

## АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.535.4

А.К. Кузьмин, К.Н. Чиков

### ПАНОРАМНЫЕ ИЗОБРАЖАЮЩИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ КАМЕРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ И ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ С ИСЗ

Рассматриваются методические возможности измерений со спутников характеристик свечения полярных сияний и электродинамических характеристик полярной ионосферы, которые предоставляет система широкоугольных изображающих монохроматических камер при использовании нескольких новых вариантов объектива <монохроматический глаз>. Анализируются характеристики этих объективов, их сравнительные преимущества и недостатки прежде всего с точки зрения их использования для решения научной задачи. Рассматривается концепция построения панорамной системы с одним из вариантов выбора длин волн эмиссий верхней атмосферы для одновременных фотометрических измерений распределений интенсивности аврорального свечения в широкой пространственной полосе с низкоапогейного спутника и суть преимуществ, которые обеспечивают изображающие камеры для дистанционной диагностики мгновенных состояний и исследований процессов в полярной ионосфере.

#### 1. Методические аспекты дистанционной диагностики параметров ионосферы по монохроматическим изображениям свечения верхней атмосферы

Картографирование распределений интенсивности излучения верхней атмосферы с помощью изображающих фотометрических приборов как с Земли, так и с орбиты околоземных космических аппаратов становится все более важным инструментом для получения информации о характеристиках и параметрах полярной ионосферы и дистанционной диагностики ее мгновенного состояния. Эта методика основана на том, что анализ распределений интенсивностей эмиссий верхней атмосферы в изображениях всего аврорального овала и его отдельных областей, получаемых в узких спектральных полосах, позволяет идентифицировать и локализовать места активных ионосферных ионизационно-рекомбинационных процессов, связанных с интенсивными высыпаниями из магнитосферы энергичных электронов и ионов, а также с направленными вверх продольными токами. Более того, эти распределения позволяют рассчитать характеристическую и среднюю энергии, поток энергии заряженных частиц, интегрированные по высоте проводимости ионосферы и др., используя то свойство, что интенсивности конкретных эмиссий могут служить мерой относительного количества энергии частиц, достигающих различных высот в атмосфере [1–3].

Физический смысл зависимостей вышеупомянутых параметров от отношений интенсивностей эмиссий, излучаемых на разных высотах, заключается в том, что вторгающиеся энергичные электроны и ионы, а также вторичные электроны проникают и останавливаются на разных высотах, где возбуждают атомы и молекулы верхней атмосферы пропорционально их относительному количеству на соответствующей высоте.

На примерах данных, полученных со спутника DE-1, в [4] были подробно обсуждены механизмы, которые лежат в основе соотношений между распределениями интенсивности в монохроматических изображениях и скоростью потери энергии, характеристической энергией высыпающихся авроральных частиц, потоком энергии высыпающихся электронов, ионосферными проводимостями. Интегрированные по высоте проводимости Холла и Педерсена ( $\Sigma_n$  и  $\Sigma_p$  соответственно) выводятся из совместных решений уравнения энергии и уравнения непрерывности с помощью зависимых от времени моделей ионосферы и термосферы. Проводимости определяются в этих модельных расчетах как функции потока энергии  $F_e$  и характеристической энергии  $E_0$  высыпающихся электронов.

Эта методика интенсивно развивалась начиная с семидесятых годов. В России развитие произошло в значительной степени благодаря успешному проведению спектрофотометрических экспериментов и измерений характеристик полярных сияний со спутников Ореол-3 и ИК-Болгария-1300 [5, 6], на которых были установлены многоканальные сканирующие фотометры второго поколения, имеющие угол поля зрения величиной в несколько градусов. Следующее поколение авроральных фотометров развивается на основе координатно-чувствительных матричных ПЗС-детекторов, что позволяет значительно расширить угол поля зрения мгновенных наблюдений.

В широкоугольных монохроматических изображающих приборах, использованных в последнем десятилетии на зарубежных спутниках [7–13], а также в известных готовящихся проектах [14, 15], для выделения излучения конкретных атмосферных эмиссий применяются плоские интерференционные светофильтры с полушириной полосы пропускания от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров. Спектральное положение максимума полосы пропускания плоского светофильтра зависит, как известно, от угла падения. При косом падении лучей максимум полосы сдвигается в сторону коротких длин волн, причем абсолютная величина сдвига пропорциональна квадрату угла падения лучей к нормали; при этом происходит уширение полосы, а пропускание в ее максимуме уменьшается.

Следовательно, абсолютная чувствительность широкоугольного изображающего фотометра для конкретной эмиссии зависит от направления наблюдения. Эта причина усугубляется температурной зависимостью положения максимума полосы пропускания светофильтра  $\approx 0,01\text{--}0,03 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ , что приводит к дополнительным погрешностям в вычислениях отношений интенсивностей эмиссий, измеренных в различных направлениях, а следовательно, и к дополнительным ошибкам в расчетах полей распределений ряда электродинамических параметров ионосферы, функционально связанных с этими отношениями. Наиболее существенно этот недостаток оптической схемы сказывается на погрешностях фотометрических измерений в изображающих камерах, работающих в узкой полосе видимой области спектра, что, с одной стороны, налагает ограничение на возможность расширения угла поля зрения камеры, а с другой – не позволяет использовать для панорамных наблюдений светофильтры с полушириной полосы пропускания в несколько долей нанометра даже в условиях хорошей термостабилизации.

В оптической схеме широкоугольной квазимонохроматической камеры, построенной с использованием объектива <монохроматический глаз> (<ME>), эта проблема решена принципиально, что приводит к появлению новых методических возможностей для исследований и обеспечения более точных измерений авроральных характеристик и параметров ионосферы (см. далее).

## **2. Преимущества характеристик объектива <монохроматический глаз> для широкоугольной изображающей камеры**

Для изображающей камеры созданы новые варианты схем объектива, каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки, описанные ниже. Характеристики первых модификаций (для видимого спектрального диапазона – <ME-SV1> и для диапазона вакуумного ультрафиолета – <ME-SU1>), разработанных на базе концентрических оптических систем [16] и положенных в основу оптической схемы объектива <ME>, были подробно рассмотрены и проанализированы в [17]. В данной статье представлены две следующие модификации объектива <ME>: <ME-SV2> и <ME-SU2>, а также рассмотрены характеристики третьей модификации объектива <ME-PV> для видимой области спектра.

Объектив <ME-SV2> представляет собой четырехкомпонентную (для измерений интенсивности видимого излучения), а <ME-SU2> – пятикомпонентную (для УФ-излучения) зеркально-линзовую оптическую систему с кольцевым входным зрачком. В первом случае базисом служит дуорепфлектор-кардиоидконденсор, а во втором – триумрефлектор. В схему каждого из них входит менисковый компенсатор – дублет, состоящий из двух менисков 1 и 3 (рис. 1 и 2). Третий компонент в <ME-SU2> (сферическое зеркало 7 на рис. 2) в совокупности с плоским зеркалом 8 введены в УФ-объектив для обеспечения лучшего подавления рассеянного солнечного света [18, 19] при проведении измерений в ультрафиолетовой области спектра на освещенной стороне аврорального овала (см. выше). Это зеркало выполняет функцию дополнительного объектива, который проецирует фокальную поверхность основного объектива (дуорепфлектора-кардиоидконденсора 4, 5) на чувствительную площадку приемника излуче-

ния 9. Подчеркнем, что усиление эффекта подавления рассеянного света происходит за счет применения добавочного плоского зеркала 8 (см. рис. 2), делящего рабочий объем объектива на две оптические камеры. При этом в оконечную камеру (к приемнику излучения) попадает лишь тот свет, который прошел через отверстие в плоском зеркале, т.е. через промежуточную полевую диафрагму объектива.

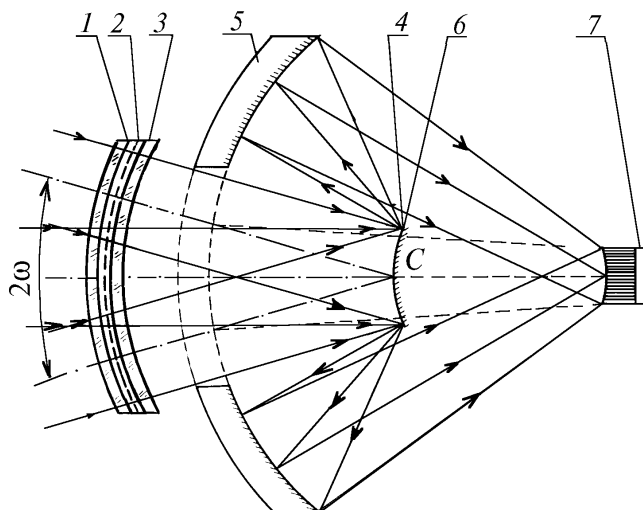


Рис. 1. Оптическая схема объектива <ME-SV2> для видимого спектрального диапазона: 1 – входной концентрический корригирующий мениск (менисковый компенсатор); 2 – сферический интерференционный светофильтр; 3 – выходной концентрический корригирующий мениск (менисковый компенсатор); 4 – выпуклое зеркало; 5 – главное вогнутое зеркало; 6 – входной зрачок, совпадающий с апертурной диафрагмой и помещаемый в общем центре кривизны всех оптических поверхностей C; 7 – волоконно-оптический элемент (фибер-шайба) или микроканальная пластина (МКП) со сферической входной поверхностью радиуса  $R = f_3^*$  перед приемником излучения (ПЗС-матрицей)

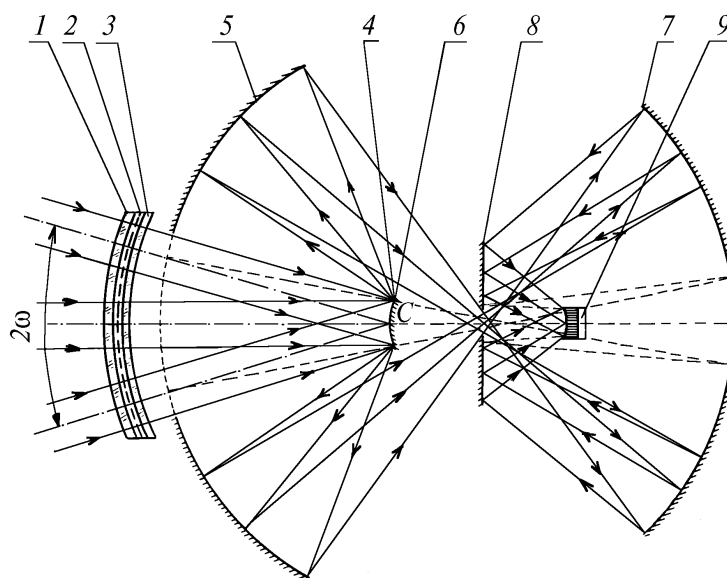


Рис. 2. Оптическая схема объектива <ME-SU2> для области вакуумного ультрафиолета: 1–6 – см. подрисуночную подпись к рис. 1; 7 – дополнительное вогнутое зеркало; 8 – плоское зеркало; 9 – волоконно-оптический элемент (фибер-шайба) или микроканальная пластина (МКП) со сферической входной поверхностью радиуса  $R = f_3^*$  перед приемником излучения (ПЗС-матрицей)

Кольцевая форма зрачка объективов обусловлена его центральным экранированием, причем функцию экрана в этих объективах выполняет выпуклое сферическое зеркало 4 на рис. 1 и 2. С целью минимизации экранирования центральной части входного зрачка выпуклым зеркалом в

отличие от модификаций объективов <ME-SV1> и <ME-SU1> апертурная диафрагма (входной зрачок) как в объективе <ME-SV2>, так и в <ME-SU2> совмещена с вышеупомянутым выпуклым сферическим зеркалом 4. При этом передний менисковый дублет остается концентрическим с общим центром кривизны, расположенным в вершине выпуклого зеркала. При таком местоположении менискового дублета в оптической схеме, тем не менее, обеспечивается сохранение прежнего хода лучей через остальные оптические элементы объективов <ME-SV2> и <ME-SU2> и сохраняется исходный уровень aberrаций (см. [17]).

Важной специфической особенностью объективов <ME-SV2> и <ME-SU2> является совмещение сферического интерференционного свето-фильтра 2, предназначенного для селектирования выбранной эмиссии, с внутренней вогнутой поверхностью входного концентрического корригирующего мениска 1 или внутренней выпуклой поверхностью концентрического корригирующего мениска 2, которые исправляют сферическую aberrацию. Общий центр кривизны  $C$  нанесенных интерференционных слоев и обеих концентрических поверхностей с радиусами  $r_2$  и  $r_3$  совпадает с центром входного зрачка объектива, вследствие чего сферический интерференционный светофильтр, концентрический центру входного зрачка б, сохраняет свои характеристики (ширину полосы пропускания и спектральное положение максимума полосы пропускания) как для осевого пучка, так и для всех внеосевых (наклонных) пучков лучей в поле зрения. Концентрический мениск 1 при этом выполняет дополнительную функцию входного окна объектива, защищающего интерференционный светофильтр от вредных атмосферных и механических воздействий (во время испытаний на Земле), а также от воздействия прямой радиации в полете.

Представленное построение оптических схем объективов позволяет обеспечить стабильную спектральную позицию максимума полосы пропускания светофильтра как в центре, так и на границе поля зрения, которое в рассматриваемом конкретном случае составляет пространственный угол  $2\omega \approx 33^\circ 24'$  для видимого диапазона и для УФ-диапазона (см. рис. 1, 2). Результаты предварительных расчетов характеристик светофильтра б для длин волн видимого спектрального диапазона показывают, что полуширина полосы пропускания возрастает на величину  $\Delta(\delta\lambda) \approx 0,1-0,2$  нм на краю поля зрения, если в центре (на оси) оно равно  $\delta\lambda \approx 1,5$  нм. Величина этого отклонения, несомненно, может быть уменьшена за счет оптимизации количества наносимых слоев интерференционного покрытия и их характеристик. Уместно упомянуть, что в настоящее время за рубежом появились технологические возможности получения довольно узких ( $\delta\lambda \approx 5-7$  нм) полос пропускания плоских светофильтров в области вакуумного ультрафиолета, построенных на принципе комбинирования нескольких отражающих пропускающих многослойных пакетов [20].

В объективах <ME-SV2> и <ME-SU2> устранены практически все aberrации за исключением кривизны поля. Для устранения этой aberrации можно использовать переходную фибршайбу из оптического волокна. Входная поверхность этой шайбы – сферическая. Ее кривизна равна кривизне фокальной поверхности объектива (рис. 1, 2). Максимальный диаметр aberrационного кружка рассеяния не превышает 10 мкм по всему полю зрения объектива, т.е. этот кружок по площади занимает примерно одну четвертую часть одного элемента выбранной ПЗС-матрицы.

Результаты расчета конструктивных параметров (радиусы поверхностей, осевые расстояния и таблицы aberrаций для модификаций объектива <ME-SV1> и <ME-SU1>) представлены в оптических выпусках в приложениях 1 и 2 (соответственно) в [17]. Эти характеристики представлены для шести (три в видимой области спектра и три в области вакуумного ультрафиолета) конкретных длин волн, на которые центрированы полосы пропускания светофильтров объектива для системы изображающих камер, создаваемой для экспериментов на низкоапогейном спутнике с высотой орбиты  $800 \div 1000$  км. Из сравнения результатов расчета aberrаций (приложения 1 и 2 в [17]) объектива для видимого и УФ-диапазонов можно видеть, что, например, максимальная величина сферической поперечной aberrации для двухзеркальной схемы получилась для длины волны  $\lambda = 630,0$  нм и составляет величину диаметра aberrационного кружка  $0,00387 \cdot 2 = 0,00774$  мм, а для трехзеркальной – для длины волны  $\lambda = 184,0$  нм и составляет  $0,00452 \cdot 2 = 0,00904$  мм, т.е. aberrационные характеристики объектива для УФ-излучения <ME-SU1> очень мало отличаются от характеристик объектива <ME-SV1> для видимой области спектра, так как обе схемы основаны на принципе концентричности зеркальных оптических поверхностей системы. Это говорит о том, что оптическая схема этой моди-

фикации объектива <ME> практически ахроматична. Расчеты показывают, что свойство ахроматичности объективов <ME-SV2> и <ME-SU2> (см. рис. 1 и 2) сохраняется, а абберационные характеристики этих модификаций объективов, отличающихся от модификаций <ME-SV1> и <ME-SU1> наличием в их оптической схеме дополнительного входного корригирующего мениска 1 и минимизированным экранированием центральной части входного зрачка, как уже было упомянуто выше, практически не отличаются от характеристик объективов первой модификации, и поэтому мы не считаем целесообразным приводить их в данной статье, а ограничимся только их описанием.

Объектив <ME-PV> для видимой области спектра (рис. 3) состоит из концентрического мениска 1 с радиусами оптических поверхностей  $r_1$  и  $r_2$ , выпукло-вогнутого мениска 2 с радиусами поверхностей  $r_3$  и  $r_4$ , выпуклого сферического зеркала 3 радиуса  $r_5$ , вогнутого сферического зеркала 4 радиуса  $r_6$ , корригирующего мениска 5 с радиусами поверхностей  $r_7$  и  $r_8$ , линзы Смита 6 с радиусами  $r_9$  и  $r_{10}$  и плоскопараллельного окна 7 детектора излучения. При этом сферические оптические поверхности радиусов  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  являются концентрическими с общим центром в точке C, совпадающим с центром входного зрачка II. Материалом всех линз в объективе для видимой области спектра служит кварц КВ-Р.

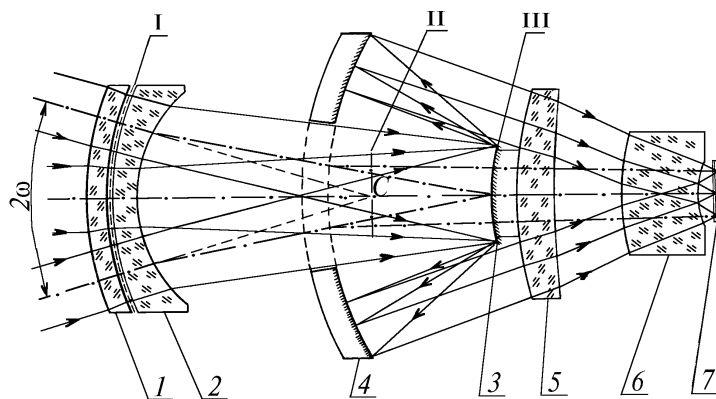


Рис. 3. Оптическая схема объектива <ME-PV> для видимого спектрального диапазона

Важной особенностью этой модификации объектива, как и в предыдущих случаях, является совмещение сферического интерференционного светофильтра I, предназначенного для выделения излучения выбранной эмиссии, либо с вогнутой поверхностью радиуса  $r_2$  концентрического мениска 1, либо с выпуклой поверхностью радиуса  $r_3$  мениска 2. Концентрический мениск 1, так же как в объективах <ME-SV2> и <ME-SU2>, выполняет дополнительную функцию входного окна объектива, защищающего интерференционный светофильтр от вредных атмосферных и механических воздействий и влияния прямой радиации в полете.

В отличие от оптической схемы модификации объектива <ME-SV1>, представленной в [17, 21], и так же как в оптической схеме модификации <ME-SV2> (см. рис. 1), главной особенностью рассматриваемого варианта объектива <ME-PV> является минимизация его центрального экранирования путем совмещения апертурной диафрагмы III с оправой выпуклого зеркала 3, что обеспечивает повышение эффективной светосилы объектива, а следовательно, в конечном счете, позволяет повысить пороговую чувствительность изображающей камеры. Это особенно важно для измерений распределений низкоинтенсивного свечения верхней атмосферы в средних широтах с относительно небольшими временами экспозиций  $\approx 0,1-0,2$  с, необходимыми, например, для регистрации и выделения над фоном "nightglow" короткоживущих мелкомасштабных эффектов свечения нижней ночной ионосферы, возбуждаемых за счет энергии мощных электромагнитных импульсов, генерируемых при разрядах ионосферных молний [22].

Позитивной особенностью объектива <ME-PV> является плоское поле изображения, которое формируется с помощью линзы Смита 6, исправляющей исходную кривизну поля. Эта характеристика позволяет использовать привычный плоский фотокатод на входе микроканального усилителя интенсивности или плоскую входную поверхность переходной фибершайбы для регистрации изображения. При этом, как видно из приведенной в Приложении таб-

лицы aberrаций, объектив в значительной степени потерял свойство ахроматичности, которое было у модификаций <ME-SV1> и <ME-SV2>, имеющих сферическое поле изображения. Конструктивные параметры объектива <ME-PV>, представленные в приложении, были оптимизированы для длины волны  $\lambda = 630,0$  нм, поэтому, как видно из таблицы aberrаций для длин волн  $\lambda = 486,1$  и  $427,8$  нм, aberrационные характеристики объектива с такими же конструктивными параметрами значительно уступают характеристикам объектива для длины волны  $\lambda = 630,0$  нм. Этим хотелось бы подчеркнуть, что для каждой длины волны конструктивные параметры этого варианта оптической схемы объектива <ME-PV> должны рассчитываться индивидуально.

Выпуклое сферическое зеркало 3 и корригирующий мениск 5 в объективе <ME-PV> технологически выполнены в едином моноблоке. Для этого зеркало 3 приклеено к мениску 5, т.е. осуществлено их взаимное крепление с использованием глубокого оптического контакта. В этом случае корригирующий мениск 5 приобретает дополнительную функцию элемента, обеспечивающего жесткую центровку выпуклого зеркала 3 по отношению к вогнутому зеркалу 4.

Проследим ход лучей в объективе <ME-PV>. Параллельные пучки лучей, пройдя через мениски 1 и 2, между которыми нанесен интерференционный светофильтр I, трансформируясь в расходящиеся и пройдя через центральное отверстие в вогнутом сферическом зеркале 4, падают последовательно на зеркала 3 и 4, после отражения от которых световые пучки проходят корригирующий мениск 5, линзу Смита 6 и окно детектора излучения 7, на фотокатоде которого они сходятся, формируя плоское изображение.

В настоящее время ведутся исследования возможностей уменьшения числа оптических элементов, а также их световых диаметров и оптической толщины в схеме объектива <ME-PV> для того, чтобы максимально приблизить эту схему к ахроматической при сохранении плоского поля изображения. Это позволит рассчитать схему для любой выбранной длины в видимом диапазоне, а также в диапазоне вакуумного ультрафиолета (объектив <ME-PU>), имеющую aberrационные характеристики не худшие, чем схемы модификаций объектива <ME-SV>.

### 3. Характеристики системы изображающих камер для эксперимента на низкополярном спутнике Земли

Характеристики и конфигурация системы соосных изображающих камер для низкополярного спутника Земли с подробным методическим обоснованием рассмотрены в нашей работе [17]. Здесь хотелось бы обратить внимание, что эта система гибкая, и ее конфигурация не обязательно должна быть именно такой с точки зрения числа одновременно наблюдаемых эмиссий, как представлено в таблице в [17].

Для решения ограниченного круга конкретных научных задач исследований и дистанционной диагностики ионосферных параметров (также подробно рассмотренных в [17]) возможен набор из четырех монохроматических камер (1V, 2V, 1UV, 3UV), полосы которых центрированы на соответствующие длины волн  $\lambda = 630,0$  нм [0I],  $\lambda = 427,8$  нм ( $N_2^+$ ),  $\lambda = 140,0$  нм [ $OI + N_2$  (LBH)] и  $\lambda = 184,0$  нм  $N_2$  (LBH), или минимальный – только из двух камер, например (1UV и 3UV) или (1V и 2V), в зависимости от конкретных параметров орбиты спутника и ряда технических возможностей проекта. Важно, чтобы при этом сохранялась суть методики, т.е. чтобы была обеспечена возможность одновременных измерений распределений интенсивностей пары эмиссий, излучаемых на разных высотах (см. выше). В отличие от варианта конфигурации системы, предложенного в [17], здесь мы представляем вариант из двух троек или двух пар изображающих камер, взаимодополняющих друг друга по углу поля зрения поперек направления полета. Для двух камер мгновенный угол поля зрения в этом направлении составит  $63^\circ$ , а для трех –  $93^\circ$  (с учетом того, что углы полей зрения смежных камер частично перекрываются в направлении, перпендикулярном направлению полета) и  $33^\circ$  – вдоль направления полета.

На рис. 4 показан пример геометрии наблюдений для варианта конфигурации системы, состоящей из двух связок изображающих УФ-камер. В одну связку входят три камеры типа 1UV, а в другую – три камеры типа 3UV (на рисунке условно показана только одна тройка камер), так что они взаимодополняют друг друга по углу поля зрения в направлении поперек направлению полета, причем углы поля зрения смежных камер перекрываются друг с другом примерно на  $3^\circ$ . Эти типы камер выбраны в связи с тем, что в УФ-диапазоне отношение интенсивностей эмиссий  $\lambda = 184,0$  нм  $N_2$  (LBH) к  $\lambda = 135,6$  нм [0I], попадающих в спектральные полосы камер 3UV и 1UV соответственно, является одним из наиболее эффективных для диаг-

ности параметров ионосферы [23, 24], т.к. одна из полос находится внутри спектрального диапазона атмосферного поглощения, максимум которого находится на длине волны  $\lambda = 142,5$  нм, а другая – вне его. Такой подход к выбору эмиссий и использование оптимальной ширины спектральных полос изображающих камер, по-видимому, позволит лучше всего обеспечить минимальную зависимость от изменения состава верхней атмосферы и эмпирических функций, связывающих характеристики  $E_0, F_e$  (см. выше) с отношениями интенсивностей эмиссий, и, в конечном счете, увеличит точность расчетов проводимостей.

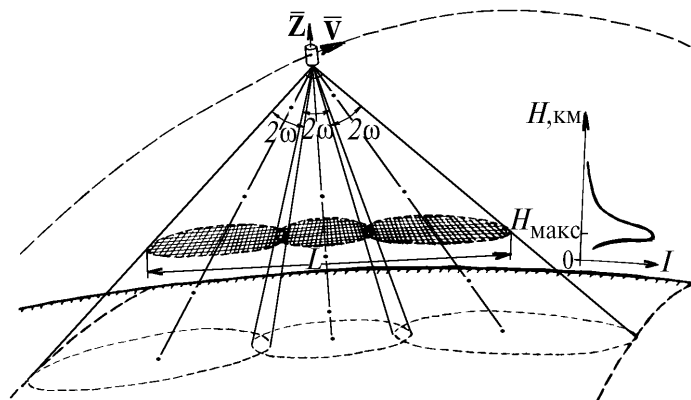


Рис. 4. Геометрия спектрофотометрических измерений характеристик полярной ионосферы с ИСЗ с помощью панорамной системы широкоугольных монохроматических изображающих камер с пространственным углом поля зрения  $2\omega \approx 33^\circ$ . Условно показаны  $I = f(H)$  – высотная зависимость интенсивности наблюдаемой эмиссии и три поля изображения камер в одной связке на высоте максимума интенсивности  $H_{\text{max}}$ .  $V$  – вектор скорости,  $Z$  – направление строительной оси спутника в зенит. Спектральные полосы камер одной связки центрированы на длину волны  $\lambda = 140,0$  нм, а другой – на  $\lambda = 184,0$  нм

Как видно из последнего рисунка, система камер в этом варианте позволяет проводить панорамное картографирование распределений интенсивностей излучения верхней атмосферы и ионосферных параметров с километровым пространственным и секундным временным разрешением (см. [17]) в пространственной полосе, имеющей (на высотах свечения) длину  $L \approx 1500 \div 1700$  км поперек направления полета и мгновенную ширину около  $300 \div 400$  км вдоль направления полета, которая расположена как в освещенной, так и в неосвещенной полусфере.

## Заключение

Представленные принципы создания системы монохроматических широкоугольных изображающих камер на основе модификаций нового объектива <монохроматический глаз> позволяют, как нам кажется, сделать очередной шаг в развитии оптики для дистанционной диагностики верхней атмосферы и методики спектрофотометрических исследований характеристик полярных сияний и параметров полярной ионосферы, повышении точности их измерений с низкоапогейных космических аппаратов.

Наиболее важной характеристической особенностью рассмотренного объектива является сочетание его ахроматичности в широком диапазоне длин волн и достаточно широком угле поля зрения с сохранением малых величин аббераций (а следовательно, и пространственного разрешения) во всем угле поля зрения, что позволяет, меняя интерференционный светофильтр на входном мениске, настраивать каждую изображающую камеру системы на измерения пространственного распределения интенсивности в спектральной полосе, в которую попадает длина волны конкретной эмиссии верхней атмосферы, выбранной исходя из конкретной физической задачи и методики эксперимента. Мы надеемся, что вышеописанные преимущества системы таких изображающих камер, установленных на низкоапогейном спутнике Земли, позволят получить новые научные результаты в области физики верхней атмосферы, ионосферы и исследований магнитосферно-ионосферных процессов.

**Оптический выпуск для модификации <ME-PV> объектива <монохроматический глаз>**

Наименование системы:	концентрический зеркально-линзовый дуореплелтор с менисковым компенсатором
Тип системы	TYPE = 01
Положение предмета	$S = \infty, 0000$
Величина предмета	$\omega = 16^\circ 30'$
Относительное геометрическое виньетирование	$U_{\text{верх}} = 0,000, U_{\text{нижн}} = 0,000$
Положение апертурной диафрагмы (АД)	
Количество поверхностей до АД	$ND = 5,0$
Расстояние до АД от предыдущей поверхности	$SD = 0 \text{ мм}$
Центральная апертура (-передняя, +задняя)	$AP = -7,2767 \text{ мм} = -D/2 = -f'/2:1,25, \text{ т.к. } D:f' = 1:1,25$
Положение плоскости изображения	
Признак задания положения плоскости установки	$IS = 0,0$
Смещение плоскости установки (в мм от гауссовской плоскости)	$SI = 0,03 \text{ мм}$

**Конструктивные параметры**

Номер поверхности	Радиусы по вершиной $r, \text{ мм}$	Осевые расстояния $d, \text{ мм}$	Показатели преломления материалов			Марка стекла
			$n(0)$ $\lambda = 630 \text{ нм}$	$n(1)$ $\lambda = 486,1 \text{ нм}$	$n(2)$ $\lambda = 427,8 \text{ нм}$	
1	67,920	5,260	1,000000	1,000000	1,000000	Кварц КВ-Р
2	62,660	1,280	1,457104	1,463110	1,467356	
3	61,380	5,240	1,000000	1,000000	1,000000	Кварц КВ-Р
4	32,660	83,620	1,457104	1,463110	1,467356	
5	46,990	-38,550	1,000000	1,000000	1,000000	Кварц КВ-Р
6	73,110	44,450	-1,000000	-1,000000	-1,000000	
7	84,330	8,600	1,000000	1,000000	1,000000	Кварц КВ-Р
8	224,900	15,630	1,457104	1,463110	1,467356	
9	56,490	18,320	1,000000	1,000000	1,000000	Кварц КВ-Р
10	18,493	4,260	1,457104	1,463110	1,467356	
11	0,000	0,500	1,000000	1,000000	1,000000	C50-5M
12	0,000		1,495550	1,502800	1,507800	

**Характеристики системы в параксиальной области**

Обобщенное увеличение $V, \text{ мм}$	Задний отрезок $S', \text{ мм}$	Положение зрачков		Фокусное расстояние		Фокальный отрезок	
		входного $S_p, \text{ мм}$	выходного $S'_p, \text{ мм}$	заднее $f'_S, \text{ мм}$	переднее $f_\Sigma, \text{ мм}$	задний $S'_f, \text{ мм}$	передний $S_f, \text{ мм}$
Для $\lambda_1 = 630,0 \text{ нм}$							
-18,4084	0,5006	67,9204	-128,0367	18,4041	-18,4041	0,4706	65,2846
Для $\lambda_2 = 486,1 \text{ нм}$							
-0,0063	-0,0267	67,6789	-126,5636	18,2875	-18,2875	0,4739	65,0464
Для $\lambda_3 = 427,8 \text{ нм}$							
-0,0100	-0,0247	67,5095	-125,5493	18,2058	-18,2058	0,4759	64,8794

Точка на оси      Центральная апертура:      передняя  $A = 7,2767 \text{ мм}$ ,      задняя  $A' = 0,3952 (\sin \sigma')$

Координата на входе $h_p, \text{ мм}$	Сферическая абберация		Волновая абберация $W, \text{ мкм}$	Неизопланатизм $\eta, \%$	Координата на выходе $\text{tg } \sigma'$
	Продольная $\Delta s', \text{ мм}$	Поперечная $\Delta u', \text{ мм}$			
Для $\lambda_1 = 630,0 \text{ нм}$					
$7,2767 (4/4)^{1/2}$	-0,00188	-0,00080	-0,50045	0,02559	0,43021
$7,2767 (2/4)^{1/2}$	-0,00155	-0,00045	-0,53802	0,01747	0,29106
Для $\lambda_2 = 486,1 \text{ нм}$					
$7,2767 (4/4)^{1/2}$	-0,01060	-0,00459	-0,70541	-0,62509	0,43357
$7,2767 (2/4)^{1/2}$	-0,00367	-0,00107	-0,51856	0,62760	0,29310
Для $\lambda_3 = 427,8 \text{ нм}$					
$7,2767 (4/4)^{1/2}$	-0,01722	-0,00750	-0,88559	-1,08610	0,43597
$7,2767 (2/4)^{1/2}$	-0,00555	-0,00163	-0,51870	-1,08457	0,29456



Точка вне оси  
Главный луч

Величина предмета  $\omega = 16^{\circ}30'$  Виньетирование:  $U_{\text{верх}} = 0,000$   $U_{\text{нижн}} = 0,000$

Величина изображения $y'$ , мм	Дисторсия $\Delta$ , %	Положение зрачков		Астигматические отрезки	
		ВХОДНОГО $S_p'$ , мм	ВЫХОДНОГО $S_p''$ , мм	$z_p'$ , мм	$z_p''$ , мм
Для $\lambda_1 = 630,0$ нм					
-5,16469	-5,28403	67,88144	-120,05937	-0,02662	-0,03546
Для $\lambda_2 = 486,1$ нм					
0,03187	-5,86859	67,64258	-188,78851	-0,02603	-0,03190
Для $\lambda_3 = 427,8$ нм					
0,05420	-6,27818	67,47475	-117,91800	-0,02590	-0,02972

- Meng C.-I., Huffman R.E., Skrivanek R.A. et al. // SPIE. Ultraviolet Technology. 1986. V. 687. P. 62–72.
- Ishimoto M., Meng C.-I., Romick G.J., Huffman R.E. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. N A9. P. 9854–9866.
- Vondrak R.R., Robinson R.M. // Remote sensing of the atmospheric of energetic particle fluxes, 40th Congress of the International Astronautical Federation, IAF–89–179, Malaga, Spain, 1989.
- Rees M.H., Lummerzheim D., Roble R.G. et al. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. N A11. P. 12841–12860.
- Gladyshev V.A., Kuzmin A.K., Mularchik T.M. et al. // Ann. Geophys. 1982. V. 38. N 5. P. 631–634.
- Gogoshev M.M., Petkov N., Kuzmin A.K. et al. // Adv. Space Res. 1983. V. 2. N 7. P. 115–120.
- Kaneda E., Mukai T., Hirao K. // Physics of auroral arc formation. Geophys. Monogr. Ser. Ed. by S.-I. Akasofu and J.R. Kan. AGU. 1981. V. 25. P. 24–30.
- Frank L.A., Craven J.D., Ackerson K.L. et al. // Space Sci. Instr. 1981. V. 5. N 4. P. 369–393.
- Meng C.I. and Huffman R.E. // Geophys. Res. Lett. 1984. V. 11. P. 315–318.
- Schenkel F.W., Ogorzalek B.S., Larrabee J.C. et al. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 20. P. 3395–3405.
- Anger C.D., Babey S.K., Broadfoot A.L. et al. // Geophys. Res. Lett. 1987. V. 14. N 4. P. 387–390.
- Oguti T., Kaneda E., Ejiri M. et al. // J. Geomagn. Geoelectr. 1990. V. 42. N 4. P. 555–564.
- The FREJA scientific satellite. The FREJA science team. // Ed. M. Andre, Swedish Institute of Space Physics, Kiruna, Sweden. 1991. 190 P.
- Cogger L.L., Galperin Yu.I., Shepherd G.G. et al. // Project Interball. Ed. by CNES. France. 1995. P. 267–272.
- Johnson R.V. // Opt. Eng. 1988. V. 27. N 12. P. 1046–1050.
- Попов Г.М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М.: Наука, 1969. 136 с.
- Кузьмин А.К., Чиков К.Н. // Космические исследования. 1994. Т. 32. Вып. 1. С. 126–142.
- Волосов Д.С. Методы расчета сложных фотографических систем. Л.-М.: Гостехиздат, 1948. 394 с.
- Якушенко Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.
- Zukic M., Torr D.G., Kim J., Spann J.E., Torr M.R. // Opt. Eng. 1993. V. 32. N12. P. 3069–3074.
- Kuzmin A.K. and Chikov K.N. // Proceedings of the 19th Annual European Meeting on Atmospheric Research by Optical Methods, Kiruna, Sweden. 1992. P. 585–592.
- Boeck W.L., Vaughan O.H., Blakeslee R., Vonnegut B., Brook M. // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. P. 99–102.
- Germany G.A., Torr M.R., Richards P.G., Torr D.G. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. N A6. P. 7725–7733.
- Germany G.A., Torr M.R., Torr D.G., Richards P.G. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. N A1. P. 383–388.

Институт космических исследований РАН,  
Москва

Поступила в редакцию  
4 мая 1994 г.

#### A.K. Kuzmin and K.N. Chikov **Panoramic Imaging Monochromatic Cameras for Diagnostics of Ionospheric and Upper Atmospheric Characteristics from the Satellites.**

Methodical possibilities for measurement of auroral and electrodynamic characteristics of polar ionosphere from the satellite by means of the system of wide-angle imaging cameras with new modifications of objective <monochromatic eye> are considered. Aberrational and spectral characteristics of objectives and their comparative advantages and shortcomings are analysed. Conception of the system construction and of choice of upper atmosphere emissions wavelength for simultaneous spectrophotometrical measurements of auroral intensity panoramic distributions from low-apogee satellite are presented. The advantages that imaging cameras provide, when remote diagnosing the instantaneous states and researching the processes in polar ionosphere, are discussed.