

## ДИСТАНЦИОННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ОРБИТАЛЬНОГО АВРОРАЛЬНОГО ИМАДЖИНГА. ЧАСТЬ 1 (ВУФ-ДИАПАЗОН)

А. К. Кузьмин, А. М. Мерзлый

**В** аспекте подготовки методики перспективных российских орбитальных экспериментов, нацеленных на получение глобальных изображений аврорального овала в эмиссиях ВУФ-области спектра, на конкретных примерах анализируется мировой экспериментальный и методический опыт наблюдений авроральных эмиссий с орбит КА типа «Молния». Какие авроральные эмиссии необходимо измерять и с каким пространственным и временным разрешением, какие методические задачи необходимо решать для получения и обработки авроральных изображений, какие сопутствующие измерения характеристик плазмы и на каких высотах необходимы для повышения эффективности экспериментов при диагностике состояния характеристик полярной ионосферы с орбит – вот далеко не полный перечень рассматриваемых в данной работе вопросов.

**Ключевые слова:** дистанционная диагностика состояния полярной ионосферы, авроральные эмиссии, вакуумный ультрафиолет, авроральный овал, авроральные имаджеры.

### Введение

В начале XXI века продолжились исследования плазменных процессов в околоземном пространстве, приводящих к высыпаниям заряженных частиц в полярную ионосферу и их следствиям: продольным токам, генерации электрических полей, образованиям градиентов электронной концентрации и неоднородностей поперечных проводимостей в ионосфере, а также диссипации волн из магнитосферы и возбуждению эмиссий в разнообразных по форме авроральных структурах. Авроральное «магнитосферно-ионосферное телевидение» [1] как в глобальном, так и в локальных масштабах становится всё более востребованным инструментом диагностики состояния полярной ионосферы, в котором верхняя атмосфера и ионосфера «служат» природным экраном, отображающим динамические характеристики высыпающихся электронов и ионов, модулированных на разных высотах в магнитосфере [2]. Орбитальный авроральный имаджинг, ставший одним из инструментов исследований магнитосферно-ионосферной системы, принципиально изменил оценку возможностей дистанционной диагностики околоземных плазменных процессов, а авроральные имаджеры стали обеспечивать необходимую информацию в сопряжении: с орбитальными измерениями характеристик плазмы, с измерениями характеристик ионосферы наземными приборами поддержки орбитальных миссий, включая фотометрическую сеть, и моделями магнитосферно-ионосферной электродинамической системы и транспорта заряженных частиц из магнитосферы в ионосферу. Результаты многих из орбитальных авроральных наблюдений обеспечили возможность открытий новых явлений в околоземном космическом пространстве, которые не могли быть идентифициро-

ваны с помощью других методов (см. [3, 4] и ссылки в них). С развитием орбитальных навигационных и других радиоволновых систем, использующих полярную ионосферу в качестве среды распространения трансполярных сигналов, назрела необходимость постоянного мультимасштабного онлайн-контроля состояния её характеристик в разных масштабах, от глобального до локального [5]. Хотя влияние процессов в магнитосферно-ионосферной системе на характеристики полярной ионосферы исследуется уже несколько десятков лет, причинно-следственные связи, влияющие на условия распространения, до сих пор остаются до конца не выясненными [6, 7]. Необходимость дальнейших исследований этих связей и регулярного орбитального контроля характеристик полярной ионосферы стимулирует подготовку новых орбитальных наблюдений, проектирования новых экспериментов, продолжения развития методики одновременных орбитальных и наземных исследовательских и мониторинговых измерений эмиссий авроры и их характеристик разных масштабов с пространственным разрешением от десятков километров (глобальные измерения) до километров (локальные измерения).

### 1. Типы физических механизмов, приводящих к ускорению и высыпаниям заряженных частиц и возбуждению авроральных эмиссий, и роль оптической диагностики в их определении.

В работе [2] была проведена ревизия условного деления процессов в ионосферно-магнитосферной системе, приводящих, в конечном счёте, к возбуждению авроры, в результате которой схема на Fig.4.1 в [3] стала состоять из четырёх основных областей и процессов в них. Схема приведена на рис. 1, адаптированном из Fig.2 в [2] и [8], на ко-

тором можно видеть 4 условных типа областей авроральных процессов, инициируемых процессами на Солнце, динамикой характеристик солнечного ветра и межпланетного поля. Первый и третий (слева направо) – типы процессов, характеризующиеся продольным током вниз (к Земле), который переносится ионными высыпаниями и движущимися вверх электронами из ионосферы, и продольным током вверх, сопровождающимся продольными электрическими полями, ускоряющими электроны из магнитосферы (так называемые inverted-V события, фиксируемые как максимумы на энергетических спектрах), высыпающиеся из питч-углового конуса потерь. Второй (слева) – иллюстрирует процесс питч-угловой диффузии в конус потерь и высыпаний электронов в ионосферу, сопровождаемых турбулентностью электромагнитных волн. В этой области нет интенсивных продольных токов, но имеют место

взаимодействия «волна – частица». Четвёртый тип (первая панель справа) отображает процессы в авроральных областях, где низкоэнергичные электроны из ионосферы ускоряются Альвеновскими волнами, приходящими из областей динамичных событий в магнитосфере, таких как пересоединение магнитных силовых линий и деполяризация магнитного поля. Обратим внимание на правую панель рис. 2, где справа показаны результаты одновременных измерений с КА IMAGE и FAST, иллюстрирующие процесс ускорения холодных ионосферных электронов за счёт диссипации дисперсионных Альвеновских волн вдоль магнитного поля, генерируемых в магнитосфере, который принято называть Альвеновским волновым ускорением (WAE) [8]. Приближаясь к ионосфере, волны подхватывают высокоплотные ионосферные электроны и ускоряют их в направлении к Земле [2].

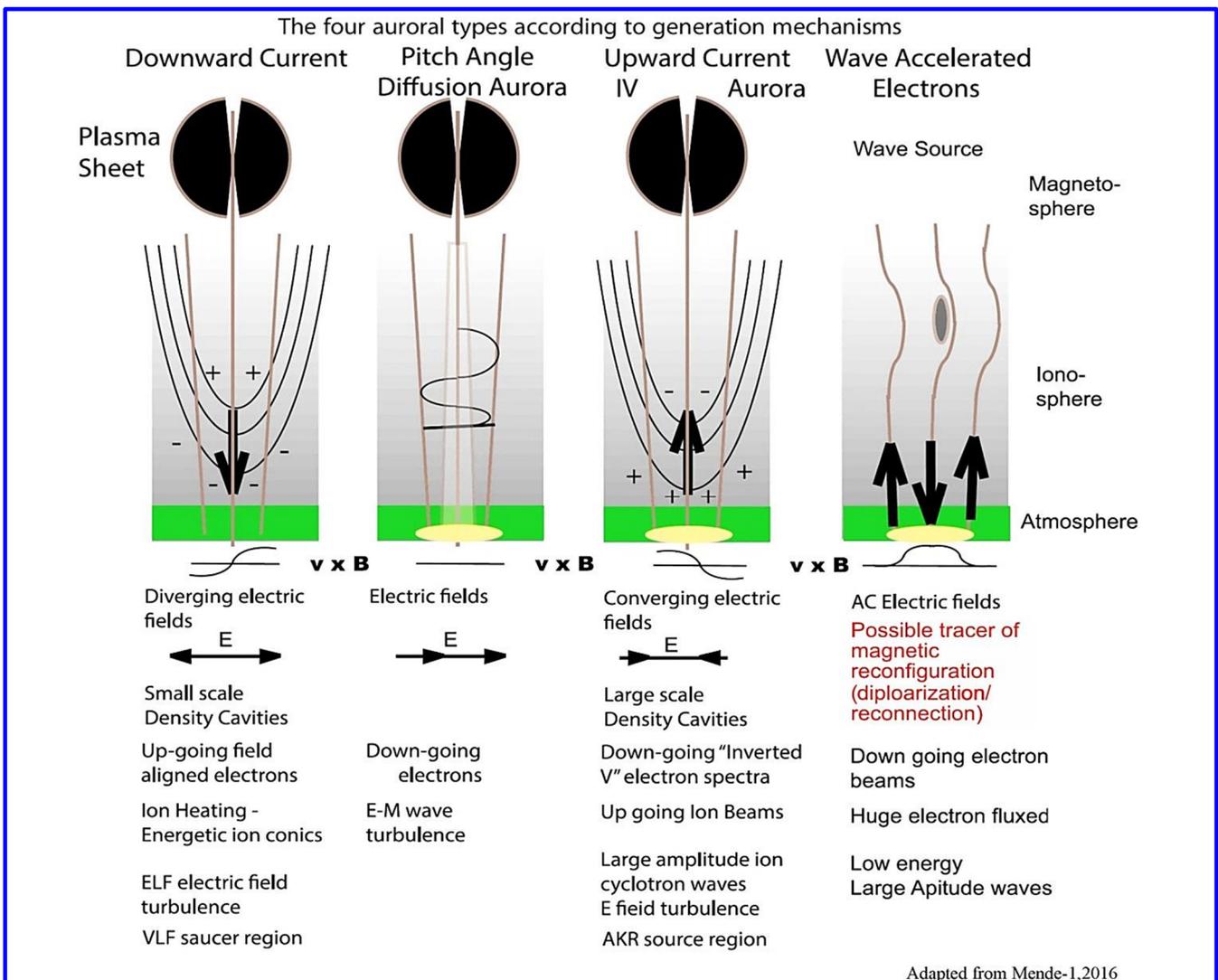


Рис. 1. (Адаптирован из Fig.2 в [2]). Четыре типа процессов генерации авроры в соответствии с механизмами, представленными в [8]

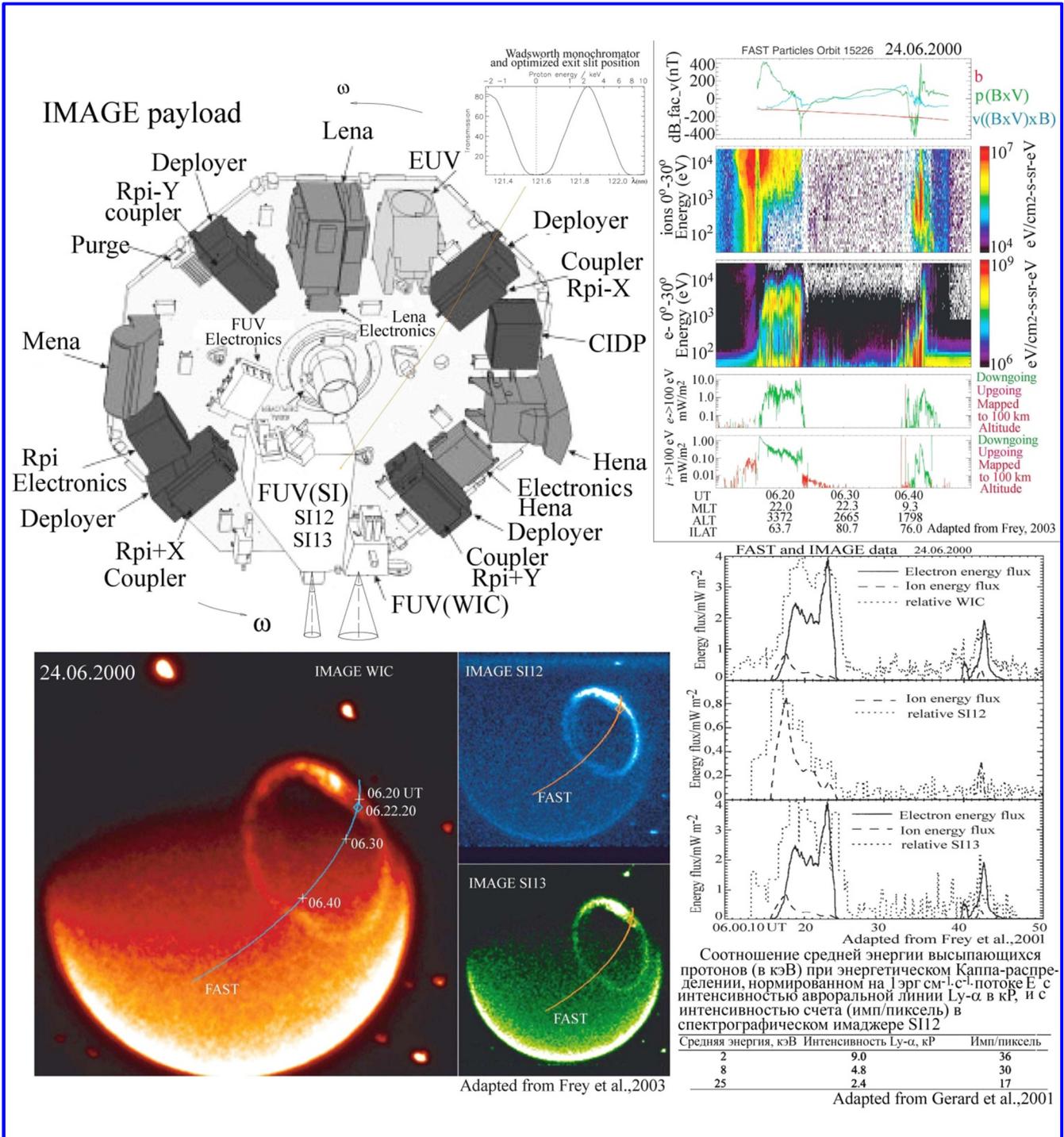


Рис. 2. (Адаптирован из Fig.11 в [39] и Fig.1 в [45]). Пример трёх изображений северного аврального овала (внизу слева), полученных одновременно со спиново-вращающегося КА IMAGE 24.06.2000 в 06.22.20 UT изображающими ВУФ-приборами: широкополосной ВУФ-камерой WIC и двумя изображающими каналами S12 и S13 спектрографического имажера SI (их расположение на спиново-вращающейся платформе с угловой скоростью  $\omega = 3$  град./с, направление вращения показано стрелкой), спектральные полосы которых показаны на рис. 3. На изображениях нанесены проекции траектории КА FAST, пересекавшего авральный овал в 06.20-06.42 UT. Спектрограммы высыпавшихся частиц приведены на правой верхней панели. На правой нижней панели показаны профили потока энергии, переносимого высыпавшимися заряженными частицами, полученные одновременно с изображениями аврального овала с КА IMAGE, в окрестности КА FAST и рассчитанные по ВУФ-изображениям с КА IMAGE [45]

**2. Развитие орбитального аврорального имажинга в диапазонах вакуумного ультрафиолета, рентгеновском и видимом с орбит КА** (от прошлого к будущему/см. резюме в п. 2.7.).

Развитие орбитальной диагностики состояния ионосферы оптическим методом началось со спектрофотометрии «видимых» авроральных эмиссий в 1960-х годах на спутниках первого поколения. Фильтровые фотометры с углом поля зрения  $\Omega \sim 1 - 3^\circ$  и спектральной полосой, имеющей ширину несколько нм, настроенные на основные авроральные эмиссии, устанавливались на околоземные КА (см. табл. 1, адаптирована из Tabl.4.2. в [3] и дополнена), начиная с КА Injun-3 (фотометры, настроенные на авроральные эмиссии  $\lambda_{391,4}$  и  $\lambda_{557,7}$  нм) в 1962 г. В 1967 г. был запущен сканирующий фотометр на OGO-4. В 1981 г. стартовали три крупных проекта: «ИК-Болгария-1300», «Ореол-3» и Dynamics Explorer-1, которые позволили развить методики наблюдений, получить широтные профили интенсивности авроральных эмиссий и первые их изображения в видимом и ВУФ-диапазонах спектра одновременно с пичт-угловыми распределе-

ниями высыпающихся частиц и продольных токов в окрестности КА [9 – 11].

**2.1.** Ещё до начала космической эры геофизики-спектроскописты поняли, что в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) имеется поддиапазон, в котором молекулы кислорода на высотах ниже 100 км верхней атмосферы способны поглощать ВУФ-кванты, возбуждённые солнечным ультрафиолетом (dayglow) благодаря тому, что сечение поглощения континуума Шумана – Рунге подстилающего  $O_2$  расположено в области длин волн  $\lambda \sim 130 \div 175$  нм (см. рис. 3, средняя нижняя панель). Это свойство атмосферы оказалось принципиально важным для орбитальных наблюдений свечения авроральных ВУФ-эмиссий, т. е. атомов и молекул, возбуждённых при ударах высыпающимися из ближней магнитосферы энергичными электронами, на фоне освещённой атмосферы. Японские геофизики были первыми, кто проверил эту особенность на практике [12]. В 1975 – 1977 гг. они разработали полосовую изображающую камеру в диапазоне 120 – 140 нм с фототелевизионной развёрткой по строкам и установили её на КА Куокко (Exos-A), который был запущен на полярную орбиту в 1978 г. [13].

Таблица 1

**Спутники, обеспечившие в XX веке измерения авроральных эмиссий с указанием параметров орбит и научных целей**

Spacecraft	Launched	Orbit [km, km, °]	Primary auroral science
Alouette 1	1962	996, 1031, 81	topside ionospheric study
Injun 3	1962	237, 2785, 70,4	auroral photometer
DMSP	1965	830, 830, 99	particles, fields and imaging (OLS system), VUV imaging from F16 (2003)
OGO-4	1967	410, 910, 86	auroral scanning photometer
Injun 5	1968	665, 2525, 81	precipitation, VLF, auroral photometer
ESRO-1	1968	300, 1550, 90	auroral physics
ISIS-2	1971	1358, 1428, 88	first imager
S3-3	1976	246, 7856, 98	auroral electric fields and particles
Kiokko (Exos-A)	1978	556, 3941, 65	ATV-aurora VUV
DE-1	1981	568, 23289, 90	coordinated with DE-2, global aurora
DE-2	1981	309, 1012, 90	low altitude aurora
IC-Bulgaria-1300	1981	906, 825, 81,2	low altitude auroral processes
Aureole-3 (Arcad 3)	1981	380, 1920, 83	low altitude auroral processes
Viking	1986	822, 14000, 99	auroral acceleration, global aurora, waves
Akebono	1989	300, 8000, 75	high altitude auroral physics
Freja	1992	596, 1764, 63	low altitude, high resolution auroral physics
FAST	1996	348, 4159, 83	auroral physics at very high resolution
POLAR	1996	5000, 50551, 86	global aurora
Interball-Auroral Probe	1996	774, 19202, 63	auroral processes in lower magnetosphere coordinated with interball Tail Probe
Astrid-2	1998	978, 1013, 83	low altitude auroral physics microsatellite
Cluster	2000	17200, 120500, 90	four-spacecraft constellation
IMAGE	2000	1000, 46004, 90,01	global aurora auroral processes in lower magnetosphere

Примечание: DMSP – серия спутников, некоторые из них работают в настоящее время.

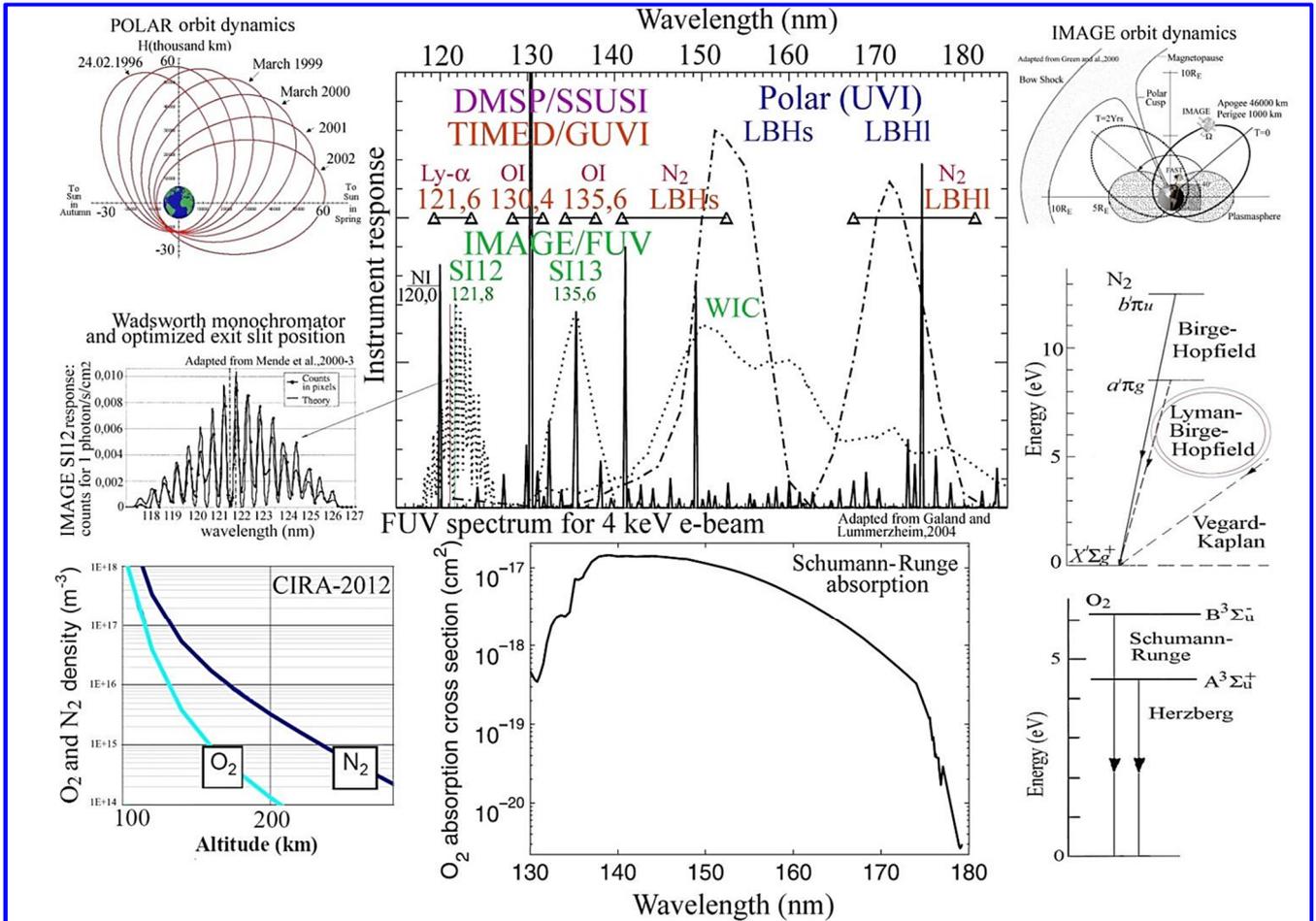


Рис. 3. Спектральная составляющая методики ВУФ-диагностики ионосферы с орбит КА POLAR, IMAGE, TIMED, DMSP и модельный ВУФ-спектр для высыпающих электронов с энергией 4 кэВ из [23] (см. среднюю верхнюю панель). На левой верхней панели показана эволюция плоскости орбиты КА POLAR с 1996 по 2002 гг. На правой верхней панели – эволюция орбиты КА IMAGE за два года с момента запуска, а также орбита КА FAST. На левой нижней панели приведено высотное распределение плотности  $O_2$  и  $N_2$  согласно модели CIRA-2012. На средней нижней панели представлена зависимость сечения поглощения Шумана – Рунге молекулярного кислорода от длины волн. На правой верхней панели – возбуждённые энергетические уровни молекулярного азота, с которых излучаются полосы LBH, а на правой нижней панели – энергетический переход  $O_2$  при поглощении квантов Шумана – Рунге (см. текст)

Результаты этого эксперимента подтвердили, что свечение полярного сияния в диапазоне ВУФ, возбуждаемое энергичными заряженными частицами, «видно» с орбиты не только на теневой, но и на освещённой стороне полярной верхней атмосферы. Более того, благодаря способности подстилающей атмосферы поглощать фоновые ВУФ-кванты, открылась возможность с высот 30 – 50 тыс. км наблюдать динамику аврорального овала целиком в различных геомагнитных условиях от его спокойно-диффузного состояния до интенсивных структур во время магнитных бурь и суббурь (см., например, рис. 4). Так зародилась и начала развиваться методическая основа орбитальной ВУФ-диагностики характеристик авроральной ионосферы.

Чтобы сориентироваться в удельных интенсивностях авроральных эмиссий (вР/Ангстрем,  $10A = 1 \text{ nm}$ )

на рис. 5 показан ВУФ-спектр свечения авроры, полученный с орбиты STS-39 с помощью спектрометра AIS [14], направленного тангенциально к слою свечения. На спектре видны эмиссионные линии и полосы:  $\lambda 121,6 \text{ nm}$  ( $Ly-\alpha$ );  $\lambda 135,6 \text{ nm}$  [OI]; LBH  $N_2$  и др., используемые в диагностике характеристик полярной верхней атмосферы и ионосферы в орбитальных проектах (см. далее). Часть эмиссионных линий не видна на спектре из-за недостаточного спектрального разрешения и чувствительности AIS, например линии атомарного азота  $NI$  120 и 149,3 нм. Казалось бы, с точки зрения чувствительности аппаратуры и уменьшения времени экспозиции изображений стоило бы использовать для диагностики полярной ионосферы интенсивные полосы  $N_2$  Вегарда – Каплана, но они находятся далеко справа от области поглощения  $O_2$ .

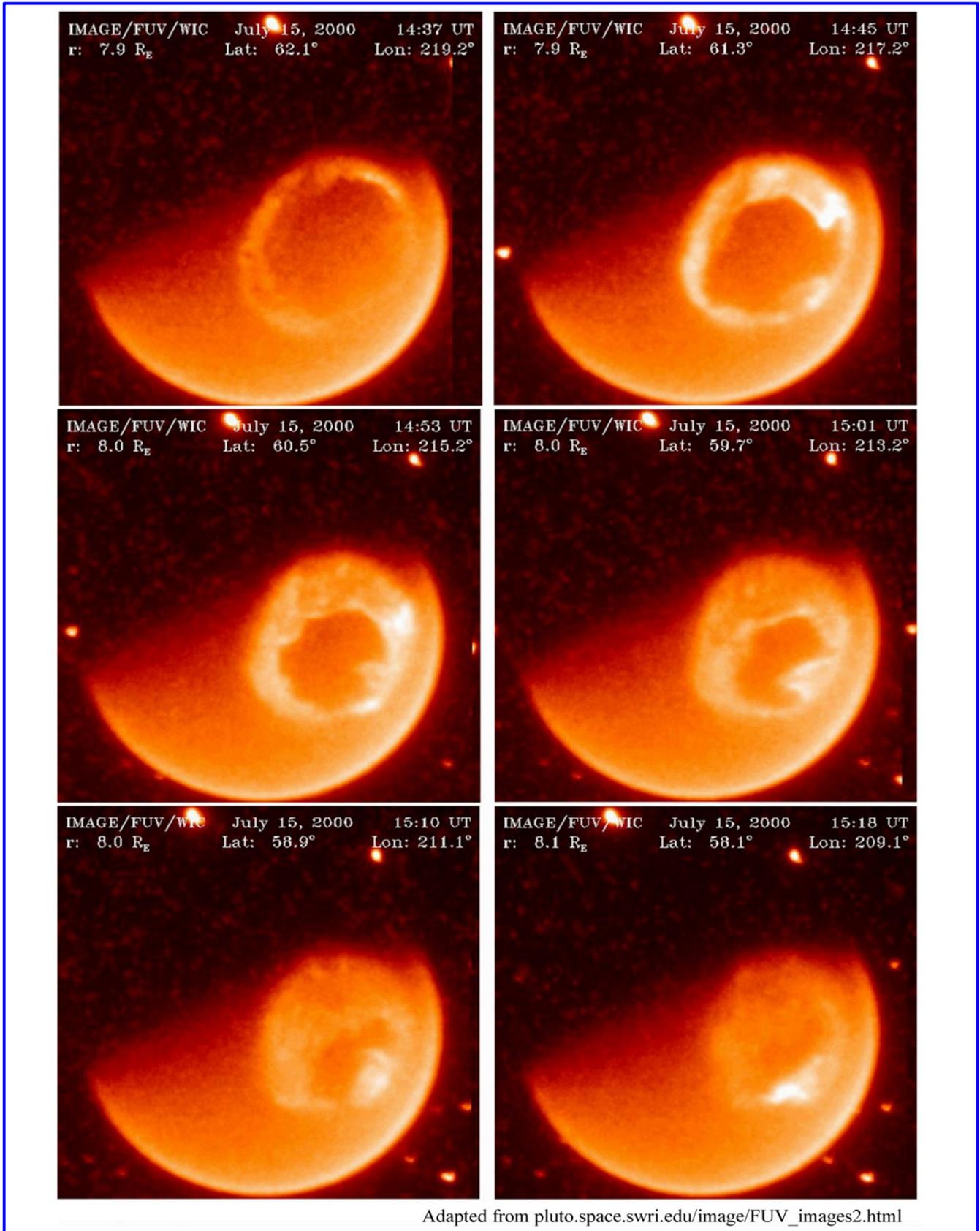


Рис. 4. Динамика магнитной бури на освещённой стороне Северного полушария 15.07.2000, отражённая в ВУФ-изображениях, полученных с камеры WIC ( $\lambda 140 - 190$  нм) на КА IMAGE в 14.37 – 15.18 UT

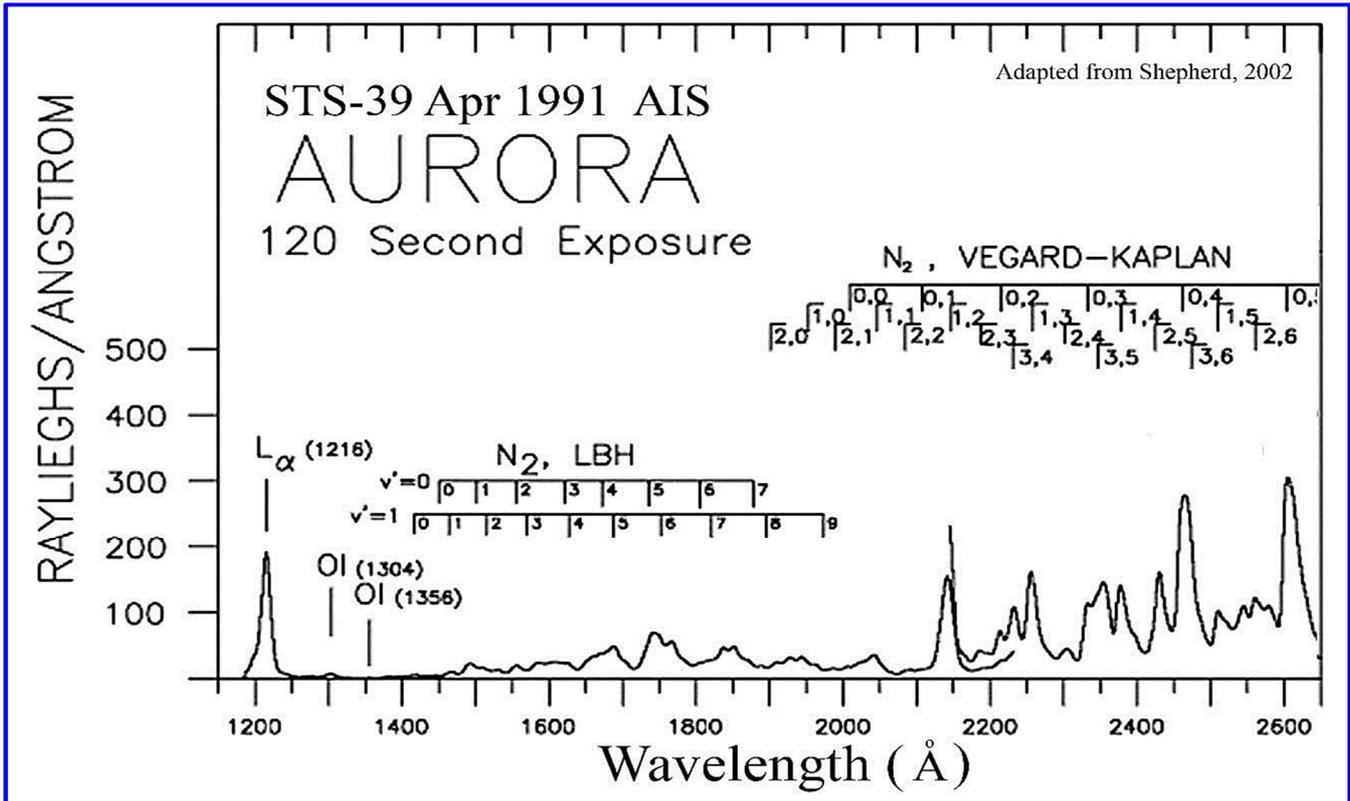


Рис. 5. ВУФ-спектр свечения авроры, полученный с орбиты STS-39 с помощью спектрометра AIS в апреле 1991 г. (1 нм = 10 Å)

Только через 14 лет (в 1981 г.) после проведения наблюдений авроры с КА Куокко, специалисты США запустили сканирующий ВУФ-имаджер, установленный на КА Dynamics Explorer-1, на полярную высокоапогейную орбиту [11, 15]. Эксперимент придал существенный импульс развитию изображающей ВУФ-диагностики состояния полярной ионосферы и позволил продолжить совершенствование её методики. При обработке авроральных ВУФ-изображений, полученных с орбиты КА DE-1, была создана методика коррекции фонового ВУФ-излучения, возбуждаемого солнечным ультрафиолетом на освещённой стороне [16], и которая впоследствии была развита [17], что позволило улучшать качество снимков.

Благодаря успехам лабораторных экспериментов по определению сечений взаимодействия заряженных частиц с компонентами атмосферы и ионосферы [18] и прогрессу в развитии моделей транспорта частиц в верхней атмосфере и ионосфере стало возможным восстановление энергетических характеристик частиц из распределений спектрально-селектированных изображений авроральных эмиссий [19 – 27]. Было подтверждено, что по распределениям интенсивности ВУФ-эмиссий, возбуждаемых энергичными протонами и электронами, можно определять и картографировать не только распределения потока энергии, переноси-

мого заряженными частицами, и их средней энергии, но и разновысотные поперечные проводимости, интегрированные по высоте [25, 28].

2.2. С учётом богатого мирового экспериментального опыта XX века (см. табл. 1, адаптированную из Tab.4.2. в [3]), основанного на данных орбитальных проектов на КА DE-1, Viking, Freja, HILAT, были получены первые детальные снимки авроральных ВУФ-эмиссий, в которых была многократно подтверждена реальность использования диапазона вакуумного ультрафиолета для дистанционной диагностики высыпаний заряженных частиц не только на теневой стороне, но и на освещённой [11, 15, 29 – 31], а позднее были осуществлены орбитальные проекты POLAR и IMAGE (см. табл. 1 и рис. 2 и 3). Оба спутника были спиново-вращающимися вокруг центральной оси симметрии, на каждом из них была установлена изображающая аппаратура, нацеленная на измерения авроральных эмиссий. В проекте POLAR глобальные наблюдения проводились одновременно в рентгеновском, ВУФ- и видимом диапазонах спектра (авроральные имаджеры: PIXIE (рентгеновский диапазон); UVI (диапазон ВУФ), и VIS (видимый и ВУФ-диапазоны) соответственно [32 – 35]. Пример таких наблюдений, иллюстрирующий динамику развития суббури, приведён на рис. 6.

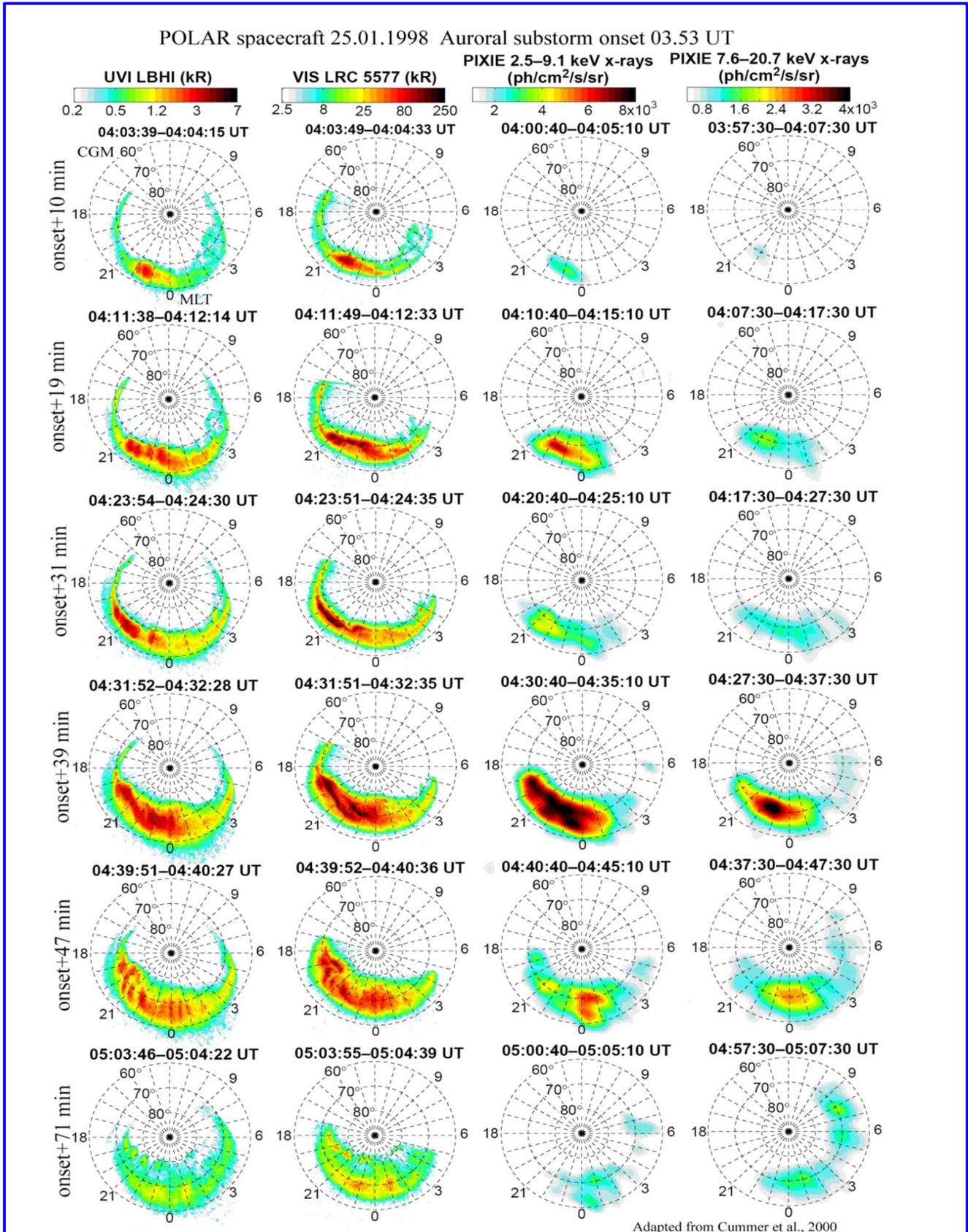


Рис. 6. Динамика суббури в изображениях, полученных 25.01.1998 с имажеров: UVI (LBHI), VIS ( $\lambda 557,7$  nm [OI]), и рентгеновском PIXIE (каналы 2,5 – 9,1 кэВ и 7,6 – 20,7 кэВ), установленных на КА POLAR

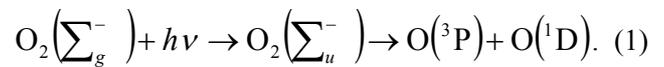
Существенным шагом в развитии методики наблюдений авроральных ВУФ-эмиссий с орбиты типа «Молния» и глобальной дистанционной диагностики полярной ионосферы стал проект IMAGE (Imager for Magnetopause to Aurora Global Exploration), который стартовал 25.03.2000 [36]. На этом КА был установлен отличный от проекта POLAR ВУФ-комплекс аппаратуры (камера WIC и спектрографический имаджер SI, состоящий из каналов SI12 и SI13) для получения изображений и одновременных измерений состояния аврорального овала, возбужденного как высыпавшимися электронами, так и протонами, причем «мгновенные» глобальные распределения интенсивности авроральной доплеровски сдвинутой водородной линии ( $\lambda 121,8$  нм) были проведены с помощью SI12 впервые [37, 38].

*Комментарий.* Эмиссия Ly- $\alpha$  имеет 2 компонента: интенсивное холодное излучение от геокороны на длине волны 121,567 нм и более слабую доплеровски сдвинутую водородную эмиссию, возбуждаемую авроральными протонами (121,8 нм), высыпавшимися в верхнюю атмосферу [39, 40] (см. далее).

На верхней средней панели рис. 3 показаны спектральные поддиапазоны ВУФ-имаджеров: UVI на КА POLAR в области полос Лаймана – Берджа – Хопфельда (LBHs и LBHl, они выделены синим цветом); имаджеров WIC, SI12 ( $\lambda 121,8$ ) и SI13 на КА IMAGE, они выделены зелёным цветом), а также изображающих спектрографов GUVI (TIMED) и SSUSI (DMSP) ( $\lambda 121,6$ ;  $\lambda 130,4$ ;  $\lambda 135,6$  нм, LBHs и LBHl, они выделены красным цветом. Методические детали ВУФ-экспериментов на КА POLAR и IMAGE анализируются далее. На левой средней панели рис. 3 показана развёртка оптимизированных полос пропускания выходной щели монохроматора Уодсворта (Wadsworth), на котором пунктиром показана доплеровски сдвинутая линия Ly- $\alpha$  ( $\lambda 121,8$  нм), этот монохроматор был использован в спектрографическом имаджере SI в проекте IMAGE [38]. Функциональные зависимости концентраций  $O_2$  и  $N_2$  от высоты согласно модели CIRA 2012 показаны слева внизу рис. 3. Вверху слева: орбита КА POLAR в момент запуска 24.02.1996 (условно) и эволюция её плоскости за 6 лет, справа орбита КА IMAGE и её эволюция в течение двух лет (см. также табл. 1, адаптированную из Tab.4.2. в [3]).

Спектральная зависимость сечения поглощения ВУФ-квантов молекулами  $O_2$  [41] – на средней панели внизу. На правой верхней и нижней панелях (соответственно) показаны энергетические уровни возбуждения полос LBH молекулярного азота (вверху справа рис. 3), и молекулярного кислорода

после поглощения солнечных ВУФ-квантов (область континуума Шумана – Рунге 130 – 175 нм) перед реакцией диссоциации (внизу справа рис. 3).



Принципиально новые результаты в авроральной физике были получены в координированных наблюдениях с орбиты «Молния» (IMAGE) с плазменными наблюдениями на орбите малого КА FAST, запущенного в 21.08.1996 [42, 43], см. табл. 1 и рис. 3 (на второй сверху левой панели показана орбита FAST относительно орбиты IMAGE. Данные измерений энергетических распределений частиц на орбите FAST с помощью транспортной модели [44] позволили, решая обратную задачу, регулярно проводить расчёты энергетических характеристик частиц (валидировать), полученные в подножных точках (f.p.) авроральных ВУФ-изображений на высотах эмиссий с орбиты КА IMAGE одновременно с измерениями потоков частиц на КА FAST (см. далее).

На нижней левой панели рис. 2, адаптированном из Fig.11 в [39] и из Fig.2 в [43], показан пример изображений северного аврорального овала, полученных с орбиты КА IMAGE, скоординированных с измерениями характеристик плазмы в ближней магнитосфере с орбиты КА FAST [39]. Эти изображения получены 24.06.2000 в 06.22.20 UT одновременно тремя изображающими ВУФ-приборами: широкополосной ВУФ-камерой WIC и двумя изображающими каналами SI12 и SI13 спектрографического имаджера SI, спектральные полосы которых показаны на рис. 3 зелёным цветом. На каждом изображении тонкой линией нанесена проекция траектории КА FAST на высоту ВУФ-эмиссий (~150 км), плюсами замаркированы точки в 06.20, 06.30 и 06.40 UT. Параметры орбиты и другие характеристики КА FAST см. в [42]. На верхней панели рис. 3 показаны проекция орбиты КА IMAGE после запуска 25.03.2000 и после её эволюции через 2 года, т. е. в марте 2002 г., а также проекция орбиты КА FAST (условно). На изображении приборной панели КА IMAGE показаны (условно) углы полей зрения  $\Omega$  изображающих приборов и геометрия наблюдений аврорального овала. Широтные профили потоков энергии электронов, рассчитанные по ВУФ-интенсивности, полученной с WIC и SI13, а также полученные с КА FAST, показаны на правой панели (вверху и внизу соответственно). Широтные профили потоков энергии ионов, рассчитанные по ВУФ-интенсивности, полу-

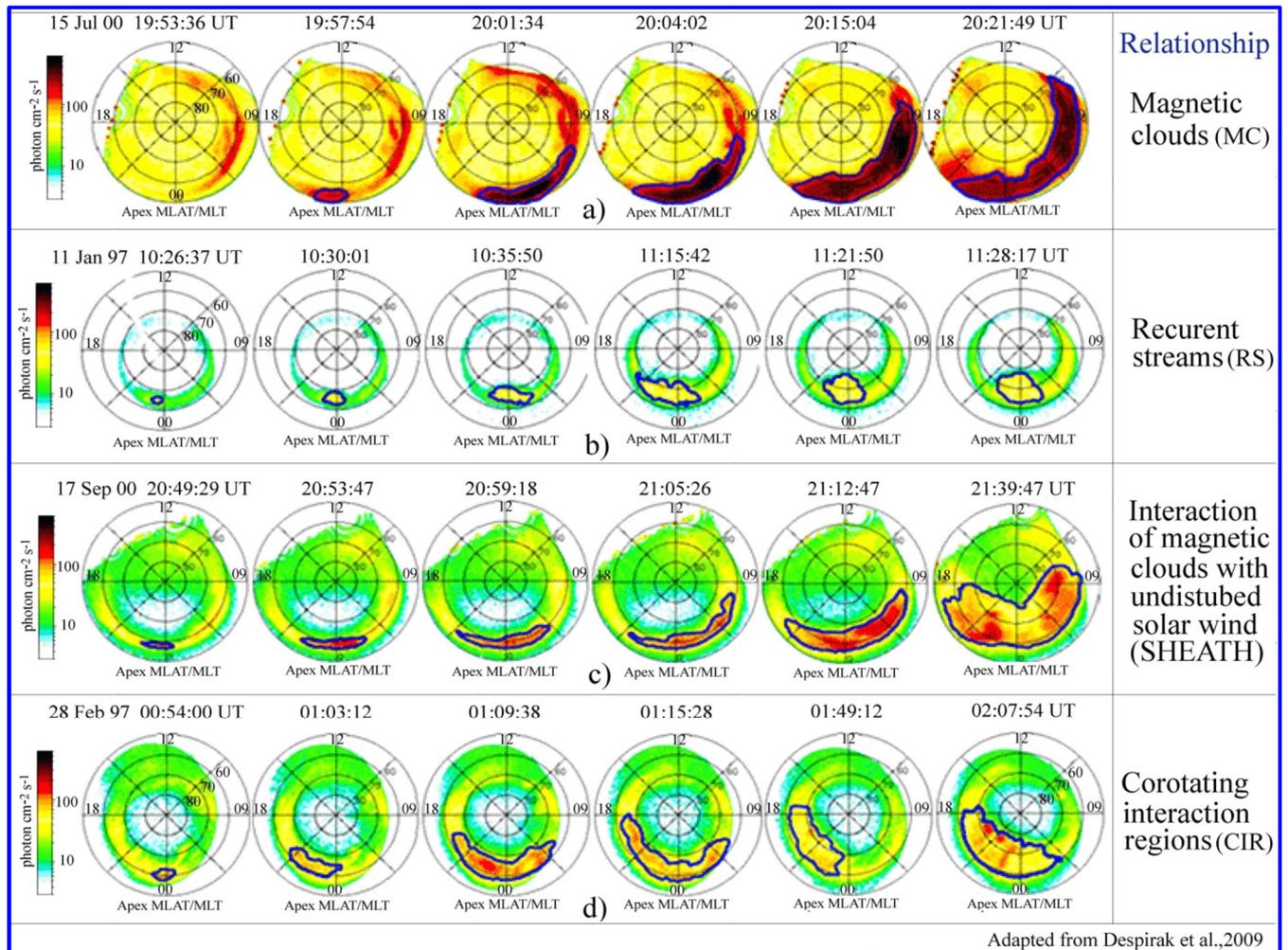
ченной с SI12 (IMAGE), а также полученные при измерениях потоков частиц с КА FAST, показаны на правой панели (внизу).

**2.3.** Рассмотрим ряд примеров результатов глобальной оптической авроральной диагностики с орбит типа «Молния», на примерах изображений аврорального овала, полученных с КА POLAR и КА IMAGE:

**Пример 1.** Рис. 6, адаптированный из [46], иллюстрирует динамику развития авроральной суббури (в течение 71 мин), начавшейся в 03.53 UT 25.01.1998, наблюдаемой с орбиты КА POLAR, отображённой в трёх диапазонах длин волн одновременно с помощью комплекса из трёх изображающих приборов в рентгеновском, ВУФ- и видимом соответственно [32 – 34].

**Пример 2.** В табл. 2 и в сериях последовательных глобальных авроральных ВУФ-изображений

на рис. 7, полученных имаджером UVI (LBHI) с орбит КА POLAR в 1997 и 2000 гг., адаптированном из [47], иллюстрируется развитие структур авроральных выпуклостей, отражающее конкретные условия в солнечном ветре, а именно магнитные облака, рекуррентные потоки, взаимодействия магнитных облаков с невозмущённым солнечным ветром; и области взаимодействия коротации, пересекающие магнитосферу во время экспозиции изображений. Условия в структурах солнечного ветра, сопутствующие сериям ВУФ-изображений с КА POLAR, можно увидеть на Fig.1 (a, b) и Fig.2 (a, b) в [47]. Принципиальные отличия характеристик авроральных выпуклостей на ВУФ-изображениях при разных рассматриваемых условиях, представленных в табл. 2, можно считать диагностическими при статистическом подтверждении.



**Рис. 7.** Примеры развития суббури (11.01.1997; 28.02.1997; 15.07.2000 и 17.09.2000) по данным авроральных ВУФ-изображений UVI (LBHI) на КА 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

Таблица 2

Координаты границ и размеры авроральной выпуклости и отношения между широтными и долготными размерами авроральных выпуклостей для четырёх структур солнечного ветра (MC, RS, Sheath, и CIR)

Solar wind structure	Onset latitude (°CGLAT)	Maximal latitude (°CGLAT)	Latitudinal size ( $L_F$ ) (°CGLAT)	Longitudinal size ( $L_d$ ) (°CGLAT)	The ratio between longitudinal and 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
Sheath	56,7	80,3	22,0	221	10,0
CIR	55,3	82,3	25,6	226	8,8

**Пример 3.** На рис. 4 представлена серия авроральных ВУФ-изображений северного аврорального овала, полученных на освещённой стороне с камеры WIC на КА IMAGE в области поглощения  $O_2$ , они отображают динамику внезапного начала фазы развития мощной геомагнитной бури 15.07.2000 (14 – 17.07.2000), произошедшей после события

CME (coronal mass ejection) 14.07.2000. Интервал времени (14.37-15.18 UT), в котором получены ВУФ-изображения, отмечены вертикальными синими линиями, а фазы бури вертикальными точечными линиями на рис. 8, адаптированном из [48], представляющим характеристики геомагнитных условий:  $K_p$ ,  $Dst$ ,  $B_z$  и  $AE$  в течение трёх суток с 15 по 17 июля 2000 г.

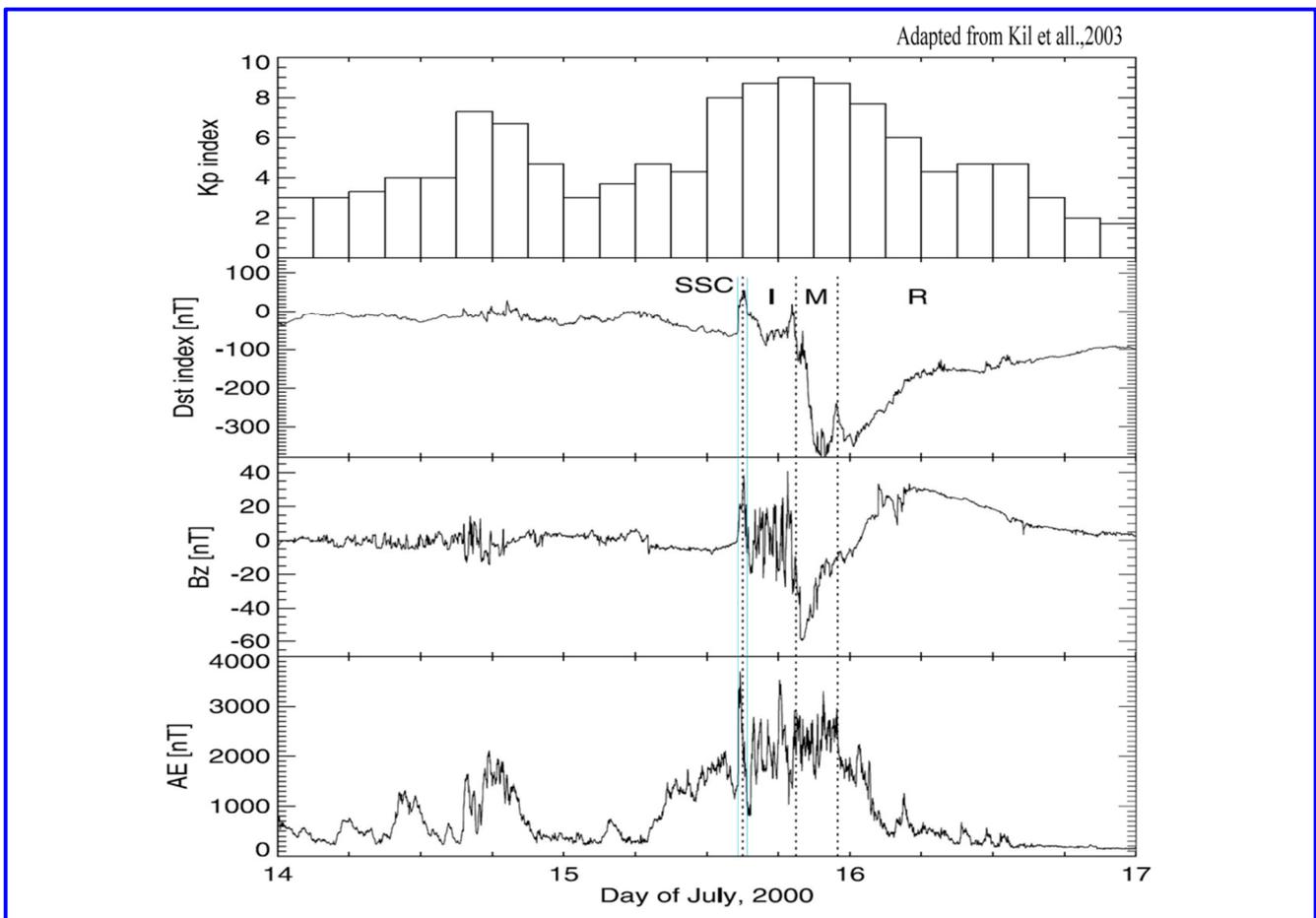


Рис. 8. Геомагнитные условия в период магнитной бури, произошедшей после коронального массового выброса (CME) 15 – 17 июля 2000 г. На панелях сверху вниз: верхняя панель – глобальный трёхчасовой планетарный  $K_p$ -индекс геомагнитной активности; 2-я панель сверху –  $Dst$ -индекс интенсивности геомагнитной бури (с ростом интенсивности бури  $Dst$ -индекс уменьшается); 3-я панель сверху –  $B_z$ -компонента межпланетного поля; нижняя панель –  $AE$ -индекс (равный разности  $AL-AU$ ) авроральной электроструи. Последовавшее за корональным выбросом массы с Солнца (SSC) после 15.30 UT развитие бури делится на фазы:  $I$  (начальная фаза) в течение 15.30-19.30 UT;  $M$  (главная фаза) в течение 19.30-23.00 UT; и фазу  $R$  (фаза восстановления) после 23.00 UT 15 июля 2000 г.

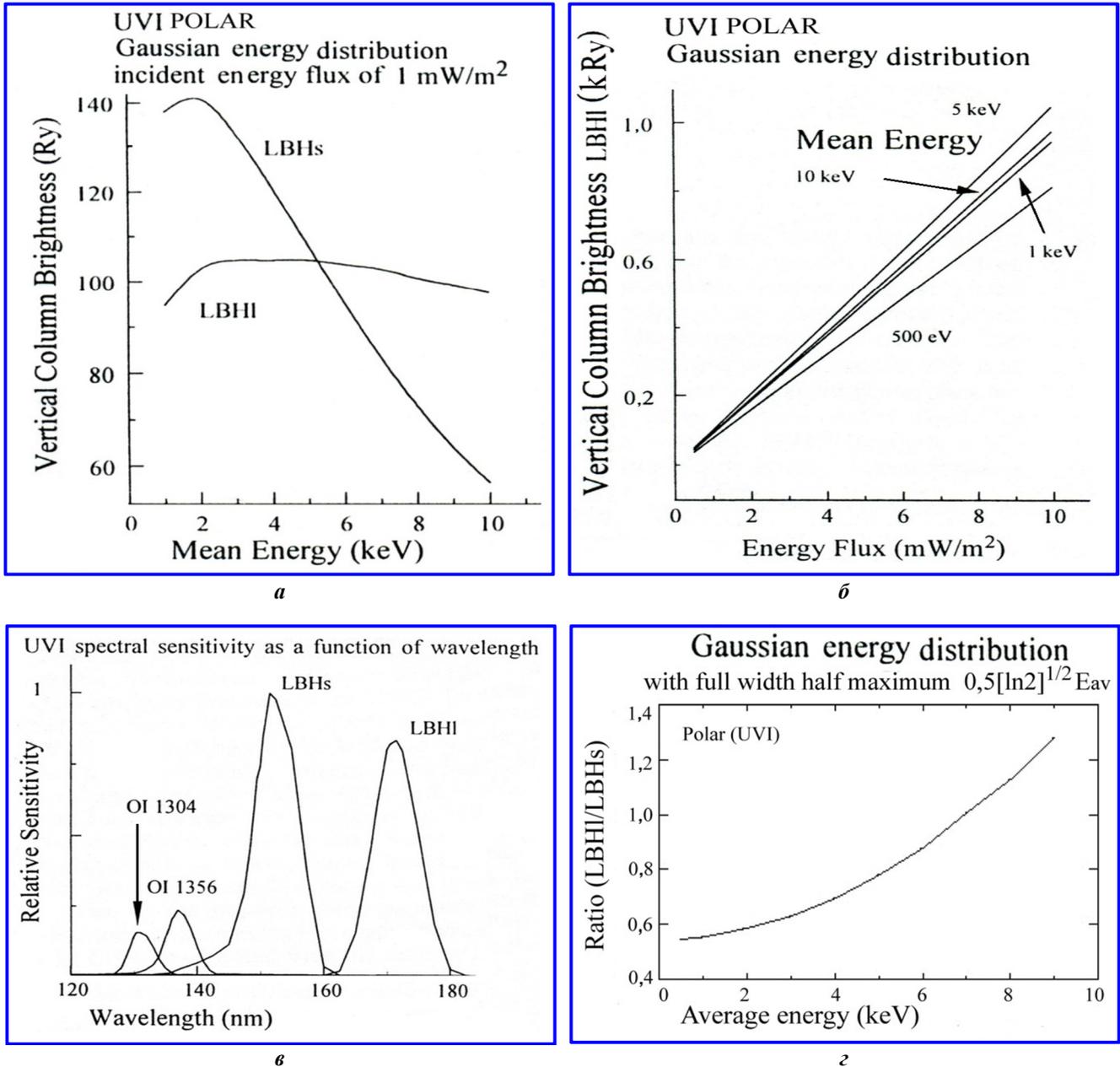


Рис. 9. Модельная зависимость интенсивности LBHs и LBH/I (в Рэляях) от средней энергии, нормированная на поток энергии  $1 \text{ мВт/м}^2$ , показана на левой верхней панели (а). Модельная зависимость интенсивности LBH/I (в Рэляях) от потока энергии электронов при различных средних энергиях и Гауссовском энергетическом распределении показана на правой верхней панели (б). Относительная чувствительность ВУФ-имаджера UVI показана на нижней левой панели (в) (на рис. 5 полосы пропускания LBHs и LBH/I маркированы штрихпунктирной линией на рис. 3 в сравнении с полосами имаджеров в других проектах). Зависимость отношения интенсивности LBH/I/LBHs от средней энергии электронов при Гауссовском энергетическом распределении показана на нижней правой панели (г)

2.4. Далее рассмотрим, как отражаются энергетические характеристики высыпающих заряженных частиц в изображениях авроральных эмиссий, и какие функциональные связи этих характеристик с интенсивностью эмиссий позволяют определять их величины.

После наблюдений ВУФ-эмиссий с орбиты КА POLAR имаджером UVI и модельных исследований [49] и

[19] функциональные связи энергетических характеристик высыпающих заряженных частиц с интенсивностью ВУФ-эмиссий были уточнены и стали выглядеть, как на рис. 9. Методика их расчётов опиралась на одновременное получение изображений полос LBH N<sub>2</sub> в двух ВУФ-поддиапазонах: LBHs и LBH/I (см. панель (в)), но фактически фильтровая селекция поддиапазонов осуществлялась последовательно.

**Пример 4.** На рис. 10 показан пример ВУФ-изображений авроральных эмиссий (верхняя панель): Ly- $\alpha$  (доплеровски сдвинутая), полос LBH N<sub>2</sub> и кислородной эмиссии  $\lambda$ 135,6 нм [OI], полученных 28 февраля 2000 г. в 11.38 UT с орбиты КА IMAGE с помощью приборов ВУФ-комплекса SI12, WIC и SI13 соответственно, спектральные полосы которых можно видеть на рис. 3 (верхняя средняя панель), маркированные зелёным цветом. На нижней панели рис. 10 показаны результаты расчётов распределений

энергетических характеристик  $E_e$  (средняя энергия) и  $F_e$  (поток энергии) высыпающих электронов, полученных на основе экспериментально-модельной технологии параллельно-последовательных шагов с учётом конкретных характеристик, калибровочных коэффициентов и передаточных функций аппаратуры (см. логическую схему (flowchart) на рис. 11 и в табл. 3, 4, 5), проведённых как без учёта вклада энергии высыпающих протонов, так и с учётом этого вклада (слева направо) [39].

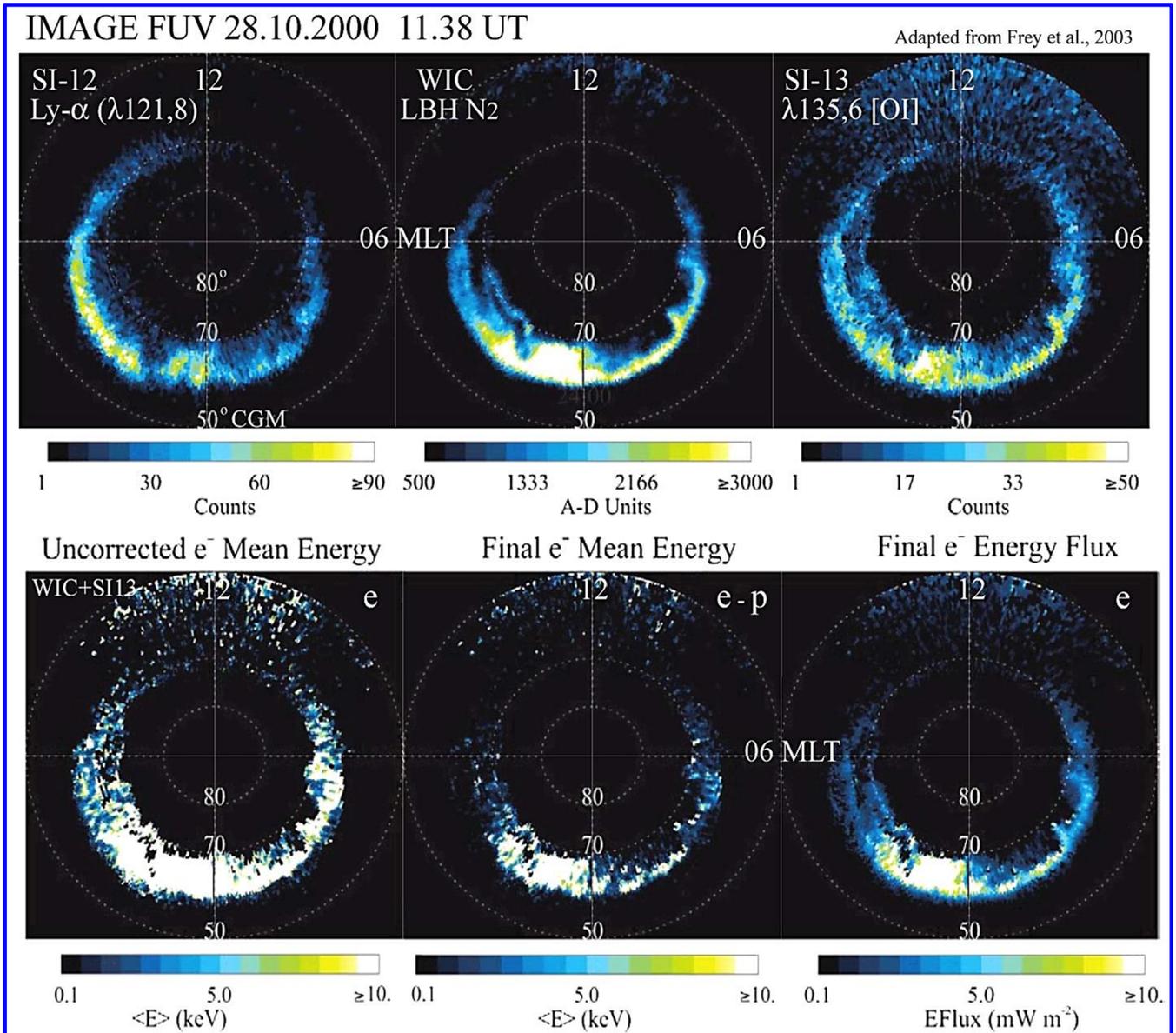


Рис. 10. На верхней панели показаны три ВУФ-изображения аврорального овала (слева направо), полученные 28.10.2000 синхронно с орбиты КА IMAGE с помощью аппаратуры: SI12 (доплеровски сдвинутая водородная линия Ly- $\alpha$  ( $\lambda$ 121,8 нм)), WIC (полосы LBH N<sub>2</sub>  $\lambda$ 137 – 190 нм) и SI13 ( $\lambda$ 135,6 нм [OI]), шкала интенсивностей в имп/с. На нижней панели слева показаны результаты расчётов распределений средней энергии, когда суммированы отсчёты WIC+SI13 в предположении, что они возбуждены электронами, на средней панели показано распределение средней энергии электронов, скорректированное на вклад протонов, а на правой панели распределение потока энергии только высыпающих электронов

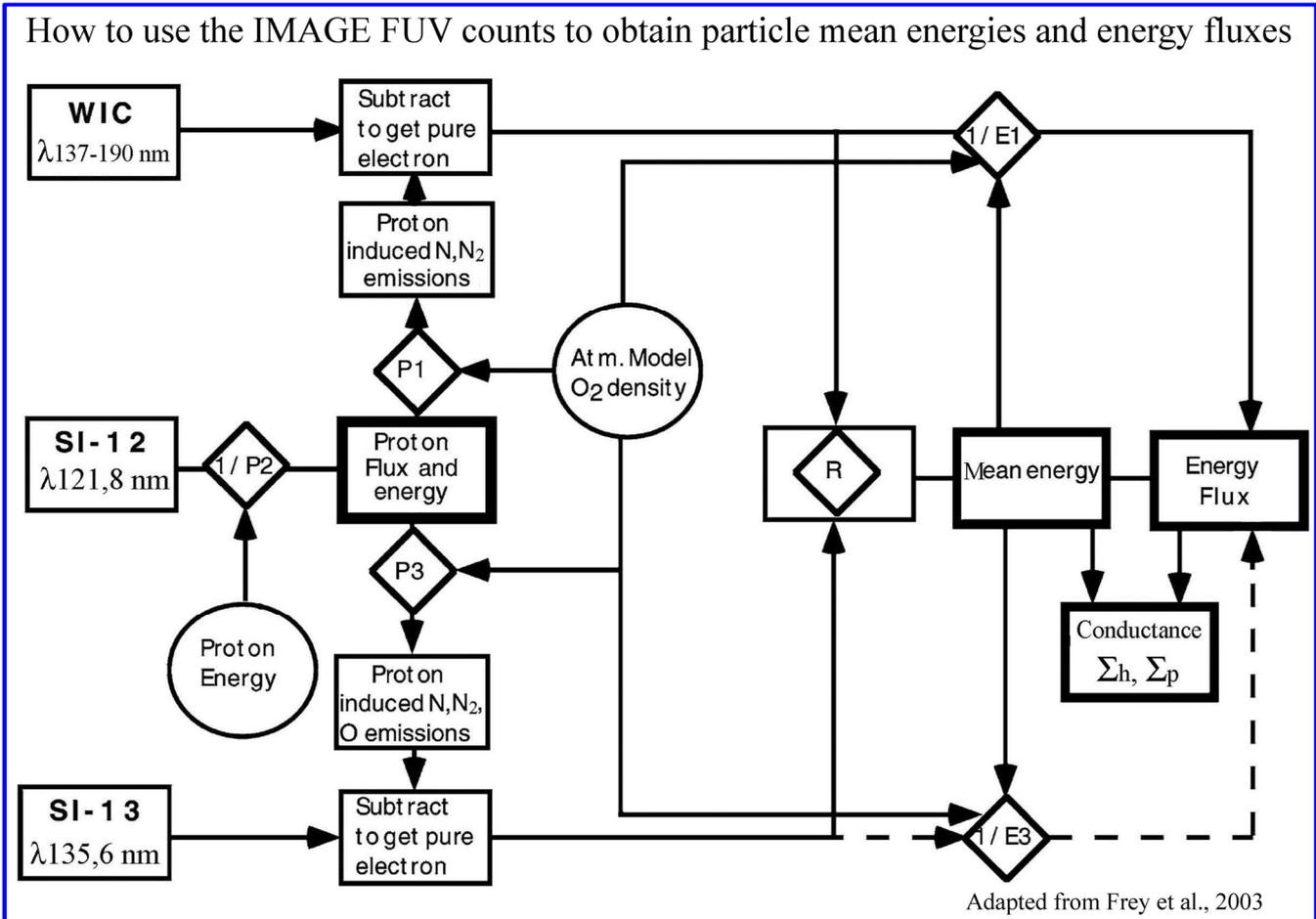


Рис. 11. Блок-схема (Flowchart) экспериментально-модельной технологии, показывающая путь (параллельность/последовательность) расчётов средней энергии высыпавшихся электронов и их потока энергии (с учётом вклада энергии высыпавшихся протонов) на основе ВУФ-изображений, аврорального овала, полученных с аппаратуры WIC (Wideband Imaging Camera), и SI (Spectrographic Imager), имеющей два канала SI12 и SI13, на орбите КА IMAGE. Расчёт распределений интегрированных по высоте проводимостей ионосферы  $\Sigma_h$  и  $\Sigma_p$  проводился на основе распределений средней энергии и потока энергии электронов и протонов (см. (13) – (16))

Таблица 3

**Характеристики спектрографического имаджера SI и широкоугольной изображающей камеры WIC, установленных на КА IMAGE**

Мгновенный угол поля зрения SI12-SI13	15° × 15°
Мгновенное поле памяти в угле поля зрения SI12-SI13	15° × 15°
Число пикселей детекторов	128 × 128
Спектральная полоса в канале SI12	119 – 126 nm not at 121,5667 or at 120,0
Излучение геокорональной Ly-α и NI не пропускается	
Спектральная полоса в канале SI13	135,6 ± 4,0 nm
2D-изображающий монохроматор входит в оптическую схему	2D imaging monochromator
Детекторы: с перекрёстной линией задержки и счётчиком одиночных событий	Crossed delay line (single event counter)
Мгновенный угол поля зрения WIC	30° × 17°
Мгновенное поле памяти WIC	17° × 17°
Число пикселей в поле памяти	256 × 256
Спектральная полоса пропускания WIC	140 – 190 nm
Тип оптической системы: концентрическая зеркальная	Concentric reflective system
Детектор: матрица, сочленённая с люминесцентным экраном и предварительным усилителем интенсивности на МКП	MCP phosphor coupled to CCD

Таблица 4

## Характеристики систем наблюдения и регистрации WIC и SI

Система наблюдения	Угол, стягиваемый пикселем (°)	Угол разрешен. ячейки (°)	Пространств. разрешение в апогее (km)	Пространств. разрешение в перигее (km)	Порог чувствит. ячейки на фотон ( $\text{cm}^{-2}\text{R}^{-1}\text{cell}^{-1}$ )	Измеренный эквивалент апертуры $A_e(\text{cm}^2)$	Число имп. за время экспозиции при интенсивности фотонов имп-1/100 Р/экспозиц.
WIC	0,09	0,18	120	3,1	5,7	0,04	23
SI 1218	0,11	0,11	73	2	1,6	0,010	1,8
SI 1356	0,11	0,11	73	2	1,6	0,008	1,3

Таблица 5

## Характеристика съёмки за один спиновый оборот, интегрированная из данных в [36]

Период спинового вращения КА IMAGE	120 с
Угловая скорость вращения КА IMAGE	3°/с
Время нахождения точки авроры в поле зрения камеры WIC	$\sim 30 \times 120/360 = 10$ с
Время нахождения точки авроры в поле зрения SI	$\sim 15 \times 120/360 = 5$ с
Время экспозиции каждого видеокadra	1/30 с
За 1 спиновый оборот КА WIC получает 300 видеокadров за 10 с	
За 1 спиновый оборот КА SI получает $\sim 150$ видеокadров за 5 с	

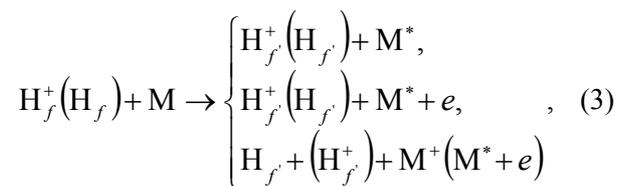
На рис. 12 представлены использованные графические зависимости функциональных связей интенсивности авроральных ВУФ-эмиссий с  $F_{e,p}$  и  $E_{e,p}$ , которые были выведены в серии работ [39, 40, 42, 51 – 56, 42, 40] на основе моделей транспорта заряженных частиц в верхней атмосфере и ионосфере и передаточных функций аппаратуры SI12, WIC и SI13. Рассматриваемая методика и технологии, использованные в проектах POLAR и IMAGE, могут быть адаптированы для будущих российских проектов и создания ВУФ-изображающей аппаратуры с учётом специфики наблюдений с орбит конкретных перспективных КА и режимов ориентации их осей в пространстве (см. далее).

Один из важнейших элементов методики получения и анализа глобальных авроральных ВУФ-изображений в проекте IMAGE, отличающего его от предыдущих проектов, заключается в получении изображений авроральной водородной эмиссии и учёте вклада энергии высыпавшихся протонов и электронов в возбуждение конкретных авроральных эмиссий, которые значительно отличаются в разных секторах MLT аврорального овала. На освещённой стороне конструкция спектрографического имаджера SI12 позволяла проводить необходимую аппаратурную селекцию холодной интенсивной ( $\sim 100$  Р/нм) геокорональной водородной линии Ly- $\alpha$  ( $\lambda 121,567$  нм) и выделение более слабой авроральной Ly- $\alpha$ , возбуждённой высыпавшимися энергичными протонами ( $\lambda 121,8 \pm 0,1$  нм), так как авроральная Ly- $\alpha$  (при наблюдениях сверху) доплеровски сдвинута на величину  $\Delta\lambda$  в более длинноволновую сторону по отношению к геокорональной [55]:

$$\Delta\lambda(\text{A}) = 1,77\sqrt{E_p}, \quad (2)$$

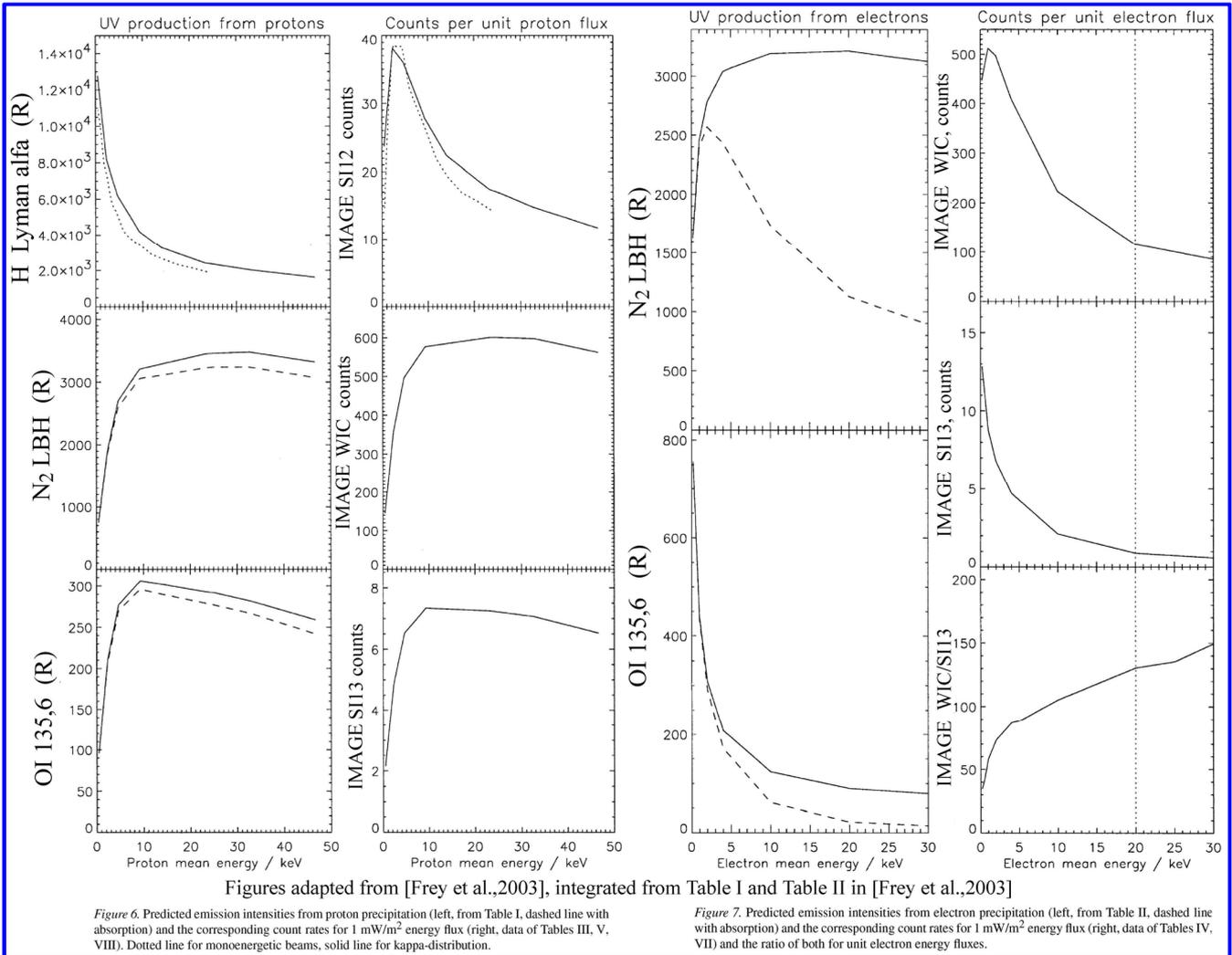
где  $\Delta\lambda$  – доплеровский сдвиг,  $\lambda$  в Å (Ангстремах), а энергия протона  $E_p$  в кэВ.

*Комментарий.* Авроральная Ly- $\alpha$  излучается благодаря высокой вероятности обдирочных столкновений и реакции перезарядки протонов с компонентами верхней атмосферы М (см. реакции (3)), когда протон становится нейтральным атомом водорода в возбуждённом состоянии, которое приводит к излучению Ly- $\alpha$  при его возврате в основное состояние, прежде чем он столкнётся и потеряет электрон и снова станет протоном. Такие циклы перезарядки могут повторяться от сотен до десятков тысяч раз в зависимости от первичной энергии протона. Поперечные сечения возбуждения эмиссии Ly- $\alpha$  низкоэнергичными протонами при столкновениях с  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  можно увидеть в работе [57].



где М – атмосферные компоненты  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  или О;  $\text{H}_f$  – вторичный энергичный атом водорода;  $\text{H}_f^+$  – вторичный энергичный протон;  $e$  – вторичный электрон.

Выделение авроральной эмиссии Ly- $\alpha$  над фоном геокорональной Ly- $\alpha$  осуществлялось в SI12 с использованием щелевой решётки Wadsworth. Оптимизация положения и функция пропускания выходной щели и решётки (показана в середине вверху рис. 2) не позволяла квантам геокорональной Ly- $\alpha$  доходить (0%) до детектора изображения, а излучение авроральной Ly- $\alpha$  пропускалось ( $\sim 93\%$ ) [38].



**Рис. 12. Модельные зависимости интенсивностей авроральных эмиссий Ly-α, LBH и λ135,6 нм [OI] от средней энергии высыпавшихся протонов (1 и 2 панели слева) и от средней энергии высыпавшихся электронов (3 и 4 панели слева), рассчитанные на основе Table I и II, адаптированных в [39] из [44, 52, 53] с учётом характеристик авроральных имаджеров WIC и SI (см. табл. 3 – 5), представленных в [37, 38]**

Так как водородные атомы после перезарядки практически сохраняют кинетическую энергию, имевшуюся у протонов до перезарядки, то они продолжают двигаться по касательной к спиральной траектории протона вокруг м. с. л. По этой причине, а также из-за того, что гирорадиус протона значительно больше гирорадиуса электрона, структура водородного свечения получается более размазанной по пространству в отличие от авроральных структур, возбуждённых электронами, а образующиеся вторичные электроны имеют энергетическое распределение с более низкой средней энергией, чем вторичная электронная продукция от высыпавшихся электронов или фотоионизации. В конечном счёте, как «протонные», так и «электронные» вторичные электроны, двигаясь вдоль магнитного поля, растрчивают энергию на ионизацию и возбуждение авроральных эмиссий.

Средняя энергия высыпавшихся частиц

$$E_{cp} = \frac{\int_0^{\infty} E f(E) dE}{\int_0^{\infty} f(E) dE}, \quad (4)$$

где  $E$  в кэВ.

**2.5. Технология получения и обработки авроральных изображений и определения распределений энергетических характеристик высыпавшихся частиц по дистанционно измеренным распределениям интенсивности авроральных эмиссий в полученных с орбиты изображениях в проекте IMAGE.** Процесс условно можно разделить на три парал-

лельно-последовательных направления, которые на определённых этапах пересекаются, чтобы получить наиболее достоверные результаты с минимальной ошибкой. Для этого проводились:

1. Предполётная лабораторная (под пучком ВУФ) и полётные (по звёздам [Freu et al., 2003]) калибровки аппаратуры и уточнения её характеристик (см. табл. 3 – 5) проводились для определения калибровочных коэффициентов и реальных передаточных функций аппаратуры, входящей в состав ВУФ-комплекса.

*Комментарий.* Предполётная лабораторная калибровка имаджеров на ВУФ-стенде это сложный и трудоёмкий процесс, а её точность зависит от множества факторов конкретного стенда. Достаточно привести для примера сравнение ВУФ-изображений полярной области, полученные одновременно с орбиты КА POLAR UVI) и с орбиты КА IMAGE (камера WIC), которые адаптированы из работы [17] (см. рис. 13). Практически идеально совпадающие (по структуре авроры) изображения отличаются интенсивностью примерно в 3 раза. Автор этого рис. А. DeJong проанализировала причину этой разницы и показала, что абсолютные калибровки чувствительности имаджера UVI на КА POLAR и ВУФ-камеры WIC на КА IMAGE значительно отличаются. По сути, изображения на рис. 13 можно считать натурной интеркалибровкой разных изображающих приборов UVI и WIC, находящихся одновременно на разных орбитах КА POLAR и IMAGE.

2. Предварительная обработка изображений, полученных с WIC, SI12 и SI13 включала ряд коррекций:

а) коррекцию смаза изображения за счёт спинового вращения КА IMAGE вокруг собственной оси ( $3^\circ/\text{с}$ ) с помощью переноса строк (Time Delay Integration) во время экспозиции, время  $\text{min}$  экспозиции одного кадра  $1/30 \text{ с}$ ;

б) коррекцию оптической дисторсии и приведение всех трёх изображений к плоскому полю, к одному количеству пикселей, к одному углу поля зрения/пиксель и к одному времени экспозиции кадра; коррекцию интенсивности во всех элементах изображений на тангенциальное усиление (эффект Ван-Райна), так как все они «видели» авроральные фрагменты под разными углами (в рамках угла поля зрения), при разных углах наблюдений с разных позиций КА на орбите;

в) вычитание фона  $\text{airglow}$  на ночной стороне аврорального овала. Этот шаг выполнялся статистическим методом, основанным на данных гистограмм интенсивности изображения в средних широтах;

г) коррекцию ВУФ-изображений на вклад интенсивности фона от  $\text{dayglow}$  по адаптированной методике, разработанной в [16] для обработки ВУФ-изображений, полученных в проекте DE-1. Эта методика была адаптирована и использована для коррекций изображений, полученных с КА POLAR и IMAGE, в ряде работ, в том числе [17, 58]. Для примера на рис. 14 показано изображение аврорального овала, полученное 09.04.1996 с КА POLAR в 13.51.24 UT, которое было скорректировано по методикам [16, 17] и было представлено в докладе [58].

3. Расчёт отклика верхней атмосферы и ионосферы на высыпания заряженных частиц (электронов и ионов) с учётом априорной информации и моделей нейтральной атмосферы и ионосферы при конкретных условиях в солнечном ветре и геомагнитной активности наиболее близких к условиям во время получения изображений аврорального овала. Для этого расчёта использовались:

а) методики расчёта скоростей потерь энергии высыпавшимися частицами, ионизации и возбуждения составляющих основываются на комбинации нескольких транспортных самосогласованных моделей: аналитической, Монте-Карло и гибридных (комбинированных), описывающих взаимодействие электронных, протонных, и электронно-протонных пучков с атмосферой [19 – 21, 40, 44, 52, 56, 60 – 64]. В список продуктов расчёта входят: потери энергии протонов и электронов при столкновениях с составляющими атмосферы и ионосферы на конкретных высотах; ионизация и электронная концентрация; генерация вторичной электронной продукции от электронов и протонов; генерация нейтральных атомов  $H$  после столкновений протонов с составляющими и реакций перезарядки (3), а также профили распределений интенсивности конкретных эмиссий в зависимости от высоты;

б) максвелловское энергетическое распределение высыпавшихся электронов и Каппа-распределение высыпавшихся протонов (см. (5) и (6) соответственно) [50]:

Максвелловское энергетическое распределение (3) согласно [21]:

$$f(E) = \frac{Q_0}{2\pi E_0^2} \frac{E}{E_0} \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right), \quad (5)$$

где  $E_0$  – характеристическая энергия электронов;  $Q_0$  – тотальный поток энергии ( $\text{мВт}/\text{м}^2$ );  $E = 2E_0$  – средняя энергия электронов.

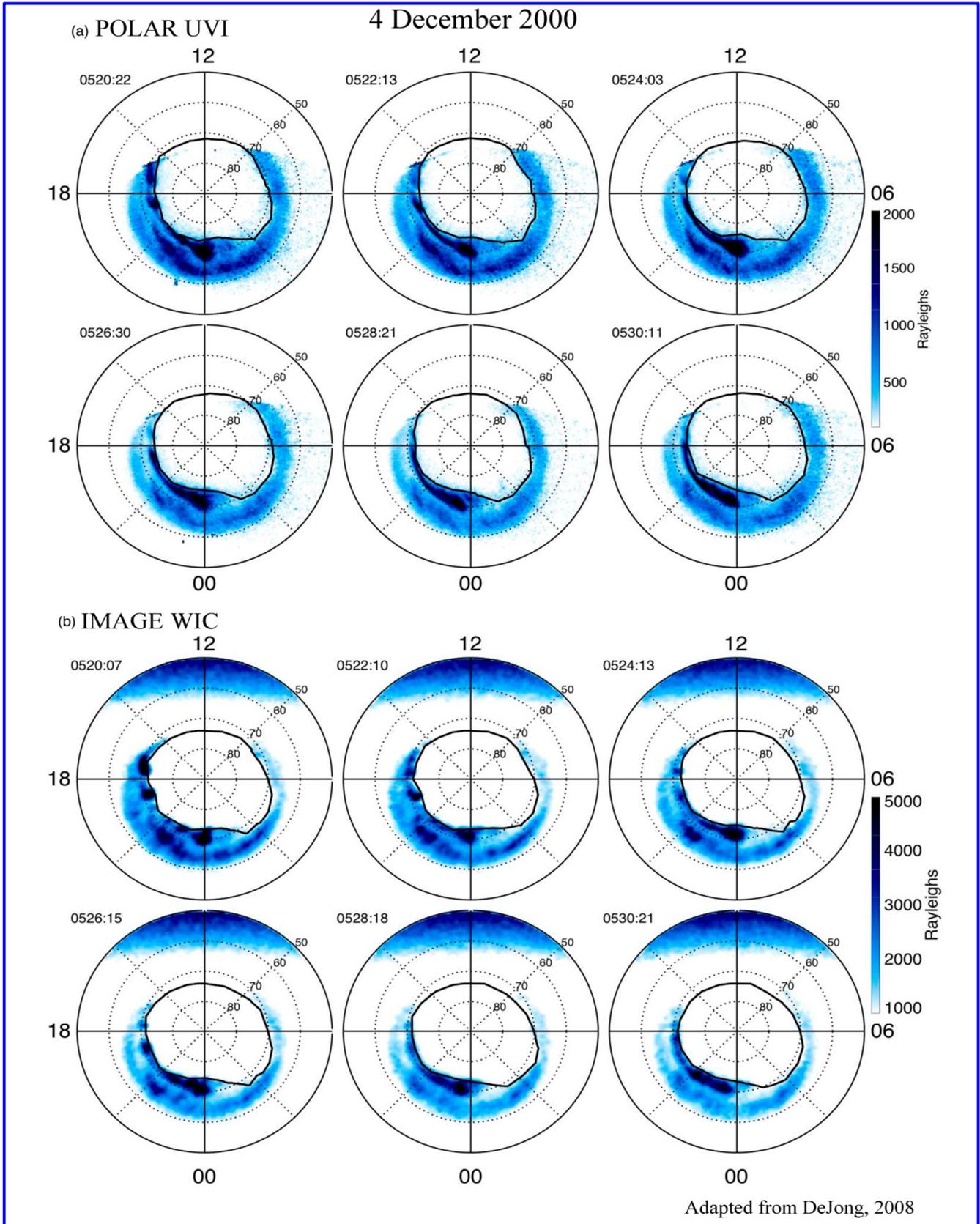


Рис. 13. Сравнение практически одновременных наблюдений ВУФ-эмиссий северной полярной области с двух орбит КА POLAR и КА IMAGE. Рисунок показывает существенную разницу абсолютных лабораторных калибровок аппаратуры UVI (POLAR) и аппаратуры WIC (IMAGE) в этих проектах (см. [17])

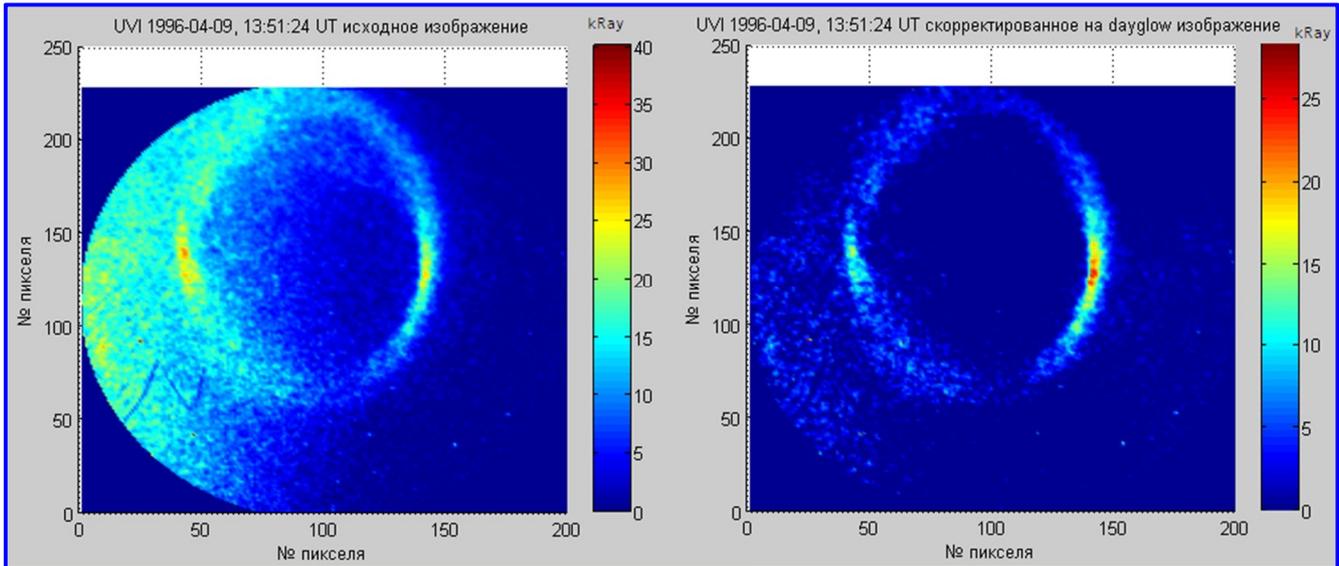


Рис. 14. Слева показано исходное изображение аврорального овала, полученное 09.04.1996 в 13.51.24 UT ВУФ-имаджером UVI на орбите КА POLAR. Справа показано то же самое изображение, скорректированное на вклад интенсивности dayglow. Шкалы интенсивности в единицах кР (килоРэлей) показаны справа от изображений

**Каппа** – энергетическое распределение высыпавшихся протонов (4) согласно [55]:

$$f(E) = \frac{Q_0}{2\pi E_0^2} \frac{(k-1)(k-2)}{k^2} \frac{E}{E_0} \frac{(k E_0)^{k+1}}{(E + k E_0)^{k+1}}, \quad (6)$$

где  $E_0$  – характеристическая энергия протонов, а  $Q_0$  – тотальный поток энергии. Для каппа-

аппроксимации  $E_p = 2E_0 \frac{k}{k-2}$  – средняя энергия

протонов. Индекс  $k$ , использованный в этом случае, равен 3,5, так как он обеспечивает наиболее удовлетворительную подгонку к среднему измеренному распределению [52].

в) поперечные сечения ионизации атмосферных составляющих и возбуждения эмиссий по опубликованным данным лабораторных измерений, эта информация со временем уточняется по мере проведения новых лабораторных исследований [2, 18];

г) в качестве вводной информации, в начале процесса используются статистические данные по интегральному потоку энергии и средней энергии высыпавшихся электронов и протонов в различных секторах MLT, основанные на серийных измерениях пичч-распределений частиц с орбит спутников DMSP в различных геомагнитных условиях [65, 66];

д) модель нейтральной атмосферы и ионосферы для конкретных условий в термосфере и геомагнитной активности;

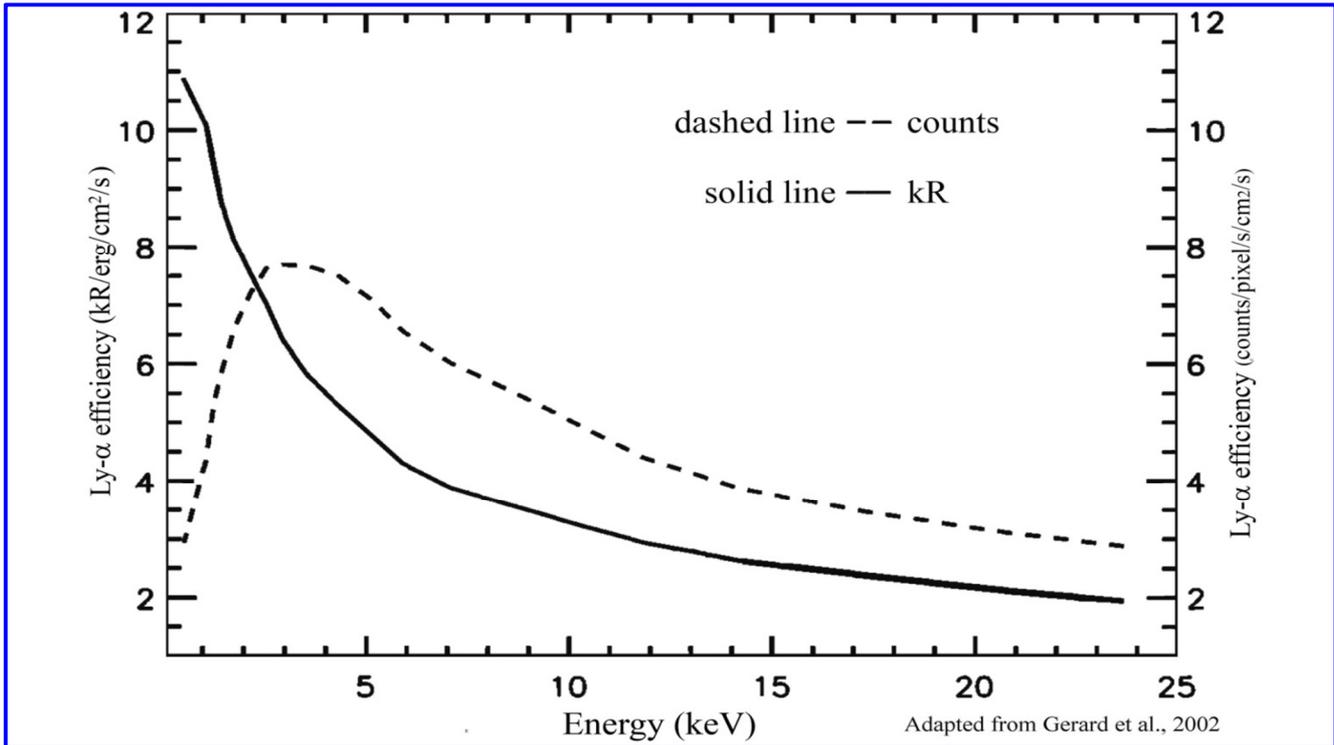
е) передаточные характеристики аппаратуры, регистрирующей авроральные изображения на

орбите КА и характеристики съёмки, представленные в табл. 5.

Табл. 3, 4, 5 характеристик аппаратуры ВУФ-комплекса на КА IMAGE и характеристик съёмки с орбиты (адаптирована из Table II и Table III в [36]) состоит из таблиц: характеристик ВУФ-изображающей аппаратуры на КА IMAGE (II и III), и характеристик съёмки за один спиновый оборот КА IMAGE.

**2.6.** Логика расчёта энергетических характеристик высыпавшихся частиц по экспериментально-модельной методике, применённой в проекте IMAGE.

На вход схемы расчёта (см. рис. 11) поступает 3 изображения от WIC, SI-12 и SI-13 (рис. 10, верхняя панель) после того, как они прошли предварительную обработку и различные коррекции (см. выше), включая поправки на деградацию чувствительности за время полета. Имеется 4 неизвестных, которые необходимо рассчитать на основе этих изображений и модельных зависимостей, а именно средняя энергия и поток энергии электронов, средняя энергия и поток энергии протонов. Сначала предварительно оценивается средняя энергия протонов с использованием статистической модели прогнозирования ([65, 66], зависящей от  $Kp$ -индекса (см. Fig.3 [65]), которая корректируется по данным распределения интенсивности авроральной  $Lu-\alpha$  в изображении, полученным в SI12 (рис. 12, левая верхняя панель) и табл. III из [39], затем определяется поток энергии протонов с учётом рис. 15, адаптированного из [44], при условии, что зависимость интенсивности от средней энергии нормирована на поток энергии  $1 \text{ мВт/м}^2$  при энергетическом каппа-распределении (6) высыпавшихся протонов.



**Рис. 15.** Функциональная связь интенсивности водородной эмиссии Ly-α, измеренной в направлении в надир, и средней энергии высыпающих протонов, нормированной на поток энергии  $1 \text{ эрг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Интенсивность в единицах кР показана сплошной линией, а интенсивность в скорости счёта детектора изображений показана пунктирной линией

На следующем шаге изображения, полученные с SI-13 и WIC, корректируются на вклад протонов в соответствии с табл. 6 – 8 (Tabl. I, II, III, IV в [39]), доводя до вклада интенсивности от чисто электронных высыпаний. После этой коррекции оценивается средняя энергия электронов на основе данных отношений  $I_{\text{LВН}}/E_{\text{ср}}$  и  $I_{135,6}/E_{\text{ср}}$  на рис. 12 (правая нижняя панель). Средняя энергия электронов затем вводится в финальный шаг оценки потока энергии электронов. Он может быть оценён как по изображениям в SI-13, так и по изображениям в WIC, которые позволяют провести кросс-проверки, хотя при этом необходимо иметь в виду, что эти оценки делаются по излучению разных спейс ОI и N<sub>2</sub>, которые по-разному зависят от условий в термосфере. Изображения WIC (с учётом вклада интенсивности  $\lambda 135,6$ , измеренного SI13) использовать для определения потока энергии электронов было целесообразнее, так как они получены при большем количестве квантов и, соответственно, более высокой скорости счёта с учётом статистической неопределённости, что позволяет получать лучшее пространственное разрешение за счёт меньшего бинирования пикселей в детекторах изображений. В результате были получены

распределения энергетических характеристик, показанные на нижней панели рис. 10.

В табл. 6 представлены интенсивности ВУФ-эмиссий (как без учёта, так и с учётом поглощения фоновых квантов, возбуждённых солнечным ультрафиолетом) нижележащим слоем молекулярного кислорода в зависимости от средней энергии высыпающих протонов с потоком энергии, нормированным на  $1 \text{ мВТ}/\text{м}^2$ .

В табл. 7 представлены интенсивности ВУФ-эмиссий (как без учёта, так и с учётом поглощения фоновых квантов, возбуждённых солнечным ультрафиолетом) нижележащим слоем молекулярного кислорода в зависимости от средней энергии высыпающих электронов с потоком энергии, нормированным на  $1 \text{ мВТ}/\text{м}^2$ .

В табл. 8 представлен отклик спектрографического имаджера SI (канал 112) на интенсивности эмиссий Ly-α, возбуждённой высыпающими протонами, поток энергии которых нормирован на  $1 \text{ мВТ}/\text{м}^2$ , с различными средними энергиями. Колонка P2 в соответствии с Fig. 10 из [36].

В табл. 9 представлен отклик изображающей камеры WIC на эмиссии, возбуждённые потоком электронов, поток энергии которых нормирован на  $1 \text{ мВТ}/\text{м}^2$ , с различными средними энергиями. Колонка E1 в соответствии с Fig. 10 из [36].

Таблица 6

**Интенсивности ВУФ-эмиссий (как без учёта, так и с учётом поглощения фоновых квантов, возбуждённых солнечным ультрафиолетом) нижележащим слоем молекулярного кислорода в зависимости от средней энергии высыпавшихся протонов с потоком энергии, нормированным на 1 мВт/м<sup>2</sup>**

$\langle E_p \rangle$ (KeV)	Ly- $\alpha$	LBH + NI	LBH + NI abs	1356	1356 abs	1304	1304 abs
0,47	12770	762	751	96	95	123	123
2,00	9000	1690	1660	191	188	334	333
8,00	4770	3070	2930	298	289	626	625
25,0	2360	3460	3240	292	277	690	688
46,7	1630	3326	3068	259	243	643	641

Таблица 7

**Интенсивности ВУФ-эмиссий (как без учёта, так и с учётом поглощения фоновых квантов, возбуждённых солнечным ультрафиолетом) нижележащим слоем молекулярного кислорода в зависимости от средней энергии высыпавшихся электронов с потоком энергии, нормированным на 1 мВт/м<sup>2</sup>**

$\langle E_e \rangle$ (KeV)	LBH	LBH abs	1356	1356 abs	1304	1304 abs
0,20	1630	1629	757	756	2908	2907
0,50	1940	1910	638	635	2420	2420
1,00	2450	2390	440	434	1607	1606
5,00	3070	2320	194	153	630	621
10,0	3194	1738	124	61	321	305
25,0	3170	1010	85	18	132	116

Таблица 8

**Отклик спектрографического имаджера SI (канал 112) на интенсивности эмиссий Ly- $\alpha$ , возбуждённой высыпавшимися протонами, поток энергии которых нормирован на 1 мВт/м<sup>2</sup>, с различными средними энергиями**

$\langle E_p \rangle$ (KeV)	Counts per 1 mW/m <sup>2</sup> , P2	Rayleigh	Counts/kR	$A_e$ (cm <sup>2</sup> )
0,47	23,7	12770	1,86	0,0009
2,00	35,6	9000	3,95	0,0020
8,00	30,2	4770	6,33	0,0032
25,0	17,0	2360	7,20	0,0037
46,7	11,7	1630	7,18	0,0037

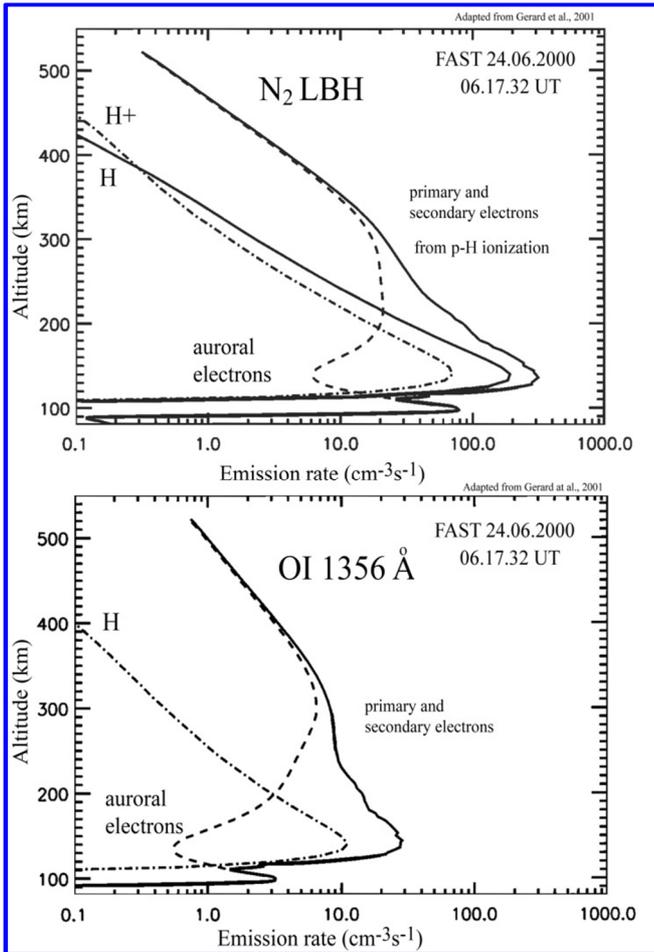
Таблица 9

**Отклик изображающей камеры WIC на эмиссии, возбуждённые потоком электронов, поток энергии которых нормирован на 1 мВт/м<sup>2</sup>, с различными средними энергиями**

$\langle E_e \rangle$ (KeV)	LBH	LBH abs	1356	1356 abs	1304	1304 abs	Total abs. E1
0,20	295	295	45,4	45,4	106	106	446
0,50	351	344	37,6	37,5	88,6	88,6	470
1,00	443	427	25,4	25,1	58,8	58,8	511
5,00	556	346	9,65	8,15	23,1	22,7	377
10,0	579	208	7,43	3,68	11,8	11,1	223
25,0	575	95	1,93	0,89	4,84	4,24	101

Рассматривая детали логической схемы вычисления распределений энергетических характеристик высыпавшихся частиц по изображениям авроральных ВУФ-эмиссий, полученных с орбиты КА IMAGE (рис. 10), обратим внимание на модельно-экспериментальные зависимо-

сти от высоты (в км) удельной интенсивности в ед. объёма эмиссий LBH N<sub>2</sub> и 135,6 нм [OI] (см. рис. 16), показывающие вклады первичных электронов, протонов и атомов водорода и вторичной электронной продукции в их возбуждение [44].



**Рис. 16.** Зависимости интенсивности эмиссий  $N_2$  LBH и  $\lambda 135,6$  нм от высоты. Эти зависимости рассчитаны по реальным спектрам электронов и протонов, полученным с орбиты КА FAST при одновременных измерениях авроральных эмиссий с КА IMAGE 24.06.2000 (см. рис. 2 – правая нижняя панель)

**2.7.** Сравнение методик ВУФ-измерений с орбит КА IMAGE и POLAR. В пунктах 2.4 – 2.6 рассмотрены две экспериментально-модельные методики дистанционного определения пространственных распределений энергетических характеристик высыпавшихся авроральных протонов и электронов по ВУФ-изображениям, использованных на орбитах типа «Молния» в проектах POLAR и IMAGE. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки:

– в проекте IMAGE экспериментально-модельная диагностика энергетического вклада протонов и электронов в возбуждение диагностируемых ВУФ-эмиссий проводилась параллельно, но были неопределённости, связанные с использованием эмиссий двух спейс  $N_2$  и OI и особенно зависимость  $\lambda 135,6$  нм [OI] от сезона, цикла солнечной активности и изменений в нейтральной атмосфере [26];

– в проекте POLAR экспериментально-модельная диагностика энергетических характеристик электронов проводилась последовательно (переключением интерференционных фильтров). При помощи фильтров осуществлялось выделение интенсивности LBH  $N_2$  в двух спектральных поддиапазонах LBHs и LBHl, при этом функциональная связь интенсивности LBHl с потоком энергии высыпавшихся электронов, включая вторичную продукцию от протонов, была проверена с помощью модели. Так как спектральный интервал полос LBHs находится в области сечения поглощения  $O_2$ , а LBHl вне его, то на освещённой стороне изображения измерялась только интенсивность LBHs (при этом, как было показано выше, требовалась коррекция изображений на вклад интенсивного излучения dayglow); отношение интенсивностей LBHl/LBHs и его функциональная связь со средней энергией электронов была проверена на основе модели [21].

**2.8.** Картографирование распределений ионосферных проводимостей интегрированных по высоте на основе данных распределений энергетических характеристик высыпавшихся частиц, получаемых дистанционным оптическим методом с орбит КА. Ионосферные проводимости являются главными параметрами при анализе взаимодействия ионосферы, термосферы и магнитосферы, и особенно при исследованиях электродинамики высокоширотной ионосферы и оценках поперечного электрического поля и продольных и поперечных токов. Так как авроральные эмиссии отражают локальные энергетические распределения частиц в полярных областях, а проводимости напрямую зависят от ионизации высыпавшимися электронами и протонами, это предопределило развитие методики дистанционной диагностики поперечных проводимостей интегрированных по высоте на основе изображений авроральных эмиссий, получаемых с орбит КА.

В работе [67], посвящённой определению ионосферных проводимостей из авроральных ВУФ-изображений, сделан акцент на том, что ключом к возможности определения проводимостей, интегрированных по высоте, оптическим методом стала возможность контролировать характеристики потока энергии частиц по распределению авроральных эмиссий. В англоязычной литературе принято называть проводимости в единице объёма – conductivity (Siemens/m), а интегрированные по высоте – conductance (Siemens) в ед. SI (S – англ., см – русск.).

Согласно [67], проводимости Педерсена и Холла в единице объёма зависящие от высоты, описываются уравнениями (7) и (8) как функции концентраций электронов и ионов и их подвижностей:

$$\sigma_P = \frac{e}{B} \left[ n_e k_P^e + \sum_i n_i k_P^i \right]; \quad (7)$$

$$\sigma_H = \frac{e}{B} \left[ n_e k_H^e - \sum_i n_i k_H^i \right], \quad (8)$$

где коэффициенты подвижностей являются функциями отношений частоты столкновений  $\nu$  и gyro-частоты  $\Omega = eB/m$  электронов и ионов;  $\nu_{ek}$  – частота столкновений электронов с нейтралами;  $\nu_{ik}$  – частота столкновений ионов с нейтралами; а  $\nu_{ei}$  – частота столкновений электронов с ионами;  $n_i$  – концентрация ионов;  $n_e$  – концентрация электронов:

$$k_P^e = \frac{\left( \sum_k \nu_{ek} + \sum_i \nu_{ei} \right) / |\Omega_e|}{1 + \left[ \left( \sum_k \nu_{ek} + \sum_i \nu_{ei} \right) / |\Omega_e| \right]^2}; \quad (9)$$

$$k_P^i = \frac{\sum_k \nu_{ik} / \Omega_i}{1 + \left( \sum_k \nu_{ik} / \Omega_i \right)^2}; \quad (10)$$

$$k_H^e = \frac{1}{1 + \left[ \left( \sum_k \nu_{ek} + \sum_i \nu_{ei} \right) / |\Omega_e| \right]^2}; \quad (11)$$

$$k_H^i = \frac{1}{1 + \left( \sum_k \nu_{ik} / \Omega_i \right)^2}. \quad (12)$$

На практике ниже 250 км доминирует частота столкновений ионов с нейтралами, а частота столкновений электронов с ионами начинает давать вклад выше 250 км.

В [1, 68] сделаны подробные обзоры эмпирических соотношений для интегрированных по высоте поперечных проводимостей ионосферы, образующихся благодаря потокам как высыпающихся электронов (см. (13) и (14)), так и высыпающихся протонов (см. (15) и (16)), выведенных в [27] и

[63], а также анализ вклада энергии электронов и протонов в зависимости от высоты:

$$\Sigma_P^e = \left[ \frac{40 E_{cp}^e}{16} + \left( E_{cp}^e \right)^2 \right] \left( F_e \right)^{0,5}; \quad (13)$$

$$\Sigma_H^e = \left[ \frac{18 \left( E_{cp}^e \right)^{1,85}}{16} + \left( E_{cp}^e \right)^2 \right] \left( F_e \right)^{0,5}; \quad (14)$$

$$\Sigma_P^p = 5,7 \left( F_p \right)^{0,5}; \quad (15)$$

$$\Sigma_H^p = 2,6 \left( E_{cp}^p \right)^{0,3} \left( F_p \right)^{0,5}. \quad (16)$$

Проводимости Педерсена и Холла, интегрированные по высоте, с учётом вклада электронов и протонов на ночной стороне тогда можно выразить:

$$\Sigma_P^{e+p} = \left[ \frac{40 E_{cp}^e}{16} + \left( E_{cp}^e \right)^2 \right] \left( F_e \right)^{0,5} + 5,7 \left( F_p \right)^{0,5}; \quad (17)$$

$$\Sigma_H^{e+p} = \left[ \frac{18 \left( E_{cp}^e \right)^{1,85}}{16} + \left( E_{cp}^e \right)^2 \right] \left( F_e \right)^{0,5} + 2,6 \left( E_{cp}^p \right)^{0,3} \left( F_p \right)^{0,5}, \quad (18)$$

где выражения  $E_{cp}^e$  и  $E_{cp}^p$  даны в (4) в кэВ, причём  $E_{cp}^e$  может изменяться от 0,5 до 20 кэВ, а  $E_{cp}^p$  может изменяться от 2 до 40 кэВ;  $\Sigma_P^e$ ,  $\Sigma_H^e$ ,  $\Sigma_P^p$ ,  $\Sigma_H^p$  – в см;  $F_e$  и  $F_p$  – в мВт·м<sup>-2</sup>.

Солнечная EUV-радиация является главным источником ионизации на дневной стороне ионосферы. Вклад EUV-радиации добавляется в карты проводимостей, интегрированных по высоте. Определение этих эмпирических формул основывается на фотохимической модели (равновесия) ионосферных проводимостей и измерений радаров в Аресибо и в Чатанике [69].

$$\Sigma_P^{sun} = \frac{4,5}{B} (1 - 0,85\nu^2) (1 + 0,15u + 0,05u^2); \quad (19)$$

$$\Sigma_H^{sun} = \frac{5,6}{B} (1 - 0,9\nu^2) (1 + 0,15u + 0,05u^2), \quad (20)$$

где  $\nu = \chi/90^\circ$ ,  $u = F_{10,7}/90^\circ$ . Солнечный зенитный угол в градусах, поток солнечного излучения 10,7 см в ед.  $10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>, магнитное поле в Гауссах, а проводимость в См. Эти формулы нормально работают для  $0 \leq \chi \leq 85^\circ$  и  $70 \leq F_{10,7} \leq 250$ ,

Тогда на дневной стороне полная проводимость интегрированная по высоте будет:

$$\Sigma_{total} = (\Sigma_{sun}^2 + \Sigma_{particles}^2)^{1/2}. \quad (21)$$

Недавно в работе (см. формулы (7) и (8) в [Khazanov, Robinson et al., 2018] предложены поправочные коэффициенты  $K$  к проводимостям Педерсена и Хола, интегрированным по высоте (см. формулы (13) и (14), наблюдаемым в диффузной авроре, которые позволяют учесть влияние супер тепловых электронов с Максвелловским и Каппа распределениями, многократно отражающихся в сопряженных зеркальных точках на границе между магнитосферой и ионосферой. Применение этих поправочных коэффициентов, приводит к тому, что величины проводимостей должны быть

уменьшены в 2 или более раз относительно рассчитанных без учёта эффектов многократного упругого рассеяния электронов. При расчёте в диффузных авроральных формах недооценка проводимости приводит к ошибочно большим электрическим полям, может объяснить переоценку электрического потенциала поперек полярной шапки, рассчитываемую в магнитогидродинамических моделях кольцевого тока, и существенно влияет на величины других электродинамических параметров ионосферы.

**Пример 5.** На рис. 17 (I и II), адаптированных из [70], в координатах MLAT-MLT приведены распределения интегрированных по высоте проводимостей, рассчитанных на основе ВУФ-изображений авроральных эмиссий, полученных с орбиты КА IMAGE во время спокойных условий (23.12.2000) и во время возмущённых условий (12.08.2000).

Один из важных результатов, продемонстрированных на рис. 17 (I и II) в том, что в спокойных геомагнитных условиях возрастание ионосферных проводимостей вследствие высыпаний протонов может достигать ~50% (в глобальном

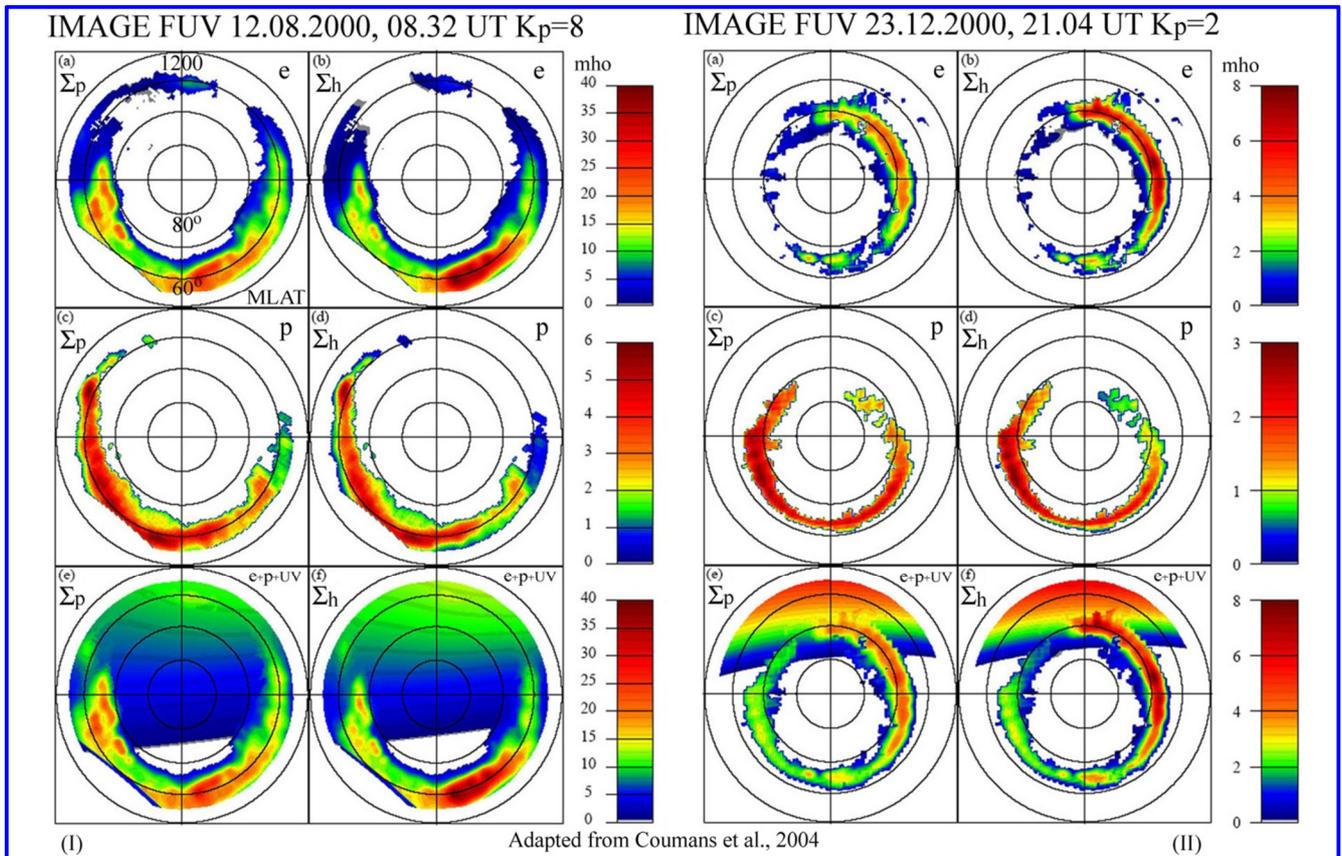


Рис. 17 (I и II). На панелях (a) и (b) – проводимости, индуцированные только электронами; на панелях (c) и (d) – проводимости, индуцированные только высыпающими протонами; на панелях (e) и (f) приведены распределения суммарных проводимостей, индуцированных высыпаниями авроральных электронов и протонов с учётом вклада фоновых проводимостей от экстремального ультрафиолета

масштабе) и до 100% – в отдельных локальных местах аврорального овала.

Следует заметить, что изображения проводимостей Педерсена и Холла (7 – 18), полученные дистанционно, несут в себе информацию не только о локальных концентрациях электронов и ионов в полярной ионосфере на соответствующих высотах, но и их подвижности, что представляется важным при дифференциальном анализе высотных распределений  $N_e$  в локальных столбах общего электронного содержания (ТЕС), которые используются при исследованиях причин сцинтилляций сигналов навигационных систем, распространяющихся в толщах слоёв ионосферы в различных геомагнитных условиях.

Резюме экспериментального опыта проектов POLAR и IMAGE в аспекте подготовки перспективного эксперимента «Авровизор-ВУФ» на орбите типа «Молния»: профессиональный обзор характеристик орбитальных ВУФ-имаджеров (летавших и перспективных) и характеристик их оптических схем сделан в [71].

Учитывая, что перспективный российский КА (типа «Арктика-М») будет иметь ориентацию строительной оси  $X$  на центр Земли и параметры орбиты: апогей  $\sim 40000$  км, перигей  $\sim 1000 - 1500$  км, угол наклонения  $i \sim 63^\circ$  [72], то имеется реальная возможность использования времени накопления квантов (экспозиция)  $\sim 30 - 40$  с, пространственного разрешения  $\sim 50 \times 50$  км и частоты съёмки 1 кадр/мин в каждом приборе ВУФ-комплекса в перспективном российском эксперименте «Авровизор-ВУФ» на орбите типа «Молния» [73], что позволит использовать методические качества ВУФ-имаджеров, реализованные как в проекте POLAR, так и в проекте IMAGE, которые могут быть реализованы при построении ВУФ-комплекса, состоящего из трёх параллельных приборов: двух изображающих камер, настроенных на измерения интенсивности  $LBN_s$  и  $LBN_l$  и изображающего спектрографа типа SI с селекцией эмиссий доплеровски сдвинутой  $Ly-\alpha$  и  $\lambda 135,6$  нм [OI]. Такая комбинация приборов комплекса позволит одновременно получать глобальные изображения аврорального овала, эмиссии которого возбуждаются как протонами, так и электронами одновременно с измерениями энергетических распределений высыпавшихся протонов и электронов в окрестности КА (выше области ускорения) [73].

Для измерений энергетических распределений частиц в области ускорения высыпавшихся частиц необходим КА на орбите типа FAST [8]. Энергетические спектры частиц, полученные на такой орби-

те, целесообразно использовать, как входные, в моделях транспорта частиц и расчётах ионизации на разных высотах и интенсивности эмиссий с целью тестирования в подножных точках магнитных силовых линий  $f_p$ , найденных в изображениях.

Для локальных измерений авроральных эмиссий со средним и высоким пространственным разрешением и энергетических распределений высыпавшихся частиц под областью ускорения необходимы три малых КА, ориентированных на Землю, с полярной орбитой (типа «Метеор»), плоскости орбит которых разведены по разным часовым поясам MLT. На этих КА могут быть установлены две фильтровые изображающие камеры (авроральные имаджеры) с углами поля зрения не менее  $30^\circ$ , полосы которых настроены на пропускание эмиссий  $\lambda 630$  нм (или  $\lambda 557,7$  нм) [OI],  $\lambda 427,8$  нм  $N_2^+$ . Возможен вариант установки одной компактной зеркально-линзовой изображающей ВУФ-камеры (см. [73] и [71]) с углом поля зрения  $\sim 50^\circ$  и спектральной полосой, расположенной в области поглощения  $O_2$  (см. выше), что позволит проводить наблюдения на освещённой стороне аврорального овала. Максимально информативным может быть вариант использования не одного, а группировок из трёх малых КА, находящихся в  $\sim 150$  км друг от друга, который позволит осуществлять реконструкции плоских изображений авроральных эмиссий и получать объёмные структуры распределений интенсивности, а в конечном счёте, объёмные распределения электронной концентрации в E- и F-областях ионосферы. Использование изображающего спектрографа для измерений интенсивности линии водорода  $Ly-\alpha$  ( $\lambda 121,8$  нм) с километровым пространственным разрешением [73, 74] на малых КА проблематично из-за его большой оптической базы, а соответственно, и больших габаритных размеров. При использовании более крупных КА целесообразно рассмотреть вариант применения модернизированного «подметающего» ВУФ-спектрометра (типа SSUSI на DMSP), который позволит увеличить число наблюдаемых авроральных ВУФ-эмиссий одновременно, что создаст новые возможности для анализа энергетических характеристик высыпавшихся частиц с пространственным разрешением  $\sim 5 \times 5$  км.

**Заключение.** На конкретных иллюстрированных примерах авроральных изображений, полученных с орбит КА POLAR и IMAGE, рассмотрены методические и диагностические возможности имаджинга авроральных ВУФ-эмиссий с орбит типа «Молния». Пространственные характеристики (расположение аврорального овала и его границ),

авроральные структуры средних и крупных масштабов внутри овала, энергетические характеристики высыпающих электронов и протонов отображаются в распределениях интенсивности авроральных эмиссий и полос в ВУФ-диапазоне спектра. Отмечены преимущества спектрального диапазона 135 – 170 нм, где «действует» поглощение фоновых квантов эмиссий, возбуждённых солнечным ультрафиолетом. Это природное свойство молекулярного кислорода обеспечивает возможность наблюдений аврорального овала с орбит на освещённой Солнцем стороне. Проанализированы методические особенности получения, калибровки и обработки глобальных изображений аврорального овала в ВУФ-эмиссиях с орбит типа «Молния» с разным наклоном их плоскости к плоскости экватора (проекты POLAR и IMAGE), и отмечено существенное преимущество ориентации перспективного российского КА «Арктика-М», одна из осей которого будет постоянно направлена на центр Земли, для наблюдений ВУФ-эмиссий с помощью проектируемого аврорального имаджера «Авровизор-ВУФ» перед наблюдениями с орбит рассмотренных зарубежных КА. Поток энергии частиц и их средняя энергия, и, как следствие, проводимости полярной ионосферы, интегрированные по высоте, зависят от распределений интенсивности конкретных эмиссий и их отношений и вычисляются при анализе изображений. Детально рассмотрена и проанализирована логическая цепь расчётов энергетических характеристик высыпающих частиц на основе изображений интенсивности авроральных эмиссий и функциональных связей интенсивности с потоком энергии и средней энергией электронов и протонов, использованная в проекте IMAGE. Сформулированы методические рекомендации, которые позволят подготовить эксперименты по дистанционной оптической ВУФ-диагностике состояния полярной ионосферы с орбит перспективных российских КА на орбите типа «Молния».

Конкретные примеры методических и диагностических возможностей дистанционного имаджинга авроральных эмиссий в видимой и ВУФ-области спектра с полярных орбит (с высотой ~ 850 км) в интересах диагностики состояния полярной ионосферы и их возможные приложения для контроля условий распространения сигналов в ионосфере будут рассмотрены в готовящейся к печати части 2.

### Сокращения

ВУФ – вакуумный ультрафиолет

КА – космический аппарат

кР – килоРэлей, 1 Рэлей =  $10^6$  фотон/см<sup>2</sup>·с·стер

м. с. л. – магнитная силовая линия

Сименс (1 См) = 1 siemens (1 S) = 1/Ohm = 1 mho (обратный Ом) – единица проводимости в системе СИ

CME – coronal mass ejection

DMSP – Defense Meteorological Satellite Program

f.p. – foot point

FUV – Far ultraviolet

FAST – Fast Auroral Snapshot Explorer

IMAGE – Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration

LBH – Lyman-Birdge-Hopfield bands of N<sub>2</sub>

MLAT – геомагнитная широта

MLT – Magnetic Local Time

kRay (or kRy) – kilo Rayleigh, 1 Rayleigh =  $10^6$  photon/sm<sup>2</sup>·s·ster

RS – recurrent stream

CIRA – COSPAR International Reference Atmosphere

SI – spectrographic imager

SSUSI – Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager

STS – Space Transportation System

TEC – Total Electron Content

VUV – Vacuum Ultraviolet

WAE – Wave Accelerated Electrons

WIC – Wide angle Imaging Camera

### Литература

1. Кузьмин А. К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит перспективных российских космических аппаратов / ИКИ РАН // Пр. 2161. – 2011. – 49 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [iki.rssi.ru>books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf).
2. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables // Journ. Geophys. Res.: Space Physics. – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10623 – 10637. – Doi:10.1002/2016/JA022607.
3. Paschmann G., Haaland S., Treumann R., Auroral plasma physics // Space Sci. Rev. – 2002. – V. 103. – № 1 – 4. – 485 p. – Doi:10.1023/A:1023030716698.
4. Keiling A., Wygant J. R., Cattell C. A., Mozer F. S. and Russell C. T. The global morphology of wave poyniting flux: Powering the aurora // Science. – 299. – Pp. 383 – 386. – Doi:10.1126/science.1080073.
5. Аксёнов О. Ю., Аникин В. А., Борисов Ю. А., Кузьмин А. К., Лапшин 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. – 2015. – Москва. – ЦАО. – МФТИ. – 37 с. – 8 рис. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201501.pdf>.
6. Hunsaker R. D., Hargreaves J. K. The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation // Cambridge

- Univ., UK. – 2003. – 617 pages. – ISBN: 9780511535758. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535758>.
7. Basu S., Grovesa K., Basu S., Sultana P. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans // *Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – V. 64. – Pp. 1745 – 1754.
  8. Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Temerin M., Peria W., Mozer F. S., Klumpar D. M., Shelly E. G., Peterson W. K., Moebius E., Elphic R., Strangeway R., Cattell C., Pfaff R. F. FAST observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating // *Geophys. Res. Lett.* – 1998. – 25. – 12. – Pp. 2017 – 2020. – doi:10.1029/98GL00851.
  9. Gogoshev M., Petkov N., Kuzmin N., Gogosheva Ts., Spasov S., Kostadinov I. Airglow atmospheric imager on board the «IK-Bulgaria-1300» satellite // *Adv. Space. Res.* – 1983. – V. 1.2. – № 7. – Pp. 115 – 120. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198801.pdf>.
  10. Gladyshev V. A., Kuzmin A. K., Mularchik T. M., et al. Auroral photometers aboard the Aureol-3 satellite: the Altair experiment // *Annales Geophysicae.* – 1982. – T. 38. – Fasc. 5. – Pp. 631 – 634. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198201.pdf>.
  11. Frank L. A., Craven J. D., Imaging results from Dynamics Explorer 1 // *Rev. Geophys.* – 1988. – V. 26. – Pp. 249 – 283.
  12. Kaneda E., Takgi M., Niwa N. Vacuum ultraviolet television camera // *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Symp. Space Tech. Sci.* – 1977. – Agne. – Tokyo. – Pp. 233 – 238.
  13. Kaneda E., Auroral TV observation by KYOKKO // *Proc. International Workshop of selected topics of magnetospheric physics.* – 1979. – Tokyo. – Pp. 15 – 19.
  14. Shepherd G. G. Spectral imaging of the atmosphere // Volume 82 in the International Geophysics Series / Eds. by R. Dmowska, J. R. Holton and H. T. Rossby // Academic Press., An Elsevier Science Imprint. – 2002. – 323 p.
  15. Frank L. A., Craven J. D., Ackerson K. L., English M. R., Eather R. H., and Carovillano R. L. Global auroral imaging instrumentation for the Dynamics Explorer Mission // *Space Sci. Instrum.* – 1981. – № 5. – Pp. 369 – 393.
  16. Immel T., Craven J., Nicholas A. An empirical model of the FUC dayglow from DE-1 images // *Journ. Atmos. Solar. Ter. Phys.* 2000. – V. 62. – Pp. 42 – 64.
  17. DeJong A. D. Studies of magnetospheric convection: balanced and unbalanced // *Diss. of doctor philosophy (Atmospheric and Space Science).* – Univ. Michigan. – 2008. – 146 p.
  18. Ajello J. M., Shemansky D. M. A re-examination of important N<sub>2</sub> cross sections by electron impact with application to the dayglow: The Lyman-Birge-Hopfield band system and NI (119,99 nm) // *Journ. Geophys. Res.* – 1985. – V. 90. – Issue A10. – Pp. 9845 – 9861.
  19. Strickland D. J., Jasperse J. R., Whalen J. A. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – N A10. – Pp. 8051 – 8062.
  20. Strickland D. J., Meier R. R., Hecht J. H. and Christensen A. B. Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: Theory and model results // *Journ. Geophys. Res.* – 1989. – V. 94. – Issue A10. – Pp. 13527 – 13539. – Doi:10.1029/JA094iA10p13527.
  21. Strickland D. J., Daniell R. E. Jr., Jasperse J. R. and Basu B. Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora: 2. Model results // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – Issue A12. – Pp. 21533 – 21548. – Doi:10.1029/93JA01645.
  22. Basu B., Jasperse J. R., Strickland D. J., Daniell R. E. Jr. Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora: 1. Theory // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – Issue A12. – Pp. 21517 – 21532. – doi:10.1029/93JA01646.
  23. Galand M., Lilensten J., Kofman W. and Sidje R. B., Proton transport model in the ionosphere: multistream approach of transport equations // *Journ. Geophys. Res.* – 1997. – V. 102. – Issue A10. – Pp. 22261 – 22272. – <https://doi.org/10.1029/97JA01903>.
  24. Иванов В. Е., Козелов Б. В. Прохождение электронных и протонно-водородных пучков в атмосфере Земли // Апатиты. – Изд. КНЦ РАН. – 2001. – 260 с.
  25. Robinson R. M., Vondrak R. R., Miller K., Dabbs T., Hardy D. On calculating ionospheric conductances from the flux and energy of precipitating electrons // *Journ. Geophys. Res.* – 1987. – V. 92. – Issue A3. – Pp. 2565 – 2569. – <https://doi.org/10.1029/JA092iA03p02565>.
  26. Germany G. A., Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators // *Journ. Geophys. Res.* – 1994. – V. 99. – A1. – Pp. 383 – 388. – <https://doi.org/10.1029/93JA02357>.
  27. Galand M. and Richmond A. D. Ionospheric electrical conductances produced by auroral proton precipitation // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – A1. – Pp. 117 – 125. – <https://doi.org/10.1029/1999JA002001>.
  28. Robinson R. M., Vondrak R. R., Craven J. D., Frank L.A., Miller K. A comparison of ionospheric conductances and auroral luminosities observe simultaneously with Chatanika radar the DE-1 auroral imagers // *Journ. Geophys. Res.* – 1989. – V. 94. – Issue A5. – Pp. 5382 – 5396. – <https://doi.org/10.1029/JA094iA05p05382>.
  29. Anger C. D., Murphree, J. S., Vallance Jones, A., King R. A., Broadfoot A. L., Cogger L. L., Creutzberg F., Gattinger R. L., Gustafsson G., Harris F. R., Haslett J. W., Llewellyn E. J., McConnell J. C., McEwen D. J., Richardson E. H., Rostoker G., Sandel B. R., Shepherd G. G., Venkatesan D., Wallis D. D. and Witt G. Scientific Results from the Viking Ultraviolet Imager: an Introduction // *Geophys. Res. Lett.* – 1987. – V. 14. – Pp. 383 – 386.
  30. Murphree J. S., King R. A., Paine T., Smith K., Reid D., Adema J., Gordon B., Wlochowicz R. The FREJA ultraviolet imager // *Space Sci. Reviews.* – 1994. – V. 70. – Pp. 421 – 446. – <https://doi.org/10.1007/BF00756880>.
  31. Paxton L. J., and Meng C-I. Auroral imaging and space-based optical remote sensing // *Johns Hopkins APL Technical Digest.* – 1999. – V. 20. – N 4. – Pp. 556 – 569.
  32. Imhof W. L., Spear K. A., Hamilton J. W., Higgins B. R., Murphy M. J., Pronko J. G., Vondrak R. R., McKenzie D. L., Rice C. J., Corney D. J., Roux D. A., Williams R. L., Stein J. A., Bjordal J., Stadsness J., Njoten K., Rosenberg T. J., Lutz L., Detric D., The POLAR ionospheric X-ray imaging experi-

- ment (PIXIE) // *Space Sci. Reviews.* – 1995. – V. 71. – N 1–4. – Pp. 385–408. – Doi:10.1007/bf00751336.
33. Torr M. R., Torr D. G., Zukic M., Johnson R. B., Ajello J., Banks P., Cole K., Keffer C., Parks G., Tsurutani B., Spann J., A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission // *Space Sci. Reviews.* – 1995. – V 71. – N 1–4. – Pp. 329–383. – Doi:10.1007/BF00751335.
34. Frank L. A., Sigwarth J. B., Craven J. D., Dolan J. S., Dvorsky M. R., Hardebeck P. K., Harvey D., Muller D. W. The visible imaging system (VIS) for the POLAR spacecraft // *Space Sci. Reviews.* – 1995. – V. 71. – N 1–4. – Pp. 297–328.
35. Frank L. A., and Sigwarth J. B. Finding concerning of positions of substorm onsets with auroral images from the Polar spacecraft // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – NA6. – Pp. 12747–12761.
36. 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.* – 2000. – V. 91. – N 1–2. – Pp. 243–270. – Doi:10.1023/a:1005271728567.
37. Mende S. B., Heetderks H., Frey H. U., Lampton M., Geller S. P., Abiad R., Siegmund O. H. W., Trensins 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.* – 2000. – V. 91. – N 1–2. – Pp. 271–285. – Doi:10.1023/a:1005227915363.
38. 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- $\alpha$  and OI 135.6 nm // *Space Sci. Reviews.* – 2000. – V. 91. – N 1–2. – Pp. 287–318. – Doi:10.1023/a:1005292301251.
39. 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. – Pp. 255–283. – Doi:10.1023/B:SPAC.0000007521.39348.a5.
40. Gerard J.-C., Shematovich V. I., Bisikalo D. V., Lummerzheim D. A Monte Carlo model of aurora hydrogen emission line profiles // *Annales Geophysicae.* – 2005. – V. 23. – Pp. 1473–1480. – DOI 10.5194/angeo-23-1473-2005.
41. Gibson S. T., Gies H. P. F., Blake A. J., McCoy D. J., Rojers P. J. Temperature dependence in the Shumann-Runge photoabsorption continuum of oxygen // *J. Quant. Spectrosc. Radia. Transfer.* – 1983. – V. 30. – Pp. 385–393.
42. Pfaff R., Carlson C., Watzin J., Everett D., Gruner T. An overview of the Fast auroral snapshot (FAST) // *Space Sci. Rev.* – 2001. – V. 98. – Issue. 1–2. – Pp. 1–32. – Doi:10.1007/978-94-010-0332-2\_1.
43. 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.* – 2003. – V. 108. – SMP 6–1. – 1344, doi:10.1029/2002JA009787, 2003.
44. Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., Shematovich V. I., Bisicalo D. V., Frey H., Mende S., Gladstone G.R., Carlson C. W. Observation of the proton aurora with IMAGE FUV imager and simulations ion flux in situ measurement // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – Pp. 28939–28948.
45. 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.* – 2001. – V. 28. – N 6. – Pp. 1135–1138.
46. Cummer S. A., Vondrak R. R., Ostgaard N., Stadsnes J., Bjordal J., Chenette D. L., Brittnacher M. J., Parks G. K., Sigwarth J. B., Frank L. A. Global multispectral auroral imaging of an isolated substorm // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – V. 27. – N5. – Pp. 637–640. – Doi:10.1029/1999GL003678.
47. Despirak L. V., Lubchich A. A., Yahnin A. G., Kozevlov B. V., Biernat H. R. Development of substorm bulges during different solar wind structures // *Ann. Geophys.* – 2009. – 27. – Pp. 1951–1960.
48. Kil H., Paxton L. J., Pi X., Hairston M. R., Zhang Y. Case study of the 15 July 2000 magnetic storm effects on the ionosphere-driver of the positive ionospheric storm in the winter hemisphere // *Journ. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108. – NA11. – Pp. 1391. – SIA 1–22, doi:10.1029/2002JA009782.
49. 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.*, vol. 104, edited by J. L. Horwitz, D. L. Gallagher and W. K. Peterson – 1998. – Pp. 149–160, AGU, Washington, D. C.
50. 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.* – 2003. – V. 108. – A6. – Pp. 1247. – (SMP14-1-SMP14-10), doi: 10.1029/2002JA009685.
51. Meurant M., Gerard J.-C., Hubert B., Coumans V., Blockx C. Dynamics of global scale electron and proton precipitation induced by a solar wind pressure pulse // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30. – N20. Pp. 2032. – Doi:10.1029/2003GL018017.
52. 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.* – 2001. – V. 106. – Pp. 21475–21494.
53. 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.* – 2002. – V. 107. – A8. – Pp. 1183. – (SMP15-1-SMP15-12), doi:10.1029/2001JA009229.
54. Hubert B., Gerard J. C., Fuselier S. A., Mende S. B., Burch J. L. Proton precipitation during transpolar auroral events: Observations with the IMAGE-FUV images // *Journ. Geophys. Res.* – 2004. – V. 109. – A06204, doi:10.1029/2003JA010136.

55. Gerard J.-C., Hubert B., Bisicalo D. V., Shematovich V. I. A model of the Lyman- $\alpha$  line profile in the proton aurora // *Journ. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – Pp. 15795 – 15805.
56. Solomon S. C. Auroral particle transport using Monte Carlo hybrid methods: observation and modeling // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – NA1. – Pp. 107 – 116.
57. Van Zyl B., Neumann H., Lyman- $\alpha$  emission cross sections for low-energy H and H<sup>+</sup> collisions with N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> // *Journ. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – Pp. 1023 – 1027. – Doi:10.1002/(ISSN)2156-2202a.
58. Shadrin D. G., Kuzmin A. K., Merzlyi A. M. Correcting and refining dayglow technology for dayside orbital auroral FUV-images fro data of UVI (POLAR) // *Rep. of student section of COSPAR-2014, Moscow, Moscow State University.* – 2014.
59. Strickland D. J., Bishop J., Evans J. S., Majeed T., Shen P. M., Cox R. J., Link R. and Huffman R. E. Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): theory, software, architecture, inputs, and selected results // *J. Quant. Spec. Rad. Trans.* – 1999. – V. 62. – Pp. 689 – 742.
60. Kozelov B. V., Ivanov V. E. Monte-Carlo calculation of proton-hydrogen atom transport in N<sub>2</sub> // *Planet. Space Sci.* – 1992. – V. 40. – N11. – Pp. 1503 – 1511.
61. Lummerzheim D. and Galand M. Profile of the hydrogen H $\beta$ -emission line in proton aurora // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – P. 23 – 32.
62. Lummerzheim D., Galand M., Kubota M. Optical emissions from proton aurora // *Proc. of Atmospheric studies by optical methods.* – 2003. – Sodankyla Geophysical Observatory Publications. – P. 1 – 5.
63. Galand M., Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V. Response of the upper atmosphere to auroral protons // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – A1. – Pp. 117 – 125. – <https://doi.org/10.1029/2000JA002009>.
64. Дашкевич Ж. В. Фотометрия и моделирование излучений полярных сияний // *Дисс. Канд. физ.-мат. наук, спец. ВАК РФ 25.00.09. Физика атмосферы и гидросферы, ПГИ РАН. – Апатиты.* – 2005. – 145 с.
65. Hardy D. A., Gussenhoven M. S., Brautigam D. A statistical model of auroral ion precipitation // *Journ. Geophys. Res.* – 1989. – V. 94. – A1. – Pp. 370 – 392. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1029/JA094iA01p00370>.
66. Hardy D. A., McNeil W., Gussenhoven M. S., Brautigam D. A statistical model of auroral ion precipitation 2. Functional representation of the average patterns // *Journ. Geophys. Res.* – 1991. – V. 96. – A4. – Pp. 5539 – 5547. – <https://doi.org/10.1029/90JA02451>.
67. 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.* – 1994. – V. 99. – A12. – Pp. 23297 – 23305.
68. 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.* – 2007. – Т. 45. – № 3. – С. 1 – 16. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/200702.pdf>.
69. Rasmussen C. E., Schunk R. W., and Wickwar V. B. A photochemical equilibrium model for ionospheric conductivity // *Journ. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – Pp. 9831 – 9840.
70. Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., and Mende S.B. Global auroral conductance distribution due to electron and proton precipitation from IMAGE-FUV observations // *Annales Geophysicae.* – 2004. – V. 22. – Pp. 1595 – 1611. – Sref-ID:1432-0576/ag/2004-22-1595.
71. Unick C., Donovan E., Spanswick E., and Uritsky V. Selection of FUV auroral imagers for satellite missions // *Journ. Geophys. Res.* – 2016. – V. 121. – Pp. 10019 – 10031.
72. Асюшкин В. А., Грешилов П. А., Ефанов В. В., Мартынов М. Б., Моисеев А. А., Немыкин С. А., Романов В. М., Шевалев И. Л. Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований: монография / под общей редакцией Г. М. Полищука и К. М. Пичхадзе. – М.: Изд. МАИ ПРИНТ, 2010. – 659 с.
73. «Создание перспективного оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высоко- и низкопогейных КА для мониторинга и контроля состояния ионосферы Земли» // ИКИ РАН – ОАО НПП «Геофизика-Космос». – Аванпроект. – ИКИ РАН. – 2013. – 385 с.
74. Кузьмин А. К., Мерзлый А. М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокопогейных и низкоорбитальных космических аппаратов / А. К. Кузьмин, А. М. Мерзлый // *Вопросы электромеханики.* – М.: ОАО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2014. – Т. 143. – № 6. – С. 19 – 28. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201402.pdf>, 2014.
75. Khazanov G. V., Robinson R. M., Zesta E., Sibeck D. G., Chu M., and Grubbs G. A., Impact of precipitating electrons and magnetosphere-Ionosphere coupling process on ionospheric conductance // *Space Weather.* – 2018. – V. 16. – Pp. 829 – 837.

Поступила в редакцию 03.12.2018

*Александр Константинович Кузьмин*, кандидат физико-математических наук, главный специалист, т. (495) 333-20-00, e-mail: [alkkuzmin@mail.ru](mailto:alkkuzmin@mail.ru).  
*Алексей Михайлович Мерзлый*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 333-20-00, e-mail: [pinega@list.ru](mailto:pinega@list.ru). (ИКИ РАН).

# REMOTE OPTICAL DIAGNOSTICS OF THE CONDITION OF THE POLAR IONOSPHERE IN DIFFERENT RANGE OF SPECTRUM BASED ON OBSERVATION DATA OF ORBITAL AURORAL IMAGING. PART 1 (VUV-RANGE)

**A. K. Kuzmin, A. M. Merzliy**

*In the aspect of preparing the methodology of promising Russian orbital experiments directed at obtaining global images of the auroral oval in VUV-emissions, the world experimental and methodical experience of observations of auroral emissions from the «Molniya» type orbits is analyzed using specific examples. What auroral emissions need to be measured, with what spatial and temporal resolution, what methodological problems need to be solved for obtaining and processing images, what accompanying measurements of plasma characteristics and at what altitudes are necessary to increase the efficiency of experiments to diagnose the state of the polar ionosphere characteristics from orbits this is not a complete list of issues considered in this paper.*

**Key words:** remote diagnostics of polar ionosphere condition, auroral emissions, vacuum ultraviolet, auroral oval, auroral imagers.

## References

1. Kuzmin A. K. Remote spectrophotometric diagnostics of auroral ionosphere characteristics from the orbits of advanced Russian satellites / Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences // Ref. 2161. – 2011. – 49 c. – [Electronic resource]. – Available at: [iki.rssi.ru>books/2011kuzmin.pdf](http://iki.rssi.ru/books/2011kuzmin.pdf).
2. Mende S. B. Observing the magnetosphere through global auroral imaging: 1. Observables // Journ. Geophys. Res.: Space Physics. – 2016. – V. 121. – Issue 10. – Pp. 10623–10637. – Doi:10.1002/2016/JA022607.
3. Paschmann G., Haaland S., Treumann R., Auroral plasma physics // Space Sci. Rev. – 2002. – V. 103. – № 1–4. – 485 p. – Doi:10.1023/A:1023030716698.
4. Keiling A., Wygant J. R., Cattell C. A., Mozer F. S. and Russell C. T. The global morphology of wave poynting flux: Powering the aurora // Science. – 299. – Pp. 383–386. – Doi:10.1126/science.1080073.
5. Aksenov O. Iu., Anikin V. A., Borisov Iu. A., Kuzmin A. K., Lapshin V. B., Liakhov A. N., Merzlyi A. M., Potanin Iu. N., Saltanov P. Ia., Svidskii P. M., Trekin V. V. Principles of development of advanced system for monitoring background conditions in polar ionosphere and short-term forecast thereof by means of integrated monitoring of magnetosphere-ionosphere interaction in terms of auroral activity from satellite orbits and Earth surface // Preprint 2015-1. – 2015. – Moscow. – Central Administrative District. – Moscow Institute of Physics and Technology. – 37 p. – 8 fig. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201501.pdf>.
6. Hunsucker R. D., Hargreaves J. K. The high latitude ionosphere and its effects on radio propagation // Cambridge Univ., UK. – 2003. – 617 pages. – ISBN: 9780511535758. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535758>.
7. Basu S., Grovesa K., Basu S., Sultana P. Specification and forecasting of scintillations in communication and navigation links: Current status and future plans // Journ. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2002. – V. 64. – Pp. 1745–1754.
8. Carlson C. W., McFadden J. P., Ergun R. E., Temerin M., Peria W., Mozer F. S., Klumpar D. M., Shelly E. G., Peterson W. K., Moebius E., Elphic R., Strangeway R., Cattell C., Pfaff R. F. FAST observations in the downward auroral current region: Energetic upgoing electron beams, parallel potential drops, and ion heating // Geophys. Res. Lett. – 1998. – 25. – 12. – Pp. 2017–2020. – doi:10.1029/98GL00851.
9. Gogoshev M., Petkov N., Kuzmin N., Gogosheva Ts., Spasov S., Kostadinov I. Airglow atmospheric imager on board the «IK-Bulgaria-1300» satellite // Adv. Space. Res. – 1983. – V. 1.2. – № 7. – Pp. 115–120. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198801.pdf>.
10. Gladyshev V. A., Kuzmin A. K., Mularchik T. M., et al. Auroral photometers aboard the Aureol-3 satellite: the Altair experiment // Annales Geophysicae. – 1982. – V. 38. – Fasc. 5. – Pp. 631–634. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198201.pdf> 1.
11. Frank L. A., Craven J. D., Imaging results from Dynamics Explorer 1 // Rev. Geophys. – 1988. – V. 26. – Pp. 249–283.
12. Kaneda E., Takgi M., Niwa N. Vacuum ultraviolet television camera // Proc. 12<sup>th</sup> Int. Symp. Spece Tech. Sci. – 1977. – Agne. – Tokyo. – Pp. 233–238.
13. Kaneda E., Auroral TV observation by KYOKKO // Proc. International Workshop of selected topics of magnetospheric physics. – 1979. – Tokyo. – Pp. 15–19.
14. Shepherd G. G. Spectral imaging of the atmosphere // Volume 82 in the International Geophysics Series / Eds. by R. Dmowska, J. R. Holton and H. T. Rossby // Academic Press., An Elsevier Science Imprint. – 2002. – 323 p.
15. Frank L. A., Craven J. D., Ackerson K. L., English M. R., Eather R. H., and Carovillano R. L. Global auroral imaging instrumentation for the Dynamics Explorer Mission // Space Sci. Instrum. – 1981. – № 5. – Pp. 369–393.
16. Immel T., Craven J., Nicholas A. An empirical model of the FUC dayglow from DE-1 images // Journ. Atmos. Solar. Ter. Phys. – V. 62. – Pp. 42–64.
17. DeJong A. D. Studies of magnetospheric convection: balanced and unbalanced // Diss. of doctor philosophy (Atmospheric and Space Science). – Univ. Michigan. – 2008. – 146 p.

18. Ajello J. M., Shemansky D. M. A re-examination of important N<sub>2</sub> cross sections by electron impact with application to the dayglow: The Lyman-Birge-Hopfield band system and NI (119,99 nm) // *Journ. Geophys. Res.* – 1985. – V. 90. – Issue A10. – Pp. 9845 – 9861.
19. Strickland D. J., Jasperse J. R., Whalen J. A. Dependence of auroral FUV emissions on the incident electron spectrum and neutral atmosphere // *Journ. Geophys. Res.* – 1983. – V. 88. – N. A10. – Pp. 8051 – 8062.
20. Strickland D. J., Meier R. R., Hecht J. H. and Christensen A. B. Deducing composition and incident electron spectra from ground-based auroral optical measurements: Theory and model results // *Journ. Geophys. Res.* – 1989. – V. 94. – Issue A10. – Pp. 13527 – 13539. – Doi:10.1029/JA094iA10p13527.
21. Strickland D. J., Daniell R. E. Jr., Jasperse J. R. and Basu B. Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora: 2. Model results // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – Issue A12. – Pp. 21533 – 21548. – Doi:10.1029/93JA01645.
22. Basu B., Jasperse J. R., Strickland D. J., Daniell R. E. Jr. Transport-theoretic model for the electron-proton-hydrogen atom aurora: 1. Theory // *Journ. Geophys. Res.* – 1993. – V. 98. – Issue A12. – Pp. 21517 – 21532. – doi:10.1029/93JA01646.
23. Galand M., Lilensten J., Kofman W. and Sidje R. B., Proton transport model in the ionosphere: multistream approach of transport equations // *Journ. Geophys. Res.* – 1997. – V. 102. – Issue A10. – Pp. 22261 – 22272. – <https://doi.org/10.1029/97JA01903>.
24. Ivanov V. E., Kozelov B. V. Propagation of electron and proton-hydrogen beams in the Earth atmosphere // *Apatity.* – Karelian Research Center of RAS. – 2001. – 260 p.
25. Robinson R. M., Vondrak R. R., Miller K., Dabbs T., Hardy D. On calculating ionospheric conductances from the flux and energy of precipitating electrons // *Journ. Geophys. Res.* – 1987. – V. 92. – Issue A3. – Pp. 2565 – 2569. – <https://doi.org/10.1029/JA092iA03p02565>.
26. Germany G. A., Torr M. R., Torr D. G., Richards P. G. Use of FUV auroral emissions as diagnostic indicators // *Journ. Geophys. Res.* – 1994. – V. 99. – A1. – Pp. 383 – 388. – <https://doi.org/10.1029/93JA02357>.
27. Galand M. and Richmond A. D. Ionospheric electrical conductances produced by auroral proton precipitation // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – A1. – Pp. 117 – 125. – <https://doi.org/10.1029/1999JA002001>.
28. Robinson R. M., Vondrak R. R., Craven J. D., Frank L. A., Miller K. A comparison of ionospheric conductances and auroral luminosities observe simultaneously with Chatanika radar the DE-1 auroral imagers // *Journ. Geophys. Res.* – 1989. – V. 94. – Issue A5. – Pp. 5382 – 5396. – <https://doi.org/10.1029/JA094iA05p05382>.
29. Anger C. D., Murphree, J. S., Vallance Jones, A., King R. A., Broadfoot A. L., Cogger L. L., Creutzberg F., Gattinger R. L., Gustafsson G., Harris F. R., Haslett J. W., Llewellyn E. J., McConnell J. C., McEwen D. J., Richardson E. H., Rostoker G., Sandel B. R., Shepherd G. G., Venkatesan D., Wallis D. D. and Witt G. Scientific Results from the Viking Ultraviolet Imager: an Introduction // *Geophys. Res. Lett.* – 1987. – V. 14. – Pp. 383 – 386.
30. Murphree J. S., King R. A., Paine T., Smith K., Reid D., Adema J., Gordon B., Wlochowicz R. The FREJA ultraviolet imager // *Space Sci. Reviews.* – 1994. – V. 70. – Pp. 421 – 446. – <https://doi.org/10.1007/BF00756880>.
31. Paxton L. J., and Meng C-I. Auroral imaging and space-based optical remote sensing // *Johns Hopkins APL Technical Digest.* – 1999. – V. 20. – N. 4. – Pp. 556 – 569.
32. Imhof W. L., Spear K. A., Hamilton J. W., Higgins B. R., Murphy M. J., Pronko J. G., Vondrak R. R., McKenzie D. L., Rice C. J., Corney D. J., Roux D. A., Williams R. L., Stein J. A., Bjordal J., Stadsness J., Njoten K., Rosenberg T. J., Lutz L., Detric D., The POLAR ionospheric X-ray imaging experiment (PIXIE) // *Space Sci. Reviews.* – 1995. – V. 71. – N. 1 – 4. – Pp. 385 – 408. – Doi:10.1007/bf00751336.
33. Torr M. R., Torr D. G., Zukic M., Johnson R. B., Ajello J., Banks P., Cole K., Keffer C., Parks G., Tsurutani B., Spann J., A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission // *Space Sci. Reviews.* – 1995. – V. 71. – N. 1 – 4. – Pp. 329 – 383. – Doi:10.1007/BF00751335.
34. Frank L. A., Sigwarth J. B., Craven J. D., Dolan J. S., Dvorsky M. R., Hardebeck P. K., Harvey D., Muller D. W. The visible imaging system (VIS) for the POLAR spacecraft // *Space Sci. Reviews.* – 1995. – V. 71. – N. 1 – 4. – Pp. 297 – 328.
35. Frank L. A., and Sigwarth J. B. Finding concerning of positions of substorm onsets with auroral images from the Polar spacecraft // *J. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – NA6. – Pp. 12747 – 12761.
36. Mende S. B., Heeterdks 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.* – 2000. – V. 91. – N 1 – 2. – Pp. 243 – 270. – Doi:10.1023/a:100 5271728567.
37. Mende S. B., Heeterdks 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.* – 2000. – V. 91. – N. 1 – 2. – Pp. 271 – 285. – Doi:10.1023/a:1005227915363.
38. Mende S. B., Heeterdks 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- $\alpha$  and OI 135.6 nm // *Space Sci. Reviews.* – 2000. – V. 91. – N. 1 – 2. – Pp. 287 – 318. – Doi:10.1023/a:1005292301251.

39. 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. – Pp. 255 – 283. – Doi:10.1023/B:SPAC.0000007521.39348.a5.
40. Gerard J.-C., Shematovich V. I., Bisikalo D. V., Lummerzheim D. A. Monte Carlo model of aurora hydrogen emission line profiles // *Annales Geophysicae.* – 2005. – V. 23. – Pp. 1473 – 1480. – Doi 10.5194/angeo-23-1473-2005.
41. Gibson S. T., Gies H. P. F., Blake A. J., McCoy D. J., Rojers P. J. Temperature dependence in the Shumann-Runge photoabsorption continuum of oxygen // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* – 1983. – V. 30. – Pp. 385 – 393.
42. Pfaff R., Carlson C., Watzin J., Everett D., Gruner T. An overview of the Fast auroral snapshot (FAST) // *Space Sci. Rev.* – 2001. – V. 98. – Issue. 1 – 2. – Pp. 1 – 32. – Doi:10.1007/978-94-010-0332-2\_1.
43. 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.* – 2003. – V. 108. – SMP 6 – 1. – 1344. – doi:10.1029/2002JA009787, 2003.
44. Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., Shematovich V. I., Bisicalo D. V., Frey H., Mende S., Gladstone G.R., Carlson C. W. Observation of the proton aurora with IMAGE FUV imager and simulations ion flux in situ measurement // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – Pp. 28939 – 28948.
45. 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.* – 2001. – V. 28. – N. 6. – Pp. 1135 – 1138.
46. Cummer S. A., Vondrak R. R., Ostgaard N., Stadsnes J., Bjordal J., Chenette D. L., Brittner M. J., Parks G. K., Sigwarth J. B., Frank L. A. Global multispectral auroral imaging of an isolated substorm // *Geophys. Res. Lett.* – 2000. – V. 27. – N. 5. – Pp. 637 – 640. – Doi:10.1029/1999GL003678.
47. 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.* – 2009. – 27. – Pp. 1951 – 1960.
48. Kil H., Paxton L. J., Pi X., Hairston M. R., Zhang Y. Case study of the 15 July 2000 magnetic storm effects on the ionosphere-driver of the positive ionospheric storm in the winter hemisphere // *Journ. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108. – NA11. – Pp. 1391. – SIA 1 – 22. – doi:10.1029/2002JA009782.
49. Germany G. A., Spann J. F., Parks G. K., Brittner 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., vol. 104, edited by J. L. Horwitz, D. L. Gallagher and W. K. Peterson* – 1998. – Pp. 149 – 160, AGU, Washington, D. C.
50. 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.* – 2003. – V. 108. – A6. – Pp. 1247. – (SMP14-1-SMP14-10). – doi: 10.1029/2002JA009685.
51. Meurant M., Gerard J.-C., Hubert B., Coumans V., Blockx C. Dynamics of global scale electron and proton precipitation induced by a solar wind pressure pulse // *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – V. 30. – N20. – Pp. 2032. – Doi:10.1029/2003GL018017.
52. 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.* – 2001. – V. 106. – Pp. 21475 – 21494.
53. 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.* – 2002. – V. 107. – A8. – Pp. 1183. – (SMP15-1-SMP15-12). – doi:10.1029/2001JA009229.
54. Hubert B., Gerard J. C., Fuselier S. A., Mende S. B., Burch J. L. Proton precipitation during transpolar auroral events: Observations with the IMAGE-FUV images // *Journ. Geophys. Res.* – 2004. – V. 109. – A06204. – doi:10.1029/2003JA010136.
55. Gerard J.-C., Hubert B., Bisicalo D. V., Shematovich V. I. A model of the Lyman- $\alpha$  line profile in the proton aurora // *Journ. Geophys. Res.* – 2000. – V. 105. – Pp. 15795 – 15805.
56. Solomon S. C. Auroral particle transport using Monte Carlo hybrid methods: observation and modeling // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – NA1. – Pp. 107 – 116.
57. Van Zyl B., Neumann H., Lyman- $\alpha$  emission cross sections for low-energy H and H<sup>+</sup> collisions with N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> // *Journ. Geophys. Res.* – 1988. – V. 93. – Pp. 1023 – 1027. – Doi:10.1002/(ISSN)2156-2202a.
58. Shadrin D. G., Kuzmin A. K., Merzlyi A. M. Correcting and refining dayglow technology for dayside orbital auroral FUV-images from data of UVI (POLAR) // *Rep. of student section of COSPAR-2014, Moscow, Moscow State University.* – 2014.
59. Strickland D. J., Bishop J., Evans J. S., Majeed T., Shen P. M., Cox R. J., Link R. and Huffman R. E. Atmospheric Ultraviolet Radiance Integrated Code (AURIC): theory, software, architecture, inputs, and selected results // *J. Quant. Spec. Rad. Trans.* – 1999. – V. 62. – Pp. 689 – 742.
60. Kozelov B. V., Ivanov V. E. Monte-Carlo calculation of proton-hydrogen atom transport in N<sub>2</sub> // *Planet. Space Sci.* – 1992. – V. 40. – N. 11. – Pp. 1503 – 1511.
61. Lummerzheim D. and Galand M. Profile of the hydrogen H $\beta$ -emission line in proton aurora // *Journ. Geophys. Res.* – 2001. – V. 106. – P. 23 – 32.
62. Lummerzheim D., Galand M., Kubota M. Optical emissions from proton aurora // *Proc. of Atmospheric studies by optical methods.* – 2003. – Sodankyla Geophysical Observatory Publications. – P. 1 – 5.

63. Galand M., Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V. Response of the upper atmosphere to auroral protons // Journ. Geophys. Res. – 2001. – V. 106. – A1. – Pp. 117 – 125. – <https://doi.org/10.1029/2000JA002009>.
64. Dashkevich Zh.V. Photometry and modeling of auroral emissions // Thesis for the Degree of Candidate of Physics and Mathematics, Specialty (Code of State Commission for Academic Degrees and Titles) 25.00.09. Atmosphere and hydro-sphere physics, Polar Geophysical Institute of RAS. – Apatity. – 2005. – 145 p.
65. Hardy D. A., Gussenhoven M. S., Brautigam D. A statistical model of auroral ion precipitation // Journ. Geophys. Res. – 1989. – V. 94. – A1. – Pp. 370 – 392. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1029/JA094iA01p00370>.
66. Hardy D. A., McNeil W., Gussenhoven M. S., Brautigam D. A statistical model of auroral ion precipitation 2. Functional representation of the average patterns // Journ. Geophys. Res. – 1991. – V. 96. – A4. – Pp. 5539 – 5547. – <https://doi.org/10.1029/90JA02451>.
67. 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. – 1994. – V. 99. – A12. – Pp. 23297 – 23305.
68. Kuzmin A. K., Chikov K. N. Spectrophotometric diagnostics of energetic characteristics and conductivity of auroral ionosphere from satellites. 1. Methodological particularities, accuracy issues, requirements to characteristics of experimental instruments // Space research. – 2007. – Vol. 45. – No. 3. – Pp. 1 – 16. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/200702.pdf>.
69. Rasmussen C. E., Schunk R. W., and Wickwar V. B. A photochemical equilibrium model for ionospheric conductivity // Journ. Geophys. Res. – 1988. – V. 93. – Pp. 9831 – 9840.
70. Coumans V., Gerard J.-C., Hubert B., Meurant M., and Mende S.B. Global auroral conductance distribution due to electron and proton precipitation from IMAGE-FUV observations // Annales Geophysicae. – 2004. – V. 22. – Pp. 1595 – 1611. – Sref-ID:1432-0576/ag/2004-22-1595.
71. Unick C., Donovan E., Spanswick E., and Uritsky V. Selection of FUV auroral imagers for satellite missions // Journ. Geophys. Res. – 2016. – V. 121. – Pp. 10019 – 10031.
72. Aksiushkin V. A., Greshilov P. A., Efanov V. V., Martynov M. B., Moishev A. A., Nemykin S. A., Romanov V. M., Shevlev I. L. Automated spacecraft for fundamental and applied scientific research: monograph / edited by G. M. Polishchuk and K. M. Pichkhadze. – M.: MAI-PRINT Publishing House, 2010. – 659 p.
73. Development of advanced optical system Aurovisor-VUV as part of high- and low-apogee satellite constellations for Earth ionosphere monitoring // Space Research Institute of RAS – JSC NPP Geofizika-Kosmos. – Preliminary Design. – Space Research Institute of RAS. – 2013. – 385 p.
74. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M. Advanced experiment of monitoring Earth ionosphere condition by means of Aurovisor-VUV optical system as part of high-apogee and LEO satellite constellations / A. K. Kuzmin, A. M. Merzlyi // Matters of Electromechanics. – M.: JSC «VNIIEEM Corporation». – 2014. – Vol. 143. – No. 6. – Pp. 19 – 28. – [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201402.pdf>, 2014.
75. Khazanov G. V., Robinson R. M., Zesta E., Sibeck D. G., Chu M., and Grubbs G. A., Impact of precipitating electrons and magnetosphere-ionosphere coupling process on ionospheric conductance // Space Weather. – 2018. – V. 16. – Pp. 829 – 837.

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

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