

ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «АВРОВИЗОР-ВУФ» В СОСТАВЕ ГРУППИРОВОК ВЫСОКОАПОГЕЙНЫХ И НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.К. Кузьмин, А.М. Мёрзлый
(ФГБУН Институт космических исследований РАН, г. Москва)

Рассматриваются особенности постановки эксперимента по контролю состояния ионосферы Земли в интересах решения научных и прикладных задач с помощью перспективного бортового оптического комплекса (ОК) «Авровизор-ВУФ» в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) в составе изображающих камер и изображающих спектрометров различных модификаций. ОК предназначен для дистанционного глобального и локального мониторинга и контроля состояния полярной ионосферы Земли с высокоапогейных (орбиты типа «Молния») и низкоорбитальных космических аппаратов.

Ключевые слова: дистанционная диагностика полярной ионосферы Земли, глобальный и локальный мониторинг, вакуумный ультрафиолетовый диапазон спектра, авроральный овал.

Система магнитосфера – ионосфера Земли имеет сложную структуру из-за искажения дипольного магнитного поля переменным налетающим солнечным ветром со своим магнитным полем, называемым межпланетным. Поэтому у земной магнитосферы часть магнитных силовых линий остаётся замкнутой, а часть размыкается и вытягивается на большие расстояния, образуя хвост с ночной стороны. Динамика изменений условий в магнитосфере и ионосфере определяется меняющимися характеристиками солнечного ветра и процессами накопления-сброса энергии и ускорения плазмы, приводящими к высыпанию заряженных частиц в верхнюю атмосферу и ионосферу. Ускоренные высыпаящиеся электроны и протоны ионизуют компоненты верхней атмосферы и возбуждают их свечение, которое концентрируется в авроральных овалах (северном и южном) на высотах ~100 – 300 км, (причём морфология и границы «электронного» и «протонного» овалов заметно отличаются). Благодаря магнитному и наведённому электрическому полю формируется поперечная проводимость ионосферы, необходимая для замыкания продольных токов в ионосфере, текущих вдоль силовых линий и отвечающих как за мгновенную магнитную конфигурацию магнитосферы, так и за её перестройку в ходе развития магнитных бурь и суббурь. Кроме заряженных частиц, в этом процессе участвуют волны и развивающиеся плазменные неустойчивости. При взаимодействии ионосферы с магнитосферой возникает положительная обратная связь: больше высыпаний частиц – больше проводимость ионосферы, меньше сопротивление и лучше замыкание тока – быстрее развивается разрыв в хвосте магнитосферы – больше поток энер-

гии высыпаящихся заряженных частиц. Эти электродинамические процессы существенно влияют на мгновенное состояние полярной ионосферы, влияющее на условия работы технологических систем на Земле и в околоземном пространстве, и именно поэтому необходимы их дальнейшие исследования.

Основная научная задача и методика эксперимента

Одна из ключевых проблем космической физики – уточнение механизма действия самонастраивающейся системы ионосферно-магнитосферных связей и её зависимости от динамики нейтральных составляющих в термосфере. Поэтому основная научная задача, решаемая в рамках планируемого эксперимента на основе данных оптического комплекса (ОК) «Авровизор-ВУФ», заключается в дальнейших исследованиях характеристик динамики взаимодействия магнитосферы, полярной ионосферы и верхней атмосферы как в спокойных условиях, так и во время геомагнитных бурь и суббурь.

Дистанционная диагностика характеристик полярной ионосферы с орбит на основе монохроматических изображений эмиссий верхней атмосферы и ионосферы развивается в отечественных и зарубежных проектах уже более 40 лет. Исследования полярной ионосферы с орбит космических аппаратов (КА) с помощью комплексов приборов, включая изображающие, за рубежом и в СССР начались в 80-х гг. прошлого века и продолжают до сегодняшнего дня (проекты: «ИК – Болгария-1300» [1, 2], «Аркад-3» (Ореол-3) [3], DE-1 [4], Viking [5], Freya [6], HILAT [7], Interball-2 [8, 9], Polar

[10 – 12], Image [13 – 15], TIMED [16] и др.) и планируются в будущем [17 – 20]. Проведённые эксперименты позволили отладить методику и получить принципиально новые научные данные, которые имеют и прикладное значение.

Суть методики детально описана в [21, 22] и заключается в следующем. Благодаря потерям энергии высыпавшихся из магнитосферы заряженных частиц на ионизацию и возбуждение составляющих верхней атмосферы и ионосферы в полярных зонах возникает авроральное свечение эмиссий атомов, молекул и их ионов в диапазоне спектра от рентгеновского до инфракрасного. Все эмиссии (запрещённые и разрешённые спектральные линии и полосы) имеют свои индивидуальные свойства (энергетические характеристики и время жизни), которыми можно «пользоваться» как диагностическими индикаторами энергетических характеристик источника возбуждения. В зависимости от параметров орбиты КА выбирается конкретный набор эмиссий верхней атмосферы и ионосферы, позволяющий проводить диагностику наиболее эффективно.

В настоящее время в связи с развитием технологий и увеличением пороговой чувствительности многоэлементных изображающих детекторов, с существенным развитием информационно-бортовых систем в части передачи объёмов информации появилась техническая возможность реализации широкоугольных авроральных имаджеров в видимой и ВУФ-поддиапазонах спектра с километровым пространственным разрешением и временным за доли сек (с низкоорбитальных КА), а в области вакуумного ультрафиолета с разрешением $\sim 10 - 20$ км (за единицы – десятки секунд) с высокоапогейных орбит. Изображающие приборы в рентгеновском диапазоне пока имеют относительно грубое пространственное разрешение [12]. Необходимым сопутствующим информационным звеном дистанционной диагностики состояния ионосферы является одновременная (с оптической) диагностика характеристик плазмы непосредственно в окрестности КА, а именно: измерения потоков заряженных частиц по отношению к направлению магнитного поля (питч-угловые распределения), мелкомасштабных градиентов магнитного и электрического полей и аврорального километрового излучения (АКР). Наиболее информационно эффективным является вариант одновременных наблюдений с высокоапогейных и низкоорбитальных КА (рис. 1).

Серийные наблюдения распределений интенсивности конкретных атмосферных эмиссий с орбит в конечном счёте обеспечивают получение: а) морфо-

логических характеристик, т. е. мгновенную локацию, размеры, структуру и границы авроральных овалов, как возбуждаемых при высыпаниях электронов («электронный» овал), так и возбуждаемых при высыпаниях протонов («протонный» овал),

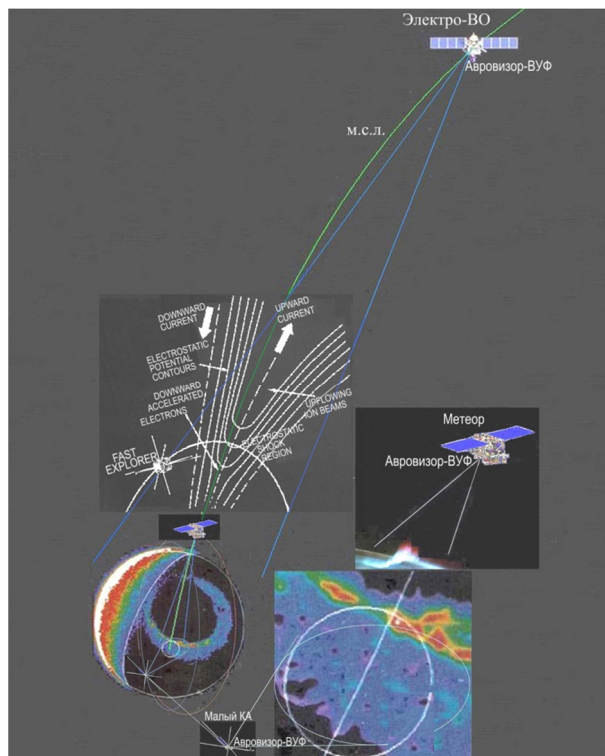


Рис. 1. Геометрия ВУФ-наблюдений с высокоапогейных и низкоорбитальных КА [21]

отображающих мгновенные условия в системе магнитосфера – ионосфера; б) пространственных распределений энергетических характеристик высыпавшихся частиц, а в конечном счёте пространственных распределений общего содержания электронов в ионосфере и поперечных электрических проводимостей, интегрированных по высоте, являющихся уже электродинамическими характеристиками. Данные распределений интенсивности эмиссий позволяют картографировать (в режиме, близком к реальному времени) фоновую-спектральную обстановку в полярной области околоземного пространства, а также фоновую электродинамическую обстановку в ионосфере как крупномасштабно (глобально) с высокоапогейной орбиты, так и мелкомасштабно (локально) с высот $\sim 500 - 800$ км, которая динамично изменяется в зависимости от состояния геомагнитных условий (спокойные или возмущённые) в магнитосфере Земли. Эта информация представляет интерес для Росгидромета, Министерства обороны, Министерства транспорта, Министерства связи, Роскосмоса и других ведомств.

ИКИ РАН совместно с «ОАО НПП «Геофизика-Космос» и ИПГ Росгидромета разработали детальный аванпроект (АП) [17] бортового оптического комплекса приборов ОК «Авроризор-ВУФ» и определили цели эксперимента:

- глобальное и локальное картографирование мгновенного морфологического состояния аврорального овала, возбуждаемого электронами;

- глобальное и локальное картографирование мгновенного морфологического состояния аврорального овала, возбуждаемого протонами;

- картографирование глобальных и локальных мгновенных распределений потока энергии высыпавшихся заряженных частиц;

- картографирование глобальных и локальных мгновенных распределений средней энергии высыпавшихся заряженных частиц;

- картографирование глобальных и локальных мгновенных распределений общего содержания электронов в E-области ионосферы и поперечных магнитному полю проводимостей ионосферы, интегрированных по высоте.

Средствами достижения этих целей являются следующие дистанционные синхронные регулярные измерения с орбиты:

- измерения пространственного распределения интенсивности свечения полярной верхней атмосферы в спектральном диапазоне $\lambda\lambda 133 - 160$ нм (область поглощения нижележащим слоем молекулярного кислорода);

- измерения пространственного распределения интенсивности свечения полярной верхней атмосферы в спектральном диапазоне $\lambda\lambda 155 - 180$ нм (вне области поглощения молекулярного кислорода);

- измерения пространственного распределения интенсивности свечения полярной верхней атмосферы в конкретных линиях ВУФ-спектра: $\lambda 121,8$ нм (Ly- α) H I и $\lambda 135,6$ нм [OI].

Зарубежный опыт и преимущества ОК «Авроризор-ВУФ»

Учитывая зарубежный и отечественный опыт постановки экспериментов и исследований полярной ионосферы в ВУФ-диапазоне спектра в аванпроекте [17], были рассмотрены все аспекты создания целевой бортовой аппаратуры, предназначенной для длительной работы на орбите. Сравнение характеристик зарубежных авроральных экспериментов, проведённых на полярных орбитах с высотой апогея ~ 45000 км, с реально достижимыми характеристиками экспериментов с

помощью проектируемых модулей комплекса «Авроризор-ВУФ» для высокоапогейных КА (типа «Электро-ВО») показывает, что существенным преимуществом последних является сокращение времени экспозиции при получении ВУФ-изображений аврорального овала, что особенно важно на конечной стадии мощных магнитных бурь. Это обусловлено постоянной ориентацией одной из строительных осей КА на Землю и, как следствие, постоянной ориентацией множества элементарных векторов наблюдения ОК на полярную область в отличие от зарубежных высокоапогейных КА. Например, ВУФ-комплексы на КА «Polar» (США) [10] и «IMAGE» (США+Канада+Бельгия, 2000 г.) [13 – 15] работали на спиново-вращающихся КА с периодом ~ 120 с/оборот (IMAGE), что приводило к возможности скользящего сканирования области свечения только в течение $10 \div 15$ с за один спиновый оборот и позволяло получать картину аврорального овала только за несколько спинов (особенно при низких интенсивностях свечения во время спокойных геомагнитных условий).

Другим важным преимуществом модулей комплекса «Авроризор-ВУФ» для высокоапогейных КА является одновременная синхронная регистрация ВУФ-изображений авроры в двух спектральных поддиапазонах, находящихся как в области поглощения молекулярным кислородом, так и вне её (изображающие камеры ВУФ-КИ-1-в и ВУФ-КИ-2-в). Это преимущество позволит за десятки секунд одновременно получать пространственные распределения как средней энергии электронов, так и потока энергии электронов во всём авроральном овале. Для сравнения, в наиболее технически совершенном зарубежном ВУФ-комплексе, реализованном на КА «IMAGE» (NASA), камера WIC [14] регистрировала ВУФ-изображения авроры только в одной широкой спектральной полосе $140 \div 190$ нм, в которую попадали спектральные полосы и линии, находящиеся и в области поглощения, и вне её. Информация о готовящихся зарубежных ВУФ-экспериментах, включая проекты ВУФ-имаджеров Ravens и UVAMC (Канада) [18, 19], а также о ВУФ-имаджере в Китайском перспективном проекте KuaFu [20], свидетельствует о возрастающей актуальности орбитальной ВУФ-диагностики и контроля состояния полярной ионосферы.

Состав и назначение модулей ОК «Авроризор-ВУФ»

Различные модификации модулей, входящих в состав ОК «Авроризор-ВУФ», и их конкретное назначение представлены в табл. 1.

Состав и назначение модулей ОК [17]

Тип модуля	Наименование и обозначение модуля	Назначение модуля
Модуль «Авровизор-ВУФ-В» для высокоапогейных КА	ВУФ-камера изображающая 1 ВУФ-КИ-1-в	Прибор служит для определения пространственного распределения потока энергии в ионосфере, переносимого высыпаяющимися электронами. Измерения проводятся регулярно (каждые 2 мин) для получения с экспозицией от единиц до десятков секунд изображений северного или южного (в зависимости от расположения апогея орбиты) аврорального ВУФ-свечения атмосферы в диапазоне длин волн $\lambda\lambda=155\div 180$ нм с пространственным разрешением до $\sim 10 - 20$ км
	ВУФ-камера изображающая 2 ВУФ-КИ-2-в	Прибор служит для определения пространственного распределения средней энергии высыпаящихся электронов. Измерения проводятся регулярно (каждые 2 мин) для получения с экспозицией от единиц до десятков секунд изображений северного или южного (в зависимости от расположения апогея орбиты) аврорального ВУФ-свечения атмосферы в диапазоне длин волн $\lambda\lambda=133\div 160$ нм с пространственным разрешением до $\sim 10 - 20$ км
	ВУФ-спектрометр изображающий ВУФ-СИ	Прибор служит для определения: – мгновенного положения протонного аврорального овала и его границы (по абсолютной интенсивности доплеровски смещённой линии $\text{H I } L\gamma_{\alpha}$ $\lambda=121,8$ нм, обусловленной высыпаяющимися протонами); – мгновенного положения электронного аврорального овала и его границы (по абсолютной интенсивности линии атома кислорода $\text{O I } \lambda=135,6$ нм, обусловленной высыпаяющимися электронами). Измерения проводятся регулярно (каждые 4 мин) для получения с экспозицией до 2 мин изображений северного или южного (в зависимости от расположения апогея орбиты) аврорального ВУФ-свечения атмосферы в двух длинах волн с пространственным разрешением до ~ 10 км
Модуль «Авровизор-ВУФ-Н» для низкоорбитальных КА	Панорамная ВУФ-камера изображающая 1 ВУФ-КИ-1-н	Прибор служит для определения пространственного распределения потока энергии в ионосфере, переносимого высыпаяющимися электронами. Измерения проводятся регулярно каждые 5 с со временем экспозиции в несколько секунд для получения локальных (с высоким пространственным разрешением) и глобальных (с низким пространственным разрешением) изображений северного и южного аврорального ВУФ-свечения атмосферы в диапазоне длин волн $\lambda\lambda=155\div 180$ нм
	Панорамная ВУФ-камера изображающая 2 ВУФ-КИ-2-н	Прибор служит для определения пространственного распределения средней энергии высыпаящихся электронов. Измерения проводятся регулярно каждые 5 с со временем экспозиции в несколько секунд для получения локальных (с высоким пространственным разрешением) и глобальных (с низким пространственным разрешением) изображений северного и южного аврорального ВУФ-свечения атмосферы в диапазоне длин волн $\lambda\lambda = 135\div 160$ нм
	ВУФ-спектрометр изображающий («подметающий») ВУФ-СИП-н	Прибор с щелевидным полем зрения поперёк направления полёта служит для получения изображения аврорального овала в диапазоне $\lambda\lambda = 120\div 180$ нм со спектральным разрешением $\sim 0,3$ нм для дифференциальной оценки вклада всех попадающих в указанный диапазон эмиссий отдельных полос N_2 $L\text{BH}$. При этом изображение всего аврорального овала получается за время пролёта КА над ним (~ 15 мин)

ВУФ-изображения, получаемые в двух изображающих каналах спектрографа ВУФ-СИ, обеспечат распределения интенсивности свечения аврорального овала, возбуждаемого высыпаяющимися протонами и высыпаяющимися электронами в конкретных спектральных линиях. Это качество впервые было реализовано на КА IMAGE [15]. Включение в состав ОК «Авровизор-ВУФ» для низкоорбитальных КА панорамной ВУФ-камеры (в спектральной области поглощения) с углом поля зрения до 140 и мёртвой зоной не более $\pm 10 - 11^\circ$ от оптической оси расширяет пространственные возможности мелкомасштабной ВУФ-диагностики состояния нижележащей ионосферы, проводящейся одновременно с диагностикой параметров ионосферной плазмы в окрестности КА под областью ускорения заряженных частиц. Учитывая последовательность съёмки панорамных изображений (каждые 3 с) и

считая наблюдаемое свечение статичным за время экспозиции ($\sim 0,6 - 1$ с), предполагается использовать данные интенсивности свечения, полученные на периферийных углах (т. е. усиленные за счёт эффекта Ван-Райна), в коррекции всей наблюдаемой картины при пролёте КА над конкретной полярной областью. Информации о разработке панорамных ВУФ-имаджеров для будущих проектов за рубежом в настоящее время нет.

Включение в состав низкоорбитального ОК «подметающего» и лимбового изображающего спектрометра позволит делать оценку вклада отдельных эмиссий и полос в интегральную спектральную полосу каждой ВУФ-камеры.

В табл. 2 представлены оценки реально достижимых физических, тактико-технических и эксплуатационных характеристик модулей перспективного ОК «Авровизор-ВУФ» и некоторые предварительные характеристики КА.

Таблица 2

Тактико-технические характеристики КА и модулей ОК [17]

Наименование	ОК «Авровизор-ВУФ-В» для высокоапогейного КА			ОК «Авровизор-ВУФ-Н» для низкоорбитального КА		
	Параметры орбиты КА	Апогей – 40 000 км Перигей – 1000 – 2000 км Рабочий участок: от 20000 до 40000 км			Круговая орбита с высотой ~ 900 км Рабочий участок: вся орбита	
Наклонение плоскости орбиты к плоскости экватора	~63°			~82 – 98°		
Параметры ориентации	В надир			В надир		
Контроль параметров ориентации	Знание (контроль) положения строительных осей КА должно соответствовать $3\sigma=3$ км (по отношению к поверхности Земли)			Знание (контроль) положения строительных осей КА: среднеквадратичные погрешности ориентации в орбитальной системе координат не более 0,5 угл. град		
				Стабильность максимальных значений угловой скорости для каждой оси ~0,01 угл.град/с		
Размеры объекта (аврорального овала)	~10000 км			~10000 км		
Диапазон измеряемых интенсивностей излучения объекта	20÷20000 Рэлей			20÷20000 Рэлей 200÷200000 Рэлей (при лимбовых углах наблюдений)		
Пространственное разрешение на поверхности объекта / формат матрицы пикселей	10÷20 км / 1000×1000			2÷5 км (при углах 22÷50°) / 1000×1000 10÷20 км (при углах ~50÷140°) / 1000×1000		
Обозначение модуля	ВУФ-КИ-1-в	ВУФ-КИ-2-в	ВУФ-СИ	ВУФ-КИ-1-н	ВУФ-КИ-2-н	ВУФ-СИП-н
Угол поля зрения 2ω , угл.град	21		18	22÷140	40	1×24
Время экспозиции, с	15÷120		15÷150	0,5÷2		3÷15
Габаритные размеры, м	400×400×150		800×500×300	400×300×300		500×400×350
Масса, кг	15		20	15		25
Потребляемая мощность, Вт	15		15	15		20

Для реализации эксперимента по дистанционной диагностике состояния ионосферы Земли и решения научных и прикладных целевых задач подходят ориентированные на Землю российские КА типа «Молния» и «Метеор» (см. табл. 2). Проведены предварительные расчёты радиационной обстановки на этих орбитах и условий работы на них ОК «Авровизор-ВУФ», которые позволили определить требования к радиационной стойкости ОК «Авровизор-ВУФ» при эксплуатации его не менее 8 лет [23].

В аванпроекте [17] проанализированы также задачи модельной поддержки и программного обеспечения (ПО) включая: взаимодействие высыпающих заряженных частиц с верхней атмосферой и ионосферой (решение прямой и обратной задач); имитационного моделирования наблюдений с учётом геометрии эксперимента и характеристик модулей; ПО (диалоговая программа Вектор-М [25]) для детальных расчётов всей сопутствующей астрономической, географической, геомагнитной (включая трассирование вдоль силовой линии магнитного поля) и геофизической информации для точки положения центра масс КА и для каждого элементарного вектора дистанционных наблюдений на заданных высотах, а также многообразного набора ПО целевой тематической обработки ВУФ-изображений, получаемых с ОК «Авровизор-ВУФ», для корректного решения прикладных и научных задач и доведения информации до потребителя (оператора).

В аванпроекте был рассмотрен ряд вариантов схемных решений модификаций (как для высокоапогейных, так и низкоорбитальных КА) модулей ОК «Авровизор-ВУФ», в том числе:

а) осевые концентрические варианты оптических схем изображающих ВУФ-камер и внеосевые трёх- и четырёхзеркальные асферические системы с относительно узким угловым полем (~20 угл. град) для глобальных наблюдений всей полярной ионосферы с высот более 25000 км. Сравнительный анализ характеристик этих вариантов схем показал, что для ориентированного на Землю КА на высокоапогейной орбите наиболее перспективными представляются внеосевые оптические схемы изображающих камер и, в частности, построенные на основе четырёхзеркального внеосевого объектива (см. рис. 2) с предварительными характеристиками, приведёнными в табл. 3.

Оптическая схема (см. рис. 2) имеет наиболее высокие (из рассмотренных вариантов) показатели по качеству изображения. Так, коэффициент передачи модуляции на частоте 80 лин/мм составляет не менее 0,8 для всего спектрального диапазона, размер пятна рассеяния по уровню 85% для спектрального диапазона 120÷180 нм составляет 12 мкм, дисторсия менее 5%;

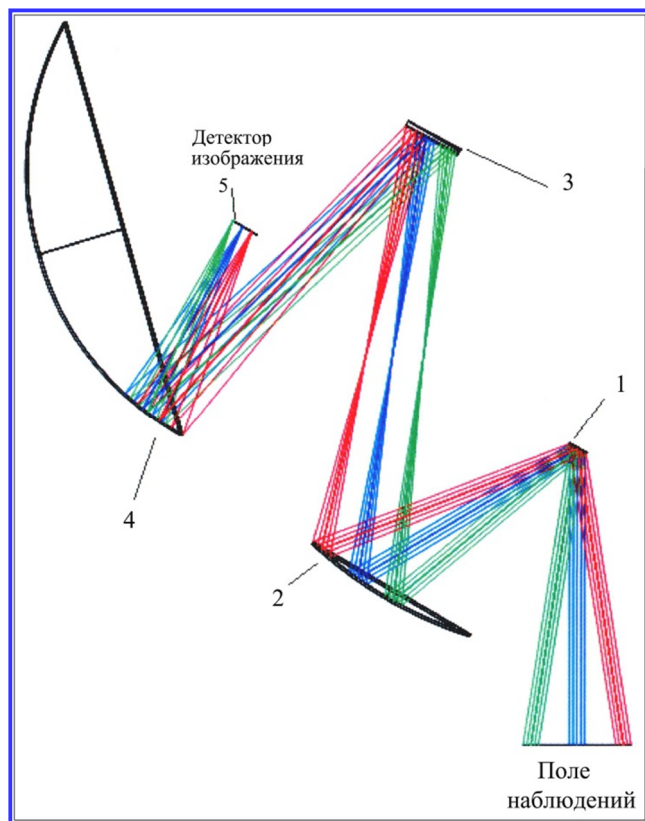


Рис. 2. Оптическая схема четырёхзеркального внеосевого объектива для изображающих камер ВУФ-КИ-1-в и ВУФ-КИ-2-в, предназначенных для установки на высокоапогейный КА: 1, 2, 3 и 4 – асферические внеосевые зеркала; 5 – плоскость анализа (детектор изображения) [17]

Таблица 3

Предварительные характеристики четырёхзеркального внеосевого объектива изображающей камеры ВУФ-КИ [17]

Относительное отверстие	1:5,2
Фокусное расстояние, мм	45
Угловое поле, угл.град	18×18
Размер пятна рассеяния по уровню 85% (для спектрального диапазона 120÷180 нм), мкм	Не более 12
Дисторсия	Менее 5%
Способ спектральной фильтрации	Селективно отражающие зеркала
Общие габариты объектива, мм	~330×350×80

б) осевая панорамная полосовая изображающая ВУФ-камера в поддиапазоне ВУФ, находящемся в области поглощения нижележащим слоем молекулярного кислорода $\lambda 135 - 160$ нм, с угловым полем до ~ 140 угл. град и мёртвой зоной $\pm 11^\circ$ от оптической оси для локальных и тангенциальных наблюдений с высот менее 1000 км (см. рис. 3).

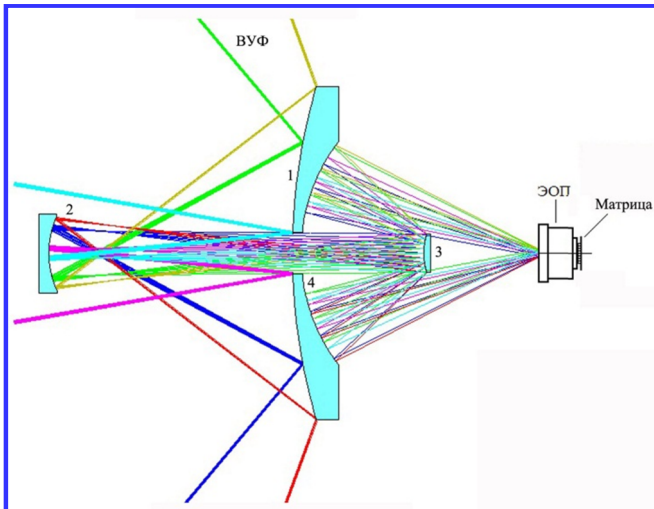


Рис. 3. Трёхзеркальная оптическая схема и ход лучей в панорамной изображающей ВУФ-камере ВУФ-КИ-1н для низкоорбитальных КА: 1, 2, 3, 4 – отражающие поверхности по ходу лучей. В предварительном варианте схема рассчитана для ВУФ-диапазона Ю.С. Ивановым – автором ряда вариантов схем all-sky камер [24]

Основным недостатком этой трёхзеркальной оптической схемы изображающей ВУФ-камеры для низкоорбитальных КА с угловым полем 140° является малая величина относительного отверстия $\sim 1:10$ и центральное экранирование в пределах угла поля зрения $\pm 11^\circ$. Но учитывая, что в полярных широтах магнитная силовая линия, вдоль которой высыпаяются заряженные частицы, возбуждающие свечение, наклонена к направлению в надир на $\sim 12 - 14^\circ$, такое экранирование не мешает решению поставленных задач. Схема осевой полосовой камеры ВУФ-КИ-2-н (в спектральном поддиапазоне вне области поглощения), имеющей угол поля зрения $\sim \pm 20^\circ$, не показана в данной работе, так как она значительно проще. Предварительные расчёты показали реализуемость панорамных зеркальных систем для условий эксплуатации на орбите;

в) изображающий двухканальный ВУФ-спектрограф ВУФ-СИ высокого разрешения (до $\sim 0,01$ нм) для глобальных одновременных наблюдений свечения «протонного» и «электронного» аврорального овалов в конкретных длинах волн и определения их мгновенных характеристик. Прототипом этого модуля является

изображающий спектрограф СИ на КА IMAGE [15], но некоторые характеристики ВУФ-СИ [17] превосходят характеристики СИ.

Первый изображающий канал спектрографа настроен на водородную спектральную линию Ly- α $\lambda 121,8$ нм, которая (при наблюдениях сверху) доплеровски сдвинута на 0,2 нм вправо от геокорональной линии Ly- α $\lambda 121,6$ нм. Это принципиально важное качество селекции близлежащей линии позволит проводить измерения интенсивности свечения на освещённой стороне аврорального овала, возбуждаемого высыпавшимися протонами. Второй изображающий канал, настроен на линию атомарного кислорода $\lambda 135,6$ нм, которая возбуждается преимущественно высыпавшимися электронами.

На рис. 4 показаны схемы каналов 121,8 и 135,6 нм и их проекционных систем изображающего спектрографа ВУФ-СИ. Рассмотрим коротко, как они работают [17]. Промежуточное изображение полихроматическое (недиспергированное) аврорального свечения, прошедшего (с различных направлений в рамках угла поля зрения) через входную щель (не показана) формируется коллимирующим зеркалом вблизи поверхности вогнутой сферической дифракционной решётки. Дифракционная решётка разлагает отражённое ею излучение в спектр, при этом нулевой порядок дифракции улавливается ловушкой, а первые внутренние порядки проходят дальше. Выходные щели выделяют требуемый участок спектра в заданном интервале длин волн. Благодаря тому, что через выходные щели проходит излучение, отражённое от различных участков решётки, это излучение (теперь уже спектрально узкое) несёт в себе информацию о пространственном распределении аврорального свечения в конкретной длине волны. Проекционные системы каналов служат для переноса изображения дифракционной решётки через соответствующие выходные решётки выходных щелей на поверхность детекторов (матриц) с помощью поворотных 1 и фокусирующих зеркал 2;

г) с целью получения информации и оценки вклада отдельных эмиссий в спектральные полосы изображающих камер, а также получения распределения интенсивности свечения ВУФ-спектра по высоте для низкоорбитального КА были рассмотрены варианты «подметающего» и лимбового ВУФ-спектрометров высокого разрешения. На рис. 6 представлена геометрия наблюдений аврорального свечения «подметающего» и лимбового ВУФ-спектрометра (модуль ВУФ-СИП-н). Один из вариантов схемы подобного спектрометра для дистанционных наблюдений характеристик ионосферы был использован в американском проекте TIMED [16].

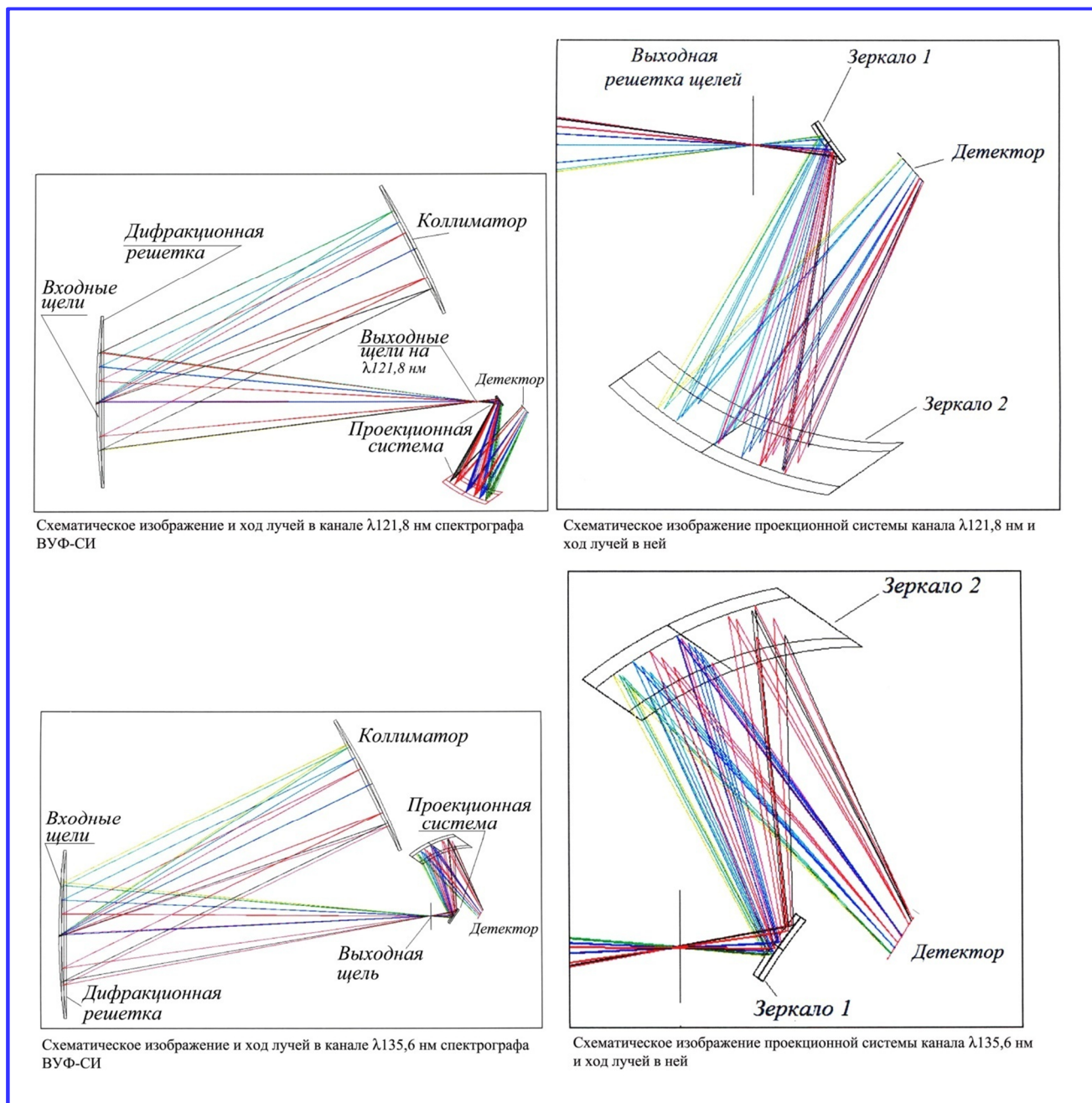


Рис. 4. Схемы каналов 121, 8 и 135, 6 нм и их проекционных систем изображающего спектрографа ВУФ-СИ [17]

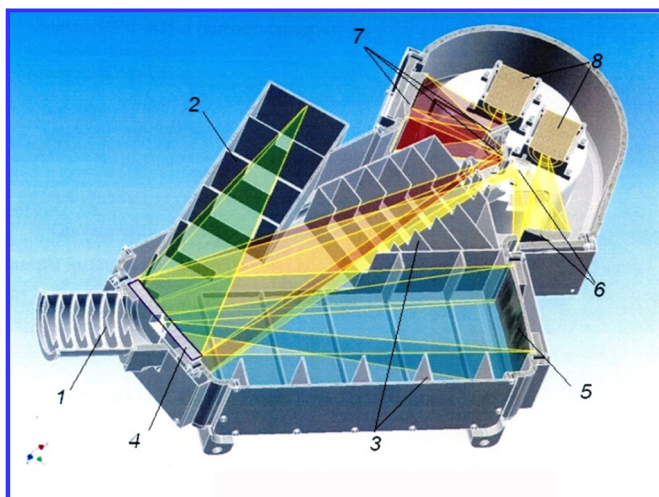


Рис. 5. Вид в разрезе и ход лучей в спектрографе ВУФ-СИ: 1 – входная бленда; 2 – светуловитель нулевого порядка; 3 – диафрагмы защиты от боковых засветок; 4 – дифракционная решётка; 5 – коллимирующее зеркало; 6 и 7 – проекционные системы каналов; 8 – приёмники излучения (матрицы) [17]

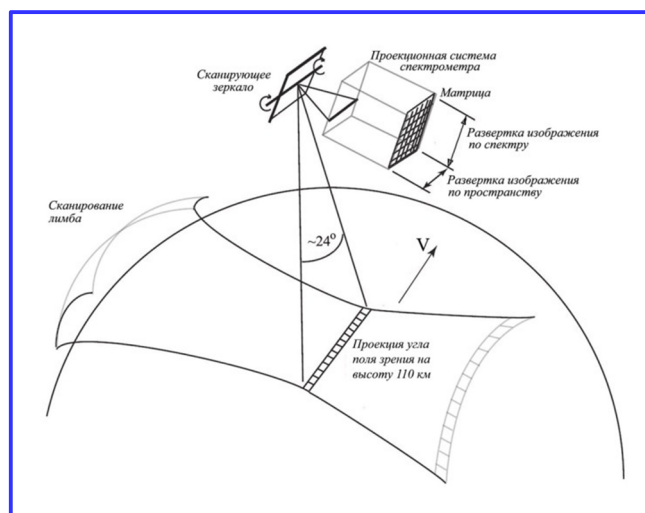


Рис. 6. Геометрия наблюдений «подметающего» и лимбового ВУФ-спектрометров ВУФ-СИП-н с низкоорбитального КА [17]

Проведённые детальные расчёты показали реальность разработки и изготовления схемы спектрографа для дальнейшего воплощения в бортовом варианте модуля ОК и его установки на борт перспективных российских КА. Вид изображающего ВУФ-спектрографа в разрезе и ход лучей в его схеме показан на рис. 5. Каждый из рассмотренных модулей ОК «Авроризор-ВУФ» нацелен на решение конкретной целевой задачи в комплексе, взаимно дополняя друг друга. При этом у каждого из них есть свои методические преимущества и недостатки.

Выводы

Предлагается проработанный вариант поставки орбитального эксперимента по дистанционной диагностике характеристик ионосферы с помощью спектральных изображающих приборов в ВУФ-диапазоне спектра. Рассмотрено шесть типов приборов (модулей), включая спектрально-полосовые изображающие камеры и изображающие спектрометры для глобальной крупномасштабной диагностики с высокоапогейного КА и мелкомасштабной локальной диагностики с низкоорбитального КА. Представляются их предварительные оптические схемы и характеристики. Определяются основные прикладные и научные задачи, решаемые на основе данных оптического комплекса, в интересах науки и различных министерств и ведомств.

Литература

1. Саргойчев Ст. И., Гогошев М. М., Мендев И. Д., и др. Спутниковый спектрофотометр «Фотон-1» для исследования ультрафиолетового излучения земной атмосферы в области 1150÷2590 Å с борта спутника «ИК – Болгария-1300» // Научное космическое приборостроение. Вып. 2. – Оптико-электронные приборы. – М.: Металлургия, 1983. – С. 72 – 73.
2. Gogoshev M. M., Petkov N., Kuzmin A. K., et al. Airglow atmospheric imager aboard IC – Bulgaria-1300 satellite // Advances in Space Research. – 1983. – Vol. 2. – N 1. – P. 115 – 120.
3. Gladyshev V. A., Kuzmin A. K., Mularchik T. M. et al. Auroral photometers aboard the Aureol-3 satellite: the Altair experiment // Annales Geophysicae. – Т. 38. – Fasc 5 (1982). – P. 631 – 634.
4. Frank L. A., Craven J. D., Ackerson K. L. et al. Global auroral imaging instrumentation for the Dynamic Explorer mission // Space Sci. Rev. – 5 (1981). – P. 363 – 393.
5. Anger C. D., Babey S. K., Lyle Broadfoot A. et al. An ultraviolet auroral imager for the Viking spacecraft // Geophysical research letters. – Vol. 14. – N 4 (1987). – P. 387 – 390.
6. Murphree J. S., King R. A., Payne T. et al. The Freya ultraviolet imager // Space Sci. Rev. – 70 (1994). – P. 421 – 446.
7. Huffman R. E., Meng C.-I. Ultraviolet imaging of sunlit auroras from HILAT // Johns Hopkins APL Technical Digest. – V. 5. – № 2 (1984). – P. 138 – 142.
8. Кузьмин А. К., Гальперин Ю. И., Шуйская Ф. К. и др. УФ-спектрометр УФСИПС на спутнике Авроральный зонд: Пример одновременных измерений интенсивности авроральных $\lambda 1304$ и $\lambda 1356$ [OI] и потоков частиц // Космические исследования. – 1998. – Т. 36. – № 6. – С. 636 – 647.
9. Cogger L. L., Hearn D. J., Murphree J. S. et al. Ultraviolet auroral imager (UVAI) // Interball mission and Payload, CNES-IKI-RSA (1995). – P. 382 – 400.

10. Torr M. R., Torr D. G., Zukic M. et al. A far ultraviolet imager for the international solar-terrestrial physics mission // Global geospace mission / ed. by Russel C.T., Kluwer Academic Publisher, 1998. – P. 329 – 383.
11. Frank L. A., Sigwarth J. B., Craven J. D. et al. The visible imaging instrument (VIS) for the Polar spacecraft // Space Sci. Rev. – 1995. – V. 71. – № 1/4. – P. 297 – 328.
12. Imhoff W. L., Spear W. L., Hamilton J. W. et al. The Polar ionospheric X-ray imaging experiment (PIXIE) // Space Sci. Rev. – 1995. – V. 71. – № 1/4. – P. 385 – 408.
13. Mende S. B., Heeterdicks H., Frey H. U. et al. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft: 1. System design // Space Sci. Rev. – V. 91. – Issue 1–2 (2000). – P. 243 – 270.
14. Mende S. B., Heeterdicks H., Frey H. U. et al. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft: 2. Wideband FUV imaging // Space Sci. Rev. – V. 91. – Issue 1–2 (2000). – P. 271 – 285.
15. Mende S. B., Heeterdicks H., Frey H. U. et al. Far ultraviolet imaging from the IMAGE spacecraft: 3. Spectral imaging of $Ly-\alpha$ and OI 135,6 nm // Space Sci. Rev. – V. 91. – Issue 1–2 (2000). – P. 287 – 318.
16. Humm D. C., Paxton L. J., Christensen A. B. et al. Design of performance of the global ultraviolet imager (GUVI) // Proc. SPIE X-ray and Gamma-ray Instrumentation for Astron. – IX. – 3345(1998). – P. 2 – 12.
17. «Создание перспективного оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высоко- и низкоапогейных КА для мониторинга и контроля состояния ионосферы Земли» // ИКИ РАН – ОАО НПП «Геофизика-Космос», Аванпроект, ИКИ РАН (2013). – 385 с.
18. Milan S., Bannister N., Donovan E. et al., A proposal to the ESA M-class mission opportunity call 2010 ESA Cosmic Visions 2015 – 2025 // Ravens. Auroral and magnetospheric imaging mission. – 2006. – P. 37.
19. Donovan E. UVAMC Pre-Phase A Study Final Report / University of Calgary, Canada. – 2012, 006ST.9F007-080324, Feb 1. – 62 p.
20. «KuaFu» mission – Space Weather Explorer, Assessment Study Report, Part A: Science Objective and Payload, Space Weather Group of the National Natural Science Foundation of China, July 6 (2005). – 134 p.
21. Кузьмин А. К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит перспективных российских космических аппаратов // Препринт ИКИ РАН. – Пр-2161 (2011). – 49 с. – Доступен на сайте ИКИ РАН.
22. 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.
23. Безродных И. П., Морозова Е. И., Петрукович А. А. и др. Оценка оптимальных параметров экранов для защиты электронных систем космических аппаратов от ионизирующих излучений // Вопросы электромеханики. – 2012. – Т. 131. – № 6. – С. 15 – 18.
24. Sigernes F., Ivanov Y., Chernous S. et al. Hyperspectral all-sky imaging of auroras // Optics Express. – 2012. – V. 20. – № 25. – P. 27650 – 27660.
25. Баныщикова М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К. Предварительные результаты расчёта сопутствующей геофизической и астрономической информации для эксперимента с прибором Авровизор-ВИС/МП на перспективном КА Метеор-МП // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – №10/2. – С. 174 – 180.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ОАО «НПП «Геофизика-Космос» Бойко В.А., Видецих Ю.А., Цой С.В., Шатовой Е.А. за активную поддержку работ по планированию проекта, совместную плодотворную работу при подготовке аванпроекта ОК «Авровизор-ВУФ», и особенно в части расчётов оптических схем, а также сотруднику ИКИ РАН Безродных И.П. за помощь в оценках радиационной стойкости конкретных модулей ОК.

Поступила в редакцию 24.11.2014

Кузьмин Александр Константинович, главный специалист ИКИ РАН, канд. физ.-мат. наук,
т. (495)333-20-00, (903) 156-35-89,
alkkuzmin@mail.ru.

Мёрзлый Алексей Михайлович, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник ИКИ РАН,
т. (495) 333-20-00, pinega@list.ru.