



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 2. АВРОРАЛЬНЫЕ И АВРОРА-ПОДОБНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВОЗБУЖДЕННЫЕ ПРИРОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ, ВКЛЮЧАЯ ВОЛНЫ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ

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

В продолжение работы, начатой в 2022 г, составлена часть 2 аннотированного атласа примеров изображений структур эмиссий и характеристик плазмы в авроральном овале и субавроральной области во время событий, происходивших в разных секторах MLT в основном в геомагнитно-возмущенных условиях суббурь. Мотивацией создания атласа стал дальнейший анализ опыта развития технологии подготовки и проведения комплексных экспериментов, нацеленных на создание системы картографирования и диагностики многообразных динамичных авроральных явлений в полярной ионосфере, отражающихся в мгновенном поле градиентов Ne в различных высотных слоях, являющихся основными «виновниками» проблем при распространении трансполярных сигналов. Как и часть 1, эта работа в основном акцентирована на результатах наблюдений авроральных эмиссий, полученных с помощью изображающих камер с поверхности Земли и с орбит КА с полярным углом наклона плоскости. Большинство представленных примеров конкретных авроральных и аврора-подобных структур, сопровождаются среднemasштабными изображениями частей аврорального овала и полярной шапки в разных секторах MLT, полученными в относительно близкое к рассматриваемым событиям время с орбит конкретных КА DMSP в авроральных эмиссиях в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) с помощью сканирующих по пространству изображающих спектрографов SSUSI, а также его «предшественника» GUVI на орбите КА TIMED. Некоторые примеры также сопровождаются результатами сопутствующих измерений распределений характеристик потоков высыпающихся частиц (анализатор SSJ), градиентов магнитного поля и результатах локальных наблюдений градиентов Ne радаром некогерентного обратного рассеяния в соответствующих секторах полярной ионосферы в близкое к событиям время. В части 1 [Кузьмин и др., 2022] был рассмотрен ряд примеров авроральных структур, включая пульсирующие, возбуждение которых связано с процессами увеличения энергии высыпающихся электронов Альфвеновскими волнами в ближней магнитосфере, и их флуктуациями и резонансами, а также продольными электрическими полями, и продольными токами, текущими вдоль силовых линий в этих областях. В данной работе **первая** глава посвящена примеру локальной реакции ионосферы на интенсификацию полярных сияний на полярной границе овала, известной как PBI (poleward boundary intensification) [Lyons et al., 2002]. Этот пример сопровождается данными радара некогерентного рассеяния (ISR Incoherent scatter radar) и оптических приборов в Sondrestrom, Гренландия в сочетании с орбитальными измерениями с орбит КА IMAGE и FAST. **Вторая** глава посвящена особенностям

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/ukcczn>

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»

129128; Россия, Москва

ул. Ростокинская, 9.

e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

относительно редко встречающегося типа динамических авроральных лучевых структур, называемых «пылающими полярными сияниями» (flaming aurora), возбуждаемых высыпаниями авроральных электронов разных энергий и характеристикам, сопутствующих им, естественно усиленных ионно-акустических линий NEIAL (naturally enhanced ion-acoustic lines), наблюдаемых в областях лучевых структур при отражениях (эхо) сигналов радаров некогерентного обратного рассеяния на разных высотах магнитных силовых линий; в **третьей** главе рассмотрены примеры характеристик некоторых аврора-подобных фрагментированных структур и их особенностей, названных авторами их исследователей FAEs (Fragmented Aurora-like Emissions), наблюдаемых на полярной стороне аврорального овала; в **четвертой** главе: анализируются примеры и особенности структур STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement), и часто сопровождающих их мелкомасштабных структур PF (Picket Fence), наблюдаемых в субавроральной области на фазе восстановления. К генерации почти всех рассмотренных структур причастны волны различных типов или их турбулентность. Анализ особенностей и характеристик FAEs таких как: “Lumikot” [McKay et al., 2019]; “Dunes” [Palmroth et al., 2020] и ряд других предполагается рассмотреть в следующей части работы.

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

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АТЛАС, АВРОРАЛЬНЫЕ И АВРОРА-ПОДОБНЫЕ СТРУКТУРЫ ЭМИССИЙ, НЕОДНОРОДНОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ОРБИТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА, АВРОРАЛЬНЫЕ ИМАДЖЕРЫ, ПОЛЯРНАЯ ИОНОСФЕРА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ, ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, НАЦЕЛЕННЫХ НА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУР ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_15

<https://elibrary.ru/ukcczn>

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие авроральных исследований продолжается. Этот процесс не только связан с развитием теории и с моделированием процессов, совершенствованием методик проведения экспериментов и улучшением характеристик плазменных и оптических инструментов для наблюдений, но и стимулируется всё большим пониманием важности информации о мгновенных состояниях полярной ионосферы (как в глобальном, так и в локальных масштабах) в различных геомагнитных условиях во всех секторах MLT и в конкретных областях. Информация о многообразных процессах, происходящих в магнитосферно-ионосферной системе, приводящих, в конечном счете, к полярным сияниям, должна включать вариации интенсивности в структурах авроральных эмиссий в разных масштабах одновременно, что в будущем наверняка приведет к дальнейшему развитию технологии наблюдений и увеличению точности краткосрочных прогнозов состояния полярной ионосферы в ее конкретных областях. Возможно, таким примером в будущем будут результаты экспериментов ИКИ РАН с авроральными имаджерами, которые предполагается использовать для наблюдений авроральных структур с орбиты типа Молния (весь авроральный овал) и с орбиты российской орбитальной станции, которая, как предполагается, будет работать на орбите с полярным углом наклона ее плоскости к плоскости экватора (фрагменты аврорального овала в разных секторах MLT).

В дополнение к введению в части I (см. [Кузьмин и др., 2022]) добавлены несколько аспектов, касающихся роли изображений авроральных эмиссий в анализе состояния условий в полярной ионосфере и конкретных явлений на разных этапах развития суббурь. Хотя теоретическое обоснование глобальной и мезомасштабной изменчивости авроры и движущие ими механизмы в солнечном ветре и магнитосфере значительно развито, физические процессы, приводящие к авроральным и аврора-подобным структурам декаметрового масштаба и активным формам полярных сияний, остаются недостаточно исследованными и неполно описанными [Semeter et al., 2008; Dahlgren et al., 2012; Hirsch et al., 2015; Palmroth et al., 2020; Semeter et al., 2020; Whiter et al., 2021; Dreyer et al., 2021; Nishimura et al., 2023]. Энергетические распределения высыпающихся электронов в различных мелкомасштабных авроральных структурах, полученные с орбит КА, позволяют приблизиться к пониманию механизмов их ускорения, которые «работают» в ближней магнитосфере и над ионосферой. Информация о характеристиках потоков электронов и их изменениях в пространстве и времени может быть получена как в окрестности КА в конкретной магнитной силовой трубке на конкретной высоте с помощью электростатических анализаторов, так и дистанционно из изображений конкретных авроральных эмиссий [Rees, 1989; Strickland et al., 1983; Иванов и Козелов, 2001], наблюдаемых с поверхности Земли и с орбит КА с разным разрешением в зависимости от высоты и характеристик аппаратуры.

Одновременные изображения конкретных эмиссий, полученные в конкретных длинах волн в различных диапазонах в глобальном и локальных масштабах обеспечивают возможности для изучения взаимосвязи между входящим потоком энергии электронов и их средней энергией, и распределением интенсивности эмиссий в конкретных авроральных структурах в плоскости перпендикулярной магнитным силовым линиям [Semeter et al., 2001; Dalhgren et al., 2008].

Формально к авроральным структурам геофизики всегда относили структуры, вытянутые вдоль силовых линий магнитного поля и сопряженные с областью источника высыпающихся частиц. Фотографии и рисунки, сделанные учеными-пионерами авроральных исследований, начиная ещё с 30х годов прошлого века (например, C.Størmer) [Hunnekuhl et al., 2020], а также современными фотографами-любителями северной экзотики демонстрируют, что в полярных областях бывают условия, когда наблюдаются структуры эмиссий, которые «сопровождают» авроральные дуги, но не «связаны» с магнитным полем. Механизмы, приводящие к генерации таких структур, только начинают исследоваться [Whiter et al., 2021]. Аврора-подобные (aurora-like) структуры образуют разные фрагментированные формы, иногда с регулярными расстояниями между ними. Чаще всего они дрейфуют с постоянной скоростью, демонстрируют внутреннюю динамику, возможно не связанную с авророй, и, как правило, локализованы в местах повышенных электронной и ионной температур, отслеживаемых радарными некогерентного рассеяния.

Все авроральные и аврора-подобные структуры, так или иначе, отображают процессы динамики магнитосферы в областях ее проецирования в полярную ионосферу и верхнюю атмосферу, а мелкомасштабные – отображают еще и процессы околоземной электродинамики и генерации неустойчивостей и волн в плазме. Поэтому исследователи механизмов интенсификаций структур, включая мелкомасштабные, в авроральном овале и на его полярной и экваториальной границах, продолжают сосредотачивать свое внимание как на процессах, лежащих в основе магнитосферной динамики, так и на процессах реакции ионосферы и верхней атмосферы на них.

При анализе причинно-следственной цепочки, связывающей энергетические спектры частиц с наблюдаемыми картинками ионизации, используются результаты наблюдений широтно-узких плазменных усилений, простирающихся из нижней области E через область F, в том числе, на полярной границе овала, проводимых с помощью радаров некогерентного рассеяния. Например, в нитевидных (filamentary) структурах наблюдаются одни из самых больших горизонтальных градиентов интенсивности конкретных эмиссий и электронной концентрации, наблюдаемых где-либо в ионосфере. Наличие этих градиентов в областях влияния Альфвеновских волн отражает электродинамическую связь между магнитосферой и ионосферой [Semeter et al., 2005]. Одно из следствий, выведенных в указанной работе, касается оптической морфологии дуг PBI (poleward boundary intensifications) по сравнению с авроральными структурами, наблюдаемыми во время брейкапа (распада) суббури. Дуги PBI часто больше похожи на лучи (см., например, рис. 1, адаптированный из [Semeter et al., 2005]), что проявляется в более цилиндрических формах ионизации, в которых горизонтальные градиенты проводимости могут быть значительными в любом направлении, включая направление $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$. В этом направлении они неустойчивы к градиентному дрейфу. При этом, столбцы ионизации (см. например рис. 3) могут каскадно переходить в структуры меньшего масштаба вследствие неустойчивой геометрии ионизации [Dugrud et al., 2004].

Как уже упоминалось в части 1 статьи [Кузьмин и др., 2022], анализ данных измерений в области структур дискретной авроры в условиях брейкапа показывает, что явление не турбулентное или хаотичное, а, скорее, имеет лежащую в основе пространственно-временную когерентность. Результаты регулярных наблюдений постоянно добавляют новые доказательства того, что дисперсия Альфвеновских волн играет важнейшую роль в структурировании аврорального потока частиц и особенно на 100-метровых масштабах [Semeter et al., 2008, Kataoka et al., 2021].

В связи с дальнейшим увеличением пространственного и временного разрешения и пороговой чувствительности изображающих приборов во второй-третьей декадах 21 века увеличилось внимание к экспериментам, в которых проводятся наблюдения не только непосредственно авроральных структур, возбуждаемых высыпающимися электронами разных энергий, но и сопутствующих им аврора-подобных (aurora-like) мелкомасштабных структур, возбуждаемых электростатическими ионно-циклотронными волнами (EIC electrostatic ion cyclotron waves) [Chernyshov et al., 2016; Whiter et al., 2021]; коллапсирующими волнами Ленгмюра [Akbari et al., 2021; Michell et al., 2013, 2014]; и/или волнами Фарлей-Бунемана (Farley-Buneman) в ионосферной плазме [Whiter et al., 2021].

Наиболее сложными и недоисследованными механизмами и процессами до сих пор остаются процессы генерации аврора-подобной дуги STEVE и сопутствующих ей структур PF и других фрагментированных структур.

2. ПРИМЕР ИНТЕНСИФИКАЦИИ АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУР, И СОПУТСТВУЮЩИХ ГРАДИЕНТОВ N_e , НАБЛЮДАВШИХСЯ НА ПОЛЯРНОЙ ГРАНИЦЕ ОВАЛА PBIS (POLAR BOUNDARY INTENSIFICATIONS) ПРИ ВЫСЫПАНИЯХ ЭЛЕКТРОНОВ, УСКОРЕННЫХ ВОЛНАМИ

Коротко о *PBIs*. В периоды продолжительной магнитосферной активности овал полярных сияний на ночной стороне часто приобретает двойную конфигурацию с широтно-узкой полосой, разграничивающей границу замкнутых и незамкнутых линий магнитного поля, и более широкой диффузной полосой, наблюдаемой на юге. Полоса, обращенная к полюсу, может состоять из периодических усилений, напоминающих жемчужины на нитке или ‘серпантины’, которые иногда охватывают всю ширину аврорального овала [Henderson et al., 1998].

Хотя рассматриваемым далее в этой главе результатам уже более 15 лет [Semeter et al., 2005], мы выбрали их, потому что предыдущие исследования усилений полярных сияний на приполюсной границе были сосредоточены почти исключительно на лежащей в основе магнитосферной динамике, а в работе [Semeter et al., 2005] они сфокусированы на реакции ионосферы на эти авроральные структуры для того, чтобы продемонстрировать, как более предпочтительно строить технологию комплексных измерений, нацеленных на исследования авроральных структур (в данном случае *PBIs* / Polar Boundary Intensifications), название которых впервые появилось в [Lyons et al., 2002, и ссылки в ней]. В рассматриваемой работе *PBIs* наблюдались 20-11-2001 на полярной границе северного аврорального овала. В анализе данных эксперимента [Semeter et al., 2005] использовали: авроральные изображения, полученные с поверхности Земли: (ASI /all-sky imager/ и сканирующий фотометр в ближней инфракрасной области), расположенные в исследовательском центре верхних слоев атмосферы Sondrestrom, Гренландия; крупномасштабные ВУФ-изображения аврорального овала, полученные с орбиты КА IMAGE; данные характеристик плазмы, полученные в близкое время с орбиты КА FAST (Electron ESA Spectrometer/анализатор EES/) и изображения распределений N_e , полученные одновременно с помощью радара некогерентного рассеяния ISR (Incoherent Scatter Radar). С точки зрения развития технологии наблюдений для анализа данных *PBIs* и сопутствующих им авроральных структур это был передовой (на тот период времени) эксперимент, но для исследований деталей структур, а следовательно и мелкомасштабных процессов в контексте мультимасштабных, не хватало изображений авроральных эмиссий с разрешением ~50-100 м/пиксель, таких как позднее получались с полярной орбиты малого КА INDEX (Innovative Technology Demonstration Experiment), названного REIMEI, с установленным на его борту мультиспектральным авроральным имаджером MAC [Sakanoi et al., 2003; Motoba and Hirahara, 2016], который был запущен только в 2005 г.

2.1. Анализ события PBIS 20-11-2001, рассмотренного в [Semeter et al., 2005].

На верхней панели рис.1 показана серия из четырех последовательных ВУФ-изображений аврорального овала, полученных 20-11-2001 в интервале с 00.59.40 по 01.05.48 UT с орбиты КА IMAGE с помощью изображающей камеры WIC, характеристики которой изложены в [Mende et al., 2000]. На каждом изображении красными стрелками указано расположение Исследовательского центра верхних слоев атмосферы Sondrestrom (Гренландия). Шкала интенсивности показана цветом под изображениями в относительных единицах от 0 до 2000. Под ними показана вторая панель из 24 последовательных черно-белых изображений, полученных с All-sky камеры (ASI) с интервалом 15 сек в течение периода с 01.00.15 по 01.06.15 UT. Они отображают динамику развития авроральных структур над Sondrestrom. Оптическая схема камеры включала встроенный стеклянный фильтр, отсекающий излучение с длинами волн < 640 нм, и поэтому была настроена на короткоживущие эмиссии N_2 1PG, являющиеся индикатором высыпающихся электронов. Камера была установлена в исследовательском центре Sondrestrom (Sondrestrom Upper Atmospheric Research Facility). Обратим внимание, что all-sky изображения отображались в системе координат, основанной на горизонте, т. е., где восток и запад меняются местами по сравнению с компасом. На нижней левой панели рис.1 показан AE-индекс для 20 ноября 2001 г., а на правой нижней панели показаны данные, полученные

анализатором спектров высыпающих частиц SSJ, установленном на КА DMSP F15, в интервале с 00.57 ÷ 01.27 UT.

На верхней панели рис. 2 приведено увеличенное изображение участка аврорального овала, полученное с КА IMAGE, на котором нанесен участок проекции орбиты КА FAST с 01.45 по 01.49 UT [Chaston et al., 2002]. Поле зрения all-sky камеры на высоте эмиссии в Sondrestrom на верхней панели показано белым кружком. Пространственное разрешение ВУФ-изображений на рис. 1 и 2 составляло примерно 100×100 км/пиксель. На второй панели сверху рис. 2 показаны энергетические спектрограммы электронов, полученные на орбите КА FAST (анализатор EES) в трех направлениях к магнитному полю. На трех нижних панелях рис. 2 показаны (слева-направо): **а)** три спектра электронов, зарегистрированных анализатором EES в «моменты» времени, указанные красными стрелками на спектрограмме (вторая панель сверху); **б)** профили ионной продукции, рассчитанные из уравнения (11) в [Semeter et al., 2005] в соответствии с моделью [Semeter and Kamalabadi, 2005]; **с)** четыре профиля N_e , рассчитанные в интервале с 3 по 180 сек, отсчитывая от левой красной стрелки, на средней панели.

На рисунке 3 на большой верхней панели показаны 20 малых панелей цветных изображений N_e (в координатах высота-расстояние), визуализированных после получения с помощью некогерентного радара обратного рассеяния ISR (Sondrestrom, Greenland, Incoherent Scatter Radar), который сканировал вдоль магнитного меридиана с 00.33.20 по 01.12.12 UT. Изображение N_e , которое получено в интервале 01.01.56÷01.03.57 UT, показано ниже (слева). Величина N_e маркирована цветом в шкале, приведенной ниже. Данные были обработаны путем интегрирования по времени в течение 5 с и двух различных интегрирований по дальности: 1,5 км ниже 150 км и 10 км выше 150 км. Стрелка внизу справа на каждой малой панели указывает направление сканирования. На правой нижней панели рис. 3 показана спектральная развертка эмиссий в ближнем инфракрасном интервале (λ 720÷840 нм), полученная с помощью сканирующего фотометра, установленного в центре исследований Sondrestrom, в интервале с 00.56.55 по 01.11.29 UT. Спектры были получены с 2х-минутной экспозицией. Интегральная интенсивность мультиплета O^+ 732-733 нм и излучения OI 844,6 нм указаны на рисунке. Интенсивность эмиссии OI 844,6 нм на этих графиках была уменьшена в 10 раз для целей отображения.

Резюме. **а)** Рассмотрен пример динамического отклика ионосферы на усиление на приполюсной границе РВІ в событии 20-11-2001 над исследовательским центром верхних слоев атмосферы Sondrestrom, проанализированный в [Semeter et al., 2005]. Из спектрограммы электронов (рис. 2), полученной с орбиты КА FAST видно, что в высыпаниях электронов прослеживается более мелкий масштаб структур. Данные радара ISR и сканирующего фотометра свидетельствуют об обнаружении узких вытянутых по полю столбиков с увеличенной концентрацией в плазме, которые согласуются с фотометрическими измерениями образования ионов, и совокупными измерениями вытянутых по полю электронных всплесков на орбите КА FAST в непосредственной близости; **б)** Дуги РВІ больше похожи на лучи, что приводит к возможности образования более цилиндрических форм ионизации. Это означает, что горизонтальные градиенты проводимости могли быть большими в любом направлении, включая направление $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, и поэтому могли быть неустойчивыми для градиентного дрейфа, а столбцы ионизации (в данных ISR) могли каскадно переходить в структуры меньшего масштаба вследствие нестабильной геометрии ионизации (см. [Dyrud et al., 2004]); **в)** С точки зрения технологии рассмотренного комплексного эксперимента в Sondrestrom в будущем было бы интересным дополнить подобные исследования координированными орбитальными мелкомасштабными наблюдениями авроральных эмиссий, таких как проводились после 2005 г. с помощью имаджера MAC, с орбиты КА REIMEI (INDEX), активный режим ориентации которого позволял всегда «видеть» в изображениях эмиссий проекцию подножной точки м.с.л. (*f.p.*), пересекаемой КА в момент экспозиции [Motoba and Higahara, 2016]. Некоторые примеры таких мелкомасштабных изображений авроральных эмиссий, полученные MAC с орбиты КА REIMEI, были рассмотрены в части 1 [Кузьмин и др., 2022].

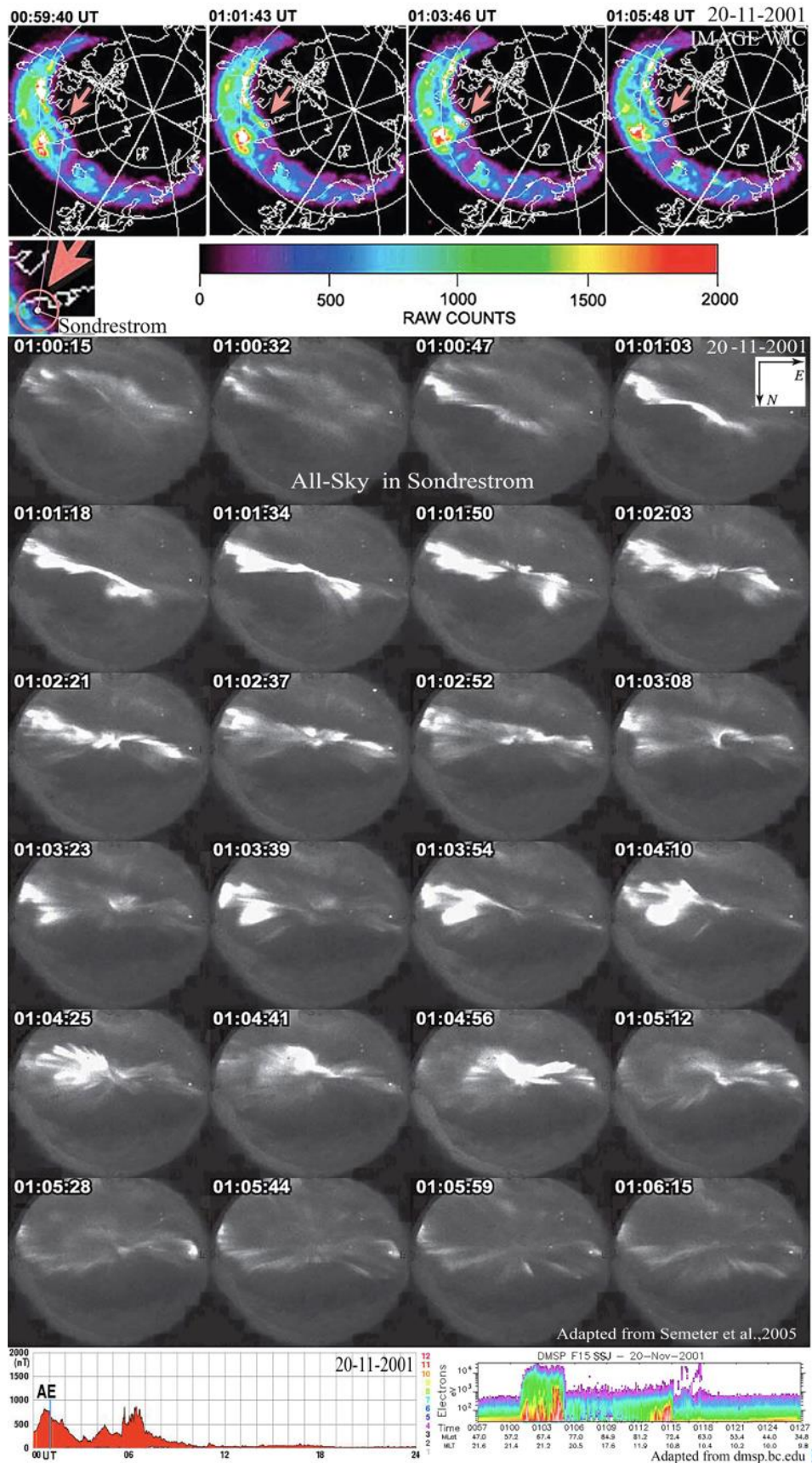


Рис. 1. На верхней панели приведены 4 последовательных изображения ВУФ-эмиссий в авроральном овале, полученных 20-11-2001 с помощью изображающей камеры WIC в интервале 00.59.40÷01.05.48 UT с орбиты КА IMAGE. Позиция исследовательского центра Sondrestrom (Sondrestrom Upper Atmospheric Research Facility) показана красной стрелкой на каждом изображении. На второй панели сверху показана серия All-sky авроральных изображений, полученных в интервале 01.00.15÷01.06.15 UT, в короткоживущих эмиссиях первой положительной системы N₂ (1PG). На нижней левой панели показан AE-индекс для 20 ноября 2001 г., а на правой нижней панели показаны данные в интервале с 00.57÷01.27 UT, полученные с помощью анализатора спектров высыпающейся части электронов (SSJ), установленном на КА DMSPF15.

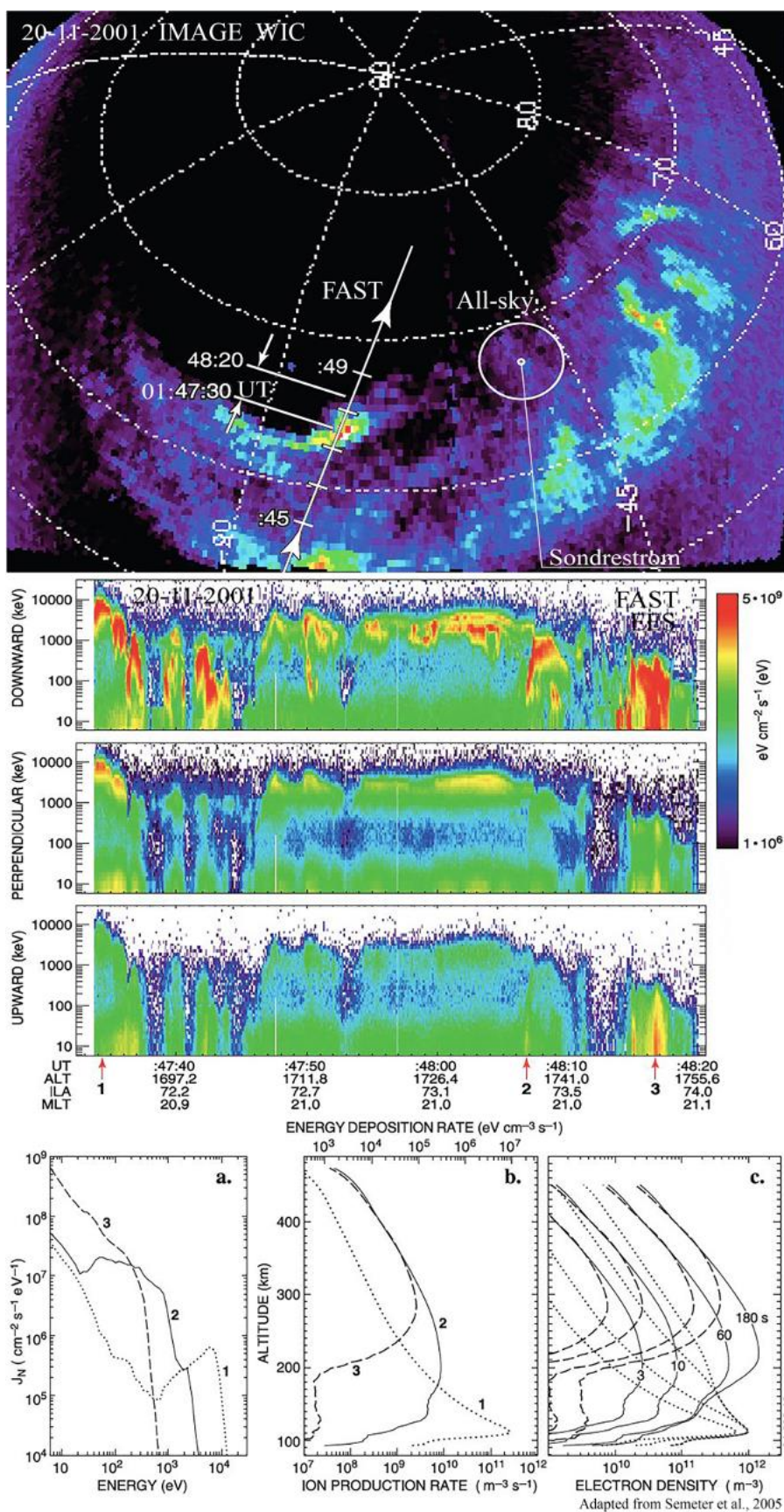


Рис. 2. На верхней панели приведено изображение значительной части аврорального овала, полученное 20-11-2001 с орбиты КА IMAGE, на которое нанесен участок проекции орбиты КА FAST, а также белым кружком помечена позиция проекции поля зрения (на высоте эмиссии) all-sky камеры, установленной в исследовательском центре Sondrestrom вблизи радара некогерентного рассеяния ISR

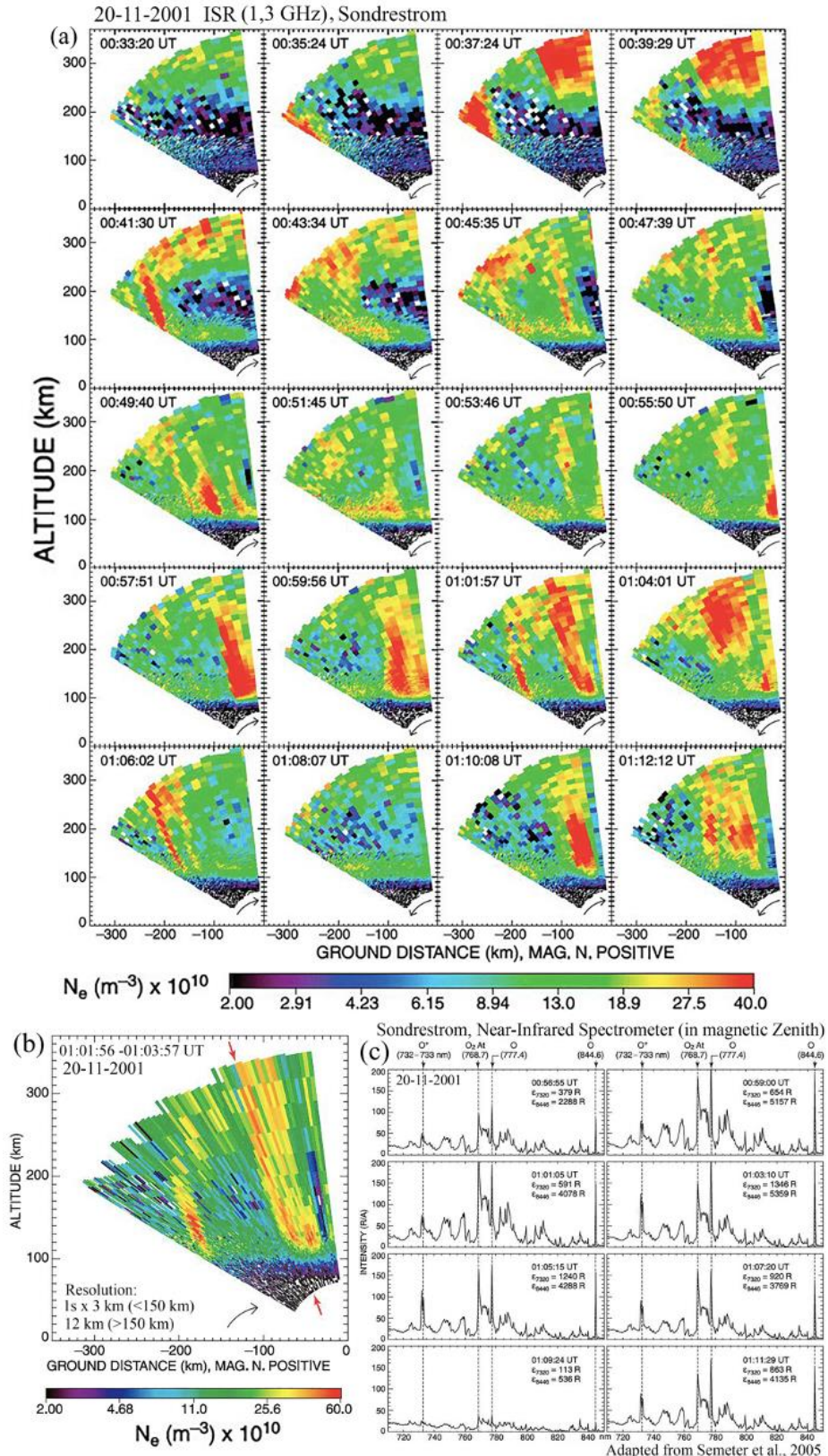


Рис. 3. На панелях показаны: **a)** 20 последовательных распределений N_e , полученных 20-11-2001 с 00.33.20 по 01.12.12. UT при сканировании высот лучами радара некогерентного рассеяния ISR в координатах: расстояние в км (горизонтальная ось) и высота в км (вертикальная ось); **b)** распределение N_e , проинтегрированное в интервале 00.01.56 ÷ 01.03.57 UT; **c)** спектральные развертки интенсивностей эмиссий сканирующим фотометром в ближней инфракрасной области, установленном в исследовательском центре Sondrestrom вблизи радара некогерентного рассеяния ISR

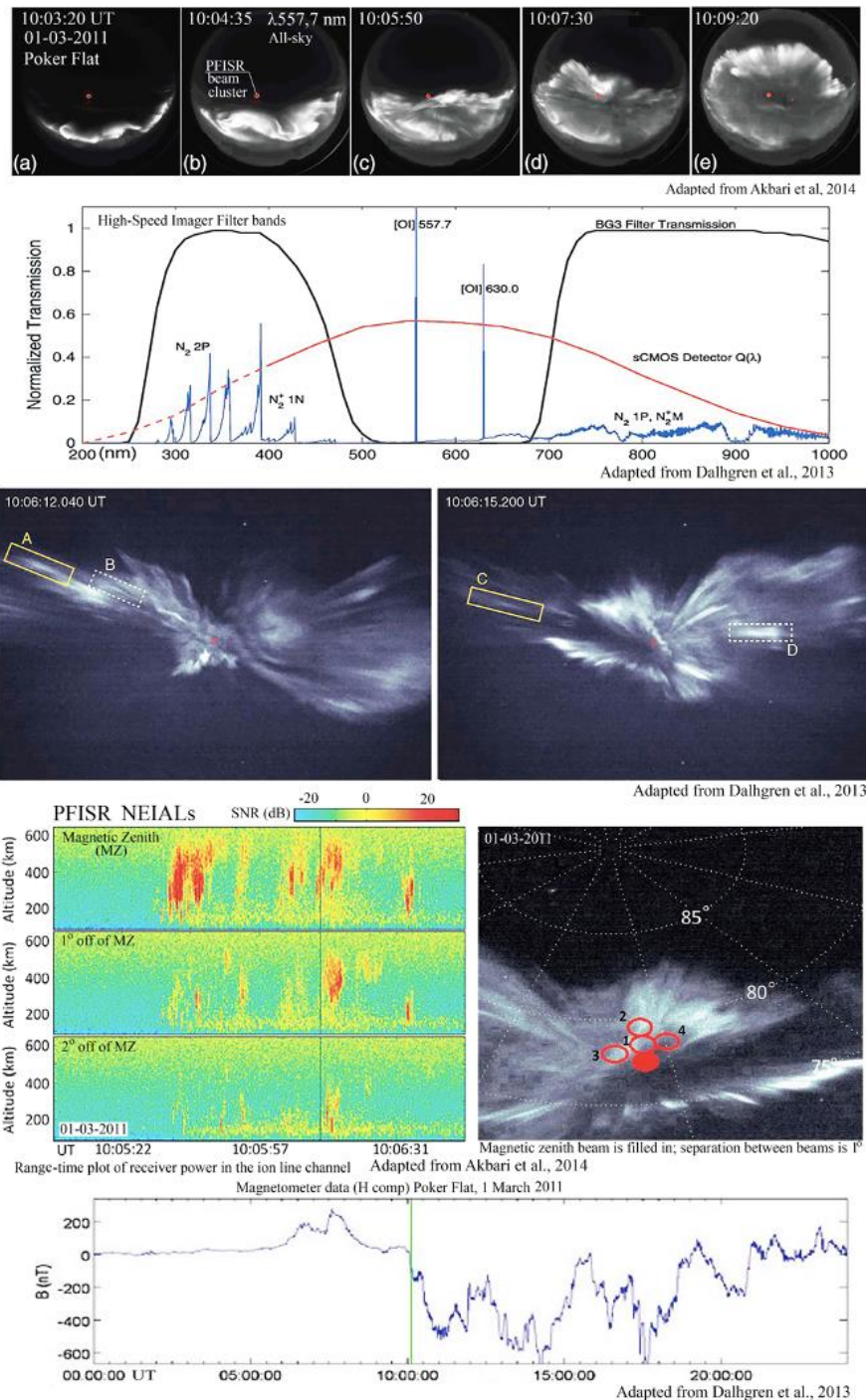


Рис. 4. На средней панели изображения, отмеченные (A, B и C, D) четырех «пылающих» лучей, получены 01-03-2011 в 10.03÷10.06 UT в Science Operations Center at Poker Flat Research Range с помощью высокоскоростного имаджера с полем зрения $33^\circ \times 29^\circ$, с разрешением 30 м на высоте 120 км [Dahlgren et al., 2013; Akbari and Semeter, 2014]. Большинство лучей испытывали движения похожие на пламя в момент наблюдений, и эти события были выбраны для детального изучения в контексте событий эхо сигналов (лучей) радара PFISR вблизи магнитного зенита. На верхней панели показаны 5 последовательных изображений all-sky камеры в Poker Flat. На второй снизу панели слева высотное распределение принятой энергии эхо-сигнала в канале ионной линии для трех лучей радара в период, когда расширение суббури пересекало конфигурацию отраженных (эхо) лучей радара PFISR для магнитного зенита и двух углов от него (1° и 2°). Вертикальной линией отмечено время, когда было получено изображение с элементами структуры, обведенными маленькими прямоугольниками «A» и «B» над ним. Примеры оптических элементов, обозначенных как «A» и «B», показывают движение «пламени» flaming aurora в радиальном направлении относительно маленького красного кружка, которым отмечено положение магнитного зенита над Poker Flat, Аляска [Akbari et al., 2021]. Справа изображение областей с нанесенными проекциями лучей PFISR для магнитного зенита (красное пятно) и 1, 2, 3 и 4 градусов от зенита

3. ПРИМЕРЫ «ПЫЛАЮЩИХ» СТРУКТУР ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ (FLAMING AURORA) И РЯД ПРИМЕРОВ СОПУТСТВУЮЩИХ ИМ ОТРАЖЕННЫХ (ЭХО) СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНЫХ РАДАРОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ИОНОСФЕРЕ

3.1. Характеристики структуры «пылающих» полярных сияний 01 - 03 - 2011

В Международном атласе полярных сияний [International auroral atlas, 1963 г.] «пылающими» были названы пульсирующие полярные сияния типа p2, когда локальные структуры, освещенные всплесками яркости, движутся вверх вдоль направления магнитного поля, и таким образом, кажутся сходящимися в магнитном зените. Если электроны различных энергий одновременно «стартуют» из точки на силовой линии магнитного поля и движутся в верхнюю атмосферу и ионосферу, то может возникать эффект пламени. Частицы с более высокой энергией, прибывающие раньше, будут увеличивать интенсивность свечения на более низкой высоте, чем частицы с более низкой энергией. Измерение результирующей скорости «движения пламени» дает возможность зафиксировать положение точки старта электронов [Cresswell, 1969]. В этой работе впервые были опубликованы негативы четырех из пяти последовательных кадров, показывающих пример «пылающего» сияния 16 февраля 1967 года. Мы их не приводим в данной работе, но отметим, что чувствительность пленки позволяла использовать скорость съемки ~ 30 кадров/сек. Нижняя часть возникшего луча, а затем «двигавшегося» вверх с отметки $56,8^\circ$ ш. до $58,5^\circ$ ш., была отмечена стрелкой на каждом из кадров. При принятой начальной высоте нижней границы 100 км скорость движения «пламени» составила $\sim 70 \pm 9$ км/сек.

В [Omholt, 1971] «пылающее» полярное сияние было определено как видимое «восходящее» движение локализованных участков полярных сияний вдоль магнитных силовых линий, которое является оптическим проявлением направленных по полю дисперсионных электронных всплесков, когда поток более высокоэнергичных электронов первым достигает ионосферы в условиях брейкпапа, отдавая энергию на более низких высотах, и за которыми следуют менее энергичные электроны, которые отдают энергию на больших высотах.

Примеры изображений структур flaming aurora приведены на рис. 4. На верхней панели показана серия из 5 изображений в эмиссии $\lambda 557,7$ нм [OI] (с 10.03.20 до 10.09.20 UT), полученных в исследовательском центре (T. Neil Davis Science Operations Center at Poker Flat Research Range, Аляска) с all-sky камеры 01-03-2011 [Akbari et al., 2014]. На третьей панели сверху показаны 2 изображения, которые были получены 01-03-2011 там же в интервале 10.03÷10.06 UT с помощью имаджера с полем зрения $33^\circ \times 29^\circ$. В схему этого имаджера был встроен стеклянный фильтр BG3, ограничивающий полосу пропускания (она показана на второй панели сверху рис. 4) так, чтобы максимально ослабить имеющие относительно большое время жизни кислородные эмиссии $\lambda 557,7$ и $\lambda 630,0$ нм, до попадания на детектор изображения. На этой же панели показана зависимость квантовой эффективности sCMOS матрицы (2560x2160 пикселей) от длины волны. Пропускались только короткоживущие эмиссии N_2 2PG и N_2^+ 1NG, которые практически мгновенно возбуждаются при высыпаниях электронов, и имеют время жизни несколько десятков наносекунд. Эти два изображения (левое и правое) получены с интервалом 3 сек. (в 10.06.12 и 10.06.15 UT) [Dalhgren et al., 2013]. Большинство лучей в этих изображениях, включая фрагменты A, B и C, D, испытывали движения похожие на пламя в момент наблюдений, и именно эти 4 фрагмента были выбраны для детального изучения в контексте событий эхо сигналов при сопутствующих измерениях радаром PFISR (Poker Flat Incoherent Scatter Radar) вблизи магнитного зенита [Akbari et al., 2014]. Красные точки в изображениях показывают позицию локального магнитного зенита.

Самые узкие яркие структуры, измеренные в магнитном зените, имеют ширину, перпендикулярную к магнитному полю величиной всего ~ 200 м. Одновременно можно видеть расширенные лучи в зените, в которых присутствуют пылающие flaming структуры, сходящимися к центру из-за воспринимаемого как движение излучения вверх вдоль магнитного поля. Эти изображения, полученные камерой через 3 мин после начала расширения суббури (магнитограмма в Poker Flat показана на нижней панели рис. 4), свидетельствуют о динамике в мелкомасштабной авроральной структуре. На верхней панели представлено 5 последовательных изображений с all-sky камеры (a,b,c,d,e) в кислородной эмиссии $\lambda 557,7$ нм, полученных в интервале 10.03.20÷10.09.20 UT 01-03-2011. Красными точками отмечены места направления луча радара PFISR в Poker Flat. На второй

панели снизу слева показано высотное распределение отраженного (эхо) сигнала радара PFISR в интервале 10.05÷10.07 UT для магнитного зенита и двух углов от него (1° и 2°). Справа на изображении «flaming aurora» нанесены области проекций лучей радара в зенит (красный маленький кружочек). Высотное распределение отраженных (эхо) сигналов радара PFISR для магнитного зенита и двух углов от него (1° и 2°) показано на второй панели снизу (слева), а справа изображение областей с нанесенными проекциями лучей PFISR для магнитного зенита (красное пятно), и для углов 1,2,3 и 4 градуса от зенита (красные кружки).

3.2. Примеры событий структурированных отраженных (эхо) сигналов радаров некогерентного рассеяния (ISR), называемых NEIAL, в областях «пылающих» (flaming) и корона-подобных авроральных структур

3.2.1. Что такое структура NEIALs и какие условия приводят к их возникновению?

Одно из ионосферных явлений, имеющих отношение к авроральным структурам, рассмотренным выше, это «Naturally Enhanced Ion Acoustic Lines (NEIALs)». NEIALs - явление структурированных отраженных (эхо) сигналов, наблюдаемых при анализе данных с радаров некогерентного рассеяния (ISR) при направлении в область магнитного зенита в полярных областях, и, в частности в областях «пылающих» (flaming) и корона-подобных авроральных структур [Michell and Samara, 2010]. Оно отображается во внезапном усилении двух ионно-акустических максимумов (их чаще называют «плечами») в отраженном спектре ISR (см. [Groves et al., 1991; Rietveld et al., 1991; Forme, 1993, 1999]). В высоких широтах NEIALs часто обнаруживаются при измерениях именно вдоль силовых линий магнитного поля в расширенном диапазоне высот (несколько сотен км), и почти всегда видны в ассоциации с полярным сиянием, возбужденным потоками низко-энергичных электронов, а также с оптическими лучистыми структурами, часто называемыми «пылающими» flaming aurora (Blixt et al., 2005; Sullivan et al., 2008; Dahlgren et al., 2013; Akbari et al., 2014; Michell et al., 2014), см. например, рис. 5.

Чтобы идентифицировать NEIALs в отраженных (эхо) радиолокационных сигналах, используется их основная характеристика - отраженная энергия, которая может быть на несколько порядков больше, чем фоновое некогерентное рассеяние. Отраженные сигналы от NEIALs значительно отличаются от отражений от спутников или других не геофизических твердых целей, рассеивающих спектры лучей радара [Michell and Samara, 2013].

Большинство NEIALs, наблюдаемых при отражении лучей некогерентных радаров обратного рассеяния, делятся на два типа. **Первый** тип NEIALs встречается на относительно малых высотах в области F или ниже, при этом энергия распределяется между ионно-акустическими плечами [Forme, 1999]. Этот относительно низко-высотный тип NEIAL наиболее часто наблюдаемый в отраженных (эхо) сигналах радара PFISR, ассоциируется с активными структурированными авроральными дугами, такими, какие бывают на фазе роста суббури [Akbari and Semeter, 2014], и, наиболее вероятно, генерируется Ленгмюровской турбулентностью [Forme, 1993, 1999]. **Во второму типу** относятся NEIALs, которые наблюдались в эхо сигналах радаров EISCAT [Rietveld et al., 1991], они происходят на относительно больших высотах (> 600 км) и часто имеют большую асимметрию в усилении энергии эхо между двумя ионно-акустическими плечами. В работе [Michell et al., 2014] было обнаружено, что существует корреляция между авроральными структурами и типом наблюдаемых NEIALs, и, что авроральные структуры, присутствующие во время событий NEIALs, согласуются с вероятными механизмами генерации NEIALs, выведенными в каждом случае. Второй тип NEIALs возникает более редко при отражении лучей радара PFISR и связан с авроральными структурами, которые возбуждаются большими потоками низко-энергичных электронов, такими, какие бывают в полярных пограничных интенсификациях (PBI), а также в начале суббури и, вероятно, являются результатом потоковой неустойчивости, а в некоторых случаях, и турбулентности волн Ленгмюра [Rietveld et al., 1991]. Кроме того, анализ данных авроральной фотометрии выявил, что существует анти-корреляция между высотой NEIALs и рассчитанной энергией электронов, которая согласуется с гипотезами относительно механизмов генерации в [Michell et al., 2014].

С момента первого наблюдения Foster et al. [1988], появление интенсивных нетепловых эхо-сигналов в данных радара некогерентного рассеяния (ISR) были предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. В Таблице 1, адаптированной из [Michell et al., 2014], (для справки) приведены характеристики некогерентных радаров обратного рассеяния,

используемых в северной полярной области для локализаций усиленных сигналов на ожидаемой частоте ионно-акустического резонанса. Ряд работ подтверждают, что такие эхо-сигналы являются результатом рассеяния на дестабилизированных ионно-звуковых волнах. Отсюда и появилось название для обозначения этих эхо-сигналов - «естественно усиленные ионно-акустические линии» (NEIALs naturally enhanced ion acoustic lines) [Sullivan et al., 2008; Michell and Samara, 2010; Akbari and Semeter, 2014; Michell et al., 2014; Akbari et al., 2021].

Были предложены механизмы для объяснения NEIALs. К ним относятся: (1) streaming instabilities (неустойчивости потоков) из-за относительного дрейфа между тепловыми электронами и различными видами ионов [Rietveld et al., 1991; Collis et al., 1991; Wahlund et al., 1992]; (2) взаимодействия волна-волна, когда дестабилизированная первичная Ленгмюровская волна вызывает усиление ионно-акустических волн [Forme, 1999; Strømme et al., 2005]; (3) дестабилизация ионно-акустических волн с помощью локального ускорения электронов ионно-циклотронными волнами [Bahçivan and Cosgrove, 2008]. Независимо от механизма генерации, предполагается, что начальная свободная энергия обеспечивается высыпанием электронов. Так как авроральная активность является признаком высыпания электронов, некоторые экспериментальные работы были сосредоточены на сопоставлении эхо-сигналов радаров с оптическими данными и исследовании временных и пространственных соотношений между NEIALs и различными типами авроральных структур [Collis et al., 1991; Sedgemore-Schulthess et al., 1999; Grydeland et al., 2003, 2004; Blixt et al., 2005; Sullivan et al., 2008; Michell et al., 2008, 2009; Michell and Samara, 2010]. Ряд работ были сосредоточены на статистической частоте возникновения NEIALs в зависимости от высоты, времени года и частоты радара [Rietveld et al., 1991, 1996].

Одним из аспектов наблюдений NEIALs, является их зависимость от угла с магнитной силовой линией (м.с.л.). Степень, с которой возбуждение NEIAL меняется от угла с м.с.л., зависит от базового механизма генерации. Например, предполагалось, что потоковые неустойчивости, создаваемыедвигающимися вдоль поля частицами, дестабилизируют ионно-акустические волны, направленные строго вдоль магнитного поля, в то время как усиления ионно-акустических волн, генерируемые параметрическим распадом Ленгмюровских волн, должны наблюдаться в более широком диапазоне углов к силовым линиям магнитного поля. Зависимость от угла обзора NEIALs накладывает дополнительные ограничения на возможные механизмы генерации. Отсутствие экспериментальных работ по этому вопросу отчасти связано с эфемерной природой эха в сочетании с ограничением скорости управления лучом, связанного с радаром ISR (Incoherent Scatter Radar), построенном на основе тарелки. Однако, импульсное управление новыми усовершенствованными модульными радарными некогерентного рассеяния позволило улучшить методику таких исследований [Michell et al., 2014].

Таблица 1. (адаптирована из [Michell et al., 2014]). Сводка характеристик основных высокоширотных некогерентных радаров обратного рассеяния, в частности: рабочая частота, длина шкалы брэгговского рассеяния ($\lambda/2$), геомагнитная широта и ширина луча

Radar	Freq. (MHz)	$\lambda/2$ (cm)	Mag. lat.	Beam width
EISCAT VHF	224	67	66.2°	1.5°
PFISR	449	33	66.1°	1°
ESR	500	30	75.2°	0.6°
EISCATUHF	933	16	66.2°	0.5°
Sondrestrom	1290	11	74.2°	0.5°

В [Michell et al., 2014] рассмотрена возможность использования лучей 450 МГц Радара Некогерентного Рассеяния в Poker Flat (PFISR, Poker Flat Incoherent Scatter Radar) для исследования видимости интенсивности NEIAL в зависимости от магнитного ракурса. Известно, что NEIALs локализованы в пространстве с относительно мелкими горизонтальными масштабами (~100-200 м) [Grydeland et al., 2004]. Так как разные направления лучей пересекаются в разных точках пространства,

то можно ошибочно интерпретировать пространственную изменчивость в источнике NEIAL, как эффект магнитного угла обзора. Чтобы различить эти случаи, отслеживалась активность полярных сияний как показатель пространственного распределения базовой турбулентности. В [Michell et al., 2014] NEIALs наблюдались во время фазы расширения суббури, во время которой динамичные авроральные формы быстро перемещались относительно набора лучей радара, а затем покрыли большую часть неба. Поэтому утверждалось, что различия характеристик NEIALs в разных отраженных лучах радара должны быть обусловлены магнитным ракурсом.

3.2.2. Примеры наблюдений высотных NEIALs 01-03-2011 и 22-01-2012, проведенных в poker flat с помощью радара PFISR и оптических приборов

Радар PFISR, соседствующий с Poker Flat Research Range в Fairbanks, расположен рядом с экваториальным статистическим краем аврорального овала, поэтому динамичное полярное сияние и начало суббури регулярно наблюдаются в местном магнитном зените во время геомагнитно-возмущенных условий [Michell and Samara, 2013]. 1 марта 2011 г был проведен эксперимент с конкретной целью исследований зависимости NEIALs от угла наблюдений от магнитного зенита [Akbari et al., 2014]. Радар некогерентного обратного рассеяния PFISR был настроен для выборки пяти положений луча, одно из которых было в магнитный зенит и четыре соседних луча, разделенных всего на 1° от него. На второй (правой) панели снизу рис. 4 показаны положения и угловая протяженность (контур на полуширине $\sim 1,1^\circ$) лучей в одном кадре, полученных при измерениях с изображающей камерой CMOS, использованной в исследовании Dahlgren et al. [2013], с геодезическим азимутом, и контурами высот. Изображающая камера с углом поля зрения 15° (см. левую панель на рис. 5) была совмещена с углом поля радара PFISR; таким образом, что его диаграмма направленности не зависела от высоты. Луч, направленный в магнитный зенит, обозначенный сплошным красным пятном (рис.4), определяется как луч радара, параллельный линиям магнитного поля на земле с использованием модели международного эталонного геомагнитного поля International Geomagnetic Reference Field model [International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD, 2010]. Из-за кривизны силовых линий этот луч радара не совсем параллелен силовым линиям на больших высотах. Тем не менее, он остается ближайшим к ним лучом. На высотах, где наблюдались NEIALs, луч, направленный в магнитный зенит, имел угол $\sim 0,2^\circ$ с силовыми линиями магнитного поля.

Таблица 2. (адаптирована из [Michell et al., 2014]). Сводка характеристик имаджеров эмиссий полярных сияний в течение аврорального сезона в Poker Flat 2011–2012 гг., которые использовались для наблюдений NEIALs

Field of view (degrees)	Frame rate (Hz)	Emission Filter (nm)	Lifetime Avg.	altitude (km)
All-sky (180°)	3.3	557.7 Slow	(0.7 s)	100–120
Narrow (15°)	40.7	427.8 Prompt	(ns)	100–120
Narrow (15°)	40.7	844.6 Prompt	(ns)	200–250

Начало суббури произошло на юго-востоке от позиции радара PFISR примерно в 10:00 UT 01-03-2011 г., оно сопровождалось расширением авроры к полюсу, и достигло зенита PFISR в $\sim 10:05:30$ UT. На Рисунке 5 показаны изображения в кислородной эмиссии $\lambda 557,7$ нм, зарегистрированные all-sky камерой в Poker Flat, когда аврора расширялась, проходя через кластер лучей PFISR (обозначено красным). Эмиссия $\lambda 557,7$ нм в полярном сиянии происходит в слое на высотах между 120 и 180 км. Это показатель высыпаний электронов в широком диапазоне энергий, и поэтому ожидалось, что они появились на силовых трубках, магнитно-сопряженных с NEIAL.

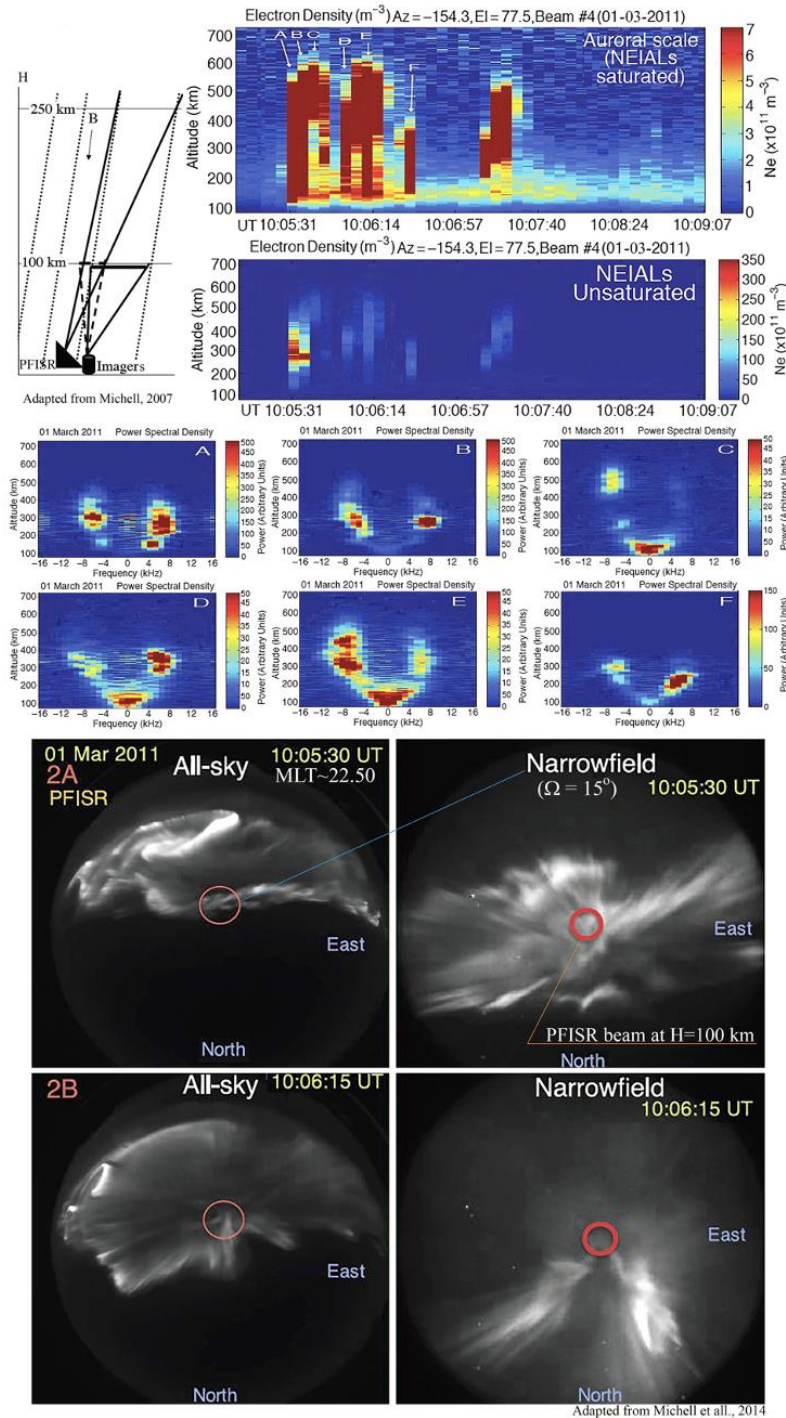


Рис. 5. На первых двух панелях сверху показаны высотные структуры распределения N_e в NEIALs (от A до F) в насыщенном (верхняя) и ненасыщенном (нижняя) вариантах, полученные радаром PFISR 01-03-2011 в интервале 10.00÷10.09 UT. Шкала N_e показана цветом справа. Слева от этих распределений показана геометрия условного расположения поля генерации лучей радара и поля зрения аврорального имаджера, направленных вдоль силовых линий магнитного поля в Poker Flat. Под ними показаны 2 ряда по 3 панели, соответствующих каждому из NEIALs по отдельности (от A до F), отображающих их высотные распределения (от 100 до 700 км) в частотах от -16 до +16 кГц. Распределение их энергии в каждой из панелей показано в цветовых шкалах справа. На 4х нижних панелях показаны авроральные изображения, полученные в Poker Flat 01-03-2011 с all-sky-камеры (в 10.05.30 и в 10.05.16 UT друг под другом слева) и с аврорального имаджера с углом поля зрения $\sim 15^\circ$ в том же интервале времени (друг под другом справа) при MLT ~ 22.50 . Красными кружками на all-sky изображениях нанесены проекции поля зрения имаджера, а на 15-и градусных изображениях – проекции поля лучей радара PFISR на высоте 100 км [Michell et al, 2014].

Характеристики авроральных имаджеров приведены в таблице 1

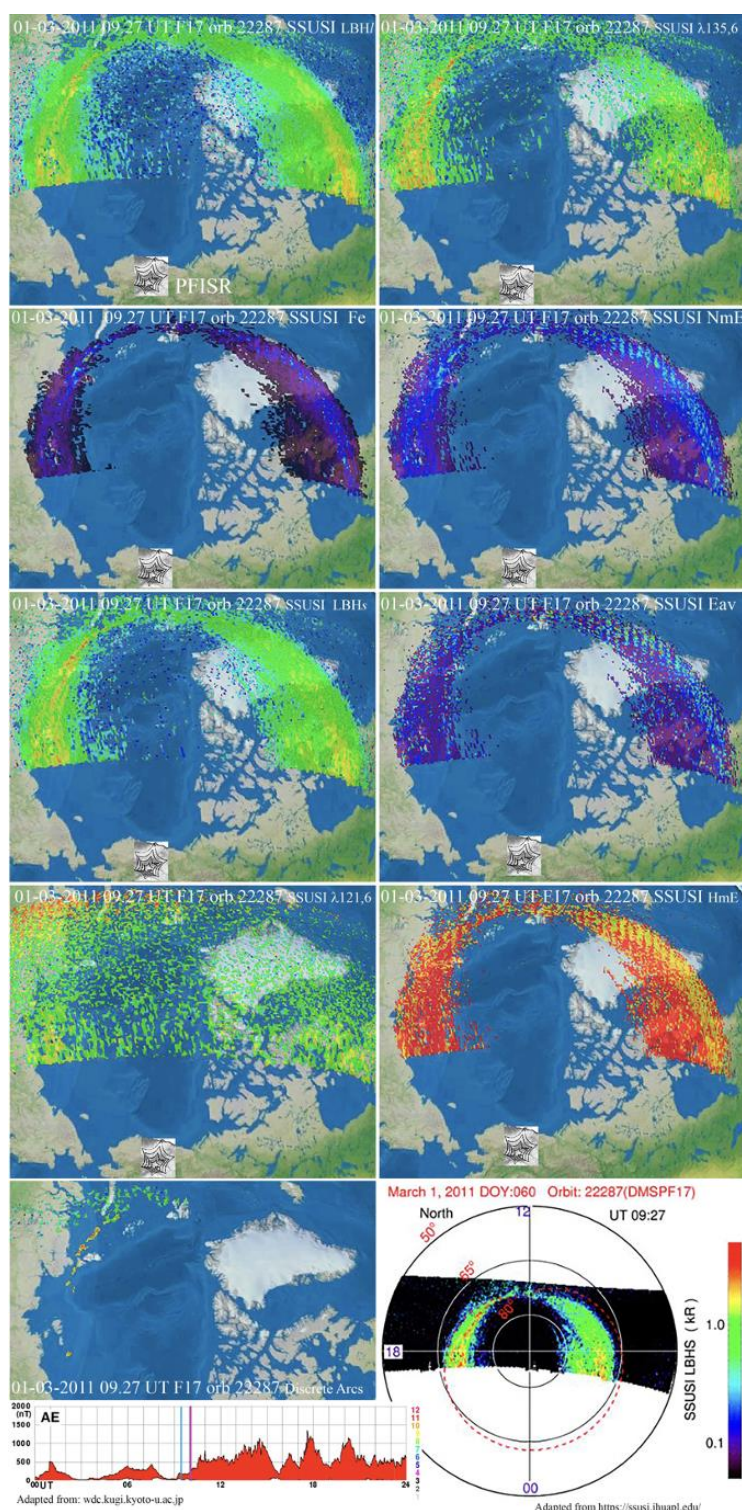


Рис. 6. Обстановка в северном авроральном овале в авроральных ВУФ-эмиссиях: (LBH/ N₂ и LBHs N₂, и рассчитанные из них средняя энергия высыпавшихся электронов E_{ав} и поток энергии высыпавшихся электронов F_ε; а также N_mE и H_mE – концентрация Ne в максимуме E-области полярной ионосферы и высота этого максимума соответственно; λ135,6 nm OI; λ121,6 nm Ly-α) примерно за 30 мин до начала суббури 01-03-2011, полученная с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI на орбите КА DMSP F17 в 09.27 UT. На магнитограмме, приведенной на нижней левой панели внизу рисунка, момент наблюдений отмечен голубой вертикальной линией, а фиолетовой вертикальной линией отмечен момент генерации flaming аурога во время развития суббури, показанный на рис. 5. Левая верхняя панель показывает изображение участка овала в эмиссии LBH/ N₂, являющейся прямым индикатором потока энергии высыпавшихся электронов. Видно, что диффузный овал был относительно широким, что свидетельствует о высыпаниях электронов в мягкой части энергетического спектра. На всех панелях карт эмиссий области расположения Poker Flat (Аляска) обозначены маленьким значком диаграммы радара PFISR

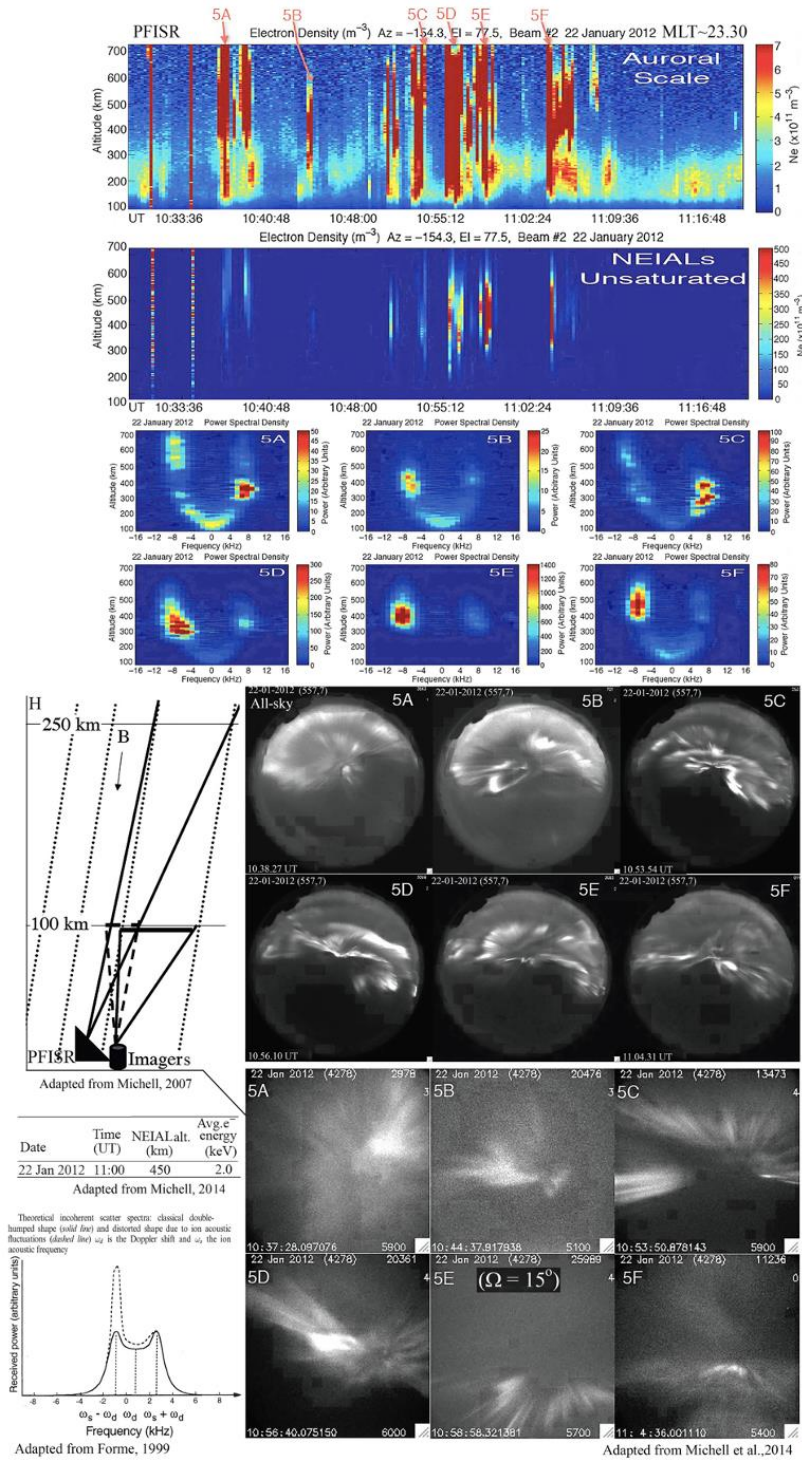


Рис. 7. В соответствии с той же логикой, что и на рис. 5, на первых двух панелях сверху показаны высотные структуры распределения N_e в NEIALs (от 5A до 5F) в насыщенном (верхняя) и ненасыщенном (нижняя) вариантах, полученные радаром PFISR 22-01-2012 в интервале 10.33÷11.17 UT. Шкала N_e показана цветом справа. Под ними показаны два ряда по 3 панели, соответствующих каждому из NEIALs по отдельности (от 5A до 5F), отображающих их высотные распределения (от 100 до 700 км), полученных в интервале частот -16 ÷ +16 кГц. Распределение их энергии в каждой из панелей показано в цветовых шкалах справа. На панелях под ними показаны две панели по 3 авроральных изображения, полученные в Poker Flat 22-01-2012 с all-sky-камеры в интервале 10.38.27÷11.04.31 UT друг под другом) и две панели по 3 авроральных изображения, полученных с имаджера с углом поля зрения $\sim 15^\circ$ в том же интервале времени (при MLT~23.30) [Mitchell et al, 2014]. Внизу слева показана таблица высот NEIALs и средней энергии электронов. В левом нижнем углу приведены: теоретический классический спектр NEIAL (сплошная линия), и искаженный из-за ионно-акустических флуктуаций (пунктирная линия), рассчитанные в теоретической работе [Forme, 1999]

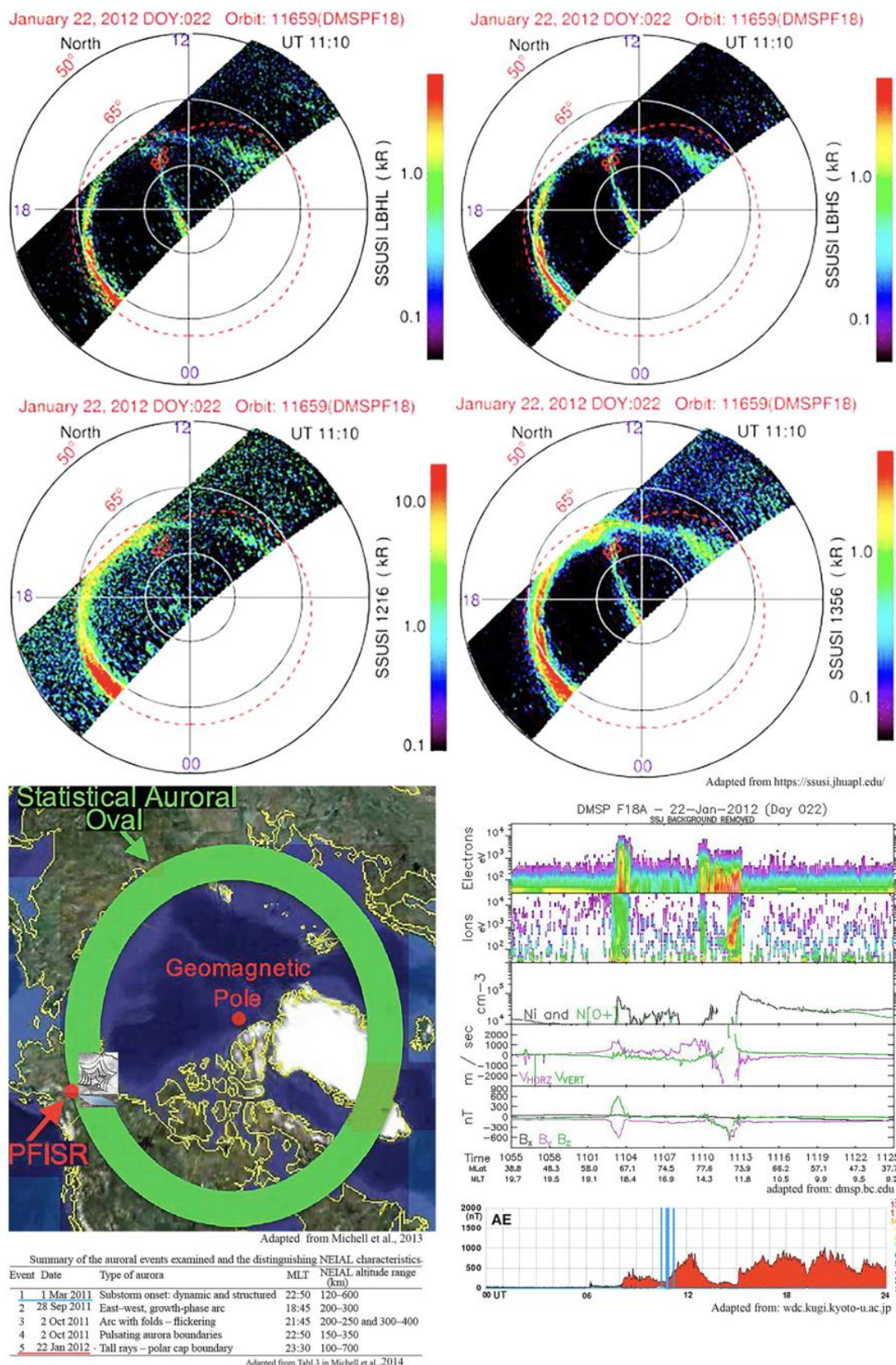


Рис. 8. На двух верхних рядах панелей изображений 4-х ВУФ-эмиссий обстановка в авроральном овале 22-01-2012 в ~11.10 UT, полученных с помощью изображающего спектрографа SSUSI на орбите КА DMSP F18. Внизу справа спектрограмма авроральных электронов, полученная с помощью анализатора SSJ5, установленного на КА DMSP F18. Внизу слева показан среднестатистический авроральный овал, на котором нанесена позиция радара PFISR с его условной диаграммой. Под ним показана таблица событий, рассмотренных в работе [Michell et al., 2014], включая два события, рассмотренных выше 01-03-2011 и 22-01-2012

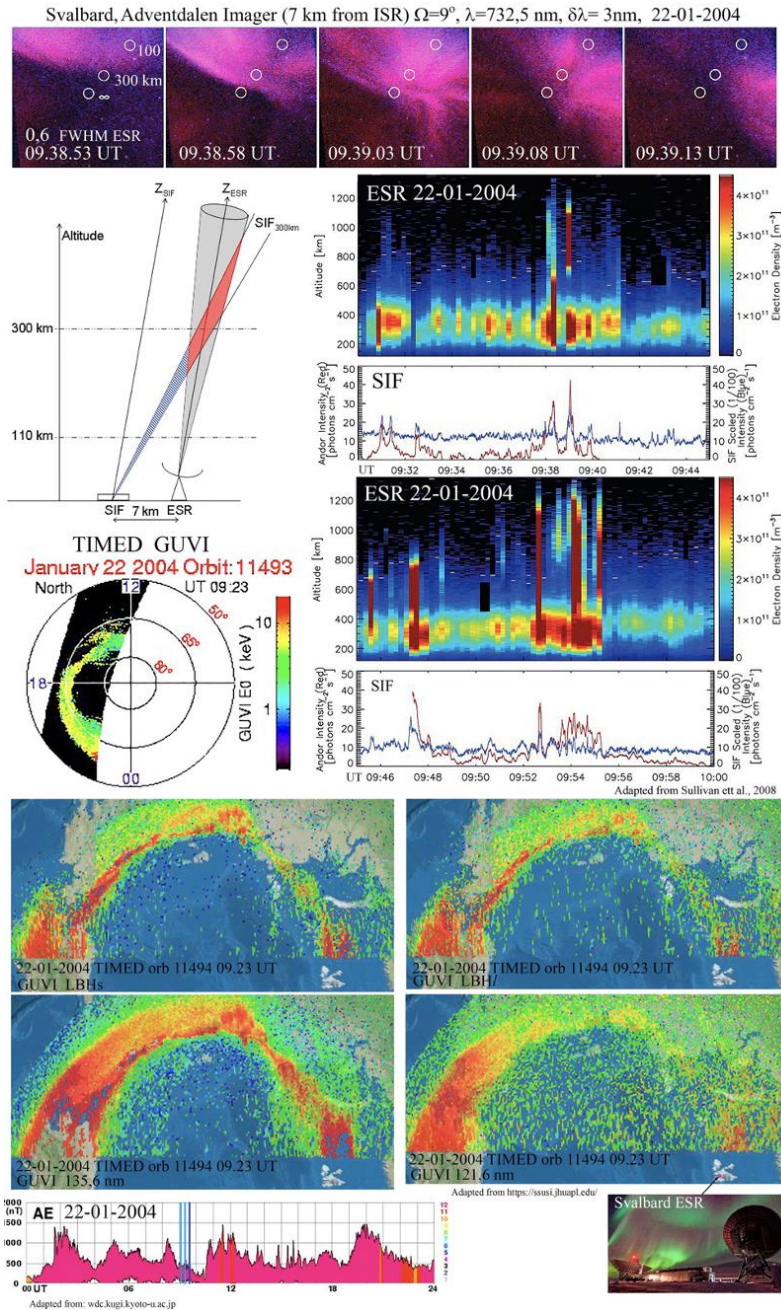


Рис. 9. На верхней панели показана серия мульти-волновых составных (имаджер Andor + имаджер SIF)/изображений, показывающих оптическое усиление эмиссии дублета [OII], связанное с признаком NEIAL в 09:39:03 UT 22-01-2004. Показанные кадры были сделаны в 09:38:53, 09:38:58, 09:39:03, 09:39:08 и 09:39:13 UT слева направо [Sullivan et al., 2008]. Для ориентации изображения направление на север – вертикально вниз, а направление на восток – влево. Белые кружки, показанные постепенно удаляющимися от центра изображения, представляют положение проекции луча ESR (FWHM 0,6°) на высоты: ∞, 300 км и 110 км от центра изображений к периферии соответственно. Эффект параллакса не учитывался. Под верхней панелью слева показана геометрия координированных наблюдений радаром ESR и оптическими приборами, а справа показаны временные развертки N_e в зависимости от высоты, полученные в интервалах 09.30 ÷ 09.45 UT и 09.45 ÷ 10.00 UT друг под другом по данным наблюдений ESR. Каждая развертка под ней сопровождается графиками эмиссий, полученными с имаджера SIF (см. геометрию слева). Под ними показаны 4 панели с изображениями ВУФ-эмиссий в авроральном овале, полученными с орбиты КА TIMED с помощью изображающего спектрографа GUVI. Развертка средней энергии высыпавшихся электронов E_0 (в тексте она обозначена как E_{av}) в координатах InvLat-MLT, рассчитанная по данным изображающего ВУФ-спектрографа GUVI, показана слева от панелей ESR+SIF. Развертка AE-индекса 22-01-2004 показана в самом низу рисунка

3.2.3. Примеры наблюдений высотных NEIALs в области каспа 22-01-2004, проведенных с помощью радара EISCAT (Svalbard) и оптических приборов [Sullivan et al., 2008]

Рассмотрим результаты наблюдений событий NEIALs, происходивших утром с 09.30 до 10.00 UT над островом Шпицберген 22-01-2004, показанные на рис. 9. На второй сверху слева панели показана геометрия одновременных наблюдений радаром некогерентного рассеяния EISCAT Svalbard Radar (ESR) и оптическими приборами, установленными в 7 км к северо-западу от радара в Adventdalen. В указанном интервале времени для измерений использовалась 42 м антенна ESR. Время интегрирования составляло 6,4 с, а затем следовала пауза 6,4 с для каждой точки данных. Для наблюдений использовался ряд оптических приборов: **1)** имаджер Andor с полем зрения $9^\circ \times 9^\circ$, направленный в магнитный зенит, с приемником AndorIXon EMCCD и фильтром ($\delta\lambda \sim 3$ нм), полоса пропускания которого была настроена на запрещенный дублет иона кислорода [OII] $^2P-^2D$ ($\lambda 732$ нм и $\lambda 733$ нм), работавший в режиме 2 кадра/сек [Ivchenko et al., 2005]. Этот дублет эффективно возбуждается высыпанием электронов низкой энергии (100 эВ) с максимумом на высоте около 300 км; **2)** SIF (Spectrographic Imaging Facility) - имаджер на основе CCD с усилением, с временным разрешением 25 кадров в секунду и полем зрения $16^\circ \times 12^\circ$ с фильтром RG645, имеющим полосу пропускания >645 нм; а также **3)** спектрограф HiTIES (High Throughput Imaging Echelle Spectrograph), настроенный на пропускание излучения эмиссии дублета OII и первой положительной системы полос молекулярного азота (N_2 1PG) между $\lambda 670$ и $\lambda 750$ нм в авроральном спектре, интенсивность которых прямо пропорциональна потоку энергии высыпавшихся электронов на высотах ~ 110 км; **4)** использовались также и вспомогательные фотометры. Наблюдения проводились утром в сумеречных условиях, поэтому различный вклад в изображения из-за солнечного света был вычтен вместе с инструментальным уровнем темнового шума. Вклад солнечного света оценивался по формуле линейной подгонки в короткие периоды ясного неба до и после события NEIALs в области каспа. Интенсивности, как в All-sky имаджерах, так и в спектрографе HiTIES, были откалиброваны по звездам, видимым в периоды ясного неба.

На верхней панели рис. 9 показаны пять последовательных составных (наложенных друг на друга изображений) авроральной структуры, полученных с помощью имаджеров Andor и SIF 22-01-2004 в интервале с 09.38.53 по 09.39.13 UT, когда в отраженных (эхо) сигналах радара ESR наблюдались NEIALs. Маленькими белыми кружками помечены (см. от центра изображения к периферии) проекции луча радара ESR (FWHM $0,6^\circ$) на высоты: ∞ , 300 и 110 км соответственно. На двух парах правых панелей рис.9 друг под другом показаны: как сырые данные Ne от высоты 110 до 1300 км (scaled Debye-corrected backscattered power) в цветовой шкале (от 0 до $4 \cdot 10^{11}$) в зависимости от времени и высоты, так и графики интенсивности эмиссий, полученных в углах поля зрения соответствующих лучу радара ESR на высоте 300 км для имаджеров Andor (красным) и SIF (синим). Внизу слева показано распределение AE-индекса для 22-01-2004. Выше показаны 4 панели изображений ВУФ-эмиссий (LBHs, LBHl, $\lambda 135,6$ nm [OI] и $\lambda 121,6$ nm /Ly- α /), полученных с помощью изображающего спектрографа GUVI с орбиты КА TIMED 22-01-2004 в 09.23 UT (это время относится к середине каждой панели). Помня о том, что КА TIMED работал на орбите с прямым наклоном ее плоскости к плоскости экватора ($i = 71,4^\circ$, высота ~ 635 км), время на изображениях ВУФ-эмиссий в окрестности о. Шпицберген должно быть на $\sim 8-10$ мин больше, чем указано на изображениях, т.е. ~ 09.33 UT. Обратим внимание на среднemasштабную структуру ВУФ-эмиссий (особенно LBHs и $\lambda 135,6$ nm) в авроральном овале вблизи острова Шпицберген. Внутри неё как раз и наблюдались NEIALs примерно в 09.38 ÷ 09.39 UT.

3.2.4. Примеры наблюдений лучистых авроральных структур и отсутствия/или совсем слабых структур NEIALs в их окрестности, проведенных 2,3,4-04-2011 радаром некогерентного обратного рассеяния и оптических приборов, расположенных в Sondrestrom (Гренландия) [Michell and Samara, 2013]

Радар Sondrestrom (Гренландия) с антенной в виде тарелки имеет рабочую частоту 1290 МГц (Табл. 1), поэтому размер шкалы брэгговского рассеяния составляет 11 см в отличие от радара PFISR с фазированной антенной решеткой на частоте 449 МГц и имеющего размер шкалы брэгговского рассеяния 33 см. Было проведено сравнение неодновременных наблюдений подобных авроральных структур и эхо-сигналов от этих двух радаров, выполненных в магнитном зените. Оба радара использовали длинные некодированные импульсы (450 мс), чтобы получить максимальную

спектральную информацию из F-области ионосферы. Оба радара имеют близкую ширину луча ($\sim 1^\circ$ у PFISR и $0,5^\circ$ у радара в Sondrestrom), оба «освещали» относительно небольшие области в ионосфере. Типичная рабочая мощность двух радаров также сопоставима и составляет около 2 МВт. Поэтому важной характеристикой сравнения данных между радаром в Sondrestrom и радаром в Poker Flat является их рабочая частота или, что эквивалентно, их зондирующие волновые числа.

Имаджеры, используемые для авроральных наблюдений в Sondrestrom, были построены на базе AndorIxon DU-888 EMCCD. Использовались матрицы с 1024×1024 пикселей с их внутренним бинированием, что позволяло при наблюдениях получение разных сочетаний пространственного и временного разрешения. В каждом случае они оснащались объективами, обеспечивающими угол поля зрения $\sim 19^\circ \times 19^\circ$, и поддерживались одним all-Sky имаджером. CCD охлаждались до температуры (-70°C), чтобы уменьшить тепловой шум, и использовался режим бинирования 4×4 , в результате чего получались изображения 256×256 с частотой 31 кадр в секунду (при времени экспозиции 30 мс). Конфигурация была выбрана, потому что она обеспечивала адекватное временное разрешение, сохраняя при этом приемлемое угловое разрешение $\sim 0,058^\circ$ на пиксель, или приблизительно 100 метров/пиксель для более узкого поля и $\sim 800 \div 1000$ м на пиксель для all-sky камеры в окрестности зенита, предполагая, что авроральная эмиссия излучается на высоте 100 км. Узкопольные имаджеры были направлены в магнитный зенит, который находился недалеко от центра all-sky изображения как при наблюдениях радаром в Sondrestrom, так и радаром в Poker Flat. Все авроральные изображения, представленные здесь, ориентированы так, что север внизу, а восток справа.

Для анализа были выбраны три даты 2, 3 и 7 апреля 2011 года, когда в Sondrestrom наблюдались активные лучистые полярные сияния и явное увеличение плотности ионосферы в E- и F-областях благодаря высыпаниям электронов, но NEIALs не наблюдались, или были совсем слабые. Все три, показанных на рис. 10, события произошли в полуночном секторе, с местной магнитной полночью около 02.00 UT. На рис. 10 (левая панель вверху) показана электронная плотность на 02 апреля 2011 г. как функция высоты и времени при наблюдениях эхо-сигналов от лучей радара в Sondrestrom (Гренландия), в течение примерно 50 минут. Для всех трех событий радар был настроен на наблюдения с центром в магнитном зените. Повышение плотности электронов, связанное с полярным сиянием, простирающееся от высоты менее 100 км до 250 км, изменялось плавно и не показывало резких усиления, которые бы указывали на присутствие NEIALs.

Две красные стрелки на рис. 10 (левая верхняя панель), обозначенные цифрами 1A и 1B, обозначают время авроральных изображений. Первая, обозначенная 1A, (около 00.52 UT) соответствует верхнему all-sky изображению на рис. 10 (левая вторая панель сверху), и изображению в узком поле зрения. Тонкий красный кружок вблизи центра изображения всего неба (слева) обозначает расположение изображения узкого поля (справа). На нем магнитный зенит и локация луча радара, обозначенные более толстым малым кружком, «расположены» рядом с центром изображения узкого поля и имеют ширину ~ 11 км (1 км на высоте 100 км). Черной вертикальной линией в середине маркировано искажение, вызванное каким-то лучом, который «светил» в это время на площадке в Sondrestrom. Все эти изображения были получены в белом свете (без фильтров), авроральная структура была интенсивной и фактически насыщала имаджер за несколько минут. В обоих случаях узкие (~ 1 км) структуры полярных сияний были замечены, как высокодинамичные со скручиванием и складками вокруг магнитного поля. Структура хорошо видна в нижнем ряду снимков all-sky и узкого поля, сделанных на 32 мин позднее, а именно в 01.25 UT, обозначена 1B.

Следующий пример на рис. 10 (справа вверху) от 3 апреля 2011 г., также демонстрирует сильное увеличение электронной плотности за счет высыпаний авроральных электронов. На этой панели показана плотность электронов, измеренная радаром в Sondrestrom, как функция высоты и времени, охватывающая период около 30 минут (02.15–02.45 UT). Как и 2 апреля 2011 г., увеличение электронной плотности 02.24 UT (обозначено красной стрелкой (1C)), плавно изменяющееся как по высоте, так и по времени, не показывает никаких NEIAL-подобных усиления эхо сигналов. На панели под ней показаны изображения с камеры all-sky и имаджера с узким полем зрения), видны активные, лучистые полярные сияния, проходящие через зенит. Высокие лучистые (150 км–300 км) структуры согласуются с энергией дисперсных высыпаний электронов со значительным потоком энергии (500 эВ–2 кэВ) электронов, рассчитанным по методике в [Rees, 1989]. Ниже (справа) показана плотность электронов по данным радара в Sondrestrom для аврорального события (стрелки 1D и 1C), произошедшего 07 апреля 2011 г., в том же формате, как и на панели со стрелкой 1B. Этот случай немного отличается от предыдущих тем, что увеличение электронной плотности в первую очередь

произошло на низких высотах (100 км ÷ 150 км), с некоторыми увеличениями, простирающимися вверх почти до высот 200 км. Это свидетельствует о высыпании электронов с большей характеристической энергией (2кэВ ÷ 10кэВ), чем в случаях 1А и 1В.

Основываясь на подобии морфологии структур полярных сияний в области радаров Sondrestrom 1,2,3-04-2011 (рис.10) и структур, наблюдавшихся в области радаров PFISR 01-03-2011 (рис. 5), в [Michell et al., 2013] было обращено внимание на то, что в области радаров Sondrestrom присутствовали лучистые авроральные структуры, но не наблюдались NEIALs, либо они были очень слабые (ниже чувствительности изображающих приборов). Наиболее вероятно это свидетельствовало о предельном размере шкалы для усиленной волновой активности, ответственной за образование NEIALs. Предыдущие наблюдения с использованием других высокоширотных радаров ISRs позволили обнаружить присутствие NEIALs в диапазоне длин волн радаров. Напомним, что характеристики высокоширотных радаров суммированы в Таблице 1. Выше были рассмотрены примеры NEIALs для PFISR (Poker Flat) и EISCAT (Svalbard).

Важным различием между радаром в Sondrestrom и в Poker Flat является их расположение на разной геомагнитной широте. PFISR находится вблизи экваториального края овала полярного сияния (66.1°), в то время как Sondrestrom (74.2°) находится вблизи обращенного к полюсу края овала полярного сияния (см. рис. 8 и 10). Можно было бы предположить, что радары, наблюдали разные типы полярных сияний (хотя и очень похожие), и это могло бы объяснить разницу в наблюдениях NEIALs. Однако это не так, поскольку динамическое полярное сияние с одинаковой морфологией наблюдалось на обоих радаров. Кроме того, наблюдения NEIALs, регулярно проводились с других высокоширотных ISR, например EISCAT, и в их данных обнаруживалось наличие NEIALs и активных структур на магнитных широтах как выше, так и ниже Sondrestrom. Это подтверждает гипотезу того, что повышенная волновая активность, ответственная за NEIALs, действительно наблюдалась в полярном сиянии над Sondrestrom, но луч радара там не рассеивался эффективно из-за меньших волновых чисел зондирующих волн. Поэтому отсутствие или совсем слабые NEIALs в данных, полученных с радара Sondrestrom 1,2,3-04-2011 (рис.10), представляют интерес для изучения некогерентного рассеяния волн, а также позволяет точное определение высоты и величины усиления электронной плотности, связанное с наблюдаемыми структурами полярных сияний.

Когда волны Ленгмюра распадаются на ионно-акустические волны, их результирующий масштаб слишком велик, чтобы соответствовать размеру шкалы рассеяния Брэгга (Bregg) в 11 см для радара Sondrestrom, и это может приводить к более жестким ограничениям порога видимости NEIALs при наблюдениях.

На рис. 11 представлена обстановка в северном авроральном овале, которая была зарегистрирована ВУФ-имаджером SSUSI с орбиты КА DMSP F18 07-04-2011 в 01.48 UT, и спектрометром потоков частиц SSJ, т.е. примерно за 15 мин до измерений радаром и имджерами в Sondrestrom, показанных на рис.10.

Резюме. Результаты наблюдений радаров в Sondrestrom и в Poker Flat, хотя и подобны, для разных событий, не являются окончательным доказательством того, что эхо-сигналы NEIALs не наблюдаются с помощью радара в Sondrestrom. Тем не менее, они показывают, что значительно уменьшенная чувствительность радара к рассеянию от повышенной волновой активности в окрестности активного полярного сияния существует. С другой стороны, меньшая наблюдаемость (обнаруживаемость) событий NEIALs является преимуществом радара в Sondrestrom для регулярных и точных измерений границ полярной шапки и динамики суббури в конкретных авроральных структурах, которые не всегда могут быть точно измерены радаром PFISR из-за сильных помех, вызванных обратным рассеянием от NEIALs. Данные радара в Sondrestrom подтверждают существование резкой границы между наблюдаемостью и не-наблюдаемостью повышенной ионно-акустической волновой активности, ответственной за NEIALs в диапазоне 10–15 см, которая регулярно фиксируется другими полярными радаром с размерами шкалы брэгговского рассеяния от 16 см до 67 см.

4. АВРОРА-ПОДОБНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЭМИССИЯХ ПОЛЯРНОЙ И СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В этой главе рассмотрим характеристики средне- и мелкомасштабных структур эмиссий похожих на полярные сияния (aurora-like), таких как: FAEs (fragmented aurora-like emission(s)); мелкие полосы (streaks) в области полярной границы аврорального овала; характеристики красных SAR-дуг, и

зеленых «протонных» дуг в субавроральной ионосфере, а также - иногда сопровождающих их STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement), т.е. значительное увеличение скорости теплового излучения); и структуры «Picket Fence», похожие на забор из колев или штакетника, встречающиеся как в субавроральных областях, и, как правило, сопутствующих структурам STEVE.

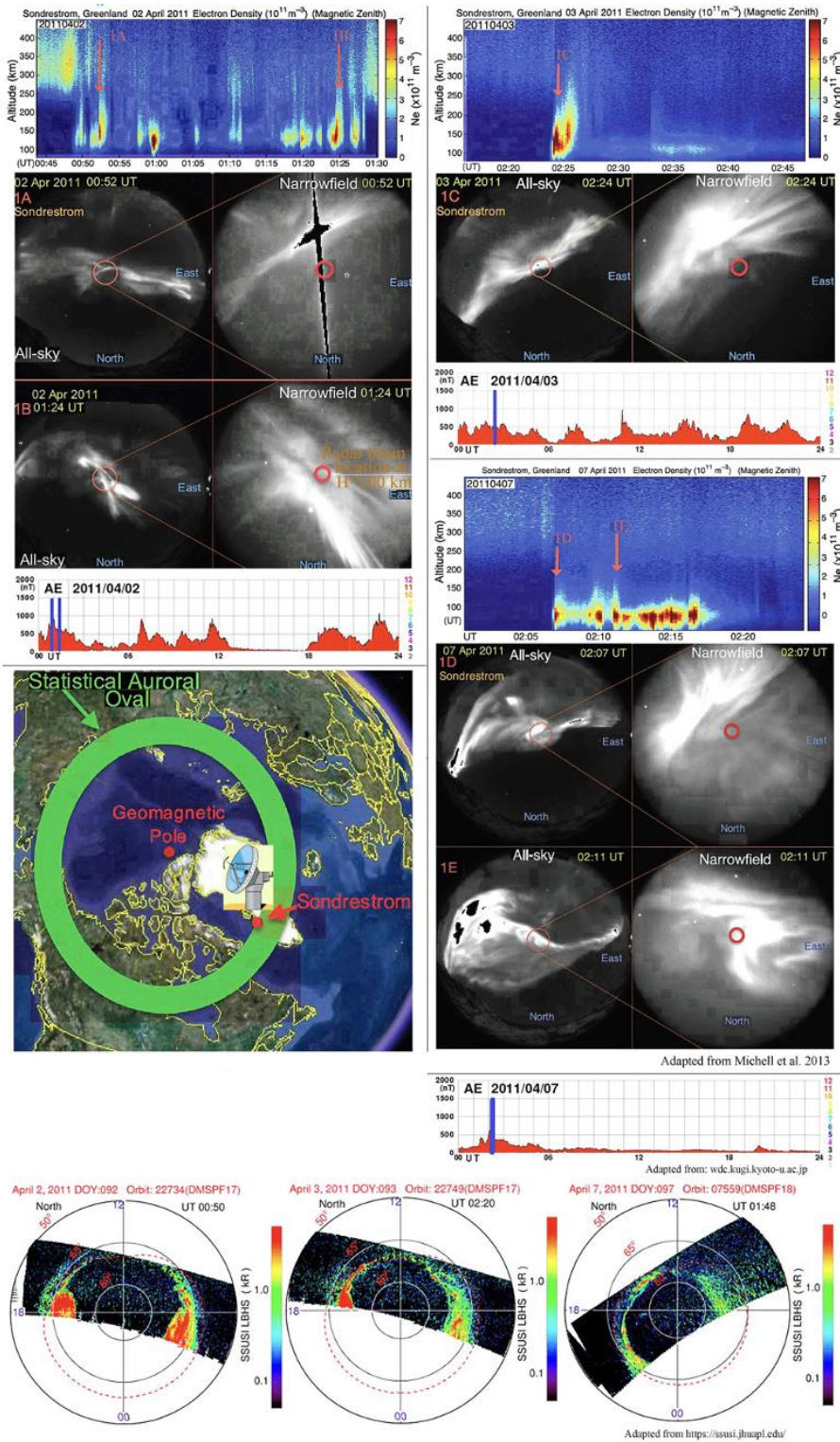


Рис. 10. Показаны результаты координированных наблюдений трех авроральных событий (2, 3 и 11 апреля 2011 г), полученные с помощью радара некогерентного обратного рассеяния (ISR) и оптических изображающих приборов (соосные all-sky-имаджер и имаджер с полем зрения $19^\circ \times 19^\circ$, направленные в магнитный зенит, и имеющие пространственное разрешение: $\sim 800\text{-}1000$ м/пиксель all-sky, и $\sim 100 \times 100$ м узкопольной камеры на высоте 100 км). Результаты наблюдений 02-04-2011 показаны на левых верхних панелях друг под другом, а результаты наблюдений 03-04-2011 и 07-04-2011 – на правых верхних панелях и на правых средних панелях соответственно. Под каждым из них приведены развертки данных магнитного поля для соответствующей даты. На трех нижних панелях показаны состояния обстановки в авроральном овале, полученные 2,3 и 4 апреля 2011 г. в координатах InvLat-MLT в спектральном поддиапазоне LBHs с помощью изображающих ВУФ-спектрографов SSUSI с орбит КА DMSP F17 и F18. Статистический авроральный овал и позиция ISR на его полярной границе показаны на средней левой панели

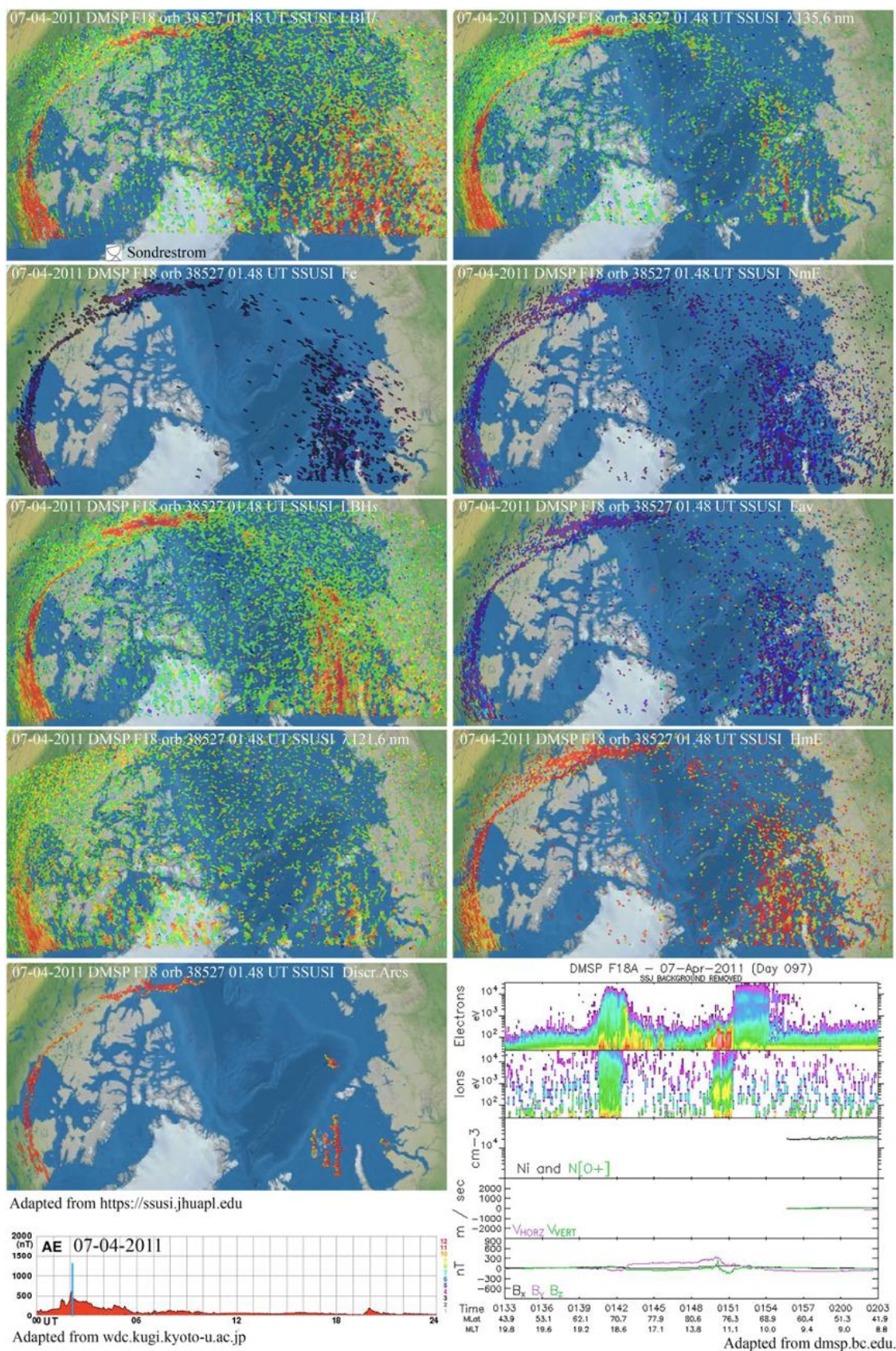


Рис. 11. Более детально обстановка в авроральном овале 07-04-2011 в 01.48 UT, полученная с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI с орбиты КА DMSP F18, показана на панелях для разных ВУФ-эмиссий, а также E_{av} (средняя энергия высыпающих электронов), F_e (поток энергии высыпающих электронов), рассчитанные по отношению интенсивностей $I(LBH)/I(LBH_s)$ и по данным $I(LBH)$ соответственно, а также N_mE и H_mE . В самом низу слева показана развертка AE-индекса для 07-04-2011

4.1. Примеры фрагментированных аврора-подобных структур эмиссий FAEs (fragmented aurora-like emissions), наблюдавшихся на полярной стороне аврорального овала

На о. Шпицберген в обсерватории Kjell Henriksen Observatory вблизи Longyearbyen (LYR), Svalbard изображающие камеры, охватывающие все небо, позволили регистрировать фрагментированные структуры в 2015 и 2017 годах. Всего было выявлено 305 кандидатов в FAEs. Особенностью FAEs оказалось то, что они наблюдались вблизи полярной границы аврорального овала. В 2021 г. вышло две больших экспериментальных работы (Dreyer et al., 2021) и (Whiter et al., 2021), посвященных результатам наблюдений FAEs. На снимках с камер наблюдения всего неба FAEs едва различимы и выглядят, как небольшие (несколько километров на высотах нижней части области E) фрагменты зеленой эмиссии (рис.14, левые панели), и до сих пор они наблюдались только во время авроральной активности.

К настоящему времени известно [Dreyer et al., 2021; Whiter et al., 2021], что FAEs делятся на два типа: 1) отдельные или неравномерно распределенные фрагменты свечения, и 2) волнообразные структуры с регулярным расстоянием между ними вблизи дуг полярного сияния (к северу от них), т.е. на полярной границе аврорального овала. FAEs имеют горизонтальную, относительно малую (несколько км) протяженность излучения, вытянутую вдоль поля, и короткое время жизни - менее минуты. В FAEs структурах наблюдались эмиссии: $\lambda 557,7$ нм [OI] и $\lambda 673,0$ нм (N_2 , первая положительная система полос 1PG). При этом отсутствовали короткоживущие эмиссии N_2^+ $\lambda 427,8$ нм и атомарного кислорода $\lambda 777,4$ нм. Этот факт свидетельствовал об ограничении верхнего предела энергии, которая может вырабатываться механизмом генерации FAEs, а отсутствие у них протяженности по магнитному полю указывает на иной механизм генерации, чем у полярных сияний (т.е. высыпание частиц). Согласно [Dreyer et al., 2021] наиболее вероятно, что FAEs могут образовываться в результате возбуждения тепловыми электронами ионосферы, т.к. по данным радара ESR FAEs сопровождалась повышенными электронными температурами в диапазоне высот 110-120 км и повышенными температурами ионов на высотах F-области.

В [Dreyer et al., 2021] и [Whiter et al., 2021] было предложено два возможных типа волн, которые могли бы создавать FAEs, а именно: а) электростатические ионные циклотронные волны (EIC), и б) неустойчивость и волны Фарли–Бунемана (Farley–Buneman waves), возникающие в области сильных локальных токов. Найдено, что результаты наблюдений FAEs могут соответствовать любому из этих двух типов волн при определенных допущениях. В случае волн EIC (electrostatic ion cyclotron waves) FAEs должны располагаться на высоте более 140 км. В случае волн Фарли–Бунемана создается сильное электрическое поле, необходимое для получения наблюдаемых скоростей дрейфа FAEs (~ 365 mV m^{-1}) [см. Orpenheim et al., 1996; Otani et al., 1998; Kovalev et al., 2008].

Рассмотрим несколько примеров наблюдений FAEs и их характеристики, полученных при наблюдениях с о. Шпицберген, представленных в [Dreyer et al., 2021; Whiter et al., 2021], а также мелких полос (streaks) похожих на FAEs (см. рис.18), представленных в [Semeter et al., 2020], фотографии которых были сделаны фотоаппаратами-любителями в национальном парке Isle Royale National Park, расположенным на территории округа Keweenaw county штата Мичиган (США).

На верхней панели (а) рис. 12 [Dreyer et al., 2021] показана кеограмма ASK1 ($\lambda 673,0$ N_2 1PG), полученная 07-12-2015 в интервале 18.22.33-18.23.31 UT в обсерватории КНО Longyearbyen, Svalbard. Под ней - три изображения, полученных с помощью изображающего фотометра, имеющего поле зрения $\Omega = 6,2^\circ \times 6,2^\circ$ ($\sim 10,7 \times 10,7$ км на высоте 100 км), (панели b,c,d), на которых видно: фрагментированную структуру FAE 1 типа (см. выше) в эмиссии $\lambda 673,0$ нм N_2 1PG (панель c) и в эмиссии $\lambda 774$ нм OI (панель d); а на панели b – наложенные изображения $\lambda 562,0$ нм молекулярных полос O_2^+ 1N (1,0), которые производятся в E-области ионосферы (95÷150 км) и излучения атомарного кислорода $\lambda 777,4$ нм, которое имеет два источника в зависимости от энергии высыпаний. Эта эмиссия производится на больших высотах низкоэнергичными электронами, возбуждающими атомарный кислород. Авроральная дуга видна на юге, т.е. внизу всех трех панелей (b,c,d). Вертикальной линией помечено время съемки (панель b), и на кеограмме (панель a). Характеристики имаджера ASK (Auroral Structure and Kinetics) см. в [Ashrafi, 2007; Dahlgren et al., 2008].

На средней панели рис. 12 приведены друг под другом панели трех высотных распределений: N_e , T_e , T_i , полученных 07-12-2015 некогерентным радаром обратного рассеяния EISCAT (ESR)

[Wannberg et al., 1997] на о. Шпицберген. Стрелочками под каждой панелью маркируются моменты наблюдения FAEs, представленные выше и помеченные буквами (b, c, d).

На нижней панели представлена условная схема одного из вариантов механизма возбуждения FAEs, адаптированная из [Dreyer, 2019, Fig.5.1], предложенная D.Whiter. Эта схема демонстрирует один из предполагаемых механизмов генерации фрагментов полярных сияний из-за суперпозиции сходящихся электрических полей полярных сияний (зеленым цветом, перпендикулярно магнитному полю и дугам) и электрического поля атмосферного волнового поля (красным, также перпендикулярно дуге и **В**-полю). Фрагменты (FAEs) на схеме визуализируются в виде зеленых прямоугольников с закругленными углами, где сходящееся электрическое поле полярного сияния совпадает с волновым полем. Направление магнитного поля указано значком \otimes внизу схемы. На рис. 13 показана обстановка в авроральном овале 07-12-2015, по изображениям ВУФ-эмиссий, полученных с орбиты КА DMSP F18 примерно на пол часа позднее изображений FAEs, полученных с о. Шпицберген. На верхней левой панели рис. 13 положение Loneyarbyen на острове обведено тонким белым кружком (LYR). На нижней левой панели показана магнитограмма для 07-12-2015.

Пример наблюдений серии FAEs 2-го типа 04-12-2013, приведенный в [Whiter et al., 2021], показан на рис. 14. Эти изображения FAEs получены, как и приведенные на рис. 12, при наблюдениях с о. Шпицберген. На первой панели сверху показана серия из 4х цветных all-sky изображений, полученных в интервале 19.03.26-19.05.25 UT. На второй панели – серия из 4х изображений, полученных с помощью узко-угольного имаджера ASK (с углом поля зрения $6,2^\circ \times 6,2^\circ$) в эмиссии $\lambda 673,0$ нм 1PG в интервале 19.04.10,53÷ 19.04.23,03 UT. На третьей панели сверху показано два изображения (a) и (b) в эмиссиях $\lambda 673,0$ нм N₂ 1PG (ASK1) и $\lambda 777,4$ нм OI (ASK3) соответственно, полученных в 19.04.19. UT. На следующих трех панелях сверху показаны высотные распределения Ne, Te, Ti в интервале 19.00-19.06 UT, полученные с помощью некогерентного радара обратного рассеяния ESR. На развертке AE-индекса в самом низу рис. 14 «момент» получения изображений FAEs помечен вертикальной синей линией. Обстановка в авроральном овале 04-12-2013 в 19.21 UT, т.е. примерно через 16 мин после рассмотренных наблюдений FAEs, полученная с орбиты КА DMSP F17 в ВУФ-эмиссиях LBH1, LBHs, $\lambda 135,6$ нм и $\lambda 121,6$ нм (Ly- α) по данным ВУФ-имаджера SSUSI, а также по данным измерений потоков части, показана рис. 15.

4.2. Что такое STEVE, и как связана его структура в субавроральной ионосфере с SAR-дугами, структурой Picket Fence (PF), и фрагментированными полосками Streaks?

Разные гипотезы и возможные механизмы возникновения, существования и связи STEVE с SAR-дугами и сопутствующими структурами Picket Fence, а также полосками Streaks рассматривались в целом ряду работ [Archer et al., 2019; Chu et al., 2019; Harding et al., 2020; Semeter et al., 2020; Dreyer et al., 2021; Liang et al., 2021; Martinis et al., 2022, 2021; Nishimura et al., 2020, 2023; Gillies et al., 2023]. В этих работах приведено множество фотографий примеров, на которых в разных ракурсах и сочетаниях зафиксированы эти структуры, а также приведены результаты наблюдений с All-sky камерами и спектрографическими имаджерами. Результаты наблюдений характеристик плазмы, полученных с орбит КА, пролетевших над окрестностями STEVE, свидетельствуют о взаимосвязи нескольких процессов и многообразии явлений, т.к. сопутствующие STEVE аврора-подобные структуры динамично двигаются. Еще десяток лет назад они почти не регистрировались из-за относительно низкой чувствительности изображающих детекторов, которая «приводила» к большим временам экспозиций, и соответственно низкой статистике наблюдений. Одна из трудностей анализа STEVE по фотографиям была и в том, что цветовые оттенки различных участков одной и той же структуры на разных фотографиях были разные. Тем не менее, пытаясь рассмотреть примеры этих событий, мы приводим ряд фотографий, опубликованных в вышеуказанных ссылках.

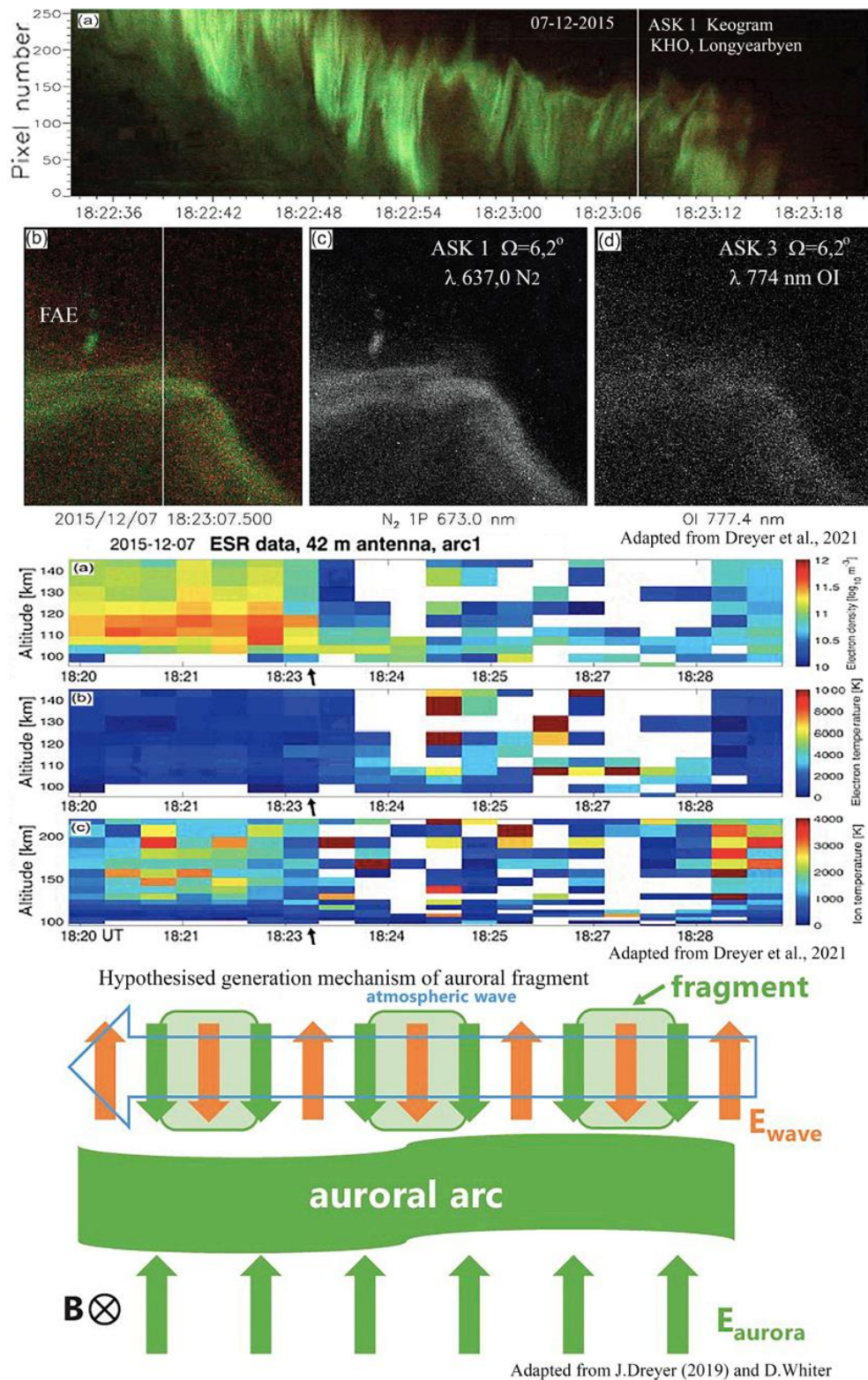


Рис. 12. На верхней панели (a) кеограмма авроральной дуги, наблюдавшейся 07-12-2013 в 18.22.-18.24 UT в KHO Longyearbyen, Svalbard [Dreyer et al., 2021]. На панелях под ней приведены три изображения FAEs первого типа, полученных узкоугольным имаджером: (c) ASK1 в эмиссии $\lambda 637,0 \text{ nm N}_2 \text{ 1PG}$; (d) ASK3 изображение в эмиссии $\lambda 777.4 \text{ nm}$ атомарного кислорода; и (b) совмещенные изображения (в «зелено-голубом» канале ASK1) и красной эмиссии $\lambda 673,0 \text{ nm N}_2 \text{ 1PG}$ в ASK3. На следующих трех панелях (друг под другим) приведены результаты радарных измерений высотных распределений N_e , T_e , T_i . Под ними схема из вариантов механизма возбуждения FAEs, предложенная D.Whiter в [Dreyer et al.,2021]

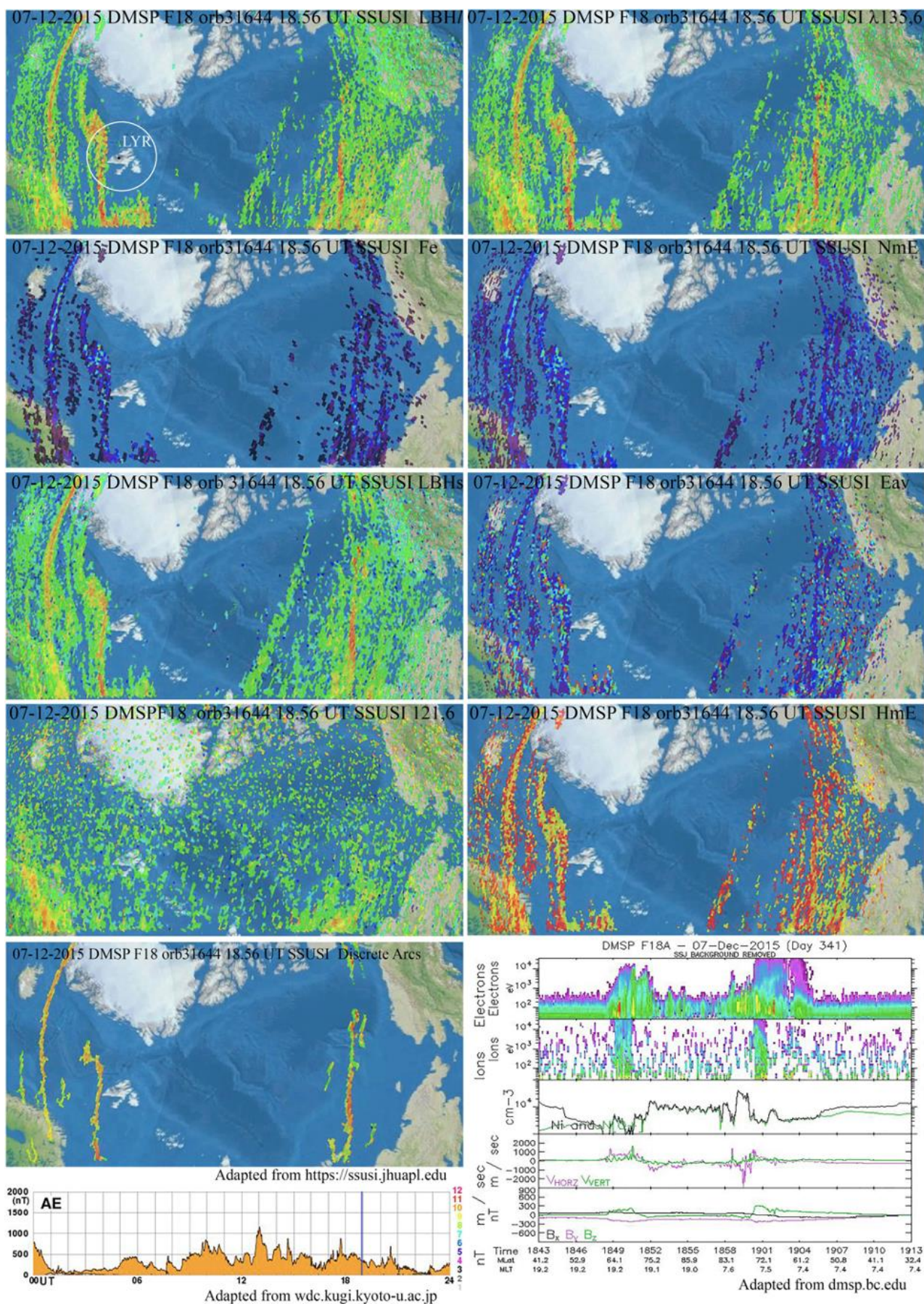


Рис. 13. Обстановка в авроральном овале 07-12-2015 по данным, полученным с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI и спектрометра частиц SSJ с орбиты КА DMSP F18

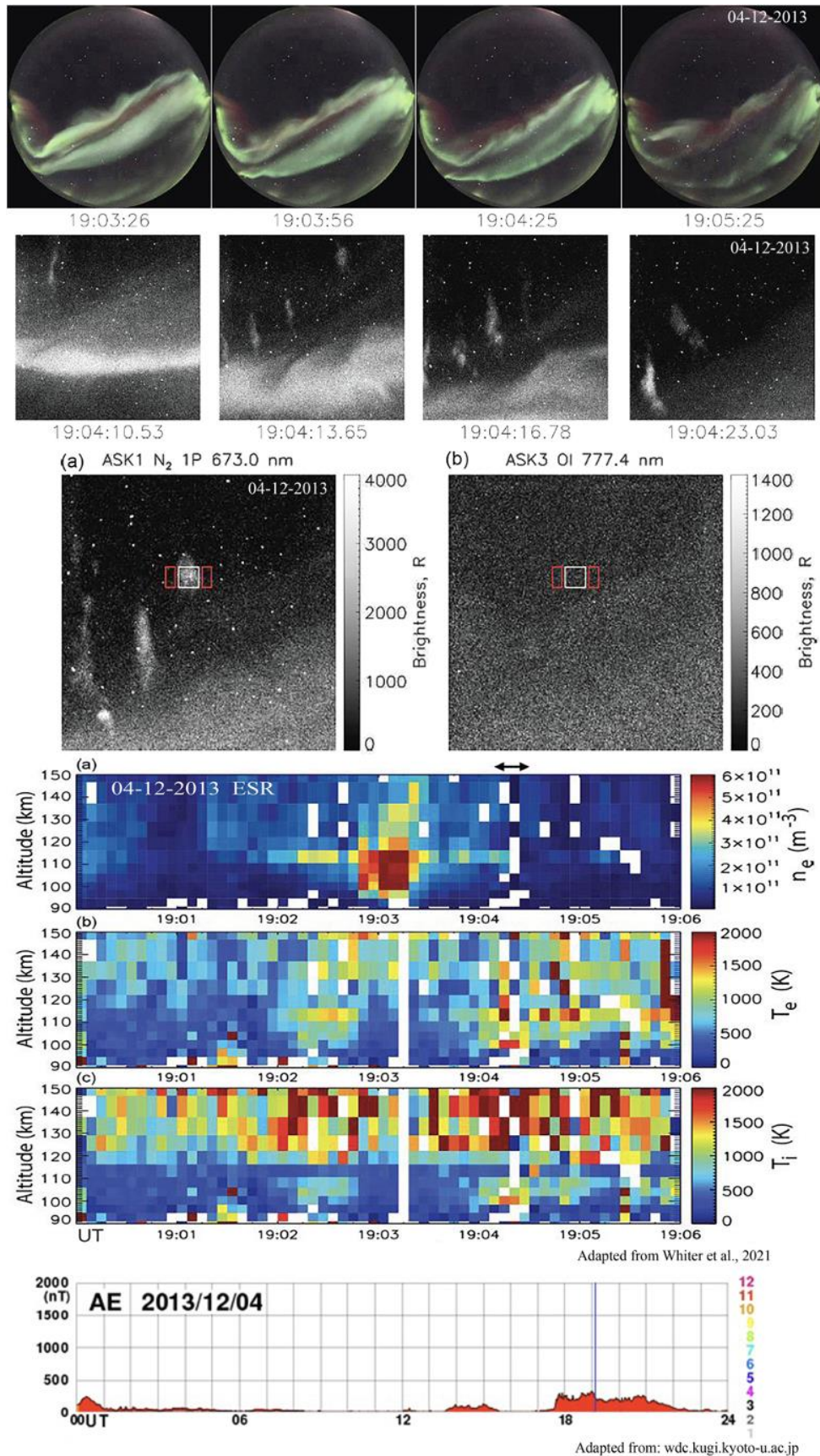


Рис. 14. Пример наблюдений серии FAEs 2-го типа 04-12-2013 с о. Шпицберген, адаптированный из [Whiter et al., 2021] (см. текст)

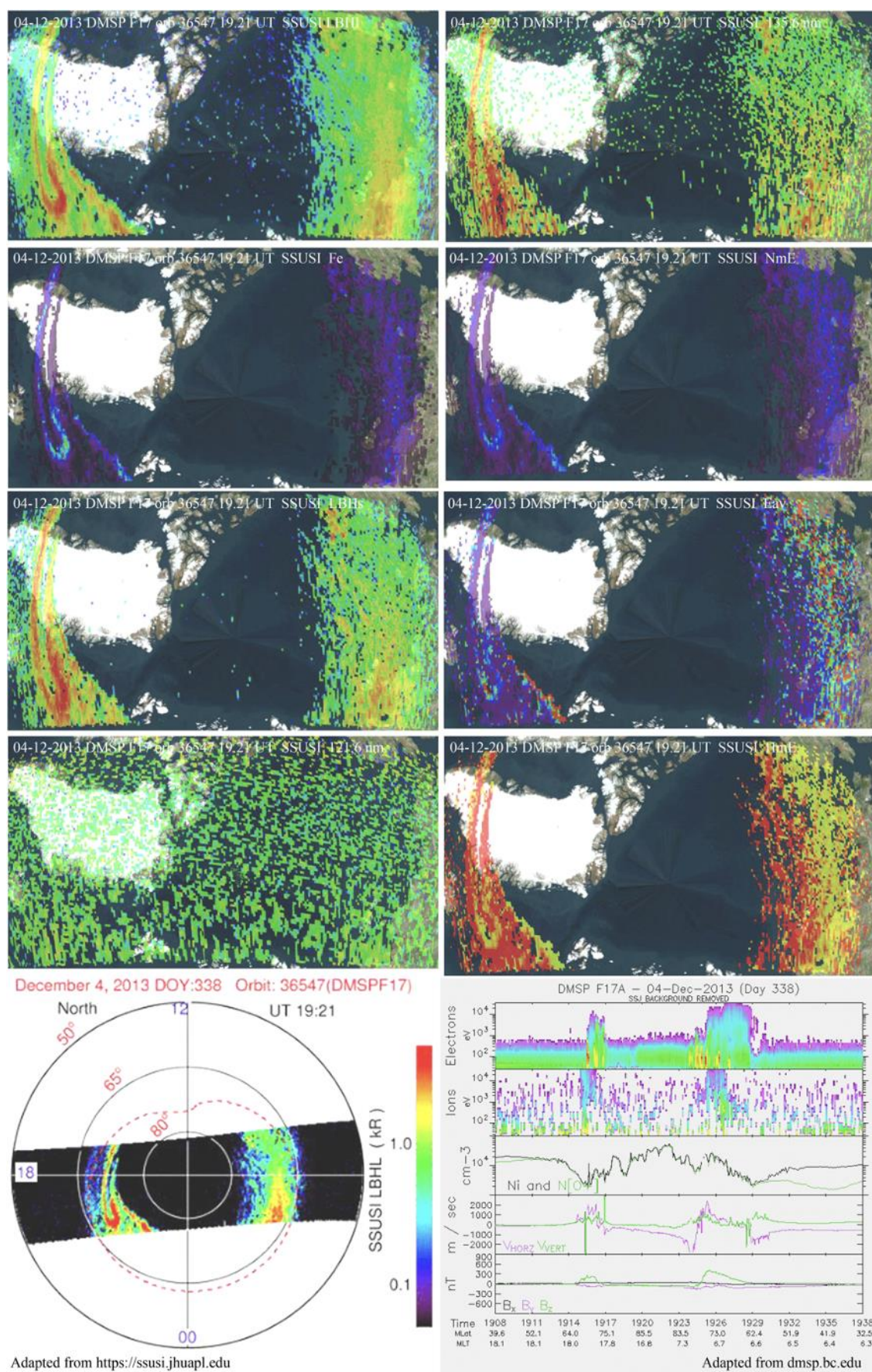


Рис. 15. Обстановка в авроральном овале 04-12-2013 по данным, полученным с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI и спектрометра частиц SSJ с орбиты КА DMSP F17. На полярной границе аврорального овала видны контуры о. Шпицберген

Наиболее полный системный обзор 2023 г., посвященный структуре и возможным механизмам генерации STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) и связанным с этим явлением структурам Picket Fence (PF) (частокол, напоминающий колья или штакетник забора), а также полосок (streams), подобных FAEs, был представлен в работе [Nishimura et al., 2023]. В нем рассмотрен один из наиболее актуальных механизмов генерации STEVE и сопутствующих структур, и обозначено множество открытых вопросов и нерешенных проблем, связанных со STEVE и сочетанием с сопутствующими структурами. Об этом будет сказано далее, а в начале рассмотрим некоторые фотографии и некоторые из аспектов наблюдений, детали All-sky изображений и пространственно-временных сочетаний на конкретных примерах событий, представленных на рис.16-22, включая связи: со стабильными авроральными красными дугами (SAR stable auroral red arcs [Kozyra et al.,1997; Mendillo et al.,2016]); с субавроральными поляризационными потоками (SAPS subauroral polarization streams) [Foster and Burke, 2002, Wang et al.,2011]); и субавроральным дрейфом ионов (SAIDs subauroral ion drifts [Spiro et al. 1979; Martinis et al.,2021]). Комментарии к рисункам 16-22 и обзор анализа процессов могут быть недостаточно полными, и поэтому мы рекомендуем читателям, интересующимся их деталями, обратиться к ссылкам на конкретные работы, которые приведены в первом абзаце данного параграфа.

4.2.1. Варианты событий присутствия/отсутствия STEVE и сопутствующих структур на фотографиях, и комментариев к ним

Сильное увеличение скорости теплового излучения (STEVE) представляет собой дугу фиолетового/лилового/сиреневого цвета, которая образуется в верхних слоях атмосферы к экватору от овала полярных сияний (MacDonald et al., 2018). STEVE может сопровождаться (или не сопровождаться) структурой относительно маленьких зеленых лучей, называемых PF (Picket Fence). Возможные варианты сочетаний присутствия/отсутствия STEVE и PF в фотографиях [Nishimura et al.,2023] показаны на рис. 16. На этом рисунке показаны четыре фотографии, две верхних слева сделаны в Strathmore (Calgary, Canada) 3 сентября 2016 года в 05.16 и 05.22 UT, третья нижняя слева сделана 31-03-2017 в 03.16 UT в Fort Frances (Канада), а четвертая справа сделана 14-03-2021 в Strathmore (Канада). Пурпурно-лиловая дуга на двух верхних фото слева - это STEVE. Как и на этих двух фотографиях, STEVE, как правило, состоит из двух эмиссионных слоев (Liang et al., 2019), отличающихся цветом. Зеленые лучи под STEVE на снимке, сделанном в 05.22 UT, – это PF. Эти две верхних фотографии были сделаны с разницей всего в 6 минут, но на верхней фотографии (в 05.16 UT) структуры PF отсутствовали. Как правило, STEVE появляется первым, а затем появляется PF уже во время присутствия STEVE (Yadav et al., 2021; Martinis et al., 2022). На нижней фотографии слева показано событие 31-03-2017, когда PF присутствует, а STEVE уже нет. По-видимому, STEVE присутствовал ранее в этом событии, а PF без STEVE появился ближе к концу жизни STEVE [Nishimura et al.,2023]. Фотография справа, показывающая более сложную структуру, сделана в 06.49 UT 14-03-2021 в Strathmore (Canada). На ней в STEVE видны лучевые структуры, и некоторые из его лучей кажутся соединенными с лучами PF. Север находится слева. Зеленое рассеянное излучение к северу от STEVE - диффузная структура в авроральном овале. Время экспозиции составляло 10 с.

На рис. 17 На шести панелях слева сверху представлены All-sky изображения, полученные 14-03-2021 в интервале 06.45-06.49 UT на озере Lucky Lake, Canada, показывают эволюцию события появления и развития STEVE, фотография которого была сделана в 06.49 UT в Strathmore (Канада) и показана на правой панели рис. 16. All-sky изображения на рис.17 сопровождаются развертками зависимости интенсивности от магнитной широты в 3х конкретных длинах волн и в непрерывном спектре) на 4х панелях друг под другом справа сверху. Эти развертки-кеограммы получены с помощью изображающего спектрографа (Transition Region Explorer (TREx)) на озере Lucky Lake, Canada в интервале 06.00-07.30 UT. STEVE появился около 06.10 UT и светился на всех показанных длинах волн в континууме airglow. Изначально это была однородная дуга пурпурно-лилового цвета без PF. После ~06.20 UT дуга STEVE переместилась к экватору (см. All-sky на панели (a) в 06.25 UT), и в нижней части дуги появились волнообразные мелкомасштабные структуры, выделенные белыми стрелками (панель 5b в 06.31 UT), а на кеограммах мелкомасштабная структура проявилась в виде периодической модуляции интенсивности излучения (панели g-j). Это временное изменение на фиксированной долготе происходит из-за того, что мелкомасштабные структуры STEVE дрейфуют на запад. Мелкомасштабные структуры наклонены к западу с увеличением высоты, что в формате кеограмм

начинается сначала на более высоких широтах. Азимутальная длина волны мелкомасштабных структур со временем становилась короче (панель (с)). После 06.43 UT PF появились рядом (на меньшей высоте) с яркими частями STEVE (панели (d-f)). PF можно рассматривать как почти монохроматическое усиление в эмиссии $\lambda 557,7$ нм (панель (h)). PF становились ярче и простирались на меньшую высоту, сохраняя при этом связь с яркими частями STEVE, и под каждой яркой частью STEVE появилась группа зеленых лучей (панель (e)). Западная (правая) часть (панель f) соответствует фотографии, приведенной справа на рис.16, сделанной в Strathmore, примерно в 500 км к западу от Lucky Lake. В то время как STEVE, выделенный тремя правыми стрелками на этом изображении, был почти выровнен с PF, STEVE, выделенный двумя левыми стрелками, был сдвинут к западу от PF. В последовательности изображений задний край STEVE был соединен с PF, но передний край дрейфовал на запад быстрее, чем PF. STEVE и PF исчезли вскоре после 07.00 UT. Это событие продемонстрировало развитие мелкомасштабных конструкций STEVE, начало строительства PF и связь между мелкомасштабными структурами STEVE и PF. Эти рассмотренные факты привели к вопросам: как устроены волнообразные мелкомасштабные структуры STEVE, и как они приводят к появлению PF, какова их связь с SAR-дугами и протонными эмиссиями? В работе [Nishimura et al., 2023] подчеркивается, что для их разрешения необходимы дополнительные наблюдения за эволюцией STEVE и PF. Чтобы понять, как эти эмиссии эволюционируют с течением времени и как они связаны друг с другом, необходимы также сопутствующие с наземными наблюдениями характеристик плазмы с орбит КА и ракет в локальных авроральной и субавроральной областях, где появились структуры STEVE и PF.

На нижней панели рис. 17 показана концептуальная схема, смоделированных в [Harding et al., 2020], аэрономических процессов механизма генерации STEVE в субавроральной ионосфере, которая на данный «момент» считается наиболее актуальной. Её детали мы рассмотрим очень ограниченно далее, а пока из-за лимита объема работы в целом отсылаем читателя к вышеуказанной ссылке.

Важно заметить, что механизма генерации PF в этой схеме нет. О том, что к запуску этого механизма в условиях суббурь причастна динамика нейтральных ветров и дрейфа ионов (см. далее), но прежде рассмотрим рис. 18 и 19.

Внизу рис. 18 представлены примеры фотографий, сделанных 06-05-2018 [Semeter et al., 2020]. Структуры, названные «таинственными» маленькими зелеными полосками (mysterious green streaks below STEVE), напоминающими FAEs, наблюдались и сфотографированы любителями полярных сияний с двух позиций (из парка на острове Isle Royale, Michigan и с северной стороны из South Alberta). Слева направо представлены 4 фотографии (a, a', b, и d), а схема триангуляции на (c). На левой фотографии (a) видны: вытянутая структура STEVE, правее сопутствующая структура PF, а еще правее две маленькие полоски, названные “streaks” в [Semeter et al., 2020], которые, скорее всего, можно называть структурой FAEs, они видны в увеличенном виде справа внизу левой панели (a). Правее показано еще три фотографии (a', b, d) в несколько меньшем масштабе, причем первая из них (a') повторяет изображение слева (a), и отличается только комментариями к ней. Эти фото сделаны в 05.20 UT фотографом-любителем А. Chernenkov в точке с координатами 51.255°N и 114.701°W , а третья фото слева (b) сделано почти в это же самое время фотографом-любителем J.Wang в точке с координатами 51.267°N и 114.328°W . По этим фотографиям была проведена триангуляция высоты FAEs, показанная на схеме (c). В результате триангуляции были получены значения высот для концов полоски (streak) FAE ($R_1=104.4\pm 1.6$ км и $R_2=106.4\pm 1.6$ км). На самой правой панели (d) показана фотография того же самого события (время не указано), сделанная в другом ракурсе фотографом-любителем А. Dyer, из South Alberta, Canada, на которой видна только полоска FAE, обозначенная, как R_1 на двух фото слева, сделанных в Isle Royale.

Вверху над фотографиями на рис. 18 на 9-и панелях показана обстановка в авроральном овале, полученная 06-05-2018 примерно в 05.30 UT по данным изображений ВУФ-эмиссий с орбиты КА DMSP F17. Она включает: изображения 4-х ВУФ-эмиссий, и пять панелей, включая: E_{av} - среднюю энергию высыпающихся электронов; F_e - поток энергии высыпающихся электронов; $NmE - Ne$ в максимуме E-; H_mE - высоту максимума Ne; и панель с изображением грубой идентификации расположения дискретных дуг. На этой панели внизу звездочкой помечено расположение Isle области Royale, Michigan. Справа рис.18 дана развертка AE-индекса для 06-05-2018.

На верхних панелях слева рис. 19 показаны три фотографии STEVE и структур PF [Archer et al., 2019], сделанных 16-09-2017 в 05.44 и 05.53.14 UT (в разных ракурсах). Верхняя (слева) - в районе озера Berg и горы Mount Robson в провинции British Columbia, Канада (53.1534° Северной широты,

119.1538° Западной долготы, высота 1680 м) фотографом-любителем D. Eurich (вверху слева). Под ней фотография, сделанная фотографом-любителем R. Downie в 05.53.14 UT, а третья – сделана фотографом J. Smith также в 05.53.14 UT, но с позиции, расположенной почти под STEVE с берегов озера Shushwap Lake (50,97° Северной широты, 119,35° Западной долготы, высота над уровнем моря 530 м). На средней и нижней фотографиях, показанных друг под другом, STEVE и элементы структуры PF, пронумерованы от 1 до 8. Направления на юг обозначено буквой S. На левой верхней панели показана схема триангуляции STEVE (лиловый ромб) и PF (зеленая полоска), сделанная с привязкой к магнитным силовым линиям с учетом позиций конкретных звезд. PF простирается на высоте от 95 до 150 км и вытянут примерно вдоль геомагнитного поля, в то время как разброс высот STEVE составляет от 130 до 270 км. Схема показывает, что эти два явления STEVE и PF с большой вероятностью происходят на соседних силовых линиях магнитного поля.

На правой фотографии верхней панели рис. 19 показана привязка STEVE и структуры PF к высотам (от 100 до 300 км). Правее от нее показаны высотные нормированные профили синего, зеленого, и красного каналов, составленные из каждой строки пикселей матрицы от 0 до ~450 км. Под этой панелью показан график высотно-долготной зависимости конкретных пронумерованных (от 1 до 8) элементов PF.

На нижней панели слева рис. 19 показана обстановка в авроральном овале 16-09-2017, полученная по изображению ВУФ-эмиссии LBH λ с орбиты КА DMSP F18 в ~05.40 UT. Её интенсивность прямо пропорциональна потоку энергии высыпавшихся электронов Fe. Позиция горы Mount Robson, с которой была сделана фотография вверху слева, отмечена звездочкой внизу панели изображения ВУФ-эмиссии LBH λ . Справа от нее показана развертка спектрограммы энергетического распределения высыпавшихся частиц, полученная с помощью спектрометра SSJ5 с орбиты КА F18 в интервале 05.26-05.56 UT.

Рассмотрим пример динамики нейтральных ветров в субавроральной ионосфере, сопутствующей условиям для запуска процесса генерации STEVE на примере наблюдений 02-09-2016 из работы [Liang et al., 2021], показанный на рис. 20. В чем его особенности и какая гипотеза механизма образования условий, приводящих к возникновению STEVE? Сверху (слева) рисунка показана кеограмма в интервале 06.15-07.45 UT, а под ней 2 серии по 4 All-sky изображения, полученных на станции GACO ASI в интервалах 07.20.30-07.28.00 и 06.59.00-07.27.30 UT. На нижнюю серию All-sky изображений (a,b,c,d) зелеными мелкими стрелками нанесены направления нейтральных ветров, измеренные с помощью сканирующего доплеровского томографа (SDI scanning Doppler imager) (см. [Dhadly et al., 2015], и ссылки в ней), установленного на станциях GACO HAARP (HRP 62,39° Северной широты, 145,15° Западной долготы) и Poker Flat (PKR 65,12° Северной широты, 147,43° Западной долготы). SDI сканирует все небо и регистрирует более чем в ста точках неба доплеровское уширение и доплеровский сдвиг кислородных линий с длиной волны $\lambda 630$ и $\lambda 557,7$ нм на высотах >200 км. Поля обзора SDI на вышеуказанных станциях справа вверху рис. 20 обозначены красными и зелеными точками, причем поле обзора SDI на станции GACO - на темном фоне. Позиции станций PKR и GACO на них обозначены маленькими треугольничками с белой точкой внутри. Из данных при прямой видимости (LOS line-of-sight) доплеровского сдвига и доплеровского уширения были получены составляющие нейтральных ветров и нейтральной температуры. Показанный на рис. 20 пример демонстрирует, что нейтральные ветры усиливаются в западном и южном направлениях после активизации структур полярных сияний во время суббури (см. кеограмму) и демонстрируют тенденцию распространения от полярных широт к экватору, а в некоторых случаях (как на рис. 20) усиленные экваториальные ветры характеризуются резким прекращением/разворотом на определенной субавроральной широте, где развивается сильная конвергенция ветров. Эта схема сохраняется в течение ~15-20 минут, а затем возникает STEVE примерно на широте этой остановки. Обратим внимание, что STEVE появился в All-sky изображениях только после 07.15 UT.

На левой панели рис. 21 показан пример из серии All-sky изображений полученных 12-10-2021 в интервале 04.41-05.14 UT в обсерватории Strathmore (вблизи Calgary, Canada), которая демонстрирует динамику появления, развития и затухания SAR-дуги и дуги протонного сияния, возбужденного вторичными электронами. В этом событии сопутствующих структур PF не наблюдалось.

На правой панели рис. 21 показан пример выбранных из серии All-sky изображений, полученных 17 марта 2015 года в южном полушарии (Mount John Observatory (43,99° южной широты, 170,46° восточной долготы), в 200 км к северу от Dunedin, (45.95°S, 170.32°E), New Zeland) в трех колонках 09.27.01; 09.50.57 и 10.02.06 UT. Изображения (a) экспонировались в течение 10 сек

с интервалом между экспозициями 5 сек. При обработке они были разложены на три цвета (красный, зеленый и синий (b, c, d)). Ось All-sky камеры Canon EOS 5D Mark III с объективом EF8-15 мм f/4L была направлена не прямо вверх, а отклонена к югу от зенита на угол $\sim 35^\circ$. На изображениях юг (S) внизу и запад (w) справа. Видны 3 характеристики: ранняя ярко-красная дуга вытянутая с востока на запад, идентифицированная как дуга SAR (stable auroral red arc), более широкая на западе (в колонке изображений в 09.27.01 UT), а затем равномерная тонкая бело-пурпурная дуга, наблюдаемая в 09.50.57 UT, идентифицированная как STEVE (b) в средней колонке), и зеленые структуры PF, «наложенные» на STEVE в конце периода присутствия дуги (правая колонка (c)). Эти изображения представляют временную эволюцию трех разных явлений, наблюдаемых в субавроральных широтах. Панели (b, c и d) на рис. 21 показывают изображения, разложенные по красному, зеленому и синему цветовым каналам соответственно. В 09.27 UT красный канал - единственный, который показывает яркую дугу, без присутствия в зеленом и синем каналах. Яркое излучение на юге - это диффузное полярное сияние, которое появляется во всех каналах. Кроме того, наблюдается «темная» (еле различимая) дуга в зеленом канале, совпадающая с местоположением красной дуги. Скорее всего это протонная дуга (см. пункт 4.2.4). До сих пор нет ясности, может ли эта низкоинтенсивная эмиссия помочь объяснить последующие наблюдаемые структуры. О подобном снижении эмиссии "зеленой линии" сообщалось во время наблюдений STEVE (Yadav et al., 2021). Вклад только красного цвета сохраняется до ~ 09.44 UT, когда дуга становится равномерной уже и начинает появляться также в зеленом и синем каналах (средняя колонка). Вклад трех каналов согласуется с предыдущими наблюдениями за событиями STEVE и подтверждает их многоспектральный характер (Gillies et al., 2019; Mende & Turner, 2019). В 10.02 UT, видна структура PF (правая колонка) в основном в зеленом канале, в то время как красный канал «показывает» часть рассеянной дуги. Явная разница во вкладе каждого цветового канала в дугу подчеркивает различную природу явлений в 09.27 UT и 09.51 UT. На профиле AE-индекса 17-03-2015 видно, что дуга SAR возникла чуть позже основной фазы геомагнитной суббури. Переход в STEVE совпал с фазой восстановления после суббури (между ~ 09.30 и $\sim 10:00$ UT).

На нижней панели слева рис. 22 показан пример All-sky изображения SAR-дуги, выбранного в угле ($\Omega=80^\circ$), полученного 17-03-2015 в 09.33.45 UT на горе Mount John Observatory ($43,99^\circ$ южной широты, $170,46^\circ$ восточной долготы), в 200 км к северу от Dunedin (Новая Зеландия) [Martinis et al., 2022]. Это изображение показано на фоне еле видимой сетки географических координат и контуров островов Новой Зеландии. Синим цветом показана проекция на карту участка орбиты КА SWARM B на высоту 425 км, который пролетал на высоте 520 км в направлении на север. Справа на трех панелях друг под другом показаны результаты измерений характеристик плазмы, проведенных на орбите КА SWARM B: Ne (cm^{-3}); Te ($^\circ\text{K}$); и горизонтальную скорость ионов V_{hor} (m/s) в зависимости от времени. Ne и Te были получены с помощью зондов Ленгмюра, а V_{hor} был получен с помощью двух датчиков ионного теплового имаджера (ТИ) (Knudsen et al., 2017). Представляют интерес снижение плотности плазмы в 09.37.40 UT, наблюдаемый примерно на $\approx 45^\circ$ широты, достигающее $\approx 3 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, одновременное увеличение Te , достигающее 8000° K , и интенсивный поток плазмы в западном направлении, V_{hor} , достигает максимума $\sim 5,5$ км/с. Этот пик проявляется в виде узкого всплеска внутри более широкой структуры ($1,5\text{--}2^\circ$ широты), скорость которого достигает $\approx 2,5\text{--}3$ км/с, что является признаком SAID, внедренном в сильную SAPS или, более широкий SAID, о котором сообщалось ранее (Foster & Burke, 2002; Grocott et al., 2011).

На восьми панелях сверху рисунка (две колонки по 4) показана обстановка в южном авроральном овале 17-03-2015, полученная с помощью спектрографического ВУФ-имаджера SSUSI с орбиты КА DMSP F19 в 09.35 UT, а на правой панели внизу та же обстановка в ВУФ-эмиссии LBNI в координатах InvLat-MLT, отражающей поток энергии высыпавшихся электронов.

4.2.2. Условия в магнитосфере и верхней атмосфере и наиболее актуальная концепция аэрономического механизма генерации STEVE в субавроральной верхней атмосфере

Представленные выше примеры STEVE [Nishimura et al., 2023 и другие] показали, что наиболее часто эта аврора-подобная дуга появляется перед магнитной полуночью во время фазы восстановления крупных суббурь и длится $\sim 1\text{--}1,5$ ч (Gallardo-Lacourt et al., 2018; Yadav et al., 2022). Данные all-sky imager (ASI) сети программы THEMIS позволили определить, что протяженность дуги STEVE с востока на запад составляет $\sim 1900\text{--}2000$ км по азимуту ($\sim 2,5$ часа MLT), а продолжительность - $1\text{--}1,5$ часа. У STEVE сильная сезонная зависимость, где его частота наиболее высока в дни

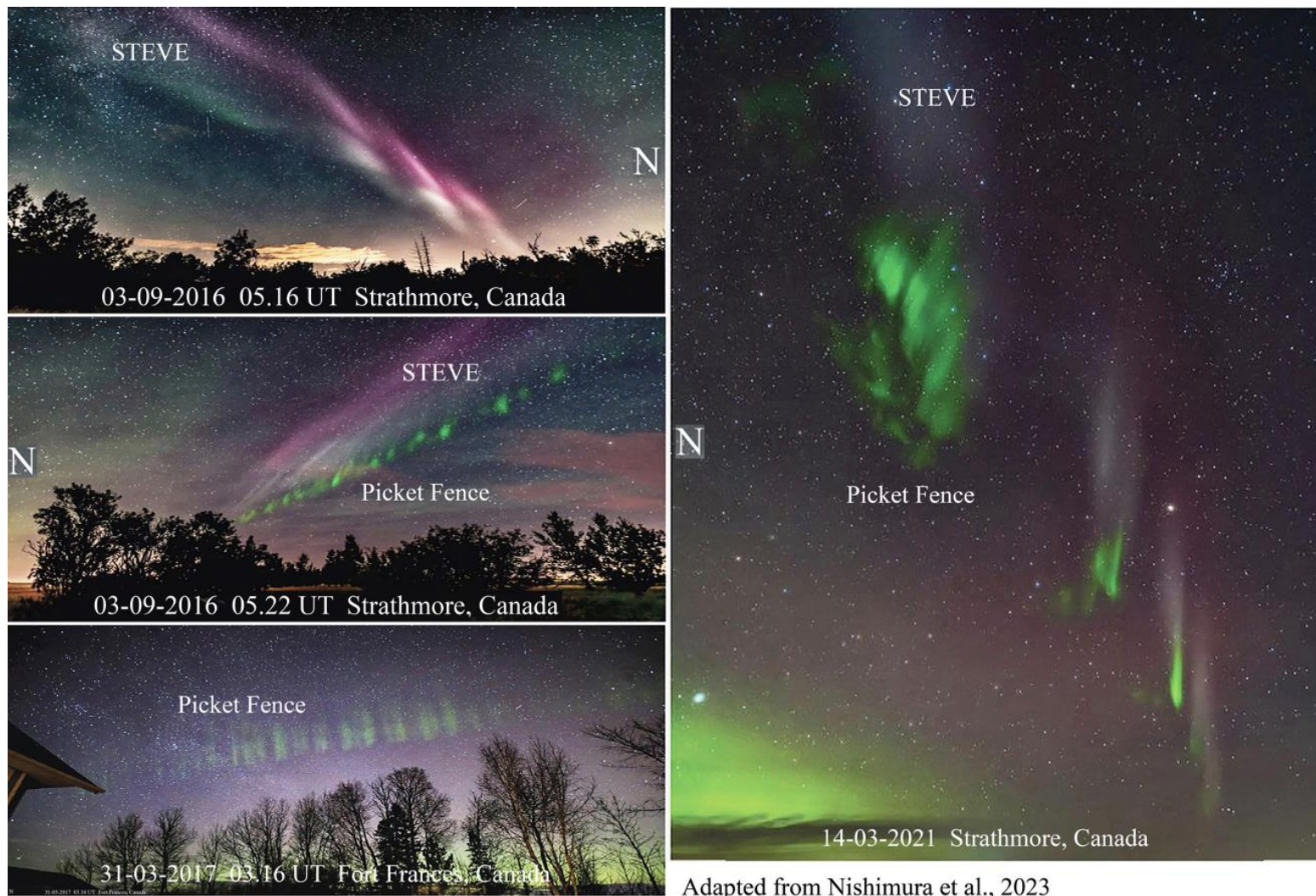
равноденствия. В отличие от типичных авроральных эмиссий, которые являются яркими в определенных спектральных линиях, пурпурно-лиловый цвет характеризуется непрерывным излучением на длинах волн 400-700 нм (Gillies et al., 2019). STEVE ассоциируется с SAID (subauroral ion drifts), восходящим потоком ионосферы, снижением плотности плазмы (провал), повышением температуры и электромагнитными волнами в продольных токах (MacDonald et al., 2018; Nishimura et al., 2019; Nishimura et al., 2020; Archer et al., 2019). Эти особенности обычно наблюдаются при усиленных субавроральных потоках (subauroral polarization streams (SAPS)), но они более выражены и сужаются в широтном направлении, когда появляется STEVE. В области самой дуги STEVE высыпания энергичных частиц отсутствуют.

В [Nishimura et al., 2020] были исследованы магнитосферно-ионосферные условия, которые связаны со STEVE и SAID во время фазы восстановления после суббури. При сравнении характеристик близких по мощности суббурь, произошедших 05-04-2010 и 01-02-2008, как с присутствием STEVE, так и без него соответственно (это сравнение можно увидеть на рис. 23), было обнаружено, что суббури со STEVE и SAID характеризуются суббуревым всплеском (serge) и восходящими токами, распространяющимися по мере авроральной активности на весь сектор времени от сумерек до полуночи. Местоположение инжекции суббури также смещалось в сторону сумерек, а при инжекции около полуночи произошел большой вклад электронов. Восходящие продольные токи R2 FACs (*occurrence of bifurcations of the Region 2*, см. Fig.3 в (Burch et al., 2005), также распространялись в направлении сумерек. Сравнение показало, что при суббуре, не приведшей к генерации STEVE, SAID отсутствовал, а суббуревая авроральная активность была локализована около полуночи, причем в инжекциях около полуночи в большей степени преобладали ионы.

Результаты моделирования с помощью RCM-E [Yang et al., 2012] подтвердили, что инжекция перед полуночью приносит больше электронов во внутреннюю магнитосферу до полуночи и сокращает расстояние между направленными к земле границами электронов и ионов до полуночи. При этом субавроральные поляризационные потоки SAPS (subauroral polarization streams) становятся более узкими перед полуночью (SAID) и ограничены узким разделением границ частиц, и широкая область SAPS перемещается на более темную сторону. С другой стороны, инжекция в полночь усилила SAPS, но не изменила радиальную ширину потока (flow). В этой ситуации электроны высокой энергии более эффективно проникают в околоземное пространство и создают более сильную плазменную струю. Мощный струйный поток и связанные с ним волновые процессы обеспечивают энергию для возбуждения эмиссии STEVE. Эти результаты свидетельствовали, что смещение области пересоединения в магнитном хвосте в сторону сумерек контролирует появление STEVE и SAID.

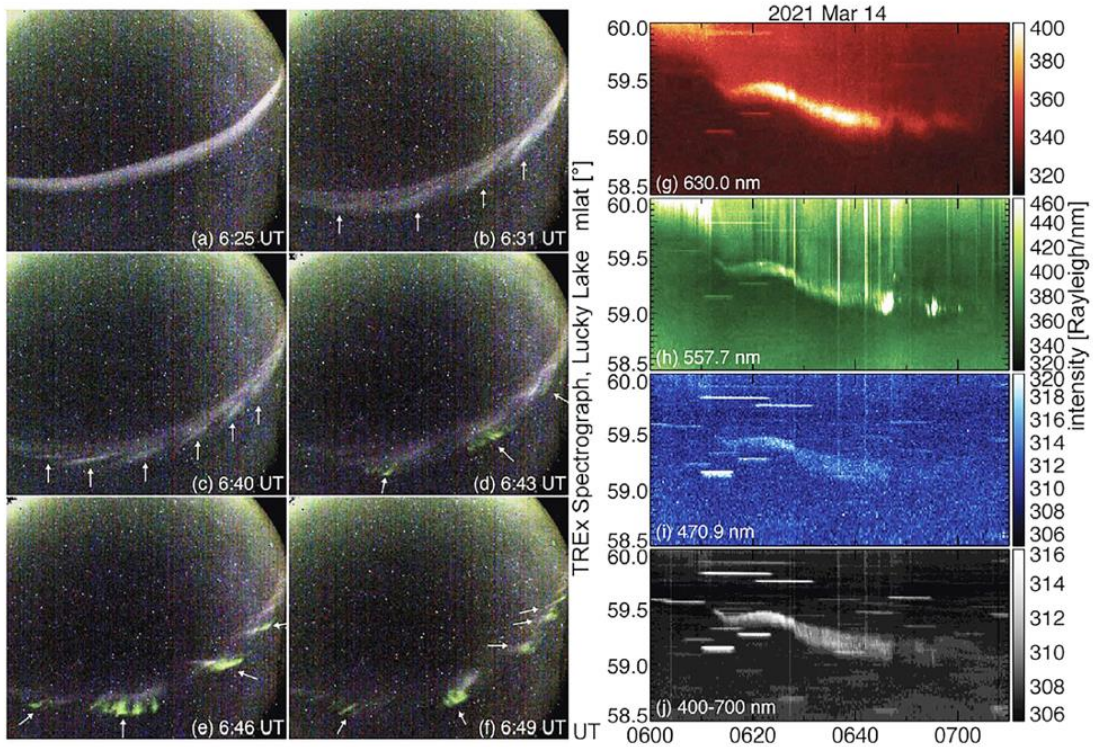
Результаты моделирования с помощью RCM-E [Yang et al., 2012] подтвердили, что инжекция перед полуночью приносит больше электронов во внутреннюю магнитосферу до полуночи и сокращает расстояние между направленными к земле границами электронов и ионов до полуночи. При этом субавроральные поляризационные потоки SAPS (subauroral polarization streams) становятся более узкими перед полуночью (SAID) и ограничены узким разделением границ частиц, и широкая область SAPS перемещается на более темную сторону. С другой стороны, инжекция в полночь усилила SAPS, но не изменила радиальную ширину потока (flow). В этой ситуации электроны высокой энергии более эффективно проникают в околоземное пространство и создают более сильную плазменную струю. Мощный струйный поток и связанные с ним волновые процессы обеспечивают энергию для возбуждения эмиссии STEVE. Эти результаты свидетельствовали, что смещение области пересоединения в магнитном хвосте в сторону сумерек контролирует появление STEVE и SAID.

Вернемся к роли нейтральных ветров, которая была показана на рис.20, в создании условий для появления STEVE. Нейтральные ветры усиливаются в западном и южном направлениях после усиления суббуревых полярных сияний и демонстрируют тенденцию распространения от полярных широт к экватору. Однако в некоторых случаях усиленные экваториальные ветры характеризуются резким прекращением/разворотом на определенной субавроральной широте, где развивается сильная конвергенция ветров.



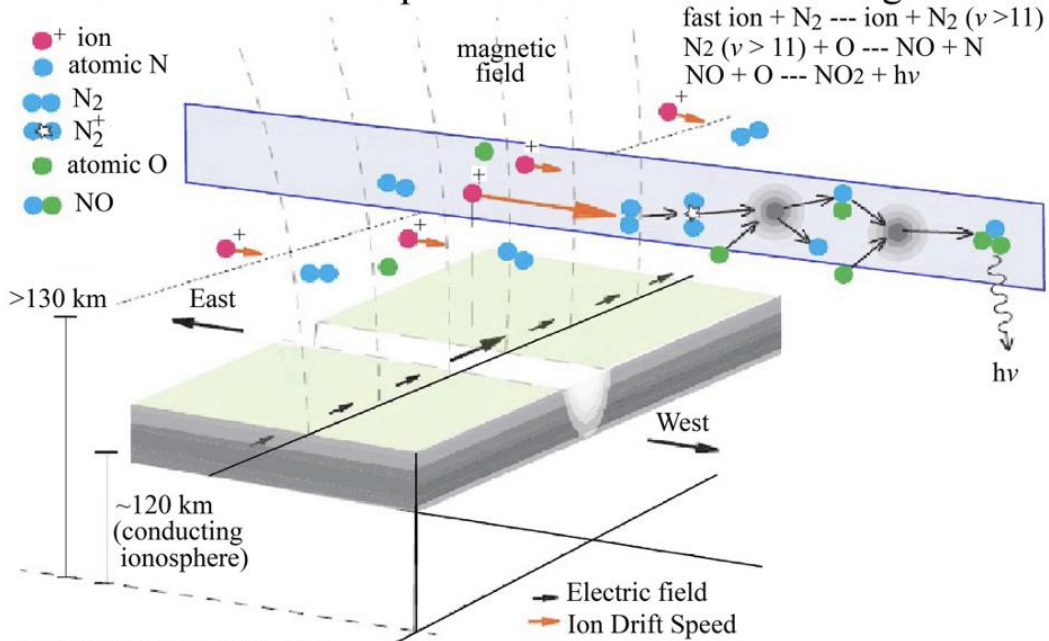
Adapted from Nishimura et al., 2023

Рис. 16. Фотографии вариантов одновременных сочетаний аврора-подобных структур STEVE, PF, и (иногда) сопутствующих им FAEs (streaks), сделанные фотографами-любителями в Канаде в разное время. Снимки адаптированы из [Nishimura et al., 2023]. Направления на север на фотографиях обозначены буквой N. Комментарии к фотографиям см. в тексте



Adapted from Nishimura et al., 2023

Actual modeled conception mechanism of STEVE generation



Adapted from Harding et al., 2020

На Рис. 17. На трех верхних панелях All-sky изображений, полученных в 14-03-2021 в интервале 06.45-06.49 UT на озере Lucky Lake, Canada, показана эволюция события появления и развития STEVE, фотография которого, сделана в 06.49 UT в Strathmore (Канада) и показана на правой панели рис. 16. All-sky изображения сопровождаются развертками интенсивности от магнитной широты в 3х конкретных длинах волн и в непрерывном спектре) на 4х панелях справа сверху. Эти развертки-кеограммы получены с помощью изображающего спектрографа (Transition Region Explorer (TREx)) на озере Lucky Lake, Canada в интервале 06.00-07.30 UT. STEVE появился около 06.10 UT и был виден на всех показанных длинах волн, включая континуум airglow.

Внизу показана концептуальная схема аэрономического механизма генерации STEVE, смоделированного в [Harding et al.,2020] (см. текст)

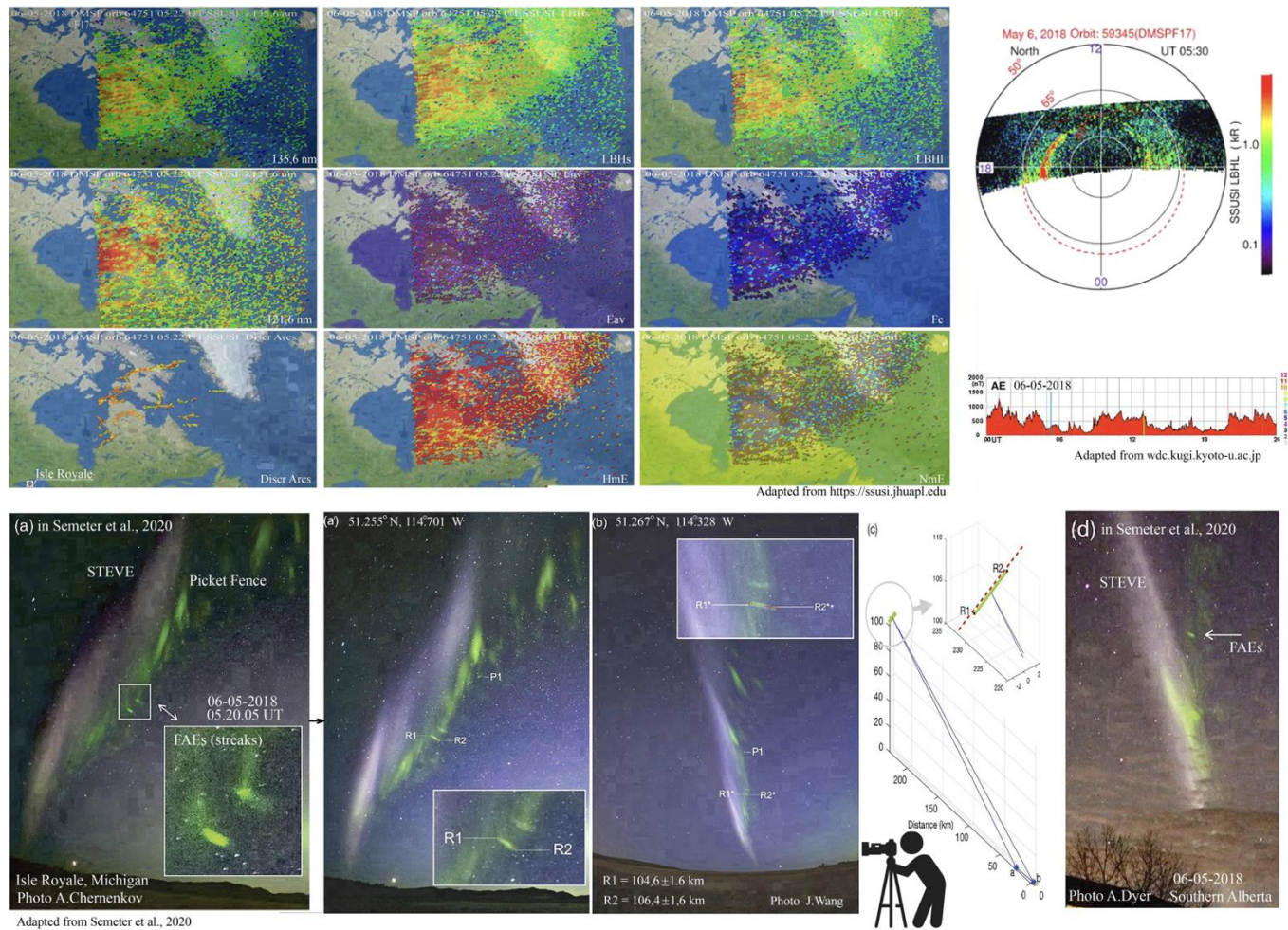


Рис. 18. Внизу серия фотографий аврора-подобных структур и схема их высотной триангуляции. Фотографии сделаны 06-05-2018 из разных точек почти одновременно фотографами-любителями с острова Isle Royale, Michigan и Southern Alberta, Canada, они адаптированы из [Semeter et al., 2020]. Комментарии см. в тексте. Вверху на 9-и панелях показан локальный участок обстановки в авроральном овале, полученной в ~05.20 UT по изображениям ВУФ-эмиссий с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI с орбиты КА DMSP F17 06-05-2018. Позиция Isle Royale помечена маленькой звездочкой слева внизу панели Discr Arcs. а справа та же обстановка в северной полусфере в координатах InvLat-MLT, полученная с помощью изображающего ВУФ-спектрографа SSUSI с орбиты КА DMSP F18 06-05-2018 в ~05.30 UT. Под ней представлен развертка AE-индекса 06-05-2018

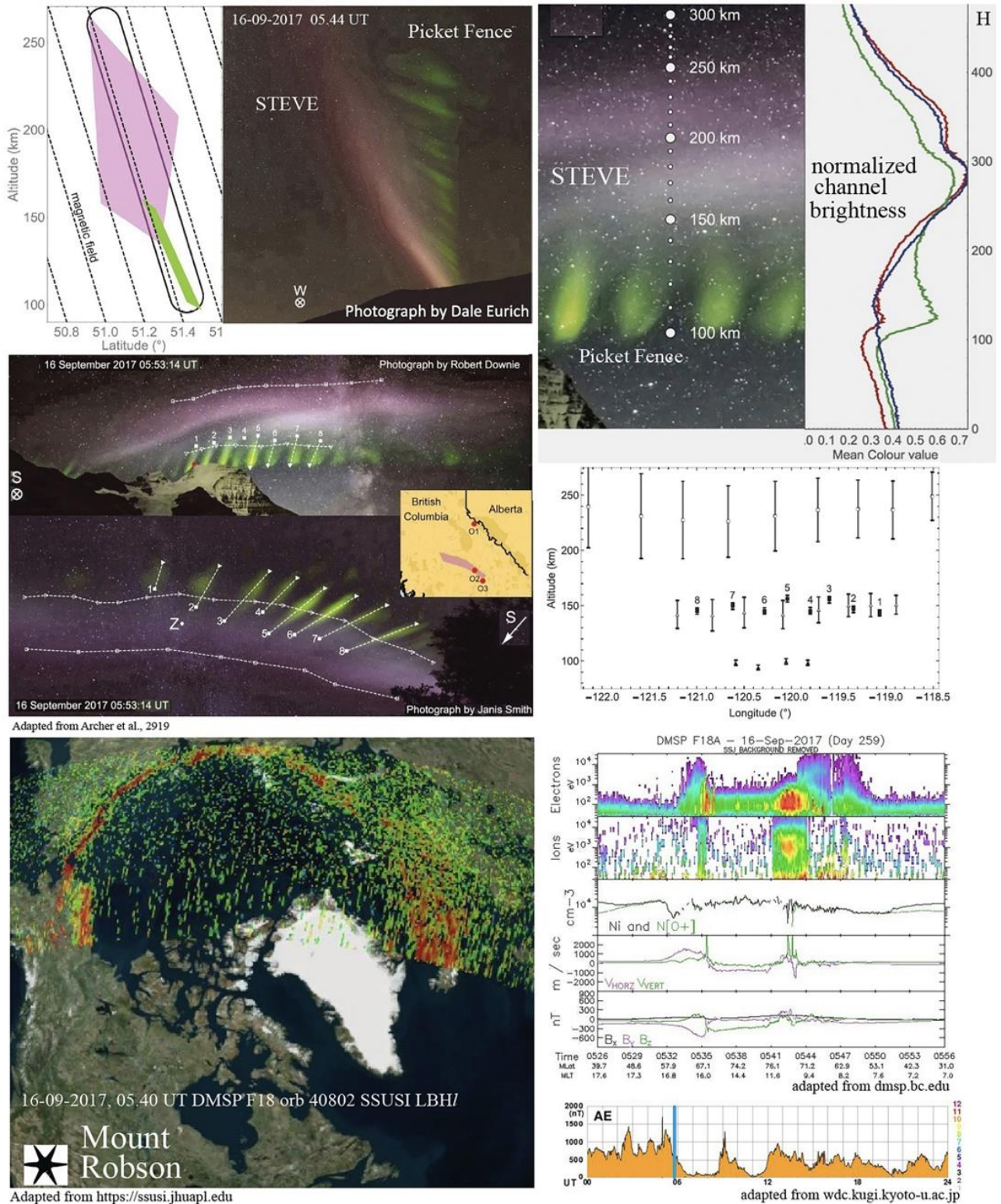


Рис. 19. Со-расположение STEVE и Picket Fence по отношению к линиям магнитного поля по фотографиям любителей, сделанным 16-09-2017 в 05.44 UT в округе British Columbia (Канада) (Archer et al., 2019). Справа высотное распределение интенсивности эмиссий в STEVE и PF. На второй и третьей панели сверху друг по другом показаны фотографии STEVE и PF, сделанные там же в разных ракурсах с разных точек примерно на 10 минут позднее, а на правой панели сверху приведен график высотного расположения STEVE и PF в зависимости от долготы

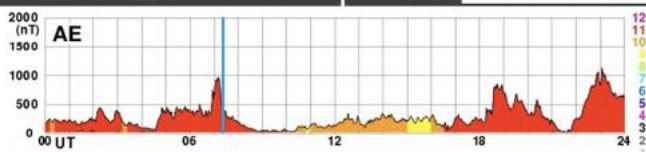
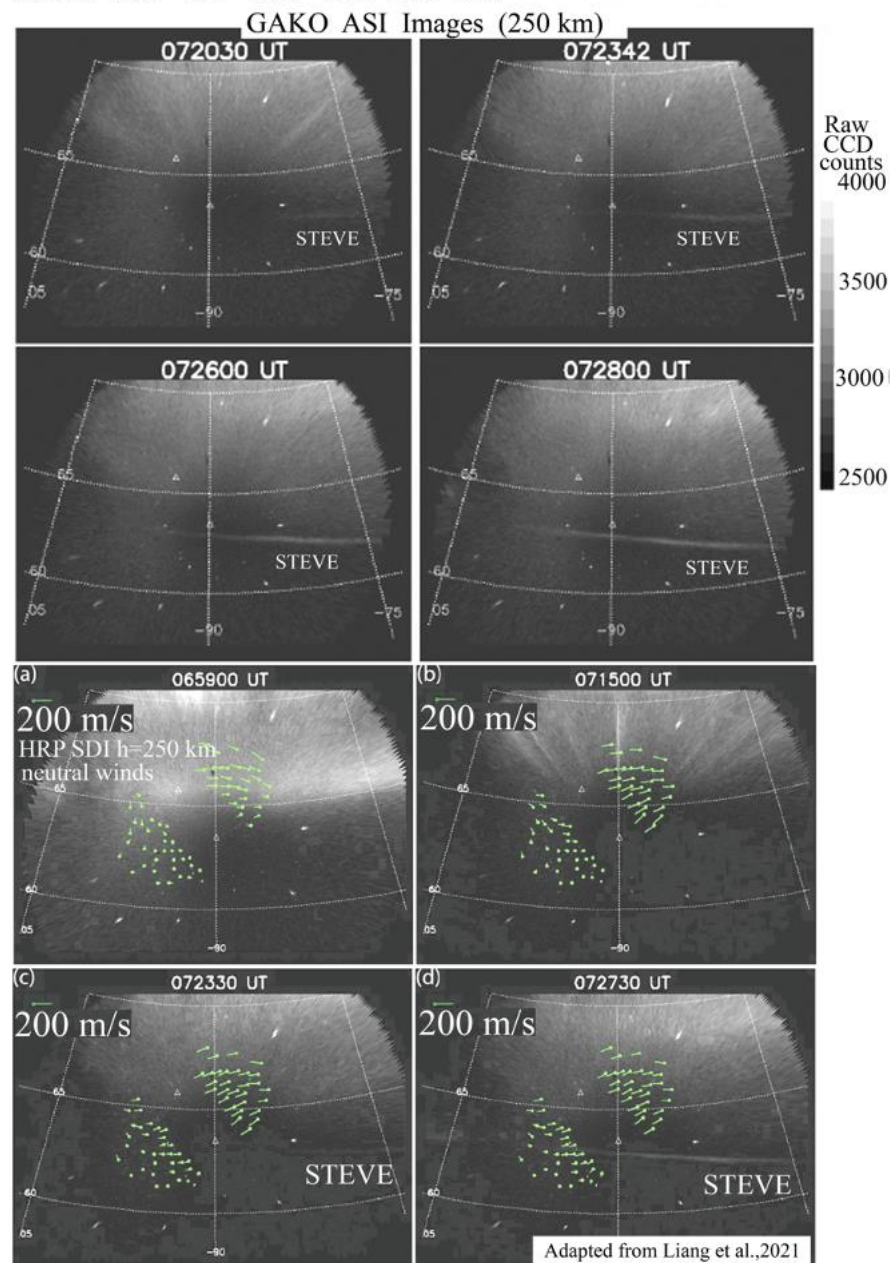
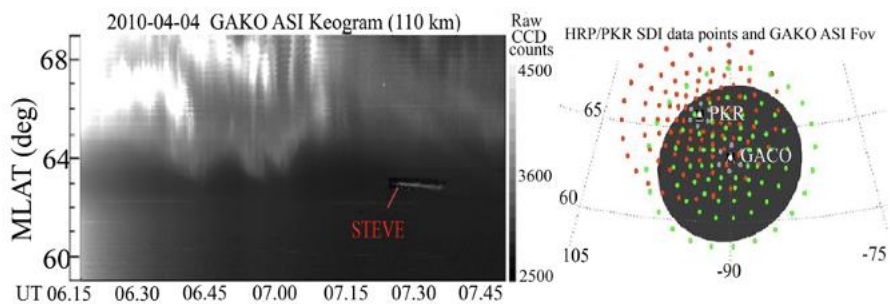


Рис. 20. На верхней панели слева показана кеограмма, позиция STEVE на ней указана красной стрелкой. На нижних панелях показаны две черно-белых серии по 4 All-sky изображений, полученных 04-04-2010 на станции GACO ASI с высоты ~250 км [Liang et al., 2021], на которых видно отсутствие, а затем появление STEVE. На верхней серии изображения были получены в интервале 07.20.30-07.28.00 UT, а на нижней серии – в интервале 06.59.00-07.27.30 UT. Шкалы интенсивности показаны справа от фотографий. С целью демонстрации гипотезы о влиянии нейтральных ветров, определяющих условия в термосфере на стадии восстановления после суббури, приводящих к генерации STEVE, на нижнюю серию All-sky-изображений мелкими зелеными стрелками нанесены направления нейтральных ветров, измеренных с помощью сканирующего доплеровского томографа (SDI scanning Doppler imager), установленного на станциях HRP GACO (62,39° Северной широты, 145,15° Западной долготы) (см. текст)

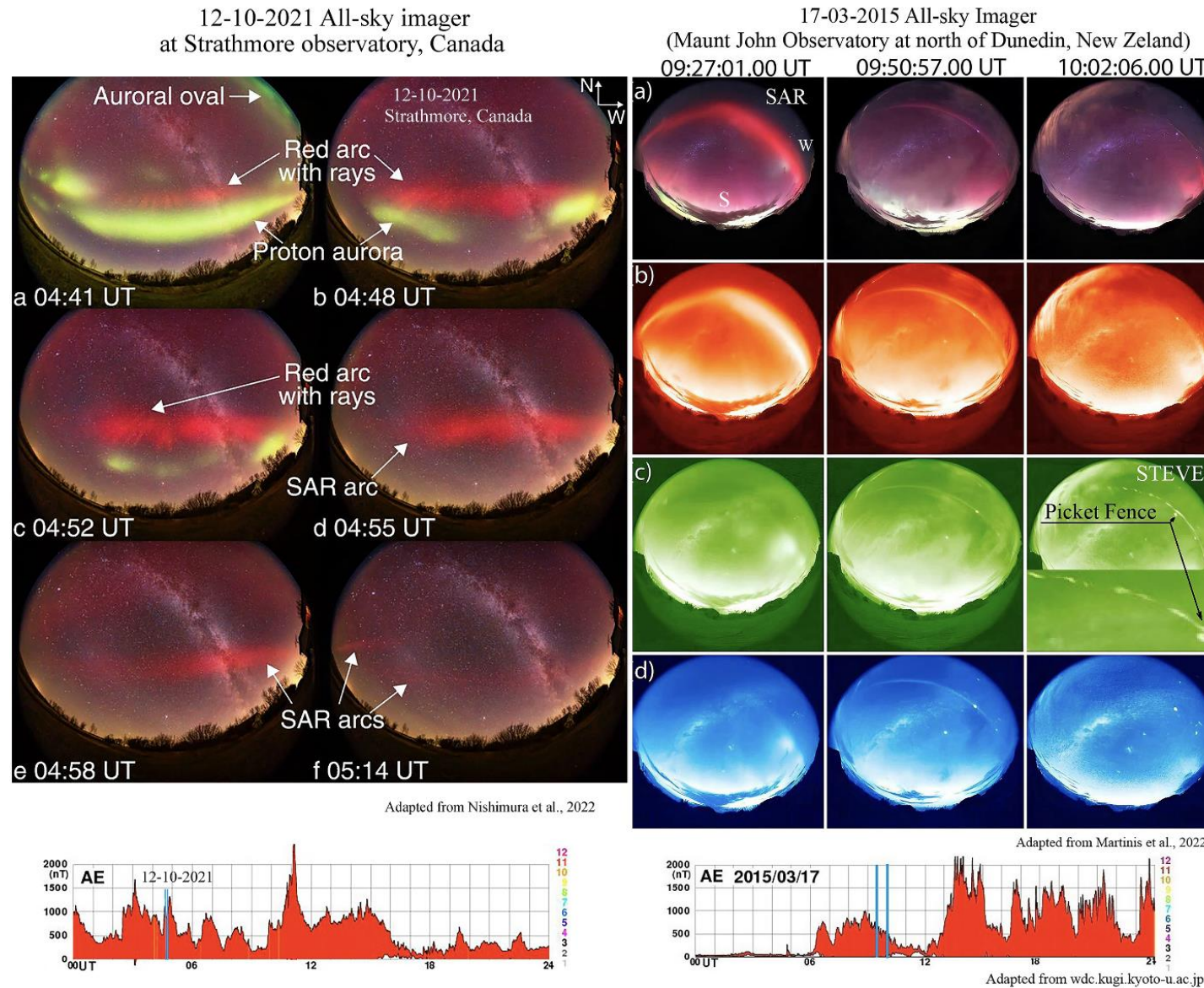


Рис. 21. (левая панель) Серия цветных All-sky изображений, полученных 12-10-2021 в обсерватории Strathmore (near Calgary, Canada) в интервале, 04.41-05.14 UT, демонстрирующих сорасположенность SAR-дуги и зеленой эмиссии от вторичных электронов выпадающих протонов; (правая панель) серия цветных All-sky изображений, полученных 17-03-2015 в интервале получаса (с 09.27.01 по 10.02.06 UT) в обсерватории на горе Mount John на севере от Dunedin (Новая Зеландия), которые на стадии восстановления суббури показывают динамику преобразования SAR-дуги в STEVE и далее в структуру PF. (см. текст). Условия развития суббури (AE-индекс) показаны на панелях внизу соответственно

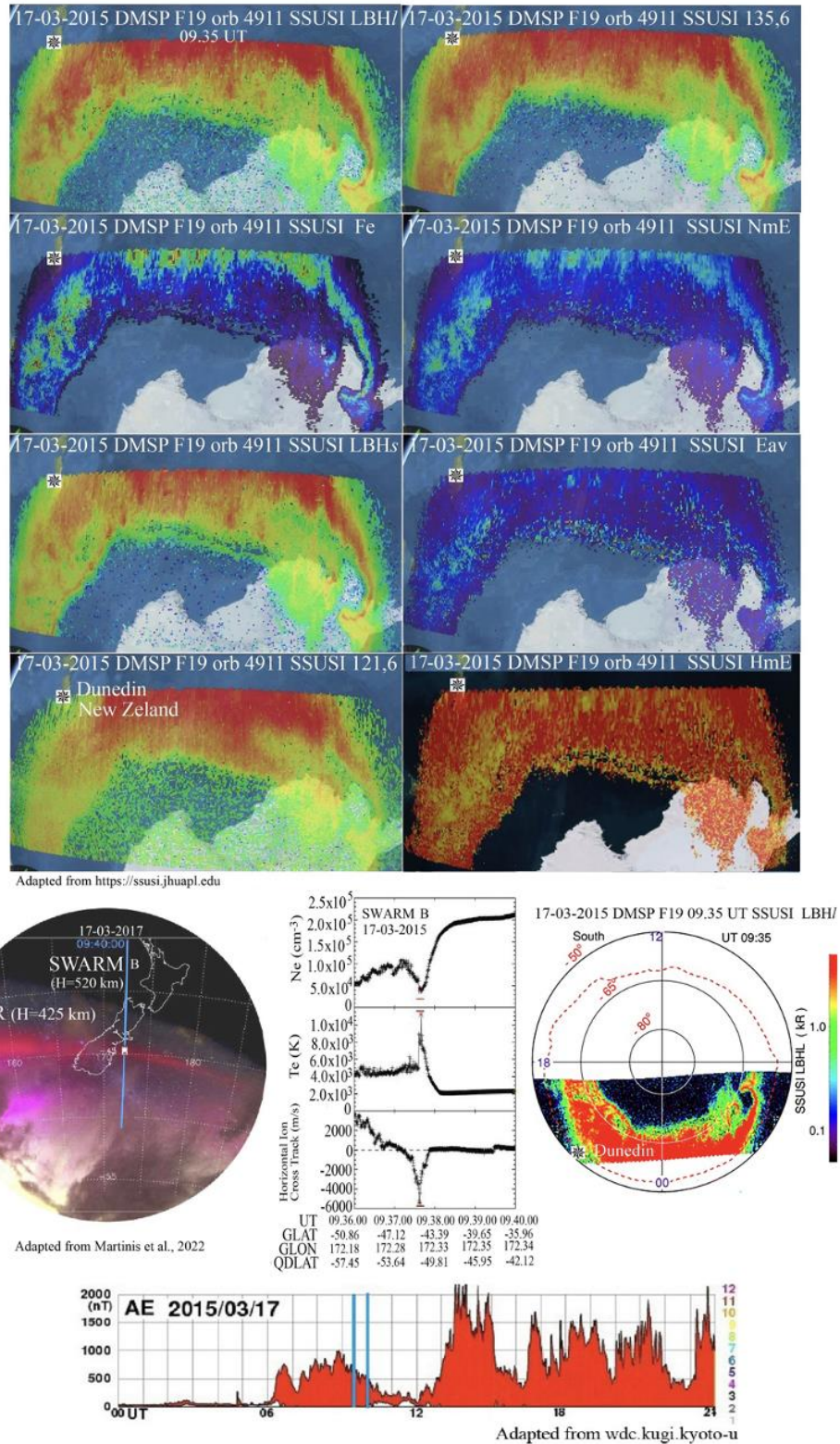


Рис. 22. Внизу слева SAR-дуга на All-sky изображении, полученном 17-03-2015 в 09.27 UT в обсерватории на горе Mount John на севере от Dunedin (Новая Зеландия). На изображении наложена проекция орбиты КА SWARM B, пролетавшего над районом Dunedin в 09.40 UT на высоте 520 км, на котором измерялись характеристики плазмы, показанные справа от изображения. Градиенты N_e , T_e , и V_{hor} при пролете над SAR-дугой, наблюдавшиеся примерно в 09.37.40 UT, являются признаком SAID, ввернутым в сильную SAPS или, более широкий SAID. Обстановка в южном авроральном овале в 09.30-09.35 UT показана на серии верхних панелей (БУФ-эмиссии и рассчитанные из них Fe, E_{av}, NmE, H_{mE}). Позиция Dunedin показана на них звездочкой

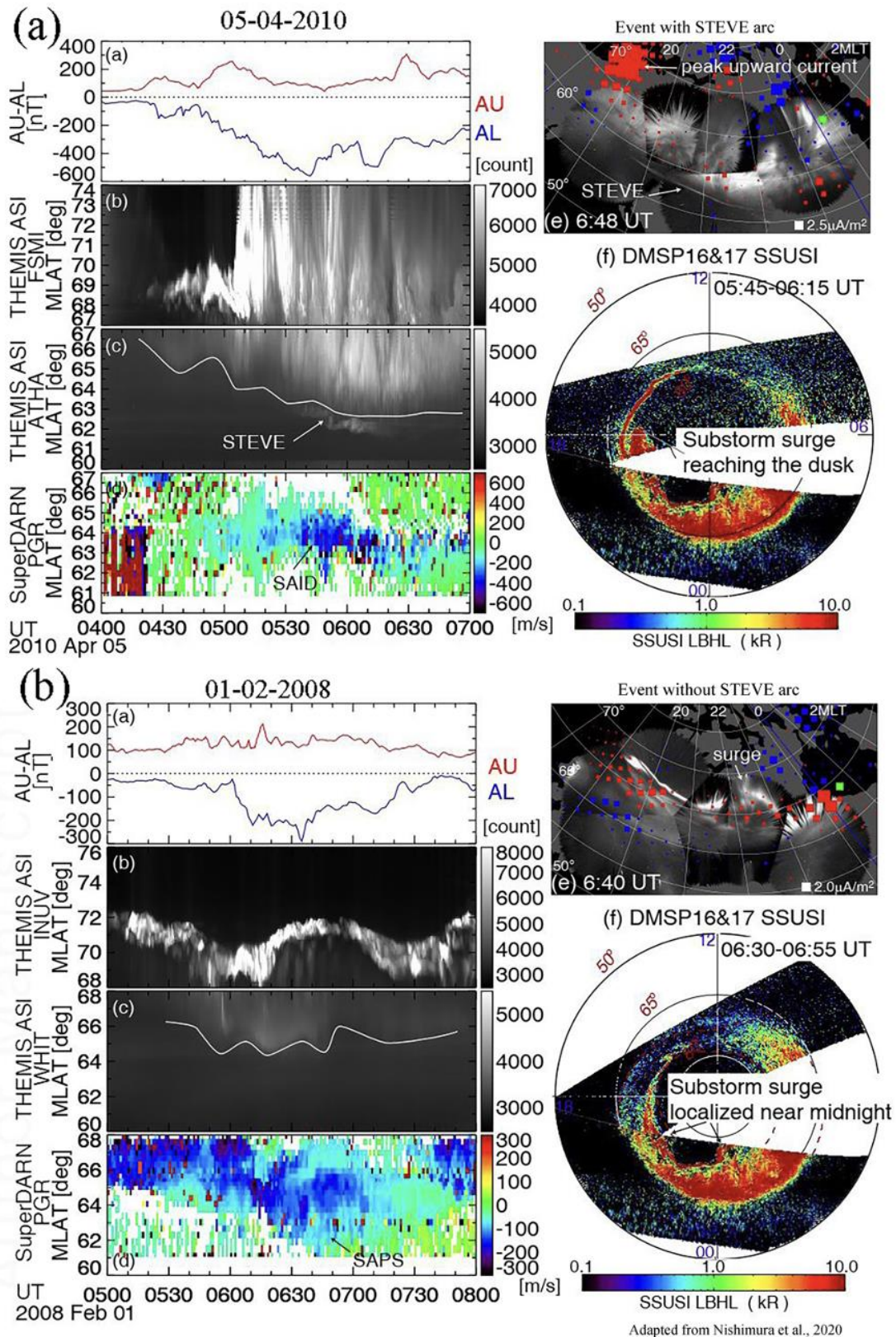


Рис. 23. Результаты наблюдений двух суббурь по данным, КА DMSP 16 и 17, SuperDarn, и All-sky THEMIS ASI [Nishimura et al., 2020]. На верхней панели (a) характеристики суббури, произошедшей 05-04-2010, динамика развития которой привела к возникновению структуры STEVE на экваториальном краю аврорального овала. На нижней панели (b) характеристики суббури, произошедшей 01-02-2008, в результате которой структура STEVE не образовалась

Эта схема сохраняется в течение ~15-20 минут, а затем возникает STEVE примерно на широте этой остановки. Сила южного ветра усиливается, а конвергенция ветра, как правило, слабее или отсутствует при суббури, в время которых STEVE не возникает. Было предположено, что усиленные экваториальные ветры могут переносить соответствующие нейтральные специ, которые являются ключевыми для образования airglow свечения STEVE на субавроральных широтах, и создавать условия для их накопления на широте остановки экваториальных ветров из-за сильной конвергенции там. Такой эффект переноса/накопления, вызванный нейтральными ветрами, может приводить к образованию резервуара нейтральной составляющей. Когда SAID (subauroral ion drift) и область высокой электронной температуры и конвективного потока пересекают этот резервуар, из-за высокой кинетической энергии ионов и температуры электронов ионы будут активно взаимодействовать с повышенными концентрациями нейтральных компонент (см. Harding et al., 2020), при этом интенсивность хемилюминесцентного свечения airglow будет постепенно увеличиваться до обнаруживаемой яркости, и после превышения определенного визуального и инструментального порога чувствительности, может возникать дуга STEVE. Эти структуры хорошо видны на рис.16-20,23 (см. далее). Было также установлено, что этот эффект согласуется с рассчитанной временной шкалой ионно-нейтрального взаимодействия (Nishimura et al., 2020). Gallardo-Lacourt et al. (2018) показали, что STEVE чаще всего появляется примерно через 50-80 минут после начала суббури, как например на рис. 23(a).

В (Harding et al., 2020) был смоделирован и описан вероятный аэрономический механизм, объясняющий непрерывное излучение в STEVEs, схема которого была представлена на нижней панели рис.17. Молекулы азота, возбужденные до более высокой энергии колебаний столкновениями со сверхзвуковыми ионами, преодолевают энергию активации по реакции $N_2 + O \rightarrow NO + N$. Образовавшиеся в результате ионы NO могут соединяться с окружающими атомами O, образуя NO_2 , и при этом появляется спектрально-непрерывное airglow излучение STEVE (см. реакции (1) и (2)). Поскольку этот механизм действует только там, где ионы движутся со скоростью $E \times B$, это объясняет, почему STEVEs наблюдаются выше 130 км. Предложенный механизм также объясняет, почему STEVE наблюдаются только при высокоскоростных потоках SAIDs частиц, таких как 3 эВ (эквивалент до 4,4 км/с для иона NO^+ или 6,0 км/с для иона O^+), необходимых для возбуждения N_2 до состояния $v > 11$ и, таким образом, вызывает реакцию (1). Несовпадение между тонкой переходной дугой и обычно длительным химическим временем жизни NO «устраняется» одновременным выделением N, что сокращает время жизни до секунд.



Хотя результаты вычислений подтверждают предложенный механизм, необходима проверка с помощью наблюдений [Harding et al., 2020]. Наблюдения на месте (например, с платформы зондирующей ракеты) или дистанционно за повышенным содержанием NO и/или O были бы наиболее прямыми, и могли бы подтвердить этот механизм, а регистрация повышенных значений N при этом могла бы быть косвенным подтверждением реакции (1). Harding et al., 2020 смоделировали этот механизм, используя простую фотохимическую модель, чтобы продемонстрировать его обоснованность. Этот механизм инициируется быстрыми потоками ионов и, таким образом, отличается от процессов полярного сияния и процессов airglow.

4.2.3 Что известно о характеристиках PF и процессе их генерации?

Знания о PF более ограничены, чем о STEVE [Nishimura 2023]. PF обычно появляется вместе со STEVE, но STEVE может появляться и без сопутствующей структуры PF. Как показано на рис. 2, бывают ситуации, когда PF может присутствовать без STEVE (нижняя панель слева на рис. 16). Обе структуры, как STEVE, так и PF дрейфуют на запад, но PF движется значительно медленнее (Gillies et al., 2020). Какие процессы определяют возникновение, скорость дрейфа и продолжительность PF? Также неясно, какие условия определяют длину волны свечения PF?

Особенность PF заключается в том, что его структура может быть локализована на небольшом участке пространства. В то время как PF обычно образует дугу со множеством лучей (средняя и нижняя панели слева на рис. 16), на правой панели рис.16 видно, что PF может состоять всего из нескольких

лучей несмотря на то, что структура более протяженная. Пока нет объяснения, какие механизмы могут ограничить PF небольшой частью STEVE. У STEVE на этой фотографии есть небольшой излом возле PF. Дисторсия потокового канала SAID flow channel или градиента плотности могут играть определенную роль в формировании PF [Nishimura et al., 2023]. Важно определить структуру потока и плотности вдоль STEVE, чтобы понять, как формируется PF.

Хотя PF первоначально распознавались как периодические лучевые структуры (по аналогии с «частотным забором»), высокоскоростная визуализация показала, что PF также имеет мелкомасштабные структуры (Semeter et al., 2020). PF может иметь волнообразную модуляцию, и под ним могут появляться зеленые полосы. В то время как PF дрейфует на запад вдоль STEVE, зеленые полосы появляются по направлению к полюсу STEVE и дрейфуют в сторону STEVE. PF на правой панели рис.16 показывает такие полосы под PF. Интенсивность излучения в динамичной структуре PF может изменяться во времени, и простое понятие лучевых структур PF может неправильно представлять фактическую форму зеленого излучения.

Еще один важный вопрос - какую роль играет магнитосфера в создании PF. Хотя структура зеленых лучей напоминает лучевые дуги полярных сияний, которые создаются энергичными электронами, высыпавшимися из магнитосферы, до сих пор нет единого мнения о том, участвует ли высыпание электронов в механизме генерации PF. Несколько работ подтверждают гипотезу о высыпаниях. Во время присутствия PF потоки энергичных электронов фиксировались на низко-высотных орбитах КА [Nishimura et al., 2019]. Высотный профиль зеленой эмиссии может быть объяснен высыпанием энергичных электронов [Bennett and Bourassa, 2021]. Моделирование неустойчивости обратной связи показало, что электроны ускоряются вдоль силовых линий магнитного поля и создают волновую структуру вдоль STEVE [Mishin and Streltsov, 2019; 2022]. С другой стороны, в PF наблюдалось минимальное значение эмиссии N_2^+ 1NG, но более интенсивное излучение N_2 1PG, и, поэтому для возбуждения PF требуется энергия $< 18,75$ эВ (Mende et al., 2019). Мелкомасштабные структуры PF, упомянутые выше [Semeter et al., 2020], предполагают, что за PF ответственны волны или их турбулентность в ионосфере.

4.2.4 Связь SAR-дуг с субавроральным протонным сиянием и структурой STEVE

В [Nishimura et al., 2022] были проанализированы All-sky изображения субавроральных эмиссий, полученные: 12.10.2021 в Strathmore, Canada (см. левую панель рис. 21); 07.04.2016 в Orimatillia, Finland; 04.11.2016 в Ikaalinen, Finland, и идентифицирована повторяющиеся последовательности протонных полярных сияний и субавроральной красной дуги (SAR) во время суббури. Последовательности начались с пары зеленых диффузных эмиссий и красной дуги, которые дрейфовали к экватору во время фазы расширения суббури. Одновременные спектрографические и спутниковые наблюдения показали, что это было субавроральное протонное сияние, где ионные высыпания создавали вторичные электроны, которые возбуждали полярное сияние с зеленым и красным цветами. Лучевые структуры в красной дуге также указывали на существование низкоэнергичных высыпаний электронов. Затем зеленое диффузное полярное сияние исчезало, а красная дуга (SAR-дуга) продолжала двигаться к экватору во время фазы восстановления суббури. Было высказано предположение, что в этой последовательности дуга SAR сначала генерировалась вторичными электронами, связанными с высыпанием ионов (протонов), а затем явление могло перейти в тепловой поток или джоулев нагрев. Протонное сияние обеспечило наблюдательные доказательства того, что инжекция ионов во внутреннюю магнитосферу является источником энергии для инициирования дуги SAR.

На правой панели рис.21 (см. п. 4.2.3) была рассмотрена серия All-sky изображений, полученных в разных цветах в 09.27.01; 09.50.57 и 10.02.06 UT 17-03-2015 в южной субавроральной области вблизи Dunedin (Новая Зеландия) [Martinis et al., 2022]. На панели (с) была в 09.27.01 UT на севере была видна совсем слабая зеленая дуга, которая скорее всего была возбуждена тоже вторичными электронами от высыпавшихся протонов.

Как мы убедились, дуга STEVE, дуга SAR и субавроральное излучение, возбужденное вторичными электронами от высыпавшихся протонов, вместе или порознь являются основными оптическими излучениями в субавроральной ионосфере перед полночью. Как правило, эти три типа субавроральных эмиссий часто изучаются по отдельности, а взаимосвязи механизмов их генерации недостаточно исследованы. Ограниченные исследования показали, что STEVE может возникнуть

после протонного сияния (Nishimura et al., 2020) и что SAR-arc может перейти в STEVE (Martinis et al., 2022). Субавроральные эмиссии не являются исключительными друг для друга, но STEVE и SAR-дуга могут находиться рядом друг с другом одновременно (Liang et al., 2019; Chu et al., 2019; Martinis et al., 2021). Сообщалось также, что протонное сияние и красная дуга, которая позже переходит в дугу SAR, сосуществуют во время суббури (Nishimura et al., 2022). Однако STEVE не был замечен в этих событиях.

STEVE, дуги SAR и протонные полярные сияния возникают во время суббури, и они связаны с инъекциями частиц во внутреннюю магнитосферу и быстрыми потоками плазмы в субавроральной ионосфере. Несмотря на пространственную близость, три типа эмиссий, как правило, происходят раздельно, и пока непонятно, как магнитосферно-ионосферная система контролирует их возникновение в сходных условиях. Переход между двумя типами эмиссий (от SAR к STEVE) указывает на то, что драйверы этих двух типов эмиссий могут переключаться с одного явления на другое во время суббури, например, скорость потока SAPS увеличивается и останавливается уже при переходе от протонного сияния или дуги SAR к STEVE. Одновременное существование STEVE и SAR-дуги предполагает, что интенсивный SAIDs и более слабый канал потока SAPS (Subauroral polarization streams) расположены рядом друг с другом. Наблюдения за временной эволюцией потока и структур частиц необходимы для определения того, какие условия магнитосферно-ионосферной системе изменяются во время перехода от SAR к STEVE?

Резюме. Рассмотрены характеристики и условия генерации ряда аврора-подобных структур, а именно: FAEs (fragmented aurora-like emission(s)); мелкие полос (streaks) в области полярной границы аврорального овала; характеристики SAR-дуг, зеленых «протонных» дуг, а также - иногда сопровождающих их STEVE и структур «Picket Fence», встречающихся в субавроральных областях в условиях фазы восстановления после суббури. Далеко не все свойства и взаимосвязи перечисленных структур понятны и объяснены. Остается многочисленный ряд вопросов, которые были поставлены в недавних работах (Dreyer et al., 2021; Nishimura et al., 2022, 2023; Gillies et al., 2023; Martinis et al., 2022 и др.).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Главной целью при подготовке второй части Атласа было на конкретных примерах отобразить многогранность условий и многообразие структур, возникающих в разных секторах MLT полярной и субполярной ионосферы, которые проявляются в мелкомасштабных авроральных и аврора-подобных структурах и сопутствующих им градиентов электронной концентрации. Информация о характеристиках рассмотренных структур и механизмах их генерации необходима для развития реальной аналитической системы диагностики проблем, возникающих при распространении трансполярных сигналов, в том числе навигационных КА в конкретных условиях.

Во статье был рассмотрен ряд примеров авроральных и аврора-подобных структур и их характеристик таких как: пример динамического отклика ионосферы на усиление на приполюсной границе аврорального овала PBIs; примеры «пылающих» структур полярных сияний (Flaming aurora) и ряд примеров сопутствующих им отраженных (эхо) сигналов некогерентных радаров обратного рассеяния в арктической ионосфере (NEIALs); ряд примеров фрагментированных авроральных и аврора-подобных структур разных масштабов с различными свойствами, включая FAEs; SAR-дуги; STEVE; PF и других. Так же, как и в части 1, все рассмотренные в части 2 структуры являются продукцией ряда процессов в системе магнитосфера-ионосфера-термосфера, которые отчасти были рассмотрены выше. В генерации почти всех рассмотренных структур принимают участие волны и/или плазменные неустойчивости разных типов. Все рассмотренные структуры так или иначе отражаются в неоднородностях N_e , возникающих в полярной ионосфере во время возмущенных геомагнитных условий и суббури. Почти все представленные примеры сопровождаются обстановкой в части областей аврорального овала, отображаемых в среднемасштабных изображениях ВУФ-эмиссий, полученных в относительно близкое к рассматриваемым событиям время с орбит конкретных КА DMSP, и рассчитанных из них характеристик высыпающихся электронов Fe, E_{av} , и N_mE , H_mE .

В заключении приводим ряд вопросов относительно взаимосвязи и механизмов генерации авроральных и аврора-подобных структур, оставшихся как у авторов рассмотренных многочисленных относительно-недавних исследований, так и у авторов этой работы, разрешение которых, необходимо не только при дальнейшем моделировании процессов, но и с помощью комплексных серийных

измерений ряда характеристик плазмы в конкретных областях с помощью наземных оптических, радарных, а также орбитальных и ракетных средств диагностики. Кроме того, необходимо проведение моделирования процессов в системе магнитосфера-ионосфера-термосфера, приводящих к генерации условий для конкретных плазменных неустойчивостей (см. текст), которые, в конечном счете, приводят к образованию структур: PBIs; NEIALs; и FAEs, примеры которых мы рассмотрели выше. Также необходимо получить дополнительные аргументы для понимания того, как формируются мелкомасштабные структуры STEVE и PF, учитывающие экстремальные скорости и нагрев ионов и нейтралов, чтобы ответить на вопросы, какие химические и динамические процессы происходят в субавроральной области, и какую степень интенсивности наблюдаемых структур они могут объяснить. Открытыми вопросами являются природа механизмов их генерации, например, вызваны ли FAEs категорий 1 и 2 одним и тем же механизмом, действительно ли FAEs категории 2 модулируются волновой активностью, и, если да, то какого рода волнами, являются ли они исключительно высокоширотным явлением, и какие пороговые значения параметров ионосферы необходимы для возникновения FAEs ? (Dreyer et al., 2021). Данные ESR свидетельствуют о том, что FAEs связаны со значительно повышенными электронными температурами на высотах 110-120 км, для которых неустойчивость Фарлей-Бунемана является единственной известной причиной на этих малых высотах. Любая концепция механизма генерации FAEs должна объяснять, почему они не наблюдаются чаще. Современные достижения в области технологии получения изображений облегчили распознавание FAEs, поэтому они могут оказаться распространенными и на большей высоте. Результаты дальнейших наблюдений должны помочь объяснить физические механизмы FAEs.

Вопросы, касающиеся генерации STEVE и PF, как результат реагирования субавроральной части взаимодействия в системе магнитосфера-ионосфера-термосфера:

- 1) Как солнечный ветер и условия геомагнитных бурь и авроральных суббурь управляют STEVE?
- 2) Почему STEVE встречается редко несмотря на то, что генерация STEVE, «не нуждается» в экстремальных драйверах?
- 3) Каковы пространственные и временные масштабы в структурах STEVE и его элементах?
- 4) Какие механизмы способствуют генерации и определяют свойства PF?
- 5) Какой химический состав и какие механизмы приводят к эмиссии STEVE?
- 6) Какая связь между: STEVE; стабильными авроральными красными дугами (SAR); субавроральной эмиссией, возбуждаемой вторичными электронами, образующимися при высыпаниях протонов; PF; и мелкими полосками (streaks/FAEs)?
- 7) Каково обратное влияние STEVE и сопутствующих структур на систему ионосфера-термосфера?

Основной результат работы: выбраны и частично систематизированы конкретные из опубликованных примеров событий и явлений, отображенных в авроральных и аврора-подобных структурах, встречающихся в различных областях полярной ионосферы, проанализированы их характеристики и условия генерации. На основе анализа составлен аннотированный атлас (часть 2) структур с использованием сопутствующей информации, включающей результаты наблюдений Ne и других характеристик ионосферы с помощью некогерентных радаров обратного рассеяния, энергетических распределений потоков частиц из магнитосферы, и среднемасштабных ВУФ - изображений участков аврорального овала, полученных с орбит КА в относительно близкое к рассмотренным событиям время. В процессе анализа информации проанализирован опыт методологии комплексных экспериментов, позволяющих получать новые сведения о локальных состояниях системы магнитосфера-ионосфера-термосфера. Разномасштабные одновременные наблюдения необходимы для идентификации деталей мелкомасштабных структур в контексте крупномасштабных, анализ данных которых позволит проводить дальнейшие исследования и регулярный контроль состояния процессов в системе магнитосфера-ионосфера-термосфера.

Информация, приведенная в Атласе (часть 2), может быть полезна студентам и аспирантам, участвующим в подготовке и реализации перспективных научных и прикладных орбитальных и наземных проектов ИКИ РАН и Росгидромет.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ASI – All-sky Imager
 EIC - electrostatic ion cyclotron waves
 ESR - EISCAT Svalbard Radar
 FACs - field aligned currents
 FAEs – fragmented aurora-like emissions
f.p. – foot point of magnetic field line
 InvLat-MLT – Invariant Latitude – Magnetic Local Time
 LBH – Lyman Birge Hopfield bands of N₂
 LBH_l – LBH long
 LBH_s – LBH short
 Lumikot - from the Finnish word Lumikko (fast-moving auroral patches)
 MLT – magnetic local time
 NEIAL - Naturally Enhanced Ion-acoustic Lines
 PBIs - poleward boundary intensifications
 PFISR - Poker Flat Incoherent Scatter Radar
 PF - picket-fence – «колья или штакетник забора»
 SAID - subauroral ion drift
 SAPS - subauroral polarization streams
 SAR – stable red aurora (SAR) arc
 STEVE – Strong Thermal Emission Velocity Enhancement
 м.с.л. – магнитная силовая линия

ЛИТЕРАТУРА

- *Иванов В.Е., Козелов Б.В.*, Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли, Апатиты, Изд-во КНЦ РАН, 2001, 260 с.
- *Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Никифоров О.В., Петрукович А.А., Потанин Ю.Н., Садовский А.М., Соколов А.Д., Янаков А.Т.* Аннотированный атлас примеров изображений эмиссий в авроральных структурах, зарегистрированных имаджерами и изображающими спектрографами с разных орбит и поверхности земли. Часть 1. Авроральные структуры, возбужденные природными источниками, включая Альфвеновские волны, Гелиогеофизические исследования, вып. 36, стр. 3-34, 2022, DOI 10.5425/2304-7380_2022_36_3, <https://elibrary.ru/>
- *Ashrafi M.*, ASK: Auroral Structure and Kinetics in action, A&G (Astronomy&Geophysics), V.48, Pp.4.35-4.37, 2007.DOI:10.1111/j.1468-4004.2007.48435.x
- *Akbari H., Semeter J.L.*, Aspect angle dependence of naturally enhanced ion acoustic lines, Journ.Geophys.Res. Space Physics, 119, 5909–5917, 2014 doi:10.1002/2014JA019835.
- *Akbari H., LaBelle J.W., Newman D.L.*, Langmuir Turbulence in the Auroral Ionosphere: Origins and Effects //Frontiers in Astronomy and Space Sciences, V. 7, Article 617792, Pp.1-22, March 2021.
- *Archer W.E., St.- Maurice J.-P., Gallardo-Lacourt B., Perry G.W., Cully C.M., Donovan E., Gillies D.M., Downie R., Smith J., Eurich D.*, The Vertical Distribution of the Optical Emissions of a Steve and Picket Fence Event, Geophys. Res. Lett., 46, 10719-10725, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019GL084473>
- *Bahcivan, H. and Cosgrove, R.*, Enhanced ion acoustic lines due to strong ion cyclotron wave fields, Ann. Geophys., 26, 2081–2095, 2008, doi:10.5194/angeo-26-2081-2008.
- *Bennett C.L., and Bourassa N.*, Improved analysis of STEVE photographs. J. Geophys. Res. Space Phys. 126, e2020JA027843 2021, doi:10.1029/2020ja027843
- *Blixt E.M., Grydeland G., Ivchenko N., Hagfors T., La Hoz C., B. S. Lanchester I, Løvhaug U.P., Trondsen T.S.* Dynamic rayed aurora and enhanced ion-acoustic radar echoes //Annales Geophysicae, 23, Pp. 3–11, 2005.
- *Burch J.L.*, Magnetospheric imaging: promise to reality, Reviews of Geophysics, 43 Pp.1-24, 2005, RG3001.

- *Chaston C.C., Bonnell J.W., Peticolas L.M., Carlson C.W., McFadden J.P., Ergun R.E.*, Driven Alfvén waves and electron acceleration: A FAST case study // *Geophys. Res. Lett.*, 29, 11, P.1535, 2002, doi:10.1029/2001GL013842.
- *Chernyshov A.A., Iliarov A., Mogilevsky M.M., Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V.*, Features of wave excitation of the electrostatic ion cyclotron type in the auroral ionosphere // *Cosmic research*, v.54, 1, Pp.52-60, doi:10.1134/S0010952516010044, 2016.
- *Cresswell G.R., Davis T.N.*, Observations on pulsating auroras // *Journ. Geophys. Res.*, v.71, №13, Pp.3155-3163, 1966 doi:10.1029/jz071i013p03155
- *Cresswell G.R.*, Flaming auroras // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, v.31, pp.179-183, 1969.
- *Chu X., Malaspina D., Gallardo-Lacourt B., Liang J., Andersson L., Ma Q., Artemyev A., Liu J., Ergun R.E., Thaller S., Akbari H., Zhao H., Larsen B., Reeves G., Wygant J., Breneman B., Tian S., Connors M., Eric Donovan E., Archer W., MacDonald E.A.*, Identifying STEVE's Magnetospheric Driver Using Conjugate Observations in the Magnetosphere and on the Ground., *Geophys. Res. Lett.*, 46, 12,665–12,674, 2019, https://doi.org/10.1029/2019GL082789
- *Collis P. N., Haggstrom, I., Kaila, K., and Rietveld, M. T.*, EISCAT radar observations of enhanced incoherent scatter spectra and their relation to red aurora and field-aligned currents, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1031–1034, 1991.
- *Dahlgren H., Aikio A., Kaila K., Ivchenko N., Lanchester B.S., Whiter D.K., Marklund G.T.*, Simultaneous observations of small multi-scale structures in an auroral arc // *Journ. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 72, Pp. 633–637, 2010, doi:10.1016/j.jastp. 2010.01.014
- *Dahlgren H., Ivchenko N., Lanchester B.S.*, Monoenergetic high-energy electron precipitation in thin auroral filaments, *Geophys. Res. Lett.*, v.39, L20101, 2012, doi://10.1029/2012GL053466
- *Dahlgren, H., Semeter, J. L., Marshall, R. A., Zettergren, M.*, The optical manifestation of dispersive field-aligned bursts in auroral breakup arcs // *Journ. Geophys. Res.: Space Physics*, v.118, 7, 2013. https://doi.org/10.1002/jgra.50415
- *Dhadly, M. S., Meriwether, J., Conde, M., and Hampton, D.*, First ever cross comparison of thermospheric wind measured by narrow- and wide-field optical Doppler spectroscopy, *Journ. Geophys. Res. Space Phys.*, V.120, Pp.9683–9705, 2015, https://doi.org/10.1002/2015JA021316.
- *Dhadly, M., Emmert, J., Drob, D., Conde, M., Doornbos, E., Shepherd, G.*, et al., Seasonal dependence of northern high-latitude upper thermospheric winds: A quiet time climatological study based on ground-based and space-based measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122 (2), 2619–2644, 2017, https://doi.org/10.1002/2016JA023688
- *Dreyer J.* A detailed study of auroral fragments, Master's thesis for the degree of master science, Uppsala University The University Centre in Svalbard, 2019, 40 pages.
- *Dreyer J., Partamies N., Whiter D., Ellingsen P.G., Baddeley L, Buchert S.C.*, Characteristics of fragmented aurora-like emissions (FAEs) observed on Svalbard // *Ann. Geophys.*, 39, 277–288, 2021 https://doi.org/10.5194/angeo-39-277-2021
- *Dyrud L., Semeter J., Oppenheim M.*, Plasma instabilities in auroral ionospheric density gradients from 120 – 200 km altitude // *Eos Trans. AGU*, 85(17), Jt. Assem. Suppl., Abstract SM51A-0338, 2004.
- *Farley D.*, A plasma instability resulting in field-aligned irregularities in the ionosphere, *Journ. Geophys. Res.*, 68, Pp.6083-6097, 1963, doi://10.1029/jz068i022p06083.
- *Forme, F. R. E.*, A new interpretation of the origin of enhanced ion acoustic fluctuations in the upper ionosphere // *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2347–2350, 1993, doi:10.1029/93GL02490.
- *Forme, F. R. E.*, Parametric decay of beam-driven Langmuir wave and enhanced ion-acoustic fluctuations in the ionosphere: a weak turbulence approach // *Ann. Geophys.*, 17, 1172–1181, 1999, doi:10.1007/s00585-999-1172-4.
- *Forsyth C., Sergeev V.A., Henderson M.G., Nishimura Y., Gallardo-Lacourt B.*, Physical Processes of Meso-Scale, Dynamic Auroral Forms, *Space Sci. Rev.*, 216, pp.1-46, 2020, https://doi.org/10.1007/s11214-020-00665-y

- Foster, J. C., del Pozo, C., Groves, K., and Saint Maurice, J.-P., Radar observations of the onset of current driven instabilities in the topside ionosphere // *Geophys. Res. Lett.*, 15, 160–163, 1988.
- Foster, J. C. and Burke, W. J., SAPS: A new categorization for sub-auroral electric fields, *EOS Transactions*, 83, 393, doi:10.1029/2002EO000289, 2002.
- Gallardo-Lacourt, B., Liang, J., Nishimura, Y., & Donovan, E., On the origin of STEVE: Particle precipitation or ionospheric skyglow? *Geophysical Research Letters*, 45, 7968–7973, 2018, <https://doi.org/10.1029/2018GL078509>
- Gartlein, C. W., Unlocking secrets of northern lights // *Nat. Geograph. Mag.*, p. 673, 1947.
- Gillies, D. M., Liang, J., Donovan, E., & Spanswick, E., The apparent motion of STEVE and the Picket Fence phenomena. *Geophys. Res. Lett.*, V.47, 20, e2020GL088980, 2020, <https://doi.org/10.1029/2020GL088980>
- Gillies, D. M., Liang, J., Gallardo-Lacourt, B., & Donovan, E., New insight into the transition from a SAR arc to STEVE. *Geophys. Res. Lett.*, V.50, 2023, e2022GL101205, <https://doi.org/10.1029/2022GL101205>
- Goertz C. K., Discrete breakup arcs and kinetic Alfvén waves, in *Physics of Auroral Arc Formation*, edited by S.-I. Akasofu and J. R. Kan, vol. 25 of *Geophys. Monogr. Ser.*, pp. 451–455, American Geophysical Union, Washington, D. C., 1981.
- Goertz C. K., Kinetic Alfvén waves on auroral field lines // *Planetary and Space Science*, 32, 1387–1392, 1984.
- Goodbody B.C., Radar and Optical Studies of Small Scale Features in the Aurora: The Association of Optical Signatures with Naturally Enhanced Ion Acoustic Lines (NEIALs), Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, 2014, May, University of Southampton
- Grydeland, T., La Hoz, C., Hagfors, T., Blixt, E. M., Saito, S., Strømme, A., and Brekke, A., Interferometric observations of filamentary structures associated with plasma instability in the auroral ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 30, P.1338, 2003, doi:10.1029/2002GL016362.
- Grydeland, T., Blixt, E. M., Løvhaug, U. P., Hagfors, T., La Hoz, C., and Trondsen, T. S., Interferometric radar observations of filamented structures due to plasma instabilities and their relation to dynamic auroral rays, *Ann. Geophys.*, 22, 1115–1132, 2004, doi:10.5194/angeo-22-1115-2004.
- Grocott, A., Milan, S. E., Baker, J. B. H., Freeman, M. P., Lester, M., & Yeoman, T. K., Dynamic subauroral ionospheric electric fields observed by the Falkland Islands radar during the course of a geomagnetic storm. *Journ. Geophys. Res.*, V.116, A11, A11202, 2011, <https://doi.org/10.1029/2011JA016763>
- Groves K.M., Nonlinear Ionospheric Propagation Effects on UHF and VLF Radio Signals. PhD thesis, Massachusetts Inst of Tech - Cambridge Plasma Fusion Center, 1991.
- Haerendel G., Olipitz B.U., Buchert S., Bauer O.H., Rieger E., LaHoz C., Optical and radar observations of auroral arcs with emphasis on small-scale structures // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58, 71–83, 1996.
- Hallinan, T. J., and T. N. Davis, Small-scale auroral arc distortions, *Planet. Space Sci.*, 18, 1735–1735, 1970, doi:10.1016/0032-0633(70)90007-3.
- Hallinan, T.J., Auroral spirals, 2, theory // *Journal of Geophysical Research*, 81, 3959–3965, 1976.
- Hallinan, T. J., and Davis T.N., Small-scale auroral arc distortions // *Planet. Space Sci.*, 18, 1735, 2005.
- Harding, B. J., Mende, S. B., Triplett, C. C., & Wu, Y.-J. J., A mechanism for the STEVE continuum emission, *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087102., 2020, <https://doi.org/10.1029/2020GL087102>.
- Hunnekuhl M., and MacDonald, E., Early ground-based work by auroral pioneer Carl Størmer on the high-altitude detached subauroral arcs now known as “STEVE”. *Space Weather*, 18(3), e2019SW002384. (2020) <https://doi.org/10.1029/2019SW002384>
- Henderson M. G., Reeves G.D., Murphree J.S., Are north-south aligned auroral structures an ionospheric manifestation of bursty bulk flows? // *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3737– 3740, 1998.
- Hirsch M., Semeter J., Zettergen M., Dahlgren H., Goenka Ch., Sundberg H., Akbari H., Reconstruction of fine scale auroral dynamics // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V.54, No 5, Pp.2-14, 2015 DOI:10.1109/TGRS.2015.2505686
- Hunnekuhl M., and MacDonald E., Early Ground-Based Work by Auroral Pioneer Carl Størmer on the High-Altitude Detached Subauroral Arcs Now Known as “STEVE”, *Space Weather*, 18, 2020, e2019SW002384. <https://doi.org/10.1029/2019SW002384>

- Huyghebaert D., Billett D., Chartier A., Chau J.L., Hussey G.C., David L. Hysell D.L., Ivarsen M.F., Mesquita R.L.A., Rojas E., Vierinen J., Young M., The future of auroral E-region plasma turbulence research // *Frontiers in Astronomy and Space Science*, 2022, DOI 10.3389/fspas.2022.1062358
- INCOHERENT SCATTER, Theory, Practice and Science, Collection of lectures given in Cargese, Corsica, 1995. Ed. Denis Alcaydé - Technical Report 97/53 - EISCAT Scientific Association Printed version - November 1997, 314 P.
- International auroral atlas, International Union of Geodesy and Geophysics, Edinburgh University Press, 1963, 17 p.
- Isham, B., Rietveld, M., Guio, P., Forme, F., Grydeland, T., and Mjølhus, E. Cavitating Langmuir turbulence in the terrestrial aurora // *Phys. Rev. Lett.* 108, 2012.105003. doi:10.1103/physrevlett.108.105003
- Kataoka R., Chaston Ch., Knudsen D., Lynch K.A., Lysak R.L., Song Y., Rankin R., Murase K., Sakanoi T., Semeter J., Watanabe T.-H., Whiter D., Small-Scale Dynamic Aurora // *Space Sci Rev*, 217, Pp. 16-32, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00796-w>
- Knudsen, D. J., Burchill, J. K., Buchert, S. C., Eriksson, A. I., Gill, R., Wahlund, J.-E., et al., Thermal ion imagers and Langmuir probes in the Swarm electric field instruments. *Journ. Geophys. Res., Space Phys.*, V.122, 2, Pp.2655–2673, 2017, <https://doi.org/10.1002/2016JA022571>
- Kovalev D.V. Smirnov A.P., and Dimant Y.S., Modeling of the Farley-Buneman instability in the E-region ionosphere: a new hybrid approach, *Ann. Geophys.*, 26, 2853–2870, 2008, www.ann-geophys.net/26/2853/2008/
- Kozyra J.U., Nagy A.F., Slater D.W., High-altitude energy source(s) for stable auroral red arcs, *Reviews of Geophysics*, 35, 2, Pp.155-190, 1997. <https://doi.org/10.1029/96rg03194>
- Liang, J., Donovan, E., Connors, M., Gillies, D., St-Maurice, J. P., Jackel, B., et al. Optical spectra and emission altitudes of double-layer STEVE: A case study. *Geophys. Res. Lett.* V.46, Pp.13630–13639, 2021, doi:10.1029/2019gl085639
- Lyons, L. R., Zesta E., Xu Y., Sánchez E.R., Samson J.C., Reeves G.D., Ruohoniemi J.M., Sigwarth J.B., Auroral poleward boundary intensifications and tail bursty flows: A manifestation of a large-scale ULF oscillation? // *J. Geophys. Res.*, 107(A11), 1352, 2002, doi:10.1029/2001JA000242.
- MacDonald, E. A., Donovan, E., Nishimura, Y., Case, N. A., Gillies, D. M., Gallardo-lacourt, B., et al. New science in plain sight: Citizen scientists lead to the discovery of optical structure in the upper atmosphere. *Science Advances*, 4, Pp.1-5, 2018, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aag0030>
- McKay D., Paavilainen T., Gustavsson B., Kvammen B., Partamies N., Lumikot: Fast auroral transients during the growth phase of substorms, *Geophys. Res. Lett.*, v.46, Pp.7214-7221, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019GL082985>
- Martinis C., Griffin I., Gallardo-Lacourt B., Wroten J., Nishimura Y., Baumgardner J., Knudsen D.J., Rainbow of the night: First direct observation of a SAR arc evolving into STEVE, *Geophys. Res. Lett.*, 49, e2022GL098511, 2022. <https://doi.org/10.1029/2022GL098511>.
- Mende S. B., Heeterds H., Frey H.U., Lampton M., Geller S. P., Abiad R., Siegmund O. H. W., Tremsin A. S., Spann J., Dougani H., Fuselier S. A., Magoncelli A. L., Bumala M. P., Murphree S., Trondsen T. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 2. Wideband FUV imaging // *Space Sci. Reviews*. V. 91. N1-2. P. 271–285. 2000, Doi:10.1023/a:1005227915363.33.
- Mende S.B., Harding B.J., Turner C. Subauroral Green STEVE Arcs: Evidence for Low-Energy Excitation // *Geophys. Res. Lett.*, 46, 14256–14262, <https://doi.org/10.1029/2019GL086145>, 2019.
- Mendillo M., Finan R., Baumgardner J., Wroten J., Martinis C., Cassilas M., A stable auroral red (SAR) arc with multiple emission features, *Journ. Geophys. Res., Space physics*, 121, 10, Pp. 10564-10577, 2016, doi:10.1029/2016JA023258.
- Mende S.B., and Turner C., Color Ratios of Subauroral (STEVE) Arcs, *Journ. Geophys. Res., Space Phys.*, v.124, pp.5945-5955, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019JA026851>
- Michell R.G., Lynch K.A., Heinselman C.J., and Stenbaek-Nielsen H.C., PFISR nightside observations of naturally enhanced ion acoustic lines, and their relation to boundary auroral features, *Annales Geophysicae*, 26, 3623–3639, 2008, www.ann-geophys.net/26/3623/2008/

- *Michell R.G., Lynch K.A., Heinselman C.J., and Stenbaek-Nielsen H.C.*, High time resolution PFISR and optical observations of naturally enhanced ion acoustic lines, *Annales Geophysicae*, 27, 1457–1467, 2009, www.ann-geophys.net/27/1457/2009/
- *Michell R.G. and Samara M.*, High-resolution observations of naturally enhanced ion acoustic lines and accompanying auroral fine structures, *Journ. Geophys. Res.*, V.115, A03310, doi:10.1029/2009JA014661, 2010
- *Michell R.G. and Samara M.*, Observability of NEIALs with the Sondrestrom and PokerFlat incoherent scatter radars, *Journ. of Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 105-106, Pp.299–307, 2013.
- *Michell R.G., Grydeland T., Samara M.*, Characteristics of Poker Flat Incoherent Scatter Radar (PFISR) naturally enhanced ion-acoustic lines (NEIALs) in relation to auroral forms // *Ann. Geophys.*, 32, 1333–1347, 2014, doi:10.5194/angeo-32-1333-2014
- *Mishin E.V.*, Artificial Aurora Experiments and Application to Natural Aurora. *Front. Astron. Space Sci.* 6,14, 2019, doi: 10.3389/fspas.2019.00014
- *Mishin E., and Streltsov A.*, STEVE and the picket fence: Evidence of feedback-unstable magnetosphere-ionosphere interaction. *Geophysical Research Letters*, 46, Pp.14247-14255, 2019, <https://doi.org/10.1029/2019GL085446>
- *Mishin E.V., and Sreltsov A.*, On the kinetic theory of subauroral arcs, *Journ. Geophys. Res., Space Phys.*, 127, 2022, e2022JA03.
- *Motoba T., Hirahara M.*, High-resolution auroral acceleration signatures within a highly dynamic onset arc // *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1793–1801, 2016, doi:10.1002/2015GL067580
- *Nell A.E., Kosch M.J., Whiter D., Gustavsson B., Aslaksen T.*, A new auroral phenomenon, the anti-black aurora // *Scientific Reports* 11:1829, 2021 <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81363-9>
- *Nishimura, Y., Gallardo-Lacourt, B., Zou, Y., Mishin, E., Knudsen, D. J., Donovan, E. F.*, et al., Magnetospheric signatures of STEVE: Implications for the magnetospheric energy source and interhemispheric conjugacy. *Geophys. Res. Lett.* 46, 5637–5644, 2019, doi:10.1029/2019gl082460
- *Nishimura Y., Yang J., Weygand J.M., Wang W., Kosar B., Donovan E. F., Angelopoulos V., Paxton L., Nishitani N.*, Magnetospheric conditions for STEVE and SAID: Particle injection, substorm surge and field aligned currents, *Journ. Geophys. Res.*, 125, 2020, e2020ja027782, doi:10.1029/2020ja027782
- *Nishimura Y., Bruus E., Karvinen E., Martinis C.R., Dyer A., Kangas L., Rikala H.K., Donovan E.F., Nishitani N., Ruohoniemi J.M.*, Interaction Between Proton Aurora and Stable Auroral Red Arcs Unveiled by Citizen Scientist Photographs, *Journ. Geophys. Res., Space phys.*, V.127, Issue7, 2022, e2022JA030570, <https://doi.org/10.1029/2022JA030570>
- *Nishimura Y., Dyer A., Kangas L., Donovan D., Angelopoulos V.*, Unsolved problems in Strong Thermal Emission Velocity Enhancement (STEVE) and the picket fence // *Front. Astron. Space Sci.* Pp.1-9, 2023, 10:1087974. doi://10.3389/fspas.2023.1087974
- *Ogawa Y., Buchert S.C., Fujii R., Nozawa S., Forme F.*, Naturally enhanced ion-acoustic lines at high altitudes, *Annales Geophysicae*, 24, 3351–3364, 2006
- *Omholt A.*, *The Optical Aurora* // 1971, 198 pp., Springer, Berlin.
- *Oppenheim, M., Otani, N., and Ronchi, C.*: Saturation of the Farley-Buneman instability via nonlinear electron $E \times B$ drifts, *J. Geophys. Res.-Space*, 101, 17273–17286, 1996. DOI: 10.1029/96JA01403
- *Otani N.F., Oppenheim M.*, A saturation mechanism for the Farley-Buneman instability, *Geophys. Res. Lett.*, V. 25, No. 11, P. 1833-1836, 1998.
- *Otto A., Lummerzheim D., Zhu H., Lie-Svendsen Ø., Rees M.H., Lanchester B.S.*, Excitation of tall auroral rays by ohmic heating in field-aligned current filaments at F region heights // *Journ. Geophys. Res.*, V. 108, No. A4, 8017, 2003, doi:10.1029/2002JA009423
- *Palmroth M., Grandin M., Helin M., Koski P., Oksanen A., Glad M.A., Valonen R., Saari K., Bruus E., Norberg J., Viljanen A., Kauristie K., Verronen P.T.*, Citizen Scientists Discover a New Auroral Form: Dunes Provide Insight Into the Upper Atmosphere // *AGU Advances*, 1, e2019AV000133., Pp.1-12, 2020 <https://doi.org/10.1029/2019AV000133>
- *Parnikov S.G., Ievenko I.B., Koltovskoy I.I.*, Comparison of the SAR-arc, STEVE and Picket Fence dynamics registered at the Maymaga subauroral station on March 1, 2017. *Proceedings v.11916*, 27 International

- Symposium on Atmospheric and ocean Optics, Atmospheric Physics, 119167L, 2021, <https://doi.org/10.1117/12.2603112>
- Perry G.W., Gallardo-Lacourt B., Archer W.E., Shepherd S.G., Reimer A.S., Gillies D.M., SuperDarn observations of STEVE, Presentation and Abstract of URSI NRSM, 2021 (virtual), Session G.3.1, 2022, doi:10.13140/RG2.230940.05762
 - Rees M.H., Physics and chemistry of the upper atmosphere, Cambridge Univ.Press, 1989, 289 P.
 - Rietveld, M. T., P. N. Collis, and J.-P. St-Maurice, Naturally-enhanced ion-acoustic-waves in the auroral ionosphere observed with the EISCAT 933-MHz radar, *J. Geophys. Res.*, 96, 19,291-19,305, 1991.
 - Rietveld M.T., Collis P.N., Vaneyken A.P., Løvhaug U.P., Coherent echoes during EISCAT UHF Common Programmes, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 58, 161–174, 1996.
 - Sakanoi T., Okano S., Obuchi Y., Kobayashi T., Eijiri 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
 - Sedgemore-Schulthess, K. J. F., Lockwood, M., Trondsen, T. S., Lanchester, B. S., Rees, M. H., Lorentzen, D. A., and Moen, J. Coherent EISCAT Svalbard Radar spectra from the dayside cusp/cleft and their implications for transient field-aligned currents, *Journ. Geophys. Res.*, 104, Pp. 24613–24624, 1999.
 - Semeter J., Lummerzheim D., Haerendel G., Simultaneous Multispectral Imaging of the Discrete Aurora // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, Pp. 1-15., 2001.
 - Semeter J., Heinselman C.J., Sivjee G.G., Frey H.U., Bonnell J.W., Ionospheric response to wave-accelerated electrons at the poleward auroral boundary // *Journ. Geophys. Res.*, V.110, 2005, A11310, doi:10.1029/2005JA011226.
 - Semeter J., Kamalabadi F., Determination of primary electron spectra from incoherent scatter radar measurements of the auroral E-region // *Radio Sci.*, V.40, RS2006, 2005, doi:10.1029//2004RS003042.
 - 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, <https://doi.org/10.1029/2008JA013122>
 - Semeter J.S, Hunnekuhl M., MacDonald E., Hirsch M., Zeller N., Chernenkoff A., Wang J., The Mysterious Green Streaks Below STEVE // *AGU Advances*, 1, 2020, e2020AV000183. <https://doi.org/10.1029/2020AV000183>
 - Spiro, R. W., Heelis, R. H., and Hanson, W. B., Rapid sub-auroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 657–660, 1979.
 - Størmer, C., The polar aurora, Clarendon Press, 403 p., 1955, London: Oxford University Press, Amen House.
 - Strickland D.J., Jasperse J.K., Whalen J.R., Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere, *Journ. Geophys. Res.*, v.88, A10, Pp.8051-8062, 1983.
 - Strømme, A., Belyey, V., Grydeland, T., La Hoz, C., Løvhaug, U. P., and Isham, B., Evidence of naturally occurring wave-wave interactions in the polar ionosphere and its relation to naturally enhanced ion acoustic lines, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05103, doi:10.1029/2004GL020239, 2005.
 - Sullivan J.M., Lockwood M., Lanchester B.S., Kontar E.P., Ivchenko N., Dahlgren H., Whiter D.K., An optical study of multiple NEIAL events driven by low energy electron precipitation, *Ann. Geophys.*, 26, 2435–2447, 2008, www.ann-geophys.net/26/2435/2008/
 - Wahlund, J.-E., Forme, F. R. E., Opgenoorth, H. J., Persson, M. A. L., Mishin, E. V., and Volokitin, A. S., Scattering of electromagnetic waves from a plasma – enhanced ion acoustic fluctuations due to ion-ion two-stream instabilities, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1919–1922, 1992.
 - Wang H., and H. Lühr, The efficiency of mechanisms driving Subauroral Polarization Streams (SAPS), *Ann. Geophys.*, 29, 1277–1286, 2011 doi:10.5194/angeo-29-1277-2011
 - Wannberg, G., Wolf, I., Vanhainen, L., Koskenniemi, K., Röttger, J., Postila, M., Markkanen, J., Jacobsen, R., Stenberg, A., Larsen, R., Eliassen, S., Heck, S., and Huuskonen, A., The EISCAT Svalbard radar: A case study in modern incoherent scatter radar system design, *Radio Sci.*, 32, 2283–2307, 1997.
 - Whiter D.K., Sundberg H., Lanchester B.S., Dreyer J., Partamies N., Ivchenko N., Di Fraia M.Z., Oliver R., Serpell-Stevens A., Shaw-Diaz T., Braunersreuther T., Fine-scale dynamics of fragmented aurora-like emissions // *Annales Geophysicae*, 39, 975–989, 2021 <https://doi.org/10.5194/angeo-39-975-2021>

- *Yadav, S., Shiokawa, K., Otsuka, Y., Connors, M., & St Maurice, J.-P.*, Multi-wavelength imaging observations of STEVE at Athabasca, Canada. *Journ. Geophys. Res. Space Physics*, V.126, 2021, e2020JA028622,
- <https://doi.org/10.1029/2020JA028622>
- *Yadav, S., Shiokawa, K., Otsuka, Y., and Connors, M.*, Statistical study of subauroral arc detachment at Athabasca, Canada: New insights on STEVE. *Journ. Geophys. Res. Space Phys.* 127, 2022, e2021JA029856. doi:10.1029/2021ja029856
- *Yang, J., Toffoletto, F. R., Xing, X., and Angelopoulos, V.*, RCM-E simulation of the 13 March 2009 steady magnetospheric convection event, *Journ. Geophys. Res.*, 117, A03224, 2012, doi:10.1029/2011JA017245.
- *Zakharov, V.E.*, Collapse of Langmuir waves, *Sov. Phys. JETP, Engl. Transl.*, 35, 908–914, 1972.

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 2. AURORAL AND AURORA-LIKE STRUCTURES EXCITED BY NATURAL SOURCES, INCLUDING WAVES OF SEVERAL TYPES

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

As a continuation of the work started in 2022, Part 2 of the annotated atlas of examples of images of emission structures and plasma characteristics in the auroral oval and sub-auroral region during events that occurred in different MLT sectors, mainly in geomagnetically perturbed conditions of substorms, was compiled. The motivation for creating the atlas was a further analysis of the experience in the development of technology for preparing and conducting complex experiments aimed at creating a system for mapping and diagnosing diverse dynamic auroral phenomena in the polar ionosphere, reflected in the instantaneous field of *Ne* gradients in various altitude layers, which are the main "culprits" of problems with the propagation of transpolar signals. Like Part 1, this work is mainly focused on the results of observations of auroral emissions obtained using imaging cameras from the Earth's surface and from spacecraft orbits with a polar angle of inclination of the plane. Most of the presented examples of specific auroral and aurora-like structures are accompanied by medium-scale images of parts of the auroral oval and polar cap in different MLT sectors, obtained at a relatively close time to the events under consideration from the orbits of specific DMSP spacecraft in auroral emissions in the range of vacuum ultraviolet (VUV) using space-scanning imaging spectrographs SSUSI, as well as its the "predecessor" of GUVI in the orbit of the TIMED spacecraft. Some examples are also accompanied by the results of concomitant measurements of the distributions of the characteristics of the fluxes of precipitating particles (SSJ analyzer), magnetic field gradients and the results of local observations of *Ne* gradients by incoherent backscattering radars in the corresponding sectors of the polar ionosphere at a time close to the events. In part 1 [Kuzmin et al., 2022], a number of examples of auroral structures were considered, including pulsating ones, the excitation of which is associated with the processes of increasing the energy of precipitating electrons by Alfvén waves in the near magnetosphere, and their fluctuations and resonances, as well as longitudinal electric fields, and longitudinal currents flowing along the lines of force in these areas. In this paper, the first chapter is devoted to an example of a local ionospheric reaction to the intensification of auroras at the polar boundary of the oval, known as PBI (poleward boundary intensification) [Lyons et al., 2002]. This example is accompanied by data from Incoherent scattering radar (ISR Incoherent scatter radar) and optical instruments in Sondrestrom, Greenland in combination with orbital measurements from the IMAGE and FAST spacecraft orbits. The second chapter is devoted to the characteristics of a relatively rare type of dynamic auroral ray structures called "flaming auroras" (flaming aurora), excited by eruptions of auroral electrons of different energies; and the characteristics of naturally enhanced ion-acoustic NEIAL lines (naturally enhanced ion-acoustic lines) observed in the regions of ray structures during reflections (echoes) of radar signals of incoherent backscattering at different heights of magnetic field lines, and their accompanying *Ne* gradients in the polar ionosphere; in the third chapter, examples of the characteristics of some aurora-like fragmented structures and their features, named by the authors of their researchers FAEs (Fragmented Aurora-like Emissions), observed on the polar side of the auroral oval; In the fourth chapter: examples and features of STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) structures and often accompanying small-scale PF (Picket Fence) structures are analyzed, the shape of which conditionally resembles "fence stakes or picket fence" observed in the sub-auroral region during the recovery phase. Waves of various types or turbulence are anyway involved in the generation of all considered structures. The authors propose to consider the analysis of the features and characteristics of FAEs such as: "Lumikot" [McKay et al., 2019]; "Dunes" [Palmroth et al., 2020] and a number of others in the next part of the work.

KEYWORDS: ATLAS, AURORAL AND AURORA-LIKE EMISSION STRUCTURES, ELECTRON CONCENTRATION INHOMOGENEITIES, ORBITAL DIAGNOSTICS, AURORAL IMAGERS, POLAR IONOSPHERE, PLASMA CHARACTERISTICS, TECHNOLOGY FOR CONDUCTING EXPERIMENTS AIMED AT STUDYING THE STRUCTURES OF THE POLAR IONOSPHERE