

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВРОРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ОРБИТ

А. К. Кузьмин, Г. М. Крученицкий,
Ю. Н. Потанин, М. А. Баньщикова

Создание бортовых авроральных фотометров и интерферометра и результаты измерений, проведённых с ними, позволили накопить немалый методический опыт постановки оптических экспериментов и измерений заряженных частиц, нацеленных на диагностику состояния верхней атмосферы и ионосферы с орбит КА. Эти эксперименты проводились в разных условиях на разных орбитах, как с автоматических спутников, так и с орбитальных станций, а полученная информация позволила откорректировать ряд ответов на вопросы о характеристиках околоземного пространства, примеры результатов проиллюстрированы. Экспериментам сопутствовало развитие моделей взаимодействия высыпавшихся из магнитосферы энергичных электронов и протонов с составляющими верхней атмосферы и ионосферы, которые подтвердили, что дистанционные измерения энергетических характеристик частиц и кинетической температуры нейтралов и ионов с орбиты могут обеспечивать информацию, необходимую для контроля состояния ионосферы в реальном времени. Улучшение характеристик чувствительных изображающих детекторов придало импульс дальнейшего развития орбитальной авроральной фотометрии и интерферометрии в видимом диапазоне спектра и ВУФ, в результате которого происходило увеличение углов поля зрения, пространственного и временного разрешения, динамического диапазона как имаджеров авроральных эмиссий, так и изображающих интерферометров. Разрабатываются новые методики наблюдений и новая аппаратура для мониторинга характеристик полярной ионосферы с орбит перспективных Российских КА, реализация которых будет опираться на новое ПО, обеспечивающее расчёт сопутствующей астрономической, геофизической, геомагнитной и географической информации вдоль орбит как для ц. м. КА, так и для векторов дистанционных наблюдений на конкретных высотах ионосферы с учётом состояния текущей ориентации осей КА, а также ситуационный анализ взаимного расположения нескольких КА на разных орбитах на основе высокоточной модели движения КА.

Ключевые слова: дистанционная диагностика состояния полярной ионосферы, авроральные эмиссии, кинетическая температура составляющих верхней атмосферы, авроральные имаджеры, интерферометр Фабри – Перо.

Введение

Оптическая диагностика состояния полярной ионосферы с орбит начала развиваться со второй половины XX века, когда на орбиту были запущены первые фотометры, настроенные на измерения интенсивности эмиссий верхней атмосферы и полярных сияний, и интерферометры для измерений контуров эмиссионных линий верхней атмосферы, позволяющих по их доплеровскому уширению измерять кинетическую температуру излучающих атомов и других компонент, находящихся с ними в термодинамическом равновесии, а также скоростей нейтрального ветра и ионного дрейфа по доплеровскому смещению максимума контура линии излучения нейтральной и ионизованной компонент соответственно. Первые фотометрические эксперименты были проведены с орбит КА: Injun-3, OGO-4, «Космос-224», OGO-6, ISIS-II, AE-C, SkyLab, «Салют-4», «Космос-900», ИК-19. В 1980-х гг. на орбитах КА Kiokko, DE-A, DE-B, «ИК-Болгария-1300», «Ореол-3», NILAT, ОС «Мир», Polar Bear, Viking, Freya работало новое поколение фотометрических приборов в видимой и ВУФ-областях спектра, которые позволили заметно развить методики наблюдений эмиссий сверху. Основной скачок развития произошёл в период от 1990-х гг. до начала XXI века. Благодаря улучшению характеристик изображающих детекторов и интенсификаторов

были разработаны и запущены авроральные имаджеры для спиново-вращающихся КА Polar и IMAGE на орбитах типа «Молния», и подметающий сканирующий изображающий спектрометр SSUSI и лимбовый спектрометр SSULI для КА DMSP F16 – F18 [1 – 3].

Существенное улучшение понимания процессов, приводящих к возбуждению авроры в магнитосферно-ионосферной системе, возникло после 1996 г., когда стали появляться данные с КА FAST [4]. И хотя на этом малом КА не было оптической аппаратуры, благодаря исследованиям характеристик плазмы на его орбите стало ясно, что можно выделить четыре главных типа аврорального источника, и кроме известных до этого авроральных областей, где доминируют ионные высыпания, питч-угловая диффузия и электронные высыпания из ближней магнитосферы, имеются области высокоплотных электронных высыпаний, возникающих при энергизации относительно холодных ионосферных электронов приходящими Альвеновскими волнами [5]. Все типы авроры могут различаться как по средней энергии, так и по общему потоку энергии высыпавшихся частиц [6], поэтому диагностика этих характеристик и идентификация типа аврорального источника являются главными задачами контроля состояния полярной ионосферы. В 2005 и 2013 гг. в Японии и Канаде были спроектированы имаджеры MAC и FAI, настроенные на авроральные

эмиссии в видимой области спектра. Они работали на низкоорбитальных, ориентированных на Землю малых КА REIMEI и e-POP соответственно [7, 8]. Возможности изменений ориентации КА REIMEI и широкий угол поля зрения имаджера FAI (e-POP) позволили практически всегда «видеть» распределение эмиссий в масштабе ~1 км и долей секунды в окрестности проекции м. с. л., которую пересекали КА.

Интерес к методам орбитальной оптической диагностики полярной ионосферы и авроральных эмиссий увеличился на рубеже XX – XXI вв., когда стало окончательно понятно, что условия трансполярного распространения сигналов глобальных орбитальных навигационных систем, зависит от распределения локальных градиентов электронной концентрации в полярной ионосфере, интегрируемых в общее содержание электронов ТЕС, а в конечном счёте, от типа аврорального источника и «мгновенного» состояния мелкомасштабных структур и энергетического распределения высыпающихся заряженных частиц. Энергетические распределения электронов и протонов через столкновения и возбуждение составляющих верхней атмосферы и ионосферы отражаются в распределениях интенсивности авроральных эмиссий и кинетической температуры нейтралов и ионов, что подтверждается современными моделями взаимодействия высыпающихся заряженных частиц с атмосферой и ионосферой [9 – 11]. Именно эти причины [12] повлияли на мотивацию создания орбитальных авроральных имаджеров для дистанционной диагностики состояния полярной ионосферы с перспективных КА [13, 14 – 18]. Рассмотрим несколько конкретных примеров из прошлого и будущего.

Измерения кинетической температуры кислородных атомов с ОС «Мир» и перспективы будущих экспериментов

На высотах 200 – 300 км, где кинетические столкновения составляющих верхней атмосферы приводят к тепловому равновесию, температуру нейтралов уверенно измеряли с поверхности Земли в стационарных авроральных структурах и средних широтах по доплеровскому уширению контуров запрещённых линий, таких как кислородная линия $\lambda 630,0$ нм со временем жизни возбуждённого атома $O(^1D)$ около 2 мин, но при этом локальные градиенты температуры при высыпаниях частиц возникали [частное сообщение В. М. Игнатьева, ИКФИА, 1981].

Наземные оптические измерения в динамичных авроральных структурах [19, 20] продемонстрировали успешность методики получения враща-

тельной температуры молекул на высотах 100 – 150 км спектрографическим методом, но такие наблюдения с орбиты до сих пор не проводились из-за недостатка чувствительности.

Ж. Е. Vlamont был первым, кто с помощью конфокального интерферометра Фабри – Перо с полярной орбиты КА OGO-6 измерил температуру составляющих верхней атмосферы в различных широтах и геомагнитных условиях [21], являющаяся одним из важнейших параметров в её термодинамике, связанной с ионосферой через механизм ионного трения. В отличие от плоского ФПИ сферический интерферометр сохранял стабильность юстировки после вибрационных нагрузок и поэтому был применён для орбитальных измерений. В ИКИ АН СССР и ОКБ ИКИ ещё в 1970-х гг. была разработана аппаратура «Эмиссия», включающая конфокальный интерферометр Фабри – Перо и параллельный фотометр, для тангенциальных измерений доплеровских контуров кислородной линии $\lambda 630$ нм [ОИ] с пилотируемых орбитальных станций «Салют». В этих экспериментах по ряду технических причин, связанных с использованием иллюминаторов для визуальных наблюдений экипажа, получение доплеровского контура эмиссии $\lambda 630$ нм [ОИ] на освещённой стороне оказалось невозможным, а были получены только фотометрические широтные профили интенсивности кислородной эмиссии [22], и, в частности, данные о долготных неоднородностях её интенсивности в различные местные времена в области ночной тропической (экваториальной) аномалии, открытой Эпплтоном в 1946 г. [23]. В 1980-х гг. аппаратура «Эмиссия» была существенно доработана и получила название «Босра» в рамках научной программы советско-сирийского экипажа. Чувствительность ФПИ и фотометра были увеличены более, чем на половину порядка, благодаря использованию активного охлаждения фотокатодов приёмников излучения, что позволило экипажу на ОС «Мир» провести в июле 1987 г. измерения доплеровских контуров в условиях ночной южной авроральной ионосферы во время суббури при $K_p = 4+$ [24]. Во время этого полёта был получен ряд значений кинетической температуры кислородных атомов в авроральных структурах южного аврорального овала, интенсивность эмиссии $\lambda 630$ нм в которых (параллельно с интерферометром) регистрировалась фотометром. На рис. 1 показаны: геометрия тангенциальных наблюдений с орбиты ОС «Мир» слоя свечения кислородной эмиссии на высоте F слоя ионосферы и условный модельный высотный профиль интенсивности эмиссии $\lambda 630$ нм; справа

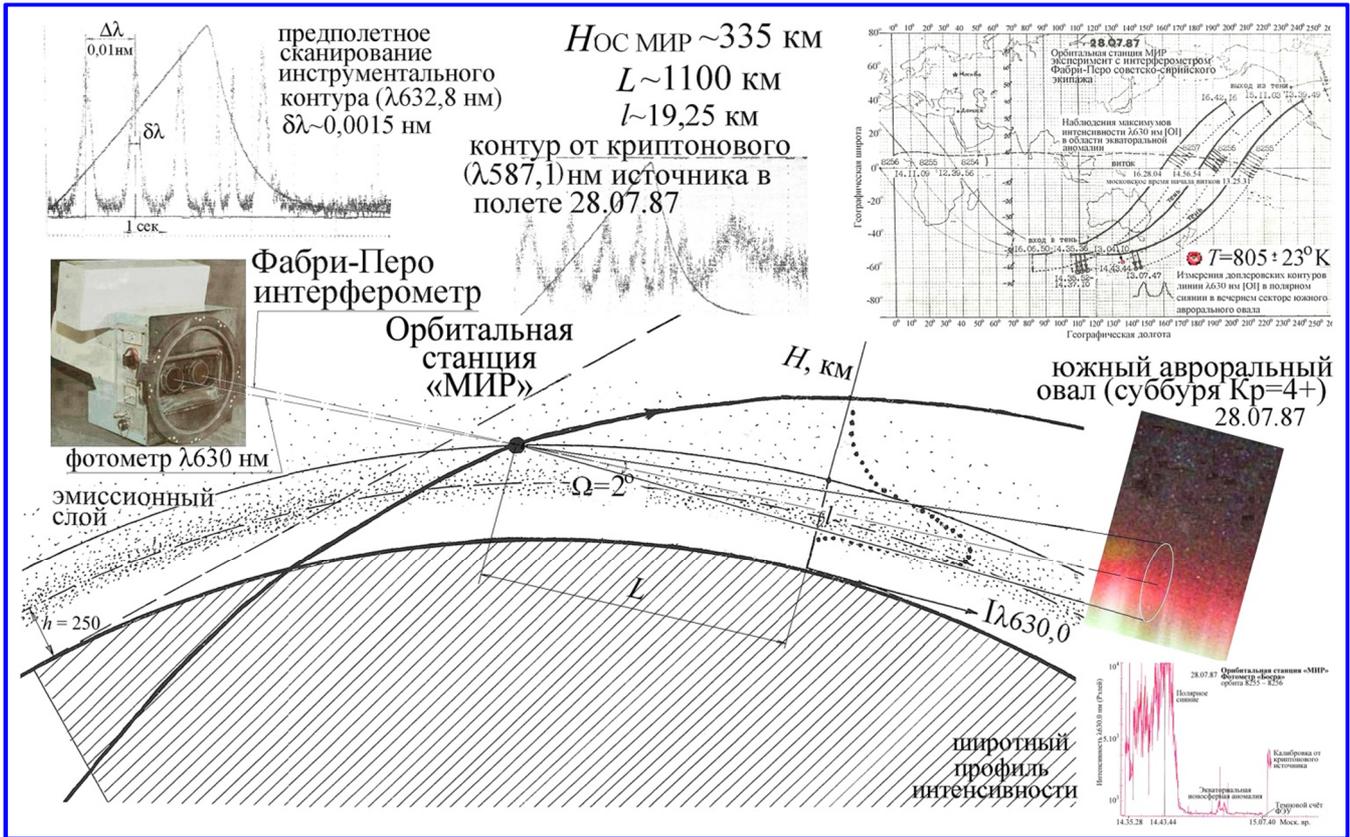


Рис. 1. Геометрия интерферометрических наблюдений доплеровского контура кислородной линии $\lambda 630,0$ [OI] нм в авроральной структуре в южном апексе орбиты с ОС «Мир» 28.08.1987

сверху показана карта развёрток проекций орбит ОС «Мир» на витках 8254 – 8257 28 июля 1987 г., где стрелками показаны проекции векторов наблюдений аппаратурой «Босра»; маленькой красной точкой отмечена одна из локаций наблюдений доплеровского контура в авроральной структуре в 14.43.44 московского времени на витке 8255; сверху слева показана развёртка сканирования инструментального контура ФПИ, прописанная перед запуском ОС с помощью рассеянного пучка излучения He-Ne лазера (линия неона $\lambda 632,8$ нм), направленного снаружи через иллюминатор в прибор, установленный на иллюминаторе внутри ОС. В середине рисунка представлена развёртка сканирования контура линии криптона ($\lambda 587,1$ нм), излучаемой встроенным в прибор безэлектродным источником, прописанная в полёте на витке 8255, которая свидетельствовала о работоспособности ФПИ непосредственно перед измерениями доплеровского контура, внизу справа показан широтный профиль интенсивности эмиссии $\lambda 630$ нм, параллельно полученный фотометром на витке 8255. В увеличенном виде этот профиль показан справа сверху рис. 2.

На рис. 2 слева сверху показаны: нормированный на единицу интенсивности наблюдаемый кон-

тур (свёртка модельного доплеровского контура кислородной линии $\lambda 630,0$ нм при температуре излучающих атомов $950^\circ K$ с предполётным инструментальным контуром конфокального ФПИ в аппаратуре «Босра» на ОС «Мир» [24], сканерная развёртка которого показана слева сверху на рис. 1. Внизу слева рис. 2 для наглядности представлено семейство свёрток инструментального контура с модельными доплеровскими контурами при кинетической температуре излучающих атомов $500, 700, 900, 1500, 2000^\circ K$; справа сверху в увеличенном виде показан широтный профиль интенсивности линии $\lambda 630,0$ нм, измеренный фотометром на витке 8255 ОС «Мир» 28.07.1987 как в тропических и средних широтах, так и в южном авроральном овале. Вертикальной чёрной линией помечена интенсивность линии в авроральной структуре (>10 кРэлей), при которой ФПИ зарегистрировал доплеровский контур $\lambda 630,0$ нм при температуре $805 \pm 23^\circ K$ на высотах $230 - 270$ км. Благодаря устным онлайн-комментариям экипажа во время измерений известно, что этот контур получен при наблюдениях лучевой динамичной авроральной структуры, когда кинетическая температура излучающих атомов относительно высокая, а средняя энергия высыпающихся

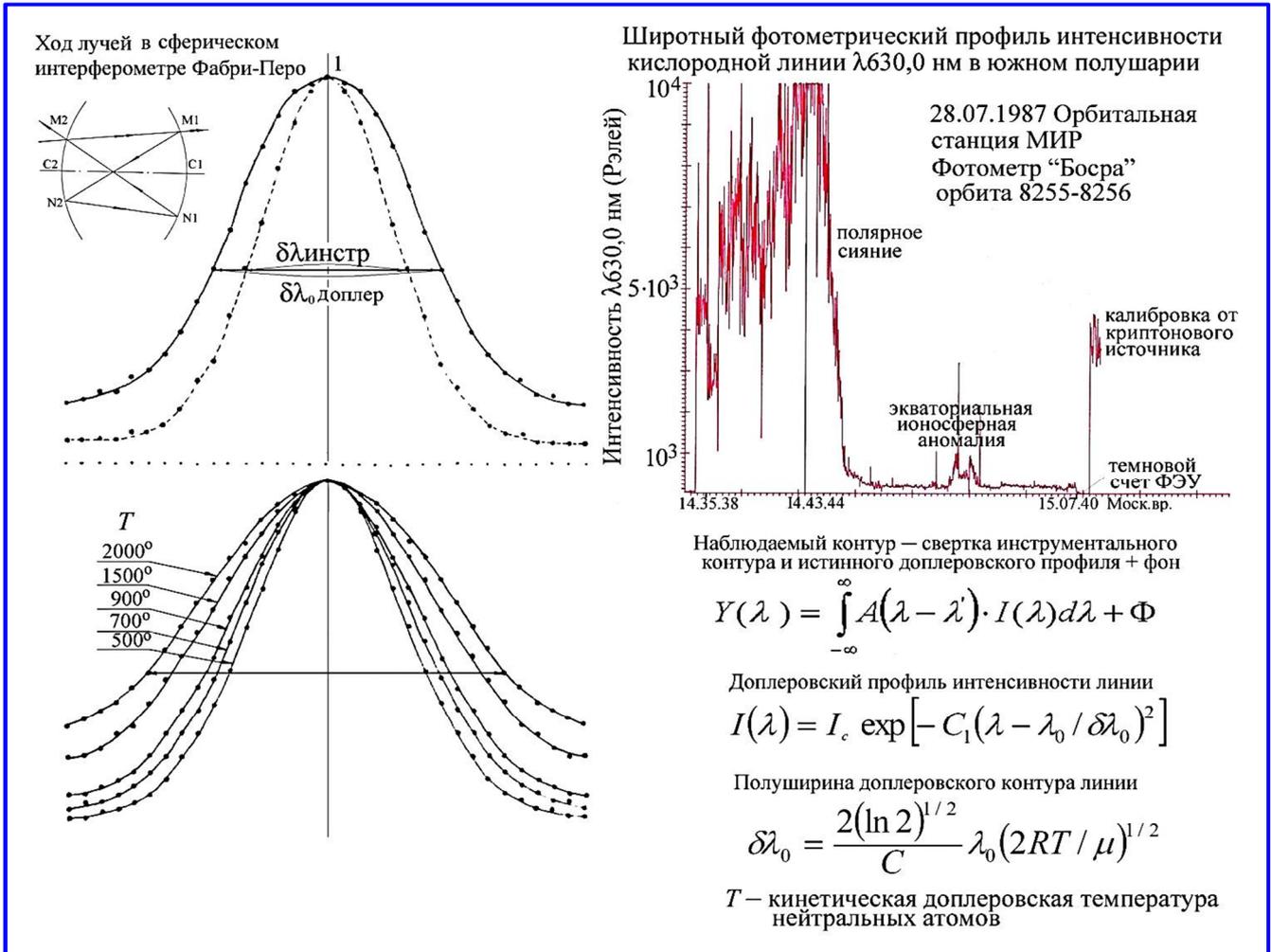


Рис. 2. Метод синтетических контуров для анализа доплеровских контуров линий и измерений кинетической температуры кислородных атомов, проведённых с ОС «Мир»

электронов низкая (см. [19]). В годы, близкие к максимуму солнечной активности, в апексах орбиты ОС нередки случаи наблюдений дискретных авроральных структур, и особенно в районах Канады и Австралии (из-за наклона геомагнитного диполя). Предполагаем, что рисунок подобной авроральной структуры был сделан в бортовом журнале при наблюдениях авроры над Канадой в реальном времени 07.02.1978 космонавтом Юрием Романенко, когда он работал на ОС «Салют-6» (см. рис. 1 в [25]).

Для обработки и анализа доплеровских контуров и расчёта кинетической температуры в ИКИ РАН был использован метод синтетических контуров [26], основанный на сравнении, нормированных на единицу интенсивности свёртки (её уравнение показано на рис. 2, справа внизу) инструментального контура с реальным доплеровским контуром со свёртками из семейства синтетических контуров при различных температурах. Температура излучающих атомов определялась при наилучшем

совпадении форм свёрток контуров инструментального с модельным и инструментального с реальным, при этом параллельно вычислялась ошибка определения температуры ΔT .

Существенный вклад в 1980-х гг. в развитие оптических методов измерения кинетической доплеровской температуры составляющих верхней атмосферы на высотах 200 – 300 км, скоростей нейтральных ветров и дрейфа ионов внесли профессор Р. Haas (ФПИ на КА UARS и DE-B [27, 28]) и профессор G. Shepherd и его коллеги, которые впервые разработали широкоугольный изображающий интерферометр Майкельсона (аппаратура WAMDI) для ОС Spacelab (STS-9) в 1983 г. [29]. Эта аппаратура обеспечила контроль с орбиты кинетической доплеровской температуры нейтралов по доплеровским контурам конкретных атмосферных эмиссий с разрешением $0,1^\circ$ в зависимости от широты, высоты и местного времени, позднее был создан модернизированный вариант изображающего

интерферометра WINDII для решения тех же задач с автоматического КА UARS (1991 – 2003) [30 – 32], а наиболее усовершенствованный вариант (MIGHTI) в 2018 г. будет запущен на КА ICON [42] (см. далее).

Спектрографическая методика измерений кинетической температуры составляющих верхней атмосферы в различных слоях ионосферы развивается. Перспективный метод измерений вращательной температуры молекулярных ионов на высотах 100 – 150 км, и особенно в высокодинамичной авроре, возбуждаемой Альвеновскими волнами, где теряют энергию высыпаящиеся электроны со средней энергией ~ нескольких кэВ, основан на измерениях отношения интенсивностей в двух ветвях молекулярных полос в системе 1NG и рассмотрен в работах [19, 20, 33]. Возрастание вращательной температуры будет увеличивать отношение интенсивности разрешённых полос 425 к 427 нм (время их жизни ~10⁻⁸ с),

измеряемое наземным спектрографом. Перспективными представляются и измерения ночных вращательных температур N₂ в полосах LBH [34]. Такие спектрографы в будущем наверняка будут построены для измерений температуры на разных высотах с орбит КА. В своём обзоре [20] проф. S. V. Mende указал также на перспективность создания бортового ФПИ для поддиапазона ВУФ 140 – 150 нм, который благодаря поглощению подстилающего слоя O₂ позволит измерять кинетическую температуру нейтралов не только на ночной стороне орбиты, но и на освещённой.

Развитие орбитальной авроральной фотометрии в проектах «ИК-Болгария-1300» и «Ореол-3»

Рассмотрим, какое развитие авроральной фотометрии произошло благодаря двум орбитальным проектам: советско-болгарскому «ИК-Болгария-1300»,

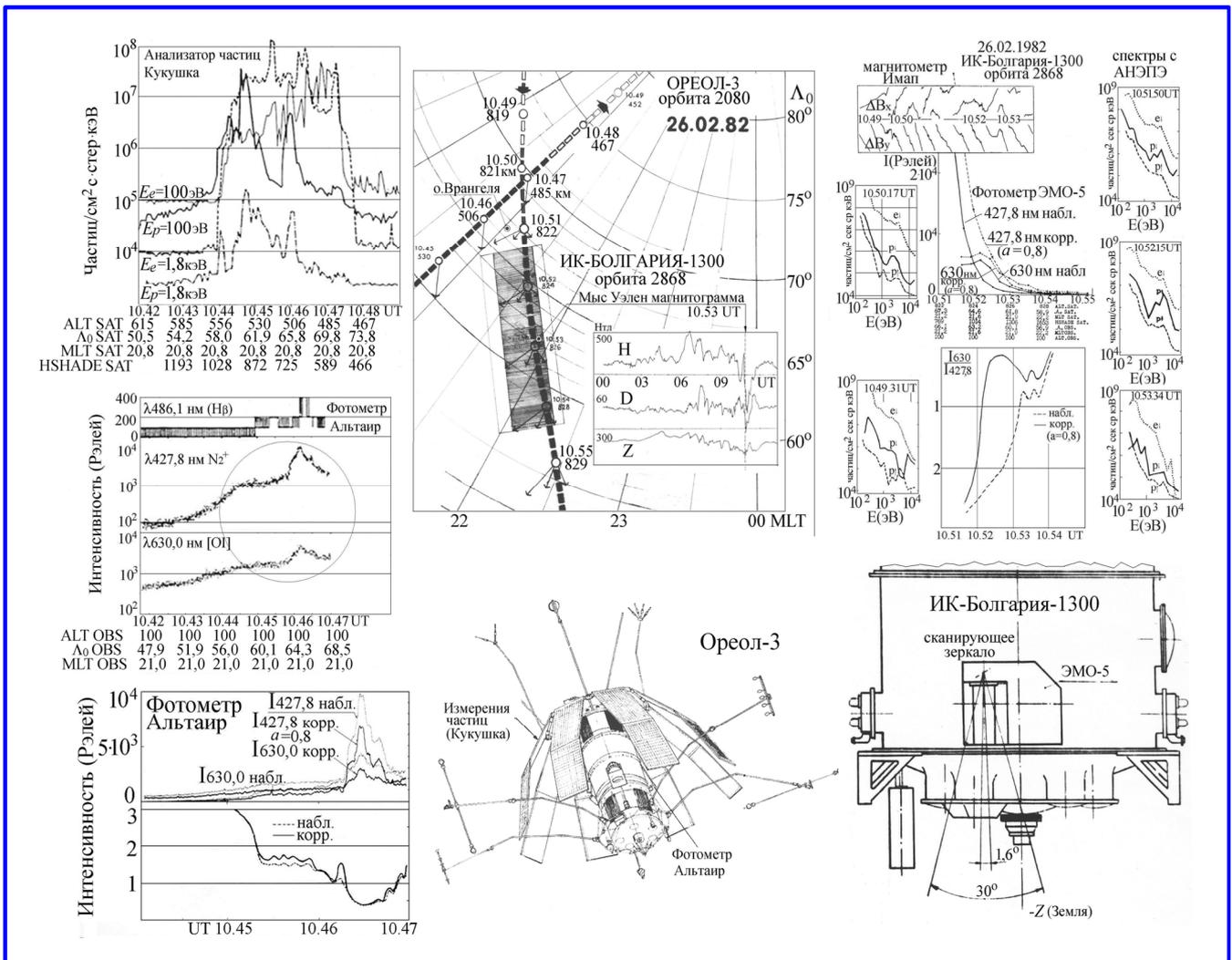


Рис. 3. Результаты скоординированных одновременных фотометрических наблюдений авроральных эмиссий с КА «Ореол-3» и «ИК-Болгария-1300» при их одновременном пересечении окрестности одной и той же м. с. л. в авроральном овале во время конечной стадии суббури 26.02.1982

научным руководителем которого был проф. А. Г. Иосифьян, и советско-французскому «Аркад-3» (спутник «Ореол-3») в начале 1980-х гг. На рис. 3 показан пример результатов скоординированных одновременных фотометрических наблюдений авроральных эмиссий и характеристик плазмы в окрестности каждого из этих КА. 26 февраля 1982 г. в интервале 10.46-10.48 UT оба спутника пересекли на разных высотах окрестность одной и той же м. с. л. в интервале 3 мин в вечернем секторе северного аврорального овала примерно над островом Врангеля во время вспышки breakup, т. е. максимальной стадии суббури (10.47-10.50 UT), что видно на средней панели рис. 3, на которой показаны проекции ц. м. КА и проекции векторов наблюдений фотометров на высоту 100 км в координатах Λ_0 -MLT, рассчитанных с учётом углов компоновки фотометров на КА и данных контроля ориентации строительных осей. Из-за разности параметров орбит КА подобные события случались периодически примерно раз в четверо суток в интервале нескольких минут с разным радиусом их попадания в окрестность одной и той же м. с. л., но по техническим причинам результаты были получены только в одном случае координации работы этих КА [35]. Так случилось, что именно 26.02.1982 в период 06-12 UT в вечернем секторе аврорального овала произошла геомагнитная суббурия, а спутники пересекли авроральный овал на разных высотах во время максимальной её стадии, что видно как по магнитограмме (встроена в среднюю панель рис. 3), полученной на станции мыса Уэлен (магнитометр на о. Врангеля в рассматриваемом интервале времени не работал), так и по интенсивности эмиссии $\lambda 427,8$ нм N_2^+ , которая достигла величины более 35 кРэлей (см. профиль интенсивности, измеренный фотометром ЭМО-5 на КА «ИК-Болгария-1300»). Компоненты магнитного поля, измеренные аппаратурой ИМАП на КА ИК-Б-1300 и TRAC на КА «Ореол-3» также «показали» градиенты, сопутствующие пересечению интенсивных продольных токов. На рис. 3 показаны магнитограммы и профили потоков электронов и протонов с энергиями 1,8 кэВ и 0,1 кэВ, измеренные на КА «Ореол-3», энергетические спектры, измеренные аппаратурой АНЭПЭ на КА «ИК-Болгария-1300», фотометрические широтные профили интенсивности эмиссий $\lambda 427,8$ нм N_2^+ и $\lambda 630,0$ нм [OI], полученные с обоих спутников. Профиль интенсивности водородной эмиссии H_β , свидетельствующий о высыпаниях протонов, был получен только с КА «Ореол-3» (см. левую и правую панели на рис. 3). Все профили интенсивности эмиссий были скорректированы на отражение от

подстилающей поверхности при коэффициенте отражения $a = 0,8$, так как по данным Гидрометцентра СССР, в этой области Арктики в этот период была ясная погода) [35]. Учёт влияния коррекции интенсивности авроральных эмиссий на эффект отражения от подстилающей поверхности особенно сказывается на величине отношения интенсивностей $\lambda 630/\lambda 427,8$ на экваториальной границе авроральной дуги, а следовательно, и на величине E_{cp}^e , связанной с этим отношением функционально [36, 37]. Широтные профили этого отношения показаны на левой нижней панели рис. 3 (фотометр «Альтаир») и внизу правой верхней панели рис. 3 (фотометр ЭМО-5).

На нижних панелях рис. 3 показаны схематические изображения КА «Ореол-3» и нижней части КА «ИК-Болгария-1300» и компоновка фотометров «Альтаир» и ЭМО-5 на них соответственно, оси которых направлены в сторону Земли. Рассмотренный на рис. 3 пример авроральных наблюдений и характеристик высыпающихся частиц во время максимальной стадии суббури при пересечении двумя КА окрестности одной и той же м. с. л. демонстрирует методические возможности для исследований авроры и локальных характеристик полярной ионосферы с разных орбит, когда в окрестности одной и той же м. с. л. были одновременно измерены распределения заряженных частиц на разных высотах и интенсивности авроральных эмиссий. Американский спутник DE-1 с авроральным ВУФ-имаджером на борту, работавший в феврале 1982 г. на полярной орбите типа «Молния», в течение рассматриваемого интервала времени «находился» в средних широтах в южном полушарии вблизи перигея и поэтому «увидеть» глобальные границы всего аврорального овала в период рассматриваемой ситуации не было возможности.

Пример спектрографических наблюдений авроральных ВУФ-эмиссий с орбиты КА «Авроральный зонд»

В следующем примере (см. рис. 4) рассмотрим результат спектрографических наблюдений авроральных эмиссий в ВУФ-области спектра с высокопогейной орбиты КА «Авроральный зонд» (проект «Интербол-2») [38]. Бесщелевой спектрограф УФС ИПС сканировал полем зрения ($\Omega \sim 0,3^\circ$) по пространству аврорального овала с помощью поворотного плоского зеркала и спинового вращения КА «Авроральный зонд». Геометрия наблюдений показана на рис. 4 (слева). Развёртка по спектру осуществлялась при отражении от плоской дифракционной решётки, работающей в 1-м порядке (см. оп-

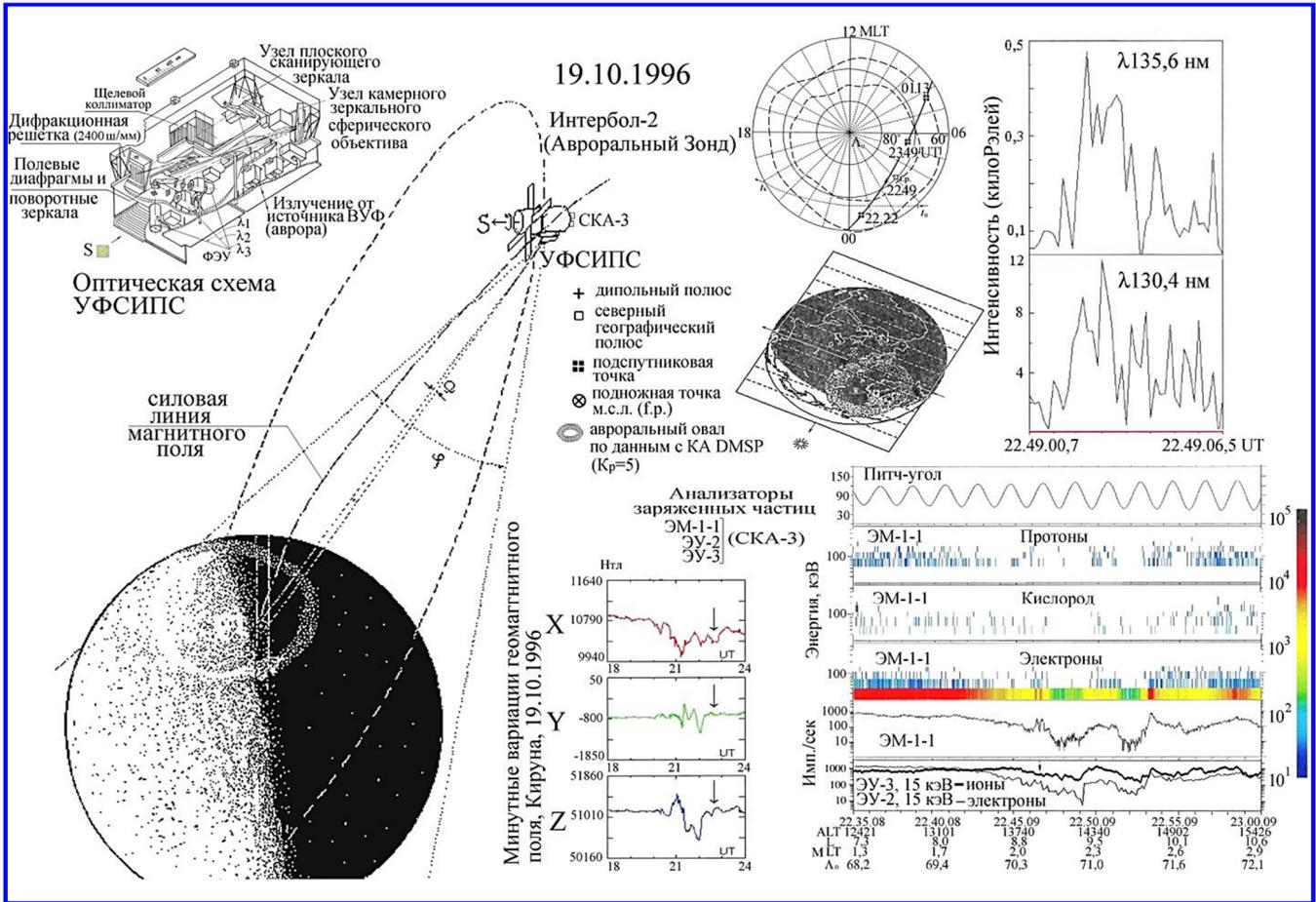


Рис. 4. Пример широтного скана интенсивности ВУФ-эмиссий $\lambda_{130,4}$ и $\lambda_{135,6}$ нм спектрографом УФСИПС с орбиты КА «Авроральный зонд» («Интербол-2»), полученного на стадии восстановления суббури 19.10.1996 в 22.49 UT, и спектрограммы интенсивности потоков электронов и энергии ионов, полученной анализаторами заряженных частиц комплекса СКА-3 в 22.35-23.00 UT

тическую схему на рис. 4, сверху слева), а с помощью разнесённых камерных зеркал излучение авроральных ВУФ-эмиссий: кислородных $\lambda_{130,4}$ и $\lambda_{135,6}$ нм и азотной $\lambda_{149,3}$ нм выбиралось и направлялось на фотоумножители. Справа сверху на рис. 4 показаны профили интенсивности кислородных эмиссий, полученные 19.10.1996 в 22.49.00-22.49.06 UT, когда КА пересёк авроральный овал из утреннего в полуночный сектор MLT на высоте ~ 14000 км. Проекция трассы КА показана чёрной линией, а трек сканирования полем зрения УФСИПС по авроральному овалу показан точечной линией. Справа внизу на рис. 4, на первых трёх панелях (сверху вниз) показана развёртка измерений энергетических распределений высыпающихся протонов и электронов с энергиями в несколько десятков кэВ, полученная с помощью энергомасс анализатора ЭМ-1-1 и энергоугловых анализаторов ЭУ-2 и ЭУ-3 (нижняя панель). Справа цветом показана шкала потока энергии частиц в ед. частиц/см²·с·кэВ. В середине внизу

на рис. 4 показана магнитограмма (развёртка компонент магнитного поля), полученная в Кируне 19.10.1996 в интервале 18-24 UT, на которой вертикальными стрелочками отмечен «момент» ВУФ-измерений с орбиты КА «Авроральный зонд». Судя по магнитограмме, КА пересёк авроральный овал на фазе восстановления суббури.

Анализ авроральных ВУФ-изображений, полученных одновременно с КА IMAGE, КА TIMED и характеристик высыпающихся частиц с КА DMSP F15

Следующий пример, показанный на рис. 5 (адаптирован из [39]), сконцентрирован на известном событии 18 апреля 2002 г., когда наблюдался двойной авроральный овал в изображениях авроральных ВУФ-эмиссий (верхние панели рис. 5), полученных с разрешением $\sim 100 \times 100$ км с орбит КА IMAGE (с помощью камеры WIC и спектрографического имаджера SI) и КА TIMED (интегрированные изображения линий LBH в двух интерва-

лах $\lambda 141 - 152,8$ нм и $\lambda 167,2 - 181,2$ нм с ВУФ-спектрометра GUVI с разрешением $\sim 10 \times 10$ км показаны на правой средней, а рассчитанные по ним распределения средней энергии и потока энергии электронов – на правой нижней панелях).

Двойной овал сопровождался специфическими условиями в солнечном ветре и в межпланетном магнитном поле (см. правую панель в середине на рис. 5, где период авроральных наблюдений замаркирован двумя синими вертикальными линиями с 06.20 до 07.00 UT). Мотивацией включения этого примера в данную работу является наблюдение в 06.38-06.43 UT мелкомасштабной структуры высыпавшихся электронов с энергиями в несколько кэВ в промежутке (Gap) между двумя ветвями аврорального овала (см. в середине внизу

на рис. 5 обведенный тонким кругом участок спектрограммы анализатора частиц SСJ4 на КА DMSP F15). Очевидно, что мелкомасштабные высыпания относительно низкоэнергичных электронов, казалось бы, должны были отразиться и в структуре свечения ВУФ-эмиссий, наблюдаемых с КА IMAGE и с КА TIMED, но на изображениях они не идентифицируются, по-видимому, потому, что изображающему спектрометру GUVI на КА TIMED и изображающей камере WIC на КА IMAGE не хватило чувствительности и пространственного разрешения для их регистрации. Мы обратили на это внимание именно в аспекте развития перспективных орбитальных авроральных имаджеров с улучшенными характеристиками [13 – 15].

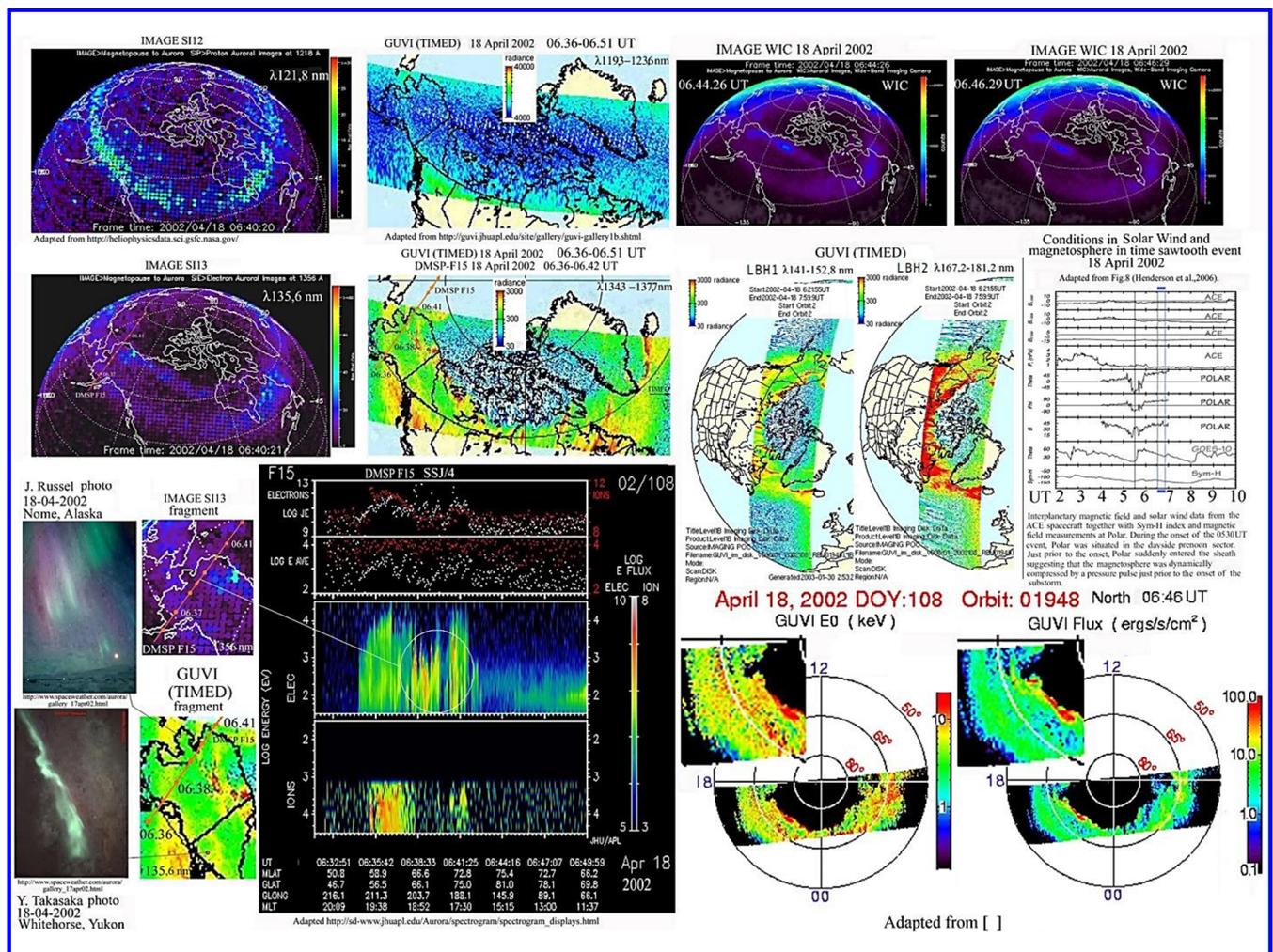


Рис. 5. Пример анализа данных глобальных наблюдений двойного аврорального овала с КА IMAGE (изображающая камера WIC и спектрографический имаджер SI) и одновременных локальных наблюдений участка двойного аврорального овала с помощью изображающего спектрометра GUVI на КА TIMED, а также энергетическая спектрограмма электронов и ионов (анализатор SСJ4 на КА DMSPF15). Измерения были проведены 18.04.2002 в 06.36-06.50 UT. Обнаружена тонкая структура высыпаний низкоэнергичных электронов ($E < 5$ кэВ) в промежутке (Gap) между ветвями двойного овала, которая не идентифицируется в ВУФ-изображениях

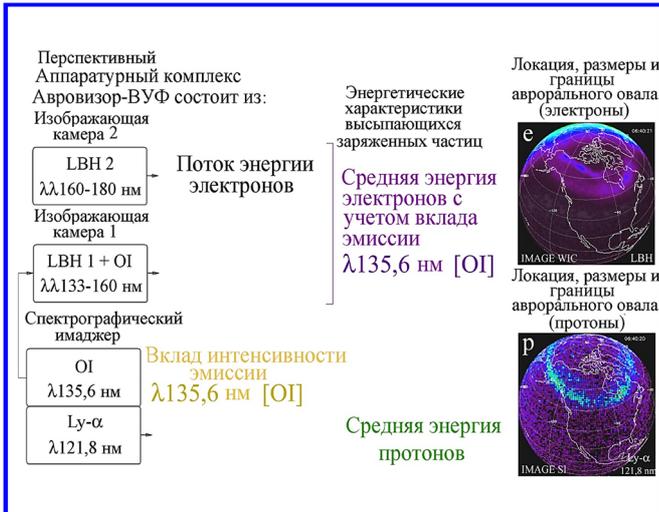


Рис. 6. Иллюстрация функциональной нагрузки дистанционных глобальных измерений ВУФ-эмиссий изображающими приборами комплекса «Авровизор-ВУФ» на перспективном КА на орбите типа «Молния»: пространственные характеристики аврального овала по электронам и по протонам и энергетические характеристики электронов и протонов (поток энергии и средняя энергия)

Рассмотренный пример, а также рис. 6 и 8 показывают, почему для диагностики состояния ионосферы необходимы глобальные и локальные измерения характеристик свечения эмиссий в авральных овалах по протонам и электронам одновременно, а также измерения потоков заряженных частиц. По нашей оценке, сделанной в Аванпроекте в 2013 г., разработанном совместно со специалистами НПП «Геофизика-Космос», с ориентированного на Землю КА глобальные измерения ВУФ-эмиссий с орбиты типа «Молния» в перспективе возможны с пространственным разрешением $\sim 50 \times 50$ км. При этом раз в 30 – 40 с будут фиксироваться: «мгновенная» локация, размеры и границы северного аврального овала на высотах свечения ВУФ-эмиссий $\sim 120 - 150$ км (см. рис. 6), а также структура свечения внутри них (в пределах указанного разрешения). Вполне реально, что одновременно с низкоорбитальных перспективных КА «Метеор-МП» и «Зонд» будут регистрироваться мелкомасштабные локальные изображения конкретных эмиссий в локальных областях аврального овала (рис. 1 в [16]) с километровым разрешением.

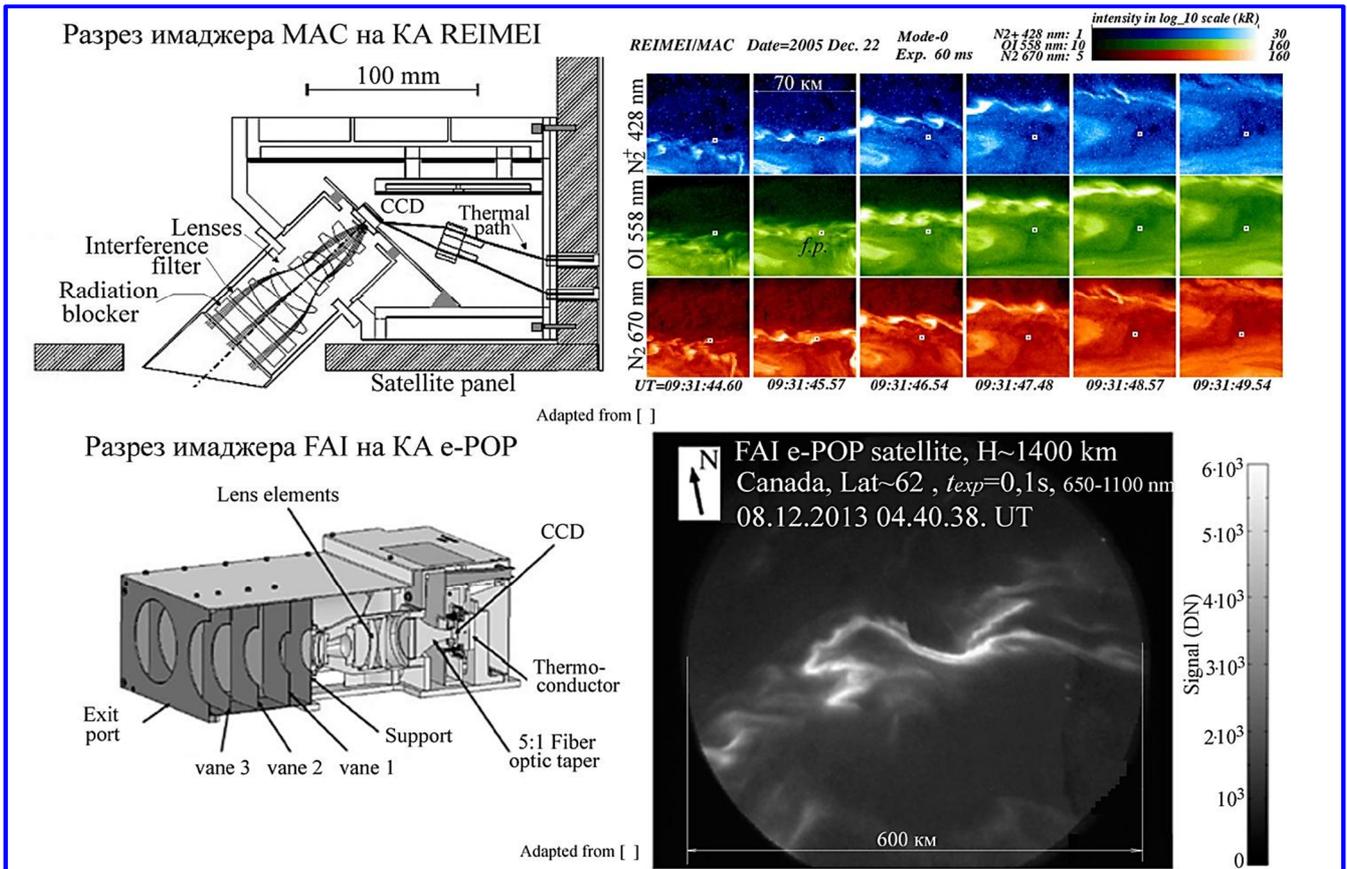
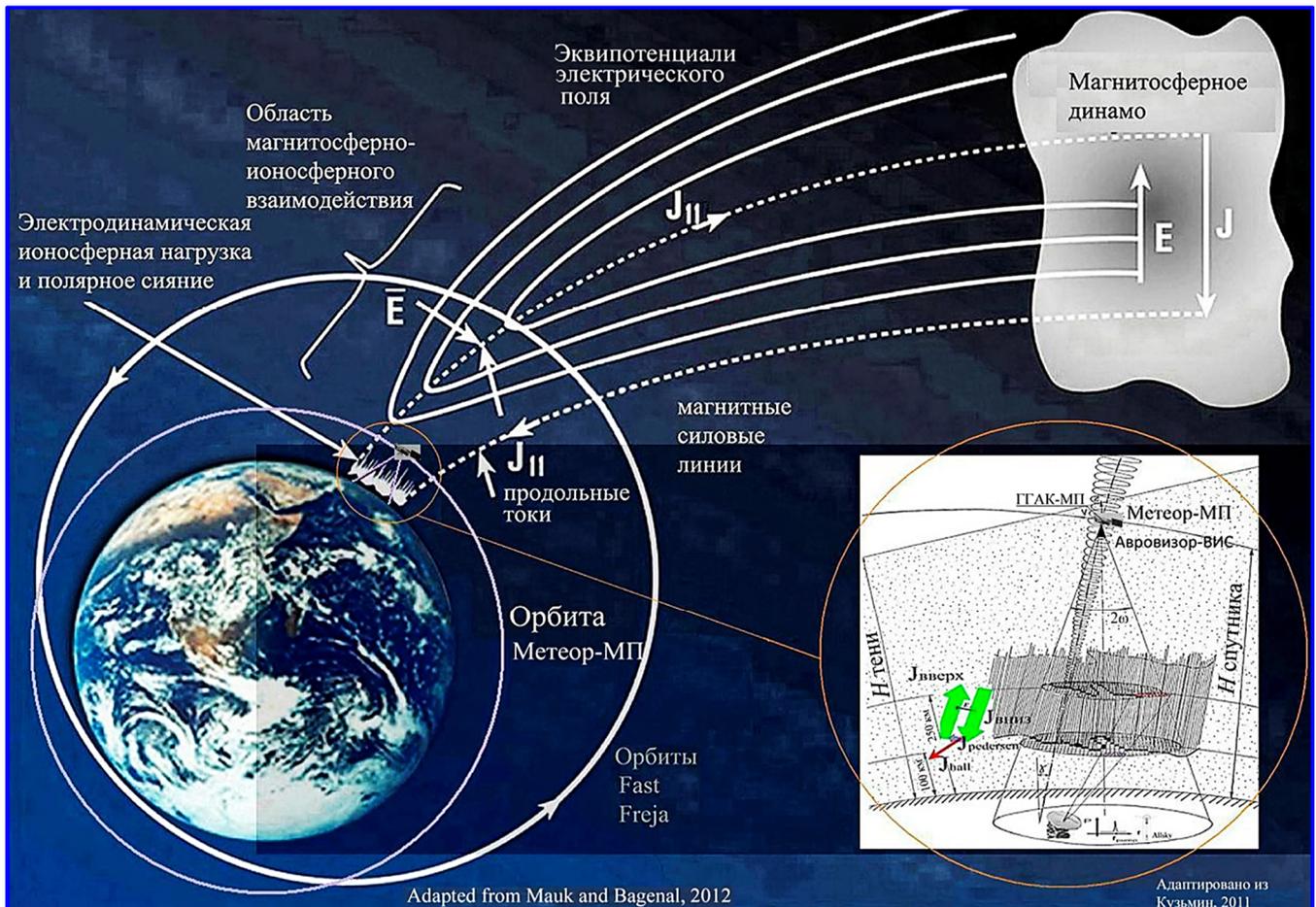


Рис. 7. Примеры изображений эмиссий, полученных авральными имаджерами: MAC 22.12.2005 (справа сверху) и FAI 08.12.2013 (справа внизу) с КА REIMEI и КА e-POP соответственно. Слева показаны разрезы конструкций фотометрических каналов с оптической схемой имаджеров MAC и FAI



Adapted from Mauk and Bagenal, 2012

Адаптировано из Кузьмин, 2011

Рис. 8. Геометрия локальных наблюдений авроральных эмиссий перспективным имаджером «Авроризор-ВИС/МП» с орбиты КА «Метеор-МП» на иллюстративном фоне физических процессов в ближней магнитосфере (Земли), приводящих к ускорению и высыпаниям заряженных частиц в ионосферу

Примеры локальных авроральных изображений эмиссий высокого разрешения в видимой области спектра с КА REIMEI (Япония) и КА e-POP (Канада)

Примерами локальных изображений, полученных с орбит низкоорбитальных КА, могут служить пространственные распределения интенсивности авроральных эмиссий, зарегистрированных имаджерами MAC и FAI (см. рис. 7), работавших на полярных орбитах малого японского КА REIMEI (круговая полярная орбита на высоте ~630 км, $i = 98,6^\circ$) и малого канадского КА e-POP (вытянутая полярная орбита с высотой апогея ~1500 км, высотой перигея ~350 км и $i = 82^\circ$, ориентирован на центр Земли) в 2005 – 2008 гг. и в 2013 – 2016 гг. соответственно [7, 8]. Угол поля зрения каждого из трёх каналов MAC был $7,6^\circ$, что соответствовало размеру изображения 70×70 км на высоте 110 км (см. верхнюю панель рис. 7). С помощью регулярных поворотов строительных осей REIMEI обеспечивалось практически постоянное присутствие

подножной точки (*f. p.*) м. с. л. в поле зрения имаджера. Угол поля зрения каждого из двух каналов FAI был 26° , что соответствовало диаметру изображения ~600 км на высоте 200 км с высоты апогея (нижняя панель рис. 7). Этой величины угла хватало для «захвата» *f. p.* полем зрения. Более подробные характеристики авроральных имаджеров MAC и FAI были представлены в табл. 1 в [13, 14]. На рис. 7 (слева) показаны разрезы конструкций изображающих каналов имаджеров.

Перспективный дистанционный мониторинг состояния полярной ионосферы по глобальным изображениям ВУФ-эмиссий с орбиты типа «Молния» и локальным изображениям «видимых» эмиссий высокого разрешения с орбиты КА «Метеор-МП»

Основы будущих российских орбитальных экспериментов для диагностики состояния полярной ионосферы были заложены в ряду недавних защищённых проектов. В Аванпроект комплекса изоб-

ражающей аппаратуры в ВУФ-диапазоне спектра для перспективного ориентированного на Землю российского КА на орбите типа «Молния» вошли: две изображающих авроральных камеры в двух соседних поддиапазонах, одна из которых $\lambda 135 - 155$ нм в области поглощения O_2 , а вторая $\lambda 150 - 180$ нм вне её, и двухканальный спектрографический имаджер, настроенный на доплеровски сдвинутую водородную линию $Ly-\alpha$ ($\lambda 121,8$ нм) и кислородную эмиссию $\lambda 135,6$ нм, его результаты отражены в [16].

В ДЭПе были рассмотрены способы реализации требуемых характеристик трёхканального аврорального имаджера «видимых» эмиссий «Авровизор-ВИС/МП», входящего в состав ГГЭК-МП Росгидромета, разрабатываемого для перспективного КА «Метеор-МП», а в ЭП рассмотрены характеристики двухканального аврорального имаджера Летиция для КА «Зонд» (программа «Геофизика»). Результаты, полученные при проектировании этой аппаратуры, отражены в ряде работ [13 – 16], включая и прикладной аспект использования данных измерений интенсивности авроральных эмиссий для диагностики состояния полярной ионосферы. На рис. 8, адаптированном из [18, 43], условно показана проекция орбиты КА «Метеор-МП» на фоне физических процессов в магнитосфере, приводящих к энергизации и высыпаниям заряженных частиц в ионосферу, и геометрия наблюдений авроральных эмиссий авроральным имаджером «Авровизор-ВИС/МП» (справа внизу на рис. 8) с одновременными измерениями распределений энергетических характеристик заряженных частиц (аппаратура МСГИ-МП) в окрестности КА. Методика измерений «Авровизор-ВИС/МП» в конечном счёте нацелена на дистанционное получение локальных мелкомасштабных (с разрешением $1,5 \times 1,5$ км) карт распределений потока энергии и средней энергии высыпающихся заряженных частиц, а также локальной электронной концентрации в максимуме E -области ионосферы в поле размером около 380 км в конкретных MLT-секторах аврорального овала [13].

В связи с предварительной информацией об одновременном (на одном носителе) запуске КА «Метеор-МП» и «Зонд» в [15] проанализированы варианты координации одновременных наблюдений авроральных эмиссий двумя имаджерами с двух орбит в одной и той же области аврорального овала и появляющееся при этом методическое качество измерений 3D-распределений диагностируемых параметров при наблюдениях одних и тех же авроральных структур под разными углами одновременно (см. рис. 3 и 4 в [15]). Эти расчёты были проведены с помощью ПО «Вектор-М», обеспечи-

вающего ситуационный анализ для взаимного «расположения» нескольких КА на разных орбитах [40] на основе высокоточной модели движения, и вычислений множества сопутствующих параметров вдоль орбит как для ц. м., так и для векторов наблюдений авроральных имаджеров, установленных на этих КА с учётом данных контроля текущей ориентации их строительных осей в пространстве.

Перспективные зарубежные проекты по диагностике состояния ионосферы с орбит

Из перспективных проектов NASA в 2018 г., связанных с оптической дистанционной диагностикой состояния ионосферы, можно выделить GOLD (запущен 25.01.2018 на геостационарную орбиту), в состав его аппаратуры входит изображающий спектрограф UV [41], и ICON (параметры орбиты $H \sim 560 - 575$ км, $I = 27^\circ$), готовящийся к запуску в 2018 г. В состав аппаратуры КА ICON входят: изображающий интерферометр Майкельсона MIGHTI [42]; имаджер в диапазоне экстремального ультрафиолета EUV; имаджер в диапазоне вакуумного ультрафиолета FUV и дрейф-метр скоростей ионов IVM.

Заключение

На конкретных примерах в ретроспективе рассмотрены результаты и отчасти методические детали экспериментов и спектрофотометрических измерений распределений интенсивности авроральных эмиссий и интерферометрических измерений температуры нейтральной составляющей верхней атмосферы с орбит советских, российских и некоторых зарубежных КА. С появлением востребованных прикладных аспектов дистанционного контроля состояния полярной ионосферы, как среды распространения сигналов, с учётом накопленного экспериментального опыта продолжается развитие методики орбитальных наблюдений свечения эмиссий. На основе современных изображающих детекторов разрабатываются перспективные авроральные имаджеры в ВУФ- и видимом спектральных диапазонах. Результаты этих работ опубликованы в серии наших статей в 2007 – 2018 гг. (ссылки см. в тексте).

Сокращения

ВУФ – вакуумный ультрафиолет
ГГЭК-МП – гелиогеофизический аппаратурный комплекс на КА «Метеор-МП»
ДЭП – дополнительный эскизный проект
ИКФИА – Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю. Г. Шафера

КА – космический аппарат
 кР – килоРэлей, 1 Рэлей = 10^6 фотон/см²·с·стер
 м. с. л. – магнитная силовая линия
 ОС – орбитальная станция
 ПО – программное обеспечение
 ФПИ – Фабри – Перо Интерферометр
 ЭП – эскизный проект
 DMSP – Defense Meteorological Satellite Program
 E-POP – Enhanced Polar Outflow Probe
 EUV – Extreme Ultraviolet Imager
f. p. – foot point
 FAI – Fast Auroral Imager
 FAST – Fast Auroral Snapshot Explorer
 FOV – Field of view
 FPI – Fabry-Perot interferometer
 FUV – Far Ultraviolet Imager
 GOLD – Global-scale Observation of the Limb and Disk
 ICON – Ionospheric Connection Explorer
 IMAGE – Imager for Magnetopause-to-Aurora Global
 Exploration
 IVM – Ion Velocity Meter
 LBH – Lyman-Birdge-Hopfield
 MAC – Multispectral Auroral Camera
 m. f. l. – magnetic field line
 MIGHTI – Michelson Interferometer for Global High-
 Resolution Thermospheric Imaging
 MLT – Magnetic Local Time
 REIMEI (INDEX) – small Japan satellite
 SC – spacecraft
 SSJ/4 – Special Sensor Electron/Ion Spectrometer
 SSUSI – Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager
 SSULI – Special Sensor Ultraviolet Limb Imager
 TEC – Total Electron Content
 UARS – Upper Atmospheric Research Satellite
 VUV – Vacuum Ultraviolet
 WIC – Wide angle Imaging Camera

Литература

- Germany G. A., Parks G. K., Brittnacher M., Cummock M., Lummerzheim D., Spann J. F., Chen L., Richards P. G., Rich F. J. Remote determination of auroral energy during substorm activity // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – V. 24 (8). – Pp. 995 – 998.
- 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. J. Summary of quantitative interpretation of imager far ultraviolet auroral data (2003) // *Space Sci. Rev.* – V. 109. – Pp. 255 – 283.
- Paxton L. J. Special sensor UV spectrographic imager (SSUSI): An instrument description, in *Instrumentation for planetary and terrestrial atmospheric remote sensing* // *SPIE.* – 1992. – V. 1745. – Pp. 2 – 15.
- Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Temerin M., Peria W., Moser F. S., Klumpar D. M., Shelly E. G., Peterson W. K., Moebius E., Elphic R., Strangeway R., Cattell C., Pfaff R. FAST observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating // *Geophys. Res. Letts.* – 1998. – V. 25. – Pp. 2017 – 2020. – doi:10.1029/98GL00851.
- Chaston C. C., Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., and Strangeway R. J. How important are dispersive Alfvén waves for auroral particles acceleration // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. – L07101. – doi:10.1029/2006GL029144.
- Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables, *Journ // Geophys. Res., Space Physics.* – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10623 – 10637. – doi: 10.1002/2016/JA022607.
- Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite // *Earth Planet Space*, 60. – 2008. – № 8. – Pp. 827 – 835.
- Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // *Space Sci. Rev.* – 2014. – V. 189. – P. 15 – 25. – doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
- Strickland D. J., Jasperse J. R., Basu B., Transport-theoretical model for the electron-proton-hydrogen atom aurora. 2. Model results // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – No. A12. – Pp. 21533 – 21548.
- Kozelov B. V., Ivanov V. E., Sergienko T. I., Auroral intensity variations in the area of combined electron and proton particle precipitation: possibilities of determination of particle flux parameters // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2002. – V. 42. – No. 4 – Pp. 513 – 518.
- Дашкевич Ж. В. Фотометрия и моделирование излучений полярных сияний // *Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук, спец. ВАК РФ 25.00.09. Физика атмосферы и гидросферы / ПГИ РАН.* – Апатиты, 2005. – 145 с.
- McMahon E. M., Comberiate J. M., Kelly M. A., Paxtone L. J. 3D ionospheric electron density reconstructions and radio propagation modeling using DMSP/SSUSI, 1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, 22 – 25 Jun 2009, San-Antonio, Texas, AIAA 2009-3639. – Pp. 1 – 8.
- Кузьмин А. К., Мёрзлый А. М., Баныщикова М. А. [и др.] Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером «Авроризор-ВИС/МП» на перспективном КА «Метеор-МП» // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли» / А. К. Кузьмин, А. М. Мёрзлый, М. А. Баныщикова, И. Н. Чувашов, Г. М. Крученицкий, Ю. Н. Потанин, П. П. Моисеев.* – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2016. – С. 325 – 341.
- Кузьмин А. К., Баныщикова М. А., Доброленский Ю. С., Крученицкий Г. М., Маслов И. А., Мёрзлый А. М., Моисеев П. П., Потанин Ю. Н., Чувашов И. Н. Характеристики создаваемого орбитального имаджера «Авроризор-ВИС/МП» и перспективы использования авроральных изображений для исследований процессов в поляр-

- ной ионосфере и оптического контроля неоднородности условий, влияющих на распространение сигналов. Практические аспекты гелиогеофизики. – М. : ИКИ РАН, 2016. – С. 114 – 133.
15. Кузьмин А. К., Банышикова М. А., Чувашов И. Н. [и др.] Преимущества наблюдений авроральных структур с двух орбит и возможности для реконструкции 3D-распределений эмиссий, получаемых с разных позиций имаджеров / А. К. Кузьмин, М. А. Банышикова, И. Н. Чувашов, Г. М. Крученицкий, Ю. Н. Потанин // Вопросы электромеханики. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – Т. 158. – № 3. – С. 7 – 21.
16. Кузьмин А. К., Мёрзлый А. М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных космических аппаратов / А. К. Кузьмин, А. М. Мёрзлый // Вопросы электромеханики. – М. : ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. – Т. 143. – № 6. – С. 19 – 28.
17. Кузьмин А. К., Банышикова М. А., Крученицкий Г. М. [и др.]. Варианты и выбор оптической схемы, оптимизация характеристик орбитального аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП», сравнение с зарубежными аналогами / А. К. Кузьмин, М. А. Банышикова, Г. М. Крученицкий, И. А. Маслов, Ю. Н. Потанин // Вопросы электромеханики. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2017. – Т. 160. – № 5. – С. 20 – 36.
18. Кузьмин А. К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит перспективных российских космических аппаратов, ИКИ РАН, Пр-2161, 2011, 49 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [iki.rssi.ru>books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf).
19. Jokioho O., Lanchester B. S., Ivchenko N., Daniell G. J., Miller L. C. H., Lummerzheim D. Rotational temperature of $N_2^+(0-2)$ ions from spectrographic measurements used to infer the energy of precipitation in different auroral forms and compared with radar measurements // *Ann. Geophys.* – 2008. – V. 26. – Pp. 853 – 866.
20. Mende S. B., Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 2. Observing techniques // *Journ. Geophys. Res: Space Physics.* – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10638 – 10660. – doi:10.1002/2016JA022558.
21. Blamont J. E., and Luton J. M. Geomagnetic effect on the neutral temperature of the F-region during the magnetic storm of September 1969 // *Journ. Geophys. Res.* – V. 77. – Pp. 3534 – 3572.
22. Гладышев В. А., Графова Л. И., Кузьмин А. К., Мулярчик Т. М., Ермолаев Ю. Ф., Мамин Ш. Я., Ноткин В. А., Скаргин А. В., Табалдыев С. Р. Прибор для измерения контура линии $\lambda 6300$ А [OI] и её интенсивности // Конструирование научной космической аппаратуры: Сб / АН СССР. – М. : Наука, 1977. – С. 79 – 88.
23. Appleton E. V. Two anomalies in the ionosphere // *Nature.* – 1946. – V. 157. – Pp. 691 – 693.
24. Balebanov V. M., Kuzmin A. K., Ponomarev Yu. N., Sinitsin V. M., Bitar B., Suleyman S. The first results of neutral Doppler temperature observations from Mir orbital station, IAF-89-178, 40th Congress of the International Astronautical Federation, 7 – 12 Oct, 1989, Malaga, Spain. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198901.pdf>.
25. Galperin Yu. I., Gretchko G. M., Grafe A., Jahn S., Kuzmin A. K., Lehmann H. R., Mohlmann D., Muljartchik T.M. Polarlichtbeobachtungen aus dem Kosmos // *Urania*, № 8. – Pp. 18 – 23, 1982. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198202.pdf>.
26. Кузьмин А. К., Пономарёв Ю. Н., Сеницын В. М. Анализ контура спектральной линии, измеренного конфокальным интерферометром Фабри – Перо // Полярные сияния и свечение ночного неба: Сб. – М. : Сов. Радио, 1977. – № 25. – С. 76 – 103. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/197701.pdf>.
27. Hays P. B., Abreu V. J., Dobbs M. E., Gell D. A. Grassi H. J., Skinner W. R. The high-resolution Doppler imager on the Upper Atmosphere Research Satellite // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – Pp. 10713 – 10723. – <http://doi.org/10.1029/93JD00409>.
28. Hays P. B., Killeen T. L., Kennedy B. C. The Fabry-Perot Interferometer on Dynamics Explorer // *Space Sci. Instr.* – 1981. – V. 5. – Pp. 395 – 416.
29. Gault W. A., Shepherd G. G. WAMDII – a wide angle Michelson Doppler imaging interferometer // *Adv. Space res.* – 1983. – V. 2. – № 7. – Pp. 111 – 114.
30. Shepherd G. G., Thuillier G., Gault W. A., Solheim B. H., et al. WINDII – The wind imaging interferometer for the Upper Atmosphere Research Satellite // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – № 10. – Pp. 725 – 750.
31. Shepherd M. G., Gattinger R. L., Rochon Y., Shepherd G. G., Solheim B. H., Kendall D. J. W. Auroral observations with the WIND Imaging Interferometer (WINDII) on UARS // *Adv. Space Res.* – 1996. – V. 17. – Issue 11. – Pp. 5 – 10. – doi:10.1016/0273-1177(95)00724-S.
32. Shepherd G. G., Thuillier G., Cho Y.-M., Duboin M.-L., Evans W. F. I., et al. The WIND Imaging Interferometer (WINDII) on the upper atmosphere research satellite: A 20 year perspective // *Review of Geophysics, AGU*, 50(2), pp. RG2007, 2012, 10.1029/2012RG000390, HAL Id: hal00697738.
33. Holma H. J., Kaila K. U., Jussila J. R. T. Temperatures, emission heights and energies in discrete auroral forms // *Phys. Chem. Earth.* – 2000. – Part. B. – V. 25. – Pp. 463 – 466. – doi:10.1016/S1464-1909(00)00045-9.
34. Krywonos A., Murray D. J., Eastes R. W., Aksnes A., Budzien S. A., Daniell R. E. Remote sensing of neutral temperatures in the Earth's thermosphere using the Lyman-Birge-Hopfield bands of N_2 : Comparison with satellite drag data // *Journ. Geophys. Res.* – 2012. – V. 117, A09311. – doi: 10.1029/2011JA017226.
35. Балебанов В. М., Кузьмин А. К., Пономарёв Ю. Н., Сеницын В. М., О некоторых аспектах планирования геофизических экспериментов на примере фотометрических измерений с двух ИСЗ // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1033, 1985, 19 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198502.pdf>.

36. Steel D. P., McEwen D. J. Electron auroral excitation efficiencies and intensity ratios // Journ. Geophys. Res. – 1990. – V. 95, A7. – Pp. 10321 – 10336.
37. Баныщикова М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К., Крученицкий Г. М. Влияние сопряжений по магнитному полю элементов изображений авроральных эмиссий на точность определения E_{cp} высыпавшихся электронов // Изв. вузов. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 1. – С. 132 – 137. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201801.pdf>.
38. Кузьмин А. К., Гальперин Ю. И., Шуйская Ф. К., Степанов В. А., Прохоренко В. И., Соловьев С. И., Чиков К. Н., Палазов К. УФ-спектрометр УФС ИПС на спутнике «Авроральный зонд»: пример одновременных измерений интенсивности авроральных $\lambda 1304$ и $\lambda 1356$ А [ОП] эмиссий и потоков частиц // Космич. исслед. – 1998. – Т. 36. – № 6. – С. 636 – 647. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199803.pdf>.
39. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M., Shadrin D. G., Borisov Yu. A., Potanin Yu. N., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N. Methodological particularities of creating of remote mapping diagnostic system of ionospheric characteristics from the orbits of three perspective Russian satellites // Preprint of Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2014, 24 pages, 7 Figures and 1 Table, on materials of the report COSPAR 40, Moscow, 3 – 9 August 2014 SCC section (Space Studies of the Upper Atmosphere of the Earth and Planets including Reference Atmospheres) C.02 Advances in Remote Sensing of the Middle and Upper Atmospheres and Ionosphere from the Ground and from Space, including Sounding Rockets and Multi-instrument Studies (poster presentation C.02 TFS-S-009). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201401.pdf>.
40. 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 // EPSC Abstracts, V. 11, EPSC2017-834-1, European Planetary Science Congress 2017, Riga. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017EPSC.pdf>, Poster Report <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017Riga1.pdf>.
41. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/two-heads-are-better-than-one-icon-gold-teaming-up-to-explore-earths-interface-to-space>.
42. Mende S. B., Frey H. U., Rider K., Ellis S. Far Ultraviolet Imager on the ICON Mission // Space Science Reviews. – 212 (1-2), 1-42. – Aug 2017. – doi: 10.1007/s11214-07-386-0.
43. Mauk B., and Bagenal F. Comparative auroral physics. Earth and other planets // Auroral phenomenology and Magnetospheric Processes. From series Geophysical Monograph, AGU, Washington, DC, 2012. – V. 197. – Pp. 3 – 28.

Поступила в редакцию 01.02.2018

Александр Константинович Кузьмин, кандидат физико-математических наук, главный специалист, т. (495) 333-20-00, e-mail: alkkuzmin@mail.ru. (ИКИ РАН).

Григорий Михайлович Крученицкий, доктор физико-математических наук, заведующий отделом, т. (495) 408-61-41.

Юрий Николаевич Потанин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 408-61-72.

E-mail: omd@cao-rhms.ru. (ФГБУ ЦАО Росгидромета).

Мария Александровна Баныщикова, кандидат физико-математических наук, доцент, т. (3822) 529-776, e-mail: mba-tomsk@mail.ru. (НИИ ПММ ТГУ).

EXPERIMENTAL HERITAGE AND PROSPECTS OF FURTHER DEVELOPMENT OF THE ORBITAL AURORAL OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE POLAR IONOSPHERE STATE

A. K. Kuzmin, G. M. Kruchenitskii, Iu. N. Potanin, M. A. Banshchikova

The development of the on-board auroral photometers and interferometers and the results of the carried out measurements made it possible to accumulate a considerable methodological experience in setting up the optical experiments and measuring the charged particles intended for diagnostics of the upper atmosphere and ionosphere state from the SC orbits. These experiments have been held under various conditions on different orbits from both automatic satellites and orbital stations. The acquired information has enabled us to correct a number of answers to the questions on the characteristics of the near-Earth space; the examples of the results are illustrated. The experiments have been carried out in parallel with the development of the models of interaction between energetic electrons and protons precipitating from magnetosphere and components of the upper atmosphere and ionosphere. The models confirmed that the remote measurement of the technical characteristics of the particles and kinetic temperature of the neutrals and ions from the orbit can provide information re-

quired for the real-time control of the ionosphere state. The upgrade of characteristics of the sensitive imaging detectors jump-started the further development of the orbital auroral photometry and interferometry within the visible spectrum range and the VUV spectroscopy, which results in increase of the viewing angles, spatial and temporal resolution, and dynamic range of both imagers of auroral emissions and imaging interferometers. The new observation methods and the new equipment for monitoring of the polar ionosphere characteristics from the orbits of advanced Russian SC are being developed. The realization of the techniques and equipment will be based on the new software providing calculation of the relevant astronomical, geophysical, geomagnetic and geographical data along the orbits for both SC center-of-mass and remote observation vectors at the precise ionosphere altitude with regard to the state of the current SC axis orientation, as well as the SWOT analysis of the relative position of several spacecrafts on different orbits on the basis of the high-accuracy SC motion model.

Key words: remote diagnostics of polar ionosphere state, auroral emissions, kinetic temperature of upper atmosphere components, auroral imagers, Fabry – Perot interferometer.

References

- Germany G. A., Parks G. K., Brittnacher M., Cumnock M., Lummerzheim D., Spann J. F., Chen L., Richards P. G., Rich F. J. Remote determination of auroral energy during substorm activity // *Geophys. Res. Lett.* – 1997. – V. 24 (8). – Pp. 995 – 998.
- Frey H. U., Mende S. B., Immel T. J., Gerard J.-C., Hu-bert B., Habraken S., Spann J., Gladstone G. R., Bisikalo D. V., Schematovich V. J. Summary of quantitative interpretation of imager far ultraviolet auroral data (2003) // *Space Sci. Rev.* – V. 109. – Pp. 255 – 283.
- Paxton L. J. Special sensor UV spectrographic imager (SSUSI): An instrument description, in *Instrumentation for planetary and terrestrial atmospheric remote sensing* // *SPIE.* – 1992. – V. 1745. – Pp. 2 – 15.
- Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Temerin M., Peria W., Moser F. S., Klumpar D. M., Shelly E. G., Peterson W. K., Moebius E., Elphic R., Strangeway R., Cat-tell C., Pfaff R. FAST observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating // *Geophys. Res. Letts.* – 1998. – V. 25. – Pp. 2017 – 2020. – doi:10.1029/98GL00851.
- Chaston C. C., Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., and Strangeway R. J. How important are dispersive Alfvén waves for auroral particles acceleration // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – V. 34. – L07101. – doi:10.1029/2006GL 029144.
- Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables, *Journ* // *Geophys. Res., Space Physics.* – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10623 – 10637. – doi: 10.1002/2016/JA022607.
- Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by multi-spectral auroral camera on board the REIMEI satellite // *Earth Planet Space*, 60. – 2008. – No. 8. – Pp. 827 – 835.
- Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // *Space Sci. Rev.* – 2014. – V. 189. – Pp. 15 – 25. – doi:10.1007/s11214-014-0107-x.
- Strickland D. J., Jasperse J. R., Basu B., Transport-theoretical model for the electron-proton-hydrogen atom aurora. 2. Model results // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – No. A12. – Pp. 21533 – 21548.
- Kozelov B. V., Ivanov V. E., Sergienko T. I., Auroral intensity variations in the area of combined electron and proton particle precipitation: possibilities of determination of particle flux parameters // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2002. – V. 42. – No. 4 – Pp. 513 – 518.
- Dashkevich Zh. V. Photometry and modeling of auroral emissions. // Thesis for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D.), spec. according to the Higher Attestation Commission (VAC) of the RF 25.00.09. Atmosphere and hydrosphere physics / PGI RAS. – Apatity, 2005. – 145 p.
- McMahon E. M., Comberiate J. M., Kelly M. A., Paxtone L. J. 3D ionospheric electron density reconstructions and radio propagation modeling using DMSP/SSUSI, 1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, 22 – 25 Jun 2009, San-Antonio, Texas, AIAA 2009-3639. – Pp. 1 – 8.
- Kuzmin A.K., Merzlyi A.M., Banshchikova M.A., et. al. Applicable aspects of measurements of the auroral emissions and characteristics of the polar ionosphere by the Aurovisor-VIS/MP imager on the perspective Meteor-MP SC. // *Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. Appendix 2016. Materials of the Fourth International Scientific Conference ‘Critical Issues in Designing of Earth Remote Sensing Systems’* / A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi, M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, G. M. Kruchenitskii, Iu. N. Potanin, P. P. Moiseev. – M. : ‘VNIIEM Corporation’ JC, 2016. – Pp. 325 – 341.
- Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Dobrolenskii Iu. S., Kruchenitskii G. M., Maslov I. A., Merzlyi A. M., Moiseev P. P., Potanin Iu. N., Chuvashov I. N. Characteristics of the orbital imager Aurovisor-VIS/MP under development and prospects of application of the auroral images for investigation of the processes in the polar ionosphere and optical monitoring of the nonuniformity of conditions affecting signal propagation. Practical aspects of heliogeophysics. – M. : IKI RAN, 2016. – Pp. 114 – 133.
- Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., et. al. Advantages of observation of the auroral structures from two orbits and possibilities for reconstruction of the 3D-distributions of emissions received from different imagers positions / A. K. Kuzmin, M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, G. M. Kruchenitskii, Iu. N. Potanin // *Matters of Electromechanics.* – M. : ‘VNIIEM Corporation’ JC, 2017. – V. 158. – No. 3. – Pp. 7 – 21.
- Kuzmin A. K., Merzlyi A. M. Perspective experiment on monitoring of the Earth ionosphere state using the Aurovisor-VUV optical system within the constellation of the high-apogee and low-orbit spacecrafts / A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi // *Matters of Electromechanics.* – M. : ‘VNIIEM Corporation’ JSC, 2014. – V. 143. – No. 6. – Pp. 19 – 28.

17. Kuzmin A. K., Bانشchikova M. A., Kruchenitskii G. M., et al. Variants and selection of an optical arrangement, optimization of characteristics of the orbital auroral imager Aurovisor-VIS/MP and its comparison with the foreign analogs / A. K. Kuzmin, M. A. Bانشchikova, G. M. Kruchenitskii, I. A. Maslov, Iu. N. Potanin // Matters of Electromechanics. – M. : ‘VNIIEEM Corporation’ JC, 2017. – V. 160. – No. 5. – Pp. 20 – 36.
18. Kuzmin A. K. Remote spectrophotometric diagnostics of the auroral ionosphere characteristics from the orbits of perspective Russian spacecrafts, IKI RAN, Pr-2161, 2011, 49 p. – [Electronic resource]. – Available at: [iki.rssi.ru>books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf).
19. Jokiahho O., Lanchester B. S., Ivchenko N., Daniell G. J., Miller L. C. H., Lummerzheim D. Rotational temperature of $N_2^+(0-2)$ ions from spectrographic measurements used to infer the energy of precipitation in different auroral forms and compared with radar measurements // Ann. Geophys. – 2008. – V. 26. – Pp. 853 – 866.
20. Mende S. B., Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 2. Observing techniques // Journ. Geophys. Res: Space Physics. – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10638 – 10660. – doi:10.1002/2016/JA022558.
21. Blamont J. E., and Luton J. M. Geomagnetic effect on the neutral temperature of the F-region during the magnetic storm of September 1969 // Journ. Geophys. Res. – V. 77. – Pp. 3534 – 3572.
22. Gladyshev V. A., Grafova L. I., Kuzmin A. K., Muliarchik T. M., Ermolaev Iu. F., Mamin Sh. Ia., Notkin V. A., Skargin A. V., Tabaldyev S. R. Instrument for measuring the $\lambda 6300$ A [OI] line contour and intensity // Design engineering of research space facilities: coll./ USSR Academy of Science. – M. : Nauka, 1977. – Pp. 79 – 88.
23. Appleton E. V. Two anomalies in the ionosphere // Nature. – 1946. – V. 157. – Pp. 691 – 693.
24. Balebanov V. M., Kuzmin A. K., Ponomarev Yu. N., Sinitsyn V. M., Bitar B., Suleyman S. The first results of neutral Doppler temperature observations from Mir orbital station, IAF-89-178, 40th Congress of the International Astronautical Federation, 7 – 12 Oct, 1989, Malaga, Spain. – [Electronic resource]. – Available at: [http:// www.cosmic-rays.ru/articles/13/198901.pdf](http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198901.pdf).
25. Galperin Yu. I., Gretchko G. M., Grafe A., Jahn S., Kuzmin A. K., Lehmann H. R., Mohlmann D., Muliarchik T. M. Polarlichtbeobachtungen aus dem Kosmos // Urania, No. 8. – Pp. 18 – 23, 1982. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198202.pdf>.
26. Kuzmin A. K., Ponomarev Iu. N., Sinitsyn V. M. Analysis of spectral line contour measured using Fabry – Perot confocal interferometer // Polar auroras and nightglow: coll. – M. : Sov. Radio, 1977. – No. 25. – Pp. 76 – 103. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/197701.pdf>.
27. Hays P. B., Abreu V. J., Dobbs M. E., Gell D. A., Grassi H. J., Skinner W. R. The high-resolution Doppler imager on the Upper Atmosphere Research Satellite // Journ. Geophys. Res. – 1993. – V. 98. – Pp. 10713 – 10723. – <http://doi.org/10.1029/93JD00409>.
28. Hays P. B., Killeen T. L., Kennedy B. C. The Fabry-Perot Interferometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instr. – 1981. – V. 5. – Pp. 395 – 416.
29. Gault W. A., Shepherd G. G. WAMDII – a wide angle Michelson Doppler imaging interferometer // Adv. Space res. – 1983. – V. 2. – No. 7. – Pp. 111 – 114.
30. Shepherd G. G., Thuillier G., Gault W. A., Solheim B. H., et al. WINDII – The wind imaging interferometer for the Upper Atmosphere Research Satellite // Journ. Geophys. Res. – 1993. – V. 98. – No. 10. – Pp. 725 – 750.
31. Shepherd M. G., Gattinger R. L., Rochon Y., Shepherd G. G., Solheim B. H., Kendall D. J. W. Auroral observations with the WIND Imaging Interferometer (WINDII) on UARS // Adv. Space Res. – 1996. – V. 17. – Issue 11. – Pp. 5 – 10. – doi:10.1016/0273-1177(95)00724-S.
32. Shepherd G. G., Thuillier G., Cho Y.-M., Duboin M.-L., Evans W. F. I., et al. The WIND Imaging Interferometer (WINDII) on the upper atmosphere research satellite: A 20 year perspective // Review of Geophysics, AGU, 50(2). – Pp. RG2007, 2012, 10.1029/2012RG000390, HAL Id: hal00697738.
33. Holma H. J., Kaila K. U., Jussila J. R. T. Temperatures, emission heights and energies in discrete auroral forms // Phys. Chem. Earth. – 2000. – Part. B. – V. 25. – Pp. 463 – 466. – doi:10.1016/S1464-1909(00)00045-9.
34. Krywonos A., Murray D. J., Eastes R. W., Aksnes A., Budzien S. A., Daniell R. E. Remote sensing of neutral temperatures in the Earth’s thermosphere using the Lyman-Birge-Hopfield bands of N_2 : Comparison with satellite drag data // Journ. Geophys. Res. – 2012. – V. 117, A09311. – doi: 10.1029/2011JA017226.
35. Balebanov V. M., Kuzmin A. K., Ponomarev Iu. N., Sinitsyn V. M. About some aspects of planning the geophysical experiments using the example of photometric measurements from two AES // Preprint of IKI RAN USSR, Pr-1033, 1985, 19 p. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198502.pdf>.
36. Steel D. P., McEwen D. J. Electron auroral excitation efficiencies and intensity ratios // Journ. Geophys. Res. – 1990. – V. 95, A7. – Pp. 10321 – 10336.
37. Bانشchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K., Kruchenitskii G. M. Impact of magnetically conjugated elements of auroral emission images on the accuracy of determining E_{av} of precipitating electrons. // Russian Physics Journal. – 2018. – V. 61. – No. 1. – Pp. 132 – 137. – [Electronic resource]. – Available at: [http:// www.cosmic-rays.ru/articles/13/201801.pdf](http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201801.pdf).
38. Kuzmin A. K., Galperin Iu. I., Shuiskaia F. K., Stepanov V. A., Prokhorenko V. I., Soloviev S. I., Chikov K. N., Palazov K. The UV spectrometer UVSIPS on the Auroral probe satellite: an example of simultaneous measurements of intensity of the

- auroral $\lambda 1304$ and $\lambda 1356$ A [OI] emissions and particle fluxes // Space Res., – 1998. – V. 36. – No. 6. – Pp. 636 – 647. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199803.pdf>.
39. Kuzmin A. K., Merzlii A. M., Shadrin D. G., Borisov Yu.A., Potanin Iu. N., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N. Methodological particularities of creating of remote mapping diagnostical system of ionospheric characteristics from the orbits of three perspective Russian satellites // Preprint of Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2014, 24 pages, 7 Figures and 1 Table, on materials of the report COSPAR 40, Moscow, 3 – 9 August 2014 SCC section (Space Studies of the Upper Atmosphere of the Earth and Planets including Reference Atmospheres) C.02 Advances in Remote Sensing of the Middle and Upper Atmospheres and Ionosphere from the Ground and from Space, including Sounding Rockets and Multi-instrument Studies (poster presentation C.02 TFS-S-009). – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201401.pdf>.
40. 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 // EPSC Abstracts, V. 11, EPSC2017-834-1, European Planetary Science Congress 2017, Riga. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017EPSC.pdf>, Poster Report <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017Riga1.pdf>.
41. [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/two-heads-are-better-than-one-icon-gold-teaming-up-to-explore-earths-interface-to-space>.
42. Mende S. B., Frey H. U., Rider K., Ellis S. Far Ultraviolet Imager on the ICON Mission // Space Science Reviews. – 212 (1-2), 1-42. – Aug 2017. – doi: 10.1007/s11214-07-386-0.
43. Mauk B., and Bagenal F. Comparative auroral physics. Earth and other planets // Auroral phenomenology and Magnetospheric Processes. From series Geophysical Monograph, AGU, Washington, DC, 2012. – V. 197. – Pp. 3 – 28.

*Aleksandr Konstantinovich Kuzmin, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Chief Specialist,
tel.: + 7 (495) 333-20-00, e-mail: alkkuzmin@mail.ru.
(IKI RAN).*

*Grigorii Mikhailovich Kruchenitskii, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Head of Department
tel.: +7 (495) 408-61-41.*

*Iurii Nikolaevich Potanin, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher, tel.: +7 (495) 408-61-72.
E-mail: omd@cao-rhms.ru.*

(Federal State - Funded Institution Central Aerological Observatory of Roshydromet).

*Maria Aleksandrovna Banshchikova, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Associate Professor,
tel.: +7 (3822) 529-776, e-mail: mba-tomsk@mail.ru.*

(Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University/NII PMM TSU).