Walter de Gruyter GmbH&Co. – 2003. – 10785 Berlin. – ISBN 3-11-017549-5, 2003. – 589 p.
69. Lummerzheim D., Galand M., Kubota M., Optical emissions from proton aurora // *Proc. of Atmospheric studies by optical methods.* – 2003. – Sodankyla Geophysical Observatory Publications. – P. 1 – 5.

Поступила в редакцию 01.02.2019

Александр Константинович Кузьмин, кандидат физико-математических наук, главный специалист, e-mail: alkuzmin@mail.ru.

Алексей Михайлович Мёрзлый, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: pinega@list.ru. Т. (495) 333-20-00. (ИКИ РАН).

REMOTE OPTICAL DIAGNOSTICS OF POLAR IONOSPHERE IN VARIOUS RANGES OF SPECTRUM BASED ON DATA OF ORBITAL AURORAL IMAGING. PART 2 (VISIBLE AND VUV RANGES)

A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi

In the aspect of preparing the methodology of promising Russian orbital experiments directed at obtaining images of the fragments auroral oval in visible and VUV emissions, the world experimental and methodical experience of observations of auroral characteristics from the low orbits is analyzed using specific examples. What auroral emissions need to be measured, with what spatial and temporal resolution, what methodological problems need to be solved for obtaining and processing auroral images, what accompanying measurements of plasma characteristics are necessary to increase the efficiency of experiments to diagnose the state of the polar ionosphere characteristics from orbits, what information can auroral imaging provide for studies of the influence of the polar ionosphere on the characteristics of transpolar signal propagation? This is not a complete list of issues considered in this paper.

Key words: remote diagnostics of polar ionosphere condition, auroral emissions, visible and vacuum ultraviolet ranges, fragments of auroral oval, auroral imagers.

References

1. Kuzmin A. K. Remote spectrophotometric diagnostics of auroral ionosphere characteristics from the orbits of advanced Russian satellites / Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences // Ref. 2161. – 2011. – 49 p. – [Electronic resource]. – Available at: [iki.rssi.ru>books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf).
2. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables // *Journ. Geophys. Res.: Space Physics.* – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10623 – 10637. – Doi:10.1002/2016/JA022607.
3. Paschmann G., Haaland S., Treumann R., Auroral plasma physics // *Space Sci. Rev.* – 2002. – V. 103. – № 1 – 4. – 485 p. – Doi:10.1023/A:1023030716698.
4. Zhang Y., Paxton L. J. (eds.), Auroral dynamics and space weather // AGU, J. Wiley&Sons, Inc. Geophys. Monograph series 215, Washington, D. C. – 2016. – 312 p. – ISBN: 9781118978702.

5. Aksenov O. Iu., Anikin V. A., Borisov Iu. A., Kuzmin A. K. Principles of development of advanced system for monitoring background conditions in polar ionosphere and short-term forecast thereof by means of integrated monitoring of magnetosphere-ionosphere interaction in terms of auroral activity from satellite orbits and Earth surface/ O. Iu. Aksenov, V. A. Anikin, Iu. A. Borisov, A. K. Kuzmin, V. B. Lapshin, A. N. Lyakhov [et al.] // Preprint 2015-1. – 2015. – Moscow. – Central Administrative District. – Moscow Institute of Physics and Technology. – 37 p. – 8 fig. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201501.pdf>.
6. Hunsucker R. D., Hargreaves J. K. The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation // Cambridge Univ., UK. – 2003. – 617 p. – ISBN: 9780511535758. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535758>.
7. Basu S., Grovesa K., Basu S., Sultana P. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans // Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2002. – V. 64. – Pp. 1745 – 1754.
8. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M. Remote optical diagnostics of the condition of the polar ionosphere in different ranges of spectrum based on observation data of orbital auroral imaging. Part 1 (VUV-range) / A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi // Matters of Electromechanics. – Moscow : VNIEM Corporation JC. – 2018. – Vol. 167. – No.6. – Pp. 9 – 41.
9. Paxton L. J., and Meng C-I. Auroral imaging and space-based optical remote sensing // Johns Hop-kins APL Technical Digest. – 1999. – V. 20. – N 4. – Pp. 556 – 569.
10. 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 Planets Space. – 2008. – V. 60. – Pp. 827 – 835.
11. Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lesard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // Space Sci. Rev. – 2014. – V. 189. – Pp. 15 – 25. – Doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
12. Gogoshev M., Petkov N., Kuzmin N., Gogosheva Ts., Spasov S., Kostadinov I. Airglow atmospheric imager on board the 'IK-Bulgaria-1300' satellite // Adv. Space. Res. – 1983. – V. 1.2. – № 7. – Pp. 115 – 120. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198801.pdf>.
13. Balebanov V. M., Kuzmin A. K., Gogoshev M. M., Gogosheva Ts. N., Petkov N. P., Kinev K. Some results of scanner spectrophotometric measurements of aurora and airglow from IK-Bulgaria-1300 satellite and prospects of similar measurements, in Results of the ARCAD 3 project and of the recent programmes in magnetospheric and ionospheric physics // Toulouse 84, CNES. – 1984. – Pp. 747 – 764.
14. Balebanov V. M., Kuzmin A. K., Ponomarev Yu. N., Sinitsyn V. M. About some aspects of geophysical experiments planning by means of the auroral photometrical measurements examples from two satellites // Preprint of USSR Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences of, Pr.-1033, 1985. – 19 p. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198502.pdf>.
15. Kuzmin A. K., Kruchenitskii G. M., Potanin Iu. N., Bانشchikova M. A. Experimental heritage and prospects of further development of the orbital auroral optical diagnostics of the polar ionosphere state // Matters of Electromechanics. – Moscow : VNIEM Corporation JC, 2018. – Vol. 163. – No 2. – Pp. 12 – 28.
16. Hirahara M., Miyashita Y., Ebihara Y., Seki K. Introduction of Plasma Particle Data Analysis for Reimei Observations // Presentation. – 2010. – URL:http://www.iugonet.org/meetings/2010-02-25/05_Reimei_EISA_Hirahara_20100225.pdf.
17. Frey H. U., Amm O., Chaston C. C., Fu S., Haerendel G. [at all]. Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc // Journ. Geophys. Res. – 2010. – V. 115. – A10209. – doi:10.1029/2010JA015537.
18. Lui A. T. Y., Cogger L. L., Howarth A. and Yau A. W. First satellite imaging of auroral pulsations by the Fast Auroral Imager on e-POP // Geophys. Res. Lett. – 2015. – V. 42. – Pp. 6877 – 6882. – doi:10.1002/2015GL065331.
19. Meng C.-I. and Huffman R. E. Ultraviolet imaging from space of the aurora under full sunlight // Geophys. Res. Lett. – 1984. – V. 11. – Issue 4. – Pp. 315 – 318. – <https://doi.org/10.1029/GL011i004p00315>.
20. Schenkel F. W. and Ogorzalek B. S. The HILAT vacuum ultraviolet auroral imager // John Hopkins Apl Technical Digest. – 1984. – 5(2). – Pp. 131 – 137.
21. Germany G. A., Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators // Journ. Geophys. Res. – 1994. – V. 99. – Issue A1. – Pp. 383 – 388. – <https://doi.org/10.1029/93JA02357>.
22. Paxton L. J., Meng C.-I., Fountain G. H., Ogorzalek B. S. [at all]. SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters // Proc. SPIE Ultraviolet Technology IV. – 1992. – V. 1764. – Pp. 161 – 176. – doi:10.1117/12.140846.
23. Henderson M. G., Reeves G. D., Skoug R., Thomsen M. F. [at all]. Magnetospheric and auroral activity during the 18 April 2002 sawtooth event // Journ. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. – A06206. – doi:10.1029/2005JA011366.
24. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M., Shadrin D. G. [at all]. Methodological particularities of creating of remote mapping diagnostic system of ionospheric characteristics from the orbits of three perspective Russian satellites // Preprint of Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2014. – 24 pages. – 7 Figures and 1 Table, on materials of the report COSPAR 40. – Moscow. – 3 – 9 August 2014 SCC section (Space Studies of the Upper Atmosphere of the Earth and Planets including Reference Atmospheres) C.02 Advances in Remote Sensing of the Middle and Upper Atmospheres and Ionosphere from the Ground and from Space, including Sounding Rockets and Multi-instrument Studies (poster presentation C.02 TFS-S-009). – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201401.pdf>.
25. Strickland D. J., Jasperse J. R., and Whalen J. A. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere // Journ. Geophys. Res. – 1983. – V. 88. – Issue A10. – Pp. 8051 – 8062. – <https://doi.org/10.1029/JA088iA10p08051>.

26. Mende S. B., Heeterdicks H., Frey H. U., Stock J. M. [at all] Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 3. Spectral imaging of Lyman- α and OI 135.6 nm // *Space Sci. Reviews.* – 2000. – V. 91. – Issue 1 – 2. – Pp. 287 – 318. – <https://doi.org/10.1023/A:1005292301251>.
27. Frey H. U., Mende S. B., Immel T. J., Gerard J.-C. [at all] Summary of quantitative of IMAGE far ultraviolet auroral data // *Space Sci. Reviews.* – 2003. – V. 109. – Issue 1. – 4. – Pp. 255 – 283. – [Electronic resource]. – Available at: <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000007521.39348.a5>.
28. Nishimura Y., Bortnik J., Li W., Thorne R. M., Lyons L. R. [at all]. Identifying the Driver of Pulsating Aurora // *Science.* – 2010. – V. 330(6000). – Pp. 81 – 84. – doi: 10.1126/science.1193186
29. Jin, Y., Moen, J. I., Miloch, W. J., Clausen, L. B. N., Oksavik, K. Statistical study of the GNSS phase scintillation associated with two types of auroral blobs // *Journ. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. – V. 121. – Pp. 4679 – 4697. – <https://doi.org/10.1002/2016JA022613>.
30. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Kruchenitskii G. M., Merzlyi A. M., Potanin Iu. N., Chuvashov I. N. Applied aspects of measurements of auroral emissions and characteristics of the polar ionosphere by Aurovisor-VIS/MP on the perspective spacecraft Meteor-MP. *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings 2016.* – Proceedings of the 4th International Scientific Conference ‘Critical Issues in Designing of ERS Systems’. – Moscow: VNIIEM Corporation JC, 2016. – Pp. 325 – 341. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201702.pdf>.
31. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kruchenitskii G. M., Potanin Iu. N., Advantages of observation of Auroral structures from two orbits and possibilities for reconstruction of 3d emission distributions received from different positions of imagers // *Matters of Electromechanics.* – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2017. – Vol. 158. – No. 3. – Pp. 7 – 21.
32. Shepherd G. G. Spectral imaging of the atmosphere // Volume 82 in the International Geophysics Series / Eds. by R. Dmowska, J. R. Holton and H. T. Rossby // Academic Press., An Elsevier Science Imprint. – 2002. – 324 p. – ISBN: 0126394814.
33. Rees M. H., and Luckey D. Auroral electron energy derived from ratio of spectroscopic emissions 1. Model computations // *Journ. Geophys. Res.* – 1974. – V. 79. – Issue 34. – Pp. 5181–5186. – <https://doi.org/10.1029/JA079i034p05181>.
34. Rees M. H., and Roble R. G. Excitation of O(1D) atoms and emission of the [OI] 6300-A line // *Can. Journ. Phys.* – 1986. – V. 64. – Issue 12. – Pp. 1608 – 1613. – <https://doi.org/10.1139/p86-284>
35. Vallance Jones A., Gattinger R. L., Creutzberg F., King R. A., Prikryl P., Cogger L. L., McEwen D. J., Harris F. R., Anger C. D., Murphree J. S., Koehler R. A. A comparison of CANOPUS ground optical data with images from the Viking UV camera // *Geophys. Res. Lett.* – 1987. – V. 14. – Issue 4. – Pp. 391 – 394. – Doi: 10.1029/GL014i004p00391.
36. 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.* – 1987. – V. 92. – Issue A6. – Pp. 6163 – 6167. – <https://doi.org/10.1029/JA092iA06p06163>.
37. Steel D. P., and McEwen D. J. Electron auroral excitation efficiencies and ratios // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – V. 95. – Issue A7. – Pp. 10321 – 10336. – <https://doi.org/10.1029/JA095iA07p10321>.
38. Enell C.-F., Gustavsson B., B. U. E. Brandstrom B.U.E. [at all] Tomography-like retrieval of auroral volume emission ratios for the 31 January 2008 Hotel Payload 2 event // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss.* – 2012. – V. 2. – Pp. 1 – 21. – [Electronic resource]. – Available at: www.geosci-instrum-method-data-syst-discuss.net/2/1/2012/doi:10.5194/gid-2-1-2012.
39. Vondrak R. R., Murphree J. S., Anger C. D., Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS-2 auroral scanning photometer // *Radio Science.* – 1985. – V. 20. – N 3. – Pp. 439 – 446.
40. Chamberlain J. W. *Physics of aurora and airglow*, v.2 of International Geophysics Series / ed. By J. Van Mieghem, Academic pres. – New York and London, 1961. – 704 p.
41. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Kruchenitskii G. M., Maslov I. A., Potanin Iu. N. Variants and selection of an optical arrangement, optimization of characteristics of orbital auroral imager Aurovisor-VIS/MP and its comparison with foreign analogs, *Matters of Electromechanics.* – Moscow : VNIIEM Corporation JC, 2017. – Vol. 160. – No. 5. – Pp. 20 – 36.
42. Adachi K., Nazawa S., Ogawa Y. [at all] Evaluation of a method to derive ionospheric conductivities using two auroral emissions (428 and 630 nm) measured with a photometer at Tromso (69° 6N) // *Earth, Planets and Space.* – 2017. – V. 69:90. – Pp. 1 – 19. – <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0677-4>.
43. Robinson R. M., Vondrak R. R., Validation of techniques for space based remote sensing of auroral precipitation and its ionospheric effects. *Space Sci. Rev.* – 1994. – V. 69. – Issue 3-4. – Pp. 331 – 407. – DOI:10.1007/BF02101699.
44. *Plasma Geliogeophysics: Volume II* / Zelenyi L. M. and Veselovsky I. S., Eds., Moscow: Fizmatlit, 2008 – 557 p.
45. Nikiforov O. V., Petrushkevich A. A., Uvarov I. A. Functional capabilities of the Aurora-Arctica information system. – IKI RAN. – [Electronic resource]. – Available at: <http://aurora.geosmis.ru>.
46. Kozelov B. V., Ivanov V. E., Sergienko T. I. Variations of auroral emissions intensity in the regions of electron and proton precipitation: capabilities of diagnostics of particle flow parameters // *Geomagn. Aeronom.* – 2002. – Vol. 42. – No. 4. – Pp. 513 – 518.
47. Dashkevich Zh. V. Photometry and modeling of auroral emissions // Thesis for the Degree of Candidate of Physics and Mathematics, Specialty (Code of State Commission for Academic Degrees and Titles) 25.00.09. Atmosphere and hydrosphere physics, Polar Geophysical Institute of RAS. – Apatity. – 2005. – 145 p.

48. Kuzmin A. K., Vaisberg O. L., Shestakov A. Iu., Shuvalov S. D., Moiseev P. P. : report (presentation) Auroral emissions, precipitating electrons and ions and magnetic field gradients as objects of investigation by small opto-electronic system Aurora on a small satellite and local diagnostics of polar ionosphere // Report (presentation) at the Symposium 'Current issues of development of Russian small satellites for solution of social and economic tasks, workshop A. –September 18 – 19, 2018. – Kaluga.
49. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K., Kruchenitskii G. M. Influence of magnetically conjugate fragments of auroral emission images of the accuracy of determining Eav of precipitating electrons // Russian Physics Journal. 2018. – V. 61. – No. 1. – Pp. 150 – 156. –doi:10.1007/s 11182018-1378-6.
50. Janhunen P. Reconstruction of electron precipitation characteristics from a set of multiwavelength digital all-sky auroral images // Journ. Geophys. Res. – 2001. – V. 101. – Issue A9. – Pp. 18505 – 18516. <https://doi.org/10.1029/2000JA000263>.
51. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Application software system Vektor-M for calculation of attendant geophysical and astronomical information for the observation space in the experiment with Aurovisor-VIS/MP on the Meteor-MP spacecraft, Proceedings of higher educational establishments. Physics. , 2012 – No. 10/2. – Pp. 106 – 111.
52. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Preliminary results of calculation of attendant geophysical and astronomical information for the experiment with Aurovisor-VIS/MP on the perspective Meteor-MP spacecraft, Proceedings of higher educational establishments. Physics. – 2013. – No. 10/2, Pp. 174 – 180.
53. Supplement to preliminary design of GGAK-MP, the part covering the three-channel visible range imager Aurovisor-VIS/MP. Explanatory note ЦИHB.412125.005, 2015, 163 p.
54. Dobrolenskii Iu. S., Kozelov B. V., Kuzmin A. K. [et al.] Researches of Auroral characteristics and altitude-latitude emission structures of the Earth's upper atmosphere and ionosphere by means of space reconstruction of auroral images detected from the orbit perspective microsatellite// Collective book 'Investigation of solar-terrestrial relationships on micro, nano and picosatellites, Proceedings of scientific session of the Workshop on solar-terrestrial relationships held by the Council on Space Activities of RAS. – 2015. – Moscow, IKI RAN. – Pp. 77 – 89.
55. Avdyushev V. A., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Capabilities of software «Vector-M» for a diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from the different orbits as a part of the system of control of space weather // Tomsk State University. – Russian Federation. – V. 11. – EPSC2017-834-1. – 2017. – European Planetary Science Congress 2017.
56. Brändström U. The auroral Large Imaging System – Design, operation, and scientific results // Ph. D thesis, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden, IRF Scientific Report. 279. – ISBN 91-7305-405-4, 2003.3.
57. Kintner P. M., Ledvina B. M., and de Paula E. R. GPS and ionospheric scintillations // Space Weather. – 2007. – V. 5. – S09003. – doi:10.1029/2006SW000260.
58. Hosokawa K., Otsuka Y., Ogawa Y. and Tsugawa T. Observations of GPS scintillation during an isolated auroral substorm // Prog. Earth Planet. Sci. – 2014. – V. 1(1). – Pp. 1 – 16.
59. Prikryl, P., Y. Zhang, Y. Ebihara, R. Ghoddousi-Fard, P. T. Jayachandran, et al., An interhemispheric comparison of GPS phase scintillation with auroral emission observed at the South Pole and from the DMSP satellite // Ann. Geophys. – 2013. – V. 56. – 2. – R0216. – Doi:10.4401/ag-6227.
60. Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Kunduri B. S. R., Thomas E. G., Coster A. J., Jayachandran P. T., Spanswick E., Danskin D. W. GPS phase scintillation and proxy index at high latitudes during a moderate geomagnetic storm // Ann. Geophys. – 2013. – V. 31. – Pp. 805 – 816.
61. P. Prikryl P., Ghoddousi-Fard R., Thomas E. G. [at all] GPS phase scintillation at high latitudes during geomagnetic storms of 7 – 17 March 2012 – Part 1: The North American sector. Ann. Geophys. – 2015. – V. 33. – Pp. 637 – 656. – www-ann-geophys.net/33/637/2015/doi:10.5194/angeo-33-637-2015.
62. Jin Y., Moen, J., & Miloch, W. J. GPS scintillation effects associated with polar cap patches and substorm auroral activity: Direct comparison // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2014. – V. 4. – A 23. – <https://doi.org/10.1051/SWSC/2014019>.
63. Tsunoda R. T. High-latitude F region irregularity: A review and synthesis // Reviews of Geophysics. – 1988. – V. 26. – No.4. – Pp. 719 – 760.
64. Mende S.B., Eather R.H., Rees M.H. [at all] Optical mapping of ionospheric conductance // Journ. Geophys. Res. – 1984. – V. 89. – Issue A3. – Pp. 1755 – 1763. <https://doi.org/10.1029/JA089iA03p01755>.
65. Frank L. A., Craven J. D., Imaging results from Dynamics Explorer 1 // Reviews of Geophysics. – 1988. – V. 26. – Pp. 249 – 283.
66. Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., and Mende S. B. Global auroral conductance distribution due to electron and proton precipitation from IMAGE-FUV observations // Annales Geophysicae. – 2004. – V. 22. – Pp. 1595 – 1611. – Sref-ID:1432-0576/ag/2004-22-1595.
67. Kuzmin A. K., Chikov K. N. Spectrophotometric diagnostics of energy characteristics and conductance of the auroral ionosphere from satellite: 1. Specific methods, accuracy problems, and instrumentation requirements // Cosmic Research. – 2007. – V. 45. – No.3. – Pp. 196 – 209.
68. Seeber G. Satellite geodesy. // Walter de Gruyter GmbH&Co. – 2003. – 10785 Berlin. – ISBN 3-11-017549-5, 2003. – 589 p.

69. Lummerzheim D., Galand M., Kubota M., Optical emissions from proton aurora // Proc. of Atmospheric studies by optical methods. – 2003. – Sodankyla Geophysical Observatory Publications. – P. 1 – 5.

*Aleksandr Konstantinovich Kuzmin, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Chief Specialist,
E-mail: alkkuzmin@mail.ru.*

*Aleksei Mikhailovich Merzlyi, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher,
e-mail: pinega@list.ru, tel.: +7 (495) 333-20-00.
(IKI RAN).*