

на правах рукописи

**Орлов Андрей Геннадьевич**

**Разработка и исследование авиационного  
гиперспектрометра видимого и ближнего  
ИК диапазонов**

Специальность 01.04.01.– Приборы и методы экспериментальной физики

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 2008

Работа выполнена в Институте химической физики РАН имени Н.Н. Семенова

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, Калинин Александр Петрович

доктор физико-математических наук, Родионов Игорь Дмитриевич

Официальные оппоненты:

д.ф.-м.н., профессор, Линкин Вячеслав Михайлович

д.т.н., профессор, Лабунец Леонид Витальевич

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2008 г. в \_\_\_\_ часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.113.01 при Институте  
космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ГСП-7,  
ул. Профсоюзная, д. 84/32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института космических  
исследований РАН.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.ф.-м.н.



АКИМОВ В.В.

**Актуальность работы.** В последние годы в мировой практике аэрокосмического мониторинга земной поверхности наблюдается все более активное внедрение методов и средств гиперспектральной съемки. В связи с этим имеет место переход от традиционных многозональных измерений к гиперспектральным, что позволяет не только увеличивать количество получаемой информации о Земле, но и обеспечивать регистрацию качественно новых ранее недоступных данных высокого спектрального и пространственного разрешения. Результаты гиперспектральных измерений могут эффективно использоваться для решения сложных задач обнаружения малоразмерных объектов, идентификации объектов исследуемой поверхности, определения их состояния и динамики, выделения различий между близкими классами.

Отличие гиперспектральных данных от многозональных заключается в большем числе спектральных каналов (до нескольких сотен) и лучшем спектральном разрешении (до единиц нм и менее). Это позволяет проводить анализ снимков на принципиально новом уровне:

- выявлять узкие линии поглощения, характерные для минеральных веществ, газов и воды, проводить их идентификацию и определять концентрацию;
- к гиперспектральным данным применимы методы распознавания спектральных характеристик, которые применяются для многозональных данных (спектрального угла, максимума правдоподобия, расстояния Махаланобиса и т.д.), но при этом вероятностные характеристики распознавания существенно улучшаются за счет большего числа спектральных каналов, а значит большей статистики и информативности;
- как и для многозональных данных, для гиперспектральных возможно вычисление индексных оценок состояния растительности типа вегетационных индексов, но при этом результаты обработки получаются более точными и устойчивыми за счет высокого спектрального разрешения, кроме этого появляется возможность использования скорректированных вегетационных индексов с дополнительными каналами;

- имеется возможность вычислять оценки, которые принципиально невозможно определить по многозональным данным, например, положение красной границы для растительности.

На пути развития и широкого внедрения аэрокосмической гиперспектрометрии встает ряд объективных и субъективных факторов, сдерживающих этот процесс во многих странах. В России среди таких факторов можно выделить следующие: отсутствие должного финансового обеспечения работ, современной элементной базы, эффективных методов предварительной и тематической обработки гиперспектральной информации. Кроме того, гиперспектрометры в основном существуют на уровне проекта, т.е. создания схмотехнических решений или отдельных элементов прибора. Это делает особенно важной разработку нового класса отечественных гиперспектрометров, сравнимых и даже превосходящих по своим параметрам зарубежные аналоги.

В связи с этим, тематика настоящей диссертационной работы, посвященной разработке перспективного отечественного гиперспектрометра, представляется актуальной и учитывающей злободневные потребности российской науки, промышленности и военной отрасли.

### **Цель работы**

Выполненные в диссертации исследования и разработки направлены на:

- разработку методики расчета основных параметров авиационного гиперспектрометра, в котором разложение излучения в спектр осуществляется на стеклянной призме (расчет пространственного и спектрального разрешения, чувствительности, отношения сигнал/шум для типовых условий съемки);
- создание прототипа гиперспектрометра с возможностью установки на авиационную платформу;

- лабораторное исследование характеристик созданного прототипа (пространственное разрешение, спектральное разрешение, спектральная чувствительность);
- разработка метода компенсации искажений гиперспектральных изображений, вызванных эволюциями носителя, по данным вспомогательной синхронной видеокамеры;
- разработка математических методов предварительной обработки гиперспектральных данных с целью исправления искажений, вызванных особенностями оптической схемы прибора;
- проведение полевых испытаний прототипа путем выполнения съемок как на Земле, так и с воздушного носителя;
- анализ полученных результатов и выработка рекомендаций для создания промышленных образцов гиперспектрометра.

### **Научная новизна работы**

В работе выполнены следующие оригинальные методические и технические разработки:

- впервые создана методика расчета элементов гиперспектрометра на базе стеклянной призмы. Методика включает: энергетический расчет, определение оптимальных углов прохождения светового потока в призме с точки зрения наилучшего спектрального разрешения и минимизации световых потерь, определение спектральной чувствительности и отношения сигнал/шум для типовых условий съемки, расчет спектрального и пространственного разрешения;
- спроектирован и изготовлен первый гиперспектрометр на стеклянной призме. Прибор является одним из первых действующих в России и по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам;
- разработана методика исследования характеристик гиперспектральной аппаратуры, а также методика ее калибровки, которая включает: калиб-

ровку спектральных каналов, радиометрическую калибровку, а также исправление дисторсий присущих призмённому гиперспектрóметру;

- разработан оригинальный метод учета эволюций авиационного носителя, которые приводят к геометрическим искажениям гиперкуба. Метод основан на использовании данных вспомогательной панхроматической видеокамеры и является более дешевой (но не менее эффективной) альтернативой использованию гироскопической навигационной системы или гиросtabilизированной платформы.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- методика расчета основных параметров и узлов гиперспектрóметра (расчет освещенности поверхности фотоприемной матрицы, спектральной разрешающей способности, пространственного разрешения, отношения сигнал/шум для типовых условий съемки);
- методика и результаты калибровки гиперспектрóметра (радиометрическая калибровка, калибровка спектральных каналов по длине волны, измерение спектрального и пространственного разрешения, методика исправления дисторсий, присущих гиперспектрóметру на базе призмы);
- методика исправления гиперкуба от искажений, обусловленных эволюциями авиационного носителя, с помощью данных вспомогательной синхронной видеокамеры;
- результаты лабораторных и полевых испытаний прибора (результаты авиационной гиперспектральной съемки тестового полигона на территории Пензенской области, занятого различными видами растительности).

### **Достоверность результатов подтверждается следующим:**

- результатами экспериментальных лабораторных исследований, в ходе которых измерены основные параметры прибора и проведено их сравнение с расчетными;

- результатами полевых испытаний, как на горизонтальных трассах, так и с борта воздушного носителя.

### **Научная и практическая ценность работы**

В результате выполненной работы создан один из первых в России гиперспектрометров с параметрами, сравнимыми с зарубежными аналогами. Созданный прибор был апробирован при дистанционном зондировании поверхности Земли, как на горизонтальных трассах, так и с воздуха. В результате выполнения работы создана оригинальная методика расчета призматического авиационного гиперспектрометра. Эта методика может быть использована для создания аналогичных приборов в будущем. Разработан оригинальный метод исправления геометрических искажений гиперспектральных изображений, которые возникают из-за эволюций авиационного носителя. Метод основан на использовании данных вспомогательной синхронной видеокамеры и может применяться не только для гиперспектрометров, но и для любых приборов со щелевым полем зрения.

В 2006 г. совместно с ФГУП Госцентр “Природа” была проведена гиперспектральная аэросъемка почвенно-растительного покрова тестового полигона на территории Пензенской области с целью определения возможностей гиперспектральной съемки для детектирования различных видов растительности, в частности, конопли. Проведенные исследования подтверждают работоспособность прибора, правильность принципов его проектирования и лабораторного тестирования, а также показывают перспективность использования гиперспектральной аппаратуры для решения этой задачи. В 2007 г. аэрогиперспектральная съемка была проведена в расширенном объеме, и в настоящий момент данные находятся в стадии обработки. Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы “Комплексные меры противодействия злоупотреблению наркотиками и их незаконному обороту на 2005-2009 годы”.

В Институте Химической Физики им. Н.Н. Семенова созданный прибор применяется для исследования процессов ламинарного горения богатой смеси

пропана, эта работа имеет весьма важное практическое значение для развития новых технологий переработки природного газа.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Третьей научно-практической конференции “Современные проблемы фотограмметрии и дистанционного зондирования посвященной 150-летию фотограмметрии”, Москва, 11–12 апреля 2002г;
- Выездном семинаре “Космическое приборостроение ИКИ РАН”, Таруса, 7-9 июня 2006г;
- На XVIII международной конференции “Современная химическая физика”, 22 сентября – 3 октября Туапсе, 2006г;
- На 4-й всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г;
- На 5-й юбилейной открытой всероссийской конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г.

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них 6 статей (все в журналах из списка ВАК). В настоящее время к печати принята еще одна статья автора. Результаты работы докладывались на семинарах в ИКИ РАН, ИХФ РАН, НТЦ “Реагент”.

### **Личный вклад автора**

Все работы, в которых опубликованы результаты диссертации, написаны в соавторстве с коллегами. Все оригинальные результаты, приведенные в диссертации и вынесенные на защиту, получены лично автором, либо при его определяющем участии.

Авторским в диссертации является: методика расчета призматического гиперспектрометра, методика исправления искажений вызванных наличием призмы в

оптической схеме, методика исправления искажений гиперспектрального изображения по данным вспомогательной синхронной видеокамеры. Лично автором осуществлено: лабораторное измерение основных параметров прибора, калибровка прибора, наземные и авиационные измерения, предварительная и тематическая обработка полученных гиперспектральных данных. Изготовление и юстировка прибора осуществлялась при непосредственном участии автора. Для предварительной обработки данных гиперспектрометра автором разработано специальное программное обеспечение.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы. Она изложена на 156 страницах и содержит 15 таблиц, 83 рисунка и список литературы из 63 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, излагается цель работы, указан личный вклад автора в работу, изложены основные результаты, новизна, научная и практическая ценность, приведена структура диссертации.

В **первой** главе дан обзор состояния гиперспектральных исследований и способов построения гиперспектрометров.

Ключевым моментом при построении гиперспектральных систем является способ передачи трехмерной структуры гиперкуба на двух или одномерный массив фотоприемников. Гиперкубом называют трехмерный массив данных, два измерения которого соответствуют пространственным координатам, третье – спектральной координате. Один из вариантов получения гиперкуба - это при съемке кадра игнорировать одну из координат, либо пространственную, например  $x$ , либо спектральную  $\lambda$ . За один кадр фотоприемная матрица формирует двухмерный срез гиперкуба с известной третьей координатой. Поэтому для по-

строения полного гиперкуба приходится прибегать к сканированию по одной из координат - пространственной (рис. 1), либо спектральной (рис. 2).

Наиболее распространенными на сегодняшний день являются гиперспектрометры, которые в каждый момент времени регистрируют узкий отрезок поверхности под собой. Такие гиперспектрометры относятся к типу “pushbroom”, (рис. 3). Формирование изображения узкого отрезка поверхности производится посредством щели, которая устанавливается на задней фокальной плоскости входного объектива.

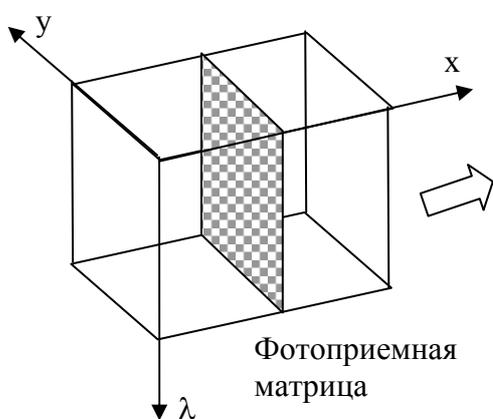


Рис. 1. Гиперспектрометр со сканированием по пространству, вдоль оси  $x$ .

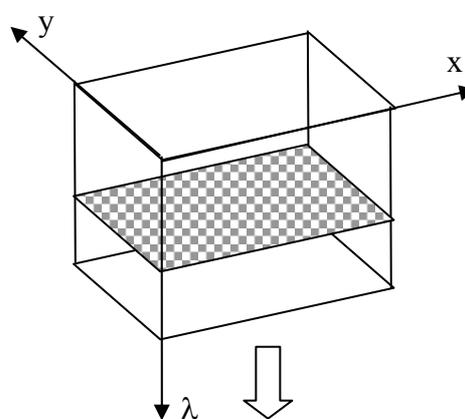


Рис. 2. Гиперспектрометр со сканированием по спектру вдоль оси  $\lambda$ .

После коллимирующего объектива изображение в параллельных лучах попадает на элемент разлагающий в спектр и затем проецируется на фотоприемную матрицу. Таким образом, на матрице формируется срез гиперкуба для определенной пространственной координаты  $x$ . Разложение в спектр может быть выполнено на дифракционной решетке, призме или их комбинации.

В главе 1 изложены также принципы работы спектрометров со сканированием по спектральной координате: на базе жидкокристаллических перестраиваемых фильтров, а также основанные на использовании акустооптических не-

коллинеарных фильтров, рассматриваются достоинства и недостатки указанных типов приборов.

Приводится описание известных авиационных гиперспектрометров AVIRIS и HYDICE. Рассматриваются типовые процедуры первичной обработки гиперспектральных изображений: радиометрическая калибровка и исправление искажений гиперкуба, обусловленных эволюциями аппарата носителя. Сделана попытка классификации актуальных научных и прикладных проблем, решаемых по гиперспектральным данным. В конце главы делается вывод о целесообразности использования схемы “pushbroom” для создания авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов.

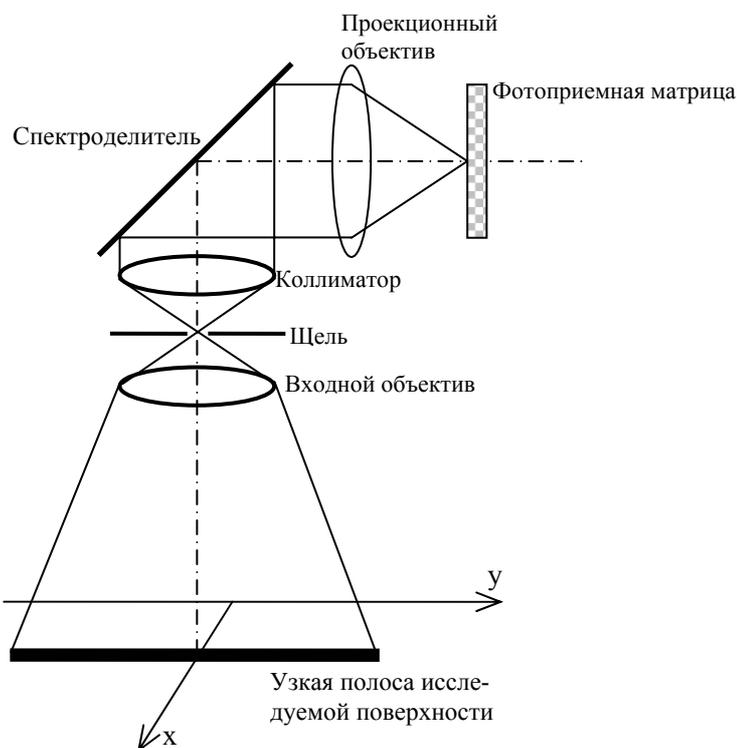


Рис. 3. Гиперспектрометр типа “pushbroom”

Во **второй** главе описывается методика расчета авиационного гиперспектрометра на базе стеклянной призмы. Цель этой главы провести анализ характеристик гиперспектрометра и выяснить при каких условиях возможно проведение съемки. Критерием возможности проведения съемки является обеспече-

ние заданного соотношения сигнал/шум при выбранном времени интегрирования фотоприемной матрицы.

Параграф 2.1 посвящен определению характеристик прибора, обусловленных использованием призмы. В литературе, посвященной созданию спектральных приборов на базе призм, вопрос об оптимальном угле прохождения лучей в призме с точки зрения энергетических потерь и наилучшего спектрального разрешения не рассматривался. Поэтому в параграфе 2.1 этот вопрос детально исследован. Показано, что в случае установки призмы в минимум отклонения лучей обеспечивается минимум световых потерь на отражение от граней и поглощение в материале призмы, а также наилучшее спектральное разрешение.

Важным параметром призмного гиперспектрометра является ширина щели поскольку она определяет ряд характеристик прибора: спектральное разрешение, величину светового потока, падающего на фотоприемную матрицу, пространственное разрешение вдоль трека.

В теории призмных монохроматоров есть понятие о нормальной ширине щели – когда угловой размер щели на выходе коллимирующего объектива равен радиусу дифракционного размытия изображения. Например, если ограничение лучей происходит в выходном отверстии коллимирующего объектива то нормальная ширина щели будет  $a_H = 1.22 \frac{\lambda}{D_K} f_K$ , где  $D_K$  и  $f_K$  – диаметр выходного зрачка и фокусное расстояние коллимирующего объектива соответственно. Показано, что если ширина щели превышает нормальную более чем в два раза (что имеет место в рассматриваемом приборе), а призма установлена в минимум отклонения, то спектральное разрешение будет описываться следующим соотношением:

$$\Delta\lambda = \frac{a}{2f_K} \sqrt{\sin^{-2}\left(\frac{A}{2}\right) - n^2} \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|^{-1}, \quad (1)$$

где  $a$  – ширина входной щели,  $f_K$  - фокусное расстояния коллимирующего объектива,  $A$  – угол при вершине призмы,  $n$  – показатель преломления материала призмы.

Выведена зависимость освещенности поверхности фотоприемной матрицы  $I(\lambda)$  от спектральной плотности яркости исследуемой поверхности  $L(\lambda)$ . В случае установки призмы в минимум отклонения имеет место соотношение:

$$I(\lambda) = L(\lambda) \frac{aS_B f_K \tau \sqrt{\sin^{-2}\left(\frac{A}{2}\right) - n^2}}{2f_B^2 f_{II}^2 \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|}, \quad (2)$$

где  $a$  – ширина входной щели,  $S_B$  – площадь входного зрачка,  $f_K, f_B, f_{II}$  - фокусные расстояния коллимирующего, входного и проекционного объективов, соответственно,  $A$  – угол при вершине призмы,  $n$  – показатель преломления материала призмы,  $\tau$  - пропускание системы.

В параграфе 2.2 приводится простая аналитическая модель освещенности Земной поверхности Солнцем. В предположении, что поверхность отражает по закону Ламберта, а коэффициент отражения -  $\rho(\lambda)$ , спектральная плотность яркости поверхности равна:

$$L(\lambda) = \rho(\lambda) \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} \cdot \frac{R_C^2}{L_{C3}^2} \exp\left(-\frac{\tau_0}{\cos(z)}\right) \cdot \cos(z), \quad (3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура поверхности Солнца,  $R_C$  – радиус Солнца,  $L_{C3}$  - расстояние от Солнца до Земли,  $\tau_0$  - оптическая толщина атмосферы,  $z$  – зенитный угол Солнца.

Эта модель является обобщением известных экспериментальных и аналитических сведений о Солнце и прохождении солнечного излучения в атмосфере Земли.

В параграфе 2.3 рассматриваются распространенные типы фотоприемных матриц и их параметры: емкость потенциальной ямы, чувствительность, шум

считывания, темновой ток, динамический диапазон. Приводится принятая в мировой литературе методика для определения отношения сигнал шум (ОСШ):

$$ОСШ = \frac{QE \cdot u_{\phi} \cdot T_u}{\sqrt{\sigma_c^2 + u_m T_u + QE \cdot u_{\phi} \cdot T_u}}, \quad (4)$$

где  $QE$  – квантовая эффективность детекторных элементов матрицы,  $u_{\phi}$  – поток фотонов, падающий на детекторный элемент (ф/с),  $T_u$  – время интегрирования,  $\sigma_c$  - среднеквадратичное отклонение шума считывания,  $u_m$  – скорость образования темновых электронов (e<sup>-</sup>/с).

Вводится понятие о чувствительности гиперспектрометра - отношение фототока пиксела матрицы к спектральной плотности яркости исследуемой поверхности на данной длине волны. Для рассматриваемого в данной работе гиперспектрометра чувствительность определяется соотношением:

$$S_{ГС}(\lambda) = \frac{aS_B f_K \tau \sqrt{\sin^{-2}\left(\frac{A}{2}\right) - n^2}}{2f_B^2 f_{\Pi}^2 \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|} S_{\Pi} S_a(\lambda), \quad (5)$$

где  $a$  – ширина щели,  $S_B$  – площадь входного зрачка системы,  $S_{\Pi}$  – площадь пиксела,  $S_a(\lambda)$  - абсолютная чувствительность пиксела матрицы (А/Вт),  $\tau$  - пропускание оптической части.

В параграфе 2.4 рассматривается вопрос о пространственном разрешении гиперспектрометра. Пространственное разрешение определяется на базе частотно контрастной характеристики (ЧКХ). При этом используется принятое в мировой литературе понятие эффективного размера элемента изображения (EIFOV, Effective Instance Field Of View). EIFOV определяется при некоторой пространственной частоте  $f_0$ , для которой ЧКХ принимает значение 0.5. В этом случае:

$$EIFOV = \frac{1}{2 \cdot f_0} \quad (6)$$

Для систем “pushbroom” ЧКХ вдоль и поперек трека определяется разными соотношениями. Поперек трека ЧКХ зависит от ЧКХ оптической части и числа

пикселей фотоприемной матрицы поперек трека. Вдоль трека *ЧКХ* зависит от *ЧКХ* оптической части, ширины щели гиперспектрометра, частоты съема фотоприемной матрицы, и продольной скорости аппарата носителя. При создании гиперспектрометра важно чтобы *ЧКХ* вдоль и поперек трека, если не совпадали, то хотя бы соотносились.

В параграфе 2.5 проведен расчет гиперспектрометра, определены его основные параметры и выбраны компоненты (объективы, призма, щель, фотоприемная матрица). Проведен расчет спектрального и пространственного разрешения, отношения сигнал/шум для типовых условий съемки. Расчетные характеристики прибора приведены в табл. 1.

Таблица 1 Расчетные значения характеристик гиперспектрометра.

Угол зрения поперек трека, град	19.6	
Число пикселей поперек трека	250	
Пространственное разрешение поперек трека, м	1.4	При высоте съемки 1000 м, скорости ЛА 120 км/ч
Пространственное разрешение по треку, м	2	
Спектральный диапазон, мкм	0.45-0.9	
Число спектральных каналов	480	
Число спектрально не зависимых каналов	106	$\Delta\lambda \leq \Delta\lambda_K$ , $\Delta\lambda$ - спектральное разрешение, $\Delta\lambda_K$ - ширина канала
Спектральное разрешение, нм	1.6-16	
Отношение сигнал/шум	100-288	Для средней атмосферы и альбедо поверхности 0.5

Из проведенных расчетов следует, что создание гиперспектрометра авиационного базирования на базе призмы в диапазоне 0.45-0.9 мкм с соотношением сигнал/шум не хуже чем 100:1 возможно. Для обеспечения указанного *ОСШ* используется четырехкратный биннинг (усреднение сигнала соседних пикселей) по пространственной координате, а на краях рабочего диапазона дополнительный биннинг по спектральной координате. В целом расчетные параметры гиперспектрометра сопоставимы с иностранными аналогами, а именно коммерческими гиперспектрометрами CASI и AISA.

В параграфе 2.6 описывается методика имитационного моделирования гиперспектральных изображений, в которой применена детализованная модель освещенности земной поверхности с учетом светотеневой обстановки и особенностей переноса оптического излучения в атмосфере Земли. Модель применима для диапазона 0.4-2.5 мкм, где преобладающий вклад в принимаемый бортовым сенсором сигнал вносит рассеянное зондируемым объектом солнечное излучение. Величина мощности (лучистого потока, Вт) оптического сигнала, падающего на  $j$ -ый элемент приемной матрицы, соответствующий  $j$ -му пикселу изображения для  $i$ -го спектрального канала  $Y_i^j$ , вычисляется следующим образом:

$$Y_i^j = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ S_{\lambda} T_a' T_a'' \left[ K_{cm} \cdot r_{\lambda}^j(\theta) \cdot \cos(z) + \frac{1}{k(\lambda, z)} \cdot R_{\lambda}^j(\theta) \right] + Y_0 \right\} \cdot \omega \cdot S_{ex} \cdot \Delta\lambda_i \cdot k_i, \quad (7)$$

где  $S_{\lambda}$  – солнечная постоянная, т.е. спектральная плотность излучения Солнца на верхней границе атмосферы;  $r_{\lambda}^j(\theta)$  – коэффициент спектральной яркости (КСЯ)  $j$ -го элемента разрешения земной поверхности (пиксела на изображении), наблюдаемого под углом  $\theta$  от надира в  $i$ -ом спектральном канале гиперспектрометра с центральной длиной волны  $\lambda_i$ ;  $\omega = \frac{\delta^2}{H^2}$  – телесный угол, соответствующий элементу изображения (пикселу) гиперкуба,  $\delta^2$  – площадь элемента изображения на земной поверхности  $H$  – высота полета носителя;  $S_{ex}$  – площадь входного зрачка;  $\Delta\lambda_i$  – ширина  $i$ -го спектрального канала по уровню половинной мощности;  $k_i$  – к.п.д.  $i$ -го спектрального канала;  $T_a' \approx \exp[-\tau_{\lambda}(\sec z)]$  – пропускание атмосферы на трассе от источника излучения (Солнце) до земной поверхности,  $T_a'' \approx \exp[-\tau_{\lambda}(\sec \theta)]$  – пропускание атмосферы на трассе от объекта зондирования до входной апертуры сенсора,  $\tau_{ex}$  – оптическая толщина ослабления (экстинкции) излучения атмосферой при  $z = 0^0$ ,  $z$  – зенитный угол Солнца;  $Y_0$  – мощность аддитивной составляющей лучистого потока, вызываемого атмосферной дымкой,  $K_{cm}$  – коэффициент, характеризующий светотеневую обста-

новку в момент гиперспектральной съемки ( $K_{cm} = 1$  на солнечной стороне зондируемой поверхности и равен нулю на теневой стороне);  $k(\lambda, z)$ - экспериментальная зависимость спектрального отношения облученности элемента изображения зондируемой поверхности прямой солнечной радиацией к облученности небосводом;  $R'_\lambda(\theta)$ - коэффициент спектральной яркости зондируемого объекта в зоне тени, т.е. КСЯ (коэффициент спектральной яркости) объекта при облучении его радиацией небосвода.

**Третья** глава посвящена созданию и лабораторному тестированию разработанного гиперспектрометра. В параграфе 3.1 дается описание конструкции прибора. Все оптические элементы гиперспектрометра смонтированы на массивной металлической плите. Кроме гиперспектрального канала (слева на рис. 4) в приборе размещена цифровая видеокамера (справа), которая работает синхронно с фотоприемной матрицей гиперспектрометра.

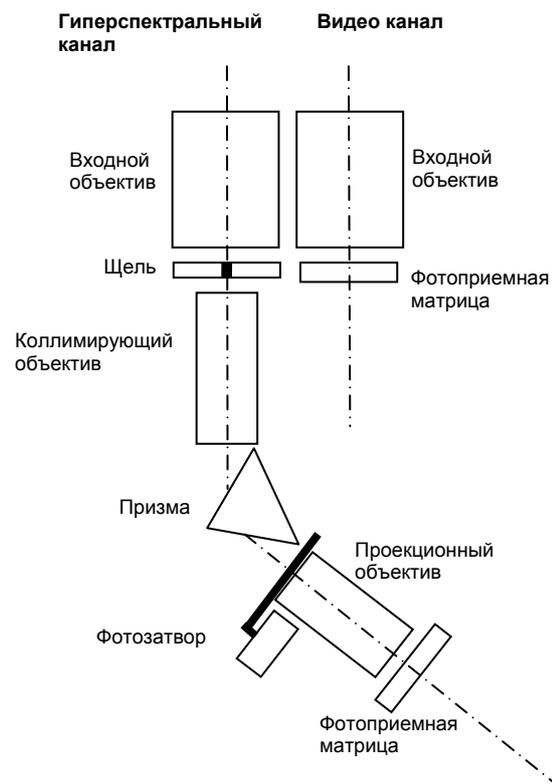


Рис. 4. Схема авиационного гиперспектрометра

Наличие видеоканала позволяет осуществлять определение трека аппарата носителя. Для определения уровня темнового тока фотоприемной матрицы в приборе предусмотрен электромеханический фотозатвор. В качестве привода затвора используется шаговый двигатель, на валу которого закреплена непрозрачная заслонка.

Параграф 3.2 посвящен экспериментальному определению основных характеристик гиперспектрометра (пространственное и спектральное разрешение, чувствительность) и сравнению их с расчетными значениями.

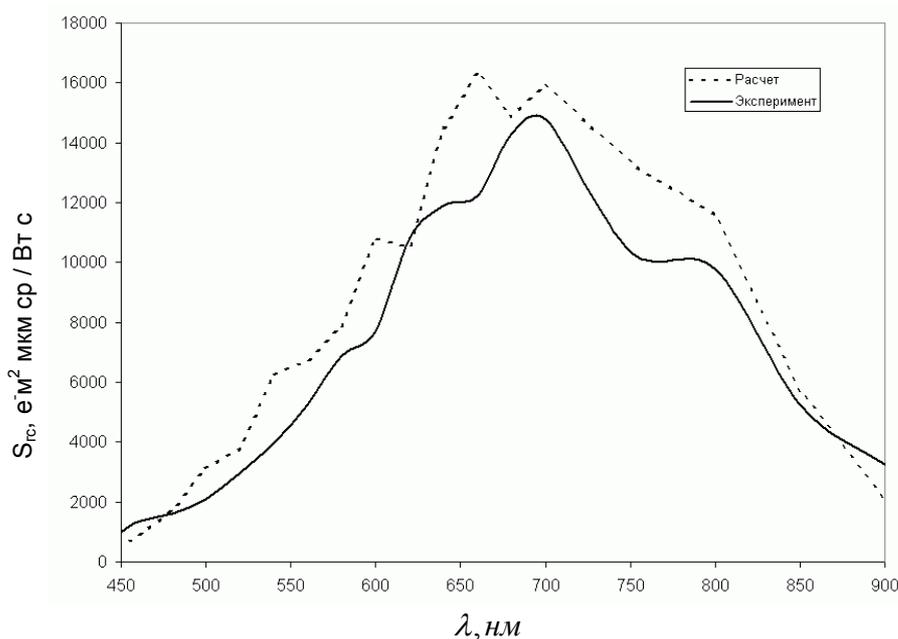


Рис. 5. Экспериментально измеренная и расчетная чувствительность гиперспектрометра

Измерение чувствительности проводилось с помощью интегрирующей сферы, внутри которой установлена галогеновая лампа с цветовой температурой 3200К. Для сферы была определена зависимость спектральной плотности яркости выходного отверстия от длины волны. Для определения чувствительности производились измерения яркости отверстия интегрирующей сферы с помощью гиперспектрометра. По формуле (5) была рассчитана чувствительность прибора. Результаты измерений и их сравнение с расчетными значениями

представлены на рис. 5. Из рисунка видно: экспериментально измеренная чувствительность оказалась несколько ниже расчетной, что возможно связано с недостаточно точной установкой осей объективов.

Измерение спектрального разрешения проводилось в диапазоне 550-800 нм с использованием монохроматора МДР-6 и стандартного осветителя. Для длины волны 515 нм проведены измерения с использованием натриевой лампы. Результаты измерения, а также сравнение их с расчетными значениями приведены на рис. 6.

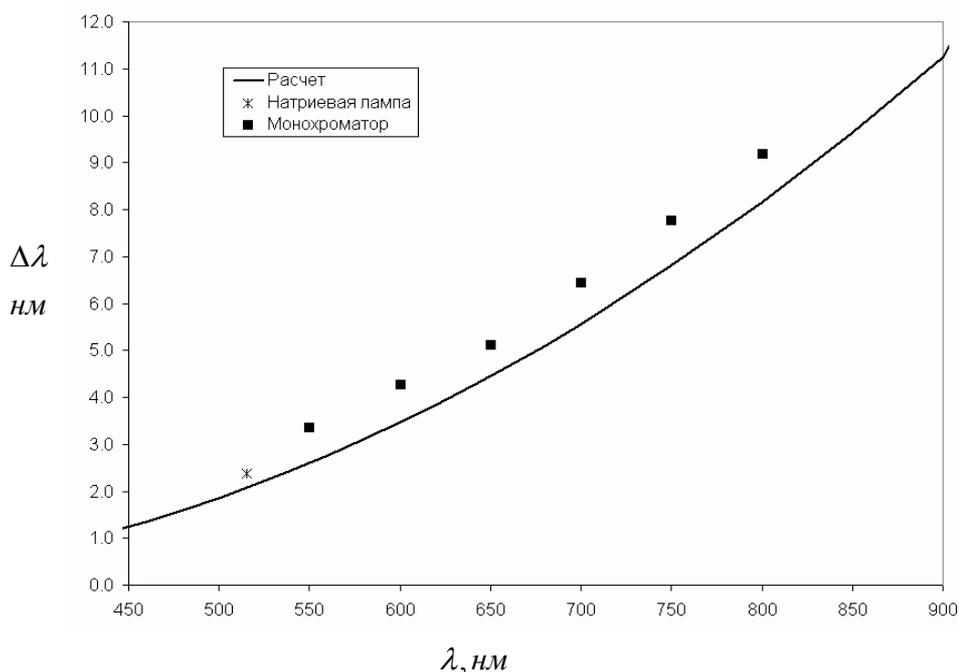


Рис. 6. Экспериментально измеренное и расчетное спектральное разрешение

Из рисунка видно, что экспериментальное разрешение оказывается несколько хуже расчетного, что возможно связано с отклонением фокусного расстояния проекционного объектива от расчетного, а также погрешностями сборки и юстировки прибора.

Проведены измерения пространственного разрешения гиперспектрометра поперек трека. Путем съемки точечного источника измерялась функция рассеяния точки (ФРТ), а затем ФРТ аппроксимировалась гауссианой

$\Phi_{PT} = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)$ . Взяв преобразование Фурье от ФРТ, получим оптическую передаточную функцию системы (ОПФ). Поскольку преобразование Фурье в данном случае не содержит комплексной части, то ОПФ совпадает с ЧКХ:  $ЧКХ = \exp(-2\pi^2 f^2 \sigma^2)$ .

Пространственное разрешение определялось из ЧКХ по формуле (6). Результаты вычисления пространственного разрешения по описанной методике, в пересчете на высоту съемки 1000 м приведены в табл. 2.

Таблица 2. Пространственное разрешение в пересчете на высоту 1000 м.

$\lambda, \text{нм}$	550	600	650	700	750	800
EIFOV, м	1.58	1.50	1.36	1.40	1.52	1.77

В параграфе 3.3 приведена методика исправления дисторсий гиперспектрометра. Методика основана на билинейной интерполяции координат базовых точек калибровочной сетки. Также описана методика калибровки прибора по длине волны с использованием монохроматора.

По результатам лабораторных исследований гиперспектрометра можно сказать, что расчетные параметры прибора, такие как спектральное и пространственное разрешение, чувствительность, достаточно хорошо согласуются с расчетом, выполненным в параграфе 2.5.

В **четвертой** главе приводится описание экспериментов по проведению гиперспектральной съемки с помощью созданного гиперспектрометра на наземных горизонтальных трассах и с борта воздушного носителя. Измерения проводились для проверки прибора в полевых условиях, а также экспертной оценки качества получаемой гиперспектральной информации.

При выполнении наземной съемки для обеспечения сканирования изображения использовалось поворотное зеркало, щель гиперспектрометра располагалась перпендикулярно земной поверхности, сканирование зеркалом осуще-

ствлялось в горизонтальной плоскости. В качестве примера приводятся результаты съемки человека на фоне растительности. Одновременно с объектом исследования проводилась съемка диффузного отражателя с известной зависимостью коэффициента спектральной яркости от длины волны. Наличие отражателя позволяет пересчитать энергетические величины спектральной плотности яркости в коэффициенты спектральной яркости (*КСЯ*), т.е. провести нормировку гиперкуба на спектр подсвечивающего излучения.

На рис. 7 приведены графики спектральной плотности яркости *L* и *КСЯ* для диффузного отражателя. Поскольку *КСЯ* отражателя близок к единице и не имеет явно выраженных линий поглощения, то функцию спектральной плотности яркости отражателя можно рассматривать как аналог спектра подсвечивающего излучения.

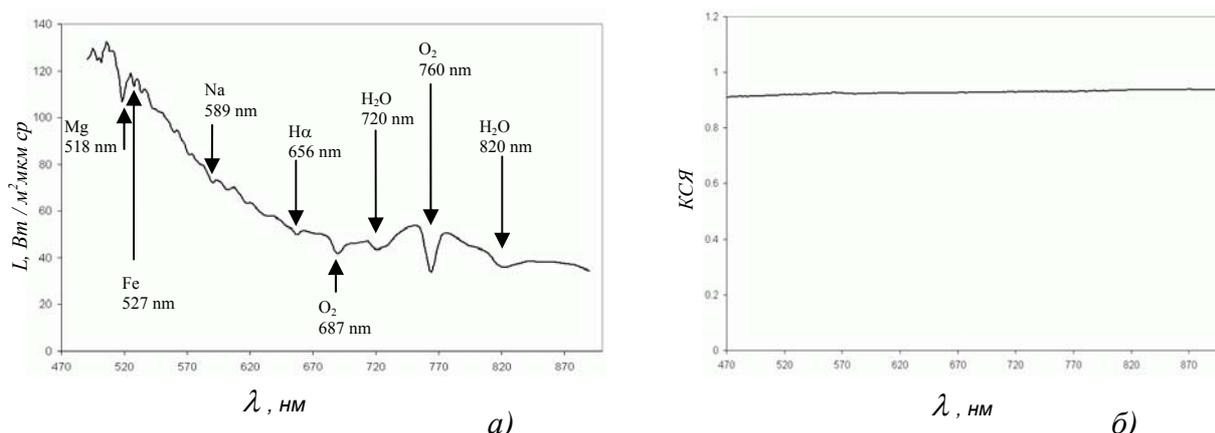


Рис. 7. Спектральная плотность яркости *L* - а), *КСЯ* для диффузного отражателя - б)

Поскольку в качестве подсветки выступало солнечное излучение, прошедшее через атмосферу Земли, то на графике функции спектральной плотности яркости видны линии поглощения атмосферы Земли (например, паров воды 720, 820 нм, кислорода 687, 760 нм, а также ряд фраунгоферовых линий, характерных для солнечного излучения).

На рис. 8 приведена функция спектральной плотности яркости и *КСЯ* для участка растительности. На графике *КСЯ* видны две характерные для хлоро-

филла линии поглощения в районе 450 нм и 670 нм, а также пик коэффициента отражения в зеленой области 550 нм. Кроме того, видно типичное для зеленой растительности резкое увеличение  $KСЯ$  в районе 690-750 нм – т.н. красная граница.

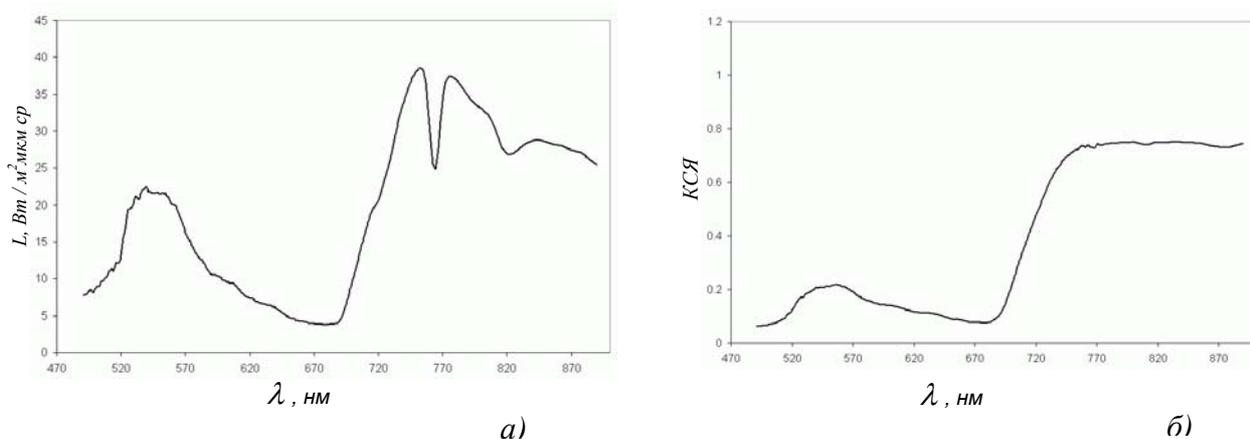


Рис. 8. Спектральная плотность яркости  $L$ - а),  $KСЯ$  для участка растительности - б)

По результатам наземной съемки можно сделать вывод, что гиперспектрометр функционирует устойчиво и выдает данные, которые согласуются с данными, опубликованными в литературных источниках, что подтверждает правильность проектирования и калибровки прибора.

Эксперимент по дистанционному зондированию Земли с борта авиационного носителя выполнялся в июле 2006 г. на территории Пензенской области. В качестве носителя в этом эксперименте использовался вертолет Ми-8МТВ. Целью эксперимента было определение возможностей гиперспектральной съемки для обнаружении заданного (целевого) типа растительности (конопли) на фоне других растительных ценозов (фоновые). Для решения этой задачи была проведена авиационная гиперспектральная съемка местности с почвенно-растительным покровом. На этой местности был расположен тестовый полигон с 36 участками (размер участка  $10 \times 10 \text{ м}^2$ ), занятыми различными типами растительности – как целевыми, так и фоновыми.

В параграфе 4.2 приводится описание результатов тематической обработки гиперспектральных данных стандартными методами распознавания: спектрального угла, максимума правдоподобия, с использованием различных вегетационных индексов (Red edge NDVI, NDVI, Senescence). Внутри тестового полигона все методы дали уверенное распознавание целевого типа растительности (конопли). Верификация результатов распознавания вне полигона проводилась выборочно, путем выполнения наземных обследований и показала, что в зависимости от используемого метода распознавания существует некая вероятность ложной тревоги, а также вероятность пропуска цели. Дальнейшее развитие методов распознавания целевого типа растительности видится в совершенствовании методик обработки гиперспектральных данных. В диссертации продемонстрирована только возможность такого распознавания.

Одновременно с гиперспектральной съемкой осуществляется видеосъемка с помощью панхроматической цифровой видеокамеры, которая смонтирована внутри гиперспектрометра. Результаты видеосъемки используются для исправления искажений гиперкуба обусловленных эволюциями носителя.

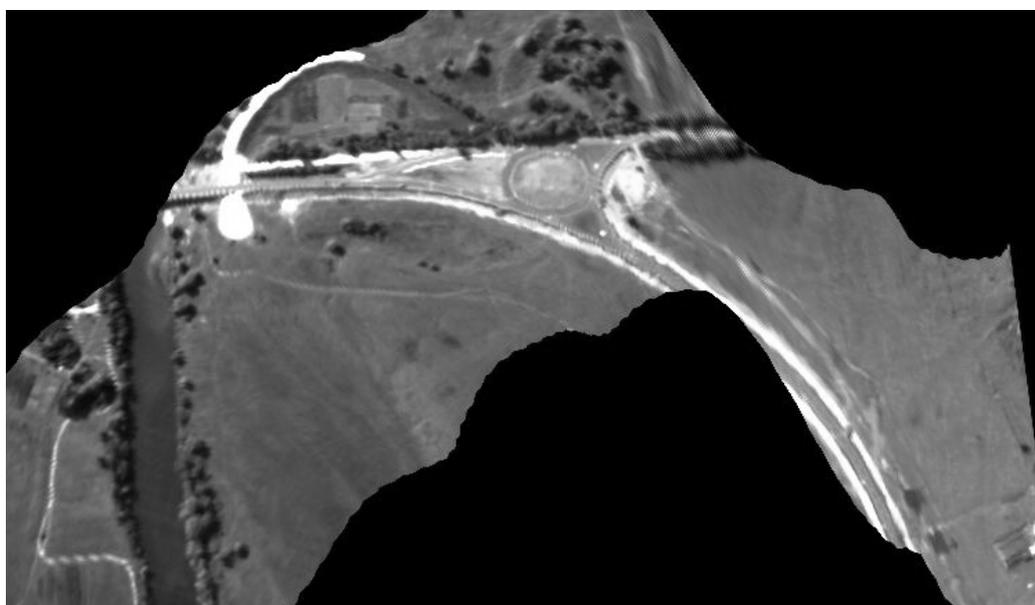
Приводимая методика компенсации геометрических искажений гиперкуба работает достаточно устойчиво, даже когда носитель выполняет маневры и виражи. На рис. 9 приведено синтезированное из гиперспектральных данных изображение участка земной поверхности при выполнении вертолетом разворота. Видно, что при некотором ухудшении разрешения (что вполне естественно при увеличении скорости сканирования щелевым полем зрения гиперспектрометра при выполнении маневра) метод дает вполне удовлетворительный результат.

По результатам летных и наземных испытаний гиперспектрометра можно сказать, что прибор функционирует правильно, пригоден для использования как в наземных измерениях, так и на борту авиационного носителя. Результаты гиперспектральных съемок с использованием созданного прибора могут применяться для решения широкого круга задач, в том числе тематической обра-

ботки с целью обнаружения различных типов поверхностей (например, растительности).



а)



б)

Рис. 9. Неисправленное - *а)* и исправленное - *б)* на геометрические искажения изображение земной поверхности при выполнении вертолетом виража

В **заклучении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Впервые создана методика расчета элементов гиперспектрометра на базе стеклянной призмы. Методика включает: энергетический расчет, определение оптимальных углов прохождения светового потока в призме с точки зрения наилучшего спектрального разрешения и минимизации све-

товых потерь, определение спектральной чувствительности, отношения сигнал/шум для типовых условий съемки, расчет спектрального и пространственного разрешения;

2. Разработана методика имитационного моделирования гиперспектральных изображений земной поверхности с использованием детализированной модели освещенности поверхности и переноса излучения в условиях атмосферы Земли;

3. Спроектирован и изготовлен один из первых в России действующих гиперспектрометров, не уступающий по своим характеристикам зарубежным аналогам. В приборе реализован ряд оригинальных технических решений: впервые в гиперспектрометре использована стеклянная призма, впервые для компенсации эволюций носителя использована синхронная видеосъемка;

4. Разработана методика исследования характеристик гиперспектральной аппаратуры, а также методика ее калибровки, которая включает: калибровку спектральных каналов, радиометрическую калибровку, а также исправление дисторсий присущих призмённому гиперспектрометру;

5. Разработан не имеющий аналогов метод учета эволюций авиационного носителя, которые приводят к геометрическим искажениям гиперкуба. Метод основан на использовании данных вспомогательной видеокамеры, и является более дешевой (но не менее эффективной) альтернативой использованию гироскопической навигационной системы или гиростабилизированной платформы.

6. Проведены успешные полевые испытания созданного гиперспектрометра путем выполнения съемок на горизонтальных трассах и с борта воздушного носителя. По результатам авиационных съемок проведена тематическая обработка стандартными методами обработки гиперспектральных данных. Продемонстрирована возможность распознавания заданного типа растительности (конопли) на фоне других растительных ценозов.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. Воронцов Д.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли, Препринт ИПМех РАН, №702, 2002
2. Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Дубровицкий Д.Ю., Зубков Б.В., Яковлев Б.А., Оценка спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометра АГСМТ-1, Препринт ИПМех РАН, №704, 2002
3. Воронцов Д.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли, Тезисы докладов третьей научно-практической конференции “Современные проблемы фотограмметрии и дистанционного зондирования посвященная 150-летию фотограмметрии”, Москва, 11–12 апреля 2002г.
4. Белов А.А., Воронцов Д.В., Дубровицкий Д.Ю., Калинин А.П., Любимов В.Н., Макриденко Л.А., Овчинников М.Ю., Орлов А.Г., Осипов А.Ф., Полищук Г.М., Пономарев А.А., Родионов И.Д., Родионов А.И., Салихов Р.С., Сенник Н.А., Хренов Н.Н., Малый космический аппарат «Астрогон-Вулкан» гиперспектрального дистанционного мониторинга высокого разрешения, Препринт ИПМех РАН №726, 2003
5. Khrenov N., Salikhov R., Ponomarev A., Ovchinnikov M., Rodionov I., Belov A., Orlov A., Vorontsov D., Ilyin A., The Russian Small Satellite for Hyperspectral Monitoring of Gas Pipelines, Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша №12, 2003
6. Khrenov N., Salikhov R., Ponomarev A., Ovchinnikov M., Rodionov I., Kalinin A., Rodionov A., Fedunin E., Belov A., Orlov A., Vorontsov D., The Russian Small Satellite for Hyperspectral Monitoring of the Earth, Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша №17, 2003

7. Akim E.L., Behr P., Bries K., Egorov V.V., Fedunin E.Yu., Kalashnikov S.K., Kalinin A.P., Kolk K.-H., Montenegro S., Rodionov A.I., Rodionov I.D., Ovchinnikov M.Yu., Orlov A.G., Pletner S., Shub B.R., Vedeshin L.A., Vorontsov D.V., THE FIRE INFRARED-HYPERSPECTRAL MONITORING (Russian – Germany Proposals for an International Earth Observation Mission), Preprint of the Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. № 32, 2004
8. Непобедимый С.П., Родионов И.Д., Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калашников С.К., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Родионов А.И., Шилов И.Б., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли, Доклады Академии наук Том 397, №1, 2004
9. Белов А.А., Воронцов Д.В., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Орлов А.Г., Родионов А.И., Родионов И.Д., Проект космического гиперспектрометра, предназначенного для малого космического аппарата, Тезисы докладов выездного семинара “Космическое приборостроение ИКИ РАН”, Таруса, 7-9 июня 2006
10. Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Авиационный гиперспектрометр, Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Приборостроение» №3, с 11-24, 2006
11. Воронцов Д.В., Егоров В.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Родионова И.П., Принципы обработки гиперспектральной информации и результаты летных испытаний прототипа авиационного гиперспектрометра, Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Приборостроение», №4, с 27-37, 2006
12. Родионов А.И., Трошин К.Я., Орлов А.Г., Гиперспектральное исследование ламинарного горения, Тезисы докладов XVIII международной конференции “Современная химическая физика”, 22 сентября – 3 октября г. Туапсе, 2006
13. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Белов А.А., Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Глубокая обработка данных вертолетного гиперспектрометра АСМГ-М, Труды четвертой всероссийской открытой конференции «Совре-

менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 13-17 ноября 2006 г

14. Балтер Б.М., Егоров В.В., Калинин А.П., Ильин А.А., Орлов А.Г., Останний А.Н., Родионова И.П., Родионов И.Д., Оценка возможностей гиперспектральной съемки для дистанционного обнаружения заданного типа растительности, Препринт ИКИ РАН Пр-2134., 2007
15. Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Родионова И.П., Орлов А.Г., Гиперспектрометр как элемент системы интеллектуального технического зрения, Датчики и системы №8 (99), с 33-35, 2007
16. Балтер Д.Б., Белов А.А., Воронцов Д.В., Ведешин Л.А., Егоров В.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.И., Родионова И.П., Федунин Е.Ю., ПРОЕКТ СПУТНИКОВОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, Исследования Земли из Космоса, №2, с. 43-55, 2007
17. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Калинин А.П., Котцов В.А., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В., МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, Исследования Земли из Космоса, №5, с. 21-29, 2007
18. Орлов А.Г., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Авиационный гиперспектрометр: архитектура и методика расчета элементов, Тезисы докладов Пятой Юбилейной Открытой Всероссийская конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2007 г
19. Балтер Б.М., Воронцов Д.В., Егоров В.В., Калинин А. П., Ильин А.А., Орлов А.Г., Останний А.Н., Родионов А.И., Родионов И.Д., Распознавание типов растительности по данным авиационного гиперспектрометра и многоспектрального космического сканера Quickbird, Препринт ИПМех РАН № 834, 2007