



ТЕХНОЛОГИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

ISSN 2304-7380

Поступила в редакцию 26.10.2019 г. Принята к печати 05.11.2019 г.

УДК 550.388.2; 550.388.8; 551.594.5

ОРБИТАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АВРОРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ, КАК ЧАСТЬ СИСТЕМНОГО КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

А.К. Кузьмин, О.Л. Вайсберг, А.М. Мерзлый, А.А. Петрукович, Г.М. Крученицкий, М.А. Баньщикова

В данной работе на конкретных представленных примерах рассматривается лишь малая часть характеристик, входящих в перспективную систему контроля космической погоды, относящихся к дистанционной оптической диагностике состояния полярной ионосферы. Примеры, иллюстрированные конкретными данными измерений авроральных эмиссий, полученными с различных орбит одновременно с характеристиками плазмы в окрестности космического аппарата (КА), рассматриваются в контексте использования экспериментального зарубежного и отечественного методического опыта, некоторых новых аспектов разработки и характеристик оптической изображающей аппаратуры в готовящихся проектах, а также перспектив их развития в ближайшем будущем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПОЛЯРНАЯ ИОНОСФЕРА, АВРОРАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ОРБИТАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА, КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК, КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

1 ВВЕДЕНИЕ

То, что на нашу повседневную жизнь влияет состояние космической погоды мы стали всё больше понимать благодаря зависимости точности работы систем, использующих орбитальные средства связи и навигации, которыми многие из нас пользуются ежедневно и иногда сталкиваются со сбоями в их работе. В настоящее время всеобъемлющей системы контроля космической погоды пока не существует, она будет создана только в перспективе. Тем не менее, существует и развивается множество теоретических и эмпирических моделей магнитосферы, верхней атмосферы, термосферы, ионосферы, опирающихся на обширный экспериментальный материал, накопленный за период космической эры. Для того чтобы следить за состоянием космической погоды требуется создание и эксплуатация комплекса наземных, орбитальных и других средств диагностики, отвечающего современным требованиям пространственного и временного разрешения. Он должен включать получение многообразной информации о процессах на Солнце, солнечном ветре, межпланетном магнитном поле, в различных частях магнитосферы, включая радиационные пояса, верхней, средней и нижней атмосфере, термосфере и ионосфере, земном магнитном поле, высыпаниях заряженных частиц различных энергий в ионосферу, волнах, распространяющихся в околоземном пространстве в различных диапазонах частот, свечении эмиссий верхней атмосферы и полярной ионосферы, продольных и поперечных электрических токах, а также о кинетической температуре нейтральных частиц, ионов и электронов.

Кузьмин Александр Константинович, к.ф.-м.н., гл.спец. «Институт космических исследований РАН», (8-495-333-20-00), e-mail: alkkuzmin@mail.ru

Вайсберг Олег Леонидович, д.ф.-м.н., зав.лаб. «Институт космических исследований РАН», e-mail: oleg@iki.rssi.ru Мерзлый Алексей Михайлович, к.т.н., с.н.с. «Институт космических исследований РАН», (8-495-333-20-00), e-mail: pinega142@yandex.ru Петрукович Анатолий Алексеевич, член-кор. РАН, директор, «Институт космических исследований РАН», e-mail: apetruko@iki.rssi.ru Крученицкий Григорий Михайлович, д.ф.-м.н., зав.отд. «Центральная Аэрологическая Обсерватория Росгидромет», (8-495-408-61-41), e-mail: omd@cao-rhms.ru

Баньщикова Мария Александровна, к.ф.-м.н., доцент, «НИИ Прикладной математики Томского государственного университета», (8-3822-52-97-76), e-mail: mba-tomsk@mail.ru

Контроль фактического состояния полярной ионосферы в режиме времени близком к реальному и его краткосрочного прогноза становится все более актуальной проблемой как для продолжения научных исследований, так и для решения ряда прикладных задач. Физические процессы, протекающие в полярной ионосфере и верхней атмосфере, зависят от процессов взаимодействия Солнечного ветра с магнитосферой, процессов внутри магнитосферы, а также ниже ионосферы (процессы в мезосфере и стратосфере), и являются составной частью общего процесса в единой среде околоземного пространства, именно они влияют на эффективность работы ряда технологических систем, «находящихся» на разных орбитах. Поэтому, хотя за последнее десятилетие понимание физики явлений, происходящих в околоземной плазме, увеличилось, но далеко не все аспекты взаимодействия отдельных сред объяснены и следовательно, для прогресса в этом направлении требуются как дальнейшие теоретические и модельные исследования, так и регулярный экспериментальный контроль характеристик полярной ионосферы [Кузьмин и Чиков, 2007].

Высыпания энергичных электронов и протонов из магнитосферы в различные сектора полярной ионосферы, имеющих неоднородные энергетические распределения, а также холодных электронов ионосферы под действием Альвеновских волн в различных секторах геомагнитного местного времени (MLT), в условиях геомагнитных возмущений приводят к генерации разномасштабных плазменных структур, неустойчивостям их состояния, возникновению градиентов электронной концентрации, неоднородностей в поперечных проводимостях, градиентов компонент магнитного поля, и, как следствие, разномасштабных продольных и поперечных токов на высотах различных слоев ионосферы. Поэтому во время геомагнитных возмущений возникают условия для помех в распространении трансполярных сигналов в том числе орбитальных систем связи и навигации, загоризонтных радиолокационных систем (ЗГРЛС), и др. Сцинтилляции сигналов и кратковременные потери захвата частоты, их временные задержки, искажения в содержании команд, и, как следствие, ошибки в работе навигационных систем из-за непостоянства траекторий распространения сигналов, а, в конечном счете, увеличение количества ошибок траекторных измерений, и позиций движущихся объектов в космосе и на поверхности Земли – вот далеко не полный перечень последствий в отклонениях характеристик полярной ионосферы во время геомагнитных возмущений и высыпаний заряженных частиц с различными энергетическими распределениями. Все перечисленное приводит к снижению достоверности информации, формируемой на основе данных, получаемых радио и навигационными средствами и снижению вероятностных характеристик обнаружения различных объектов, определения их координат на динамично изменяющемся фоне. Поэтому важность регулярного контроля состояния характеристик полярной ионосферы и их краткосрочного прогноза трудно переоценить.

Диагностика характеристик полярной ионосферы регулярно проводится с помощью комплексов приборов на станциях наблюдения и на исследовательских ракетах, но она ограничена конкретными расположениями станций наблюдения и полигонов, и зависит от погодных условий. Орбитальная авроральная оптическая и плазменная диагностика развивается по мере развития технологий детекторов частиц и изображений, увеличения их чувствительности, а также возможностей бортовых информационных систем, о чем свидетельствуют результаты ряда успешных околоземных проектов, имеющих на борту приборы и комплексы для получения пространственных распределений интенсивности авроральных эмиссий в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) и видимом диапазонах спектра (ВИС): POLAR, IMAGE, DMSP, REIMEI, е-POP, FENGYUN, и др.[Germany et al., 1994-1; Germany et al., 1998; Mende et al., 2000; Paxton et al., 1993; Paxton et al., 2017; Obuchi et al., 2008; Cogger et al., 2014; Zhang et al., 2019].

- 2 КОМЛЕКСНАЯ, ВКЛЮЧАЯ ОПТИЧЕСКУЮ, АВРОРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ОРБИТ КА, И ЕЕ СПЕЦИФИКА
- 2.1 ГЛОБАЛЬНОЕ КРУПНОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ПРИМЕРАХ АВРОРАЛЬНЫХ ВУФ-ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ВЫСОКО-АПОГЕЙНЫХ ОРБИТ В ПРОЕКТАХ POLAR, IMAGE И ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ. ПРИМЕРЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В ПРОЕКТАХUVI (SMILE) И АВРОВИЗОР-ВУФ (АРКТИКА-МП).

Все более существенную роль в диагностике характеристик полярной ионосферы с орбит играют дистанционные оптические изображающие методики наблюдений распределений интенсивности эмиссий верхней атмосферы и ионосферы, возбуждаемых высыпающимися энергичными частицами, и одновременные прямые измерения характеристик плазмы в окрестности КА [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2; Кузьмин и Мерзлый, 2019-1; Frey et al., 2001; Frey et al., 2003; Mende et al., 2003; Mende, 2016; Cao et al., 2007]. Функциональная связь потока энергии и средней энергии высыпающихся электронов и протонов, и, как следствие, электронной концентрации и поперечных проводимостей, интегрированных по высоте, с интенсивностью эмиссий и их отношениями детально рассмотрена в [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2; Кузьмин и Мерзлый, 2019-1; Germany et al., 1994-1,1994-2; Gerard et al., 2000; Hubert et al., 2001,2002].

Преимущества изображающих камер в мгновенном охвате полем зрения полярных областей ионосферы целиком с высот апогея несколько десятков тысяч км. Например, условия в проектах на спиново-вращающихся КА POLAR и IMAGE, реализованных в конце 90х — начале 2000-х на орбитах типа Молния, эллипс которых был вытянут так, что с апогейного участка полярная область могла наблюдаться в течение нескольких часов практически непрерывно, позволяли серийно получать изображения всего аврорального овала за время ~ 2 мин и контролировать динамику развития магнитных бурь и суббурь [Germany et al., 1998; Frey et al., 2003; Mende et al. 2000-1] и особенно, когда ВУФ-изображения аврорального овала получались одновременно с энергетическими распределениями высыпающихся частиц с орбиты в ближней магнитосфере, как например с КА FAST [Frey et al., 2001].

Авроральные наблюдения с перспективных КА в проектах SMILE [Raab et al., 2016] и Арктика-МП [Аванпроект, 2013], ориентированных на Землю, позволят уменьшить скважность получения снимков до десятков сек, а пространственное разрешение до <100 км/пиксель. Эти эксперименты обеспечат возможность контролировать динамику развития магнитных бурь и суббурь по крупномасштабным размерам и границам аврорального овала, и отчасти по динамике структурных фрагментов внутри него.

Приведем ряд примеров результатов ВУФ-диагностики состояния полярной ионосферы, полученных с помощью авроральных ВУФ-имаджеров с орбит типа «Молния». Методика дистанционного картографирования энергетических характеристик высыпающихся частиц, электронной концентрации и поперечных проводимостей, интегрированных по высоте по данным спектральных орбитальных изображений была детально рассмотрена в [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2, 2019-1]. В работе [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2] было показано преимущество глобальной авроральной диагностики в ВУФ-диапазоне в области поглощения фоновых ВУФ квантов, возбуждаемых солнечным ультрафиолетом. Это преимущество позволяет получать авроральные изображения с орбит на освещенной стороне полярной ионосферы.

На рисунке 1 показаны примеры серий авроральных изображений, полученных с помощью широкоугольной изображающей ВУФ-камеры (WIC) с орбиты КА IMAGE как на теневой стороне [Hubert et al., 2006] во время начала интенсификации геомагнитной суббури PBI (poleward boundary intensification) 29.12.2000, так и на освещенной [http://pluto.space.swri.edu/ image/FUV_images2.html] во время развития геомагнитной бури 15.07.2000. Вверху слева показан разрез изображающей камеры WIC и ход лучей в ней [Mende et al., 2000-2], а справа участок ВУФ-спектра, на котором пунктиром показана кривая чувствительности её детектора в зависимости от длины волны λ, а выше показана зависимость сечения поглощения молекулярного кислорода от λ.

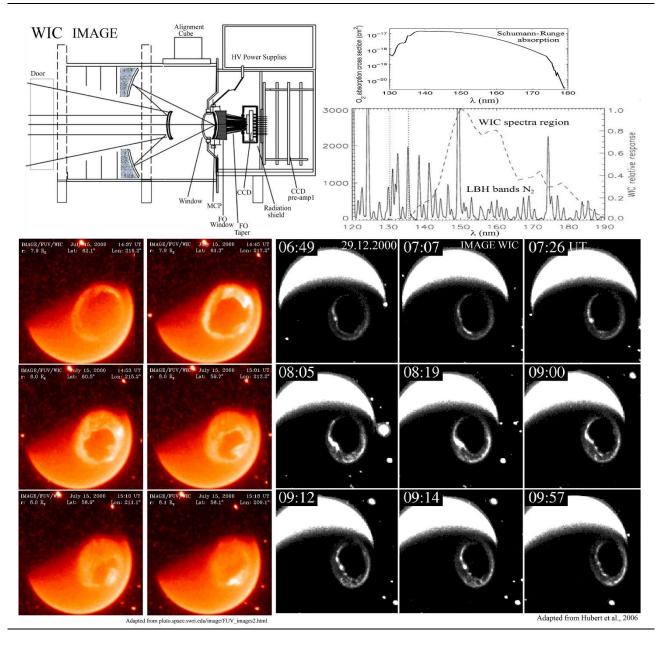


Рис.1.Серия из 6 ВУФ-изображений северного аврорального овала, отображающая динамику его характеристик во время развития суббури 15.07.2000 на освещенной стороне, полученная с помощью изображающей ВУФ-камеры WIC с орбиты КА IMAGE (слева внизу). Серия из 9 ВУФ-изображений северного аврорального овала, отображающая динамику его характеристик во время развития суббури 29.12.2000 на неосвещенной стороне, полученная с помощью изображающей ВУФ-камеры WIC с орбиты КА IMAGE (справа внизу). Разрез изображающей ВУФ-камеры WIC с ходом лучей в оптической системе (слева вверху). Спектральная полоса изображающей камеры WIC на фоне аврорального спектра в ВУФ-диапазоне λλ120-190 нм (справа в середине). Сечение поглощения (Шумана-Рунге) молекулярным кислородом ВУФ-квантов, возбужденных солнечным ультрафиолетом в зависимости от длины волны в нм (справа вверху).

На рисунке 2 слева показан пример одновременных наблюдений 11.06.2000 с орбиты КА IMAGE северного аврорального овала (во время фазы восстановления суббури) [Mende et al., 2002], возбужденного электронами, (с помощью камеры WIC), и протонами (с помощью изображающего спектрографа SI12, измеряющего распределение интенсивности доплеровски сдвинутой водородной линии Ly-α [Gerard et al., 2000]). Авроральные изображения, показанные на фоне сетки координат ILAT-MLT, свидетельствуют об отличии позиций и границ «электронного» и «протонного» овала в пространстве, что связано с многократными реакциями перезарядки

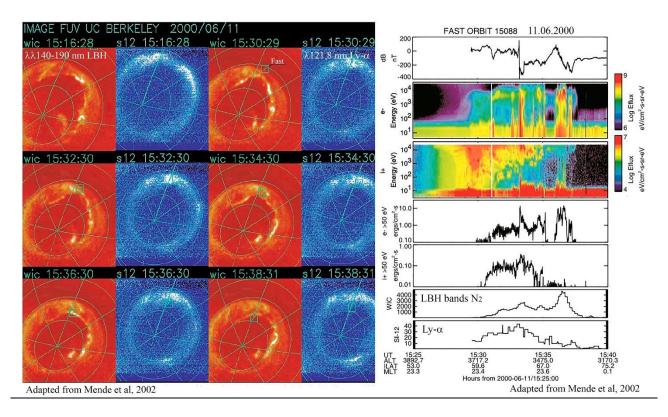


Рис. 2. (слева) Серия ВУФ-изображений северного овала (6+6), полученных одновременно 11.06.2000 с орбиты КА ІМАGЕ (красный овал, возбужденный высыпающимися электронами, изображения получены с помощью камеры WIC и синий овал, возбужденный высыпающимися протонами, изображения получены с помощью изображающего спектрографа SI в доплеровски сдвинутой водородной линии Ly-α 121,8 нм). Данные с КА FAST и КА ІМАGЕ (справа): Спектрограмма энергетического распределения высыпающихся заряженных частиц (2 и 3 панели сверху); Поток энергии высыпающихся электронов и ионов (4 и 5 панели сверху); Профили интенсивности авроральных эмиссий LBH и Ly-α вдоль f.p. проекций орбиты КА FAST, на ВУФ-изображениях они показаны в маленьких квадратиках (6 и 7 панели); градиенты магнитного поля В (1 панель сверху).

высыпающихся протонов и нейтральных атомов водорода (детали см. в [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2]). На рисунке 2 справа показаны спектрограммы энергетических распределений заряженных частиц (панели 2 и 3 сверху), полученные 11.06.2000 с орбиты КА Fast одновременно с ВУФизображениями аврорального овала с КА IMAGE, а под ними профили интенсивности ВУФэмиссий на данном участке орбиты [Frey et al., 2003; Meurant et al., 2003]. Проекции орбиты КА FAST на авроральных изображениях, полученных с КА IMAGE, обведены маленькими квадратиками. Приблизительная геометрия расположения плоскостей орбит КА IMAGE и КА Fast была показана вверху справа рис.3 в [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2].

Для сравнения с авроральными изображениями, полученными с КА IMAGE, на Рис.3, представленным здесь, показано изображение ВУФ-свечения верхней атмосферы, полученное в 1972 г. с поверхности Луны с пространственным разрешением ~ 400 км/пиксель с помощью камеры Шмидта в спектральном диапазоне $\lambda\lambda 125$ -160 нм. Справа внизу показан внешний облик камеры, а вверху ее разрез с ходом лучей [Caruthers et al.,1976]. Камера была установлена на поверхности Луны астронавтами Apollo-16. В настоящее время снимки аврорального овала с Луны могли бы быть получены со значительно лучшим разрешением, но это в значительной степени зависит от района посадки. Из-за наклона геомагнитного диполя для авроральных измерений предпочтительны интервалы, когда Земля «повернута» к Луне секторами долготы Канады или Австралии.

На Рис.4 показан пример как отражается динамика развития суббурь (11.01.1997; 28.02.1997; 15.07.2000 и 17.09.2000) в глобальных авроральных ВУФ-изображениях, полученных с помощью аврорального имаджера UVI (в полосе фильтра, включающего полосы молекулярного азота Лаймана-Берджи-Хопфельда LBHl $\lambda\lambda$ 160-180 нм) с орбиты KA POLAR в течение прохода через магнитосферу различных структур солнечного ветра: (а) МС (magnetic clouds); (b) RS (recurrent

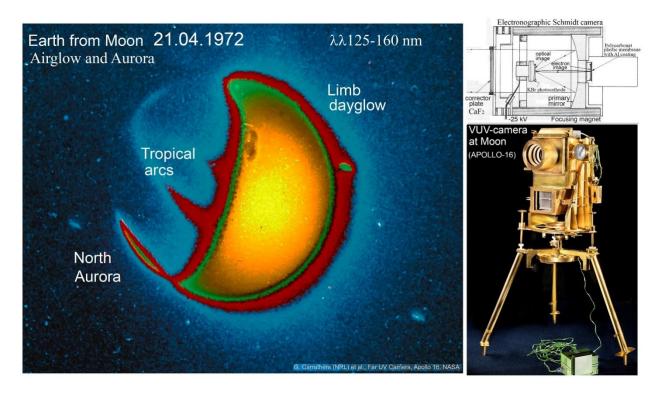


Рис.3. Пример ВУФ-изображения авроры Земли и ионосферной аномалии Эплтона в ВУФ-диапазоне 125-160 нм, полученного 21.04.1972 с помощью камеры Шмидта (с ВУФ-фильтром) с поверхности Луны (Аполло-16), оптическая схема камеры с ходом лучей и ее фотография (адаптирован из [Carruthers et al., 1976]).

streams); (c) Sheath (interaction of magnetic clouds with undisturbed solar wind) и (d) CIR (corotating interaction regions). Каждая область авроральной выпуклости очерчена синей кривой линией. Этот рис. был интегрирован из работы [Despirak et al., 2009] и адаптирован из [Кузьмин и Мерзлый, 2018].

На рисунке 5 показана геометрия глобальных авроральных наблюдений с орбиты перспективного КА SMILE (Solar wind Magnetosphere Ionosphere Link Explorer) Европейско-Китайско-Канадского проекта, нацеленный на исследования нелинейного динамичного поведения магнитосферно-ионосферной системы «в ответ» на изменяющиеся характеристики солнечного ветра [Raab et al., 2016]. Запуск этого КА намечен на 2023 г. Вверху показана проекция орбиты КА SMILE, на фоне фронтальной проекции магнитосферы и ее характеристики (высоты апогея и перигея, угол i наклонения плоскости орбиты к плоскости экватора) в координатах GSE (Geocentric Solar Ecliptic), период одной орбиты ~ 51 час. На нижнем рисунке 5 показан разрез изображающей ВУФ-камеры UVI и ее основные характеристики, разрабатываемой группой University of Calgary's Auroral Imaging Group (Канада) совместно со специалистами Бельгии и Китая. В состав научной аппаратуры входят также: рентгеновский имаджер SXI (Soft X-ray imager) в диапазоне 0,2-5 кэВ, разрабатываемый специалистами University of Leicester совместно со специалистами ряда стран; анализатор ионов LIA (Light Ion Analyser), нацеленный на измерения 3D-распределения ионов солнечного ветра по скоростям в диапазоне 0.2-20 keV/q с временным разрешением ~0,5 сек при угле поля зрения 360×3° и магнитометр (MAG) с частотой измерений 40 Hz и пороговой чувствительностью 0,1 nT, разрабатываемые специалистами Китая [Raab et al., 2016].

На рисунке 6 внизу показан разрез изображающего спектрографа и ход лучей в нем, нацеленного на наблюдения «протонного» (доплеровски сдвинутая водородная линия Ly-α λ121,8 нм) и «электронного» авроральных овалов (кислородная линия λ135,6 нм [OI]) с орбиты перспективного КА Арктика-МП, а вверху показан ход лучей в каналах λ121,8 нм и λ135,6 нм спектрографа и в их проекционных системах, которые были рассчитаны оптиками ОАО НПП Геофизика-космос [Аванпроект, 2013; Кузьмин и Мерзлый, 2014]. Подобная принципиально новая схема изображающего ВУФ-спектрографа была использована в проекте IMAGE [Mende et al., 2000-31

Table 1. Latitudes and sizes of the auroral bulge and ratio between bulge sizes for four solar wind structures (MC, RS, Sheath and CIR). Onset latitude Maximal latitude Solar wind Latitudinal size Longitudinal size The ratio between longitudinal and structure (°CGLAT) (°CGLAT) (L_F) (°CGLAT) (L_d) (°CGLAT) latitudinal sizes (L_d/L_F)

MC 50.5 68.7 16.3 289 17.7 RS 64.0 79.3 18.0 73 4.1 10.0 80.3 22.0 221 Sheath 56.7 CIR 55.3 82.3 25.6 226 8.8

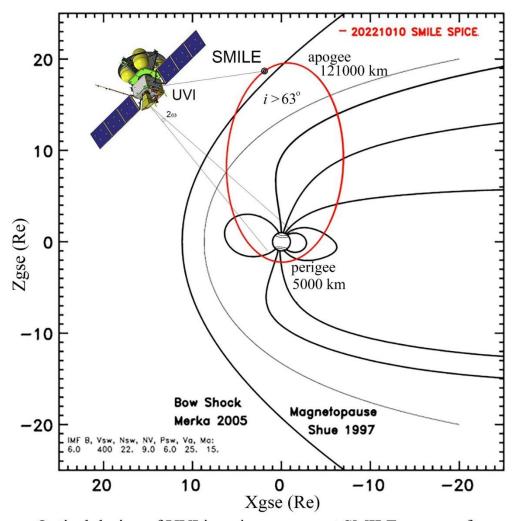
Adapted from Despirak et al.,2009 UVI (LBHI) images from the orbit of POLAR spacecraft 15 Jul 00 19:53:36 UT 19:57:54 20:01:34 20:04:02 20:21:49 UT 20:15:04 Relationship photon cm-2 s-Magnetic clouds (MC) MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT 10:30:01 10:35:50 11:15:42 11:21:50 11:28:17 UT 11 Jan 97 10:26:37 UT Recurent streams (RS) 00 Apex MLAT/MLT 00 Apex MLAT/MLT 00 Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT b) 17 Sep 00 20:49:29 UT 20:53:47 20:59:18 21:05:26 21:12:47 21:39:47 UT Interaction of magnetic clouds with undistubed solar wind (SHEATH) Apex MLAT/MLT c) Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT 02:07:54 UT 28 Feb 97 00:54:00 UT 01:09:38 01:15:28 01:49:12 01:03:12 Corotating interaction regions(CIR) Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT Apex MLAT/MLT

Adapted from Kuzmin et al., 2018 (Adapted from Despirak et al., 2009)

Рис. 4. (адаптирован из [Despirak]). Пример отражения характеристик солнечного ветра в структуре глобальных авроральных ВУФ-изображений (Развития суббурь:11.01.1997; 28.02.1997; 15.07.2000 и 17.09.2000) по данным авроральных изображений, полученных с ВУФ-имаджера UVI (с фильтром LBHI) на KA POLAR в течение прохода через магнитосферу различных структур солнечного ветра: (a) MC; (b) RS; (c) Sheath и (d) CIR. Каждая область авроральной выпуклости очерчена синей кривой линией). Аббревиатуры MC, RS, Sheath, CIR расшифрованы на рисунке справа. Сверху в Таблице 1 показаны широты и размеры авроральной выпуклости и отношения между размерами авроральных выпуклостей для четырех типов структур солнечного ветра ((a) MC; (b) RS; (c) Sheath и (d) CIR).

d)

Apex MLAT/MLT



Optical design of UVI imaging camera at SMILE spacecraft

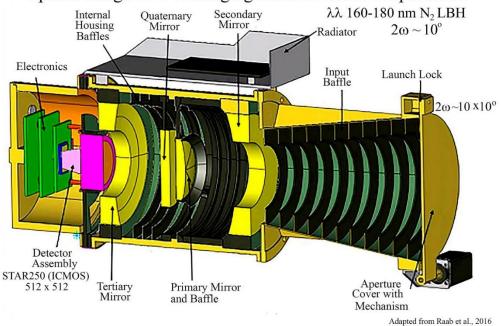
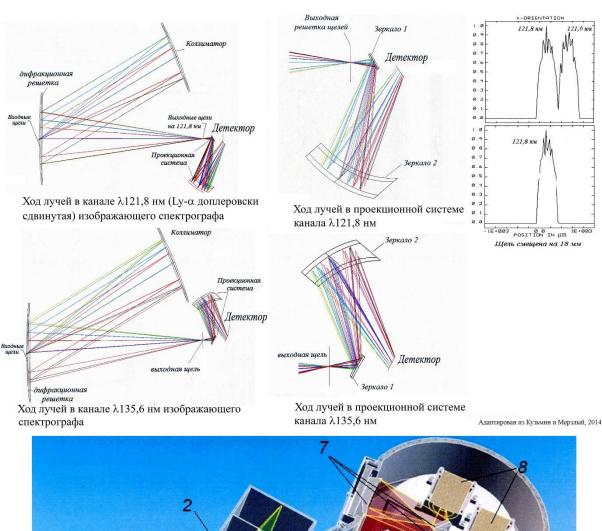


Рис.5. (вверху) Перспективный проект SMILE (ESA-CNSA-CSA). Орбита KA SMILE и геометрия авроральных наблюдений изображающей ВУФ-камеры UVI (угол поля зрения $2\omega=10^{\circ}$) в системе координат GSE (Geocentric Solar Ecliptic). (внизу) Разрез структуры оптической схемы ВУФ-камеры UVI.



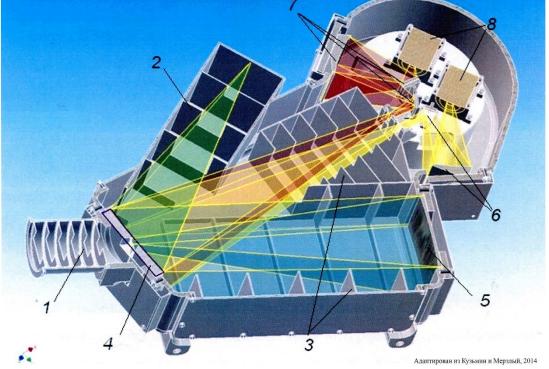


Рис.6. (внизу) Разрез изображающего ВУФ-спектрографа и схемы каналов λ121,8 нм (доплеровски сдвинутая линия Ly-α) и λ135,6 нм [OI] с ходом лучей, предназначенного для перспективного эксперимента Авровизор-ВУФ на КА Арктика-МП. Элементы схемы: 1 – светозащитная бленда; 2 – ловушка «0» порядка; 3 – диафрагмы защиты от боковых засветок; 4 – дифракционная решетка; 5 – коллимирующее зеркало; 6 – проекционная система; 7 - проекционная система; 8 – приемники излучения. (вверху) Ход лучей в канале λ121,8 нм и в проекционной системе канала λ121,8 нм; (в середине) ход лучей в канале λ135,6 нм, и в проекционной системе в канале λ135,6 нм. Справа вверху показана селекция излучения доплеровски сдвинутой линии λ121,8 нм от геокорональной линии Ly-α с помощью смещения выходной щели на 18 мм.

На рисунке 7 слева показан внешний облик 4х-зеркального варианта изображающей ВУФ-камеры для проекта Арктика-МП, а справа ход лучей в ее схеме и основные характеристики, рассчитанные оптиками ОАО Геофизика-космос для этого же проекта [Аванпроект, 2013; Кузьмин и Мерзлый, 2014]. Выделение рабочего ВУФ-диапазона в этой схеме будет осуществляться только с помощью селективных покрытий зеркальных элементов.

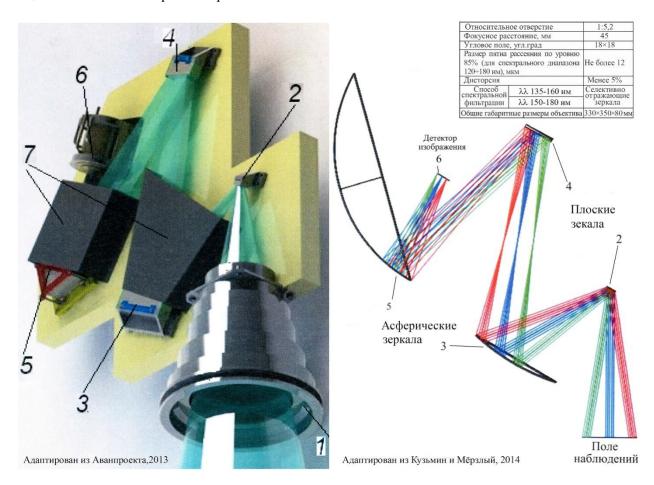
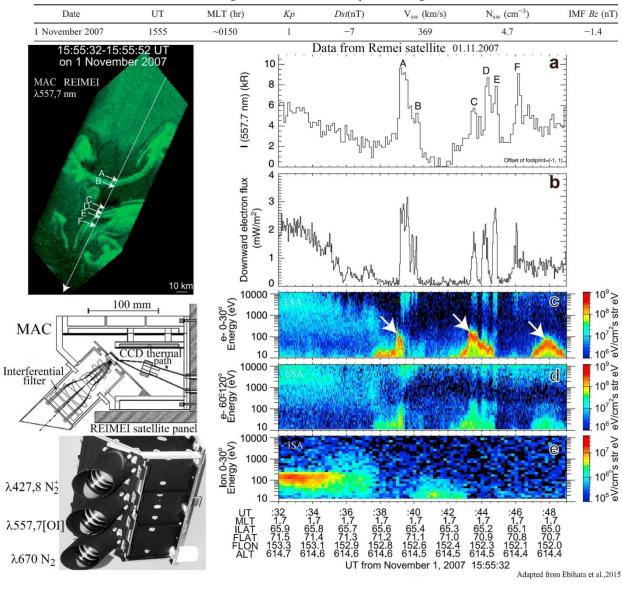


Рис.7. Внешний облик (слева), оптическая схема с ходом лучей в 4х-зеркальной изображающей ВУФкамере для перспективного эксперимента Авровизор-ВУФ на КА Арктика-МП (справа). Характеристики 4-х зеркальной схемы в Таблице (вверху справа).

2.2. ЛОКАЛЬНОЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ В КОНКРЕТНЫХ СЕКТОРАХ МLT С ВЫСОТ ПОЛЯРНЫХ ОРБИТ ОТ 600 ДО 1000 КМ. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ МАС (REIMEI), SSUSI (DMSP), WAI (FENGYUN-3D) И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В ПРОЕКТАХ ЛЕТИЦИЯ (ЗОНД) И АВРОВИЗОР-ВИС/МП (МЕТЕОР-МП)

На рисунке 8 слева вверху показан пример результатов наблюдений структурированной мелкомасштабной (1-3 км) авроральной структуры в после-полуночном секторе в относительно спокойных геомагнитных условиях (Kp=1, IMF (interplanetary magnetic field) Bz = -1,4 nT, скорость солнечного ветра 321-369 км/сек), полученных 01.11.2007 в канале λ557,7 [OI] 3х-канального аврорального имаджера МАС (Multispectral Auroral Camera) одновременно с энергетическими распределениями высыпающихся заряженных частиц с орбиты японского малого космического аппарата REIMEI (INDEX), полученными электростатическим анализатором ESA/ISA (Electron/ Ion Energy Spectrum Analyzer), спектрограмма которых показана справа [Ebihara et al., 2010]. Вектором на изображении показано направление полета на проекции подножных точек м.с.л.,



List of the Reimei Passes Observing Smokelike Aurora at the Equatorward Edge of the Main Oval^a

Рис. 8. Пример локального изображения мелкомасштабных "smokelike" авроральных структур в эмиссии λ557,7 нм [OI], полученных с помощью мультиспектральной изображающей камеры MAC 01.11.2007, и данных измерений энергетических распределений высыпающихся частиц с высоты 614 км полярной орбиты KA REMEI [Ebihara, 2015] в спокойных геомагнитных условиях. Буквами A,B,C,D,F помечены пересекаемые авроральные структуры, соответствующие максимумам интенсивности эмиссии на профиле (первая панель сверху справа) и интенсивности высыпающихся электронов (вторая панель сверху справа). Спектрограммы высыпающихся и отраженных от зеркальной точки электронов (3 и 4 панель) и ионов (5 панель). Внизу левой панели показана фотография имаджера MAC, а над ней показан разрез оптической схемы одного канала MAC на борту KA REIMEI. Геофизические условия (Kp, Dst, Vsw, Nsw, и Вz IMF) во время наблюдений 01.11.2007 показаны в таблице сверху Рис. 8.

пересекаемых КА REIMEI на высоте свечения 110 км. Авторы [Ebihara et al., 2010] назвали эти структуры дымовидными ("smokelike") и продемонстрировали, что их возбуждают так называемые «неускоренные» высыпающиеся электроны (E<300 эВ), которые наблюдались по меньшей мере в течение 9 сек полета, пока поле наблюдений имаджера MAC (70×70 км) не обновилось полностью. Внизу слева Рис.8 показан разрез одного канала MAC, установленного на борту КА REIMEI, а ниже внешний облик трех каналов имаджера MAC [Obuchi et al., 2008].

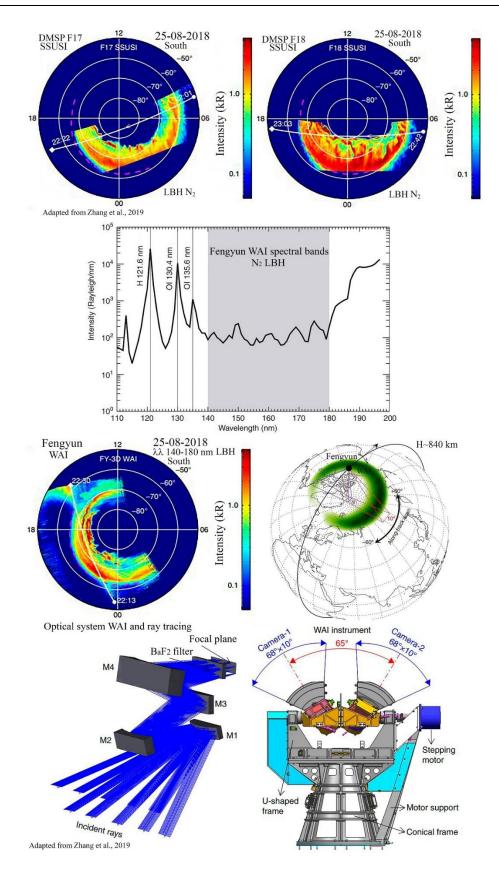


Рис. 9. ВУФ-изображения авроральных структур с высот орбит КА Fengyun и DMSPF 17 и F18, полученные 25.08.2018 с 22 до 23 UT. Спектральная область широкоформатного ВУФ-имаджераWAI на КА Fengyun показана в середине рисунка. Фронтальная проекция внешнего облика WAI с углами полей зрения изображающих камер и ход лучей в его оптической схеме показаны на нижних панелях (справа и слева соответственно), а проекция поля зрения его двух взаимодополняющих камер на высоту свечения (~150 км) показана (справа на средней панели).

На рисунке 9 на левой (второй снизу) панели приведен пример аврорального ВУФизображения (в области спектральных полос LBH λλ140-180 нм, полученного в секторе от 00 до 16 MLT 25.08.2018 с высоты орбиты КА Fengyun (Китай) ~840 км с помощью сканирующей пары изображающих камер WAI, имеющих поле зрения $68 \times 10^{\circ}$ (поперек-вдоль направления полета соответственно) и разведенных на угол 65° (показано на правой нижней панели) [Zhang et al., 2019]. Это изображение получено с пространственным разрешением ~10 км/пиксель в интервале времени, указанном на проекции орбиты. Внизу слева показан ход лучей в оптической системе камеры. На верхнем рисунке для сравнения приведены изображения частей аврорального овала, попавших 25.08.2018 в тот же период времени в поля зрения изображающих сканирующих спектрографов SSUSI [Paxton et al., 1993; Paxton et al., 2017], установленных на КА DMSPF17 (слева) и F18 (справа), полученные в близкие интервалы времени измерений с изображающими камерами WAI на KA Fengyun примерно с таким же пространственным разрешением [Zhang et al., 2019]. Примеры, показанные на Рис.9, свидетельствуют о возможности получения ВУФ-изображения значительной части аврорального овала за ~20 мин в случае, если плоскости полярных орбит 3х космических аппаратов разведены по азимутальному углу и синхронизованы по пересечению северной полярной области при их запусках, но за это время авроральная структура в различных секторах овала может измениться, это можно заметить при сравнении всех трех изображений в секторе 19-20 MLT.

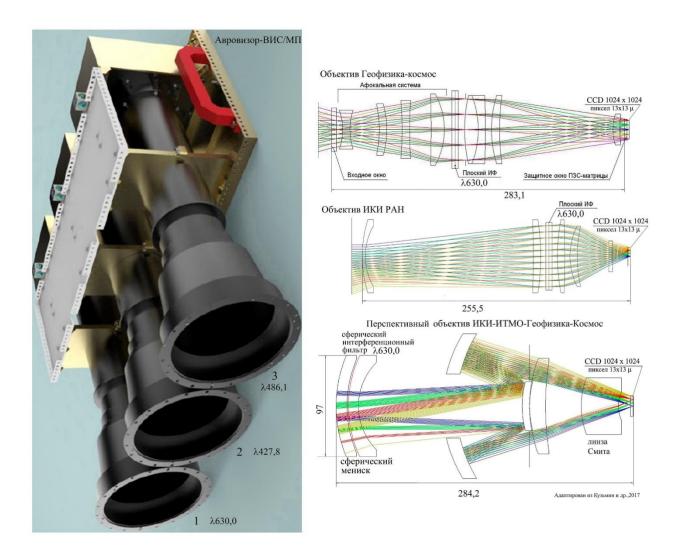


Рис.10. (справа) Примеры вариантов оптических схем каналов проектируемого аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП (с плоским фильтром и со сферическим фильтром [Кузьмин и др., 2017-2]) для измерений пространственных распределений конкретных авроральных эмиссий с орбиты перспективного КА Метеор-МП. (слева) Внешний облик имаджера (в соответствии с согласованным ГЧ [ДЭП, 2015]).

На рисунке 10 (левая панель) показана фотография макета имаджера Авровизор-ВИС/МП, выполненного по ГЧ, согласованному с конструкторами КА Метеор-МП, с указанием длин волн измеряемых авроральных эмиссий в каждом канале. На правой панели показаны варианты оптических схем, которые были рассчитаны специалистами ИКИ РАН и ОАО НПП Геофизикакосмос для 3х-канального аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА Метеор-МП. Варианты схем с плоским интерференционным фильтром в принципе подобны и близки по характеристикам, которые были детально рассмотрены в [Кузьмин и Чиков, 1995; Кузьмин и др., 2017]. Вариант новой схемы с фильтром, напыленным на сферический мениск, показанной на нижней панели, был рассчитан по входным данным, которые были представлены в изобретении [Кузьмин и Чиков, 1995; патент Кузьмин и Чиков, 1998]. Принципиально новое качество этой схемы в стабильности характеристик узкополосного фильтра на сферическом мениске: положения максимума полосы пропускания и ее полуширины (δλ~2 нм) во всех направлениях в пределах угла поля зрения имаджера 2₀=30°. Все его характеристики были рассмотрены как для видимого, так и для ВУФ-диапазона спектра [Кузьмин и Чиков, 1995]. В [Кузьмин и др.,2017-2] было обращено внимание на технологическую проблему, связанную с изготовлением сферического фильтра со спектральной полосой пропускания ~2 нм, которая заключается в отсутствии в России специального оборудования (механизма с 3D вращением подложки (мениска) под вакуумным колпаком, который обеспечивал бы компенсацию силы тяжести микрокапель при осаждении на поверхность мениска.

- 3 ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ ОДНИХ И ТЕХ ЖЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУР В РАЗНЫХ РАКУРСАХ С ДВУХ ОРБИТ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИХ 3D-ИЗОБРАЖЕНИЙ
- 3.1 РЕЗУЛЬТАТ КООРДИНИРОВАННЫХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ С КА ИК-БОЛГАРИЯ-1300 И ОРЕОЛ-3, ПРОВЕДЕННЫХ В 1982 Г.

Впервые успешная попытка наблюдений авроральной структуры в одном и том же секторе аврорального овала была сделана при координации работы двух КА ИК-Болгария-1300 и Ореол-3 в северной полярной зоне, с орбит которых измерялись распределения высыпающихся заряженных частиц и интенсивности свечения авроральных эмиссий. На КА Ореол-3 был установлен двухканальный авроральный фотометр Альтаир [Gladyshev et al., 1982], имеющий угол поля зрения КА ИК-Болгария-1300 был установлен авроральный фотометр мультиспектральным каналом, имеющим угол поля зрения тоже 3°, настроенный на измерения основных авроральных эмиссий, а также вторым каналом (угол поля зрения 3°), имеющим в поле зрения сканирующее зеркало поперек направления полета, измеряющий за 2 сек (1 сек влево и 1 сек вправо от направления в надир) пространственное распределение интенсивности эмиссии $\lambda630.0$ нм [OI] в строке шириной ~170 км [Петков и др., 1983; Balebanov et al., 1983]. Из нескольких попыток координации работы этих двух КА в зимний период 1981-1982 удачными оказались одновременные измерения 26.02.1982 при пересечении одного и того же участка вечернего сектора МLТ северного аврорального овала приблизительно над островом Врангеля. Оба КА пересекли овал и окрестность одной и той же магнитной силовой линии (м.с.л.) в пределах пяти минут (в 10.46-10.51 UT) на разных высотах (КА ИК-Болгария-1300 на высоте ~830 км, а Ореол-3 на высоте перигея ~480 км) (см. Рис.11). Случайным образом оказалось, что это событие совпало с конечной стадией суббури в этом секторе MLT (брейкап в 10.53 UT, что видно из магнитограммы, встроенной в середину рисунка). Результаты этих измерений проиллюстрированы на рис. 11 и были детально описаны в [Кузьмин и др., 2018-1].

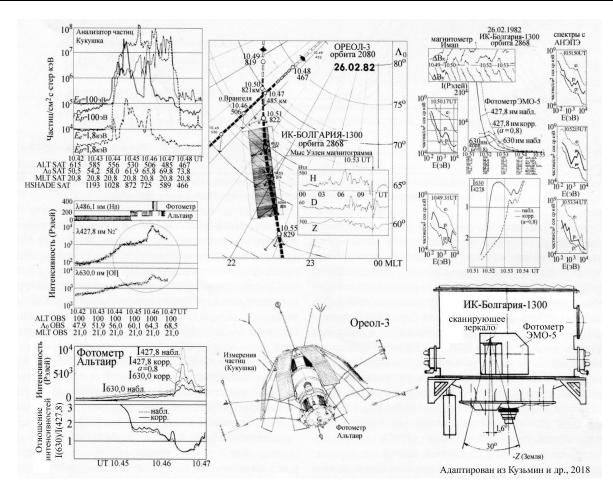


Рис.11. Фотометрические распределения авроральных эмиссий в авроральной структуре с двух орбитальных высот КА (Ореол-3 и ИК-Болгария-1300), полученные 26.02.1982 примерно над островом Врангеля во время максимальной стадии суббури (см. магнитограмму с мыса Уэлен в самой середине рисунка) одновременно с данными измерений энергетических распределений высыпающихся заряженных частиц и магнитометров на двух КА (вверху слева). Фотометрические профили эмиссий λ 427,8 нм и λ 630,0 нм, полученные с орбиты КА Ореол-3 без учета коррекции на отражения от подстилающей поверхности (слева в середине), а внизу слева фотометрические профили интенсивности этих эмиссий и их отношений показаны с учетом коррекции на отражение от подстилающей поверхности. Справа вверху показаны фотометрические профили эмиссий λ 427,8 нм и λ 630,0 нм, полученные с орбиты КА ИК-Болгария-1300 и их отношений, скорректированные на эффект отражения от подстилающей поверхности, а также спектры высыпающихся электронов и протонов, вверху показаны градиенты магнитного поля, измеренные магнитометром ИМАП в том же масштабе времени. В середине рисунка в координатах геомагн. широта-МLТ показаны проекции векторов наблюдений фотометра Альтаир (Ореол-3) и ЭМО-5 (ИК-Болгария-1300) на высоту эмиссии 1NGN₂+ λ 427,8 нм (100 км). Компоновка фотометра Альтаир на КА Ореол-3 и ЭМО-5 на КА ИК-Болгария-1300 показана внизу справа.

3.2 СМОДЕЛИРОВАННАЯ СИТУАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЭМИССИЙ В ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ АВРОРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ С ОРБИТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КА ЗОНД И КА МЕТЕОР-МП

На рисунке 12 (левая панель) представлена смоделированная ситуация и геометрия координации перспективных экспериментов с изображающими камерами, настроенными на измерения распределений интенсивности авроральных эмиссий, установленными на двух перспективных КА Метеор-МП и Зонд (программа Геофизика). Предварительная информация о запуске этих КА на одном носителе послужила стимулом для расчета вариантов их орбит и поиска ситуаций, когда оба КА пересекают одновременно один и тот же сектор северного аврорального овала. На ориентированном на центр Земли КА Метеор-МП будет установлен 3x-канальный имаджер Авровизор-ВИС/МП, нацеленный на измерения распределений интенсивности авроральных эмиссий λ 630,0 нм [ОП; λ 427,8 нм N_2^+ и λ 486,1 нм (H_β). Оптические оси каналов этого

прибора направлены в надир. Его внешний облик и варианты оптических схем показаны на Рис.10. На этом же КА будут работать анализатор энергетических распределений заряженных частиц МСГИ-МП в диапазоне энергий от 200 эВ до 15 кэВ и магнитометр ФМ-МП в составе гелиогеофизического комплекса НА. На КА Зонд будет установлен двухканальный имаджер Летиция, настроенный на измерения авроральных эмиссий $\lambda 630,0$ нм [OI] и $\lambda 427,8$ нм 1NG N_2^+ . Ориентация строительных осей КА Зонд будет подчинена обеспечению условий наблюдений Солнца телескопом (ФИАН), т.е. ось КА, параллельно которой направлен телескоп, будет постоянно следить за Солнцем. В зимних условиях в северном полушарии отклонение оси телескопа, а, следовательно, и оси (-Z) КА Зонд будет близко к максимальному от направления в надир. Поэтому, в соответствии с компоновкой прибора на КА, оси каналов имаджера Летиция было решено отклонить на 30° в сторону затененной атмосферы и ионосферы. Расчеты орбит, и координат векторов наблюдений, сделанные на основе предварительных начальных условий с помощью ПО Вектор-М [Баньщикова, и др., 2013; Avdyushev et al., 2017] позволили смоделировать ситуации, когда поля наблюдений имаджеров Авровизор-ВИС/МП и Летиция будут одновременно пересекать одну и ту же авроральную структуру и при этом в каналах будут получаться ее изображения в разных ракурсах, что позволит при обработке на основе алгоритмов 3Dреконструкций получать объемные распределения интенсивности эмиссий одной и той же наблюдаемой структуры авроры. Прогнозные расчеты на основе предварительных начальных условий показали, что подобные ситуации с разной степенью перекрытия полей наблюдения (углы полей зрения изображающих каналов как имаджера Летиция, так и имаджера Авровизор-ВИС/МП составляют $2\omega = 30^{\circ}$) должны случаться примерно 1 раз в 2 недели в течение января-февраля 2026 г. в условиях, когда фаза Луны менее четверти. Детали этого расчета прогноза ситуаций перекрытий полей зрения имаджеров в авроральном овале и геометрии наблюдений см. в [Кузьмин и др., 2017-1]. Авторы уверены, что даже такие относительно редкие ситуации могут создать условия для наблюдений эмиссий в одной и той же авроральной структуре с двух ракурсов и последующей 3Dреконструкции их изображений, что позволит получить необходимые данные для исследований механизмов влияния мелкомасштабных авроральных неоднородностей Ne на условия распространения сигналов навигационных систем, пересекающих авроральные структуры (см. далее).

На рисунке 12 (справа) показан пример другого возможного варианта наблюдений авроральных эмиссий с трех перспективных малых космических аппаратов (МКА), «разведенных» на одной орбите на расстояния ~ 150 км друг от друга, с помощью авроральных имаджеров Летициямикро, которые, как предполагается, будут установлены на каждом из трех МКА [Кузьмин и др.,2019-2]. Благодаря перекрытию полей зрения имаджеров, имеющих угол поля зрения $2\omega=30^{\circ}$ и работающих с временами экспозиций $t_{exp}\sim 0,1$ с, одна и та же область авроральной структуры будет наблюдаться под разными углами многократно и синхронно с каждой пары МКА, строительные оси которых будут направлены в надир. Подобная модель стереосъемки авроральных структур была рассмотрена в [ДЭП, 2015] Авровизор-ВИС/МП и в [Кузьмин и др., 2016], но она была ограничена углом поля зрения одного имаджера ($2\omega=30^{\circ}$).

3.3 ПРИМЕР 3D-РЕКОНСТРУКЦИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ЦЕПОЧКИ НАЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ ALIS В СКАНДИНАВИИ В 2008 Г.

На рисунке 13 показаны примеры 3D-реконструкций изображений авроральных эмиссий $\lambda427,8$ нм 1NGN₂+, $\lambda557,7$ нм [OI] и $\lambda630,0$ нм [OI], полученных со Скандинавской сети станций наблюдения ALIS 31.01.2008 [Enell et al., 2012]. Согласно функциональной связи интенсивности эмиссии $\lambda427,8$ нм 1NGN₂+ с электронной концентрацией в Е-области и потоком энергии высыпающихся электронов, а отношения интенсивностей эмиссий $I(\lambda630,0)/I(\lambda427,8)$ со средней энергией высыпающихся электронов (см. [Steel et al., 1990]), реконструированные плоские распределения эмиссий могут быть пересчитаны в 3D-распределения Ne, потока энергии и средней энергии электронов. Примеры высотных распределений отношений $I(\lambda630,0)/I(\lambda427,8)$, полученные в [Enell et al., 2012], показаны справа вверху Рис.13. Реконструкции орбитальных изображений авроральных эмиссий в перспективных проектах на KA Зонд и Метеор-МП могут быть получены с использованием развития подобных алгоритмов. Детали этих алгоритмов см. в [Кузьмин и др., 2017–1].

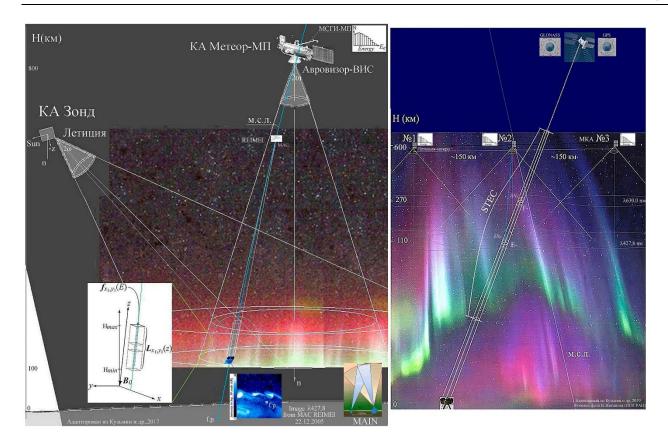


Рис.12. (слева) Пример геометрии одновременных наблюдений структур авроральных эмиссий с перспективных КА Метеор-МП и Зонд (программа Геофизика). Одновременные измерения в таких скоординированных ситуациях позволят наблюдать одни и те же авроральные структуры в разных ракурсах, что создаст условия для их 3D-реконструкции и получения объемного изображения структуры авроры в конкретных эмиссиях, как это регулярно делается с сетей наземных изображающих приборов в Скандинавии и Канаде (см. Рис. 13, адаптированный из [Enell et al., 2012]). Для наглядности и сравнения углов полей зрения и масштабов в угле поля зрения имаджера Авровизор-ВИС/МП условно показан угол поля зрения имаджера МАС, работавшего на КА REIMEI, и кадр изображения эмиссии 1NG λ427,8 нм (N₂+). (справа) Пример перспективных одновременных наблюдений авроральных структур с трех МКА, «расставленных» на расстояние ~150 км друг от друга. Показана условная геометрия наблюдений характеристик ионосферы с орбиты и поверхности Земли одновременно с работой навигационных систем, когда сигналы протыкают авроральные структуры.

4 ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ ТРАНСПОЛЯРНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ИМИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУР ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ.

Объемные реконструкции высотных распределений интенсивности эмиссий (и, как следствие, 3D-реконструкции Ne), полученных с орбит KA, совместно с энергетическими распределениями высыпающихся частиц, данными измерений мелкомасштабных градиентов магнитного поля на пересекаемых м.с.л., могут стать основой для анализа локальных условий в плазме, при которых возникают процессы в полярной ионосфере, приводящие к мелкомасштабным преломлениям трансполярных навигационных сигналов в диапазоне частот от сотен МГц до единиц ГГц и, в конечном счете, их сцинтилляциям, пример которых приведен на рис.14.

На Рис. 14, который был интегрирован из рисунков в [Jin et al., 2017, 2018; Prikryl et al., 2016] и адаптирован из [Кузьмин и др., 2019-2], показан пример пространственных корреляций фазовых сцинтилляций сигналов GPS с авроральными структурами, которые они протыкали на пути от источника (КА) до конкретных GPS приемников, расположенных в скандинавской арктической зоне. В виде кружков разных диаметров в зависимости от величины наблюдавшегося индекса фазовой сцинтилляции σ_{ϕ} в локациях точек протыкания ионосферы IPP (ionospheric pierce point)

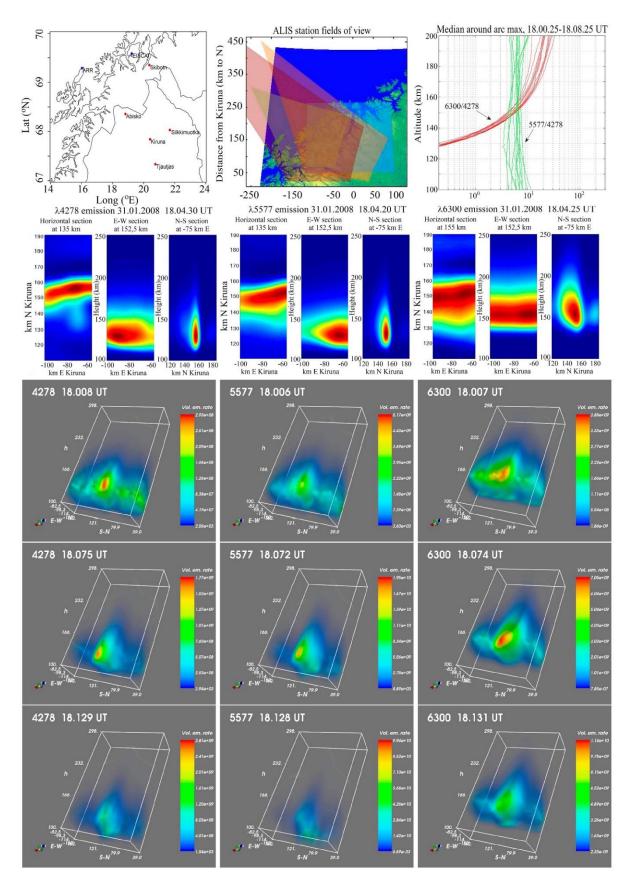


Рис.13. Пример 3D-реконструкций из плоских изображений авроральных эмиссий 1NG λ 427,8 нм (N₂⁺); λ 557,7 нм [OI] и λ 630,0 нм [OI], полученных с наземной цепочки станций в Скандинавии 31.01.2008 с использованием алегбраических алгоритмов, интегрированный из рисунков в [Enell et al., 2012] и адаптированный из [Кузьмин и Мерзлый, 2019].

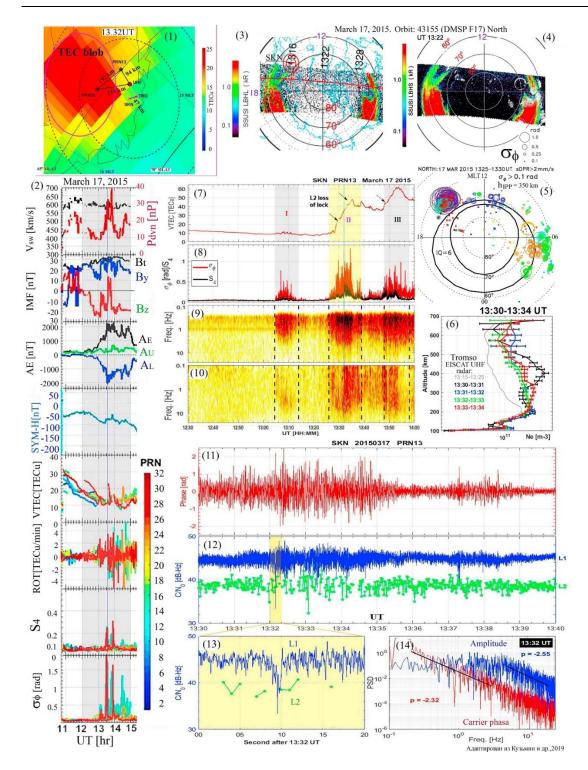


Рис. 14. Интегрирован из серии рисунков (1), (4)-(14), адаптированных из [Jin et al, 2018], и рисунков (4) и (5), адаптированных из [Prikryl et al., 2016], в которых рассмотрены результаты комплексных наблюдений (над станцией Skibotn (SKN) в северной Норвегии) в F-слое амплитудных и фазовых сцинтилляций сигналов PRN13 и PRN28 GPS 17 марта 2018 г. в интервале 13.30-13.40 UT во время мощной геомагнитной бури (см. текст). Авроральное изображение LBHs (4), полученное BУФ-имаджеромSSUSI с орбиты DMSPF17 одновременно с изображением LBHl (3), показанном на фоне контуров географической карты, включает локации наблюдений фазовых сцинтилляций сигналов в точках протыкания ионосферы по отношению к сектору аврорального овала. Шкала величин индекса фазовых сцинтилляций σ_{φ} (в радианах) показана справа внизу от ВУФ-изображения LBHs (4) кружками различных диаметров. На фоне модельного аврорального овала (индекс IQ=6 [Holtzworth R.H., and Meng C.-I., 1975]) на панели (5) также показаны локальные позиции точек протыкания (IPP) 33-х приемников GPS NMA 1 Γ ц, покрывающих Норвегию, цветными кружками различных диаметров маркированы уровни индекса фазовых сцинтилляций σ_{φ} .

Мерцающими GPS-сигналами, в работах [Jin et al., 2017; 2018] были нанесены на карты распределений интенсивности ВУФ-эмиссий, полученных 17.03.2015 в интервале времени 13.22-13.30 UT с помощью изображающего ВУФ-спектрометра SSUSI, установленного на КА DMSP F17. Детали характеристик сцинтилляций, их корреляции с высотными профилями электронной концентрации, полученными на EISCAT UHF радаре одновременно, скорость Солнечного ветра, состояние межпланетного поля, АЕ-индекс и другие условия во время наблюдений сцинтилляций сигналов GPS также показаны на рис.14 (слева) и рассмотрены в [Кузьмин и др., 2019-2].

ПРИМЕР РЕЗУЛЬТАТОВ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ, ВОЗБУЖДЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СУБАВРОРАЛЬНУЮ ИОНОСФЕРУ МОЩНЫМИ МОДУЛИРОВАННЫМИ ПУЧКАМИ ВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

На рисунке 15 представлен пример, интегрированный из рисунков в [Kendall et al., 2010] и адаптированный из [Кузьмин и др., 2016], мелкомасштабных авроральных структур, которые были зарегистрированы наземными изображающими приборами в эмиссии λ 557,7 нм [OI], и фотометрами (профили интенсивности) в эмиссиях λ 777,4 нм; λ 844,6 нм; λ 630,0 нм; λ 557,7 нм; и 427,8 нм при воздействии на субавроральную ионосферу модулированными пучками ВЧ-излучения в 03.12.48; 03.12.53 и 03.12.57 UT 28.10.2008 в Гаконе (Аляска). Одновременно модулированное обратное рассеяние радарного пучка (Kodiak) от нагретой ионосферы было зафиксировано на высотах >600 км (вверху слева Рис.15). Этот пример представлен с целью показать, какие авроральные структуры могут быть картографированы орбитальными авроральными имаджерами в субавроральной области в относительно спокойных геомагнитных условиях, когда мелкомасштабных структур не должно наблюдаться в этой области.

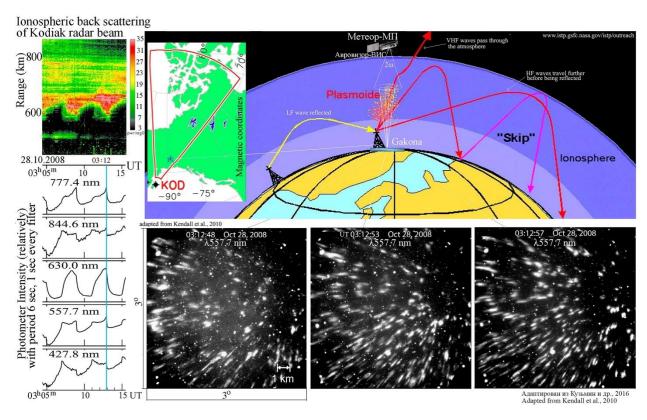


Рис. 15. Пример серии из трех изображений мелкомасштабных авроральных структур в эмиссии λ557,7 [OI] в поле зрения наземного имаджера 3 × 3° (внизу справа) и фотометрических профилей эмиссий λ777,4; λ844,6; 630,0; 557,7 и 427,8 нм (внизу слева), возбужденных мощным модулированным ВЧ-излучением в субавроральной области (Гакона) 28.10.2008 в интервале 03.05-03.15 UT. Вверху слева показано модулированное обратное рассеяние пучка радара Kodiak на высотах >550 км, направленного в область возбуждения эмиссий. Вверху показана геометрия эксперимента и условно показано наблюдение возбужденных структур имаджером Авровизор-ВИС/МП с орбиты перспективного КА Метеор-МП.

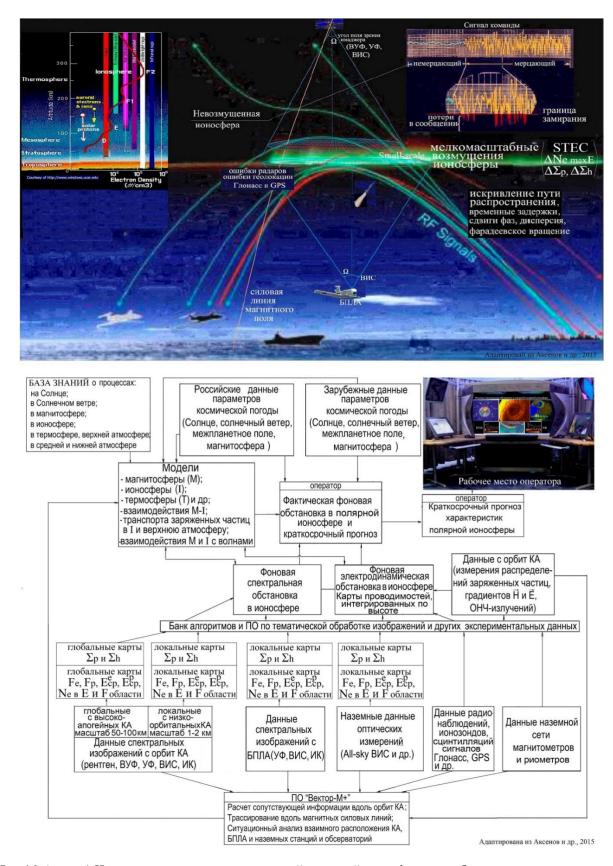


Рис.16. (вверху) Иллюстрация влияния возмущенной полярной ионосферы на работу технологических систем в полярной ионосфере [Аксенов и др., 2015]. (внизу) Функциональная блок-схема перспективной системы контроля и оценки состояния фактической фоновой спектральной обстановки и электродинамической обстановки (дистанционно) в полярной ионосфере по спектральным изображениям конкретных авроральных эмиссий на разных высотах

6 ПРОЕКТ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЛОК-СХЕМЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ ФОНОВОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБСТАНОВКИ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВЫСЫПАНИЯМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ИЗ МАГНИТОСФЕРЫ В ПОЛЯРНУЮ ИОНОСФЕРУ

На рисунке 16 (нижняя панель) представлен модернизированный вариант проекта функциональной блок-схемы оценки состояния фактической фоновой спектральной обстановки и электродинамической обстановки полярной ионосферы (как составной части перспективной системы контроля космической погоды), в который добавлены блоки расчетов глобальных и локальных карт энергетических характеристик высыпающихся частиц по данным распределений интенсивности измеряемых эмиссий и их отношений, а также расчет и картирование электронной концентрации, потока энергии и средней энергии, и поперечных проводимостей ионосферы по данным полей распределений энергетических характеристик частиц, полученных на основе распределений интенсивности эмиссий. Первый вариант этой блок-схемы был предложен в 2015 г. [Аксенов и др., 2015]. При наличии данных орбитальных и наземных наблюдений одних и тех же авроральных структур с разных ракурсов предполагается включение алгоритмов реконструкции изображений и получение локальных 3D-распределений Ne и поперечных магнитному полю проводимостей Σ_p и Σ_h , интегрированных по высоте [Кузьмин и Мерзлый, 2018-2]. На верхней панели Рис.16 показан коллаж, демонстрирующий влияние космической погоды на работу технологических систем во время геомагнитных возмущений, и условная геометрия наблюдений авроральных эмиссий с орбиты перспективного КА Метеор-МП.

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря свечению компонент полярной верхней атмосферы и ионосферы, возбуждаемому при ударах высыпающихся из магнитосферы заряженных частиц, как на экране, отображаются динамические процессы, происходящие в магнитосферно-ионосферной системе. Свечение эмиссий в многообразных авроральных структурах разных масштабов отображает информацию о мгновенных энергетических распределениях высыпающихся заряженных частиц, и, как следствие, информацию о мгновенных распределениях электронной концентрации Ne на разных высотах ионосферы и поперечных проводимостей Σ_p и Σ_h , интегрированных по высоте, благодаря которым магнитосферные токи замыкаются в толще ионосферы.

Результаты глобальных наблюдений аврорального овала с орбит типа Молния спомощью изображающих камер и изображающего спектрографа в ВУФ-диапазоне спектра с перспективного КА Арктика-МП и наблюдений локальных участков аврорального овала с высот низкоорбитальных КА (на орбитах с полярными углами наклонения) с помощью широкоугольных изображающих камер Авровизор-ВИС/МП и Летиция с перспективных КА Метеор-МП и Зонд взаимно дополняют друг друга по масштабам. Результаты наблюдений с вытянутых орбит типа Молния за время экспозиции изображений ~ несколько десятков сек позволяют получать глобальную крупномасштабную картину свечения ВУФ-эмиссий электронного и протонного овалов целиком, отображающую их мгновенную локацию в пространстве, зависящую от знаков компонент ММП, и положения границ высыпаний протонов и электронов из магнитосферы с пространственным разрешением ~ 50÷70 км/пиксель. С полярных орбит до 1000 км возможно картографирование крупномасштабных участков аврорального овала с помощью сканирующего по пространству изображающего ВУФ-спектрографа (как например SSUSI на работающих КА DMSP, или перспективного SSUSI Light [Paxton et al., 2017]) с пространственным разрешением ~ 10 км/пиксель. При использовании изображающих камер, настроенных на измерения распределений интенсивности конкретных эмиссий угол поля зрения может достигать величины 30°, что позволяет за доли сек получать мгновенную картинку локального участка аврорального овала, имеющего диаметр от 350 до 450 км (в зависимости от высоты наблюдаемой эмиссии), при этом проекция м.с.л. всегда будет «находиться» в поле изображений авроральных эмиссий, что принципиально важно при одновременных измерениях в окрестности КА энергетических распределений высыпающихся частиц [Кузьмин и др., 2016]. Пространственное разрешение в этих случаях ~1÷2 км/пиксель при времени экспозиции изображения 0,1-0,2 с, что позволяет «видеть» структуры мелкомасштабной авроры в различных секторах МLТ полярной области, контролировать их динамику, находить и идентифицировать пространственные корреляции локаций протыканий авроральных структур трансполярными сигналами во время их сцинтилляций (мерцаний).

Структура всеобъемлющей системы контроля космической погоды в околоземном пространстве еще не создана. Продолжают создаваться отдельные наземные и орбитальные составляющие, касающиеся контроля процессов на Солнце, процессов в солнечном ветре, состояния межпланетного поля, и процессов в магнитосфере. Контроль процессов в ионосфере и особенно в полярной ионосфере осуществляется, начиная с периода МГГ 1957-1958, с помощью наземных средств диагностики. Вклад орбитальных средств становится все более информативным и особенно с развитием бортовых информационных систем в 21 веке. Методики авроральной оптической диагностики активно развиваются и могут внести существенный вклад в составную часть системы контроля космической погоды.

ЛИТЕРАТУРА

- Аванпроект. ОКР «Создание перспективного оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высоко- и низкоапогейных КА для мониторинга и контроля состояния ионосферы Земли». Пояснительная записка, книга 1 (95 с.), и книга 1.1. (290 с.). 2013.
- Аксёнов О.Ю., Аникин В.А., Борисов Ю.А., Кузьмин А.К., Лапиин В.Б., Ляхов А.Н., Мерзлый А.М., Потанин Ю.Н., Салтанов П.Я., Свидский П.М., Трекин В.В. Основы развития перспективной системы контроля состояния фоновой обстановки в полярной ионосфере и её краткосрочного прогноза с помощью комплексного мониторинга магнитосферно-ионосферного взаимодействия в части авроральной активности с орбит КА и поверхности Земли // Препринт 2015-1. Москва. ЦАО. МФТИ. 37 с. 8 рис. 2015. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201501.pdf.
- Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Кузьмин А.К. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте «Авровизор-ВИС/МП» на КА «Метеор-МП» // Известия вузов. Физика. М.: ФГА ОУВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет». №10/2. С.106-111. 2012. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201201.pdf.
- ДЭП (Дополнение к эскизному проекту) на ГГАК-МП в части трехканального имаджера видимого диапазона Авровизор-ВИС/МП). Пояснительная записка ЦИНВ.412125, РКС. 2015. 163 С.
- Кузьмин А.К., Чиков К.Н. Панорамные изображающие монохроматические камеры для дистанционной диагностики характеристик ионосферы и верхней атмосферы // Оптика атмосферы и океана. V.8, №6, С.897-909, 1995. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/190505.pdf.
- Кузьмин А.К., Чиков К.Н. Патент № 2112263 на изобретение "Устройство для построения монохроматического изображения" Патентообладатель (ли): Государственный Санкт Петербургский институт точной механики и оптики (технический университет). Приоритет изобретения 14 декабря 1995 г., зарегистрирован в Государственном реестре изобретений 27.05.1998. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199502.pdf.
- Кузьмин А. К., Чиков К. Н. Спектрофотометрическая диагностика энергетических характеристик и проводимости авроральной ионосферы с ИСЗ. 1. Методические особенности, вопросы точности, требования к характеристикам экспериментальной аппаратуры // Космические исследования. Т.45. №3. С.1–16. 2007. http://www.coσmic-rays.ru/articles/13/200702.pdf.
- Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высоко-апогейных и низкоорбитальных космических аппаратов, Вопросы электромеханики, Т.143. №6. С.19-28. 2014. http://www.cosmic-rays.ru/ articles/13/201402.pdf.
- Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Крученицкий Г.М., Мерзлый А.М., Потанин Ю.Н., Чувашов И.Н.
 Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы
 имаджером Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА «Метеор-МП» // Вопросы электромеханики,
 Труды ВНИИЭМ за 2016 год. Материалы четвертой международной научно-технической конференции
 «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». − М.: АО
 «Корпорация ВНИИЭМ». 2016. С.325-341. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201702.pdf.
- *Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н.* Преимущества наблюдений авроральных структур с двух орбит и возможности для реконструкций 3D-распределений

- эмиссий, получаемых с разных позиций имаджеров // Вопросы электромеханики. Т.158. №3. С.7-21. 2017-1. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201703.pdf.
- *Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Крученицкий Г.М., Маслов И.А., Потанин Ю.Н.* Варианты и выбор оптической схемы, оптимизация характеристик орбитального аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП», сравнение с зарубежными аналогами // Вопросы электромеханики. Т.160. №5. С. 20-36. 2017-2. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201704.pdf.
- Кузьмин А.К., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Баньщикова М.А. Экспериментальный опыт и перспективы развития авроральной оптической диагностики состояния полярной ионосферы // Вопросы электромеханики. Т.163. №2. С.12-28, 2018-1. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201804.pdf.
- Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 1 (ВУФ-диапазон) // Вопросы электромеханики. Т.167. №6. С.9-41. 2018-2. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201805.pdf.
- Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Дистанционная оптическая диагностика состояния полярной ионосферы в различных диапазонах спектра на основе данных наблюдений орбитального аврорального имаджинга. Часть 2 (видимый и ВУФ-диапазон) // Вопросы электромеханики. Т.168. №1. С.19-42. 2019-1. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201901.pdf.
- Кузьмин А.К., Вайсберг О.Л., Шувалов С.Д., Шестаков А.Ю., Крученицкий Г.М., Баньщикова М.А.
 Методика диагностики распределений интенсивности авроральных эмиссий с орбит одновременно с измерениями характеристик плазмы и ее роль в исследованиях и контроле условий распространения сигналов навигационных систем в полярной ионосфере // Вопросы электромеханики. Т.169. №2. С.9-25. 2019-2. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201902.pdf.
- *Петков Н.П., Гогошева Ц.Н., Гогошев М.М., Кузьмин А.К., Ангаров В.Н.* Фотометрическая сканирующая система ЭМО-5 на борту ИСЗ «ИК-Болгария-1300» // Сб. Научное космическое приборостроение, вып.2 оптико-электронные приборы. Изд. Металлургия. С.77-83. 1983. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198303.pdf.
- Avdyushev V.A., Banshchikova M.A., Chuvashov I.N., Kuzmin A.K. Capabilities of software "Vector-M" for a diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from the different orbits as a part of the system of control of space weather // Tomsk State University, Russian Federation. V. 11. EPSC2017-834-1. 2017 European Planetary Science Congress. 2017. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017EPSC.pdf.
- Balebanov V.M., Kuzmin A.K., Gogoshev M.M., Gogosheva Ts.N., Petkov N.P., Kinev K. Some results of scanner spectrophotometric measurements of aurora and airglow from IK-Bulgaria-1300 satellite and prospects of similar measurements, in "Results of the Arcad 3 project and of the recent programmes in magnetospheric and ionospheric physics. Tolouse 84. Cepadues-Editions. Tolouse-France. 1985. P.747-764. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198402.pdf.
- Cao Ch., Newman T.S., Germany G.A., Spann J.F. A new method for auroral oval detection in FUV imagery // MVA2007 IAPR Conference on Machine Vision Applications. Tokyo. Japan, P. 583-586. May 16-18. 2007.
- Carruthers G.R., Page T. Apollo 16 far ultraviolet imagery of the polar auroras, tropical airglow belts, and general airglow // Journ. Geophys. Res., V.81. №4. P. 483-496. 1976. https://doi.org/10.1029/JA081i004p00483
- Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP mission // Space Sci. Rev. V.189. P.15-25. Doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
- Despirak L. V., Lubchich A. A., Yahnin A. G., Kozelov B. V., Biernat H. R. Development of substorm bulges during different solar wind structures // Ann. Geophys. V.27, P.1951–1960. 2009. https://doi.org/10.5194/angeo-27-1951-2009
- Ebihara Y., Sakanoi T., Asamura K., Hirahara M., and Thomsen M.F. Reimei observation of highly structured auroras caused by nonaccelerated electrons. Journ. Geophys. Res. V. 115. A08320. doi:10.1029/2009JA015009. 2010.
- Enell C.-F., Gustavsson B., B. U. E. Brandstrom B.U.E., Sergienko T.I., Verronen P.T., Rydesater P., and Sandahl I. Tomography-like retrieval of auroral volume emission ratios for the 31 January 2008 Hotel Payload

- 2 event // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss. V.2. P.1–21. 2012.www.geosci-instrum-method-data-syst-discuss.net/2/1/2012/doi:10.5194/gid-2-1-2012
- Frey H. U., Mende S. B., Carlson C. W., Gerard J.-C., Hubert B., Spann J., Gladstone G. R., and Immel T. J.
 The electron and proton aurora as seen as by IMAGE-FUV and FAST // Geophys. Res. Lett. V. 28. N6. P.
 1135 1138. 2001.
- Frey H. U., Mende S. B., Immel T. J., Gerard J.-C., Hubert B., Habraken S., Spann J., Gladstone G. R.,
 Bisikalo D. V., Shematovich V. I. Summary of quantitative of IMAGE far ultraviolet auroral data // Space Sci.
 Reviews. 2003. V. 109. Issue 1–4. P. 255-283. Doi:10.1023/: SPAC.0000007521.39348.a5.
- *Gerard J.-C.*, *Hubert B.*, *Bisicalo D. V.*, *Shematovich V. I.* A model of the Lyman-α line profile in the proton aurora // Journ. Geophys. Res. V.105. P. 15795–15805. 2000.
- Germany G. A., Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators // Journ. Geophys. Res. V. 99. A1. P. 383–388. 1994. https://doi.org/10.1029/93JA02357
- Germany G. A., Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G., John S. Determination of ionospheric conductivities from FUV auroral emissions // Journ. Geophys. Res. V.99. A12. P.23297–23305. 1994.
- Germany G. A., Spann J. F., Parks G. K., Brittnacher M. J., Elsen R., Chen L., Lummerzheim D. and Rees M. H. Auroral observations from the POLAR Ultraviolet Imager (UVI) // Geospace Mass and Energy Flow: Results the International Solar-terrestrial Physics Program. Geophys. Monogr. Ser., V.104, edited by J. L.Horwitz, D. L. Gallagher and W. K. Peterson. 1998. P.149–160. AGU. Washington. D. C.
- Gladyshev V.A., Kuzmin A.K., Mularchik T.M., Angarov V.N., Issaikin V.P., Sauvaud J.A. Auroral photometers aboard the Aureol-3 satellite: the Altair experiment // Ann. Geophys. t.38, fasc.5. P.631-634. 1982. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198201.pdf.
- Jin Y., Moen J.I., Oksavik K., Spicher A., Clausen L.B.N., and Miloch W.J. GPS scintillations associated with cusp dynamics and polar cap patches // Journ. Space Weather Space Clim. V. 7. Issue A23. P.1-12. 2017. DOI:10.1051/swsc/2017022
- Jin Y., Oksavik K. GPS scintillation and losses of signal lock at high latitudes during the 2015 St.Patric's day storm // Journ. Geophys. Res. V.123. Pp. 7943-7957. 2018. https://doi.org./10.1029/2018JA025953
- Holtzworth R.H., and Meng C.-I. Mathematical representation of the auroral oval // Geophys. Res. Lett. V.2.
 No 9. P. 377-380. 1975.
- *Hubert B.*, *Gerard J.-C.*, *Bisicalo D. V.*, *Shematovich V. I.*, *Solomon S. C.* The role of proton precipitation in the excitation of auroral FUV emissions // Journ. Geophys. Res. V.106. P. 21475–21494. 2001.
- Hubert B., Gerard J.-C., Evans D. S., Meurant M., Mende S. B., Frey H. U., Immel T. J. Total electron and proton energy input during auroral substorms: Remote sensing with IMAGE-FUV // Journ. Geophys. Res. V.107. A8. P.1183. (SMP15-1-SMP15-12). 2002. doi:10. 1029/2001JA009229.
- Hubert B., Milan S.E., Grocott A., Blockx C., Cowley S.W.H., Gerard J.-C. Dayside and nightside reconnection rates inferred from IMAGE FUV and super Dual Auroral Radar Network data // Journ. Geophys. Res., Space Physics. V.111. A03217. P.1-16. 2006. Doi:10.1029/2005JA011140
- Kendall E., Marshall R., Parris R.T., Bhatt A., Coster A., Pedersen T., Bernhardt P., Selcher C. Decameter structure in heater-induced airglow at the High frequency Active Auroral Research Program facility // Journ. Geophys. Res., Space Physics. V.115. A8. A08306, P.1-11. 2010. doi:10.1029/2009JA015043.
- Mende S. B., Heetderks H., Frey H. U., Lampton M., Geller S. P., Habraken S., Renotte E., Jamar C., Rochus P., Spann J., Fuselier S. A., Gerard J.-C., Gladstone R., Murphree S., Cogger L. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 1. System design // Space Sci. Reviews. V. 91. N1–2. P. 243-270. 2000-1. Doi:10.1023/a:100 5271728567.
- Mende S. B., Heetderks 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. 2000-2 Doi:10.1023/a:1005227915363.33.
- Mende S. B., Heetderks H., Frey H. U., Stock J. M., Lampton M., Geller S. P., Abiad R., Siegmund O. H. W., Habraken S., Renotte E., Jamar C., Rochus P., Gerard J.-C., Sigler R., Lauche H. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft. 3. Spectral imaging of Lyman-α and OI 135.6 nm // Space Sci. Reviews. V. 91. N1–2. P. 287–318. 2000-3. Doi:10.1023/a:1005292301251.

- Mende S.B., Frey H.U., Carlson C.W., McFadden J. IMAGE and FAST observations of substorm recovery phase aurora // Geophys. Res. Lett. V.29. No 12. 2002. Doi://10.1029/2001GL013027.
- *Mende S. B., Carlson C. W., Frey H. U., Peticolas L. M., Ostgaard N.* FAST and IMAGE-FUV observations of substorm onset // Journ. Geophys. Res. V.108. SMP 6–1. 1344. 2003. doi:10.1029/2002JA009787, 2003.
- Mende S.B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging. 1. Observables. Jorn. Geophys. Res., Space physics, 2016, v.121, issue 10, Pp.10623-10637, Doi:10.1002/2016/JA022607.
- Meurant M., Gerard J. C., Hubert B., Coumans V., Shematovich V. I., Bisikalo D. V., Evans D. S., Gladstone G. R., Mende S. B. Characterization and dynamics of the auroral electron precipitation during substorms deduced from IMAGE-FUV // Journ. Geophys. Res. V.108. A6. P. 1247. (SMP14-1-SMP14-10). 2003. doi: 10.1029/2002JA009685.
- Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite // Earth Planet Space. 2008. V.60, P.827-835.
- Paxton, L. J., Schaefer R. K., Zhang Y., and Kil H. Far ultraviolet instrument technology // Journ. Geophys. Res. Space Physics. V.122. P. 2706–2733. 2017. doi:10.1002/2016JA023578.
- Paxton L.J., Meng C.I., Fountain G.H., Ogorzalek D.S., Darlington E.H., Gary S.A., Goldsten J.O.,
 Kusnierkiewicz D.Y., Lee S.C., Linstrom L.A., Maynard J.J., Peacock K., Persons D.F., Smith B.E. SSUSI Horizon-to-horizon and limb-viewing spectrographic imager for remote sensing of environmental parameters //
 Proc. SPIE 1764. Ultraviolet Technology IV. 161. 1993. doi:10.1117/12.140846.
- Prikryl P., Ghoddoousi-Fard R., Weygand J.M., Viljanen A., Connors M., Danskin D.W., Jayachandran P.T., Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L., Thomas E.G., Ruohoniemi J.M., Durgonics T., Oksavik K., Zhang Y., Spanswick E., Aquino M., Sreeja V. GPS phase scintillation at high latitudes during the geomagnetic storm of 17-18 March 2015 // Journ. Geophys. Res. Space Physics. V. 121. P. 10448-10465, 2016. doi:10.1002/2016JA023171
- Raab W., Branduardi-Raymont G. Wang C., Dai L., Donovan E., Enno G., Escoubet P., Holland A., Jing L., Kataria D., Li L., Read A., Rebuffat D., Romstedt J., Runciman C., Sembay S., Spanswick E., Sykes J., Thornhill J., Wielders A., Zhang A., Zheng J. SMILE: A joint ESA/CAS mission to investigate the interaction between the solar wind and Earth's magnetosphere // Open University. Open Research Online the Open University's repository of research publications and other research outputs SMILE: a joint ESA/CAS mission to investigate the interaction between the solar wind and Earth's magnetosphere. SPIE. 2016. 9 pages. http://dx.doi.org/doi:10.1117/12.2331984
- Steel D.P., and McEwen D.J. Electron auroral excitation efficient and intensity ratios // Journ. Geophys. Res. V.95 P.10321-10336. 1990.
- Zhang X.X., Chen B., He F., Song K.-F., He L.-P., Liu S.-J., Guo Q.-F., Li J.-W., Wang X.-D., Zhang H.-J., Wang H.-F., Han Z.-W., Sun L., Zhang P.-J., Dai Sh., Ding G.-X., Chen L.-H., Wang Z.-S., Shi G.-W., Zhang X., Yu Ch., Yang Z.-D. Wide-field auroral imager onboard the Fengyun satellite, Science&Applications, 8:47, c.1-12, 2019.https://doi.org/10.1038/s41377-019-0157-7

ORBITAL OPTICAL AURORAL DIAGNOSTICS OF THE STATE OF THE POLAR IONOSPHERE, AS A PART OF THE SYSTEM CONTROL OF SPACE WEATHER

A.K. Kuzmin, O.L. Vaisberg, A.M. Merslyi, A.A. Petrukovich, G.M. Kruchenitskii, M.A. Banshchikova

In this work, using the specific examples presented, we consider only a small part of the characteristics included in a promising space weather monitoring system related to remote optical diagnostics of the polar ionosphere. Examples illustrated by specific auroral emission measurements obtained from different orbits simultaneously with plasma characteristics in the vicinity of the spacecraft are considered in the context of using experimental foreign and domestic methodological experience, some new aspects of the development and characteristics of optical imaging equipment in upcoming projects, as well as their development prospects soon.

KEYWORDS: POLAR IONOSPHERE, AURORAL IMAGES, ORBITAL DIAGNOSTICS, CHARACTERISTIC STATUS MONITORING, SPACE WEATHER