

ВАРИАНТЫ И ВЫБОР ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ, ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОРБИТАЛЬНОГО АВРОРАЛЬНОГО ИМАДЖЕРА «АВРОВИЗОР-ВИС/МП», СРАВНЕНИЕ С ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ

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

Мелкомасштабные дистанционные измерения с орбит распределений интенсивности свечения конкретных авроральных эмиссий ночной полярной ионосферы в поле наблюдений в несколько сотен километров, одновременно с прямыми измерениями распределений потоков заряженных частиц и продольных токов в окрестности КА приборами гелиогеофизического комплекса – основная мотивация создания аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» в интересах осуществления локального дистанционного контроля состояния характеристик ионосферы с орбиты КА «Метеор-МП». Угол поля зрения; селекция эмиссий; спектральное и пространственное разрешение, определяемые квазимонохроматической оптической схемой и её аберрациями; временное разрешение и чувствительность, определяемые характеристиками детектора изображений, минимальным временем экспозиции и частотой съёмки; количество спектральных изображающих каналов, определяемое научными целями и зависящее от согласованных массогабаритных характеристик, синхронизация экспозиций с измерениями характеристик плазмы; скорость информационного обмена с бортовыми системами вкуче определяют возможности и преимущества готовящегося эксперимента. Кратко рассматривается развитие специального ПО «Вектор-М» и его блок-схема, обеспечивающие новые функции программы, необходимые при управлении процессом наблюдений и обработке данных.

Ключевые слова: орбитальный авроральный имаджер, варианты и специфика оптической схемы, измерения эмиссий ионосферы и верхней атмосферы, дистанционная диагностика состояния полярной ионосферы.

Введение

Результаты наблюдений пространственных распределений интенсивности конкретных выбранных эмиссий полярных сияний в видимой области спектра с орбиты ориентированного на Землю КА обеспечивают информацию о локальных пространственных, временных и энергетических характеристиках источника их возбуждения, т. е. высыпающихся из ближней магнитосферы энергичных заряженных частиц. Эта информация позволяет контролировать состояние 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 спектрофотометрической диагностики электродинамического состояния локальных неосвещённых участков полярной ионосферы с орбит высотой менее 1000 км успешно развивается уже в течение ряда лет, а её эффективность подтверждена результатами орбитальных измерений, проведённых на орбитах КА REIMEI (Япония) [1] и КА e-POP (Канада) [2]. 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 \sim доли секунды. По данным измерений, эти характеристики реальны при наблюдениях интенсивных эмиссий на разных высотах, излучаемых возбужденными ионами молекулы азота (первая отрицательная система), ато-

мами кислорода и молекулами азота (первая положительная система). При этом важнейшим методическим фактором наблюдений было постоянное присутствие в поле изображения эмиссий проекции силовой линии магнитного поля, которую пересекали КА в момент экспозиции изображений. В проекте REIMEI это качество достигалось с помощью специального поворота строительных осей КА вокруг ц. м., а постоянная ориентация КА e-POP на Землю и угол поля зрения аврорального имаджера FAI $\Omega \sim 28^\circ$ позволяли поддерживать такой режим наблюдений постоянно.

С учётом опыта на КА REIMEI и e-POP 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 высыпающихся заряженных частиц, градиенты магнитного и электрического полей и других характеристик плазмы, а имаджер авроральных эмиссий обеспечит дистанционный контроль «результатов» этих высыпаний. Именно такая комплексная методика позволит контролировать процесс передачи и распределения энергии от заряженных частиц составляющим верхней атмосферы и ионосферы в ограниченном объёме конкретной магнитной силовой трубки одновременно как на высоте КА, так и дистанционно на высоте слоя свечения во всём поле наблюдений аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП», имеющем диаметр более 350 км на высотах наблюдаемых эмиссий. При использовании этой методики распределение градиентов электронной

концентрации, образующееся в локальном объёме общего содержании электронов (ТЭС) во время высыпаний заряженных частиц в разных силовых трубках, может картографироваться (в рамках угла поля зрения имаджера) на высотах максимума E -слоя ионосферы по распределению интенсивности эмиссии $1NG N_2^+$ [3, 4]. Карты распределений интенсивности этой и одной из кислородных эмиссий на высотах F -слоя станут информационной основой для оценки распределений потока энергии и средней энергии высыпавшихся электронов [5]. Эти распределения позволят, в конечном счёте, получать информацию о мгновенном состоянии локальных участков среды распространения в полярной области, так как именно мелкомасштабные градиенты N_e , возникающие благодаря тонкой структуре высыпаний частиц и сопутствующих им продольных токов (вдоль м. с. л.), динамично изменяющиеся в различных секторах аврорального овала, являются препятствиями для нормального (без искажений и временных задержек) распространения радиосигналов в субавроральных и трансполярных зонах в различных геомагнитных условиях [6]. В данной работе анализируются преимущества и недостатки конкретных вариантов оптической схемы аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП», разрабатываемого для перспективного КА «Метеор-МП», детально рассмотренные в [7].

1. Сравнение характеристик широкоугольных квазимонохроматических объективов для аврорального имаджера и наблюдений эмиссий полярных сияний с орбиты низкоорбитального КА, и их преимущества и недостатки для решения задач оптического контроля ионосферы, критерии выбора. Так как дистанционная орбитальная диагностика состояния полярной ионосферы строится 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 аберрации определяют максимальное пространственное разрешение элементов наблюдаемых авроральных фрагментов. В классической схеме объектива с плоским интерференционным фильтром ширина полосы пропускания интерференционного фильтра и спектрального положения её максимума зависит одновременно как от направления наблюдения (в рамках угла поля зрения), так и от температуры, а в конечном счёте, от точности знания пропускания кон-

кретной эмиссии и фона в момент экспозиции изображения для каждого вектора наблюдений (в рамках угла поля зрения). От этой точности зависят определение абсолютных интенсивностей эмиссий в каждом канале и восстановленные распределения величин энергетических характеристик заряженных частиц и локальной электронной концентрации в полярной ионосфере [6, 8].

На этапе дополнительного эскизного проектирования аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП» [7] для гелиогеофизического комплекса аппаратуры ГТАК-МП, предназначенного для перспективного КА «Метеор-МП», рассматривались два типа оптических схем объективов изображающих каналов аврорального имаджера, имеющих как общие (например, угол поля зрения $2\omega = 30^\circ$), так и разные качества: объектив с плоским интерференционным фильтром (ИФ) и построенный на принципиально новой схеме объектив со сферическим интерференционным фильтром (СИФ).

Рассмотрим характеристики этих двух типов схем объективов, рассчитанных при фиксированных согласованных с конструкторами КА лимитах объёма и массы имаджера «Авровизор-ВИС/МП» [7] на примере изображающего канала для измерений распределений интенсивности кислородной эмиссии $\lambda = 630$ нм.

Схема объектива с узкополосным сферическим интерференционным фильтром впервые была предложена в [9, 10], а её характеристики детально проанализированы специалистами-оптиками АО «НПП «Геофизика-Космос» в 2012 г. В табл. 1 представлены основные характеристики схемы, а на рис. 1 показан ход лучей от поля наблюдений до детектора. На рисунке обозначены: 1 и 2 – сферические концентрические мениски; 3 – выпуклое сферическое зеркало; 4 – вогнутое сферическое зеркало; 5 – корригирующий мениск; 6 – линза Смита, формирующая плоское поле изображения на матрице ССД; СИФ, напыленный на выпуклую сферическую поверхность мениска 2; C – центр входного зрачка, являющийся общим для сферических поверхностей (выпуклой и вогнутой) мениска 1 и выпуклой поверхности мениска 2; 2ω – угол поля зрения канала $\lambda = 630$ нм «Авровизор-ВИС/МП».

Особенностью схемы объектива (рис. 1) является технологическое совмещение узкополосного ($\delta\lambda|_{\lambda=0,5} \sim 2$ нм) СИФ, предназначенного для селекции излучения выбранной эмиссии (в данном примере $\lambda = 630$ нм [ОИ]), с первой по ходу лучей (выпуклой) поверхностью мениска 2. На выпуклую и вогнутую поверхности мениска 1 и вогнутую концентрическую поверхность мениска 2 (рис. 2)

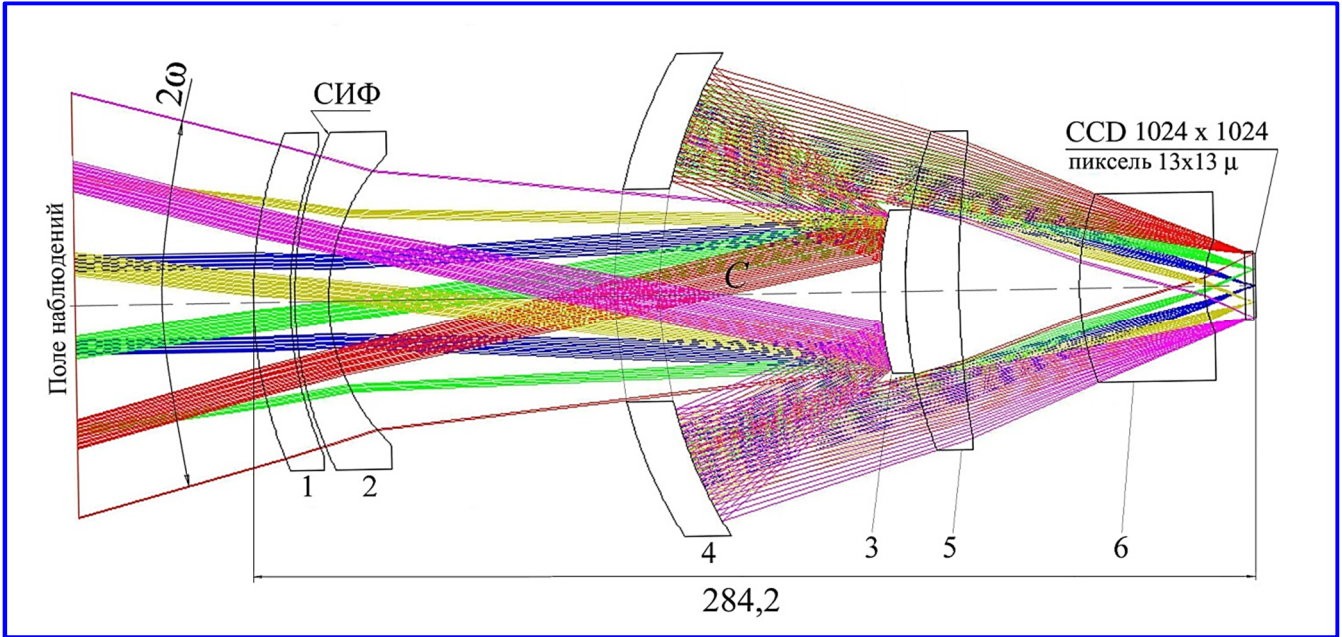


Рис. 1. Ход лучей в схеме объектива со сферическим фильтром $\lambda = 630$ нм, рассчитанный оптиками АО «НПП «Геофизика-Космос» по предложению ИКИ [7]

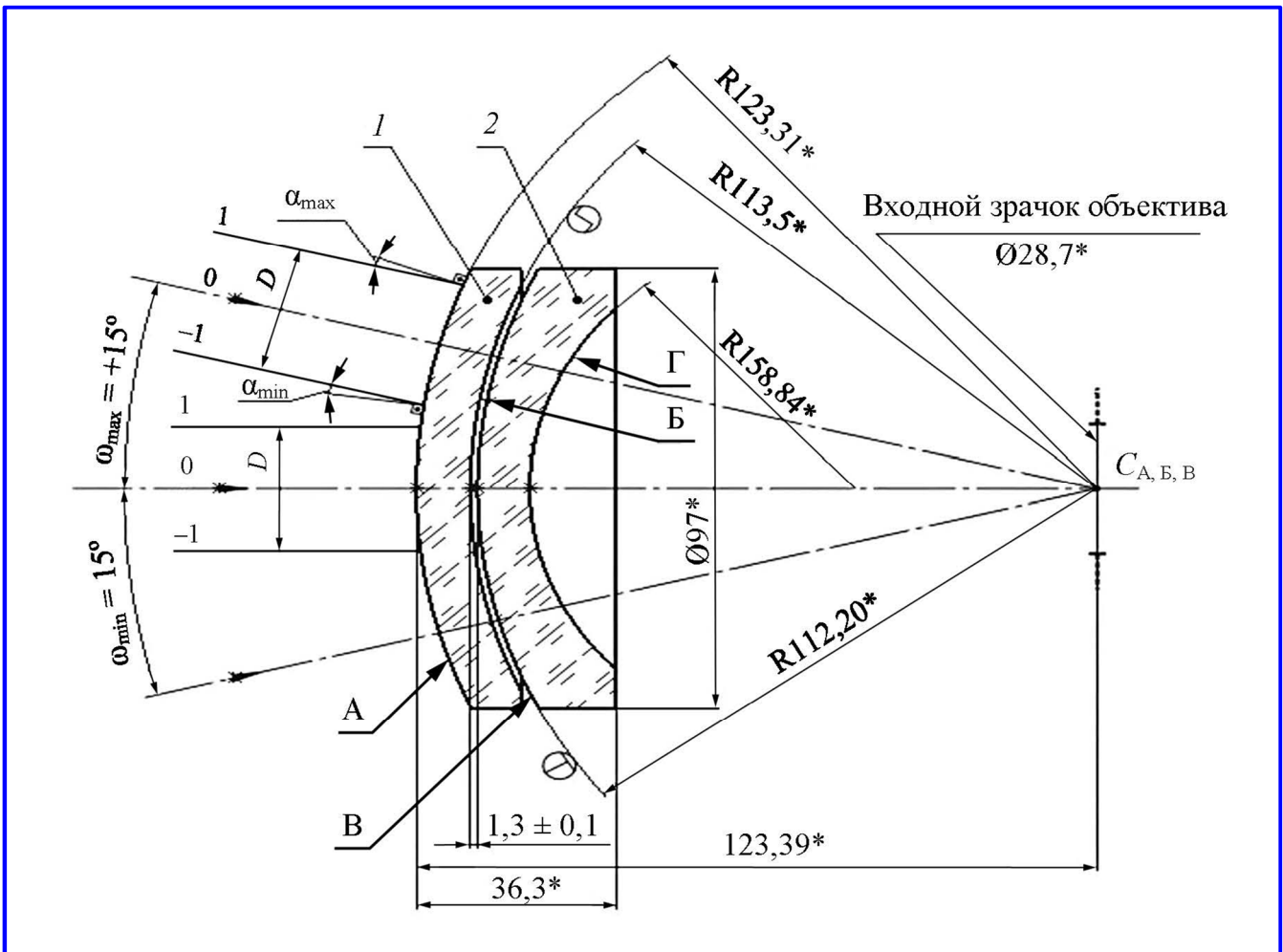


Рис. 2. Эскиз входных концентрических менисков 1 и 2, входящих в состав оптической схемы с СИФ, изображённой на рис. 1

Таблица 1

Основные характеристики оптической системы с СИФ	Оптический канал № 1
Рабочая длина волны излучения λ_0 , нм	630
Угловое поле 2ω , угл. град.	30
Фокусное расстояние f' , мм	$35,13 \pm 0,35$
Относительное отверстие D/f'	1 : 1,25

напыляются широкополосные фильтры, ограничивающие пропускание фонового излучения в более коротковолновой (300 – 620 нм) и более длинноволновой (640 – 1100 нм) областях спектра относительно эмиссии $\lambda = 630$ нм. Схема построена так, что СИФ, концентричный центру входного зрачка *C*, сохраняет свои характеристики (ширину полосы пропускания, спектральное положение максимума полосы пропускания) как для осевого пучка, так и для всех внеосевых (наклонных) пучков лучей в рамках угла поля зрения $2\omega = \pm 15^\circ$ (см. табл. 1), при этом абберационные характеристики схемы в целом позволяют получать на детекторе качественное изображение пространственной структуры эмиссии во всём угле наблюдения (см. рис. 4).

На рис. 4, *a* – зависимость центрального экранирования от угла ω ; *b* – пятна рассеяния на углах 0, 5, 10, 15°; *c* – графики геометрических aberrаций; *d* – графики волновых aberrаций; *e* – модуляционно-передаточная функция; *жс* – относительная освещённость по угловому полю; *з* – основной критерий качества – концентрация энергии в пятне рассеяния точки.

На рис. 2 представлен эскиз менисков 1 и 2 со сферическим интерференционным фильтром на выпуклой поверхности В мениска 2. Отрезающие широкополосные фильтры должны напыляться на вогнутые поверхности менисков 1 и 2.

Зависимости углов падения лучей (в пучке *D*) от координат лучей в пучке, преломленных после вогнутой поверхности Б мениска 1 и падающих на выпуклую поверхность В мениска 2, на которую напылен СИФ (см. рис. 2), показаны на рис. 3.

Относительные координаты «1» и «-1» (по осям абсцисс) соответствуют крайним лучам пучков в пределах диаметра $D = 28,1$ мм. Координаты «0» (по осям абсцисс) соответствуют главным лучам пучков *D* (данные лучи проходят через центр входного зрачка объектива *C*). Максимальные углы наклона параллельных пучков к оптической оси объектива составляют $\omega_{\min} = -15^\circ$ и $\omega_{\max} = +15^\circ$.

Для каждой поверхности менисков 1 и 2 были рассчитаны функциональные зависимости углов падения лучей, составляющих пучок *D*, на поверхности менисков 1 и 2 от координат лучей в пучке *D*, имеющих углы наклона от 0 (осевой луч в пучке *D*) до 0,25; 0,5; 0,75 и 1 ω . Так как зависимости для пучков с различным наклоном для концентрических поверхностей А, Б и В очень близки, то на рис. 3 показана только зависимость для пучков, падающих на выпуклую поверхность В мениска 2, на которую напыляется СИФ (рис. 2). В зависимости для поверхности Г, условие концентричности для которой нарушается, каждый пучок имеет собственный набор углов падения на эту поверхность (в данной работе не показана). Крайние лучи в пучке *D*, проходящие через края входного зрачка, независимо от наклона пучка имеют одинаковый угол α падения на СИФ (см. формулу):

$$\alpha = \arcsin(D / (2 \cdot R)) = \pm 7,5^\circ,$$

где $R = 112,2$ мм – радиус кривизны СИФ; $D = 28,1$ мм – диаметр параллельного пучка. Концентричность поверхностей А, Б и В входному зрачку обеспечивает падение всех главных 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 эмиссии и фона у СИФ практически одинаковая для любого направления в пределах угла поля зрения. Как показывает расчёт, неравномерность набора углов падения лучей для каждого углового направления, обусловленная aberrациями оптической системы, будет не более, чем 0,28°. Концентрический мениск 1, кроме основной, выполняет и дополнительную функцию входного окна объектива, защищающего СИФ от атмосферных и механических воздействий во время предстартовых испытаний и влияния прямой радиации в полёте.

Проследим ход лучей в схеме объектива с СИФ по рис. 1 (нумерация оптических элементов по ходу лучей приведена на рис. 1). Параллельные пучки лучей, пройдя через мениски 1 и 2, на который нанесён СИФ, трансформируясь в расходящиеся и пройдя через центральное отверстие в вогнутом сферическом зеркале 4, падают последовательно на выпуклое и вогнутое зеркала 3 и 4 соответственно, после отражения от которых проходят корригирующий мениск 5, линзу Смита 6 и окно детектора

излучения, формируя плоское изображение на фоточувствительной площадке матрицы. Выпуклое сферическое зеркало 3 и корригирующий мениск 5 технологически должны выполняться в едином моноблоке, т. е. зеркало 3 приклеивается к мениску 5. В этом случае корригирующий мениск 5 приобретает дополнительную функцию элемента, обеспечивающего жёсткую центровку выпуклого зеркала 3 по отношению к вогнутому зеркалу 4.

Недостатком схемы объектива с СИФ является центральное экранирование лучей выпуклым зеркалом 3 (рис. 1), проявляющееся в уменьшении кружка Эри, т. е. в перераспределении освещённости в дифракционном изображении точки, что приводит к частичному «размазыванию» энергии точечного источника, проецируемого на пиксель. Минимизация центрального экранирования в представленном варианте схемы осуществлена путём совмещения апертурной диафрагмы с оправой выпуклого зеркала 3, что обеспечивает повышение эффективной светосилы объектива. На рис. 4, а показан график зависимости процента прошедших через оптическую систему лучей от величины углового поля. Из рисунка видно, что экранируется ~45% лучей, вошедших в систему. Это значение не является критичным и вполне допустимо, учитывая, что схема объектива (рис. 1) обеспечивает относительное отверстие $D/f' = 1 : 1,25$ (см. табл. 1). Сле-

дует заметить, что характеристики СИФ, и в частности спектральное положение максимума пропускания, также как и у плоских интерференционных фильтров зависят от температуры (величина этой зависимости определяется конкретной технологией напыления ИФ).

Проблема технологии напыления интерференционных покрытий на сферические поверхности коротко изложена в монографии (см. п. 13.1.2 в [11]). *Комментарий. Физическая причина трудностей этой технологии заключается в разном результате воздействия силы тяжести на микрокапли, осаждающиеся в верхней точке выпуклой поверхности сферической поверхности мениска и на периферии от неё. Для решения технологической задачи получения равномерности толщины напыляемых слоев узкополосного сферического фильтра и, как следствие, одинаковости полосы пропускания по всей поверхности сферы, необходимо, чтобы подложка (мениск) вращалась в трёх плоскостях по заданному закону, позволяющему максимально компенсировать этот эффект. В России напыление широкополосных зеркал конфокальных резонаторов квантовых генераторов (на основе смеси He – Ne) с малыми углами расходимости луча начали использовать ещё с 70-х гг., но эта технология не подходит для изготовления узкополосных интерференционных фильтров на сфере.*

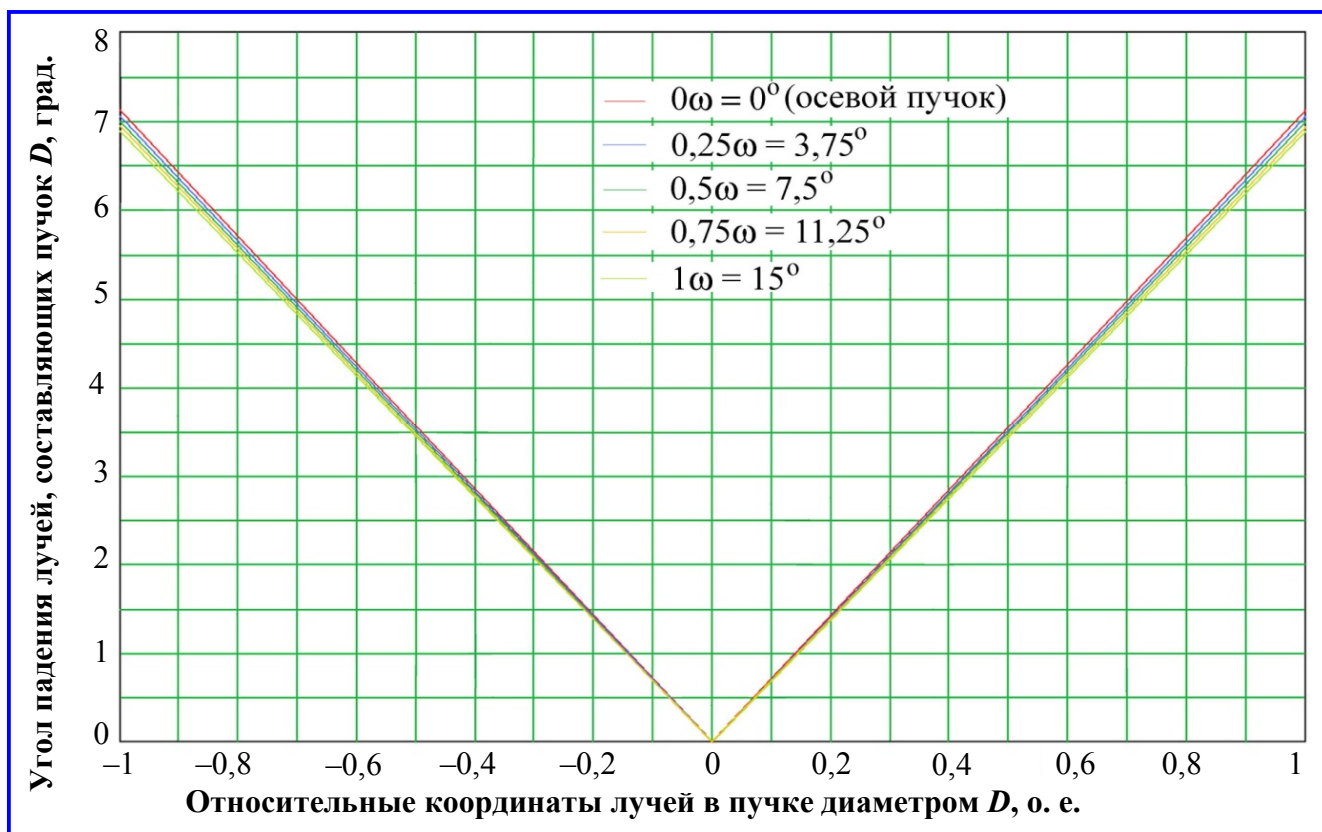


Рис. 3. Зависимости углов падения лучей (в пучке D) от координат лучей в пучке

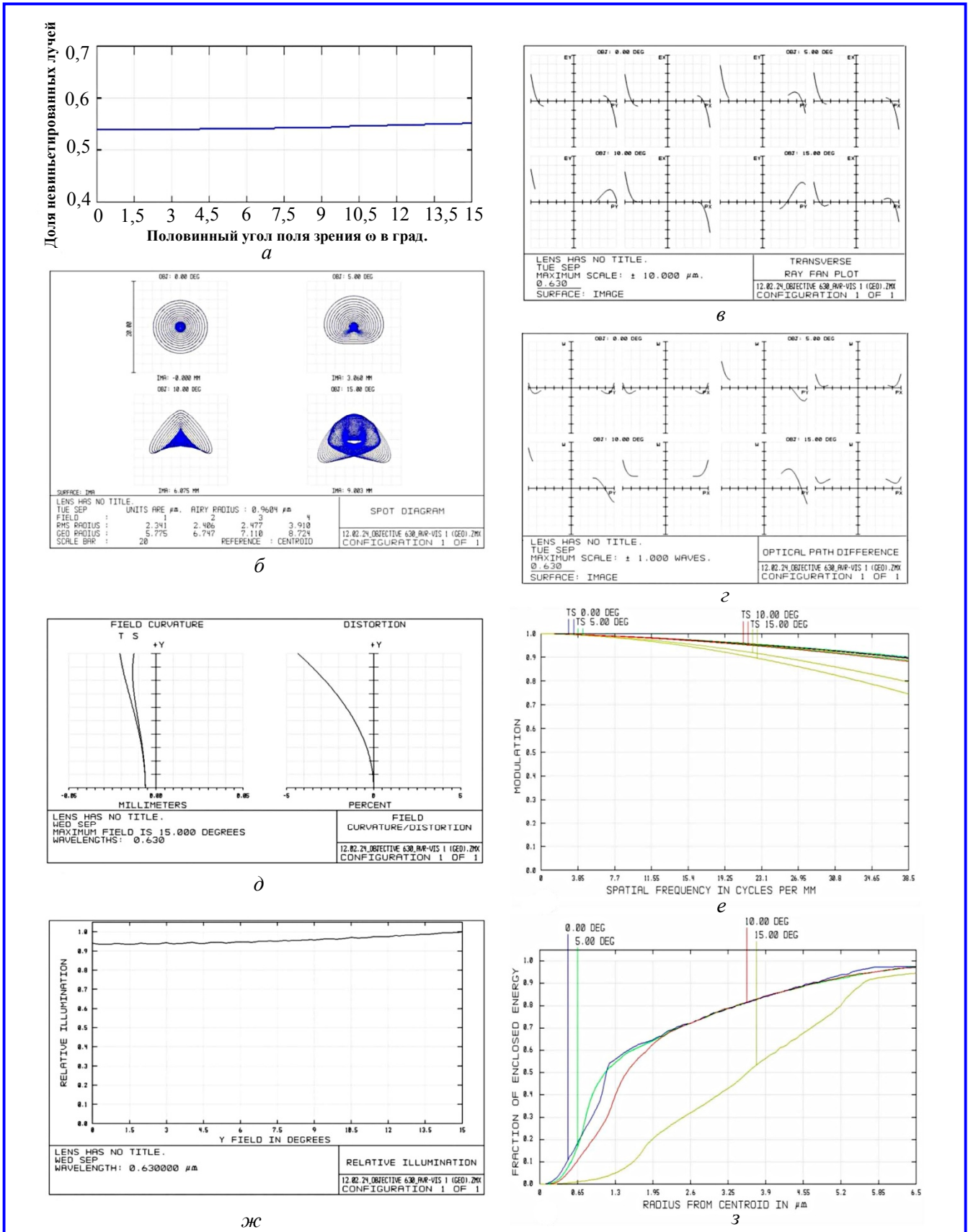


Рис. 4. Аберрационные и другие характеристики оптической схемы со сферическим интерференционным фильтром (СИФ), показанной на рис. 1

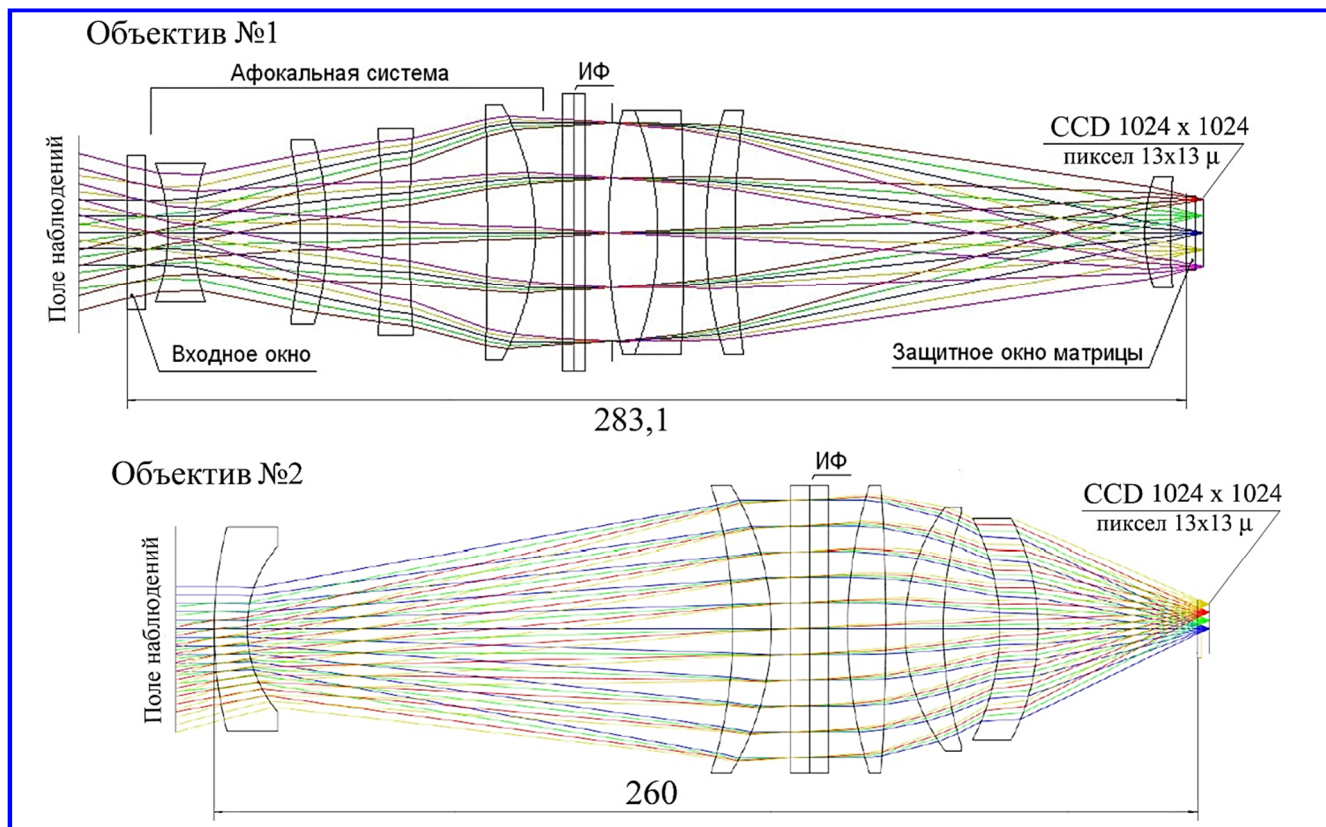


Рис. 5. Варианты телецентрической оптической схемы объектива аврорального имаджера с использованием плоского узкополосного фильтра ($\delta\lambda \sim 2$ нм)

Классическая телецентрическая оптическая схема монохроматического аврорального имаджера с плоским интерференционным фильтром (перевернутая труба Галилея) в [7] была рассмотрена в двух вариантах: специалистами ИКИ РАН (объектив № 2) и специалистами АО «НПП «Геофизика-Космос» (объектив № 1), они показаны на рис. 5 внизу и вверху соответственно. Схемы объективов рассчитаны для измерений эмиссии $\lambda = 630,0$ нм [ОИ]. Диаметр входного зрачка объектива № 1 17,6 мм, световой диаметр фильтра 68 мм. Диаметр входного зрачка объектива № 2 – 23 мм, световой диаметр фильтра – 68 мм.

Основные характеристики варианта оптической схемы с плоским ИФ, полученные в АО «НПП «Геофизика-Космос» для эмиссии $\lambda = 630$ нм [ОИ], представлены в табл. 2.

Плоские интерференционные фильтры применялись в наземной авроральной фотометрии еще со времён МГГ. Свойства плоского узкополосного ИФ были изучены, например в [12]. В дальнейшем развивались технология и аппаратура для напыления, а также состав напыляемых материалов, что позволило успешно использовать плоские узкополосные ИФ в первых бортовых авроральных фото-

метрах с углами полей зрения в несколько градусов на низкоорбитальных спутниках «ISIS-II» и «AE-C» [13 – 15], и более поздних «Ореол-3» [16], «ИК-Болгария-1300» [17, 18], а в наземной авроральной фотометрии и астрономических наблюдениях они используются и в настоящее время.

На рис. 6 показана полоса пропускания плоского интерференционного фильтра со световым диаметром 68 мм, изготовленного по одной из самых передовых технологий канадской фирмой «Keo Scientific», руководит которой известный специалист в авроральной физике Т. Trondsen (Canada). $\delta\lambda$ – ширина полосы пропускания на половине высоты

Таблица 2

Основные характеристики оптической системы с плоским ИФ	Оптический канал № 1
Рабочая длина волны излучения $\lambda_{\text{ср}}$, нм	630
Угловое поле 2ω , угл. град.	30
Фокусное расстояние f' , мм	$35,13 \pm 0,35$
Относительное отверстие D/f'	1 : 2

(полуширина), красным цветом показана полоса в центре подложки фильтра, а синим пунктиром – на краю подложки. На рис. 7 показаны зависимости смещения (красным) максимума полосы пропускания и её уширения (синим) от угла падения лучей φ (от нормали) на ИФ. Полуширина пропускания ИФ для орбитального имаджера $\delta\lambda \sim 2$ нм является оптимальной в соответствии с критерием пропускания паразитного излучения в «крыльях» полосы и зависимости положения максимума полосы пропускания от температуры. Основной задачей расчета телецентрической схемы, включающей плоский ИФ, было найти ему оптимальное место в оптической схеме, в котором углы падения периферийных лучей (в рамках угла поля зрения $2\omega = 30^\circ$) были бы не более $4,5 - 5^\circ$, что принципиально важно для минимизации пропускания фильтром паразитного фона из-за уширения полосы пропускания на больших углах падения (рис. 7, синий цвет). Аберрационные и другие характеристики оптической схемы с плоским интерференционным фильтром (ИФ) АО «НПП «Геофизика-Космос» (рис. 6, вверху) показаны на рис. 8: *a* – зависимость угла падения главных лучей от номера пиксела матрицы; *b* – пятна рассеяния на углах $0, 5, 10, 15^\circ$; *v* – графики геометрических аберраций; *z* – графики волновых аберра-

ций; *d* – графики астигматических отрезков и дисторсии; *e* – модуляционно-передаточная функция; *жс* – относительная освещённость по угловому полю; *з* – основной критерий качества – концентрация энергии в пятне рассеяния точки.

Характеристики оптической схемы объектива с плоским ИФ, рассчитанной в ИКИ РАН (рис. 5, внизу) незначительно отличаются от характеристик, полученных в АО «НПП «Геофизика-Космос» и поэтому не показаны.

Сравнение аберрационных и других характеристик оптических схем с СИФ и с плоским ИФ (рис. 4 и рис. 8) позволяет прийти к выводу, что для аврорального монохроматического орбитального имаджера с углом поля зрения 30° схема с СИФ имеет преимущество, заключающееся в сочетании центричности оптических элементов с постоянством характеристик полосы пропускания фильтра для любого направления наблюдений в рамках угла поля зрения, и все это при качестве изображения близком к получающемуся для схемы с плоским ИФ. Стабильность спектрального положения максимума полосы пропускания и её ширины во всех направлениях наблюдений обеспечит инструментальную точность соотношения сигнал/фон, при этом измеряемое распределение интенсивности

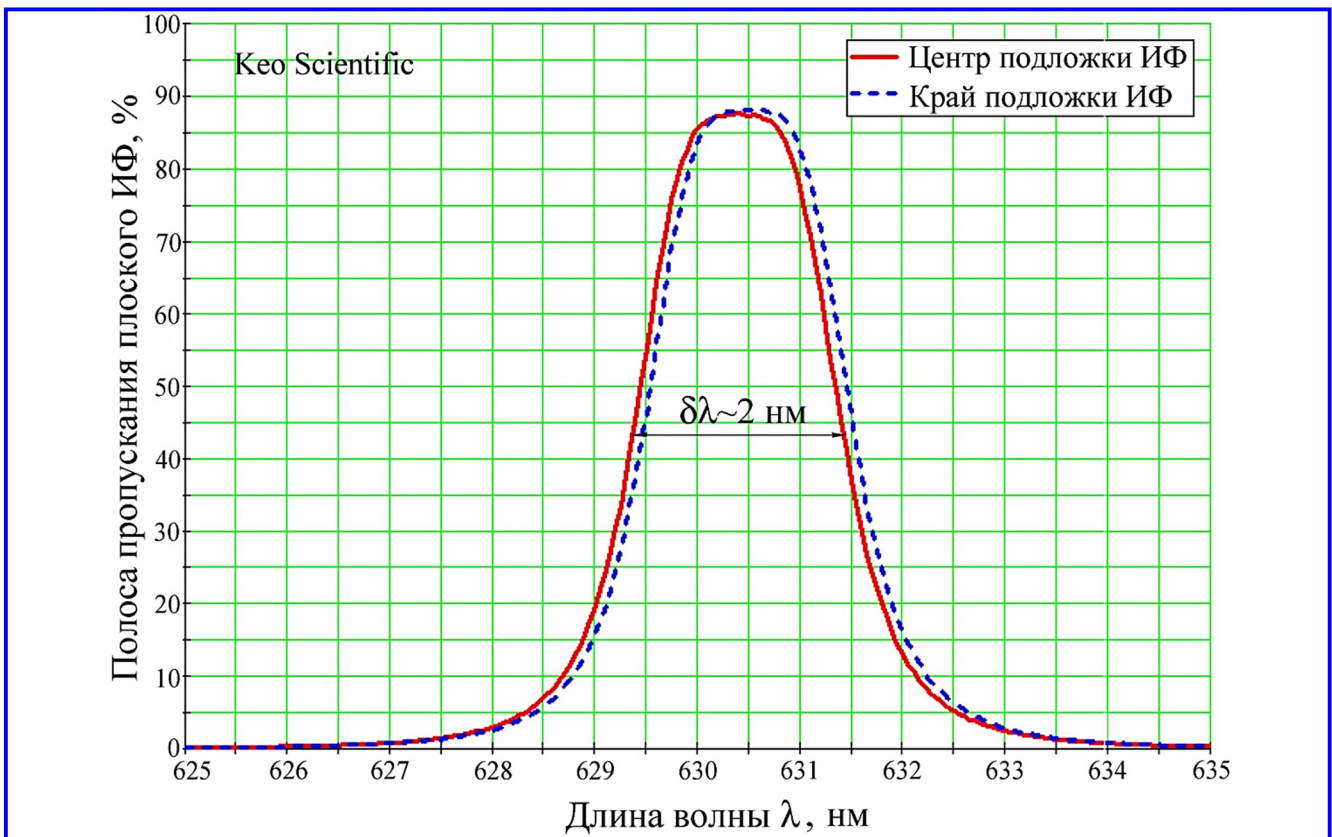


Рис. 6. Полоса пропускания плоского ИФ Keo Scientific, центрированная на эмиссию $\lambda = 630,0$ нм [О1]

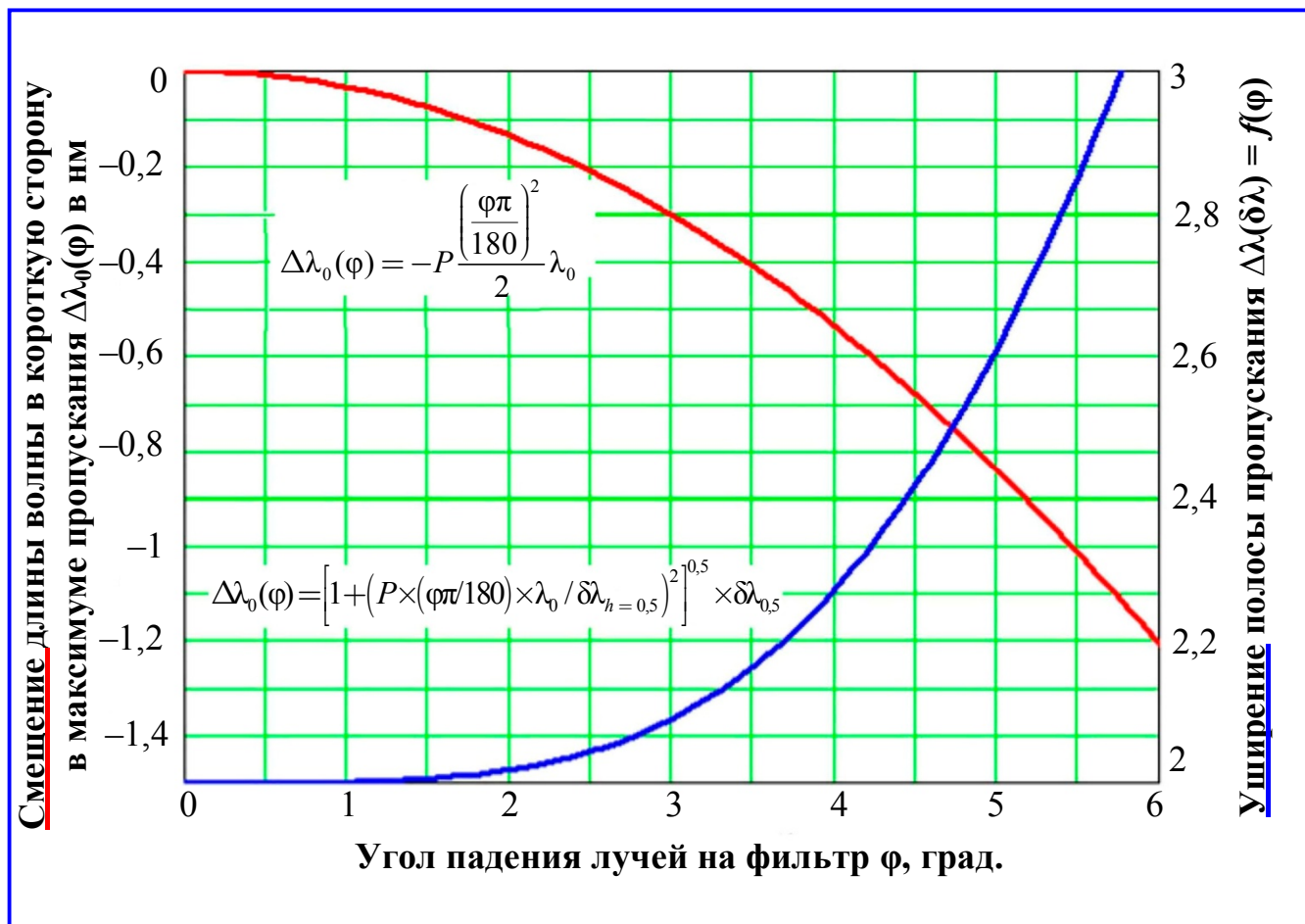


Рис. 7. Свойства плоского интерференционного фильтра в зависимости от угла падения лучей φ от нормали к фильтру

фона по изображению будет зависеть только от природных факторов. Центральное экранирование в схеме с СИФ – недостаток, но он с лихвой компенсируется преимуществами схемы. Недостатком является и отсутствие в России в настоящее время отработанной технологии, позволяющей изготавливать интерференционные фильтры с узкой полосой пропускания ($\delta\lambda \sim 2$ нм) на сферической поверхности [11], но, несомненно, он является временным и устранимым, учитывая интенсивное развитие технологий. По вышерассмотренным причинам на этапе ДЭП [7] разрабатываемого имаджера «Авровизор-ВИС/МП» в качестве рабочей была выбрана оптическая схема объектива с плоским ИФ (объектив № 2) по причине меньшего числа пропускающих элементов, но это не исключает возможности перехода к использованию оптической схемы с СИФ на следующем этапе разработки имаджера в случае развития соответствующих технологий.

Основными характеристиками аврорального имаджера являются:

а) количество эмиссий, интенсивность которых измеряется одновременно, синхронно и параллельно.

В аппаратуре «Авровизор-ВИС/МП» три параллельных изображающих канала, это число выбрано из минимального набора авроральных эмиссий, пространственное распределение интенсивности которых необходимо для дистанционной оценки потока энергии и средней энергии высыпавшихся электронов и протонов в рамках угла поля зрения. Выбраны следующие эмиссии: $\lambda = 630$ нм [OI], $\lambda = 427,8$ нм N_2^+1NG и $\lambda = 486,1$ нм (H_β) [6].

б) угол поля зрения $2\omega = 30^\circ$ в каждом изображающем канале, выбран исходя из требований обеспечения попадания в поле изображения проекции магнитной силовой линии, пересекаемой КА в момент экспозиции изображения [19]. Такой угол поля зрения позволяет всегда «видеть» интенсивность эмиссий (на соответствующих высотах), возбуждаемых высыпавшимися заряженными частицами, измеряемыми одновременно электростатическими анализаторами непосредственно в окрестности КА в момент экспозиции изображений;

в) соотношение сигнал/шум (S/N), зависящее как от квантовой эффективности детектора изоб-

ражений (CCD), так и от характеристик светозащитной бленды, установленной перед оптической схемой. От этих характеристик и характеристик пропускания оптической схемы, включая ИФ, зависит время экспозиции изображений и, как следствие, временное разрешение имаджера. В каналах имаджера «Авровизор-ВИС/МП» предполагается, что минимальное время экспозиции будет 0,05 с. В настоящее время рассматривается два основных варианта детекторов изображений: CCD матрица e2V 47-20 с числом пикселей 1024×1024 и CMOS матрица Gpixel inc. GSENSE400BSI с числом пикселей 2048×2048 . Обе матрицы имеют квантовую эффективность в спектральных областях измеряемых эмиссий в пределах 0,7 – 0,85;

г) максимальное пространственное разрешение на изображениях интенсивности авроральных эмиссий при времени экспозиции 0,1 с составляет $\sim 1,5 \times 1,5$ км (в режиме бинирования пикселей 2×2) на высоте 100 км, где расположен максимум интенсивности слоя свечения эмиссии $\lambda = 427,8$ нм;

д) критерии скважности (частоты) съёмки и соответственно оптимизации информационного потока с каналов аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» в отличие от критериев, выбираемых для глобальных крупномасштабных ВУФ-наблюдений всего аврорального овала с орбиты типа «Молния» [20] задаются требованиями методики 3D-реконструкций структур (или их фрагментов) по серии последовательных плоских изображений одних и тех же авроральных структур, полученных в изображениях под разными углами [21]. Исходя из упрощённой формулы базиса стереосъёмки $B \approx 0,03 \times L$ [22] предполагается, что частота съёмки, позволяющая получать 1 изображение (в каждом канале) в 3 секунды, обеспечит выполнение этих требований, при этом поток информации с трёх изображающих каналов составит $\sim 3,3$ Мбайт/с (~ 300 Мбайт за $\sim 1,5$ мин пересечения КА неосвещённого сектора аврорального овала). Технически в схематехнике имаджера предусмотрена возможность максимальной частоты съёмки три изображения в секунду.

Сравнение характеристик аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» с зарубежными аналогами. Сопоставление характеристик «Авровизор-ВИС/МП» с характеристиками двух зарубежных аналогов было проведено в табл. 1 в [6]. Из зарубежных бортовых имаджеров авроральных эмиссий в видимой области спектра, как уже упоминалось выше, известно только два: MAC [1] и FAI [2], с которыми были проведены наблюдения

авроральных эмиссий с полярных орбит малых КА «REIMEI (INDEX)» в 2005 – 2010 гг. и e-POP в 2013 – 2017 гг. соответственно.

Оба зарубежных авроральных имаджера были построены на основе спектральной селекции эмиссий с помощью плоских ИФ. Учитывая, что ориентация строительных осей перспективного КА «Метеор-МП» вокруг ц. м. будет строиться так, что ось ($-Z$) всегда будет направлена в нади́р, а угол поля зрения имаджера FAI на КА e-POP был $\Omega \sim 28^\circ$, то этот аналог был наиболее близок к «Авровизор-ВИС/МП» по ряду характеристик. С результатами наблюдений авроральных эмиссий с орбит вышеуказанных КА можно ознакомиться например в [23, 24]. Опыт наблюдений авроральных эмиссий в видимой области спектра с низких полярных орбит зарубежных КА был учтён при разработке российского имаджера и предполагается, что по ряду характеристик «Авровизор-ВИС/МП» будет превосходить аналоги MAC и FAI. Например, увеличение его угла поля зрения каждого канала до 30° , что всего на 2 градуса больше по сравнению с углом поля зрения имаджера FAI, позволит увеличить зону охвата локального участка аврорального овала.

ПО «Вектор-М» (вариант 2017) базовая программа-справочник для управления экспериментом в полёте и обработки данных изображений авроральных эмиссий, полученных с орбит КА. ПО «Вектор-М» было задумано и развивается на базе высокочисленной модели движения искусственных спутников Земли, т. е. с учётом всех возмущающих сил, которые влияют на точность при интегрировании дифференциального уравнения движения КА. Основной мотивацией при создании ПО было: обеспечить орбитальные геофизические измерения, включая оптические дистанционные, сопутствующей географической, геомагнитной и астрономической информацией как вдоль траектории ц. м., так и на заданных высотах конкретных векторов наблюдений (из точки ц. м.) в рамках угла поля зрения аврорального имаджера «Авровизор-ВИС-МП» [28].

С учётом данных контроля мгновенной ориентации строительных осей КА, а соответственно и осей оптических приборов, в пространстве. В качестве модели геомагнитного поля Земли была использована модель IGRF NASA совместно с пакетом программ GEOPACK-2008 [25]. Детали структуры ПО «Вектор-М» рассмотрены в работах [26 – 28], а очередной усовершенствованный вариант его блок-схемы показан на рис. 9.

В 2016 – 2017 гг. развитие программы происходило в части используемой модели геомагнитного

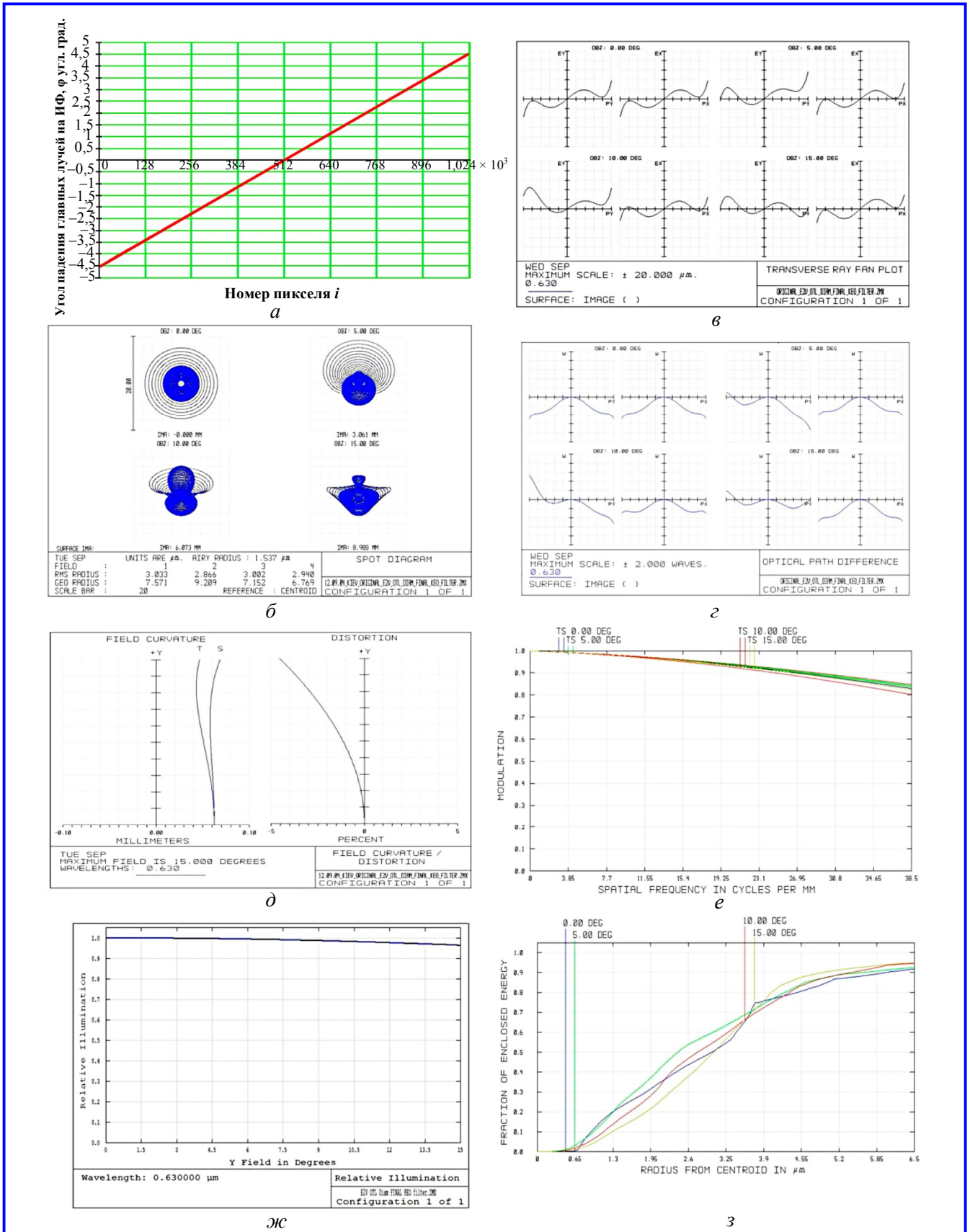


Рис. 8. Аберрационные и другие характеристики оптической схемы с плоским интерференционным фильтром (ИФ) АО «НПП «Геофизика-Космос» (рис. 6, сверху)

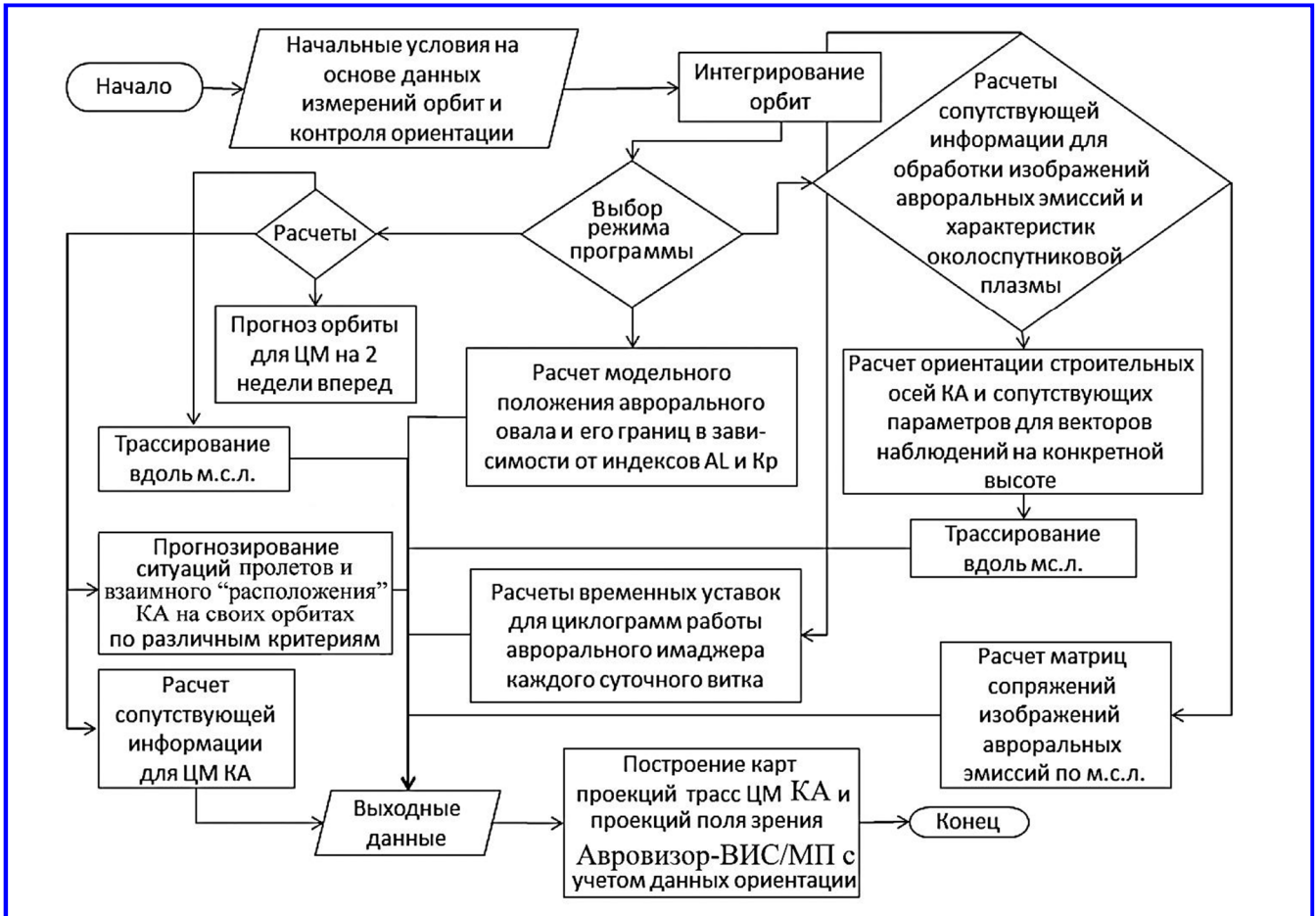


Рис. 9. Блок-схема ПО «Вектор-М» (вариант 2017) по расчётам орбит и сопутствующей географической, астрономической и геофизической информации вдоль орбит

поля, были разработаны новые блоки трассирования вдоль м. с. л. с высоты орбиты КА до высот максимумов интенсивности конкретных авроральных эмиссий, а также блок расчётов прогнозируемых ситуаций взаимного «расположения» в пространстве нескольких КА на разных орбитах одновременно [28]. Например, определение интервалов времени и координат пересечения несколькими КА одного и того же (см. выше) или разных секторов MLT северного аврорального овала, одновременного пересечения разными КА секторов северного и южного авроральных овалов, одновременных пролётов в окрестности конкретных пунктов на поверхности Земли и др., и ряд других ситуаций [29]. Для прогнозирования орбит, определения интервалов времени и идентификации областей частичного «наложения» полей наблюдения эмиссий в авроральном овале двумя имаджерами одновременно с разных орбит КА был разработан специальный подблок ПО с учётом углов полей зрения и расположения приборов на двух разных перспективных КА «Метеор-МП» и «Зонд» [21].

Заключение

Рассмотрены два варианта оптических схем монохроматических объективов для спектральных каналов готовящегося аврорального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» в составе ГТАК-МП для перспективной орбитальной миссии «Метеор-МП». Выявлены преимущества характеристик новой схемы со сферическим интерференционным фильтром перед схемой с плоским фильтром. Схема объектива с СИФ по своим характеристикам более предпочтительна, но изготовление узкополосного интерференционного фильтра на сферическом мениске пока не удаётся реализовать из-за отсутствия оборудования и современной технологии напыления диэлектрических материалов на сферическую поверхность. Поэтому основным рабочим вариантом на этапе ДЭП остаётся оптическая схема спектральных каналов имаджера, в которой селекция авроральных эмиссий в угле поля зрения осуществляется узкополосным плоским фильтром. Проанализированы характеристики аппаратуры «Авровизор-ВИС/МП» по сравнению с зарубежными авроральными имаджерами в видимой обла-

сти спектра, работавшими на низкоорбитальных малых КА. Изображения водородной эмиссии в канале 3, получаемые одновременно с эмиссиями, возбуждаемыми электронами (каналы 1 и 2), позволяют дистанционно контролировать энергетические характеристики высыпающих протонов, при этом проекция м. с. л. на высоту измеряемой эмиссии в авроральных широтах всегда будет находиться в поле изображения всех каналов. Рассмотрена блок-схема развития блоков ПО «Вектор-М», предназначенных для использования при управлении процессом наблюдений. Прогнозирование орбиты для проведения целевых измерений над конкретными пунктами, обработки получаемых изображений авроральных эмиссий, привязки их к координатным сеткам (географической и геомагнитной) с учётом данных контроля ориентации строительных осей КА, оснащение изображений сопутствующей геофизической и астрономической информацией на высотах измеряемых эмиссий для картографирования характеристик ионосферы, получаемых из изображений. Трассирование вдоль м. с. л. (в момент экспозиции изображений эмиссий) от ц. м. КА до высот их максимума интенсивности позволит контролировать процесс потери энергии высыпавшимися заряженными частицами от высоты КА до подножной точки м. с. л. в изображении эмиссий.

Сокращения

ВУФ – вакуумный ультрафиолет
 ГГЭК-МП – гелиогеофизический аппаратный комплекс на КА «Метеор-МП»
 ДЭП – дополнительный эскизный проект
 ИФ – интерференционный фильтр
 МГТ – международный геофизический год 1957 – 1958
 КА – космический аппарат
 м. с. л. – магнитная силовая линия
 НПП – научно-производственное предприятие
 ПО – программное обеспечение
 СИФ – сферический интерференционный фильтр
 ц. м. – центр масс КА
 CCD – Charge Couple Device
 e-POP – Enhanced Polar Outflow Probe
 FAI – Fast Auroral Imager
 MAC – Multispectral Auroral Camera
 MLT – Magnetic Local Time
 REIMEI (INDEX) – small Japan satellite
 TEC – Total Electron Content

Авторы благодарят сотрудников АО «НПП «Геофизика-Космос»: В. А. Бойко, А. С. Губского, А. Я. Гебгарта, Е. И. Князеву, Е. А. Шатову, а также сотрудника ИКИ РАН А. Л. Ясковича за участие в ДЭП «Авровизор-ВИС/МП» в части расчётов вариантов оптических схем.

Литература

1. Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite // *Earth Planets Space*. – 2008. – V. 60. – P. 827 – 835.
2. Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // *Space Sci. Rev.* – 2014. – V. 189. – P. 15 – 25. DOI:10.1007/s11214-014-0107-x.
3. Vondrak R. R., Murphree J. S., Anger C. D., Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS 2 auroral scanning photometer // *Radio Sci.*, 20. – 1985. – № 3. – Pp. 439 – 446.
4. Meng C.-I., Huffman R. E., Scrivanek R. A., Strickland D. J., Daniell R. E., Jr. Remote sensing of ionosphere by using ultraviolet and visible emissions // *Proceedings of SPIE*. – 1986. – V. 687. *Ultraviolet Technology*. – P. 62 – 72.
5. Steel D. P., and McEwen D. J., Electron auroral excitation efficient and intensity ratios // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – V. 95, A7. – Pp. 10321 – 10336.
6. Кузьмин А. К., Мерзлый А. М., Банышикова М. А., Чувашов И. Н., Крученицкий Г. М., Потанин Ю. Н., Моисеев П. П. Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером «Авровизор-ВИС/МП» на перспективном КА «Метеор-МП» // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. Материалы четвёртой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»*. – М. : АО «Корпорация ВНИИЭМ». – 2016. – С. 325 – 341. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201702.PDF>.
7. ДЭП (Дополнение к эскизному проекту на ГГЭК-МП в части трёхканального имаджера видимого диапазона Авровизор-ВИС/МП). Пояснительная записка ЦИНВ. 412125.005, 2015, 163 с.
8. Кузьмин А. К., Банышикова М. А., Доброленский Ю. С., Крученицкий Г. М., Маслов И. А., Мерзлый А. М., Моисеев П. П., Потанин Ю. Н., Чувашов И. Н. Характеристики создаваемого орбитального имаджера «Авровизор-ВИС/МП» и перспективы использования авроральных изображений для исследований процессов в полярной ионосфере и оптического контроля неоднородности условий, влияющих на распространение сигналов // *Сб. ИКИ РАН «Практические аспекты гелиогеофизики»*. – 2016. – С. 114 – 133. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201601.PDF>.
9. Кузьмин А. К., Чиков К. Н. Панорамные изображающие монохроматические камеры для дистанционной диагностики характеристик ионосферы и верхней атмосферы с ИСЗ // *Оптика атмосферы и океана*. – 1995. – Т. 8. – № 6. – С. 897 – 909. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199501.PDF>.
10. Кузьмин А. К. и Чиков К. Н. Устройство для построения монохроматического изображения. Патент

- № 2112263. Патентообладатель Государственный Санкт-Петербургский институт точной механики и оптики (технический университет), 14.12.1995. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199502.PDF>.
11. Macleod H. A. Thin-film optical filters. 4 edition. – CRC Press, 2010. – 772 pages. – (Series in optics and optoelectronics).
12. Blifford I. H. Jr., Factors Affecting the Performance of Commercial Interference Filters // Applied Optics. – 1966. – Vol. 5. – Issue 1. – Pp. 105 – 111.
13. Anger C. D., Fancott T., McNally J., Kerr H.S. ISIS-II scanning auroral photometer // Appl. Opt. – 1973. – 12. – № 8. – Pp. 1753–1766.
14. Shepherd G. G., Fancott T., McNally J., Kerr H. S. Isis-II atomic red line photometer // Appl. Opt. – 1973. – V. 12. – № 8. – Pp. 1767–1774.
15. Hays P. B., Carignan G., Kennedy B. C., Shepherd G. G., Walker J. C. G., The visible airglow experiment on Atmosphere Explorer // Radio Sci. – 1973. – V. 8. – № 4. – Pp. 369–377.
16. Gladyshev V. A., Kuzmin A. K., Mularchik T. M., Angarov V. N., Issaikin V. P., Sauvaud J. A. Auroral photometers aboard the Aureol-3 satellite the Altair experiment // Ann. Geophys. – 1982. – Т. 38. – Fasc. 5. – Pp. 631 – 634. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198201.pdf>.
17. Gogoshev M., Petkov N., Kuzmin A., Gogosheva Ts., Spasov St., Kostadinov I., Airglow atmospheric imager on board the «ИК-Bulgaria-1300» satellite // Adv. Space Res. – 1983. – V. 2. – № 7. – С. 115 – 120.
18. Петков Н. П., Гогошева Ц. Н., Гогошев М. М., Кузьмин А. К., Ангаров В. Н. Фотометрическая сканирующая система ЭМО-5 на борту ИСЗ «ИК-Болгария-1300» // Сб. Научное космическое приборостроение. – Вып. 2 (оптико-электронные приборы). – М.: Металлургия, 1983. – С. 77 – 83. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198303.pdf>.
19. Кузьмин А. К. Дистанционная спектрофотометрическая диагностика характеристик авроральной ионосферы с орбит зарубежных и перспективных российских КА // Препринт ИКИ РАН, Пр-2161, 2011. – 49 с.
20. Donovan E., Uritsky V.M., Unick C., Troyan V. Data-derived optimization of sensitivity requirements for upcoming auroral imaging missions // Journ. Geophys. Res. – 2017. – V. 122. – Issue 9. – Pp. 9358 – 9370.
21. Кузьмин А. К., Баныщикова М. А., Чувашов И. Н. [и др.]. Преимущества наблюдений авроральных структур с двух орбит и возможности для реконструкций 3D-распределений эмиссий, получаемых с разных позиций / А. К. Кузьмин, М. А. Баныщикова, И. Н. Чувашов, Г. М. Крученицкий, Ю. Н. Потанин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – Т. 158. – № 3. – С. 7 – 21.
22. Berkovitz J., Image-side perspective and stereoscopy, Proceedings of SPIE. – 1998. – V. 3295. – P. 288 – 298.
23. Lui A. T. Y., Cogger L. L., Howarth A., Yau A. W., First satellite imaging of auroral pulsations by the FAST Auroral Imager on e-POP // Geophys. Res. Lett, 42, 6877–6882. – doi:10.1002/2015GL065331, 2015.
24. Frey H. U., Amm O., Chaston C. C., Fu S., Haerendal G., Jusola L., Karlsson T., Lanchester B., Nakamura R., Ostgaard N., Sakanoi T., Seran E., Whiter D., Weygand J., Asamura K., Hirahara M., Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc // Journ. Geophys. Res. – V. 115, A10209. – doi:10.1029/2010JA015537, 2010.
25. Tsyganenko N. A., Geopack: A set Fortran subroutines for computations of the geomagnetic field in the Earth's magnetosphere. Available from <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html> (last accessed 13.05.2013).
26. Баныщикова М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К. Прикладная программная система «Вектор-М» для расчета сопутствующей геофизической и астрономической информации для пространства наблюдений в эксперименте «Авровизор-ВИС/МП» на КА «Метеор-МП» / М. А. Баныщикова, И. Н. Чувашов, А. К. Кузьмин // Изв. вузов. Физика. – М.: ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 2012. – № 10/2. – С. 106 – 111. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201201.pdf>.
27. 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» / М. А. Баныщикова, И. Н. Чувашов, А. К. Кузьмин // Изв. вузов. Физика. – М.: ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 2013. – № 10/2. – С. 174 – 180. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201301.pdf>.
28. Avdyushev V. A., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K., Kruchenitskiy G. M., Capabilities of software «Vector-M» for diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from different orbits as a part of the system of control of space weather // Poster Report at European Planetary Science Congress EPSC2017, Riga Sept. 2017. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017EPSC.pdf>; <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017Riga1.pdf>.
29. Баныщикова М. А., Чувашов И. Н., Кузьмин А. К., Крученицкий Г. М. Влияние сопряжений по магнитному полю элементов изображений авроральных эмиссий на точность определения E_{cp} высыпающихся электронов / М. А. Баныщикова, И. Н. Чувашов, А. К. Кузьмин, Г. М. Крученицкий // Изв. вузов. Физика. – М.: ФГАОУВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», 2018. – Т. 61. – № 1. – С. 132 – 137. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201801.pdf>.

Поступила в редакцию 08.12.2017

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

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

Игорь Алексеевич Маслов, заведующий сектором, т. (495) 333-52-67, e-mail: iam49@mail.ru.
(ИКИ РАН).

Григорий Михайлович Крученицкий, доктор физико-математических наук, заведующий отделом,
т. (495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru.

Юрий Николаевич Потанин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
т. (495) 408-61-72, e-mail: omd@cao-rhms.ru.
(ФГБУ ЦАО Росгидромета).

VARIANTS AND SELECTION OF AN OPTICAL ARRANGEMENT, OPTIMIZATION OF CHARACTERISTICS OF ORBITAL AURORAL IMAGER AUROVISOR-VIS/MP AND ITS COMPARISON WITH FOREIGN ANALOGS

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

Small-scale remote orbital measurements of distribution of luminous intensity of specified auroral emissions in the night-time polar ionosphere over the observation area of several hundreds of kilometers with simultaneous direct measurements of distribution of charged particles fluxes and longitudinal currents near the spacecraft using the heliogeophysical system instruments are considered to be the main purpose of development of auroral imager «Aurovisor-VIS/MP» intended for ensuring the local remote monitoring of the state of ionosphere characteristics from the «Meteor-MP» orbit. The field-of-view angle, selection of emissions, spectral and spatial resolution defined by a quasi-monochromatic optical arrangement and its aberrations, time resolution and sensitivity defined by image detector characteristics, minimal exposure time and imaging frequency, number of spectral imaging channels defined by scientific purposes and dependent on agreed mass and dimension characteristics, synchronization of exposures with measurements of plasma characteristics, rate of data exchange with on-board systems jointly determine the opportunities and advantages of the forthcoming experiment. Development of «Vektor-M» special software and its block diagram ensuring new program functions needed for the observation process control and data processing are briefly described.

Key words: orbital auroral imager, variants and specific features of an optical arrangement, measurements of ionosphere and upper atmosphere emissions, remote diagnostics of polar ionosphere.

List of References

1. Obuchi Y., Sakanoi T., Yamazaki A., Ino T., Okano S., Kasaba Y., Hirahara M., Kanai Y., Takeyama N. Initial observations of auroras by the multi-spectral auroral camera on board the Reimei satellite // *Earth Planets Space*. – 2008. – V. 60. – P. 827 – 835.
2. Cogger L., Howarth A., Yau A., White A., Enno G., Trondsen T., Asquin D., Gordon B., Marchand P., Ng D., Burley G., Lessard M., Sadler B. Fast Auroral Imager (FAI) for e-POP Mission // *Space Sci. Rev.* – 2014. – V. 189. – P. 15 – 25. DOI:10.1007/s11214-014-0107-x.
3. Vondrak R. R., Murphree J. S., Anger C. D., Remote sensing of high-latitude ionization with the ISIS 2 auroral scanning photometer // *Radio Sci.*, 20. – 1985. – No. 3. – Pp. 439 – 446.
4. Meng C.-I., Huffman R. E., Scrivanek R. A., Strickland D. J., Daniell R. E., Jr. Remote sensing of ionosphere by using ultraviolet and visible emissions // *Proceedings of SPIE*, 1986. – V. 687. *Ultraviolet Technology*. – P. 62 – 72.
5. Steel D. P., and McEwen D. J., Electron auroral excitation efficient and intensity ratios // *Journ. Geophys. Res.* – 1990. – V. 95, A7. – Pp. 10321 – 10336.
6. Kuzmin A. K., Merzlyi A. M., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kruchenitskii G. M., Potanin Iu. N., Moiseev P. P. Applied aspects of measurements of auroral emissions and characteristics of the polar ionosphere by the Aurovisor-VIS/MP on the perspective spacecraft Meteor-MP // *Electromechanical matters. VNIIEEM studies. Appendix 2016. Proceedings of 4th International Scientific and Technical Conference «Current issues of development of Earth remote sensing space systems»*. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2016. – Pp. 325 – 341. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201702.PDF>.
7. Supplement to preliminary design of GGAK-MP, the part covering the three-channel visible range imager Aurovisor-VIS/MP. Explanatory note ЦИИВ.412125.005, 2015, 163 p.
8. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Dobrolenskii Iu. S., Kruchenitskii G. M., Maslov I. A., Merzlyi A. M., Moiseev P. P., Potanin Iu.N., Chuvashov I. N. Characteristics of orbital imager Aurovisor-VIS/MP and prospects of using auroral images for investigation of processes in the polar ionosphere and optical monitoring of nonuniformity of conditions affecting signal propagation. Collected volume «Practical aspects of heliogeophysics» (IKI RAN), 2016. – Pp. 114 – 133. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201601.PDF>.

9. Kuzmin A. K., Chikov K. N. Panoramic imaging monochromatic cameras for remote diagnostics of ionosphere and upper atmosphere characteristics from satellites // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 1995. – Vol. 8. – No. 6. – Pp. 897 – 909. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199501.PDF>.
10. Kuzmin A. K., Chikov K. N. Monochromatic imaging device. Patent No. 2112263. Patent holder: Saint Petersburg State Institute of Fine Mechanics and Optics (technical university), 14.12.1995. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/199502.PDF>.
11. Macleod H. A. Thin-film optical filters. 4 edition. – CRC Press, 2010. – 772 pages. – (Series in optics and optoelectronics).
12. Blifford I. H. Jr., Factors Affecting the Performance of Commercial Interference Filters // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5. – Issue 1. – Pp. 105 – 111.
13. Anger C. D., Fancott T., McNally J., Kerr H.S. ISIS-II scanning auroral photometer // *Appl. Opt.* – 1973. – 12. – No. 8. – Pp. 1753 – 1766.
14. Shepherd G. G., Fancott T., McNally J., Kerr H.S. Isis-II atomic red line photometer // *Appl. Opt.* – 1973. – V. 12. – No. 8. – Pp. 1767 – 1774.
15. Hays P. B., Carignan G., Kennedy B. C., Shepherd G. G., Walker J. C. G., The visible airglow experiment on Atmosphere Explorer // *Radio Sci.* – 1973. – V. 8. – No. 4. – Pp. 369 – 377.
16. Gladyshev V. A., Kuzmin A. K., Mularchik T. M., Angarov V. N., Issaikin V. P., Sauvaud J. A. Auroral photometers aboard the Aureol-3 satellite the Altair experiment // *Ann. Geophys.* – 1982. – T. 38. – Fasc. 5. – Pp. 631 – 634. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198201.pdf>.
17. Gogoshev M., Petkov N., Kuzmin A., Gogosheva Ts., Spasov St., Kostadinov I., Airglow atmospheric imager on board the IK-Bulgaria-1300 satellite // *Adv. Space Res.* – 1983. – V. 2. – No. 7. – C. 115 – 120.
18. Petkov N. P., Gogosheva Ts. N., Gogoshev M. M., Kuzmin A. K., Angarov V. N. Photometric scanning system EMO-5 on board the IK-Bulgaria-1300 satellite // *Collected volume «Scientific space instrumentation»*. – Issue 2 (optoelectronic instruments). – Moscow : Metallurgy, 1983. – Pp. 77 – 83. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/198303.pdf>.
19. Kuzmin A. K. Remote spectrophotometric diagnostics of auroral ionosphere characteristics from the orbits of foreign and advanced Russian spacecraft // *Preprint of IKI RAN*, No. 2161, 2011. – 49 p.
20. Donovan E., Uritsky V. M., Unick C., Troyan V. Data-derived optimization of sensitivity requirements for upcoming auroral imaging missions // *Journ. Geophys. Res.* – 2017. – V. 122. – Issue 9. – Pp. 9358 – 9370.
21. Kuzmin A. K., Banshchikova M. A., Chuvashov I.N. [et al.]. Advantages of observation of auroral structures from two orbits and possibilities for reconstruction of 3D emission distributions received from different positions / A. K. Kuzmin, M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, G. M. Kruchenitskii, Iu. N. Potanin // *Electromechanical matters. VNIIEEM studies*. – Moscow : JC «VNIIEEM Corporation», 2017. – Vol. 158. – No. 3. – Pp. 7 – 21.
22. Berkovitz J., Image-side perspective and stereoscopy, *Proceedings of SPIE*. – 1998. – V. 3295. – P. 288 – 298.
23. Lui A. T. Y., Cogger L. L., Howarth A., Yau A. W., First satellite imaging of auroral pulsations by the FAST Auroral Imager on e-POP // *Geophys. Res. Lett*, 42, 6877–6882. – doi:10.1002/2015GL065331, 2015.
24. Frey H. U., Amm O., Chaston C. C., Fu S., Haerendal G., Jusola L., Karlsson T., Lanchester B., Nakamura R., Ostgaard N., Sakanoi T., Seran E., Whiter D., Weygand J., Asamura K., Hirahara M., Small and meso-scale properties of a substorm onset auroral arc // *Journ. Geophys. Res.* – V. 115, A10209. – doi:10.1029/2010JA015537, 2010.
25. Tsyganenko N. A. Geopack: A set Fortran subroutines for computations of the geomagnetic field in the Earth's magnetosphere. Available from <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html> (last accessed 13.05.2013).
26. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Application software system Vektor-M for calculation of relevant geophysical and astronomical information for the observation space in the experiment with Aurovisor-VIS/MP on the Meteor-MP spacecraft / M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin // *Russian Physics Journal*. – Moscow : National Research Tomsk State University, 2012. – No. 10/2. – Pp. 106 – 111. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201201.pdf>.
27. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K. Preliminary results of calculation of attendant geophysical and astronomical information for the experiment with Aurovisor-VIS/MP on the perspective Meteor-MP spacecraft / M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin // *Russian Physics Journal*. – Moscow : National Research Tomsk State University, 2013. – No. 10/2. – Pp. 174 – 180. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201301.pdf>.
28. Avdyushev V. A., Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K., Kruchenitskiy G. M., Capabilities of software «Vektor-M» for diagnostics of the ionosphere state from auroral emissions images and plasma characteristics from different orbits as a part of the system of control of space weather // *Poster Report at European Planetary Science Congress EPSC2017, Riga Sept. 2017*. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017EPSC.pdf>; <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/2017Riga1.pdf>.
29. Banshchikova M. A., Chuvashov I. N., Kuzmin A. K., Kruchenitskii G. M. Influence of auroral emission image elements conjugation with respect to the magnetic field on the accuracy of determination of $E_{average}$ of precipitating electrons / M. A. Banshchikova, I. N. Chuvashov, A. K. Kuzmin, G. M. Kruchenitskii // *Russian Physics Journal*. – Moscow : Na-

tional Research Tomsk State University, 2018. – Vol. 61. – No. 1. – Pp. 132 – 137. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201801.pdf>.

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

Maria Aleksandrovna Banshchikova, *Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Associate Professor,*
tel.: (3822) 529-776, e-mail: mba-tomsk@mail.ru.
(Scientific Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University)

Igor Alekseevich Maslov, *Head of Sector,* tel.: (495) 333-52-67, e-mail: iam49@mail.ru.
(IKI RAN).

Grigorii Mikhailovich Kruchenitskii, *Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Head of Department*
tel.: (495) 408-61-41, e-mail: omd@cao-rhms.ru.

Iurii Nikolaevich Potanin, *Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Senior Researcher,*
tel.: (495) 408-61-72, e-mail: omd@cao-rhms.ru.
(Federal State-Funded Institution Central Aerological Observatory of Roshydromet).