

Варианты и выбор оптической схемы, оптимизация характеристик орбитального аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП, сравнение с зарубежными аналогами

Кузьмин А.К.¹⁾, Баньщикова М.А.²⁾, Крученицкий Г.М.³⁾, Маслов И.А.¹⁾, Моисеев П.П.⁴⁾, Потанин Ю.Н.³⁾, Чувашов И.Н.²⁾, Шаталов А.Е.⁴⁾
1) ИКИ РАН, 2) НИИ ПМ Томского государственного университета, 3) Центральная Аэрологическая Обсерватория Росгидромет, НПП "Астрон Электроника"

alkkuzmin@mail.ru

Введение

Результаты наблюдений пространственных распределений интенсивности конкретных выбраных эмисий полярных сияний в видимой области спектра с орбиты ориентированного на Землю КА обеспечивают информацию о локальных пространственных, временных и энергетических характеристиках источников их возбуждения, т.е., высывающихся из ближней магнитосфера–энергетических заряженных частиц. Эта информация позволяет контролировать характеристики локальных областей полярной ионосферы в различных секторах местного времени аврорального овала. Наряду с глобальной крупномасштабной диагностикой (в ВУФ-диапазоне спектра) состояния аврорального овала в целом с орбиты типа Молния, методика мелкомасштабной спектротомографической диагностики электродинамического состояния локальных несущевых участков полярной ионосферы с орбит высотой менее 1000 км успешно развивается уже в течение ряда лет, а ее эффективность подтверждена результатами орбитальных измерений, проведенных на орбитах КА REIMEI (Япония) [Ouchi et al., 2008] и Ка с РОР (Канада) [Cogger et al., 2014]. Высокочувствительные матричные детекторы изображений в авроральных имаджерах MAC и FAI (соответственно) позволили получать с высот этих КА изображения авроральных эмиссий с пространственным разрешением ~ 1 км и временем экспозиции изображения – доли секунды. По данным измерений эти характеристики реальны при наблюдениях интенсивных эмиссий на разных высотах, излучаемых возбудленными ионами молекулы азота (первая отрицательная система), атомами кислорода и молекулами азота (первая положительная система). При этом важнейшим методическим фактором наблюдений было постоянное присутствие в поле изображения эмиссии проекции силовой линии магнитного поля, которую пересекали КА в момент экспозиции изображений. В проекте REIMEI это качество достигнуто с помощью специального поворота строительной осей КА вокруг ц.м., а постоянная ориентация Ка с РОР на Землю и угол поля зрения аврорального имаджера FAI ~ 28° позволила поддерживать такой режим наблюдений постоянно.

С помощью электростатических анализаторов и другой аппаратуры, входящей в состав ГТАК-МП, в окрестности перспективного Ка Метеор-МП одновременно и синхронно будут измеряться энергетические и пространственные распределения высывающихся заряженных частиц, градиенты магнитного и электрического полей и других характеристики плазмы, а имаджер авроральных эмиссий обеспечит дистанционный контроль результатов этих высотных. Именно такая комплексная

параметрическая на выпуклую поверхность в менинка 2, на которую наплыает СИФ. Крайние лучи, проходящие через край входного зрачка, независимо от наклона пучка, Концептричность поверхностей А, Б и В в ходу лучей 3 обеспечивает падение всех главных лучей (лучей, проходящих через центр входного зрачка C) по нормали к СИФ. При этом получается, что любой координате конкретного пикселя матрицы соответствует одинаковый набор углов падения лучей на СИФ, и благодаря этому качеству спектральная характеристика пропускания СИФ практически одинаковая для любого направления в пределах угла поля зрения. Как показывает расчет, равномерность набора углов падения лучей для каждого углового направления, обусловленная aberrations оптической системы, будет не более, чем 0,28°. Концептрический менинк из 1 выполняет и дополнительную функцию входного окона объектива, защищающего СИФ от атмосферных и механических воздействий во время предстартовых испытаний и влияния прямой радиации в полёте.

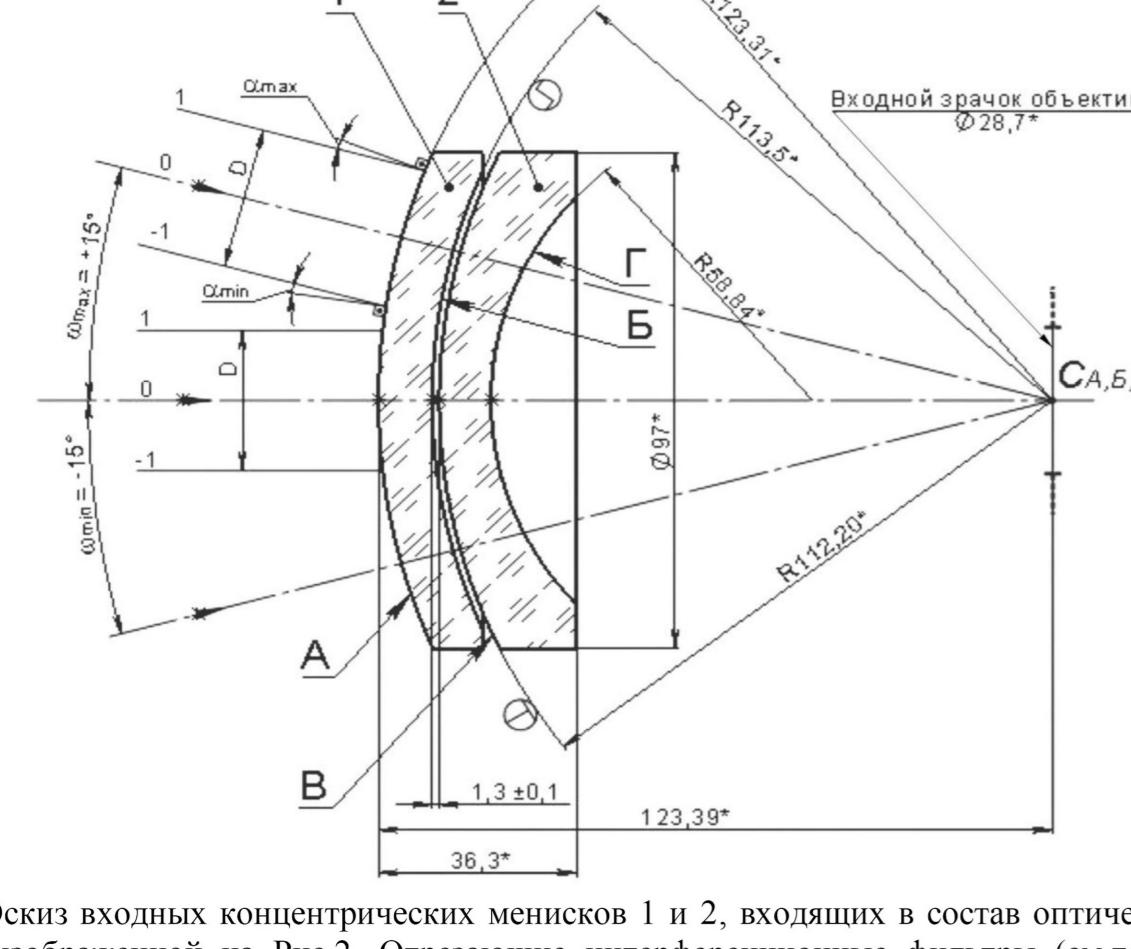


Рис.3 Эскиз входных концентрических менинков 1 и 2, входящих в состав оптической схемы СИФ, изображенной на Рис.2. Отрезающие интерференционные фильтры (см.текст) должны напыляться на выпуклую поверхность менинка 1, выпуклую поверхность менинка 2 и вогнутую поверхность менинка 2.

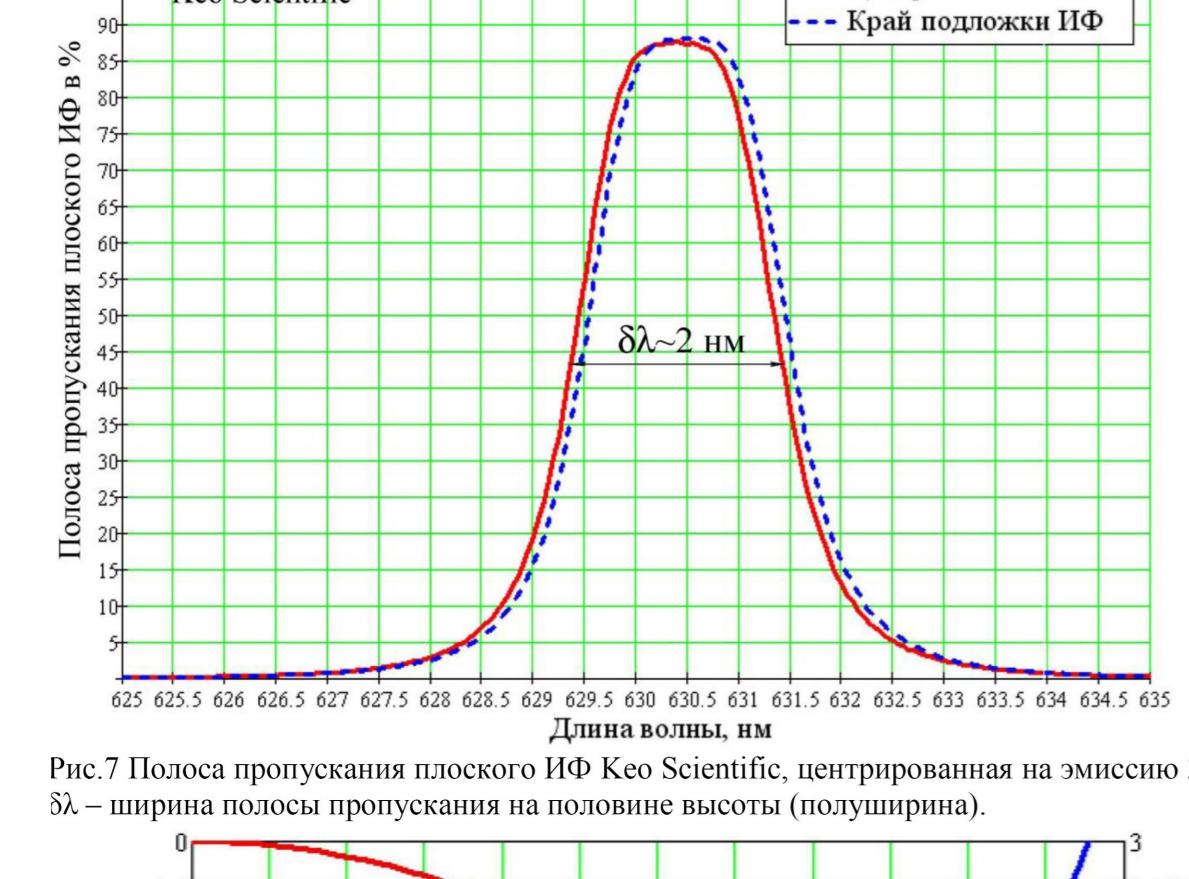


Рис.7 Полоса пропускания плюсного ИФ Keo Scientific, центрированная на эмиссию 6260 нм [Ю.]. ширина полосы пропускания на половине высоты (полуширина).



Рис.8 Свойства плоского интерференционного фильтра: Составляя максимум пропускания и ширину полосы пропускания в зависимости от угла падения лучей φ на плоский ИФ.

Плоские интерференционные фильтры применялись в наземной авроральной фотометрии еще со временем МПТ. Свойства плоского узкополосного ИФ были

методика позволяет контролировать процесс передачи и распределения энергии от заряженных частичек составляющим верхней атмосферой и ионосферу в ограниченном объеме конкретной магнитной силовой трубы одновременно как на высоте КА, так и дистанционно на высоте слоя свечения в воем поле наблюдений аврорального имаджера Авровизор-ВИС/МП имеющем диаметр более 350 км на высотах наблюдаемых эмиссий. При использовании этой методики распределение градиентов электронной концентрации, образующиеся в локальном объеме общего содержания электронов (ТЕС) во время высываний заряженных частиц в разных силовых трубках может картиграфироваться (в рамках угла поля зрения имаджера) на высотах максимума Е-слоя ионосферы по распределению интенсивности эмиссии ING N₂ [Vondrak et al., 1985; Meng et al., 1986]. Карты распределений интенсивности этой и одной из кислородных эмиссий на высотах F-слоя станут информационной основой для оценки распределений потоков энергии и средней энергии высывающихся электронов [Steel et al., 1990], позволяющих в конечном счете, получать информацию о мгновенном состоянии локальных участков среди распространения в полярной области, т.к. именно мелкомасштабные градиенты Ne, возникающие благодаря тонкой структуре высывающихся частиц и сопутствующих им продольных токов (вольт м.с.л.) и динамично изменяющиеся в различных секторах аврорального овала, наряду с глобальной крупномасштабной диагностикой (в ВУФ-диапазоне спектра) состояния аврорального овала в целом с орбитами типа Молния, методика мелкомасштабной спектротомографической диагностики электродинамического состояния локальных несущевых участков полярной ионосферы с орбит высотой менее 1000 км успешно развивается уже в течение ряда лет, а ее эффективность подтверждена результатами орбитальных измерений, проведенных на орбитах Ка REIMEI (Япония) [Ouchi et al., 2008] и Ка с РОР (Канада) [Cogger et al., 2014]. Высокочувствительные матричные детекторы изображений в авроральных имаджерах MAC и FAI (соответственно) позволяли получать с высот этих КА изображения авроральных эмиссий с пространственным разрешением ~ 1 км и временем экспозиции изображения – доли секунды. По данным измерений эти характеристики реальны при наблюдениях интенсивных эмиссий на разных высотах, излучаемых возбудленными ионами молекулы азота (первая отрицательная система), атомами кислорода и молекулами азота (первая положительная система). При этом важнейшим методическим фактором наблюдений было постоянное присутствие в поле изображения эмиссии проекции силовой линии магнитного поля, которую пересекают КА в момент экспозиции изображений. В проекте REIMEI это качество достигнуто с помощью специального поворота строительной оси Ка вокруг ц.м., а постоянная ориентация Ка с РОР на Землю и угол поля зрения аврорального имаджера FAI ~ 28° позволила поддерживать такой режим наблюдений постоянно.

На этап дополнительного эскизного проектирования аппарата Авровизор-ВИС/МП [ДЭП] для гелио-геофизического комплекса аппарата ГТАК-МП, предназначенному для перспективного Ка Метеор-МП, рассматривались два типа оптических схем объективов изображающих каналов аврорального имаджера, строящиеся на получении изображений конкретных авроральных эмиссий в локальной окрестности подспутниковой области, то принципиальной характеристикой объектива аврорального имаджера является точность спектральной селекции излучения измеряемой эмиссии над фоном во всех направлениях наблюдений, а его aberrации определяет максимальное пространственное разрешение элементов наблюдаемых авроральных фрагментов. В классической схеме объектива с плоским интерференционным фильтром ширину полосы пропускания интерференционного фильтра и спектрального положения ее максимума зависит одновременно как от направления наблюдения (в рамках угла поля зрения), так и от температуры, и, в свою очередь, от точности знания пропускания конкретной эмиссии и фона в момент экспозиции изображения для каждого вектора наблюдения (в рамках угла поля зрения) зависит точность определения абсолютной интенсивности наблюдаемой эмиссии и фона во всем объеме угла поля зрения [Рис.5].

На Рис.4 представлен эскиз менинков 1 и 2, со сферическими интерференционными фильтрами на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита, формирующая плоское поле изображения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм. СИФ, концентрический центр входного зрачка III сохраняет свои характеристики (ширина полосы пропускания, спектральное положение максимума полосы пропускания) как для осевого пучка, так и для внесосевых (наклонных) пучков лучей в рамках угла поля зрения $2\omega = \pm 15^\circ$ (см. таблицу 1), при этом aberrационные характеристики схемы в целом позволяют получать качественное изображение эмиссии во всем угле наблюдения (см. Рис.5).

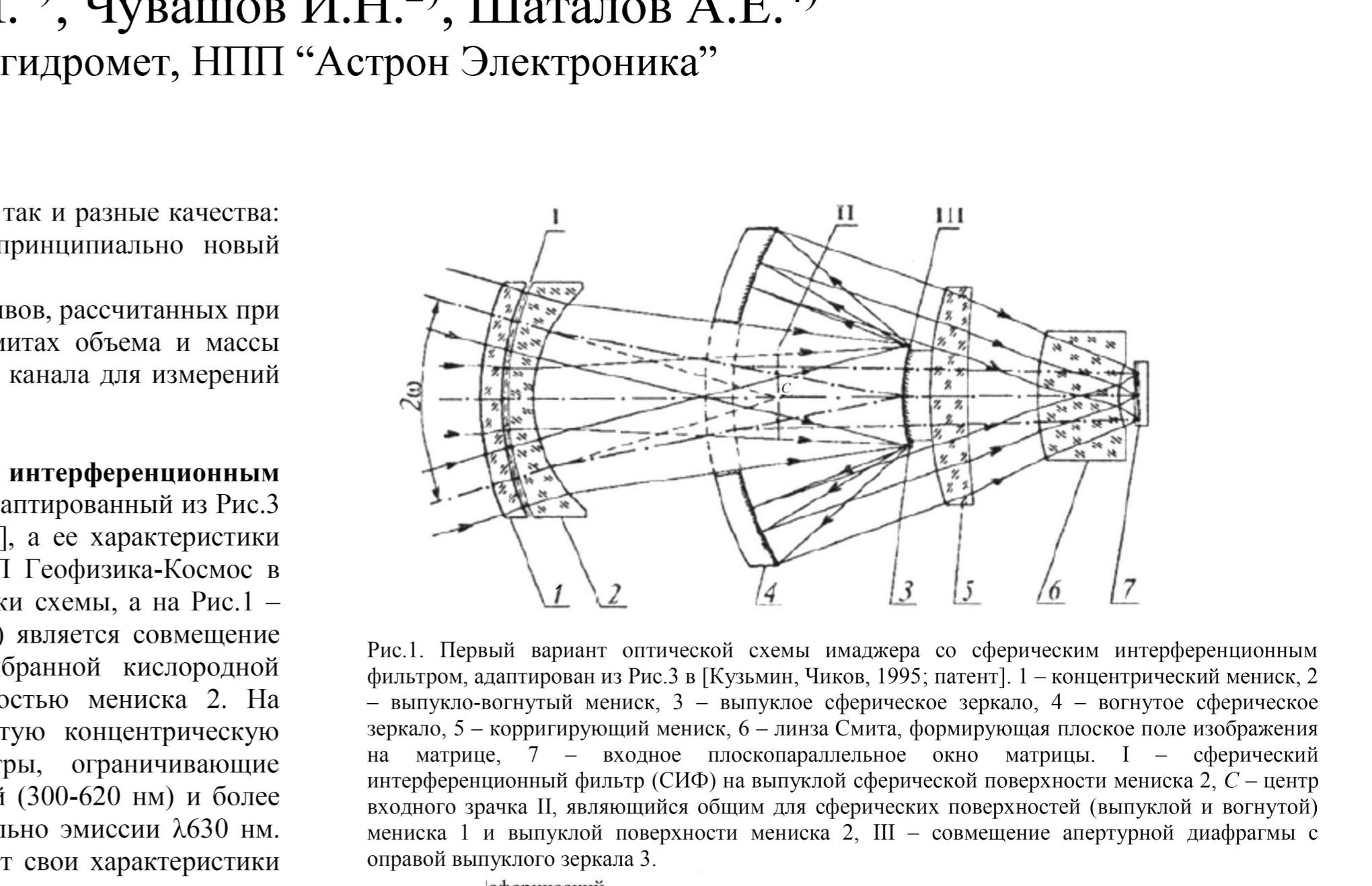


Рис.1 Первый вариант оптической схемы имаджера со сферическим интерференционным фильтром, адаптированный из Рис.3 [Кузьмин и Чиков, 1995, патент] 1 – концептрический менинк, 2 – выпуклопланочный зеркало, 3 – выпуклое сферическое зеркало, 4 – вогнутое сферическое зеркало, 5 – корргирирующий менинк, 6 – линзы Смита, формирующая плоское поле изображения на матрице, 7 – вогнутое плоскопараллельное око матрицы. I – сферический интерференционный фильтр (СИФ) на выпуклой сферической поверхности менинка 2, 2 – центр входного зрачка, 3 – совмещение апертурной диафрагмы с оправой выпуклого зеркала 3.

Рис.2 Ход лучей в схеме объектива со сферическим фильтром 6260 нм, рассчитанный оптиками НПП Геофизика-Космос по предложению ИКИ [ДЭП].

построены графики зависимостей углов падения лучей, составляющих пучок D, от относительных координат лучей в пучке, имеющих углы наклона от 0 (осевой пучок); 0,25; 0,5; 0,75 и 1,0, которые показаны на Рис.4 цветами: красные, синие, зеленые, розовые, стрелками и голубым соответственно. Т.к. эти зависимости практически совпадают, то на Рис. 4 показаны зависимости только для пучков,

на Рисунке 3 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 2. Относительные координаты «1» и «-1» (по оси абсцисс) соответствуют крайним лучам пучков в пределах диаметра D=28,1 мм. Координаты «0» (по оси абсцисс) соответствуют главным лучам D=28,1 мм. Координаты «1» и «-1» (по оси абсцисс) соответствуют главным лучам пучков в пределах диаметра D=28,1 мм. Координаты «0» (по оси абсцисс) соответствуют главным лучам D=28,1 мм.

На Рис.5 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.6 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.7 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.8 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.9 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.10 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.11 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.12 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.13 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.14 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности менинка 1 и вогнутую концентрическую поверхность на матрице, 6 – линзы Смита 2 (Рис.3) наносятся фильтры, ограничивающие пропускание фона излучения в более коротковолновой (300-620 нм) и более длинноволновой (640-1100 нм) областях спектра относительно эмиссии 6260 нм.

На Рис.15 представлена эскиз менинков 1 и 2, со сферическим интерференционным фильтром на менинке 1 и с концептрическими менинками 2. На выпуклую и вогнутую поверхности мен