

В.М. Красавцев¹, А.Н. Семенов¹, К.Н. Чиков¹, В.Б. Шлишевский²

Некоторые особенности расчета и проектирования перспективных видеоспектральных систем для дистанционного зондирования

¹*Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург*

²*Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН «КТИПМ»*

Поступила в редакцию 24.05.2007 г.

Рассматриваются особенности построения и методологические возможности перспективной видеоспектральной системы для дистанционного зондирования с борта самолета и спутника. Система предназначена для эффективного решения многих научных и прикладных задач.

Дистанционное зондирование (ДЗ) представляет собой процесс измерения характеристик интересующих пользователя объектов с помощью чувствительных датчиков, не находящихся в непосредственном контакте с предметом исследования [1]. Подобные датчики устанавливаются, как правило, на борту авиационных и космических носителей.

Особое место среди методов ДЗ занимают многоспектральные методы, основанные на регистрации и измерении одновременно в нескольких интервалах электромагнитного спектра энергии, излучаемой или отражаемой исследуемыми объектами [2] с различными спектральными коэффициентами яркости (СКЯ). Проведенные детальные исследования СКЯ природных и антропогенных образований показали [1, 2], что именно небольшие спектральные вариации являются индикаторами важнейших характеристик объектов и явлений, прежде всего, при изучении малоразмерных образований.

При наземных измерениях наблюдения обычно ведутся непосредственно над изучаемым объектом, как правило, на высоте 1,0–1,5 м и сравнительно редко — со специальных вышек. В результате исследователь может быть совершенно уверен не только в правильном выборе необходимого объекта (типа почвы или горной породы, вида растительности и т.п.), но и в оценке условий его нахождения. Напротив, при авиационных и тем более космических наблюдениях фиксируются некоторые усредненные по полю зрения прибора СКЯ земной поверхности, которые могут существенно отличаться от реальных данных, особенно для небольших объектов на местности. Более того, результаты обеих методик могут иметь значительные расхождения даже для однородных протяженных объектов [2]. Так, для растительности и некоторых горных пород наземные измерения СКЯ обычно дают превыше-

ние над авиационными и спутниковыми на 30–60%. Это очень большое различие, одной из наиболее вероятных (и существенных) причин которого может быть недостаточно корректный учет оптической толщи вертикального столба атмосферы [3].

В полной мере извлечь научную и практическую ценность выявляемых особенностей поведения СКЯ оказалось возможным лишь с появлением нового класса приборов с высоким пространственным, спектральным и радиометрическим разрешениями — видеоспектрометров [4], обеспечивающих поэлементную регистрацию одновременно и СКЯ, и геометрической структуры рассматриваемых удаленных объектов. Эти приборы открывают широкие возможности зондирования Земли и околоземного пространства, несмотря на самые изощренные естественные и искусственные виды маскировки исследуемых объектов. Получаемые с их помощью данные могут использоваться как совместно с видеоданными о топологии наблюдаемых объектов, так и самостоятельно. При этом обработка видеоспектральных данных хорошо поддается автоматизации.

Современная аэрокосмическая видеоспектральная аппаратура позволяет не только провести детальный анализ получаемого многоэлементного изображения земной поверхности, но и выполнить регистрацию спектров каждого изображаемого элемента, в том числе находящегося на пределе пространственного разрешения. Таким образом, главной отличительной чертой видеоспектрометров является совмещение в них высокого пространственного и спектрального разрешений.

Первая характеристика — пространственное разрешение — определяется минимальными размерами исследуемого участка земной поверхности, который данная аппаратура распознает как отдельный элемент. При согласованных характеристиках

оптики видеоспектральной аппаратуры и ее приемно-регистрирующей части пространственное разрешение обычно определяется по стандартной формуле $R = htg\omega$, где R – линейное разрешение на местности; h – высота полета носителя; ω – угловое разрешение видеоспектральной аппаратуры [1].

Вторая характеристика – спектральное разрешение $\delta\lambda$ – определяется способностью аппаратуры различать излучения ближайших соседних спектральных интервалов. При этом количество H спектральной информации, которое может быть передано на обработку при выполнении ДЗ, оценивается как

$$H = Z \log_2(M + 1),$$

где $Z = \Delta\lambda/\delta\lambda$ – число регистрируемых спектральных интервалов (число спектральных каналов); $\Delta\lambda$ – рабочий диапазон спектра; M – число возможных значений измеряемых интенсивностей [5].

Традиционная компоновка видеоспектрометра включает в себя проецирующий объектив и приборную спектральную часть (полихроматор), состоящую из входной щели, коллиматорного объектива, диспергирующего элемента (плоской отражательной дифракционной решетки), камерного объектива и матричного фотоприемника (МФП) излучения.

Входной проецирующий объектив (аналог аэрофотообъектива) строит изображение исследуемого удаленного объекта в неразложенном свете на входе полихроматора в плоскости его входной щели. Так как входная щель полихроматора является оптически сопряженной с плоскостью объекта, то ее длина (высота) определяет протяженность полосы обзора на указанной плоскости, а ширина – спектральное и пространственное разрешения. Эта же щель сопряжена и с плоскостью фоточувствительных элементов МФП, что позволяет одновременно осуществлять пространственное и спектральное сканирование.

Каждая строка МФП, располагаемая строго поперек направления полета носителя, фактически регистрирует монохроматическое изображение узкой полосы земной поверхности (полосы обзора) и обеспечивает развертку этого изображения по пространству, а сканирование по пространству происходит за счет движения носителя. Сканирование по спектру, осуществляемое электроникой МФП, а также максимальное количество регистрируемых спектральных интервалов, разрешаемых видеоспектрометром, определяются числом строк МФП. Сколько таких строк в МФП – столько, в принципе, можно зарегистрировать монохроматических изображений полосы обзора местности, над которой пролетает носитель.

Таким образом, видеоспектрометры обеспечивают разложение в спектр узких протяженных участков земной поверхности (последовательности полос обзора), расположенных перпендикулярно направлению полета носителя и изображаемых проецирующим объективом во входной щели прибора.

Движение носителя позволяет получать с высоким разрешением полноформатные монохроматические видеокдры в виде последовательности «одноцветных» монохроматических изображений полос обзора земной поверхности, распределенных непрерывно по направлению полета или, другими словами, вдоль трассы полета носителя. В итоге, видеоспектрометры совмещают в себе высокое пространственное разрешение, свойственное высококачественным аэрофотоаппаратам, и высокое спектральное разрешение, присущее спектральным приборам высокого класса.

Особенностью аппаратурного построения видеоспектральных средств, содержащих обычно видеоспектрометр и специальную телевизионную камеру, является их объединение в бортовой информационно-измерительный комплекс. В таком случае спецтелекамера позволяет оператору анализировать в реальном масштабе времени всю наблюдаемую в данный момент картину.

В полной мере позитивные свойства видеоспектральной аппаратуры бортового базирования (на атмосферных или внеатмосферных носителях) раскрываются при выполнении прикладных исследований, когда необходимо получать высококачественные монохроматические изображения объектов естественного и/или искусственного происхождения с одновременной интегральной визуализацией кадра. Это позволяет измерять пространственные и спектральные характеристики собственных или отраженных излучений у широкой номенклатуры объектов, интересующих многих пользователей.

Особенно эффективны аэрокосмические видеоспектральные информационно-измерительные комплексы при выполнении различных геологических и инженерно-геологических изысканий, в частности, проводимых в интересах проектирования и строительства подводных газопроводов [6]. В последнем случае наиболее информативными оказываются диапазон 500–600 нм и ультрафиолетовая область спектра. Здесь, по мере перемещения от глубоководных участков к мелководным, прослеживается сложная гамма тоновых переходов от темных тонов к светлым. При этом светлым тоном изображаются мутные воды. Так как коротковолновая часть спектра солнечных лучей проникает в морскую толщу на большую глубину, то получаемые видеоспектральные изображения способны охарактеризовать распространение мутных вод до границ мелководных участков и выявить распределение глубин.

Кроме того, согласно некоторым данным, видеоспектральные съемки позволяют визуализировать литодинамические процессы, которые могут заметно влиять на заносимость подводных траншей (прорезей) на морском дне, вымывание засышки заглубленных трубопроводов, миграцию береговой черты и оказывать непосредственное динамическое воздействие на трубопровод.

С использованием результатов дистанционных видеоспектральных исследований успешно решается и ряд важных экологических проблем. Наибольшей

эффективностью при этом отличаются видеоспектральные исследования биосферы, проводимые в целях выявления выбросов вредных веществ в атмосферу, обнаружения стресса растительности при неблагоприятном воздействии нитратов и осадков тяжелых металлов из атмосферы, утечек углеводородов из магистральных продуктопроводов и «залповых» выбросов загрязнений, что особенно важно при оперативной оценке последствий стихийных бедствий, техногенных аварий, лесных пожаров и иных форс-мажорных обстоятельств.

Разработка и совершенствование видеоспектральной аппаратуры имеют большое значение также при ее использовании в военных целях, что связано с высокой эффективностью ее применения в случае, когда в получаемом изображении для выявления демаскирующих признаков требуется раздельно опознать смежные элементы или объекты, имеющие предельно близкие цвета или их оттенки, что абсолютно невозможно при использовании традиционных видов аэрокосмической съемки. В обзоре военных программ космической видовой разведки [7] отмечена важность программ создания аппаратуры для спутниковой видеоспектральной съемки.

Военные задачи включают получение видеоспектральных изображений для оценки обстановки на сухопутном театре военных действий, номинации целей (определения локальных районов повышенного интереса, обнаружения крупномасштабных объектов и камуфляжа), трехмерного картографирования, обнаружения перемещения подразделений и крупномасштабных изменений в инженерных сооружениях, мониторинга погодных условий и прибрежных зон. Ожидается, что видеоспектральный принцип зондирования обеспечит повышение степени обнаружения тактических целей, даже если они укрыты с помощью новейших маскировочных средств.

Вместе с тем указано, что до выяснения потенциальных возможностей военного применения информации, получаемой посредством бортовых американских видеоспектрометров, правительством США наложен запрет на распространение среди зарубежных заказчиков видеоспектральных изображений с разрешением на местности лучше 20 м. Работы в этом направлении ведутся NASA по программе «Наблюдение за местностью» (EO-1) и космическим командованием США по программе «Уорфайтер».

Вышеизложенное, а также многочисленные результаты зарубежных испытаний видеоспектральной аппаратуры [8, 9] и имеющийся отечественный опыт ее применения [10–15] позволяют сделать вывод об исключительных перспективах развития такого рода съемки в задачах ДЗ, решаемых в оптическом диапазоне спектра.

Достижение высоких характеристик по светосиле, спектральному и пространственному разрешению видеоспектрометров обеспечивается, в первую очередь, за счет получения в полихроматоре монохроматических изображений высокого качества.

Следовательно, должны быть достаточно высокими требования к качеству исходных изображений, формируемых входной квазисветительной приборной частью. Ее уже нельзя причислять к классическим осветителям, так как, выполняя функции проецирующего объектива, она должна обладать и свойствами, присущими лучшим современным аэрофотосъемочным объективам.

Понятно, что простое объединение автономно рассчитанных входного проецирующего объектива и полихроматора в таком случае не может гарантировать решения поставленной задачи. В связи с этим была разработана концепция расчета оптики видеоспектрометров, основанная на строгой взаимной коррекции аберраций их проецирующей и спектральной частей в процессе сквозного совместного расчета.

Известно, что повышение резкости изображения или, другими словами, улучшение изобразительных свойств объективов достигается путем уменьшения астигматизма, кривизны поля и аберраций широких наклонных (внеосевых) пучков. Уменьшение дисторсии и хроматизма обеспечивает повышение измерительных свойств объективов. Наибольшие трудности при разработке объективов видеоспектральных приборов возникают при исправлении кривизны поля, хроматизма увеличения и аберраций широких наклонных пучков, особенно в сагиттальной плоскости.

В более общем плане следует отметить, что главным требованием, которому должен удовлетворять любой объектив видеоспектрометра, является достаточно совершенная коррекция не только монохроматических аберраций, но и особенно аберраций хроматических, причем иногда в более широкой спектральной области по сравнению с обычными объективами – ахроматами или апохроматами. Выполнение этого требования позволяет преодолеть трудности, связанные с реализацией видеоспектральных приборов, функционирование которых определяется протяженным рабочим спектральным диапазоном и вместе с тем аппаратурная компоновка которых не допускает перефокусировку оптики при переходе от одной длины волны регистрируемого излучения к другой.

Наконец, оптические элементы приборов, устанавливаемых на космических аппаратах, предназначенных для полетов в радиационном поясе Земли, должны быть радиационно стойкими, т.е. неподверженными потемнению (или мало темнеющими) и разрушению под воздействием ионизирующей радиации.

Все указанные обстоятельства чрезвычайно затрудняют выбор прозрачных оптических сред и зеркальных покрытий, которые должны обладать одновременно и высоким пропусканием (отражением), и хорошими физико-химическими свойствами и достаточной радиационной стойкостью.

Для аппаратуры аэрокосмического базирования требования минимальных габаритов и веса вынуж-

дают применять компактные зеркально-линзовые системы со светосильными зеркальными элементами, работающими со значительными углами падения лучей. При расчетах и оптимизации параметров таких объективов за базу целесообразно принимать концентрические оптические системы, свободные от большинства элементарных aberrаций (в частности, от комы, астигматизма и дисторсии). Тогда остаточные aberrации данных систем могут быть подвергнуты довольно эффективному исправлению. Например, для коррекции сферической aberrации можно предложить расчетный путь, при котором аналитическое выражение этой aberrации подчиняется условию ее минимизации. Исправление другой aberrации — кривизны поверхности изображения — можно обеспечить, привлекая известные способы, а корригирование хроматизма можно получить, выполняя в определенной степени условие инвариантности эквивалентного заднего фокусного расстояния объектива от показателя преломления материала линзовых компонентов.

Перечисленные особенности были учтены в схеме видеоспектрометра, представленной на рис. 1.

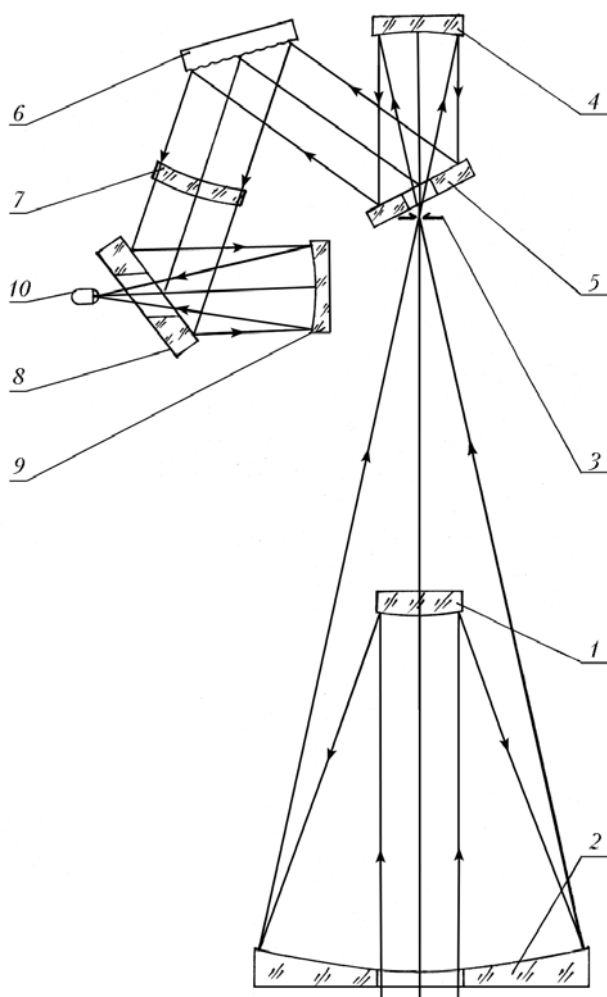


Рис. 1. Оптимизированная оптическая схема видеоспектрометра

Входные компоненты схемы образуют концентрическую телескопическую систему с угловым (и видимым) увеличением, равным единице, и включают в себя проецирующий объектив из выпуклого 1 и вогнутого 2 сферических зеркал (обращенная система Кассегрена) и коллиматорный объектив полихроматора в виде вогнутого сферического зеркала 4 с тем же фокусным расстоянием. Такая система не обладает комой и астигматизмом, ее сферическая aberrация минимизирована, а кривизна поля компенсируется положением апертурной диафрагмы прибора в общем центре кривизны трех вышеуказанных сферических зеркальных поверхностей. В результате телескопическая система дает пучок лучей, характеризующийся плоским волновым фронтом, что обеспечивает эффективное исправление aberrаций, вносимых диспергирующим элементом — плоской отражательной дифракционной решеткой 6.

Расположенная внутри телескопической системы в совмещенных фокусах проецирующего объектива 1, 2 и коллиматорного объектива 4 входная щель 3 обеспечивает совместно с дифракционной решеткой и камерным зеркально-линзовым объективом 7–9 заданное спектральное разрешение, чему способствует то обстоятельство, что оправа решетки является апертурной диафрагмой прибора. Кроме того, входная щель и работающие совместно с ней внутренние бленды и световые ловушки эффективно устраняют мешающие направленные излучения (паразитные рефлексы) и рассеянный свет. Плоские зеркала 5 и 8 с отверстиями делают компактной всю оптическую схему видеоспектрометра.

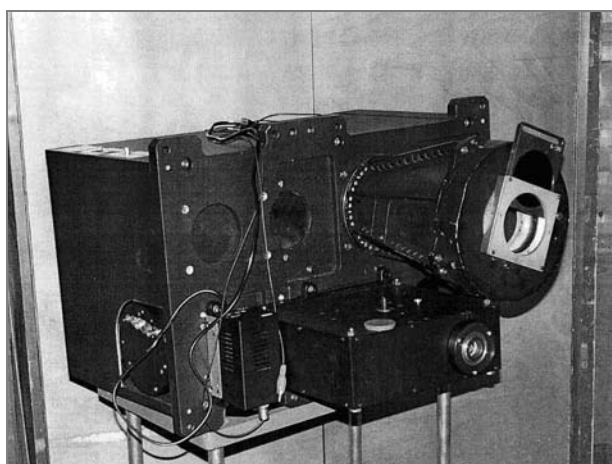
Особенностью этой части оптической схемы является то, что мениск 7 в значительной мере устраняет сферическую aberrацию как телескопической системы, так и сферического зеркала 9 камерного объектива. Соответствующие радиусы сферических поверхностей мениска, его небольшая толщина и местоположение после дифракционной решетки обеспечивают минимальную величину сферохроматической aberrации.

Кривизна поля на выходе прибора исправляется посредством линзы Пиацци — Смита, устанавливаемой в непосредственной близости к изображению, формируемому на МФП 10 камерным объективом. Она же, помимо устранения кривизны поля, выполняет дополнительную функцию — фильтрует высшие дифракционные порядки — за счет того, что составлена из двух соединенных встык линз из разных цветных стекол. При этом стыковочные грани обеих линз ориентированы в приборе перпендикулярно его плоскости дисперсии, а сама их стыковка произведена путем склеивания. Указанные свойства оптической схемы прибора позволяют получить требуемое значение пространственного разрешения.

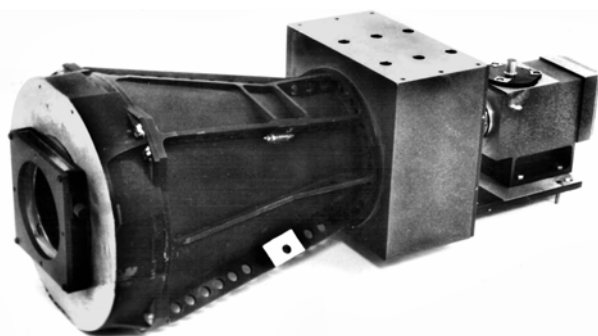
На рис. 2 представлены отечественные видеоспектрометры, построенные на базе описанной схемы.

Основные технические характеристики видеоспектрометров следующие:

– рабочий спектральный диапазон, нм	200–350	400–1000
– фокусное расстояние проецирующего и коллиматорного объективов, мм	98,76	98,76
– фокусное расстояние камерного объектива, мм	95,57	97,03
– относительное отверстие	$\approx 1:2,5$	$\approx 1:2,5$
– размеры входной щели, мм × мм	$0,037 \times 13,82$	$4 \times 0,019 \times 9,4$
– спектральное разрешение, нм	$\approx 1,8$	$\approx 1,5$
– пространственное разрешение (с высоты 500 км), м	≈ 100	≈ 95
– быстродействие, с/спектр	0,04	0,04
– потребляемая мощность, Вт	не более 25	не более 20



а



б

Рис. 2. Отечественные видеоспектрометры: а – для ультрафиолетовой области спектра; б – для видимой и ближней инфракрасной областей спектра

В первом видеоспектрометре в качестве приемника ультрафиолетового излучения использован высокочувствительный гибридный телевизионный прибор типа УПЗС-023 на базе электронно-оптического преобразователя инверторного типа с вход-

ным окном из MgF_2 или увиолевого стекла УТ-49, солнечно-слепым фотокатодом (CsTe), волоконно-оптической пластиной на выходе, микроканальной пластиной в качестве усилителя яркости и экраном желто-зеленого свечения.

Во втором приборе приемником служила кремниевая ПЗС-матрица «Калимантан» с размерами светочувствительной площадки $6,91 \times 9,22$ мм.

Проведенные полевые испытания [12, 16] и летные эксперименты [13, 16] подтвердили соответствие spectroэнергетических и эксплуатационных параметров аппаратуры ожидаемым. При этом особой результативностью отличались видеоспектральные исследования в видимой и ближней инфракрасной областях спектра, выполняемые с учетом внутриландшафтных миграционных связей и позволяющие изучать миграцию вредных веществ из атмосферы на подстилающую поверхность в системах «почва–растение», «почва–водоем».

1. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. М.: Мир, 1988. 343 с.
2. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: Изд-во МО СССР, 1986. 160 с.
3. Белов В.В., Афонин С.В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 266 с.
4. Красавцев В.М., Семенов А.Н., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б. Видеоспектрометры – новая перспективная аппаратура для дистанционных исследований: Сб. материалов // III Междунар. конгресс «ГЕО-СИБИРЬ-2007». Новосибирск, апрель, 2007. Новосибирск: СГА, 2007. Т. 4. Ч. 1. С. 89–94.
5. Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Аэрокосмические методы и обработка материалов съемок. М.: Газопресс, 2003. 352 с.
6. Шинков В.Д., Селезнев И.А. Информационное обеспечение нефтегазодобывающей деятельности на шельфе // Информация и космос. 2002. № 1–2. С. 21–22.
7. Яблонский Л., Воронин Е., Кашин В. Зарубежные военные программы космической видовой разведки // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 7.
8. Proc. of the Fourth Int. Airborne remote sensing conf. and exhibit: 21 Canadian symp. on remote sensing. Ottawa, Canada, 21–24 June 1999.
9. Proc. of the Fourteenth conf. and workshops applied geologic remote sensing. Las Vegas, USA, 6–8 November 2000.
10. Гуд В.В., Красавцев В.М., Сандаков А.Н., Чиков К.Н. Видеоспектрометрические космические комплексы для исследования Земли и планет солнечной системы // Оптич. ж. 1995. № 8. С. 67–71.
11. Чиков К.Н., Гуд В.В., Красавцев В.М., Сандаков А.Н. Видеоспектрометры для экологического мониторинга // Изв. вузов. Приборостр. 1998. № 3. С. 5–10.
12. Чиков К.Н., Гуд В.В., Красавцев В.М. Бортовой видеоспектральный комплекс для целей геолого- и экологического картирования // Научные исследования высшей школы по экологии и рациональному природопользованию: Сб. статей. СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т, 2000. С. 173–175.

13. Батян П.В., Гуд В.В., Коняхин И.А. и др. Опыт использования видеоспектрометра ИТМО в натуральных условиях // Изв. вузов. Приборостр. 2002. № 2. С. 46–51.
14. Чиков К.Н., Панков Э.Д., Порфирьев Л.Ф. и др. Особенности построения бортовых оптико-электронных систем спектронального мониторинга // Изв. вузов. Приборостр. 2004. № 9. С. 60–67.
15. Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. Краткие итоги разработки элементной базы и оптико-электронных модулей специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра: Сб. материалов // Междунар. конгресс «ГЕО-СИБИРЬ-2006». Новосибирск, апрель, 2006. Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 4. С. 31–34.
16. Марков А.В., Рафаилович А.С., Шлишевский В.Б. и др. Некоторые предварительные результаты натурных испытаний оптико-электронной аппаратуры специального назначения для ультрафиолетового диапазона спектра: Сб. материалов // Междунар. конгресс «ГЕО-СИБИРЬ-2006». Новосибирск, апрель, 2006. Новосибирск: СГГА, 2006. Т. 4. С. 34–37.

V.M. Krasavtsev, A.N. Semenov, K.N. Tchikov, V.B. Shlishevsky. **Some features of the calculation and designing prospective imaging spectrometer systems for remote sensing.**

The features of the construction and methodological capacities airborne and satellite prospective imaging spectrometer systems for remote sensing are considered. This system is intended for efficient decision of the multiple scientific and applied problems.