



УДК 550.388.2; 550.388.8; 551.594,5

**АННОТИРОВАННЫЙ АТЛАС ПРИМЕРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЭМИССИЙ В
АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ИМАДЖЕРАМИ И
ИЗОБРАЖАЮЩИМИ СПЕКТРОГРАФАМИ С РАЗНЫХ ОРБИТ И ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ.
ЧАСТЬ 1. АВРОРАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВОЗБУЖДЕННЫЕ ПРИРОДНЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ, ВКЛЮЧАЯ АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ**

А.К. Кузьмин¹, А.М. Мерзлый¹, О.В. Никифоров¹, А.А. Петрукович¹, Ю.Н. Потанин²,
А.М. Садовский¹, А.Д. Соколов³, А.Т. Янаков¹

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия

² ЦАО Росгидромет, г. Долгопрудный, Россия

³ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Составлен аннотированный атлас из конкретных примеров авроральных изображений и измерений потоков заряженных частиц в полярной ионосфере, полученных разными приборами с орбит КА и поверхности Земли, в событиях, происходивших в основном в геомагнитно-возмущенных условиях суббурь в разных секторах MLT. Каждый пример, а также характеристики приборов описаны в тексте и иллюстрированы комбинированными рисунками на основе, адаптированных из ряда работ (ссылки в тексте). Мотивацией данной работы стал анализ опыта развития технологии подготовки и проведения комплексных экспериментов на орбитах КА (включая малые КА, зондирующих ракетах и поверхности Земли), нацеленных на исследования многообразных авроральных явлений в полярной ионосфере, отражающихся в градиентах Ne в различных слоях ионосферы, являющихся основными «виновниками» проблем при распространении трансполярных сигналов [McMahon et al., 2009]. Атлас в основном акцентирован на результаты наблюдений авроральных эмиссий, как в видимой области спектра, так и области вакуумного ультрафиолета, полученных с помощью орбитальных и наземных изображающих камер, и изображающих спектрографов, а также спектрометров потоков высыпающихся частиц, работавших на относительно низких полярных орбитах. Все представленные примеры мелкомасштабных авроральных структур были выбраны исходя из условия, что они были возбуждены высыпающимися электронами плазменного слоя на ночной стороне овала или в дневном каспе, ускоренными процессами в ближней магнитосфере, включая Альфвеновские волны и их флуктуации и резонансы, и/или продольными электрическими полями и квазистатическими продольными токами, распространяющимися вниз по силовым линиям к авроральной ионосфере.

Авторы просят с пониманием отнестись, что в статье часто используются как русские, так и английские названия и терминология, т.к. их перевод на русский язык не всегда точен

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АТЛАС, ПОЛЯРНАЯ ИОНОСФЕРА, МАСШТАБЫ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, АВРОРАЛЬНЫЕ ЭМИССИИ, АВРОРАЛЬНЫЕ ИМАДЖЕРЫ, ОРБИТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА, МЕТОДОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК, УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРАСПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_36_3

<https://elibrary.ru/rkdsfl>

Электронная почта авторов для переписки:
Кузьмин Александр Константинович, e-mail: alkuzmin@mail.ru
Мерзлый Алексей Михайлович, e-mail: pinega142@yandex.ru
Никифоров Олег Вячеславович, e-mail: gelokin2201@gmail.com
Петрукович Анатолий Алексеевич, e-mail: apetruko@iki.rssi.ru
Потанин Юрий Николаевич, e-mail: oom@cao-rhms.ru
Садовский Андрей Михайлович, e-mail: asadovsk@iki.rssi.ru
Соколов Алексей Дмитриевич, e-mail: sokolov.ad@phystech.edu
Янаков Альберт Триандофилович, e-mail: alexandr.7@mail.ru



<https://elibrary.ru/rkdsfl>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Начало 21 века ознаменовалось интенсивным развитием исследований, связанных с влиянием космической погоды на характеристики среды полярной ионосферы. Одним из актуальных приложений их результатов являются ответы на вопросы: как переменное воздействие Солнца, опосредованное сверхзвуковым солнечным ветром, воздействует на околоземную среду, и как могут изменяться характеристики полярной ионосферы, влияющие на условия распространения трансполярных сигналов орбитальных навигационных и других систем, пересекающих ее ?. Серия конкретных фактов влияния динамики характеристик полярной ионосферы на механизмы генерации сцинтилляций сигналов в различных условиях и их корреляций с авроральными структурами была рассмотрена в ряду работ, см., например, обзоры [Кузьмин и др., 2019; 2021] и ссылки в них. Одно из проявлений воздействия Солнца на земную магнитосферу и ионосферу – это полярные сияния, структуры которых появляются при высыпаниях энергичных частиц в разных секторах MLT аврорального овала в условиях геомагнитных возмущений, и в полярных шапках при отрицательных значениях B_z ММП. Авроральные эмиссии в различных частях спектра, возбуждаемые ускоренными в ближней магнитосфере энергичными высыпающимися частицами являются прямыми индикаторами их энергии, а изображения авроральных структур разных масштабов в конкретных эмиссиях, получаемые с разных орбит КА, траекторий ракет и поверхности Земли, отображают локации множества градиентов Ne в различных слоях полярной ионосферы.

Какие механизмы в магнитосфере приводят к ускорению высыпающихся электронов прежде, чем они столкнутся с атомами/молекулами/ионами верхней атмосферы и ионосферы? Эта проблема волнует исследователей уже не одно десятилетие. Известно, что частицы ускоряются благодаря процессам в ближней магнитосфере. Обзор этих процессов, проанализированных по данным, полученным с орбит КА Freya и Fast, и их схематичные изображения были представлены в ряду работ: [Carlson, Pfaff, 1998; Lysak and Song, 2003; Paschmann et al., 2003; Chen et al., 2005; Chaston et al., 2007, 2015; Hwang et al., 2009; Keiling, 2009; 2021; Keiling et al., 2019; Mende S.B., 2016; Mottez, 2011; Dombek et al., 2018; Haerendal, 2020; Kataoka et al., 2021; Haerendal and Frey, 2021] и др.

Морфология структур полярных сияний богата разнообразием (дискретные дуги разных масштабов и яркости, лучи, завитки, слабые дуги, диффузные формы, и множество других структур средних и малых масштабов), см., например, [Semeter et al., 2008]. Основные магнитосферные драйверы, управляющие генерацией полярных сияний были идентифицированы и описаны в ряду статей, см., например, [Mende, 2016]: высыпания энергичных частиц из магнитослоя (пограничного слоя магнитосферы) на дневной стороне, и электронов плазменного слоя на ночной стороне; продольные электрические поля и квазистатичные продольные токи; высыпания электронов, ускоренных Альфвеновскими флуктуациями, либо резонансами на магнитных силовых линиях, или Альфвеновскими волнами, распространяющимися вниз по силовым линиям к авроральной ионосфере [Lysak and Song, 2003]. Для всех этих процессов физика плазмы, управляющая потоками энергии, переносимыми высыпающимися энергичными частицами из магнитосферы, остается предметом продолжающихся детальных исследований. Еще в конце прошлого века научным сообществом было признано, что одним из важнейших механизмов ускорения частиц являются инерционные (кинетические) дисперсионные разномасштабные Альфвеновские волны, многие характеристики которых рассмотрены в [Stasievich et al., 2000; Schriver et al., 2003; Chaston et al., 2007] и др., и исследуются до сих пор.

В названии настоящей работы отражена ее главная задача: на конкретных примерах измерений авроральных эмиссий (как в видимом спектральном диапазоне, так и в диапазоне ВУФ) рассмотреть результаты ряда конкретных сопряженных по магнитному полю измерений распределений потоков высыпающихся частиц и изображений авроральных эмиссий малых и средних масштабов: (~1-2 км), полученных с орбит малых КА REIMEI [Obuchi et al., 2008] и e-POP [Cogger et al., 2014], и (~10-15 км), полученных с орбит КА TIMED [Christensen et al., 2003] и КА DMSP [Paxton et al., 1993], и проанализировать опыт их получения в интересах подготовки будущих экспериментов, нацеленных на получение новой информации об ионосферных процессах. В отличие от измерений на КА Reimei и e-POP в измерениях среднемасштабных авроральных структур на КА TIMED и DMSP нет строгой (по времени) сопряженности по магнитному полю оптических измерений и измерений потоков частиц, тем не менее, широкая (несколько сотен км) полоса охвата значительной части полярной зоны позволяет

получать за 15-20 мин представление о состоянии структур в нескольких секторах MLT аврорального овала. Некоторым из рассматриваемых примеров в конкретных событиях сопутствуют изображения авроральных эмиссий, полученные на геофизических станциях с помощью авроральных имаджеров с разными углами поля зрения и различным разрешением, а также характеристики полярной ионосферы (например, Ne), полученные с помощью радаров.

2. КРАТКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ НАЗЕМНЫХ И ОРБИТАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НАБЛЮДЕНИЙ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ

Благодаря развитию технологий построения изображающих камер, как наземных, так и орбитальных, за последние десятилетия появились возможности получения изображений мелкомасштабных авроральных структур, и продолжают отрабатываться методики наблюдений их динамических особенностей. Было установлено [Semeter et al., 2008; Whiter et al., 2012; Kataoka et al., 2021], что мелкомасштабные структуры полярных сияний являются общей чертой аврорального брейкапа (иногда нескольких, называемых псевдобрейкапами), следующих в течение развития авроральных суббурь. Пространственно-временные свойства мелкомасштабных структур полярных сияний были рассмотрены в Sandahl et al. [2008, 2011]. Ряд успешных наземных наблюдений с использованием камер с матрицами типа EMCCD (например, [Semeter et al., 2008]) и камер с матричными детекторами типа sCMOS, (например, [Dahlgren et al., 2013]), с высоким разрешением позволили обнаружить различные типы мелкомасштабных структур и исследовать их характеристики. Скандинавский проект ASK (Auroral Structure and Kinetics) оказался успешным в выявлении потоков энергии частиц, связанных с интенсивностью авроральных эмиссий в тонких структурах с использованием трех идентичных камер с EMCCD. Например, Dahlgren et al. [2008] сообщили, что «волокна» и «завитки» были частью окружающих полярных сияний. Dahlgren et al. [2011] сообщили, что тонкие дуги связаны с увеличением потока энергии без увеличения средней энергии электронов.

Существенные достижения в наблюдении мелкомасштабных авроральных структур с низких (до 1000 км) полярных орбит были достигнуты при наблюдениях с орбит двух малых КА: Reimei [Obuchi et al., 2008] и e-POP [Cogger et al., 2014]. Аппаратура на КА Reimei [Asamura et al., 2003; Sakanoi et al., 2003] позволила получить множество результатов одновременных измерений потоков высыпающихся частиц (анализатор ESA/ISA) и сопряженных по магнитному полю изображений эмиссий полярных сияний (узкоугольная мультиспектральная изображающая камера MAC) с пространственным разрешением $\sim 1 \times 1$ км/пиксель и временным разрешением 0,12 сек. Эти результаты выявили конкретную связь между структурами в авроральных дугах и энергетическими распределениями высыпающихся электронов [Asamura et al. 2009; Frey et al. 2010, Chaston et al. 2010, 2011, Fukuda et al. 2014, Motoba and Hirahara, 2016; Kataoka et al., 2021]. Присутствие позиции проекции магнитной силовой линии в каждом изображении, пересекаемой КА Reimei во время экспозиции, обеспечивалось с помощью регулярного подворота КА вокруг его строительных осей, что явилось несомненным методическим достижением исследовательских групп в университетах, участвующих в этом орбитальном проекте.

На рисунке 1 (адаптированном из презентации [Hirahara, 2006], использованном в рис. 1 в [Kataoka et al., 2021]) рассмотрен пример одновременных наблюдений 26.12.2005 г. с орбиты КА Reimei спектрограммы пичч-распределения электронов и дуг полярных сияний (характеристики аврорального имаджера MAC на КА Reimei и его орбиты см. далее в п.2). В этом событии наблюдалась авроральная полоса с несколькими дугами, имеющими ширину ~ 1 км. Обратим внимание, что в изображении присутствует несколько мелкомасштабных дуг полярных сияний, отображающих сдвиговые движения плазмы в полярной половине авроральной полосы и достаточно равномерное излучение в экваториальной части, что согласуется с выводом в [Haerendel, 1999] о том, что на фоне часто бывает полосообразное излучение длиной в несколько десятков км, когда появляется мелкомасштабная дуга полярных сияний. Спектрограммы электронов показали высыпание электронов со спектрами типа «перевернутых V» шириной ~ 100 км, соответствующее авроральной лентообразной структуре. В полярной половине перевернутой V-структуры, где появились мелкомасштабные дуги полярных сияний, наблюдались мелкомасштабные флуктуации максимальной энергии электронов в диапазоне энергий несколько кэВ, при этом рассеянные во времени низкоэнергичные электроны высыпаются одновременно, свидетельствуя о влиянии механизма ускорения Альфвеновскими волнами. По результатам наблюдений этого события в [Whiter et al., 2012] был сделан вывод, что

мелкомасштабные дуги полярных сияний генерируются не одним механизмом ускорения, а колебаниями максимальной энергии электронов в спектре типа перевернутой буквы V, которые вызваны взаимодействием с Альфвеновскими волнами.

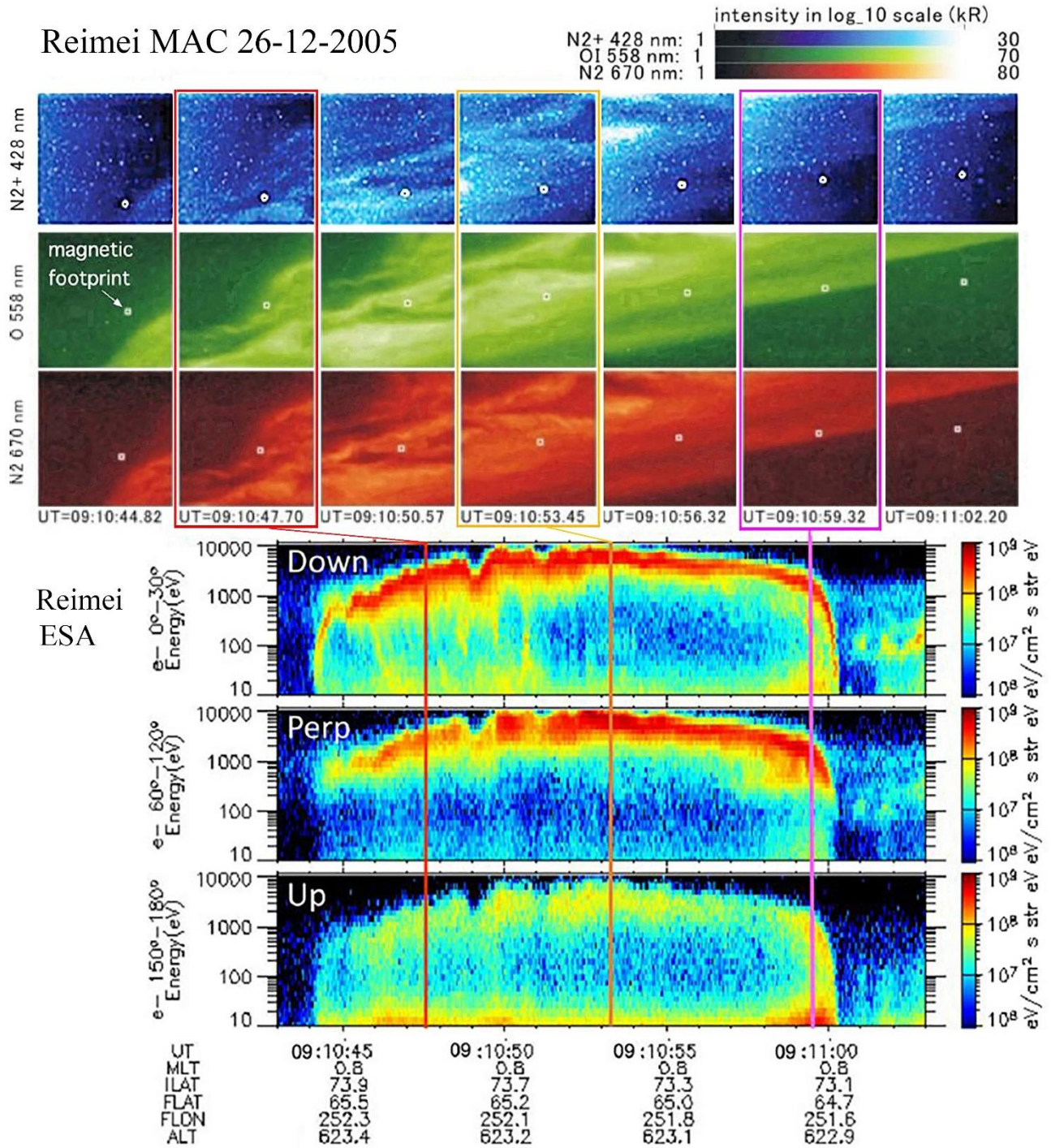


Рис. 1. Спектрограмма пичг-распределения электронов и изображения дуг полярных сияний, наблюдавшиеся одновременно с орбиты КА Reimei 26 декабря 2005 г. Авроральная полосовая структура имела ширину около 100 км по широте. Мелкомасштабные авроральные дуги отражают сдвиговые движения плазмы (sheared motions) в полярной половине авроральной полосы и более однородное распределение интенсивности в экваториальной половине полосы

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОРБИТ КА И ИЗОБРАЖАЮЩИХ ПРИБОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА НИХ, ПРИМЕРЫ ДАННЫХ С КОТОРЫХ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ СОБЫТИЯХ, ИЛЛЮСТРИРУЮТСЯ ДАЛЕЕ

3.1 Мультиспектральный Авроральный Имаджер (МАС) на КА Reimei [Hirahara, 2006; Obuchi et al., 2008]

Этот малый КА, разработанный в университетах в Киото и Нагоя (Япония), был запущен 24 августа 2005 г. на солнечно-синхронную орбиту ($i \sim 98,2^\circ$, 578–635 км). На нем был установлен ряд приборов для измерений характеристик плазмы и мультиспектральный авроральный имаджер МАС, который включал три параллельных изображающих канала, имеющих угол поля зрения $7,6^\circ$, который соответствовал размеру площадки наблюдения $\sim 70 \times 70$ км на высоте 110 км. Изображения эмиссий $\lambda 427,8$ нм (NG); $\lambda 557,7$ нм [OI] и $\lambda 670$ нм (N_2 1PG) регистрировались на матрицах CCD 1024×1024 , элементы которых бинировались по разному в разных режимах работы. В основном режиме использовалось бинирование 16×16 , и 8×8 пикселей. При времени экспозиции 0,12 и 0,06 с пространственное разрешение поперек направления полета было $1,2 \times 1,2$ км/пиксель и $0,6 \times 0,6$ км/пиксель соответственно.

3.2 Двухканальный авроральный имаджер FAI (FastAuroralImager) на КА e-POP [Cogger et al., 2014]

Этот малый КА, разработанный в университете в Калгари (Канада), был запущен 29 сентября 2013 г. на орбиту с прямым наклоном плоскости ($i \sim 81^\circ$, 330–1500 км). На нем был установлен ряд приборов для измерений характеристик плазмы и авроральный имаджер FAI (Fast Auroral Imager), который включал два параллельных изображающих канала, имеющих угол поля зрения 26° , который соответствовал диаметру площадки наблюдения ~ 650 км с высоты апогея орбиты ~ 1500 км. Изображения эмиссий $\lambda 630$ нм [OI] и $\lambda 650$ – 1100 нм (N_2 1PG) регистрировались на матрицах e2VCCD67, имеющих 256×256 пикселей.

3.3 Спектрографический ВУФ-имаджер GUVI на КА TIMED [Christensen et al., 2003]

КА TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetic and Dynamics) запущен 07.12.2001 г., орбита: 625 км круг, $i > 74,1^\circ$, контроль ориентации в пределах $0,5^\circ$, знание ориентации с точностью $0,03^\circ$. Global Ultraviolet Imager (GUVI) имеет пространственное разрешение в надире $\sim 10 \times 10$ км/пиксель, угол $11,8^\circ$ (вдоль вектора скорости) проецируется на 14 пикселей, развертка по спектру на 176 пикселей, сканирование по пространству (перпендикулярно вектору скорости) $\pm 70^\circ$ (140°) от направления в надир в течение 15 сек влево, и 15 сек вправо. Угол поля сканирования поперек направления полета 140° ; спектральные диапазоны развертки: 121,6 нм (Ly- α) ($\lambda \lambda 119,3$ – $123,6$ нм); 130,4 нм [OI] ($\lambda \lambda 128,3$ – $131,8$ нм); 135,6 [OI] нм ($\lambda \lambda 134,3$ – $133,7$ нм); LBHs N_2 ($\lambda \lambda 141,0$ – $152,8$ нм); LBH/ N_2 ($\lambda \lambda 167,2$ – $181,2$ нм).

3.4 Спектрографический ВУФ-имаджер SSUSI на КА серии DMSP (5D3 начиная с F15) [Paxton et al., 1993]

DMSP орбита 839–855 км, $i = 98,72^\circ$, $T \sim 101$ мин. SSUSI (Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager), имеет пространственное разрешение в надире $\sim 10 \times 10$ км/пиксель, угол $11,8^\circ$ (вдоль вектора скорости) проецируется на 16 пикселей (~ 153 км); развертка по спектру на 160 пикселей; варианты размеров входной щели: $0,74^\circ$; $0,3^\circ$; $0,18^\circ$ (номинальный $0,3^\circ$) перпендикулярно вектору скорости; сканирование по пространству (перпендикулярно вектору скорости) $\pm 62,4^\circ$ ($124,8^\circ$) от направления в надир в течение 15 сек влево, и 15 сек вправо перекрытие соседних строк сканирования по пространству ~ 5 ; спектральные диапазоны развертки: 121,6 нм (Ly- α); 130,4 нм [OI]; 135,6 [OI] нм; LBHs N_2 ($\lambda \lambda 141$ – 153 нм); LBH/ N_2 ($\lambda \lambda 167$ – 181 нм).

3.5 Электростатический анализатор энергии электронов и ионов ESA/ISA на КА Reimei:

Поле зрения $3^\circ \times 300^\circ$; Энергетический диапазон 12 эВ – 12 кэВ; 32 ступени развертки по энергии; $\Delta E/E = 15\%$; Временное разрешение 20 и 30 мсек; Геометрический фактор $2,8 \times 10^{-4}$ (ESA), $4,9 \times 10^{-4}$ (ISA) [Asamura et al., 2003].

4. ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЕ ПРИМЕРЫ КОНКРЕТНЫХ СОБЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ОРБИТЫ КА REIMEI, E-POP, TIMED, DMSP В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ В КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗОВАНЫ ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ ВИДИМЫХ И ВУФ ЭМИССИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ, А ТАКЖЕ ДАННЫЕ С ЗОНДИРУЮЩЕЙ РАКЕТЫ

4.1 В этом примере мы выделяем квазистатическую и Альфвеновскую структуры в данных, полученных с помощью аврорального имаджера MAC и результатов наблюдений потоков частиц с орбиты КА Reimei [Hirahara, 2006; Chaston et al., 2010, Kataoka et al., 2021]. Пример демонстрирует как многомасштабные движения форм полярных сияний, связанные с квазистатическим и Альфвеновским полярным сиянием различаются и как эти движения согласуются с их описанием электромагнитных полей вдоль линии поля полярных сияний [Chaston et al., 2010; Whiter et al., 2012].

На рисунке 2: справа на верхней панели результаты наблюдений потоков высыпающихся электронов (по данным анализатора ESA) и изображений авроральной эмиссии $\lambda 670$ нм N_2 1PG изображающей камерой MAC, полученные с орбиты КА Reimei 22.12.2005 г. над Канадой в интервале 09:31:40-09:31:53 UT. (a) Спектрограмма энергии электронов, показывающая энергию в эВ (левая шкала) и поток энергии электронов, ответственных за возбуждение эмиссии $\lambda 670$ нм (правая шкала); (b) «Альфвеновская» и (c) квазистатическая структура сияний в моменты времени t_1 и t_2 , соответствующие схеме движения КА поперек аврорального овала на левой средней панели, желтая пунктирная линия – отображает проекцию магнитной силовой линии (м.с.л.), пересекаемую КА REIMEI в момент экспозиции изображения, в магнитно-сопряженную область свечения на высоте эмиссии 120 км. Эти подножные точки КА Reimei (*f.p.*), которые крестиком (x) отмечены на (b,c), во время экспозиции каждого изображения. Завихренность структур показана мелкими стрелочками на панелях b и c, вращение против часовой стрелки и по часовой стрелке вокруг геомагнитного поля соответственно. На панелях (d) показаны три изображения в той же эмиссии в более расширенном временном интервале 09:31:45-09:32:12, а на (e) спектрограмма (средняя энергия и поток энергии) высыпающихся электронов, адаптированные из работы [Whiter et al., 2012], в которой проведена интеркалибровка (частицы-эмиссии) этих характеристик с помощью модели ионосферы. На нижней левой панели, показана полоса интерференционного фильтра, пропускающая линии эмиссии N_2 1PG $\lambda 670$ нм. На верхней левой панели показаны фронтальные разрезы электростатического анализатора электронов ESA и одного канала аврорального имаджера MAC.

На рисунке 3 проиллюстрированы измерения распределения ВУФ-эмиссий над Канадой с орбиты КА TIMED, проведенные 22.12.2005 г. с помощью сканирующего изображающего ВУФ-спектрографа GUVI как до измерений с орбиты КА Reimei (в 09:16 UT) слева, так и после них (в 12:29 UT) справа. Каждая из 9 панелей, иллюстрирует пространственное распределение интенсивности ВУФ-эмиссий и характеристик, рассчитанных из них: $121,6+121,8$ нм ($Ly-\alpha$) на четвертой панели сверху в левом ряду, отображающей высыпания протонов; LBN/ N_2 (верхняя панель в левом ряду); распределение потока энергии высыпающихся электронов, рассчитанное из интенсивности $LBN/$ (вторая панель сверху в левом ряду); $\lambda 135,6$ нм [OI] (верхняя панель в правом ряду); распределение электронной концентрации в максимуме E-области ионосферы NmE (вторая сверху панель в правом ряду); $LBNs N_2$ (третья панель сверху в левом ряду); распределение средней энергии E_{av} высыпающихся электронов, рассчитанное из отношения интенсивностей $I(LBN)/I(LBNs)$ (третья панель сверху в правом ряду); распределение высоты максимума E-области ионосферы NmE (четвертая панель сверху в правом ряду); пространственное расположение дискретных дуг по критерию сайта <http://guvitimed.jhuapl.edu/> (пятая панель сверху в левом ряду). На каждой панели имеется шкала соответствующей характеристики (показаны на панелях только в левой половине рисунка 3). Внизу левой и правой колонок панелей (в координатах Inv.Lat-MLT) показаны распределения средней энергии E_{av} вдоль всей пространственной полосы, отображаемой спектрографом GUVI в северной полярной области. Обратим внимание, что мы не включили в Рис.3 панели с изображением кислородной эмиссии $\lambda 130,4$ нм по причине, что она оптически толстая.

Самые нижние панели в левом и правом ряду отображают AE-index в течение суток 22.12.2005 г. Тонкими вертикальными линиями на них фиксированы величины AE-индекса в «моменты» измерений GUVI.

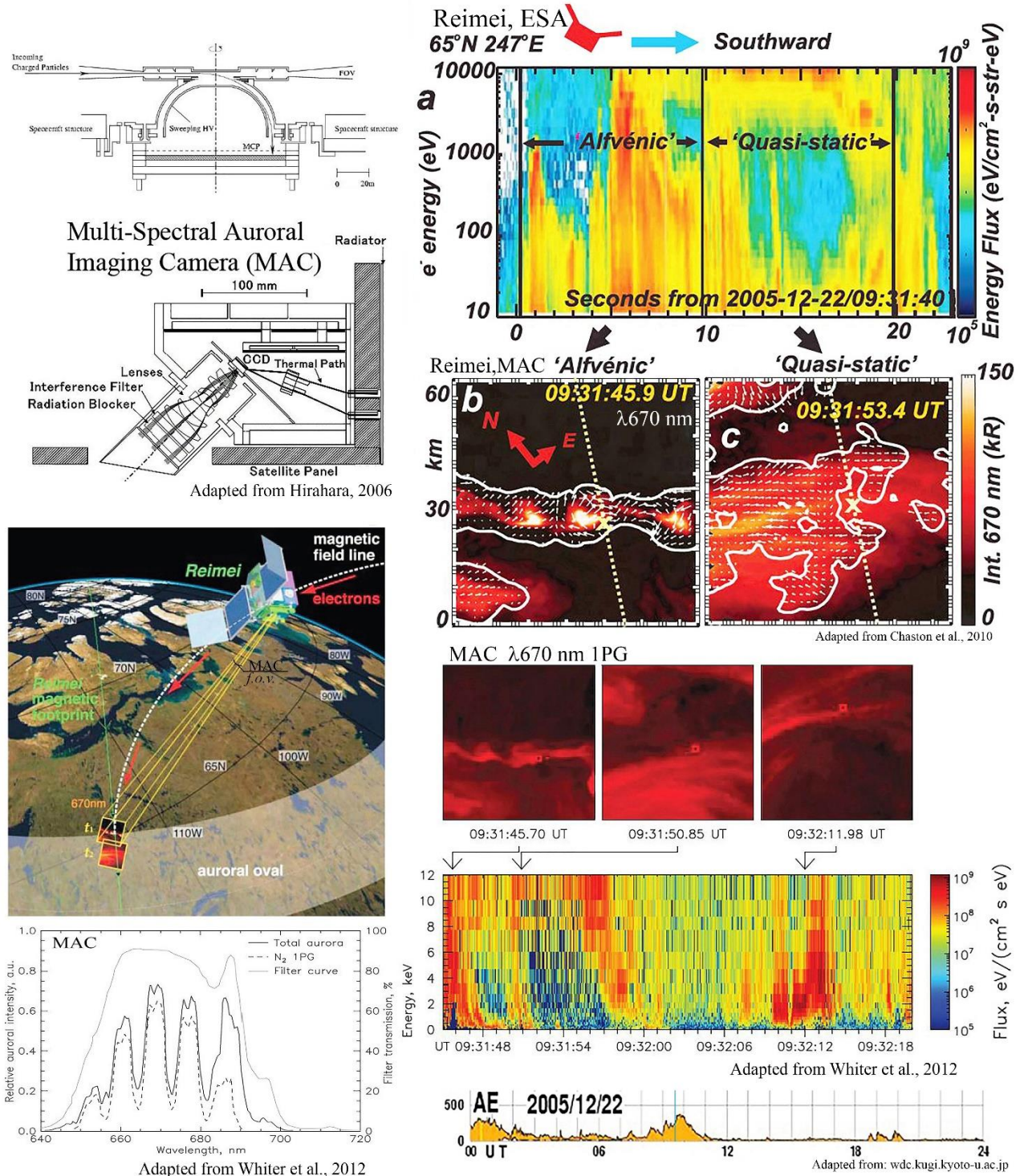


Рис. 2. Авроральные изображения эмиссии $\lambda 670$ nm 1PG, и сопутствующие измерения высыпаний электронов, полученных 22.12.2005 г. с орбиты КА Reimei над Канадой. Геометрия наблюдений эмиссий авроральным имаджером MAC. Полосы пропускания интерференционных фильтров MAC. Фронтальные разрезы приборов MAC и ESA/ISA. Подробности см. в тексте

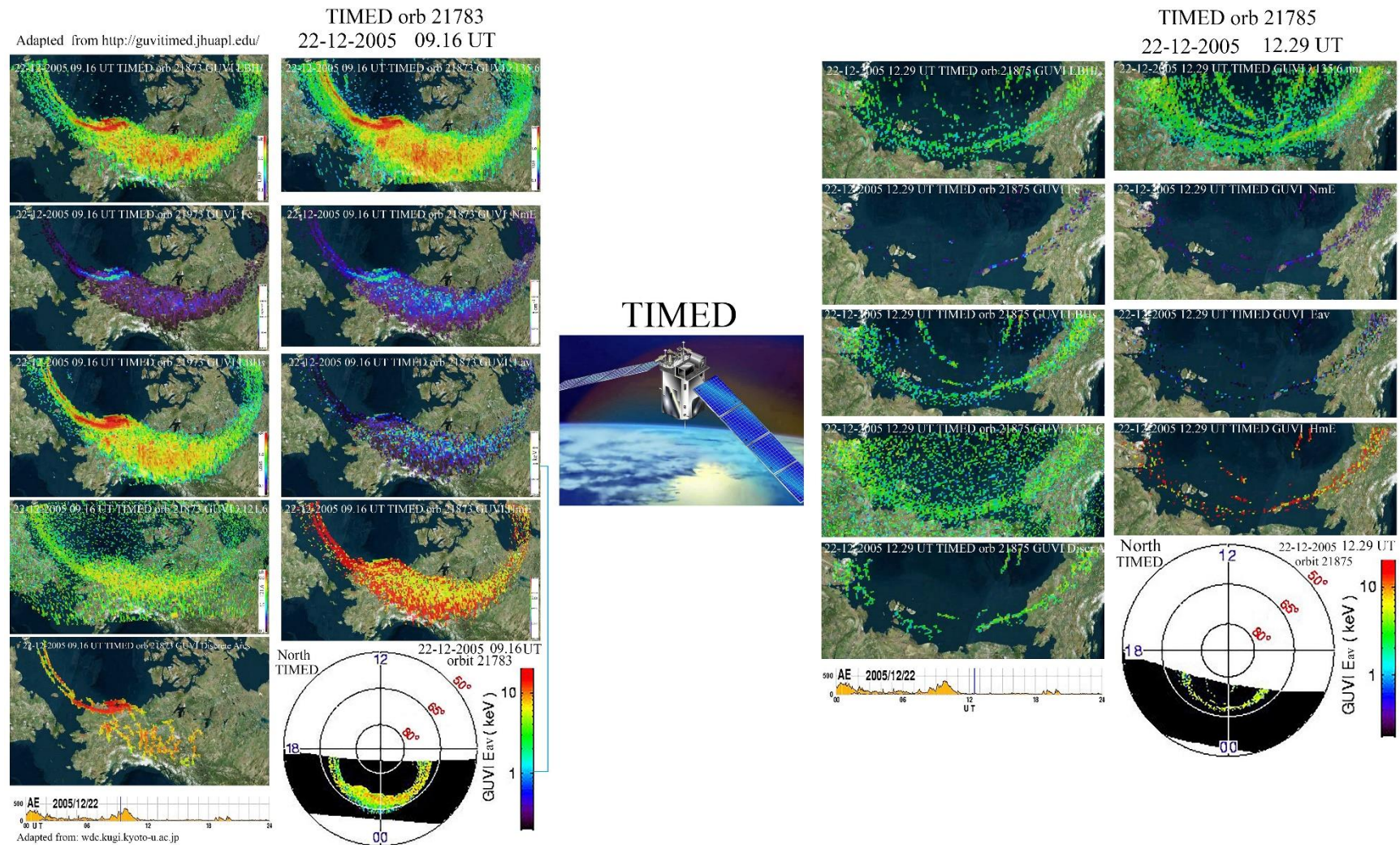


Рис. 3. Среднемасштабные измерения структур в авроральном овале над Канадой, проведенные изображающим ВУФ-спектрографом GUVI с орбиты КА TIMED 22.12.2005 г. в 09:16UT (левая половина серии панелей) и в 12:29 UT (правая половина серии панелей). Они отображают состояния и структуры аврорального овала, соответствующие данным АЕ-индекса, показанным на нижних панелях. Подробности см. в тексте

4.2 Продолжая тему влияния Альфвеновского механизма ускорения, в этом примере проиллюстрируем данные по развитию авроральной суббури над Аляской, полученные с различным пространственным разрешением на станциях Fort Yukon и Poker Flat 23.03.2007 г. в 11:20:27 UT–11:20:39 UT с помощью имаджеров с тремя разными углами поля зрения [Semeter et al., 2008] (см. рис.4), и, как и в предыдущем примере, сопроводим их ВУФ-изображениями, полученными над Аляской с орбиты КА TIMED (см.рис.5) как перед самым началом суббури (10:19 UT), так и в процессе ее развития (11:57 UT), а также энергетической спектрограммой электронов, полученными с орбиты DMSPF16 в интервале 11:04–11:12 UT и изображениями ВУФ-эмиссий, полученными изображающим спектрографом SSUSI в 11.10 UT (см. рис. 6).

На рисунке 5 (его структура аналогична рис. 3) на панелях представлены измерения ВУФ-эмиссий и, рассчитанных из них, характеристик Fe, Eav, NmE, HmE, DiscrArcs, полученных 23.03.2007 г. над Аляской с помощью изображающего спектрографа GUVI с орбиты КА TIMED как раньше начала суббури (10:19 UT) левый ряд, так и по середине ее второй половины в 11:57 UT (оба времени отмечены вертикальными линиями на магнитограмме Fort Yukon на верхней панели рис. 4). В средней панели в середине рисунка показано графическое изображение ВУФ спектра, в котором видны все измеряемые спектрографом SSUSI эмиссии, а на нижней панели фрагмент контурной карты Аляски с указанием расположения станций Fort Yukon и Poker Flat, место положение которого стрелкой указано на правой нижней панели в правом ряду рисунка. Внизу левой и правой колонок панелей (в координатах Inv.Lat-MLT) показаны распределения средней энергии Eav вдоль всей пространственной полосы, отображаемой GUVI в северной полярной области. На рисунке 6 на верхней панели показана спектрограмма электронов и ионов, полученная в начальной стадии суббури 23.03.2007 г. (согласно магнитограммы на верхней панели рис.4) в северной полярной зоне с помощью электростатического анализатора SSJ5 с орбиты 17682 КА DMSPF16 в интервале 10:55–11:25 UT, а на нижней панели изображения четырех ВУФ-эмиссий (LBH1, LBHs, λ 135,6 нм, λ 121,6+121,8 нм Ly- α) в координатах InvLat-MLT, полученных в полосе строчной пространственной развертки с помощью изображающего спектрографа SSUSI в 23.03.2007 г. 11:10 UT (время относится к центру начала координат).

Рассмотрим детали этого события на рис. 4. На рисунке 4 показаны мультимасштабные наземные наблюдения динамики развития суббури в течение 12 сек. Первый ряд состоит из трех последовательных изображений, полученных в 11:20:27; 11:20:33 и 11:20:39 UT с помощью All-sky камеры (в белом свете, 1 кадр в сек) на станции Fort Yukon, когда в 11:20 UT (см. магнитограмму Fort Yukon на верхней панели рис. 4) началось динамичное развитие суббури; второй ряд из трех изображений получен со станции Poker Flat (здесь авроральная структура находилась в магнитном зените) с помощью камеры с фильтром λ 427,8 N₂⁺ (1NG), имеющей полный угол поля зрения 60° и время экспозиции 0,5 сек (в первом ряду изображений это поле зрения ограничено трапециями); нижний ряд из трех изображений получен со станции Poker Flat с помощью изображающей камеры, имеющей полный угол поля зрения 9×9° (11° по диагонали и время экспозиции 0,033 сек), для сравнения это поле зрения обозначено на снимках во втором ряду белыми квадратами, а полоса пропускания светофильтра показана на нижней панели. Снимки в третьем ряду получены с пространственным разрешением ~100 м.

Результатом этих наблюдений была доказана когерентность структур на самом мелком масштабе во время развития суббури (брейкапа). Оказалось, что мелкомасштабные дуги «объединяются» в пакеты дуг, причем динамика движения самих пакетов, и дуг внутри пакетов, разная, что видно на рисунках, которые приведены в [Semeter et al.,2008]). Были выделены основные свойства:

1. Дискретные дуги брейкапа формируются в «пакетах дуг» и состоят из элементарной (100-метровой) когерентной структуры;
2. Новообразующиеся элементарные дуги расходятся от центра дугового пакета и на некотором расстоянии затухают;
3. Максимальная ширина, достигаемая дуговыми пакетами, простирается в диапазоне от 2 до 8 км;
4. Динамика в предбрейкапном интервале суббури заметно отличается от динамики после брейкапного интервала.

Результаты, полученные в [Semeter et al.,2008] показали, что поток электронов либо модулировался, либо ускорялся волной. **На основе совокупных наблюдений полей и высыпаний частиц над активными полярными сияниями были сделаны выводы, что наиболее вероятным механизмом ускорения является корпускулярно-волновое взаимодействие (coupling) в**

инерционной дисперсионной Альфвеновской волне [например, Stasiewicz et al., 2000]. При этом дисперсия инерционной Альфвеновской волны приводит к двум ортогональным эффектам: распространению волновой энергии в плоскости B_{\perp} и ускорению электронов в направлении \mathbf{V}_{\perp} . Последний эффект был изучен с точки зрения производства авроральных эмиссий в Chaston et al. [2003], и было отмечено, что авроральные структуры имеют интенсивность в несколько кРэлей.

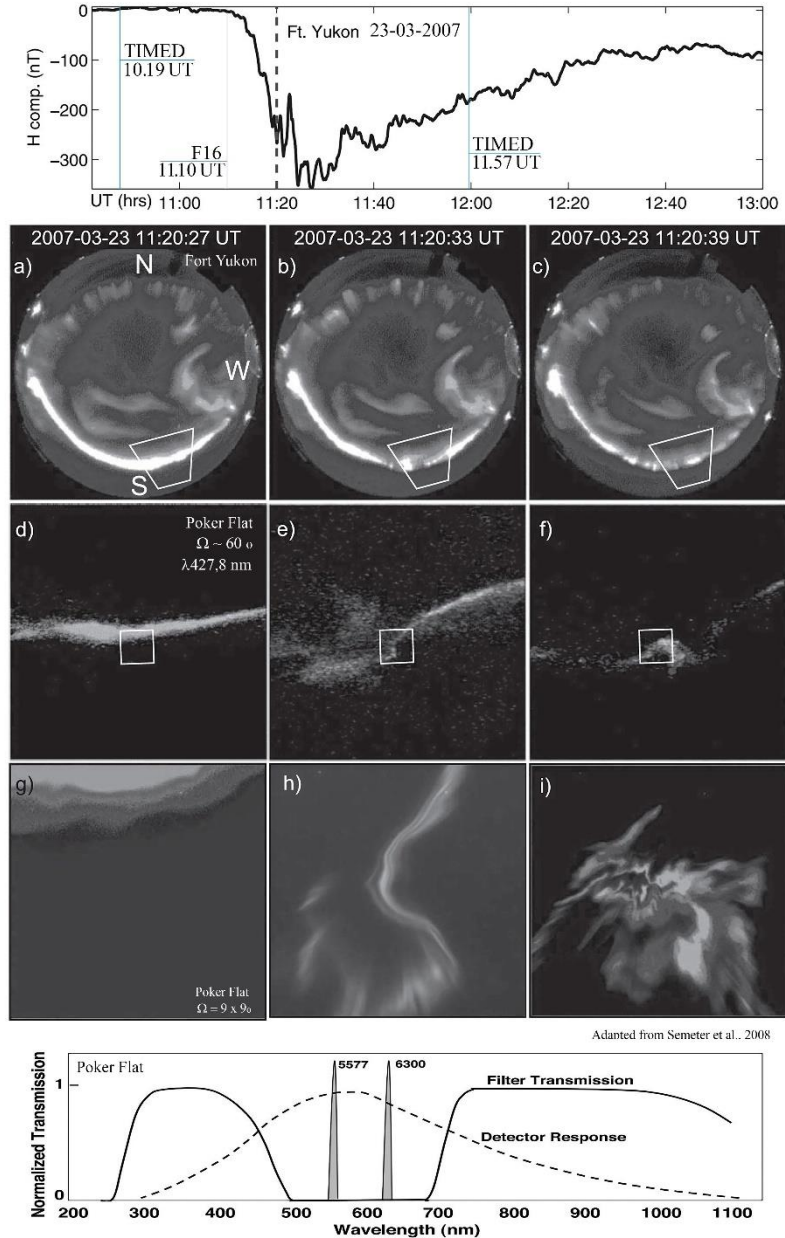


Рис. 4. Мультимасштабные изображения авроральных структур, полученные с двух станций на Аляске 23-03-2007: FortYukon (первый ряд изображений, полученных с All-sky камеры в белом свете); второй и третий ряды изображений получены со станции Poker Flat (второй ряд снимков получен с помощью изображающей камеры с углом поля зрения 60° , а третий ряд – с помощью изображающей камеры с углом поля зрения $9 \times 9^\circ$ (11° по диагонали)). На верхней панели показана H-компонента магнитометра на станции Fort Yukon, отображающая динамику развития суббури, на которой пунктиром отмечен «момент» получения изображений. На нижней панели показана полоса пропускания интерференционного фильтра узкоугольной изображающей камеры в Poker Flat, в середине которой с помощью добавочного стеклянного фильтра не пропускаются долгоживущие кислородные эмиссии $\lambda 630,0$ и $\lambda 557,7$ нм, а слева и справа пропускаются короткоживущие (десятки наносекунд) эмиссии первой отрицательной системы $N_2^+ 1NG$ и первой положительной системы N_2 и N_2^+ (системы Мейнела) соответственно. Подробности см. в тексте.

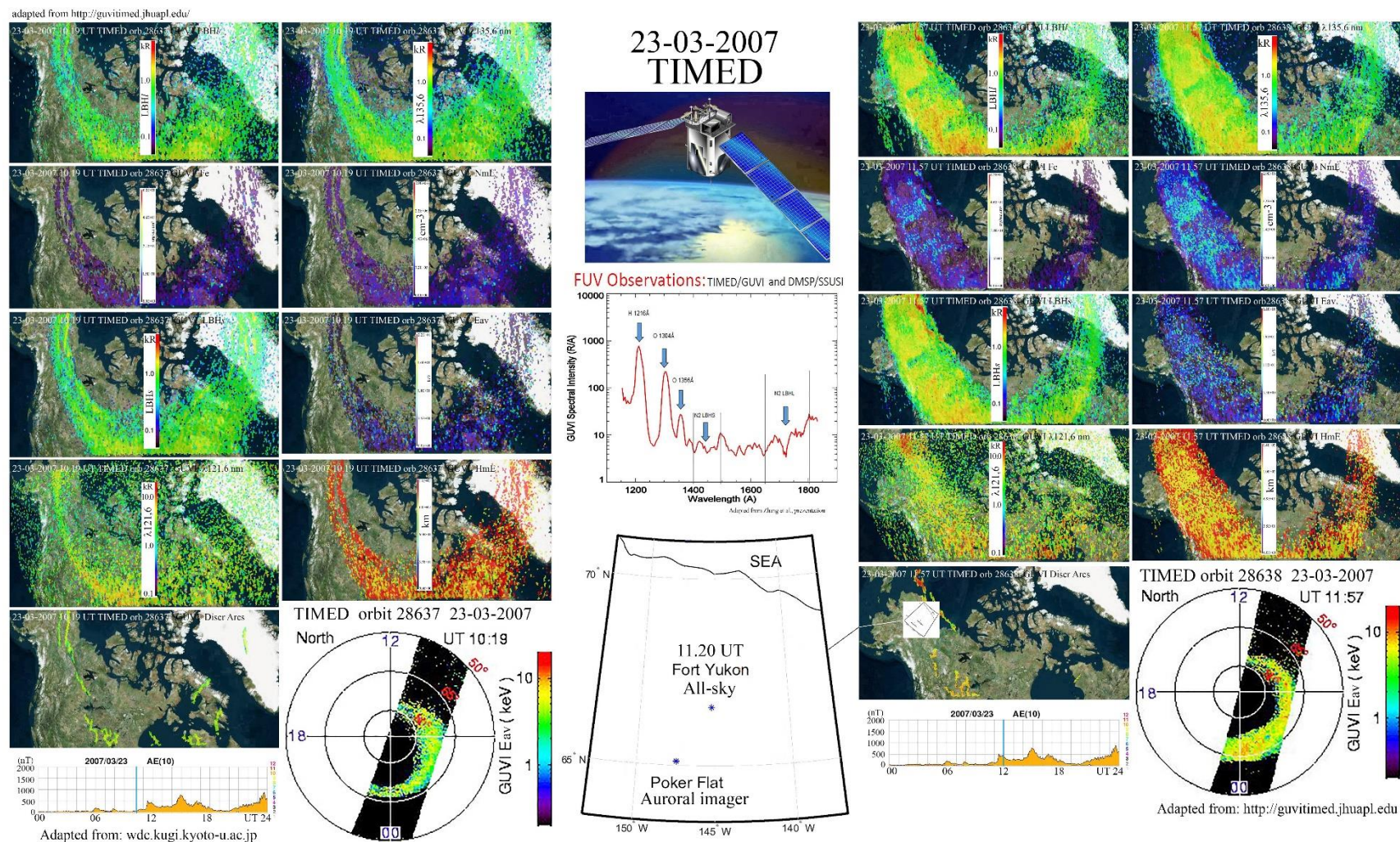


Рис. 5. Среднемасштабные измерения структур в авроральном овале над Аляской, проведенные изображающим ВУФ-спектрографом GUVI с орбиты КА TIMED 23.03.2007 г. в 10:19 UT (левая половина серии панелей) и в 11:57 UT (правая половина серии панелей). Эти измерения были проведены до и после разномасштабных измерений, проведенных с помощью наземных имаджеров в Fort Yukon и Poker Flat. Они отображают состояния и структуры аврорального овала, соответствующие данным AE-индекса, показанным на нижних панелях. Подробности в тексте.

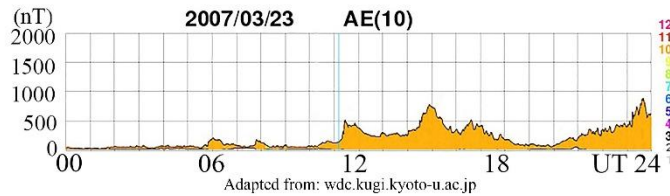
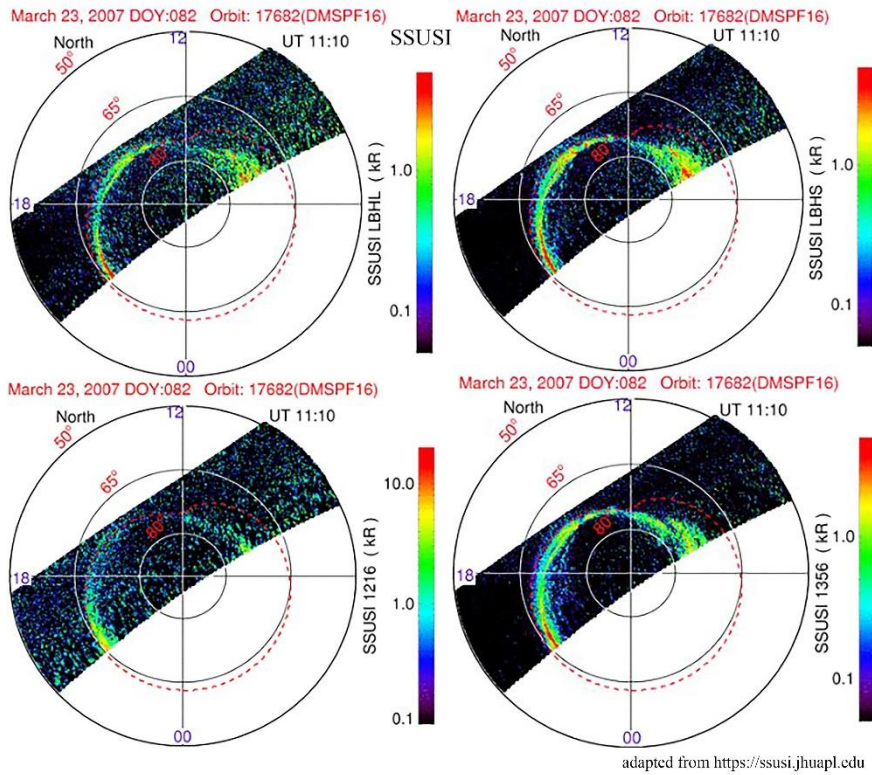
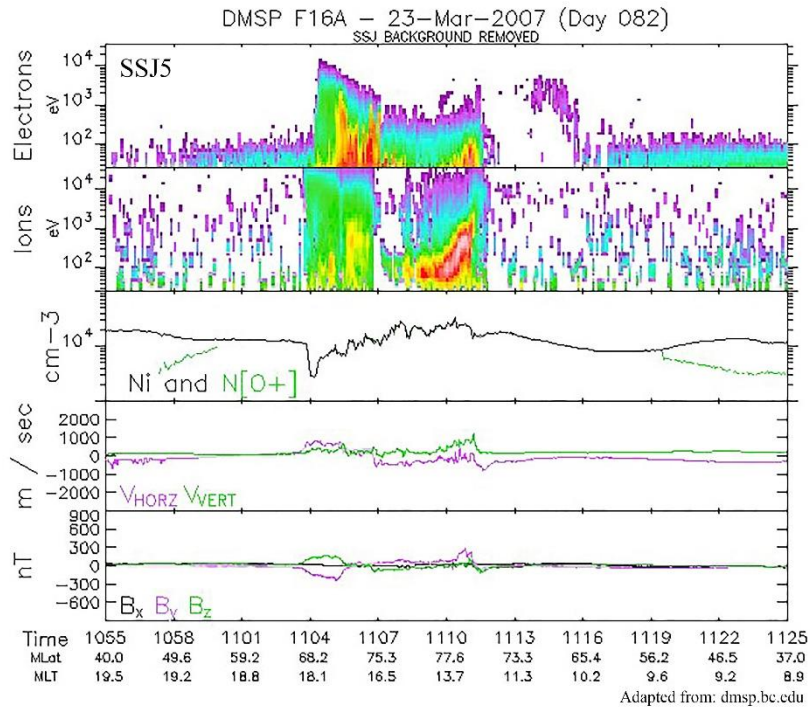


Рис. 6. (верхняя панель) Спектрограмма электронов и ионов 23.03.2007 г. 10:55-11:25 UT, полученная анализатором SSJ5 с орбиты КА DMSPF16; (нижняя панель) изображения ВУФ эмиссий в координатах InvLat-MLT, полученных с помощью изображающего спектрографа SSUSI на КА DMSPF16 23.03.2007 г. в 11:10 UT. Подробности см. в тексте.

4.3 На верхней панели рис. 7 иллюстрируются координированные измерения питч-распределения потоков электронов и оптических эмиссий с орбиты КА Reimei, проведенные 03.01.2006 г. в полуденной части северного аврорального овала (над Канадой) в интервале 10:05:43–10:06:42 UT, и показано, что сдвиговые потоки (flow shears), проходящие через дугу с перевернутым V-распределением могут быть неустойчивыми к Альфвеновским волнам [Asamura et al., 2009]. Данные анализатора ESA на панелях (a)-(d) показывают, что рассредоточенные во времени всплески высыпающихся электронов, типичные для электронов с низкой энергией ускоряемых инерционными Альфвеновскими волнами (IAWs). Эти ускоренные электроны встроены в мульти-кэВные инвертированные V электронные структуры. Имеются две перевернутые V-образные структуры в 10:06:09.5 – 10:06:13.5 UT и 10:06:13.5 – 10:06:28 UT (вторая половина не показана). Обе структуры совмещаются с энергией высыпаний ниже, чем у перевернутых V, во время периодов 10:06:10,5–10:06:12,5 UT и 10:06:14,0–10:06:15,5 UT. Эти низкоэнергичные пучки высыпаний рассредоточены во времени и ограничены питч-углами менее 30°. На панели (e) показаны потоки энергии электронов 50–500 эВ при высыпании в направлении (питч-углов 0–60°). Обратим внимание, что половина из них в углах конуса потерь 60°. Сплошная и пунктирная линии показывают потоки энергии в диапазонах энергий 1–12 кэВ и 0,01–1 кэВ, соответственно. Они соответствуют перевернутым V структурам и низкоэнергичным пучкам, соответственно, в периоды времени, когда появляются пучки высыпающихся электронов. Большая часть потока энергии высыпающихся электронов содержится в перевернутых V структурах.

На нижних панелях рис. 7 показаны две серии последовательных сопряженных по магнитному полю, состоящих из 16-и изображений авроральной эмиссии $\lambda 670$ нм 1PG в каждой серии, полученных над Канадой авроральным имаджером MAC в интервалах 10:06:11,0–10:06:12,9 UT и 10:06:14,0–10:06:15,9 UT. Шкала интенсивности и вектора направлений N-E даны под изображениями. Позиции подножных точек магнитных силовых линий (*f.p.*) на каждом изображении отмечены крестиками на точечных (бледно-желтым цветом) проекциях орбиты КА Reimei на высоте эмиссии 120 км. Черными стрелками справа помечены конкретные дуги A,B,C,D, а белые стрелки схематично указывают на направления сдвиговых потоков в авроральных структурах, иногда разнонаправлено (типа «согнутой шпильки»). Эти оптические измерения авроральных структур, включающие подножную точку м.с.л. (*f.p.*) позволили зафиксировать, что распространяющиеся и складчатые/вихревые дискретные авроральные формы двигались со скоростью 14–18 км/с, а сдвиг потока (flow shear), вытекающий из этого движения, превышает необходимый для неустойчивости к Альфвеновским волнам в масштабах порядка инерционной длины электрона. Эмиссия этих волн обеспечивает вероятное средство для управления низкоэнергичными дисперсными (рассеянными) электронными всплесками.

На рисунке 8 иллюстрируется (по аналогии с рисунками 3и б) обстановка в ВУФ-эмиссиях 03.01.2006 г. в части аврорального овала, как до измерений с орбиты КА Reimei, проведенных в 10:05:43–10:06:42 UT, (09:18 UT), так и после (10:54 UT). ВУФ-изображения были получены с орбит КА TIMED с помощью сканирующего по пространству изображающего спектрографа GUVI.

4.4 Этот пример (см. средние панели), адаптированный из [Ashrafi, 2007], демонстрирует результаты наземных радарных измерений и одновременных измерений авроральных эмиссий ($\lambda 731,9$ – $732,0$ [OI] нм – камера ASK2 и $\lambda 777,4$ нм [OI] – камера ASK3), возбужденных высыпаниями электронов в области каспа. Данные получены 26.01.2006 г. в интервале 17:35:34–17:36:32 UT на острове Шпицберген в условиях суббури (см. нижнюю среднюю панель рис.9). На первой панели сверху в середине Рис.9 показаны данные электронной концентрации в логарифмической шкале, полученные в области каспа с ESR (Eiscat Svalbard Radar) 26.01.2006 г. в 17:30–18:05 UT для высот 90–300 км с временным разрешением 30 с (они интерполированы и сглажены, чтобы выделить вариации в рамках этого события продолжительностью около двух минут). На второй панели сверху в середине показана развертка в интервале 17:33–17:39 UT для высот 90–350 км и показаны те же данные N_e с более высоким временным разрешением 10 с. Пунктирные наклонные линии ограничивают высотную V-образную форму структуры N_e . Автор провела аналогии и указала, что в случае измерений с орбиты сигнатура изменений в спектре потоков частиц типа «перевернутой буквы V» интерпретируется как пространственная.

Ниже (на третьей панели в середине рисунка) показаны 4 совмещенных (superimposed) снимка авроральных эмиссий, полученных с помощью изображающих камер ASK (Auroral Structure and Kinetic action) для четырех моментов, которые отмечены черными вертикальными линиями на второй панели сверху, т.е.: с ASK 2 (настроенным с помощью фильтра на запрещенный дублет O^+ на длинах волн

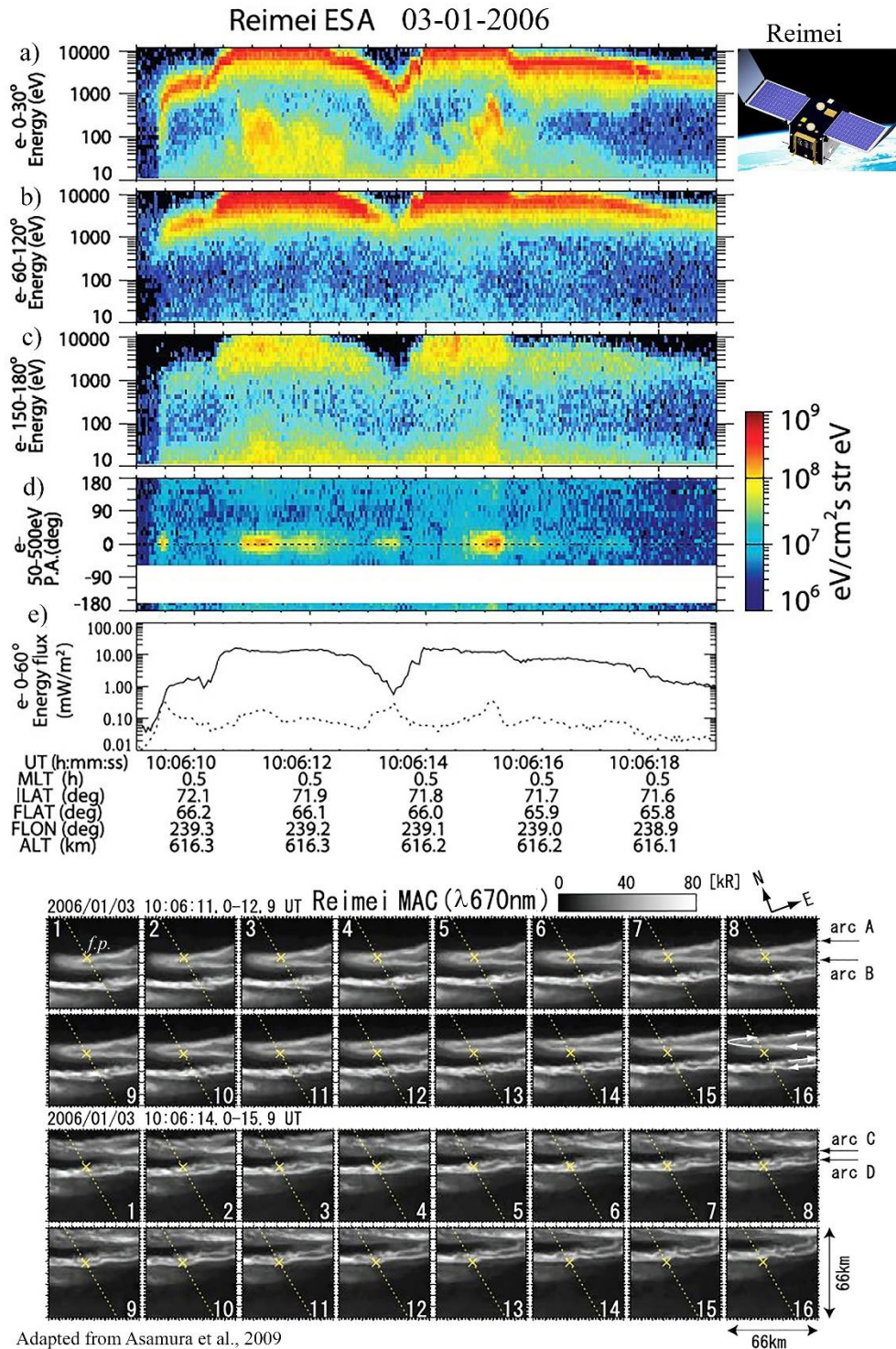


Рис.7. На верхней панели (a,b,c,d) показана спектрограмма pitch-распределения электронов и (e) широтный профиль потока энергии электронов, полученные с орбиты КА Reimei 03-01-2006 в интервале 10:05:43–10:06:42 UT. На нижней панели друг под другом две серии в предшествующих примерах (см., например, рис.3) проиллюстрированы измерения распределения ВУФ-эмиссий над Канадой, полученные с орбиты КА TIMED, проведенные 03-01-2006 с помощью сканирующего изображающего ВУФ-спектрографа GUVI как до измерений с орбиты КА Reimei (в 09.16 UT), так и после них (в 10.54 UT). Каждая из 9 панелей, иллюстрирует пространственное распределение интенсивности ВУФ-эмиссий: LBH_I, LBH_S, $\lambda 135,6$ нм, $\lambda 121,6$ нм (Ly- α) + $\lambda 121,8$ нм (доплеровски сдвинутая Ly- α) и характеристики, рассчитанные из них: Fe, Eav, NmE, HmE

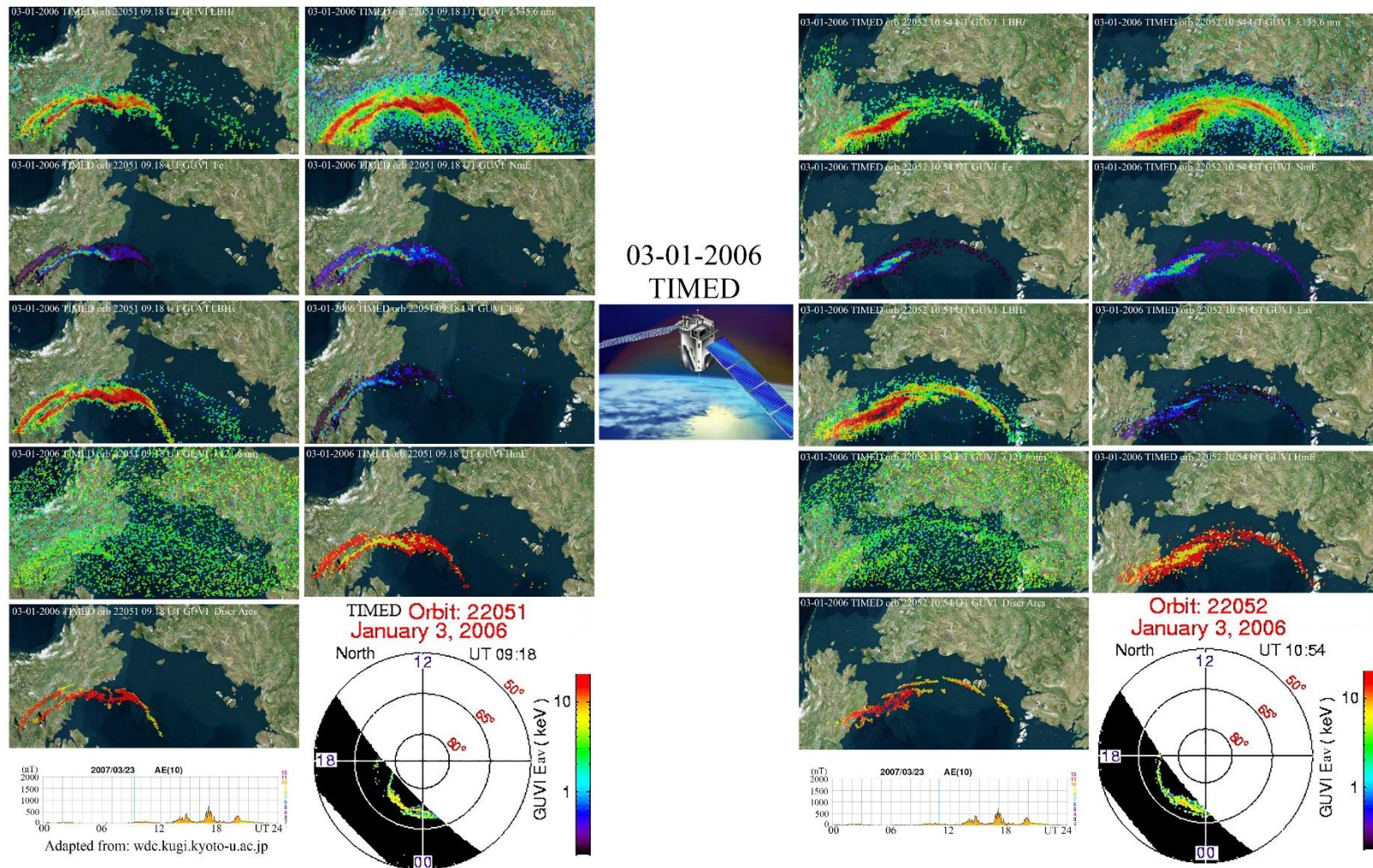


Рис. 8. распределения ВУФ-эмиссий над Канадой с орбиты КА TIMED, полученные 03.01.2006 г. с помощью сканирующего изображающего ВУФ-спектрографа GUVI в 09:18 UT и в 10:54 UT. Каждая из 9 панелей, иллюстрирует пространственное распределение интенсивности ВУФ-эмиссий и характеристик, рассчитанных из них. Подробности см. в тексте.

$\lambda 731,9-732,0$ нм, который имеет максимальную высоту эмиссии $\lambda 731,9-732,0$ нм ~ 250 км (см. реакции $e^- + O(^3P) = O^{+*} (^2P^0, ^4S^0, ^4D^0)$ [Whiter et al., 2014]., и ASK3 ($\lambda 777,4$ нм, реакции $O+e=O^*$ и $O_2+e=O^*+O$), которые имеют два источника в зависимости от энергии высыпаний электронов. Излучение производится в F-области при ударах низкоэнергичных электронов, возбуждающих атомарный кислород, а в E-области за счет молекулярной диссоциации O_2 и возбуждения атомов кислорода.

Структуры эмиссий на изображениях разнообразны, причем сначала преобладает эмиссия, соответствующая высыпаниям электронов с более низкой энергией и с максимальной электронной плотностью на высоте около 250 км, потом наблюдается увеличение энергии и ионизации на высотах около 100 км, а затем снова доминирующие структуры, возбужденные более низкоэнергичными электронами. На первом и последнем снимке изображение полярного сияния состоит из отдельных лучей, совмещенных по магнитному полю. Разницу в высотах эмиссий вдоль лучей можно увидеть по двум цветам: красному на снимке с ASK2 ближе к магнитному зениту соответствующему более низким энергиям высыпающихся электронов, и зеленому на снимке с ASK3, соответствующих более высоким энергиям высыпающихся электронов, и эмиссии, получившейся в результате диссоциации молекул O_2 на более низких высотах вдали от зенита. На двух средних панелях отображаются узкие, закрученные, и нитевидные структуры, которые представляют собой смесь красного и зеленого цветов и соответствуют более энергичным высыпаниям, но зеленый, как указано автором [Ashrafi, 2007], более интенсивный.

Комментарий. Все камеры ASK имеют угол поля зрения $6 \times 6^\circ$ (соответствует изображению размером 5×5 км на высоте 100 км). Кванты авроральных эмиссий через интерференционные фильтры попадают на матрицы (512×512 пикселей) Andor iXon DV887 с обратной засветкой CCD с электронным умножением. Набор камер ASK был установлен рядом с радаром EISCAT Svalbard. Радар (ESR), который регулярно измеряет высотные профили плотности и температуры электронов, а также температуры и скорости ионов прямой видимости.

Одна из главных мотиваций использования изображающих камер ASK заключается в свойствах эмиссий, т.е. того, что запрещенные эмиссии из метастабильных состояний имеют известные времена жизни, тогда как оптически разрешенные переходы «высвечивают» кванты практически мгновенно после возбуждения высыпающимися электронами. Это приводит к эффекту размазывания в полярном сиянии. В случае эмиссии O^+ (время жизни около 5 с) ASK2; ионы кислорода дрейфуют вместе с плазмой, излучая, когда они возвращаются в основное состояние. Комбинируя измерения с двух камер ASK2 и ASK3 с моделированием, может быть определена скорость дрейфа ионов, а, следовательно, и электрические поля, влияющие на ионы, характеристики которые могут быть оценены с высоким разрешением во времени и пространстве. При этом данные радара показывают, что есть ионизация на высоте ~ 100 км от более энергичных электронов, а также на высоте ~ 250 км от электронов с более низкими энергиями. Эти данные будут использоваться для исследования дрейфа плазмы в это время, а также для идентификации вклада различных источников ускорения электронов.

На рисунке 9 (левый и правый ряды панелей) иллюстрируется (по аналогии с рисунками 3, 6, 8) обстановка в ВУФ-эмиссиях 26.01.2006 г. в области аврорального овала, как до наземных измерений в каспе на о. Шпицберген (16:55 UT), так и после (18:32 UT). ВУФ-изображения были получены с орбит КА TIMED с помощью сканирующего по пространству изображающего спектрографа GUVI.

4.5 В примере на рис. 10, адаптированном из [Ashrafi, 2007], иллюстрируется результат наземных наблюдений авроральных структур, проведенных с тремя авроральными изображающими камерами ASK 15.12.2006 г. в 02:18 UT в условиях одной из суббурь мощной магнитной бури на станции Ramfjordmoen в Норвегии ($69,6^\circ N, 19,2^\circ E$) вблизи от радара EISCAT. Последовательности изображений, полученные в течение двух секунд (с временным интервалом 0,1 с) в трех эмиссиях: $\lambda 562,0$ нм O_2^+ (ASK1) в E-области, дублет $\lambda \lambda 731,9-732,0$ нм [OII] (ASK2) в F-области и $\lambda 777,4$ нм OI (ASK3), имеющей максимумы интенсивности, как в F-области, так и в E-области ионосферы. Изображения эмиссий (в искусственных цветах) были совмещены друг с другом по технологии, использованной в предыдущем примере, с целью проследить динамику авроральных мелкомасштабных структур во время суббури и показать развитие дуговой конструкции из тонкой дуги высокой интенсивности в несколько дуг с меньшей оптической интенсивностью. Ширина самых узких структур составляла около 200 м, в предположении высоты эмиссии 100 км. Интервал измерений отмечен синей вертикальной линией на суточной развертке AE-индекса, расположенной на нижней панели. Технология совмещения изображений позволяет получать информацию о высотном распределении эмиссий, а отношения интенсивностей эмиссий, наблюдаемой в каждой камере может быть

использована для того, чтобы проследить, как энергия возбуждающих электронов меняется в каждом волокне (filament) и как она различается между волокнами. Это событие представляет особый интерес для анализа эволюции быстрого временного процесса образования волокон (филаментации) и возможную роль в нем дисперсионных Альфвеновских волн.

На рисунке 11, как и в предыдущих примерах на рисунках 3, 5, 8, 9, показаны распределения интенсивности авроральных ВУФ-эмиссий и энергетических характеристик высыпающихся частиц, рассчитанных из них, полученных в авроральном овале с помощью изображающего ВУФ-спектрографа GUVIS двух орбит КА TIMED 15.12.2006 г., до и после «моментов» наземных наблюдений (в 02:18 UT) видимых эмиссий камерами ASK в Норвегии, т.е. в 01:30 UT и 03:09 UT соответственно.

4.6 Пример, адаптированный из [Zhang et al.,2010] и показанный на рис.12, демонстрирует как данные по высотному распределению Ne и NmE , полученные двумя независимыми методами взаимно дополняют и отчасти валидируют друг друга. На верхней правой панели показано высотное распределение Ne , полученное во время суббури при скан-треках радара ESR (некогерентного рассеяния Sondrestrom Incoherent Scatter Radar) над Гренландией 13.01.2005 г. в интервале 22:27:03-22:30:04 UT. На второй сверху панели (слева) показан фрагмент изображения ВУФ эмиссии LBH/N_2 , полученной (в это же время) на высоте примерно 120 км с помощью сканирующего изображающего спектрографа SSUSI с орбиты КА DMSPF16. Белая полоса на фрагменте изображения ВУФ-эмиссии (на левой нижней панели) в интенсивном полярном сиянии (отмечена сплошной красной стрелкой) показывает с юга на север скан-трек радара ESR. Справа на второй сверху панели друг под другом показаны профили NmE (вверху) и HmE (внизу), полученные вдоль этой белой полосы скана ESR (красные), и из интенсивностей эмиссии на фрагменте ВУФ-изображения (синие), Учитывая различные временные и пространственные разрешения и разные методы, используемые в SSUSI и ISR, а также динамику дискретных полярных сияний во время суббури, профили вполне коррелируют.

Под этими данными (в координатах InvLat-MLT) показаны изображения четырех ВУФ-эмиссий: LBH/N_2 и $LBHs N_2$, $\lambda 135,6$ OI, $\lambda \lambda 121,6+121,8$ Ly- α (доплеровски сдвинутая), полученные при пролете КА DMSPF16 над северной полярной областью (время, указанное на рисунках относится к центру рисунков, т.е. к геомагнитному полюсу). На нижней панели показана развертка AE-индекса, а на верхней (справа) панели - расположение радара ESR на фоне контура о.Гренландия.

4.7 В примере на рис.13, адаптированном из [Miles et al.,2018], продемонстрированы наблюдения локальной электродинамики полярной ионосферы, связанной с двойной дискретной авророй, состоящей из двух дуг с антипараллельным током вдоль дуги, которые были проведены над Канадой почти одновременно с наблюдениями с орбиты КА e-POP (Polar Outflow Probe) и орбит КА Swarm A и C. Получение изображений полярных сияний с помощью КА e-POP на высоте ~ 750 км позволило зарегистрировать структуру дуг на масштабе 1–10 км, которые перемещались и развивались в секундном масштабе времени. Магнитные данные с высокой частотой кадров от e-POP показали возмущения 1–10 Гц, предположительно Альфвеновские, совпадавшие с наблюдаемыми динамичными тонкими структурами полярных сияний, имеющими приблизительно тот же размер. Высокая каденция данных об электрическом и магнитном полях от SwarmA показала нестационарную электродинамику с участием отраженных и интерферирующих Альфвеновских волн и модуляции, соответствующих их захвату в ионосферный Альфвеновский резонатор (IAR ionospheric Alfvén resonator). Эти наблюдения позволили считать важной роль Альфвеновских волн, возможно, также IAR в динамике дискретных дуг на временных масштабах 0,2–10 с и пространственных масштабах ~ 1 –10 км, и тем самым выделили важность участия Альфвеновских волн в магнитосферно-ионосферном взаимодействии.

В следующем примере на правой верхней и средней панелях рис. 13 показаны: изображения мелкомасштабных дискретных дуг, полученные 11.03.2016 г. в 06:49:10-06:49:40 UT с помощью аврорального имаджера FAI (Fast Auroral Imager) [Cogger et al., 2014] с орбиты КА e-POP, который летел от экватора к полюсу. Эти изображения получены в эмиссии $\lambda 670$ нм $1PN_2$ с временем экспозиции 0,1 с и скважностью снимков 1 сек. Последовательность изображений полярных сияний на правой панели демонстрирует, что дискретные дуги сияний имели значительные внутренние тонкие структуры и не были ни статичными во времени, ни стационарными по местоположению даже в 3-х секундной шкале. На изображениях видно, что двойная дуговая система имела ширину ~ 80 км (по касательной к общему направлению дуги), каждая дуга была шириной ~ 10 км, и более мелкие детали были видны внутри дуг в масштабе 1–10 км, который вероятно, ограничивается разрешением пикселей матрицы в авроральном имаджере FAI $\sim 1,2$ км.

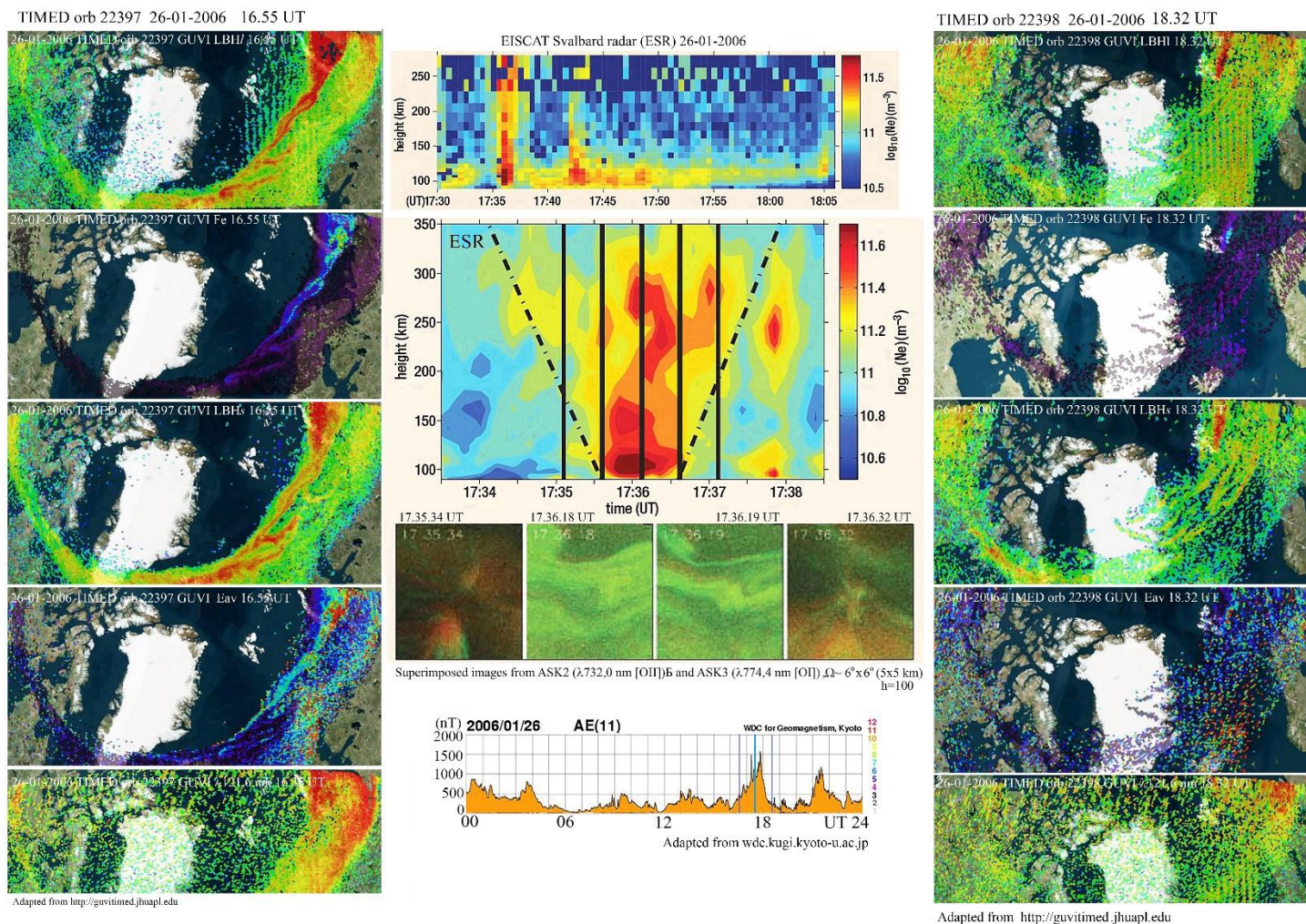
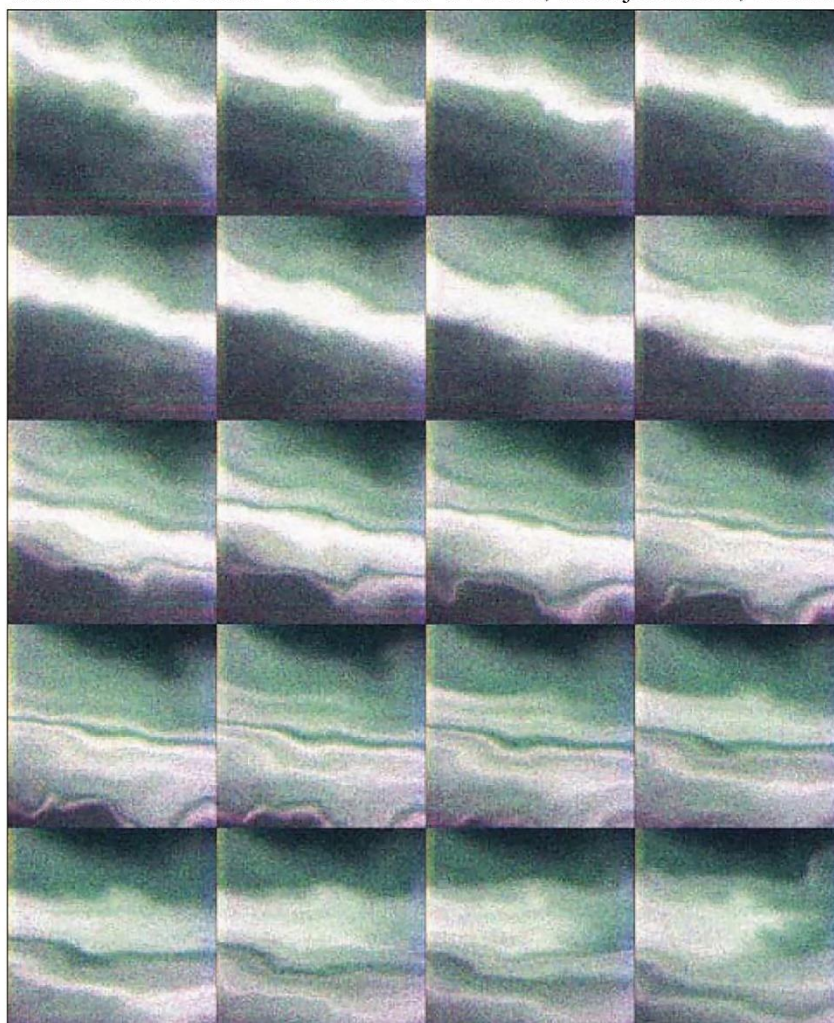
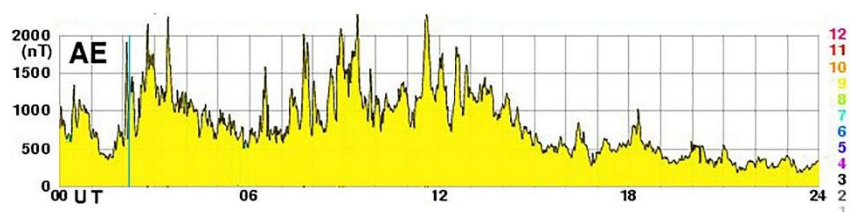


Рис. 9. На средних панелях (сверху вниз): первая и вторая панели иллюстрируют данные N_e по высоте в логарифмическом масштабе, полученные в области каспа с EISCAT-радаром 17:35:34–17:36:32 UT 26.01.2006 г. во время суббури. На третьей сверху панели показаны 4 цветных последовательных по времени совмещенных (в разных эмиссиях) изображений авроральных эмиссий: дублет O^+ $\lambda 731,9 + \lambda 732,0$ нм (на высотах ~ 250 км), и $\lambda 777,4$ нм OI, имеющих два максимума интенсивности на разных высотах. В левом и правом рядах панели изображения ВУФ-эмиссий в авроральном овале (о. Шпицберген виден на карте), полученные с орбиты КА TIMED 26-01-2006 как до измерений N_e в каспе (радар EISCAT), так и после (16:55 UT и 18:32 UT соответственно).

ASK1+ASK2+ASK3 02.18 UT 15-12-2006, Ramfjordmoen, Norway



Adapted from Ashrafi, 2007



Adapted from wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp

Рис. 10. Серия из 20 совмещенных снимков интенсивности авроральных эмиссий, полученных с помощью изображающих камер ASK1, ASK2, ASK3, размещенных вблизи радара EISCAT в Норвегии, полученных в течение двух секунд в 02:18 UT 15 декабря 2006 г. с экспозицией 0,1 с, см. [Ashrafi, 2007]

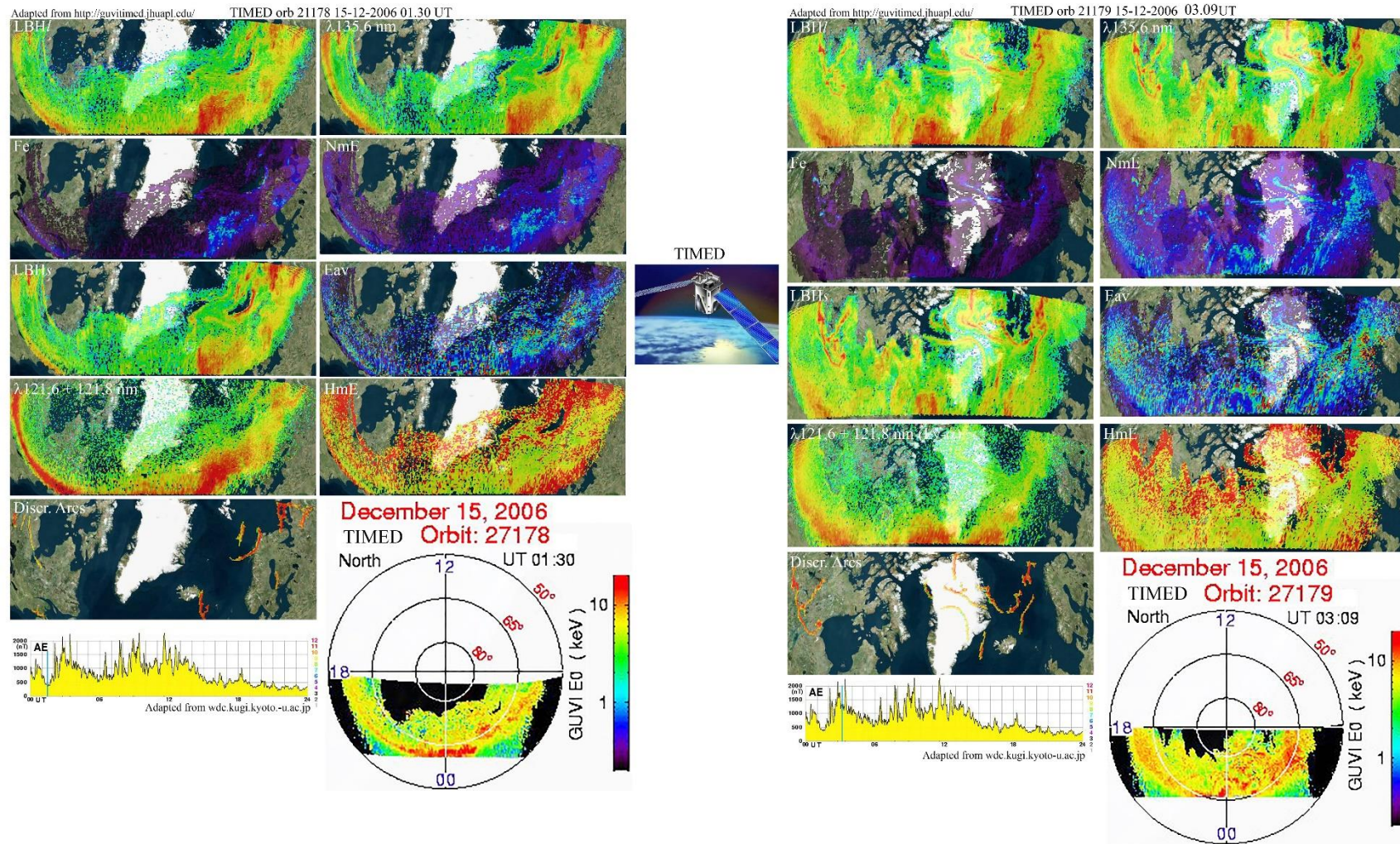


Рис. 11. Обстановка в авроральном овале 15.12.2006, полученная с орбиты КА TIMED по изображениям ВУФ-эмиссий: LBH/ и LBHs N₂; $\lambda 135,6$ OI; $\lambda 121,6 + \lambda 121,8$ (доплеровски сдвинутая линия) Ly- α , а также карты энергетических характеристик потоков высыпавшихся электронов (Fe и Eav) и NmE и HmE (концентрация электронов в максимуме E-области и высота максимума E-области соответственно). Подробности см. в тексте

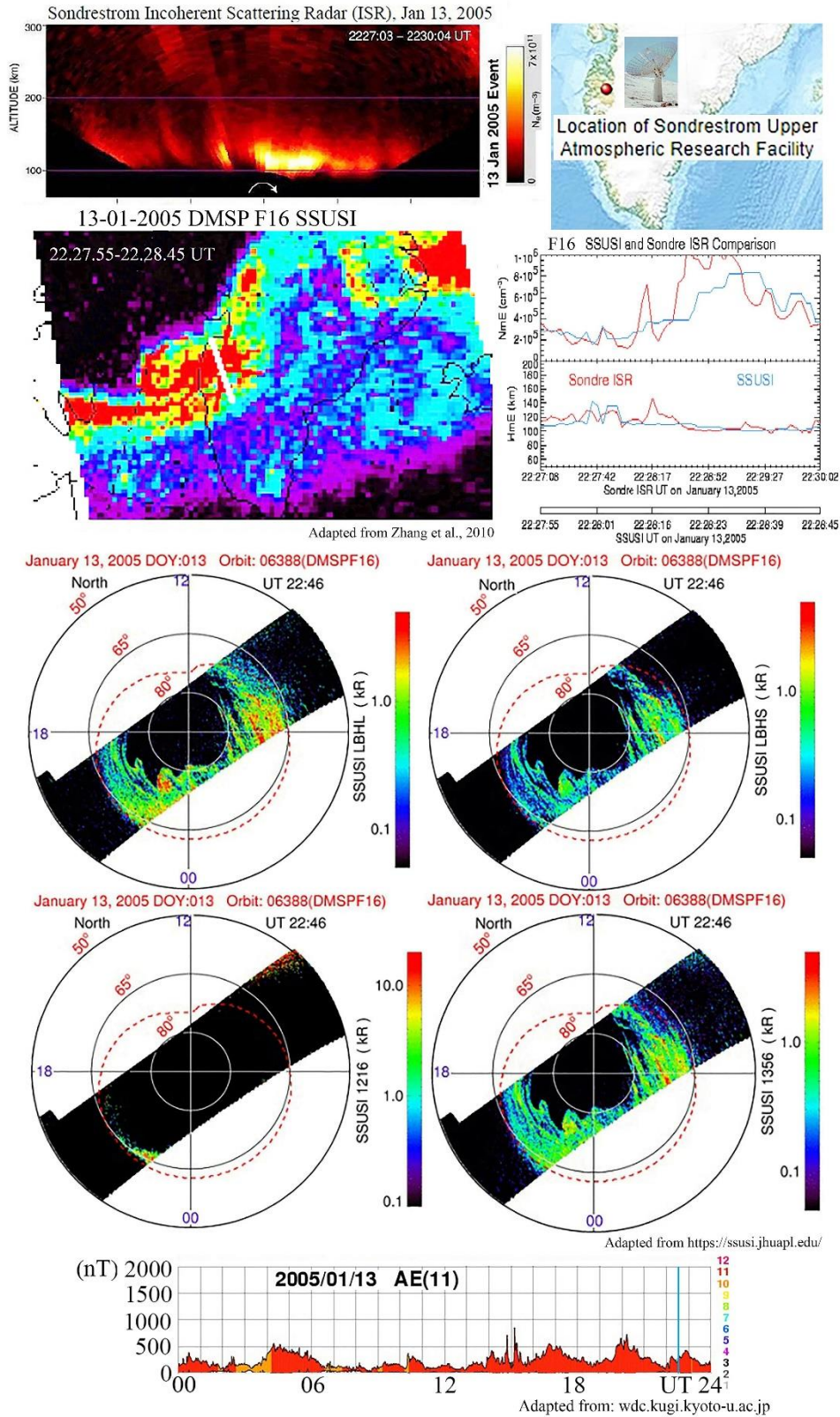


Рис. 12. Представлены данные одновременных измерений N_e по высоте (13.01.2005 г. в интервале 22:27:03-22:30:04 UT) с помощью ESR [Zhang et al., 2010] (левая верхняя панель), и фрагмент изображения интенсивности авральной ВУФ-эмиссии LBHs, полученный с орбиты КА DMSP F16 над Гренландией (вторая панель сверху с левой стороны) 13.01.2005 г. в интервале 22:27:55-22:28:45 в условиях суббури. На основе измерений ВУФ-эмиссий LBHL, LBHS, и λ 135,6 нм OI на сайте <https://ssusi.jhuapl.edu> были рассчитаны NmE и HmE, что позволило провести сравнение этих характеристик, полученных независимыми методами (см. вторую панель сверху с правой стороны). Подробности см. в тексте

КА Swarm A и C в это время летели в сторону экватора на высоте ~ 440 км и пересекли тот же диапазон широт $52\text{--}56^\circ$, что и КА e-POP, примерно на 120 секунд раньше и на 2° восточнее. Приборы на обоих КА зарегистрировали данные о магнитном поле со скоростью 50 импульсов в секунду с использованием магнитометра [Merayo et al., 2008]. С КА Swarm A также были получены данные электрического поля за 16 sps (точек в сек) с прибора (EFI electric field instrument) [Knudsen et al., 2017].

На левой верхней панели Рис.13 показан участок аврорального овала в ВУФ-эмиссии LBN_l, полученный с КА DMSP F16, и на эту же карту для наглядности нанесена уменьшенная средняя верхняя панель. В ряду нижних панелей проиллюстрирована обстановка (в других ВУФ-эмиссиях) в авроральном овале в это же время, полученная с помощью изображений ВУФ-эмиссий и измерений характеристик потоков электронов и ионов с орбиты КА DMSPF16 в 06.49 UT, т.е. в то же самое время, когда получены изображения с КА e-POP и характеристик плазмы на SWARM A и C.

4.8 22 октября 2006 г. над Тромсё (Ramfjordmoen), Норвегия наблюдались мерцающие пятна интенсивности эмиссии в авроральной структуре с помощью одной из мультиспектральных изображающих камер ASK (Auroral Structure and Kinetics), а именно той, в которую был встроен интерференционный фильтр ($\delta\lambda\sim 14$ нм) с максимумом пропускания на $\lambda 673,0$ нм (1PGN_2) с углом поля зрения $3,1^\circ \times 3,1^\circ$ ($\sim 5 \times 5$ км на высоте 100 км). Камера использовалась, чтобы наблюдать мерцающий компонент полярного сияния с высоким пространственным (40 м/пиксель) и временным (32 кадра/с) разрешением. Было обнаружено, что пространственные масштабы мерцающих пятен имеют размер меньше, чем 1 км. Типичная наблюдаемая частота мерцания, как правило, в диапазоне 6–8 Гц, хотя мерцающие пятна встречаются как на более низких, так и на более высоких частотах. Мерцающая структура коррелировала с фоновым немерцающим полярным сиянием, показывая, что между ними есть временное соотношение, но нет пространственной корреляции. Эти результаты подтвердили теорию [Temerin et al., 1986; Sakanoi et al., 2005] согласно которой мерцающая структура, вызывается интерферирующими дисперсионными Альфвеновскими волнами. Авторы смоделировали интерференцию между несколькими волнами EMIC (Electromagnetic ion cyclotron) **или дисперсионными Альфвеновскими волнами** в резонансном конусе, успешно воспроизводящую наблюдаемые пространственные и временные характеристики мерцающего полярного сияния.

На рисунке 14, адаптированном из [Whiter et al., 2008], на двух средних наборах панелей (друг под другом) показаны два изображения мерцающих пятен, полученных 22.10.2006 г. (в 18:16:30,078 UT и в 18:16:44,247 UT соответственно) в ~ 21.00 MLT, каждое из которых сопровождается изображением наблюдаемых частот мерцаний (в рамках поля зрения) и восемью изображениями плотности спектральной мощности (powerspectraldensity) на 8 частотах: 13.5; 15.5; 11.5; 9.5; 7.5; 5.5; 3.5; 1.5 Гц. На правых нижних панелях показаны графики пространственной и временной корреляции между мерцающим и немерцающим полярным сиянием. (вверху) Изменяющееся во времени коэффициент пространственной корреляции между мерцающей плотностью спектральной мощности и яркостью полярных сияний в трех 2-Гц диапазонах и по всем частотам (жирная черная линия). (внизу) Средняя спектральная плотность мощности (PSD power spectral density) на всех частотах (серая сплошная линия) и в диапазоне 5–12 Гц (серая пунктирная линия) показаны вместе со скользящим средним значением яркости полярного сияния за 1 с (черная линия), усредненные по всему изображению. На правой средней панели показано распределение интенсивности авроральной эмиссии LBN_s в северной полярной области в координатах InvLat-MLT, полученное с орбиты DMSP F16 в 18.09 UT (время соответствует прохождению начала координат), т.е., на котором видна авроральная структура (в грубом разрешении $\sim 10 \times 10$ км), в которой (вероятно) ASK наблюдались мерцающие пятна.

На левых панелях рис.14 друг под другом показана обстановка в авроральном овале в ВУФ-эмиссиях, а также Fe и Eav, полученная 22.10.2006 г. в 17:39 UT с помощью изображающего спектрографа GUVI на орбите КА TIMED примерно за 1 час до наблюдений в Тромсё.

4.9 Низкочастотное (ОНЧ) радиоизлучение полярных сияний, называемое блюдами (VLF Saucers), представляет фундаментальный интерес, потому что они (блюдца) требуют стационарного процесса излучения в динамичной авроральной среде, и до сих пор остается загадкой, в каких условиях это может происходить в полярной ионосфере [Moser et al., 2021]. Блюдца ОНЧ - это результат эффекта распространения, в результате которого генерируются свистовые сигналы разных частот в «резонансном конусе», которые распространяются под разными углами относительно магнитного

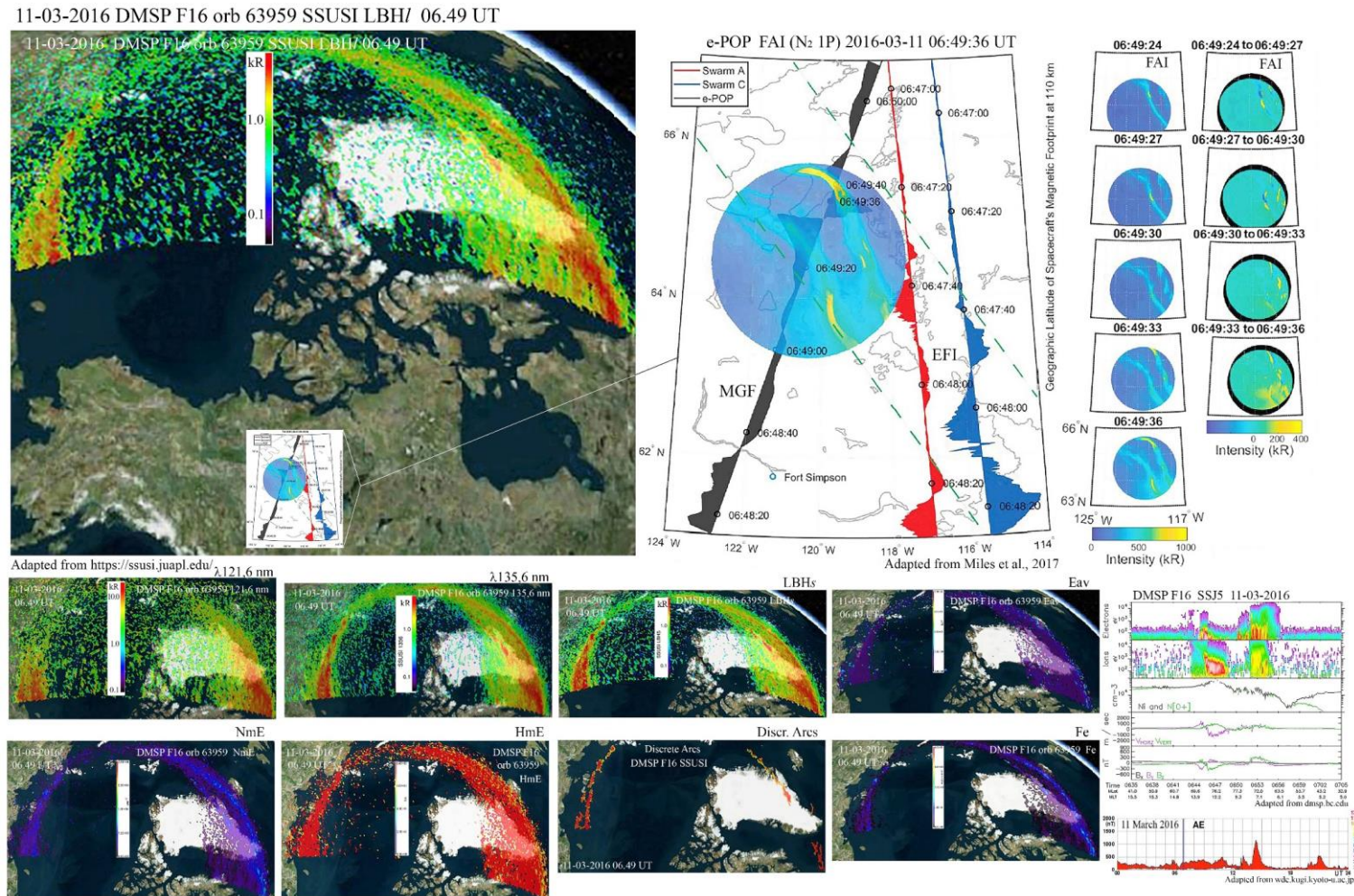


Рис. 13. Изображения эмиссии $\lambda 670$ нм N_2 1PG в мелкомасштабных авроральных дугах, и их динамики, полученные над Канадой с орбиты КА e-POP 11.03.2016 г. в 06:49:00-06:49:40 UT, а также характеристики плазмы вдоль орбит КА SWARM A и C, представлены на правой панели, адаптированной из [Miles et al., 2017]. Обстановка в авроральном овале по изображениям ВУФ-эмиссий, полученных с помощью изображающего спектрометра SSUSI и характеристикам плазмы по данным SSJ5 на орбите КА DMSPF16 представлены на левой верхней и нижних панелях. Результаты этих наблюдений позволили авторам [Miles et al., 2017] считать важной роль Альфвеновских волн в динамике дискретных дуг на временных масштабах 0,2–10 с и пространственных масштабах ~ 1 –10 км. Подробности см. в тексте

поля. Орбитальный КА или ракета, пролетая над источником или под ним, может «увидеть» V-образную зависимость частот от времени. Зондирующая ракета CAPER-2 была запущена в область каспа из Andoya, Норвегия в 09:27 UT 4 января 2019 года, и достигла апогея 774 км. Эксперименты на ней позволили провести измерения в области крупномасштабного дневного блюдца ОНЧ с несколькими лучами, подобного тем, которые наблюдались с орбиты КА DEMETER [James et al., 2012], с добавлением измерений частиц и наземных измерений. Анализ форм блюдца ОНЧ, целевые измерения с использованием сигналов и наземных данных показали, что с учетом оценочных неопределенностей, они (блюдца ОНЧ) возникают на высотах ~4000 км в пределах каспа. Бортовые анализаторы измерений частиц показали рассредоточенные электронные всплески в каспе, ускоренные Альфвеновскими волнами на высотах равных или выше источников блюдца.

В состав полезной нагрузки зондирующей ракеты CAPER-2 входили приборы, измеряющие электрическое поле до 40 кГц перпендикулярно к оси вращения ракеты со скоростью вращения ~0,75 Гц, которая поддерживалась в пределах 10° от направления фонового магнитного поля, измерялось двумя радиальными двухзондовыми антеннами с использованием зондов диаметром 6 см с интервалом 3 м. Электрические поля до 5,0 МГц измерялись параллельной осевой двухзондовой антенной. В составе НА на CAPER-2 было также два типа детекторов электронов: детекторы-бублики, измеряющие высыпавшиеся электроны в восьми выбранных диапазонах энергий от 220 до 625 эВ и цилиндрические детекторы измеряли функции распределения электронов в диапазоне 0,2–12,3 кэВ. В составе аппаратуры на CAPER-2 также входил феррозондовый магнитометр, четыре игольчатых зонда Ленгмюра и коррелятор данных волны-частицы.

04.01.2019 г. межпланетное магнитное поле (ММП) было относительно стабильным, при этом ММП $B_z \approx -5$ нТл и IMF $B_y \approx 2-6$ нТл было за 1–2 ч до запуска. В этих условиях обратное рассеяние излучения радара, характерное для каспа, появилось над Шпицбергенем, измеренное с помощью SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) (Cisham et al., 2007) в Hankasalmi. Сигнатуры в каспе, такие как повышенная плотность ионосферы и температура, были измерены радаром EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) на Шпицбергене с использованием направленной вверх 42-метровой антенны. Над Шпицбергенем авроральным имаджером в это время наблюдалась полярное сияние с преобладанием красной кислородной линии $\lambda 630,0$ нм.

На рисунке 15 (панели a,b,c,d) иллюстрируются данные измерений, адаптированные из [Moser et al., 2021], полученные с зондирующей ракеты CAPER-2, запущенной в 09:27 UT 4 января 2019 года с полигона Andoya в Норвегии в сторону о. Шпицберген, над которым она достигла высоты 774 км в области каспа (схема полета показана на нижней левой панели рис.15). На верхних панелях 1-4 слева показаны результаты измерений с зондирующей ракеты CAPER-2 над каспом (в районе о. Шпицберген): спектрограмма электрического поля от 0 до 2,5 МГц; и спектрограмма электрического поля НЧ (0-25 кГц), спектрограмма, показывающая полосу свистовой моды волн с более низкой отсечкой вблизи нижней гибридной частоты ($f_{LH} \sim 5$ кГц). *Широкополосные волны ОНЧ возникали ниже f_{LH} во время пересечения каспа. Структурированные вистлеровские излучения на частотах 5–20 кГц появились на 200 с (385 км), за несколько сотен секунд до входа ракеты в касп. Волны свистовой моды в этом частотном диапазоне продолжались во время полета через касп, но были менее структурированы;* на панели (c) развертка по энергии (левая шкала 220-320 эВ) и по потоку энергии (правая шкала) высыпавшихся электронов; (d) развертка дисперсии электронов энергия-время, полученные с траектории ракеты с 09:30 по 09:42 UT. Увеличенный вид (d) наблюдаемой дисперсии электронов энергия-время, иллюстрирует ускорение электронов Альфвеновскими волнами.

На правых панелях друг под другом показаны спектрограммы электронов, полученные с помощью электростатических анализаторов SSJ5 в секторах дневного местного времени с орбит КА DMSPF18 и F16 в интервалах 09:36-09:47 UT и 09:40-09:52 UT соответственно.

На рисунке 16 на левой верхней панели (a) увеличенный вид блюдцеобразных структур, а на (b) с выделенными срезами 12-и выбранных блюдца. На (c) показана геометрия механизма генерации блюдца VLF с путями лучей, скорректированными с учетом преломления, рассчитанными с помощью кода трассировки лучей [Moser et al., 2021]. На правой верхней панели (a) представлены данные All-sky имаджера ASI: $\lambda 630,0$ нм [OI] (слева) и $\lambda 557,7$ нм [OI] (в середине), и отношение интенсивностей эмиссий $\lambda 630,0/\lambda 557,7$ нм, наблюдаемых с помощью ASI над Longyearbyen с наложенной проекцией траектории зондирующей ракеты CAPER-2. Интенсивная эмиссия $\lambda 630,0$ над о. Шпицберген иллюстрирует полярное сияние в каспе. Однако, как и ожидалось, дуги и волокна, возникшие внутри каспа, имеют более интенсивный зеленый цвет. Это могло быть в связи с мерцающими (flashing)

сигнатурами (Poleward Moving Auroral Forms), движущимися к полюсу полярных сияний, связанных с событиями переноса потока [Oksavik et al., 2005].

На правой панели рис.16 (b) слева направо представлены карты обратного рассеяния SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network): доплеровской мощности, скорости и спектральной ширины. (c) Данные радара EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) Svalbard Radar, показывающие начало повышенной температуры электронов и восходящего потока ионов после 09:30 UT. В (a) и (b) звездочки (круглые символы) указывают средние значения оценочных неопределенностей источников блюдец ОНЧ для двух примеров профилей плотности. На панелях (c) электронная температура и скорость дрейфа ионов от высоты соответственно по данным EISCAT 04.01.2019 г. в интервале с 08:30 до 10:30 UT.

На рисунке 17 показана обстановка в части аврорального овала, в виде изображений ВУФ-эмиссий, полученных изображающим спектрографом SSUSI с орбит КА DMSP F17 04-01-2019 как до запуска ракеты CAPER-2 (08:48 UT), так и после – в 10:30 UT.

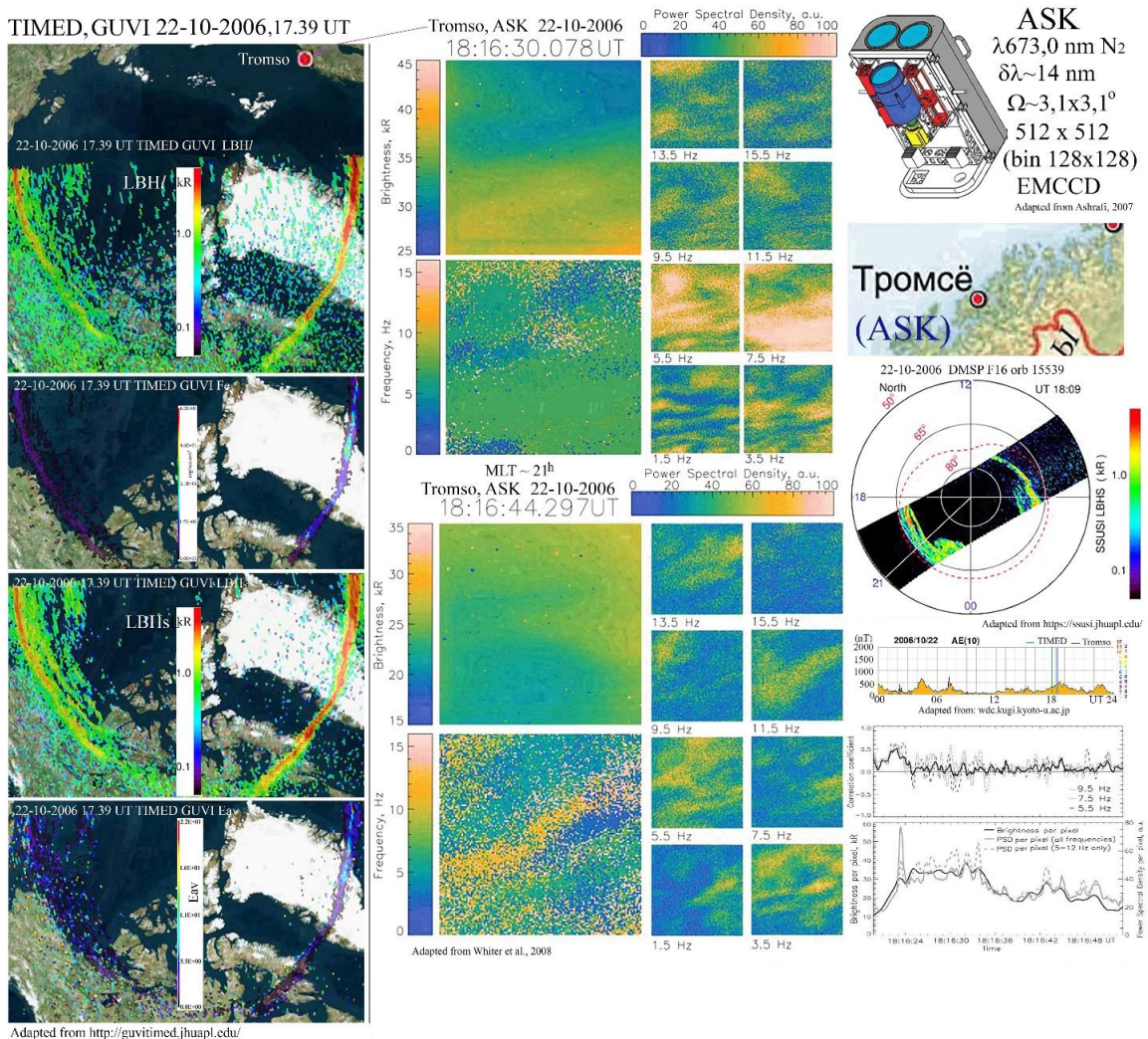


Рис. 14. Адаптирован из [Whiter et al., 2008] иллюстрирует мерцающие пятна в авроральной структуре в эмиссии $\lambda 673,0$ нм (1PGN_2), наблюдавшиеся в с помощью аврорального имаджера ASK, в Ramfjordmoen, Норвегия 22-10-2006 в 18.16.30,078 UT и в 18.16.44,247 UT (см. панели в середине рисунка) [Whiter et al., 2008]. Под ними в том же формате показаны изображения распределений частот мерцания от 0 до 15 Гц, а справа в меньшем формате изображения плотности спектральной мощности в 8-и частотах. На правой панели в середине (по высоте) в координатах InvLat- MLT показано изображение распределения интенсивности ВУФ-эмиссии LBHs в северной полярной зоне, полученное 22-10-2006 в 18.09 UT (время относится к центру координат) с помощью сканирующего изображающего спектрографа SSUSI на орбите КА DMSPF16. На левых панелях (друг под другом) показана авроральная обстановка в ВУФ-эмиссиях, изображения которых получены с помощью изображающего спектрографа GUVI на орбите КА TIMED 22-10-2006 в 17.39 UT. Развертка AE-индекса 22-10-2006 показана на второй панели снизу в правой части рисунка. Подробности см. в тексте

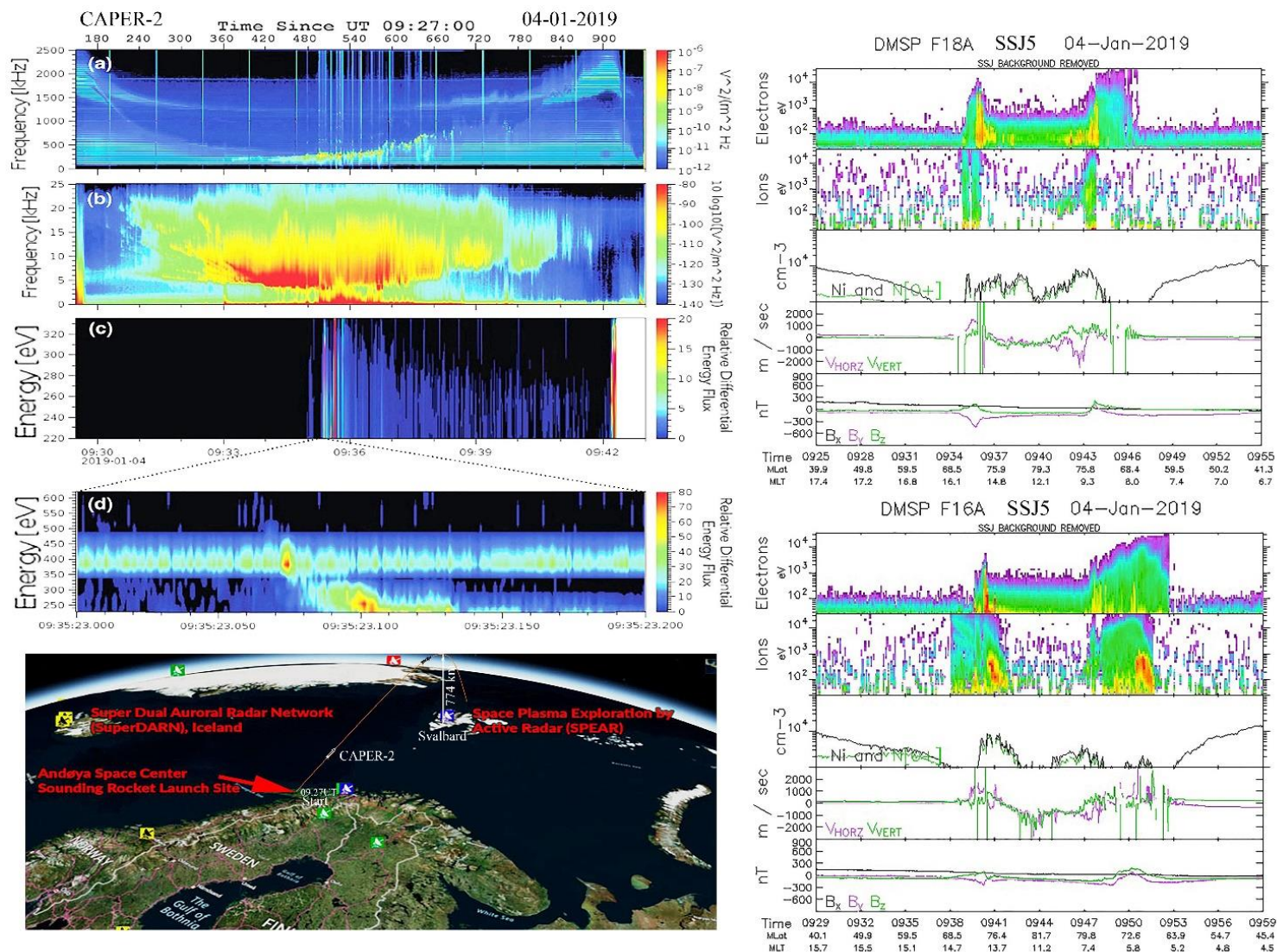


Рис. 15. Обзор данных с зондирующей ракеты CAPER-2 [Moser et al., 2021]: (a) ВЧ измерения. Интенсивные плазменные волны возникали при пересечении каспа (~500–700 с). (b) ОНЧ измерения. Блудцеобразные особенности над отсечкой нижегибридной частоты возникали в течение 200–450 с. (c) Измерения низкоэнергичных (продольных) В электронов. Увеличение числа указывает на высыпания мягких частиц, связанных с каспом. (d) Увеличенный вид наблюдаемой дисперсии электронов энергия-время, связанной с Альфвеновским ускорением электронов. На нижней панели на фоне карты Скандинавии схематический рисунок геометрии полета ракеты над о.Шпицберген в области каспа. На двух правых панелях (друг под другом) спектрограммы электронов и ионов, полученные с помощью электростатических анализаторов SSSJ5 с орбит КА DMSPF18 и F16, пролетевших над областью каспа 04.01.2019 в интервалах 09.37-09.43 UT и 09.41-09.44 UT соответственно

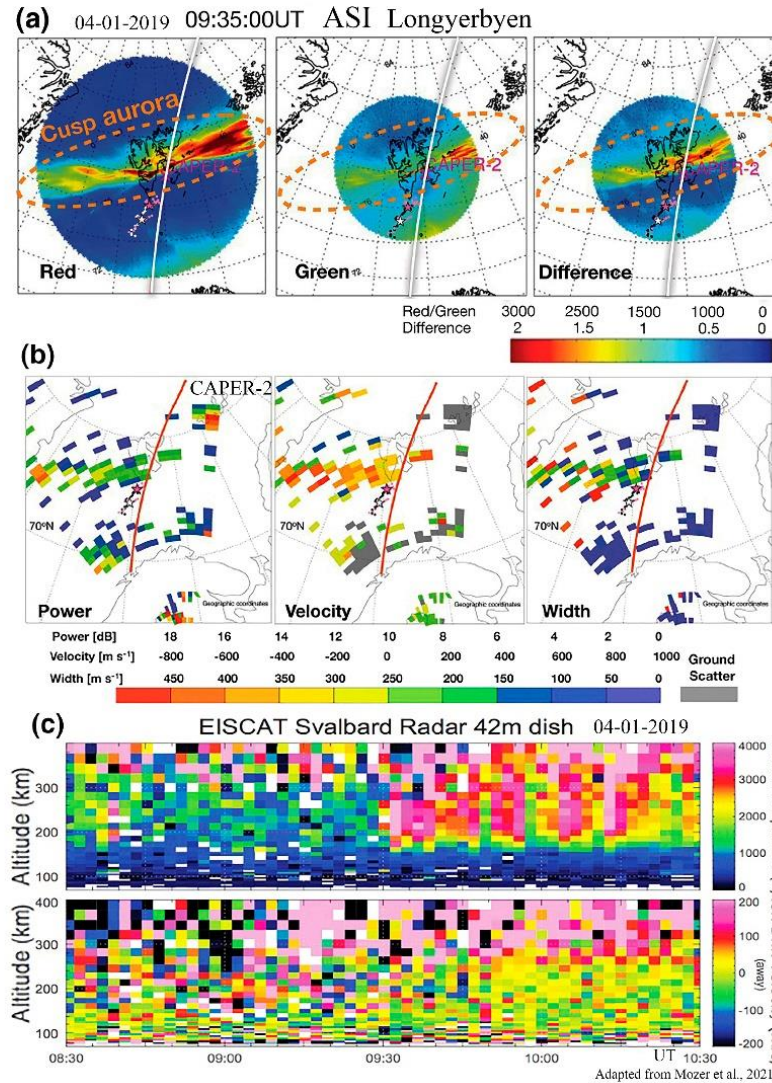
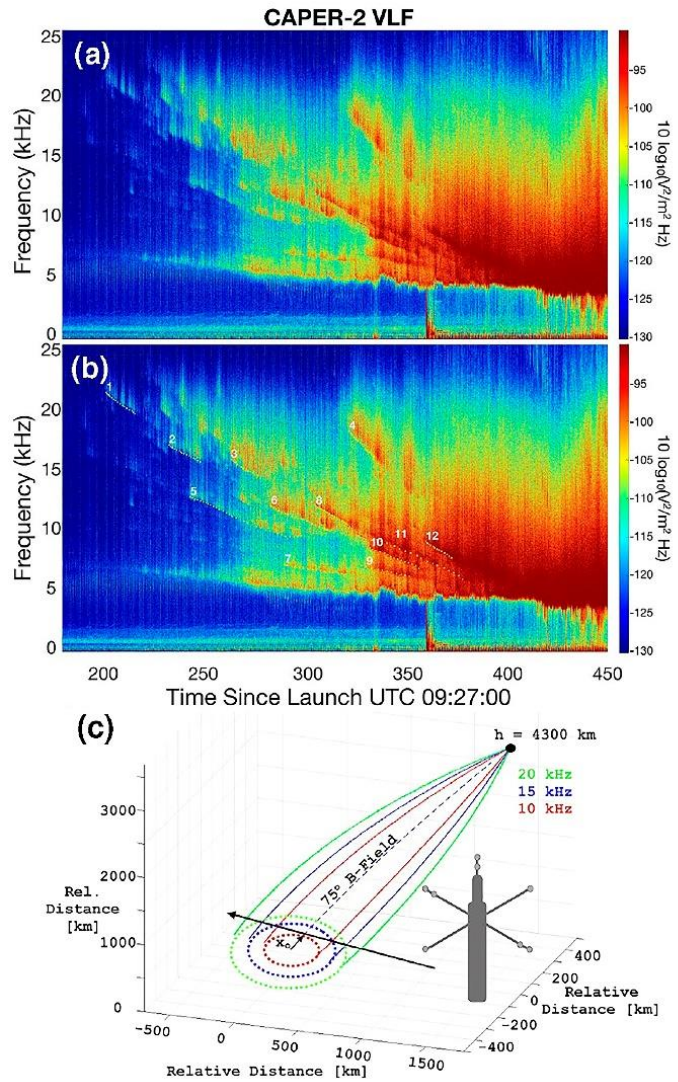


Рис. 16. Слева (а) Увеличенный вид блюдцеобразных элементов ОНЧ, показанных на рис. 15. (б) Особенности 12 срезов выбранных блюдце ОНЧ. (с) Геометрия для генерации блюдце с путями лучей, скорректированными с учетом преломления, рассчитанными с помощью кода трассировки лучей в [Moser et al., 2021] (см. текст). Справа панели All-sky (ASI) изображений эмиссий над Longyerbyen, Норвегия: (а) $\lambda 630,0 \text{ нм}$ [OI] (слева), $\lambda 557,7 \text{ нм}$ [OI] (в центре) и (справа) отношение интенсивностей I630,0/I557,7, наблюдавшихся ASI с наложенной траекторией зондирующей ракеты CAPER-2. (б) Карты обратного рассеяния доплеровской мощности, скорости и спектральной ширины, полученные с SuperDARN (Super Dual Auroral Radar). (с) Данные радара EISCAT Svalbard Radar, показывающие начало повышенной температуры электронов и потока восходящих ионов после 09:30 UT. Сеть; EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association)

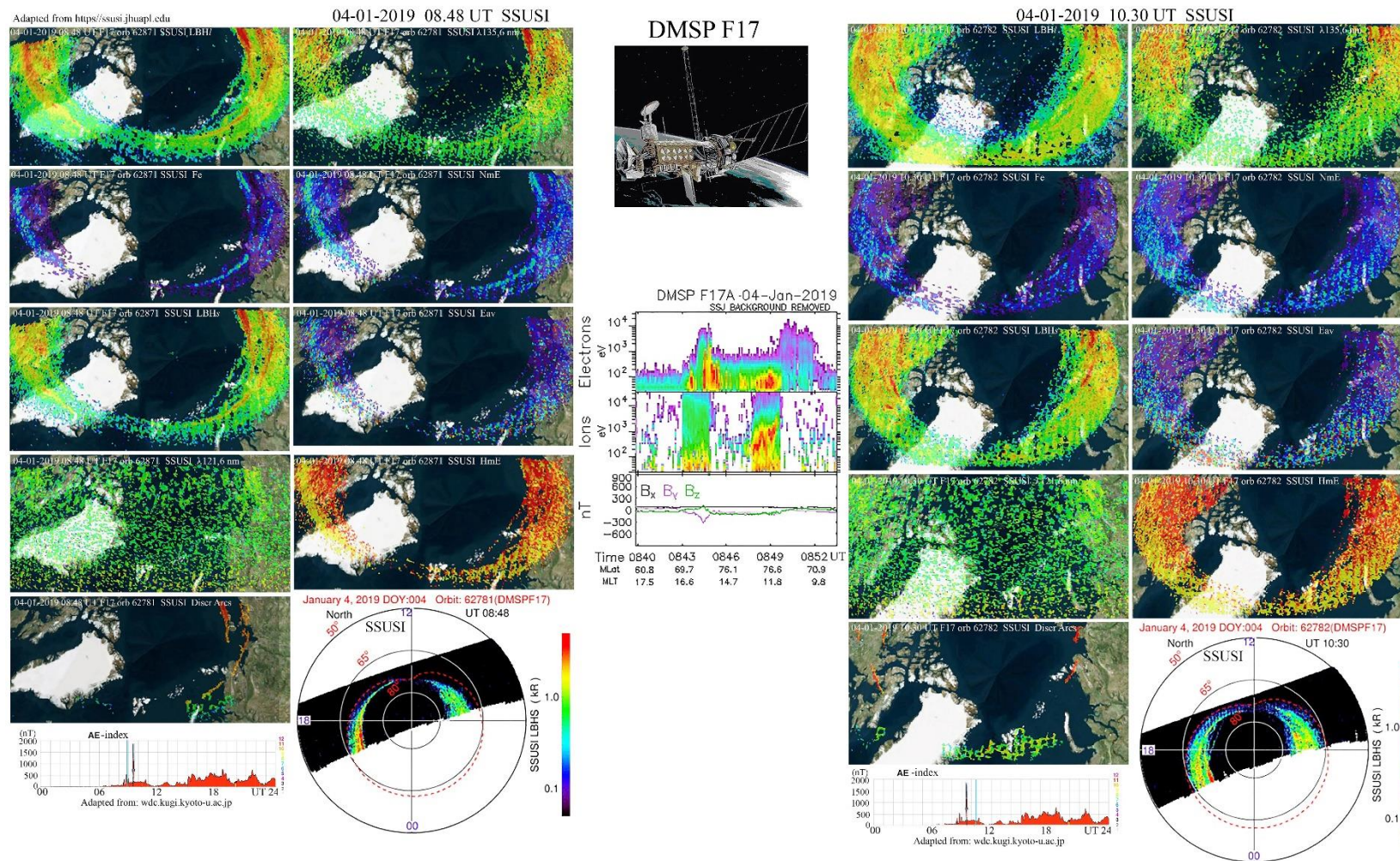


Рис. 17. Обстановка в авроральном овале, полученная с помощью изображений ВУФ-эмиссий с помощью сканирующего изображающего спектрографа GUVI с орбит КА TIMED в 08:48 UT и в 10:30 UT 04.01.2019 г. и анализатора потоков электронов и ионов SSJ5 с орбиты КА DMSPF17 в 08:46 UT 04.01.2019 г. при пролете над областью Каспа

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Составлен аннотированный атлас примеров мелко- и среднемасштабных авроральных изображений, полученных с разных низких (до 1000 км) полярных орбит КА, в котором:

- рассмотрен ряд примеров изображений мелкомасштабных структур авроральных эмиссий, полученных на неосвещенных сторонах орбит КА Reimei (INDEX) и КА e-POP в конкретных эмиссиях видимого спектра в различных геомагнитных условиях. Большинство из этих примеров сопровождаются изображениями конкретных ВУФ-эмиссий $\lambda 135,6$ нм, LBH₂ и LBH₁, полученными с орбит КА TIMED и/или КА DMSP, отображающих реальные локальные границы и структуру фрагментов аврорального овала в охватываемых сканирующим изображающим спектрографом секторах MLT, а также характеристик полярной ионосферы: Fe (поток энергии высыпавшихся электронов), Eav (средняя энергия электронов), NmE (электронная концентрация в максимуме E-области), и HmE (высота максимума электронной концентрации в E-области), рассчитанными из них [Ding et al., 2017; Luan et al., 2018; Bender et al., 2021; Knight et al., 2018; Knight, 2021];

- большинство изображений эмиссий картографированы на фоне географических координат. Кроме того, в некоторых примерах на отдельных панелях представлены изображения в полярных координатах InvLat-MLT, из которых видны конкретные MLT сектора, охватываемые подметающими изображающими спектрографами GUVI (TIMED) и SSUSI (DMSP). Представленные примеры ВУФ-изображений иллюстрируют состояние фрагментов аврорального овала в конкретном секторе MLT или его окрестностях за 10-20 минут до измерений в эмиссиях видимого спектра с орбит КА REIMEI и e-POP, или после измерений с орбит этих КА, и/или с поверхности Земли. Панели с изображениями суммарной интенсивности эмиссий Ly- α ($\lambda 121,6$ нм (фон) и $\lambda 121,8$ нм (доплеровски сдвинутая линия, излучаемая при перезарядке высыпавшихся протонов) отображают структуру высыпаний протонов;

- т.к. интенсивности ВУФ-эмиссий и карты характеристик (см. выше), получены в относительно близкое время (в пределах одного-двух десятков минут) в близких секторах MLT, в которых были получены мелкомасштабные изображения видимых эмиссий с орбит КА Reimei и КА e-POP, это позволяет конкретные мелкомасштабные изображения эмиссий соотносить со среднемасштабными в ограниченных интервалах времени развития суббурь в пределах окрестностей секторов MLT мелкомасштабных наблюдений. Для контроля развития суббурь в каждом событии приведены панели, на которых показаны суточные развертки AE-индекса, полученные по данным с наземных магнитометрических станций станций. Моменты измерений авроральных эмиссий на них отмечены цветными вертикальными линиями.

- некоторые события рассмотрены с помощью серий наземных изображений видимых авроральных эмиссий, полученных с помощью All-sky камер или имаджерами с более узкими углами поля зрения и повышенным пространственным разрешением;

- изображения эмиссий, полученные с орбит КА REIMEI, e-POP, TIMED, DMSP, а также с поверхности Земли в большинстве примеров сопровождаются данными измерений высыпавшихся частиц, измеренных электростатическими анализаторами ESA (на орбите КА REIMEI) и SSJ5 (на орбитах конкретных КА DMSP);

- в изображениях эмиссий, полученных с КА Reimei, благодаря методике проведения экспериментов всегда присутствует позиция точки проекции магнитной силовой линии ($f.p.$) на высоте эмиссии, в момент пересечения которой измерялись энергетические характеристики потоков высыпавшихся частиц;

- некоторые из примеров одновременных наблюдений авроральных эмиссий, полученных с орбиты КА DMSP и/или поверхности Земли сопровождаются данными характеристик полярной ионосферы, полученные с помощью радарных наблюдений (EISCAT). В событии, рассмотренном в каспе над (о. Шпицберген) были использованы данные с траектории зондирующей ракеты, время запуска которой было скоординировано с наблюдениями;

2. Большинство рассмотренных примеров событий подтверждают концепцию одновременного действия нескольких механизмов ускорений высыпавшихся электронов плазменного слоя на ночной стороне, т.е. продольного электрического поля и квазистатических продольных токов; высыпаний электронов, ускоренных Альфвеновскими флуктуациями, либо резонансами на магнитных силовых линиях, или более крупномасштабными Альфвеновскими волнами, распространяющимися вниз по силовым линиям к авроральной ионосфере. Для всех этих процессов физика плазмы, управляющая потоками энергии, переносимыми высыпавшимися энергичными частицами из магнитосферы, остается предметом продолжающихся детальных исследований, и поэтому одна из мотиваций

составления аннотированного атласа в том, что он может использоваться студентами и аспирантами для анализа методик экспериментов и их дальнейшего развития.

3. Составленный атлас примеров мелко- и среднемасштабных наблюдений авроральных эмиссий в конкретных событиях в конкретных секторах MLT полярной ионосферы свидетельствует о возможностях и трудностях методической (пространство-время) координации одновременных наблюдений с разных орбит КА, траекторий зондирующих ракет и поверхности Земли особенно в условиях динамики развития авроральных суббурь.

4. Представленные в атласе примеры изображений авроральных эмиссий и характеристик плазмы, и методический опыт, полученный при их получении, могут быть использованы в дальнейшем развитии технологии подготовки и проведения готовящихся экспериментов ИКИ РАН на различных орбитах, нацеленных на исследования механизмов образования и динамики градиентов Ne в различных секторах полярной ионосферы [Кузьмин и др., 2021]. Так или иначе, все примеры отображают базовые элементы развиваемой технологии получения изображений авроральных эмиссий с низких полярных орбит, которая в перспективе развития, позволит приблизиться к лучшему пониманию деталей процессов, приводящих к градиентам Ne разных масштабов в полярной зоне ионосферы, влияющих на условия распространения трансполярных сигналов [Кузьмин и др., 2019].

ЛИТЕРАТУРА

- Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Садовский А.М., Позин А.А., Щужин Ю.А., Потанин Ю.Н., Основы перспективной методики комплексных исследований влияния авроральных характеристик полярной ионосферы на условия распространения трансполярных сигналов, Гелиогеофизические исследования, вып. 32, С.3-60, 2021.
- Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Мерзлый А.М., Петрукович А.А., Крученицкий Г.М., Баньщикова М.А., Орбитальная оптическая авроральная диагностика состояния полярной ионосферы, как часть системного контроля космической погоды // Гелиогеофизические исследования, Вып. 24, С.35-60, 2019.
- Asamura, K., Tsujita D., Tanaka H., Saito Y., Mukai T., Hirahara M., Auroral particle instrument onboard the index satellite // *Adv. Space Res.*, 32(3), 375-378, 2003, [https://doi.org/10.1016/s0273-1177\(03\)90275-4](https://doi.org/10.1016/s0273-1177(03)90275-4)
- Asamura K., Chaston C.C., Itoh Y., Fujimoto M., Sakanoi T., Ebihara Y., Yamazaki A., Hirahara M., Seki K., Kasaba Y., Okada M., Sheared flows and small-scale Alfvén wave generation in the auroral acceleration region // *Geophys. Res. Lett.*, v.36, L05105, 2009, doi:10.1029/2008GL036803
- Ashrafi M., ASK: Auroral Structure and Kinetics in action, *A&G (Astronomy & Geophysics)* • August 2007 • Vol. 48, Pp.4.35-4.37, 2007, <https://doi.org/10.1111/j.1468-4004.48435.x>
- Ashrafi M., Lanchester B.S., Lummerzheim D., Ivchenko N., Jokiah O., Modelling of N21P emission rates in aurora using various cross sections for excitation // *Ann. Geophys.*, 27, 2545–2553, 2009, www.ann-geophys.net/27/2545/2009/
- Auroral Plasma Physics, ed. by Paschmann G., Haaland S., Treumann R. // *Space Science Reviews*, v.103, No 1-4, 2002.
- Bender S., Espy P.J., Paxton L.J., Validation of SSUSI derived ionization rates and electron densities // *Annales Geophysicae, Discussion*, 2021, <https://doi.org/10.5194/angeo-2021-15>
- Carlson C.W., McFadden J.P., Ergun R.E., Temerin M., Peria W., Mozer F.S., Klumpar D.M., Shelley E.G., Peterson W.K., Moebius E., Elphic R., Srangeway R., Cattell C., Pfaff R., FAST observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating // *Geophys. Res. Lett.*, v.25, No.12, Pp.2017-2020, 1998.
- Chaston C.C., Carlson C.W., McFadden J.P., R. E. Ergun R.E., Srangeway R.J., How important are dispersive Alfvén waves for auroral particle acceleration? // *Geophys. Res. Letters.*, v. 34, L07101, 2007, doi:10.1029/2006GL029144.
- Chaston C.C., Seki K., Sakanoi T., Asamura K., Hirahara M., Motion of aurorae // *Geophys. Res. Lett.*, v.37, L08104, 2010, doi:10.1029/2009GL042117, 2010

-
- Chaston C.C., Seki K., Sakanoi T., Asamura K., Hirahara M., Carlson C.W., Cross-scale coupling in the auroral acceleration region // *Geophys. Res. Lett.*, V. 38, L20101, doi:10.1029/2011GL049185, 2011.
 - Chaston C.C., Magnetic reconnection in the auroral acceleration region // *Geophys. Res. Lett.*, V.42, P.1646–1653, 2015, doi:10.1002/2015GL063164
 - Chen L.-J., Kletzing C.A., Hu S., Bounds S., Auroral electron dispersion below inverted-V energies: Resonant deceleration and acceleration by Alfvén waves // *Journ. Geophys. Res.*, v.110, A10513, 2005, doi:10.1029/2005JA011168.
 - Christensen A.B., Paxton L.J., Avery S., Craven J., Crowley G., Humm D.C., Kil H., Meier R.R., Meng C.-I., Morrison D., Ogorzalek B.S., Straus P., Strickland D.J., Swenson R.M., Walterscheid R.L., Wolven B., Zhang Y., Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission // *Journ. Geophys. Res.* v.108, No.A12, p.1451, 2003, doi:10.1029/2003JA009918
 - 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 the e-POP Mission // *Space Sci. Rev.*, v.189, Pp.15-25, 2014, Doi: 10.1007/s11214-014-0107-x.
 - Cosby P.C., Electron-impact dissociation of oxygen // *Journ. of Chemical Physics*, v.98, p.9560-9569, 1993.
 - Dahlgren, H., B. Gustavsson, B. S. Lanchester, N. Ivchenko, U. Brøndstrøm, D. Whiter, T. Sergienko, I. Sandahl, and G. Marklund, Energy and flux variations across thin auroral arcs // *Ann. Geophys.*, V.29, 1–4, 2011, doi:10.5194/angeo-29-1-2011.
 - Dahlgren, H., Ivchenko N., Lanchester B.S., Monoenergetic high-energy electron precipitation in thin auroral filaments // *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20101, 2012, doi:10.1029/2012GL053466.
 - Dahlgren H., Semeter J.L., Marshall R.A., Zettergen M., The Optical Manifestation of Dispersive Field-Aligned Bursts in Auroral Breakup Arcs // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*, V.118, P.4572–4582, doi:10.1002/jgra.50415, 2013
 - Dahlgren H., Lanchester B.S., Ivchenko N., Whiter D.K., Electrodynamics and energy characteristics of aurora at high resolution by optical methods // *Journ. Geophys. Res.*, v.121, p.5966-5974, 2016.
 - Ding, G.-X., He F., Zhang X.-X., Chen B., A new auroral boundary determination algorithm based on observations from TIMED/GUVI and DMSP/SSUSI // *Journ. Geophys. Res. Space Physics*, v.122, p.2162–2173, 2017, doi:10.1002/2016JA023295.
 - Dombeck J., Cattell C., Prasad N., Meeker E., Hanson E., McFadden J., Identification of Auroral Electron Precipitation Mechanism Combinations and Their Relationships to Net Downgoing Energy and Number Flux // *Journal of Geophysical Research, Space Physics*, v.123, p.10,064–10,089, 2018.
 - Frey H.U., Amm O., Chaston C.C., Fu S., Haerendel G., Juusola L., Karlsson T., Lanchester B., Nakamura R., Østgaard N., Sakanoi T., Séran E., Whiter D., Weygand J., Asamura K., Hirahara M., Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc // *Journ. Geophys. Res.*, V.115, A10209, doi:10.1029/2010JA015537, 2010
 - Fukuda Y., Hirahara M., Asamura K., Sakanoi T., Miyoshi Y., Takada T., Yamazaki A., Seki K., Ebihara Y., Electron properties in inverted-V structures and their vicinities based on Reimei observations // *Journ. Geophys. Res. Space Phys.*, V.119, P.3650–3663, 2014, <https://doi.org/10.1002/2013JA018938>
 - Haerendel, G., Origin and dynamics of thin auroral arcs // *Advances in Space Research*, V.23 No.10, P.1637–1645, 1999.
 - Haerendel G., Auroral Arcs: The Fracture Theory Revisited, *Journ. Geophys. Res. Space Physics.*, 126, e2020JA028194, 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA028194>
 - Haerendel G. and Frey H., The Onset of a Substorm and the Mating Instability, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029492, 2021 <https://doi.org/10.1029/2021JA029492>
 - Hirahara M., Reimei satellite observations and coordinated studies on fine-scale auroral phenomena, Presentation in Department of Physics, College of Science, Rikkyo University, Tokyo, Japan, 2006.
 - Hwang K.-J., Lynch K.A., Newman D.L., Carlson C.W., FAST observations of downward current regions: Effect of ionospheric constraints on parallel signatures // *Journ. Geophys. Res.*, V.114, A02219, 2009, doi:10.1029/2008JA013080,

- James, H. G., Parrot, M., Berthelier, J.-J. Very-low-frequency saucers observed on DEMETER. *Journal of Geophysical Research*, 117, A09309, 2012. <https://doi.org/10.1029/2012JA017965>
- Kataoka R., Chaston Ch., Knudsen D., Lynch K.A., Lysak R.L., Song Y., Rankin R., Murase K., Sakanoi T., Semeter J., Watanabe T.-H., Whiter D., Small-Scale Dynamic Aurora // *Space Sci. Rev.*, v.217, 17, 2021, <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w>
- Keiling A., Alfvén Waves and Their Roles in the Dynamics of the Earth's Magnetotail: A Review // *Space Sci. Rev.*, 142: 73–156, 2009, DOI 10.1007/s11214-008-9463-8
- Keiling A., Thaller S., Wygant J., Dombeck J., Assessing the global Alfvén wave power flow into and out of the auroral acceleration region during geomagnetic storms // *Science Advances*, 5, eaav8411, 1-10, 2019.
- Keiling A., The Dynamics of the Alfvénic Oval, *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 219, 105616, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105616>
- Knight H.K., Galkin A., Reinisch B.W., Zhang Y., Auroral ionospheric E region parameters obtained from satellite-based far ultraviolet and ground-based ionosonde observations: 1. Data, methods, and comparisons *J Geophys Res Space Phys.* 2018 ; 123(7): 6065–6089. doi:10.1029/2017JA024822
- Knight H.K., Auroral ionospheric E region parameters obtained from satellitebased far-ultraviolet and ground-based ionosonde observations – effects of proton precipitation, *Ann. Geophys.*, 39, 105–118, 2021 <https://doi.org/10.5194/angeo-39-105-2021>
- Knudsen D.J., Burchill J.K., Buchert S.C., Eriksson A.I., Gill R., Wahlund J.-E., Åhlen L., Smith M., Moffat B., Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments // *Journ.Geophys. Res. Space Physics*, v.122, p.2655–2673, 2017, <https://doi.org/10.1002/2016JA022571>
- Luan X., Zhou Su., Dou X., Auroral Energy Flux Distribution Over the Nightside Auroral Oval Observed by the DMSP F16/SSUSI: Seasonal, Geomagnetic, and Solar Activity Dependences // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v.123, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017JA023970>
- Lysak R.L., and Song Y., Kinetic theory of the Alfvén wave acceleration of auroral electrons, *Journ. Geophys. Res.*, V. 108, No. A4, P.8005, 2003, doi:10.1029/2002JA009406
- Lysak R.L., and Song Y., Nonlocal kinetic theory of Alfvén waves on dipolar field lines // *Journ. Geophys. Res.*, V. 108, No. A8, P.1327, 2003, doi:10.1029/2003JA009859
- McMahon E.M., Comberiate J.M., Kelly M.A., Paxton L.J., 3D Ionospheric Electron Density Reconstructions and Radio Propagation Modeling Using DMSP/SSUSI, 1st AIAA 2009-3639 Atmospheric and Space Environments Conference, 22 - 25 June 2009, San Antonio, Texas, p.1-8.
- Mende S.B., Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables // *Journ. Geophys. Res. Space Phys.*, v.121, Pp.10623-10637, 2016, doi:10.1002/2016JA022558.
- Merayo, J. É., Jørgensen M.G., Friis-Christensen J.L., Brauer E., Primdahl P., Jørgensen F., Allen P.S., Denver T., The Swarm magnetometry package. In R. Sandau, H.-P. Röser, A. Valenzuela (Eds.), *Small satellites for Earth observation* (pp. 143–151). 2008, Netherlands: Springer.
- Miles D.M., Mann I.R., Pakhotin I.P., Burchill J.K., Howarth A.D., Knudsen D.J., Lysak R.L., Wallis D.D., Cogger L.L., Yau A.W., Alfvénic Dynamics and Fine Structuring of Discrete Auroral Arcs: Swarm and e-POP Observations // *Geophys. Res. Letters*, v.45, Pp. 545–555. 2018, <https://doi.org/10.1002/2017GL076051>
- Mishin E., Artificial aurora experiment and application to natural aurora // *Front. Astron. Space Sci.*, 2019, <https://doi.org/10.3389/fspas.2019.00014>
- Mottez F., The role Alfvén waves in the generation of Earth polar auroras, Published in the proceeding of "Waves and Instabilities in Space and Astrophysical Plasmas" (WISAP) Eilat, Israel, June 19th - June 24th, 2011.
- Moser C., LaBelle J., Hatch S., Moen J.I., Spicher A., Takahashi T., Kletzing C.A., Bounds S., Oksavik K., Sigernes F., Yeoman T.K., The Cusp as a VLF Saucer Source: First Rocket Observations of Long-Duration VLF Saucers on the Dayside // *Geophys. Res. Letters*, v.48, e2020GL090747, 2021, <https://doi.org/10.1029/2020GL090747>
- Moser C., LaBelle J., Hatch S., Moen J.I., Spicher A., Takahashi T., Kletzing C.A., Bounds S., Oksavik K., Sigernes F., Yeoman T.K., The Cusp as a VLF Saucer Source: First Rocket Observations of Long-Duration

- VLF Saucers on the Dayside // *Geophysical Research Letters*, V.48, e2020GL090747, <https://doi.org/10.1029/2020GL090747>
- Moser C., LaBelle J., Cairus I.H., High bandwidth measurements of auroral Langmuir waves with multiple antennas // *Ann. Geophys.*, v.40, P.231-245, 2022.
 - Motoba T., Hirahara M., High-resolution auroral acceleration signatures within a highly dynamic onset arc // *Geophys. Res. Lett.*, V.43, P.1793–1801, doi:10.1002/2015GL067580
 - Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N., Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite // *Earth Planet Space*. 2008. V.60, P.827-835.
 - Oksavik, K., Moen, J., Carlson, H., Greenwald, R., Milan, S., Lester, M., et al., Multi-instrument mapping of the small-scale flow dynamics related to a cusp auroral transient // *Annales geophysicae*, v.23, p.2657–2670, 2005.
 - Paschmann, G., Haaland, S., and Treumann, R., Auroral plasma physics, Space Science series of ISSI, V. 15, Kluwer, Dordrecht, 2003.
 - Paxton L.J., Meng Ch., Fountain G.H., Ogorzalek P.S., Darlington E.H., Gary S.A., Goldsten J.O., Kusnierkiewicz D.Y., Lee S.C., Linstrom L.A., Maynard J.J., Peacock K., Persons D.F., Smith B.E., SSUSI: Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters // *Proc. SPIE 1764. Ultraviolet Technology IV*. 161. 1993. doi:10.1117/12.140846.
 - Sakanoi T., Okano S., Obuchi Y., Kobayashi T., Ejiri M., Asamura K., Hirahara M., Development of the multi-spectral auroral camera onboard the index satellite, *Advances Space Research*, V.32, No3, P.379-384, 2003, doi:10.1016/S0273-1177(03)90276-6
 - Sakanoi K., H. Fukunishi, Kasahara Y., A possible generation mechanism of temporal and spatial structures of flickering aurora // *Journ. Geophys. Res.*, v.110, A03206, 2005, doi:10.1029/2004JA010549.
 - Sandahl I., Sergienko T., Brändström U., Fine structure of optical aurora // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, V.70, P. 2275–2292, 2008.
 - Sandahl I., Brändström U., Sergienko T., Fine structure of optical aurora // *International Journal of Remote Sensing*, V.32, No. 11, P.2947-2972, 2011. Doi:10.1080/01431161.2010.541507
 - Schroeder J. W. R., Howes G. G., Kletzing C. A., Skiff F., Carter T. A., Vincena S., Dorfman S., Laboratory measurements of the physics of auroral electron acceleration by Alfvén waves // *Nature Communications*, 12, 3103, Pp.1-9, 2021, <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23377-5>
 - Semeter J., Zettergren M., Diaz M., Mende S., Wave dispersion and the discrete aurora: New constraints derived from high-speed imagery // *Journ. Geophys. Res.*, v.113, A12208, 2008, <http://doi:10.1029/2008JA013122>
 - Schriver D., Ashour-Abdalla M., Strangeway R.J., Richar R.L., Kletzing C., Dotan Y., Wigant J., Fast/Polar conjunction study of field-aligned auroral acceleration and corresponding magnetotail drivers // *Journ. Geophys. Res.*, v.108, NoA9, 2003, doi:10.1029/2002JA009426
 - Stasiewicz K., Bellan P., Chaston C., Kletzing C., Lysak R., Maggs J., Pokhotelov O., Seyler C., Shukla P., Stenflo L., Streltsov A. Wahlund J.-E., Small scale Alfvénic structure in the aurora // *Space Science Reviews*, 92, Pp.423–533, 2000.
 - Streltsov A.V., Chang C., Labenski J., Milikh G.M., Vartanyan A., Snyder A.L., Excitation of ionospheric Alfvén resonator with HAARP // *Journ. Geophys. Res.*, v.116, A10221, Pp. 1-11, 2011.
 - Temerin, M., J. McFadden, M. Boehm, C. W. Carlson, and W. Lotko, Production of flickering aurora and field-aligned electron flux by electromagnetic ion cyclotron waves // *Journ. Geophys. Res.*, 91, A5, p.5769–5792, 1986.
 - Whiter D.K., Lanchester B.S., Gustavsson B., Ivchenko N., Sullivan J.M., Dahlgren H., Small-scale structures in flickering aurora // *Geophys. Res. Lett.*, V.35, L23103, 2008, doi:10.1029/2008GL036134
 - Whiter D.K., Lanchester B.S., Sakanoi T., Asamura K., Estimating high-energy electron fluxes by intercalibrating Reimei optical and particle measurements using an ionospheric model // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 89, Pp.8–17, 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.06.014>

- *Whiter D.K., Lanchester B.S., Gustavsson B., Jallo N.I.B., Jokiah O., Ivchenko N., Dahlgren H.*, Relative brightness of the O⁺(²D-²P) doublets in low-energy aurorae // *The Astrophysical Journal*, 797, 64, 9 pp., 2014.
- *Yago K., Shiokawa K., Yumoto K., Baishev D.G., Solovyev S.I., Rich F.J.*, Simultaneous DMSP, all-sky camera, and IMAGE FUV observations of the brightening arc at a substorm pseudo-breakup // *Earth Planet Space*, 59, Pp.45-49, 2007.
- *Ye S., LaBelle J., Yoon P.H., Weatherwax T.*, Experimental tests of the eigenmode theory of auroral roar fine structure and its application to remote sensing // *Journ. Geophys. Res.* V.112, A12304, 2007.
- *Zhang Y., Paxton L.J., Bilitza D., Doe R.* Near real-time assimilation in IRI of auroral peak E-region density and equatorward boundary // *Advances in Space Research* 46, 1055–1063, 2010.
- *Zhang Y., Paxton L.J., Bilitza D.*, Near real-time global auroral observations and their application to IRI, Presentation

ANNOTATED ATLAS OF EXAMPLES OF EMISSION IMAGES IN AURORAL STRUCTURES RECORDED BY IMAGERS AND IMAGING SPECTROGRAPHS FROM DIFFERENT ORBITS AND THE EARTH'S SURFACE. PART 1. AURORAL STRUCTURES EXCITED BY NATURAL SOURCES, INCLUDING ALFVÉNIC WAVES

Kuzmin A.K., Merslyi A.M., Nikiforov O.V., Petrukovich A.A., Sadovsky A.M., Sokolov A.D., Potanin Yu.N., Yanakov A.T.

An annotated atlas was compiled from specific examples of auroral images and measurements of charged particle fluxes in the polar ionosphere, obtained by different instruments from spacecraft orbits and the Earth's surface, in events that occurred mainly under geomagnetically disturbed conditions of substorms in the different sectors of the MLT. Each example, as well as the characteristics of the devices, are described in the text and illustrated with combined drawings based on those adapted from a number of works (links in the text). The motivation for this work was to analyze the experience of developing the technology for preparing and conducting complex experiments in spacecraft orbits (including small spacecraft, sounding rockets and the Earth's surface), aimed at studying diverse auroral phenomena in the polar ionosphere, reflected in *Ne* gradients in various layers of the ionosphere, which are the main sources of problems in the propagation of transpolar signals. The atlas is mainly focused on the results of observations of auroral emissions, both in the visible region of the spectrum and in the vacuum ultraviolet region, obtained using orbital and ground-based imaging cameras, and imaging spectrographs, as well as precipitating particle flux spectrometers operating in relatively low polar orbits. All presented examples of small-scale auroral structures were chosen based on the condition that they were excited by precipitating electrons of the plasma sheet on the night side of the oval or in the daytime cusp, accelerated processes in the near magnetosphere, including Alfvén waves and their fluctuations and resonances, and/or longitudinal electric fields and quasi-static field-aligned currents propagating down field lines towards the auroral ionosphere.

KEYWORDS: ATLAS, POLAR IONOSPHERE, IRREGULARITY SCALES, AURORAL EMISSIONS, AURORAL IMAGERS, ORBITAL DIAGNOSTICS, METHODOLOGY FOR CONTROL OF THE STATE OF CHARACTERISTICS, PROPAGATION CONDITIONS OF TRANSPOLAR SIGNALS