

АВИАЦИОННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. И. Д. Родионов¹, А. И. Родионов², Л. А. Ведешин³, А. Н. Виноградов⁴,
В. В. Егоров^{5,*}, А. П. Калинин⁶

¹Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН, Москва

²ЗАО “Научно-технический центр “Реагент”, Москва

³Президиум РАН, Москва

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет

⁵Институт космических исследований РАН, Москва

⁶Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

*E-mail: victor_egorov@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2013 г.

Представлена ретроспектива разработок авиационных гиперспектрометров, выполненных в ЗАО “НТЦ “Реагент”. Описаны гиперспектральные приборы, разработанные в период с конца 90-х годов прошлого века по настоящее время. Созданная в последнее время линейка гиперспектрометров охватывает диапазон от ультрафиолетового (0.2 мкм) до ближнего инфракрасного (1.0 мкм). Эти приборы могут устанавливаться на воздушных и автомобильных носителях, включая малоразмерные. Проводимые ЗАО “НТЦ “Реагент” разработки гиперспектральных приборов достигли к настоящему времени промышленной зрелости и подготовлены к серийному производству. Их технические характеристики позволяют утверждать, что фактически создана широкодиапазонная светосильная ультраспектральная аппаратура высокого пространственного разрешения с возможностью бортовой обработки данных в реальном времени.

Ключевые слова: авиационный гиперспектрометр, зондирование, спектр, изображение, спектральное и пространственное разрешение, угловое поле зрения

DOI: 10.7868/S0205961413060080

ВВЕДЕНИЕ

Задачей гиперспектральных измерений в оптическом диапазоне является дистанционное зондирование (ДЗ) поверхности Земли (с борта самолетов, вертолетов и космических летательных аппаратов) с целью идентификации природных техногенных объектов и определения их состояния. По сложившейся в настоящее время терминологии, гиперспектральными называют измерения при наличии от нескольких сотен до тысячи спектральных каналов, а гиперспектрометром — прибор, осуществляющий измерения одновременно в спектральной и пространственных координатах. Идентификация объектов и материалов при гиперспектральных измерениях базируется на способностях этих объектов и материалов поглощать и отражать свет дифференцировано по длинам волн и специфично для каждого материала. Фундаментальной основой такого ДЗ является предположение о наличии корреляции между регистрируемым отраженным (или излученным)

светом и химическим составом отражающей поверхности.

Измерения с числом спектральных каналов более 1000 в зарубежной литературе обозначаются как “ультраспектральные” (Larar et al., 2010), и этой проблеме посвящено уже более сотни работ, регулярно проводятся международные форумы (в частности конференции SPIE). Строгой терминологии, разграничивающей гиперспектральные и ультраспектральные измерения, нет. Для ультрафиолетового (УФ) и видимого диапазонов можно условно считать гиперспектральными измерения со спектральным разрешением от 1 до 10 нм, а ультраспектральными — с разрешением лучше 1 нм.

Измеряемыми характеристиками являются зависимость коэффициента отражения поверхности Земли от пространственной координаты X точки на Земле, значения длины волны регистрируемого излучения λ , компоненты поляризации отраженного излучения. Чувствительность спектрального коэффициента отражения разнородных объектов к значению частоты и поляризации

подсвечивающего и собственного излучения выделяет гиперспектральный метод среди других методов изучения поверхности Земли. Данные гиперспектральных измерений бывают особенно полезны для решения таких сложных задач, как детектирование малых объектов, идентификация состава объектов земной поверхности и происходящих процессов, различие между очень близкими классами предметов, оценки биохимических и геофизических параметров и т.п. Только гиперспектральные измерения могут выявить малые спектральные различия между отдельными элементами поверхности и служить индикатором интересующих нас объектов и процессов на поверхности Земли.

Список задач гиперспектрального зондирования чрезвычайно велик. В статье (Akim et al., 2004) упоминается более двух десятков возможных приложений гиперспектральной съемки, и этот список с тех пор постоянно расширяется. Назначением гиперспектрометрии высокого разрешения, обсуждаемой в данной работе, является детальное распознавание инфраструктуры и исследование тонкой структуры спектров, позволяющей выявлять малые изменения в состоянии зондируемых объектов. Главный же вопрос данной работы – описание как предыдущих, так и новейших разработок гиперспектрометров ЗАО “НТЦ “Реагент”.

Основным результатом гиперспектральной съемки является “гиперкуб”. Так в мировой литературе называют множество данных, образованных значениями интенсивности отраженного солнечного сигнала от двумерной поверхности местности, разбитой условно на элементы изображения – пикселы. Кроме двух стандартных координат к каждому пикселу добавляется спектральная координата, что обеспечивает многомерность пространства данных. Кроме того, может добавляться еще дискретная поляризационная координата. Таким образом, измеряемые данные представляют собой значения функции, заданной в многомерном пространстве с непрерывными и дискретными аргументами. Гиперспектральные измерения являются чрезвычайно перспективными, поскольку обеспечивают максимальное количество информации, содержащейся в восходящем от зондируемого объекта излучении. В настоящее время в зарубежной литературе активно развивается и следующий шаг в этом направлении – ультраспектральные измерения. В России широкое применение методов гиперспектральной съемки сдерживалось практически полным отсутствием такого типа сенсоров, за исключением разработанного в Институте космических исследований (ИКИ РАН) экспериментального образца авиационного видеоспектрометра (Аванесов, 1980), который, однако, не нашел дальнейшего практического применения.

За рубежом первенство в направлении авиационных шелевых гиперспектрометров ассоциируется с прибором AVIRIS (<http://aviris.jpl.nasa.gov/>). В эксплуатации он находится с 1989 г. Имеет 224 спектральных канала в полосе 400–2500 нм, 500 пространственных каналов. Его разрешение $4 \times 4 \text{ м}^2$ с высоты 4 км с захватом полосы 1900 м при скорости носителя 190 км/ч. Обеспечивает 12 бит канал съема данных.

Одной из первых отечественных организаций–разработчиков гиперспектральных сенсоров был ЗАО “НТЦ “Реагент”. Его отличие от других разработчиков заключалось в четкой постановке задачи – необходимости развития гиперспектрометрии высокого пространственного и одновременно спектрального разрешения. Именно такой подход обеспечивает практически-важные достижения в ДЗ. Паллиатив в данном вопросе не представляет практического интереса (хотя и может иметь научное или узконаправленное применение).

В течение многих лет ЗАО “НТЦ “Реагент” проводил работы по созданию гиперспектральной аппаратуры с необходимыми техническими характеристиками и наработкой опыта применения гиперспектральной технологии для обоснования необходимости ее масштабного внедрения (гиперспектрометрии высокого разрешения) в практику отечественного ДЗ Земли.

В настоящее время ситуация начинает изменяться к лучшему – частично в связи с усилиями ЗАО “НТЦ “Реагент”, но в основном из-за начавшегося на Западе (и на Востоке, в частности в Китае) массированного внедрения данной технологии в практически важные, в том числе стратегические, приложения. Далее пренебрегать данным направлением не представляется возможным, поэтому интерес к гиперспектрометрии в РФ стремительно растет. Фактически начинается формирование рынка гиперспектрометрии. Нет сомнения (и уже известны факты), что вчерашний скептицизм сменится протекционизмом и дилерством западных компаний на отечественном рынке. Мы полагаем, что такой подход бесперспективен, поскольку, при всей простоте исходных позиций, гиперспектрометрия достаточно сложное комплексное направление, требующее соединения в одном приборе высоких достижений оптики, фотоприемной аппаратуры, электроники, встроенной вычислительной техники, системного и прикладного математического обеспечения, системных решений и интеграции в бортовые комплексы. Недостаточная проработка хотя бы одного из этих пунктов делает провальным проект в целом. Закупки отдельных даже высококачественных составляющих не решают проблемы в целом.

Цель настоящей работы – обзор гиперспектрометров, созданных ЗАО “НТЦ “Реагент”, и констатация нового этапа в развитии данного направления в РФ – перехода к ультраспектрометрии и серийному производству отечественной гиперспектрально-ультраспектральной аппаратуры для массовых применений. Можно утверждать, что все технические проблемы на пути построения современных бортовых гиперспектральных комплексов в значительной степени решены, и задача сегодняшнего дня – наработка практики их массового применения.

РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ В ЗАО “НТЦ “РЕАГЕНТ”

Интерес к гиперспектрометрии как качественно новому средству решения задач дистанционного мониторинга экологических и узкоспециализированных задач был анонсирован еще в 1980-х годах в ИПМ им М.В. Келдыша АН СССР (Rodionov, Ponomarev, 1993a). Там же были предложены практические пути реализации этого направления на основе перестраиваемых акустооптических неколлинеарных фильтров и фотоприемных устройств с предельно высокой чувствительностью – монофотонных фотоприемников.

В дальнейшем эти направления получили развитие в образованном в 1990 г. ЗАО “НТЦ “Реагент”. В частности, были проведены работы по созданию линейки акустооптических видеоспектрометров в диапазоне от УФ-С до ближнего ИК (Rodionov, Ponomarev, 1996).

Возможность создания серийных образцов приборов основывалась на проведенных до этого в мировой практике и в СССР многолетних разработках фундаментальных основ данного направления – исследования свойств нелинейных кристаллов (в частности парателлурита), технологии выращивания совершенных нелинейных кристаллов, теории акустооптических приборов.

При этом видеоспектрометры УФ-С- и УФ-В-диапазонов на кристаллах DKDP и KDP были созданы впервые в мировой практике. Удалось добиться эффективной апертуры фильтров на уровне 1 см при поле зрения до 6 град и спектральном разрешении на уровне 1 нм. Пространственное разрешение было на уровне 500 линий по полю зрения (ограничивалось имеющимися на тот момент матрицами).

Эти характеристики и в настоящее время являются ориентировочными при оценках возможностей акустооптических видеоспектрометров.

Основной интерес к акустооптическим видеоспектрометрам связан с возможностью сопровождать движущийся в угловом пространстве объект и, перебирая спектральные линии, строить спектр излучения данного объекта. При этом

спектральная характеристика формируется в течение достаточно длинного временного интервала и при этом предполагается, что в течение этого времени спектр излучения сохраняется неизменным.

Другим отличительным свойством акустооптических видеоспектрометров является возможность слежения за характерными узкими линиями спектра, позволяющими извлекать уникальную информацию.

В связи с ограниченными возможностями на тот момент вычислительной техники побудительным мотивом являлась и возможность за счет модуляции сигнала на пьезо-преобразователях реализовать интегралы от спектральной зависимости коэффициента яркости с весовыми множителями, т.е. осуществлять оптические вычисления.

Дальнейшее развитие акустооптического направления в спектрометрии проводилось в РФ и за рубежом другими организациями. При этом наибольшие успехи оказались достигнуты в применениях к исследованию биологических материалов.

Применительно к задачам аэрокосмического мониторинга более практическим оказалось направление, основанное на щелевых гиперспектрометрах (“PushBroom” по западной классификации).

Причин этого несколько. Наибольший практический интерес оказался не в слежении за маневрирующим объектом, а в сплошном мониторинге как можно больших площадей местности. В этом случае важным фактором является светосила прибора, которая прямо пропорциональна площади обзора при прочих равных условиях. Возможности щелевых гиперспектрометров, по крайней мере в исполнении ЗАО “НТЦ “Реагент”, оказались в этом случае почти в 100 раз выше по сравнению с лучшими акустооптическими. Другой аргумент – щелевые гиперспектрометры дают в точке местности мгновенную картину спектральной кривой, а акустооптические – формируют ее в разные моменты времени. В то же время турбулентность атмосферы и общая изменчивость освещения местности в случае последовательных измерений не позволяют достигнуть высокого качества спектральной кривой в условиях аэрокосмического применения. Это особенно проявляется при ультраспектральных измерениях.

Отметим, что эффективное изготовление акустооптических видеоспектрометров ограничено в 2 раза и более узким спектральным диапазоном в условиях применения одной камеры по сравнению с щелевыми гиперспектрометрами. Эта особенность связана с ограниченной эффективностью возбудителя акустооптических волн при удалении от центральной длины волны, и, хотя и имеются технические идеи, практическая ситуация в этом вопросе с 1990-х годов существенно не изменилась.

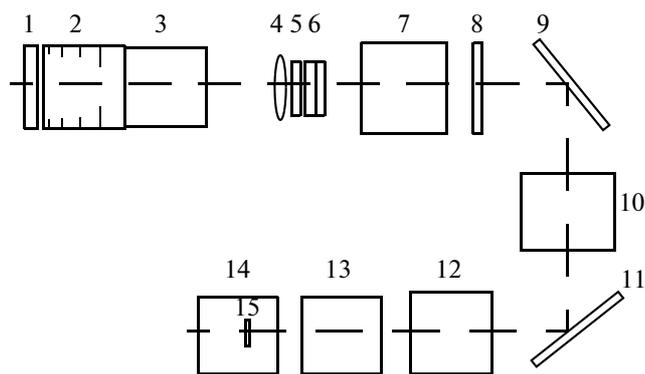


Рис. 1. Схема модуля гиперспектрометра: 1 – иллюминатор, 2 – бленда, 3 – входной объектив, 4 – коллектор, 5 – входная щель, 6 – оптический фильтр, 7 – коллиматор, 8 – поляризационная матрица, 9 – дифракционная решетка, 10 – камерный объектив, 11 – отклоняющее зеркало, 12 – электроннооптический усилитель, 13 – проекционный объектив, 14 – видеокамера без объектива, 15 – ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрица.



Рис. 2. Полоска поверхности Земли, проецируемая на вход электроннооптического усилителя. Величина полосы по Y определяется углом $1'$ и высотой полета.

В РФ в конце 1990-х годов и в начале 21 в. в ЗАО “НТЦ “Реагент” для мониторинга газопроводов был разработан гиперспектрометр (Воронцов и др., 2002а, Воронцов и др., 2002б, Калинин и др., 2006, Dedikov et al., 2001), представляющий собой набор отдельных модулей для разных поддиапазонов длин волн, работающих синхронно по полям зрения и съемки кадра и завязанных в единую бортовую систему. Эти модули охватывали следующие диапазоны длин волн: УФ $\lambda \sim 0.3\text{--}0.4$ мкм, первый диапазон видимого излучения $\lambda \sim 0.43\text{--}0.7$ мкм, второй диапазон видимого излучения $\lambda \sim 0.66\text{--}0.86$ мкм. Результаты измерений всех модулей объединялись при обработке, и в конечном итоге получается единая спектральная зависимость во всем исследованном диапазоне длин волн. Съемка проводилась одновременно для нескольких по-

ляризаций. Так что реализовалась идеология гиперспектрально-поляризационных измерений. Конструктивно модули одинаковы и схема одного такого модуля показана на рис. 1.

Каждый модуль имел входную апертуру диаметром 3 см и обладал мгновенным полем зрения $12^\circ \times 1'$, что обеспечивало формирование на входе электронно-оптического усилителя изображения полосы поверхности Земли, размеры которой определяются высотой полета самолета, вертолета или КА и фокусным расстоянием объектива (рис. 2).

В этих модулях в качестве диспергирующего устройства использовалась плоская одномерная дифракционная решетка. Особенностью одномерных решеток является сохранение ими пространственного распределения светового потока по одной из координат и развертывание (отклонение) по другой координате плоского потока спектральной линии в зависимости от ее длины. Угол отклонения спектральной линии пропорционален длине волны, и это позволяет разворачивать плоский поток в зависимости от длины волны по угловой координате.

Дифракционная решетка и электронно-оптический усилитель формируют на ПЗС-матрице изображение, по одной оси которого отложена X – координата узкой полосы Земли (рис. 2), по другой λ – длина волны отражаемого от Земли излучения, а величина заряда каждого элемента матрицы (пиксела) характеризует интенсивность, определяющая спектральную плотность данной длины волны. Таким образом, на ПЗС-матрице мы получаем набор спектральных зависимостей отраженного от поверхности Земли излучения в зависимости от координаты X определенного участка поверхности Земли. Вследствие того, что самолет (или вертолет, а в будущем и КА), на котором находится гиперспектрометр, движется вдоль координаты Y (рис. 2), мы последовательно исследуем различные полосы участка поверхности Земли в направлении Y .

Внешний вид одного из этих модулей указанного гиперспектрометра представлен на рис. 3 (см. на цветн. вклейках).

При разработке набора указанных выше модулей был применен не имевший до этого мировых аналогов подход, основанный на использовании многокамерных фотоприемников на основе комбинации электронно-оптического преобразователя (ЭОП) нулевого поколения (это обеспечило высокое отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума), ЭОП с микроканальным усилением (это обеспечило высокий уровень усиления) и ПЗС-матрицы на выходе, что обеспечило считывание гиперспектральной информации.

Последнее позволило реализовать, впервые в РФ, реальные гиперспектральные измерения гео-

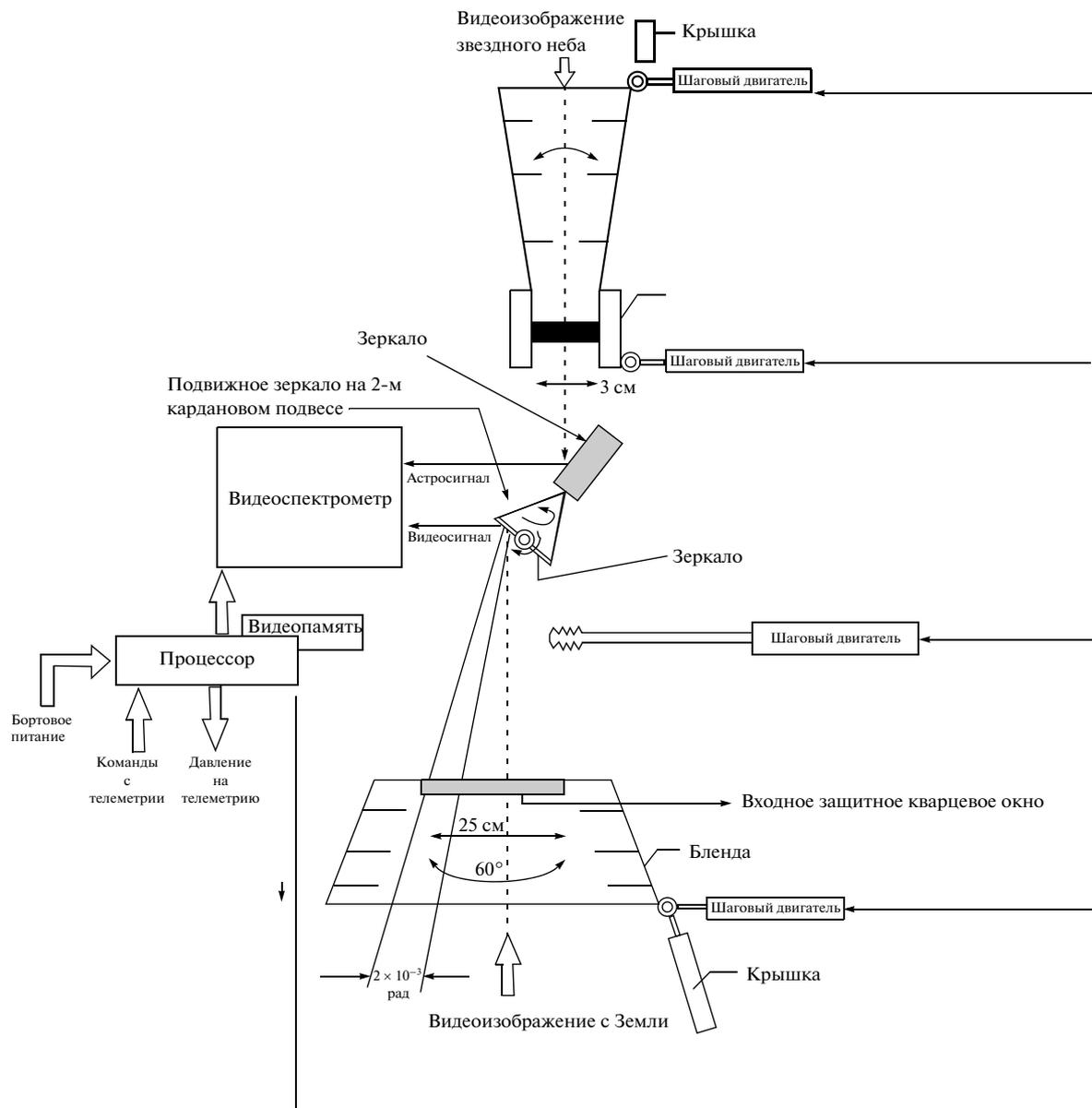


Рис. 4. Функциональная схема приборного комплекса малого космического аппарата “Астрогон–Вулкан”.

технических систем (северные трубопроводы) при полете типового самолета аэрофотосъемщика (ИЛ-20, АН-30). При этом результативные измерения проводились и в сложных условиях сильной облачности и морозящего дождя при полете на высоте 1000 м (несколько ниже уровня облаков) (Хренов и др., 2001, Непобедимый и др., 2004).

В последующем использование таких многокамерных фотоприемников в составе гиперспектрометров встречалось и в зарубежной литературе.

Также в ЗАО “НТЦ “Реагент” был разработан проект гиперспектрометра дистанционного мониторинга высокого разрешения, предназначенного для малого КА “Астрогон-Вулкан” (Белов

и др., 2003, Балтер и др., 2007а, Rodionov et al., 1997б). Функциональная схема приборного комплекса аппарата “Астрогон-Вулкан”, включающего гиперспектральный сенсор разработки ЗАО “НТЦ “Реагент”, представлена на рис. 4. Основные характеристики этого гиперспектрометра приведены в табл. 1.

Мотивацией разработки проекта “Астрогон-Вулкан” являлась очевидная (в зарубежной литературе) истина – для распространения области применения гиперспектральной технологии на промышленный мониторинг и мониторинг двойного применения необходимо пространственное разрешение на уровне 3–5 м, а для уверенной

Таблица 1. Основные характеристики гиперспектрометра высокого разрешения, предназначенного для малого КА “Астрогон-Вулкан”

Параметр	Значение
Количество спектрально-поляризационных каналов измерения	>1600
Гиперспектральный режим съемки осуществляется в каждом из шести спектральных диапазонов по программе, заданной с Земли или сформированной на борту	да
Мгновенное поле зрения, град	0.36
Пространственное разрешение, м	<3
Спектральное разрешение (для $\lambda = 0.5$ мкм), нм	1
Входной диаметр объектива, мм	250–300
Разрешение фотоприемника, линий	500
Угловое разрешение фотоприемника (для $\lambda = 0.5$ мкм), рад	6×10^{-6}
Радиометрическое разрешение для максимального спектрального разрешения до 2.2 нм и пространственного до 3 м	не хуже 5%
Внешняя и внутренняя калибровки	есть
Температурный диапазон работы для посадочных мест, град С	–40...+ 40
Температурный режим работы для оптико-механического блока, град С	20 ± 2
Объем магнитной памяти, Гбайт	до 300
Скорость выдачи данных в радиолинию, Мбит/с	120
Масса прибора в целом, кг	не более 50
Пиковая потребляемая мощность, Вт	200
Срок эксплуатации в условиях полета, лет	не менее 5

классификации объектов на местности требуется порядка 1000 и более спектральных каналов.

В США это было очевидно еще в 1990-х годах, и достижение необходимого уровня характеристик было разбито на три этапа. Сначала, в конце 1990-х годов, был запущен спутник EO-1 с гиперспектральным сенсором Hyperion, с пространственным разрешением 30 м и 220 спектральными каналами. В последние годы запущен (с 2010 г. введен в эксплуатацию) спутник TacSat 3, с пространственным разрешением около 4 м и 400 спектральных каналов, с разрешением 5 нм в диапазоне 400–2500 нм. В числе 16 приоритетных программ NASA имеется и направление развития гиперспектральной аппаратуры и гиперспектральных спутниковых группировок с продвинутой гипер(ультра-) спектральной аппаратурой высокого

пространственного и спектрального разрешения (более 1000 спектральных линий). Отметим, что TacSat 3 позиционируется как военный спутник, доступ к данным которого существенно ограничен для коммерческого потребителя. “Астрогон-Вулкан” позиционировался как высокоэффективный коммерческий проект, возможно, международный (Makridenko et al., 2003).

К сожалению, практическая возможность создания в начале 2000-х годов прорывного аппарата, опережающего текущий уровень мировой техники, не была оценена в должной мере. Отметим, что РАН (академик Лаверов Н.П.) неоднократно обращала внимание на эту проблему.

В связи со сложностью финансирования космических проектов ЗАО “НТЦ “Реагент” продолжил разработку гиперспектрометров для авиационных применений.

В середине 2000-х годов в ЗАО “НТЦ “Реагент” был разработан макет призматического гиперспектрометра (Орлов, 2008), функциональная схема которого приведена на рис. 5. Его основные параметры приведены в табл. 2.

Наличие видеоканала и синхронных с ним съемок гиперспектрального сенсора позволили разработать способ устранения искажений изображений ДЗ, связанных со сложной траекторией движения носителя гиперспектрального сенсора (Орлов, 2008; Ильин, 2011б). Пример исправления

Таблица 2. Основные параметры призматического гиперспектрометра

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, нм	500–900
Спектральное разрешение, нм	1–10
Пространственное разрешение, рад	1×10^{-3}
Число независимых спектральных каналов	224
Отношение сигнал/шум	> 100

искажений гиперспектральных изображений показан на рис. 6 (на цветн. вклейках).

Этот подход (Ильин, 2011б) имеет принципиальное значение, обеспечивая, во-первых, возможность получения качественных гиперспектральных данных без использования гироплатформ, что важно для применения на малоразмерных летательных аппаратах. Во-вторых, именно такой подход обеспечивает наибольшие возможности совместной обработки панхромных и гиперспектральных данных. Такая обработка (Data Fusion) в зарубежной литературе считается обязательной составляющей гиперспектрометрии и приводит к качественному улучшению гиперспектральных данных.

Призменный гиперспектрометр (Орлов, 2008) был использован в экспериментах по распознаванию категорий растительных ценозов (Балтер и др., 2007б, 2008б; Егоров и др. 2011; Ильин и др., 2011а). Пример тематической обработки материалов видео- и гиперспектральной съемки (классификации с обучением) показаны на рис. 7 (на цветн. вклейках). В матрицах точности классификации (табл. 3) по диагонали жирным шрифтом выделены значения вероятностей правильного обнаружения объекта, вне диагонали – вероятность ложной тревоги объекта.

В процессе выполнения работы решена важная задача наркочеконтроля – показана практическая возможность по обучению на тестовых участках оконтуривать с высокой точностью посевы наркочерющих растений на больших площадях.

Показана возможность не только различать посевы мака и конопли, и не только отличать коноплю от близкой к ней по виду крапивы, но и определять количество мужской и женской (поскони) конопли в пикселе изображения, проективные покрытие, размеры листья и пр. Более подробная информация об используемой процедуре классификации с обучением почвенно-растительных объектов, объеме выборки наземных измерений и методике расчета матрицы точности классификации представлена в работах (Балтер и др., 2007а; 2008а, Егоров и др. 2011, Ильи и др., 2011).

При решении данной задачи был разработан принципиально новый подход к обработке гиперспектральных данных (Ильин, 2011б), основанный на обучении с применением нейросетей.

Разработанный в ЗАО “НТЦ “Реагент” макет бортового гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов с высоким пространственным разрешением (Виноградов и др., 2012) показан на рис. 8 (на цветн. вклейках). Характеристики этого гиперспектрометра приведены в табл. 4.

На рис. 9 (на цветн. вклейках) дано изображение, полученное этим гиперспектрометром в ходе самолетной съемки с высоты 1 км.

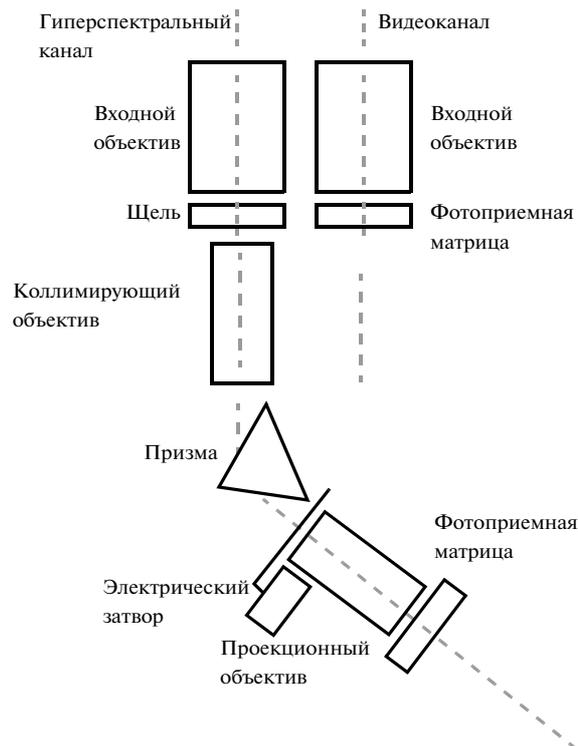


Рис. 5. Функциональная схема призменного гиперспектрометра.

На рис. 10 показаны графики спектральной плотности энергетической яркости в точках а, б, в, г рис. 9.

Из анализа рис. 10а следует, что СПЭЯ убывает до длины волны 700 нм. В диапазоне 530–560 нм имеется небольшой подъем, связанный с некоторым зарастанием поля под паром растительностью и обусловленный повышенной отражательной способностью хлорофилла. В ближнем ИК-диапазоне график СПЭЯ сильно изрезан, что обусловлено поглощением солнечного излучения молекулами кислорода и парами воды. Аналогичная изрезанность СПЭЯ наблюдается и на других графиках рис. 10. Рисунок 10б представляет собой классический образец спектра зеленой растительности с ярко выраженным пиком в области

Таблица 3. Матрица точности классификации

Объекты классификации	Объекты, выделенные по результатам классификации		
	Почва	Фоновая растительность	Конопля
Почва	0.82	0.087	0.0052
Фоновая растительность	0.0004	1	0
Конопля	0.00024	0.073	0.859

Таблица 4. Основные характеристики бортового гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазона с высоким пространственным разрешением

Параметр	Значение
Поле зрения гиперспектрометра, град	15
Поле зрения видеоканала, град	30
Спектральный диапазон, нм	450–800
Количество независимых спектральных каналов	не менее 250
Светосила, D/f	0.95
Пространственное разрешение, мрад	не хуже 1
Отношение сигнал/шум	не менее 100
Максимальная скорость записи данных, fps	30
Разрешение фоточувствительного элемента	1390 × 1040
Размер фоточувствительного элемента, мм	8.8 × 6.6 (2/3")
Сетевой интерфейс	1GbEthernet
Питание, В	8–30
Потребляемый ток, мА	240–1240
Потребляемая мощность, Вт	7–12

530–560 нм, сильным поглощением излучения Солнца в красной области спектра в диапазоне 650–690 нм и резким подъемом значений СПЭЯ в ближней ИК-области.

Среди антропогенных объектов можно выделить здание с красной металло-черепичной крышей (рис. 10а) и полотно асфальтовой дороги (рис. 10б). Красная крыша, как и следовало ожидать, характеризуется резким подъемом СПЭЯ в области 580–620 нм. Спектр отражения от асфальта характеризуется квазиэкспоненциальным спаданием. Он значительно отличается от других спектров отсутствием выраженных особенностей (спадов или пиков).

Для демонстрации высокой пространственной разрешающей способности созданного гиперспектрометра приведем результат съемки просеки (попутная основная задача) в лесном массиве с линией электропередачи (ЛЭП), результаты которой в RGB-цветах показаны на рис. 11 (на цветн. вклейках). Именно высокое пространственное разрешение прибора позволило выделить на снимке провода ЛЭП, опоры и тени от них.

Отметим, что гиперспектрометрия, при ее практических применениях, должна применяться не в рафинированном виде, а с учетом остальных, не менее важных, факторов для ДЗ. К такому относятся – многоракурсные измерения, по-

ляризационные измерения и т.п. Игнорирование последних в ряде задач возможно, но должно учитываться в общем виде. В этой связи в ЗАО “НТЦ “Реагент” был предложен проект многоракурсного гиперспектрометра (Родионов, 2012), позволяющий проводить съемку земной поверхности одновременно под разными углами визирования. Такое многоракурсное зондирование земной поверхности позволяет повысить достоверность процедур классификации и оценки состояния зондируемых объектов.

Это особенно существенно при съемке объектов со сложной пространственной структурой. При гиперспектрометрии высокого пространственного разрешения по объектам инфраструктуры, например, по зданиям, разные ракурсы дают принципиально разный спектр. Например, съемка в надири дает спектр материала крыши дома, а при съемке под углом спектр сигнала, восходящего от стен дома и окон. В результате усредненного описания ошибки будут уже в первом порядке. В настоящее время за рубежом для таких задач предлагается пятиракурсная съемка (Mententi, 2004).

Продемонстрируем функционирование многоракурсного гиперспектрометра на примере прибора, показанного на рис. 12 (на цветн. вклейках), в котором диафрагменный узел состоит из трех щелей. Отраженные, рассеянные или излучаемые фотоны от объекта попадают во входной объектив 1, который формирует изображение объекта на многощелевом диафрагменном узле. Каждая щель выделяет изображение узкого участка объекта, видимого под разными углами, как это показано на рис. 13, на котором приведены три положения (а, б и в) гиперспектрометра при пролете носителя прибора над изучаемым объектом. Был изготовлен макет трехщелевого гиперспектрометра (Егоров и др., 2013), который продемонстрировал справедливость предложенной идеи.

Полученный опыт практической работы по созданию гиперспектральных систем и получения и обработки полетной информации позволил перейти от этапа исследовательской работы по апробированию гиперспектральной технологии к следующему этапу – промышленному освоению гиперспектральных систем и их серийному производству. Для этого на основании предыдущего опыта была разработана линейка современных гиперспектральных модулей УФ-, видимого ближнего ИК-диапазонов для мобильных и бортовых применений, охватывающих диапазон от УФ- (200 нм) до ближнего ИК-диапазона (1.1 мкм). На рис. 14 представлены изображения модулей указанной выше линейки.

Вся линейка гиперспектральных модулей (пять приборов) предназначена для проведения детального мониторинга техногенных систем и элемен-

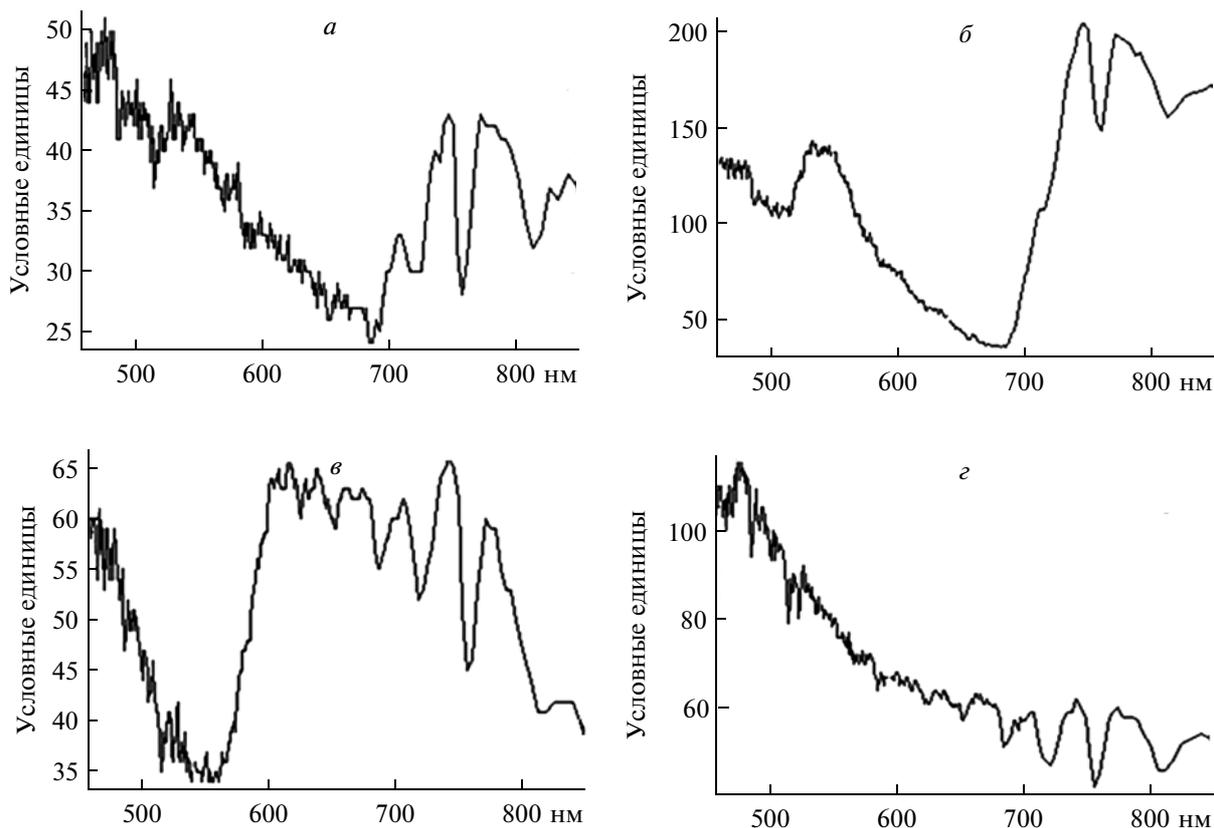


Рис. 10. Графики (ненормированные) спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в точках а, б, в, г рис. 9.

тов их инфраструктуры. Конструктивно каждый модуль линейки выполнен в виде моноблока без единой крепежной плиты. В качестве спектроделителя во всех приборах использована призма.

В табл. 5 перечислены характеристики представленных на рис. 14 модулей.

Предлагаемые потребителю гиперспектральные комплексы снабжаются компактной системой бортовой обработки (предобработка, включающая калибровку, а также тематическую обработку) и хранения данных в реальном времени, интегрируются с навигационной системой борта

Таблица 5. Характеристики линейки гиперспектральных модулей

№ пп	Характеристика	Гиперспектральные модули				
		УФ	УФ-ВИД	ВИД –ИК-1	ВИД –ИК-2	ВИД –ИК-3
1	Спектральный диапазон, мкм	0.2–0.3	0.35–0.55	0.45–1.0	0.45–0.9	0.4–1.0
2	Угол поля зрения, град	60	60	60	20	35
3	Пространственное разрешение с высоты 1 км, м	от 0.3				
4	Число каналов	до 500				
5	Частота кадров, 1/с	до 100				
6	Масса, кг	5.8	6.6	11	1.95	3.2
7	Габариты, мм	605 × 235 × 105	590 × 310 × 102	575 × 315 × 135	400 × 180 × 80	425 × 230 × 84
8	Наличие термостабилизации	да		да		

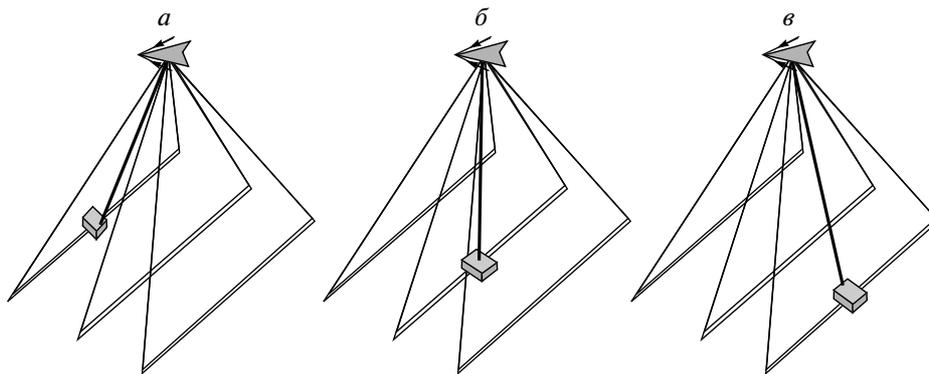


Рис. 13. Пролет многослойного гиперспектрометра над объектом.

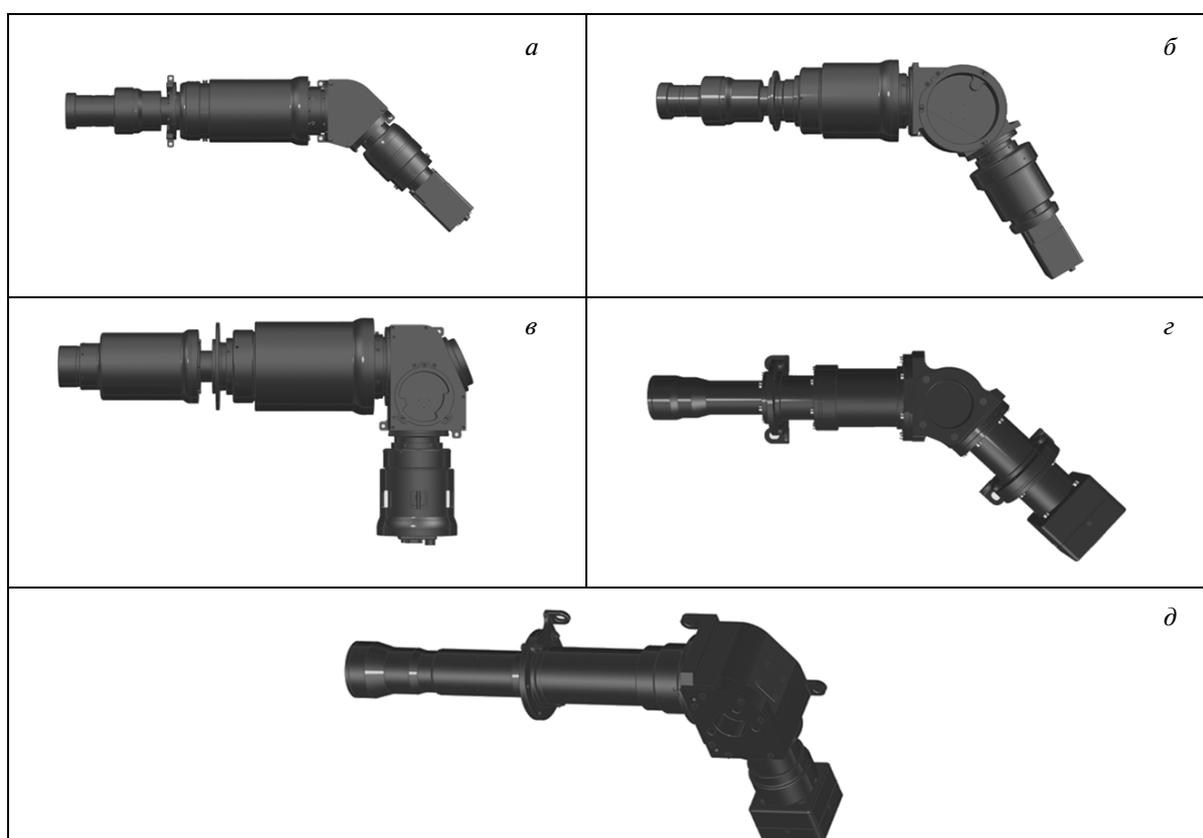


Рис. 14. Линейка гиперспектральных модулей: а – УФ-диапазон; б – УФ-ВИД; в – ВИД-ИК-1; г – ВИД-ИК-2; д – ВИД-ИК-3.

и обеспечивают передачу данных в каналы связи. Комплексы адаптируются по требованию потребителя к конкретным носителям и целевым назначениям. Возможно как использование отдельных модулей, так и комплексов модулей с масштабируемой системой бортовой совместной обработки данных.

Для демонстрации возможностей созданных гиперспектрометров на рис. 15 (на цветн. вклей-

ках) показан гиперспектральный снимок окружающей промышленной зоны модулем ВИД-ИК-3.

На рис. 16 показан график нормированной спектральной плотности энергетической яркости рассеяния атмосферой солнечного излучения в точке изображения неба на этом снимке. Хорошо видны линии поглощения различных газов и аэрозолей природного и антропогенного происхождения. Анализ спектральной кривой на рис. 16 пока-

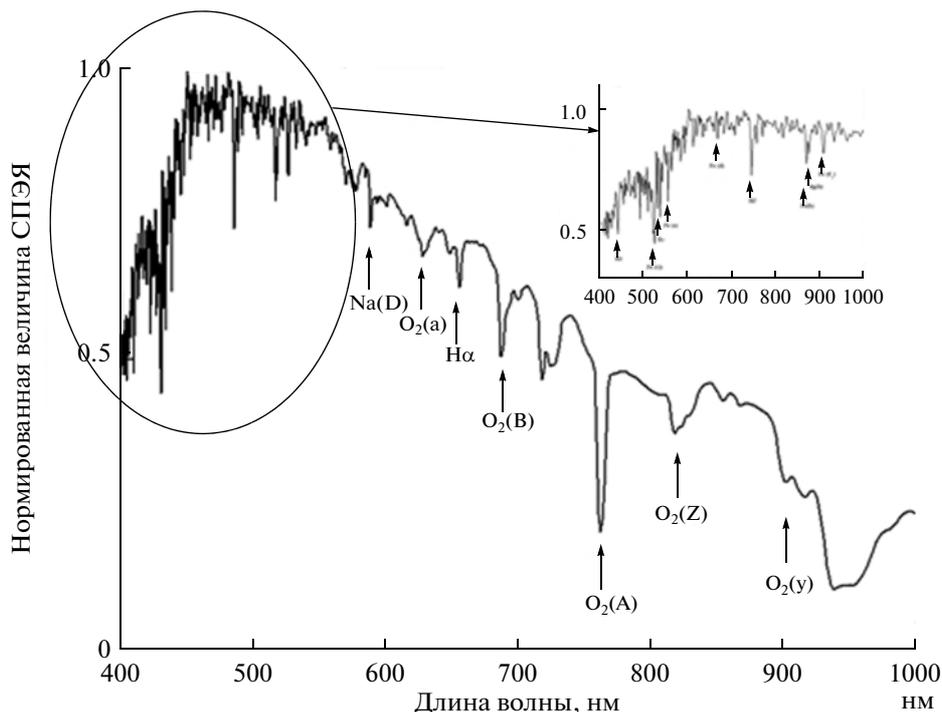


Рис. 16. Нормированное значение спектральной плотности энергетической яркости рассеяния атмосферой солнечного излучения.

зывает, что на разработанных для серийного производства образцах получено не только уникальное для широкоугольной гиперспектрометрии пространственное разрешение (около 1000 линий в поле зрения), но одновременно фактически достигнуто ультраспектральное разрешение (в сине-зеленой области спектра) — порядка 0.2 нм. Обратим внимание, что неравномерность по спектральной координате, свойственная призмным спектрометрам (на красной границе разрешение ухудшается до 2–3 нм), в данном случае коррелирует с более густым расположением линий поглощения в сине-зеленой области спектра. Поэтому имеется четкое выделение линий поглощения на всем диапазоне длин волн. Число спектральных каналов — не менее 500 (обратим внимание, что часто под спектральным разрешением понимают размерность используемой матрицы, что неверно).

Частота кадров на уровне 100 Гц реализуется практически в течение всего светлого времени суток.

Для диапазона 0.2–0.3 мкм возможно использование монофотонного сенсора (Белов и др., 2010, Rodionov et al., 1997a), обеспечивающего предельно высокий уровень чувствительности и динамического диапазона в данной области спектра. В этом случае кадровое накопление отсутствует и возможна регистрация быстропротекающих процессов с временным разрешением до 1 нс и лучше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводимые с начала 1990-х годов разработки гиперспектральных приборов ЗАО “НТЦ “Реагент” достигли к настоящему времени промышленной зрелости и подготовлены к серийному производству.

Достигнутые технические характеристики позволяют утверждать, что фактически создана широкодиапазонная светосильная ультраспектральная аппаратура высокого пространственного разрешения с возможностью бортовой обработки в реальном времени, что, с одной стороны, открывает новые информационные возможности, а, с другой стороны, требует развития методического аппарата ультраспектральной технологии, которая несколько отличается от гиперспектральной и в настоящее время представляется достаточно новой и перспективной технологией.

Разрабатываемые приборы могут устанавливаться на воздушных и автомобильных носителях, включая малоразмерные.

Предлагаемые потребителю гиперспектральные комплексы снабжаются компактной системой бортовой обработки (предобработка, включающая калибровку, а также тематическую обработку) и хранения данных в реальном времени, интегрируются с навигационной системой борта и обеспечивают передачу данных в каналы связи. Комплексы адаптируются по требованию потре-

бителя к конкретным носителям и целевым назначениям. Возможно как использование отдельных модулей, так и комплексов модулей с масштабируемой системой бортовой совместной обработкой данных.

Накопленный опыт создания гиперспектральной аппаратуры в ЗАО «НТЦ «Реагент» позволяет при наличии финансирования перейти к созданию компактной по габаритам и весам бортовой космической аппаратуры высокого пространственного и спектрального разрешения с необходимым числом каналов для мониторинга природно-техногенных объектов Земли.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.523.11.3005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесов Г.А. Проблемы аэрокосмической спектроскопии земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1980. № 2. С. 34–43.
- Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д. Кластеризация почвенно-растительных объектов с помощью нейросетевого алгоритма Кохонена // Зондирование Земли из космоса. Вып. 5. Т. I. М.: ООО Азбука-2000, 2008а. С. 32–39.
- 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 // Исслед. Земли из космоса. 2007а. № 2. С. 43–55.
- Балтер Б.М., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Останний А.Н., Родионова И.П., Родионов И.Д. Оценка возможностей гиперспектральной съемки для дистанционного обнаружения заданного типа растительности: Препринт № Пр-2134. М.: ИКИ РАН, 2007б. 28 с.
- Балтер Б.М., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В., Чекалина Т.И. Целевое выделение растительных сообществ по данным авиационной гиперспектральной съемки и много спектрального сенсора «QuickBird» // Исслед. Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 34–42.
- 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 № 726. М.: ИПМех РАН, 2003. 32 с.
- Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В., Порохов М.А., Родионов А.И., Родионов И.Д., Русанов В.В. Монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона «Скорпион» // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 47–50.
- Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф. Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли: Препринт № 702. М.: ИПМ РАН, 2002а. 35 с.
- Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Зубков Б.В., Яковлев Б.А. Оценка спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометра АГСМТ-1: Препринт № 704. М.: ИПМ РАН, 2002б. 36 с.
- Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д. Бортовой гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2012. Т. 9. № 3. С. 101–107.
- Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д. Оценка количественных биометрических характеристик посевов наркосодержащих культур по данным авиационного гиперспектрального зондирования // Исслед. Земли из космоса. № 5. 2011. С. 64–69.
- Егоров В.В., Калинин А.П., Мельникова Е.М., Родионов И.Д., Родионова И.П., Родионов А.И. Многощелевой гиперспектрометр типа push-broom для дистанционного зондирования земной поверхности: Препринт № 704. М.: ИПМ РАН, 2013. 28 с.
- Ильин А.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Родионов А.И. Способ оценки количественной характеристики зондируемой поверхности Земли: Патент № 2411468. 2011а. № 4.
- Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Родионов А.И. Способ устранения искажений изображений дистанционного зондирования, связанных со сложной траекторией движения носителя сенсора изображения: Патент № 2411449. 2011а. № 4.
- Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2006. № 3. С. 11–24.
- 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 // Докл. РАН. 2004. Т. 397. № 1. С. 45–48.
- Орлов А.Г. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов: Дис. канд. техн. наук. М.: ИКИ РАН, 2008. 163 с.
- Родионов И.Д., Родионов А.И., Калинин А.П., Егоров В.В. Многоакурсный гиперспектрометр для дистанционного зондирования земной поверхности: Патент № 121366. 2012. № 29.
- Хренов Н.Н., Дмитриевский А.Н., Ананенков А.Г., Шермет В.В., Пономарев А.А., Родионов И.Д. Гиперспектральный аэрокосмический мониторинг трасс трубопроводов и территорий месторождений // Наука и техника в газовой промышленности. 2001. № 2-3. С. 37–46.
- Akim E.L., Behr P., Bries K., Egorov, Fedunin E.Yu., Kalinin A.P., Kalashnikov S.K., 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 № 32. М.: Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, 2004. 36 p.

Dedikov E., Khrenov N., Lukyaschenko V., Salikhov R., Ponomarev A., Ovchinnikov M., Rodionov I. The Russian small satellite for hyperspectral monitoring of gas pipelines // Digest of 3rd Int. Symp. Int. Acad. of Astronautics. Berlin. 2001. P. 235–239.

Larar Allen M., Hyo-Sang Chung, Makoto Suzuki, Han'guk Haeyang Yŏn'guwŏn. Multispectral, hyperspectral, and ultraspectral remote sensing technology, techniques, and applications III // Proc. SPIE International Society for Optical Engineering. 13–14 October 2010. Incheon, Korea Republic, 2010. V. 7857.

Makridenko L.A., Salikhov R.S., Ovchinnikov M.Y., Khrenov N.N., Montenegro S., Behr P., Pletner S., Rodionov I.D. Mono-photon technology based on hyperspectral systems for remote sensing in Russia. // 4th IAA Symp. Small satellites for Earth observation. April 7–11, 2003. Berlin. iaa-b4-702.

Massimo M., Maselli F., Chiesi M., Benedetti R., Cristofori S., Guzzi D., Magnani F., Raddi S., Maffei C. Multi-angular hyperspectral observations of Mediterranean forest with PROBA-CHRIS // Proc. SPIE 5546, Imaging Spectrometry X, 204. October 15, 2004. doi:10.1117/12.559348.

Rodionov I., Ponomarev A. Active Optical Ecological Monitoring // SPIE. 1993. V. 2107. P. 476–494.

Rodionov I., Ponomarev A. Wide aperture acousto-optic turnable filters for visible and UV lights // SPIE. 1996. V. 2449. P. 200–207.

Rodionov I., Rodionova I., Ovchinnikov M. Approaches to develop the Earth observing systems based on the turnable acousto-optic filter and separate photons counter with MCP // SPIE. 1997a. V. 3117. № 3117-10.3.

Rodionov I., Rodionova I., Ovchinnikov M. The microsatellite for remote exploration of environment // SPIE. 1997b. V. 3119. № 3119-11.

Aviation Hyperspectral Complexes for Remote Sensing Problems

I. D. Rodionov¹, A. I. Rodionov², L. A. Vedeshin³, A. N. Vinogradov⁴, V. V. Egorov⁵, A. P. Kalinin⁶

¹ *Semyonov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre, Moscow*

³ *Presidium of Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁴ *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow*

⁵ *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁶ *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Retrospect of aviation hyperspectral developments carried out by Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre is presented. Hyperspectral devices which were developed from the end of past century to nowadays are described. The set of hyperspectrometers created in the last time covered the band from UV (0.2 μ) to near infrared (1.0 μ). These devices can be installed in air and auto carriers. Created by Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre hyperspectral devices are ready for the series production. Their technical characteristics permit to confirm that it was really created the wide-range high-aperture ultra spectral equipment with high spatial resolution.

Keywords: hyperspectrometer, aviation, remote sensing, spectrum, image, spectral and spatial resolution, field of view

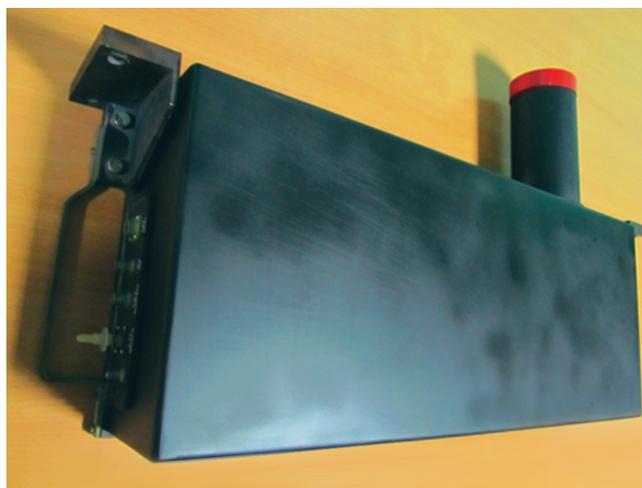


Рис. 3

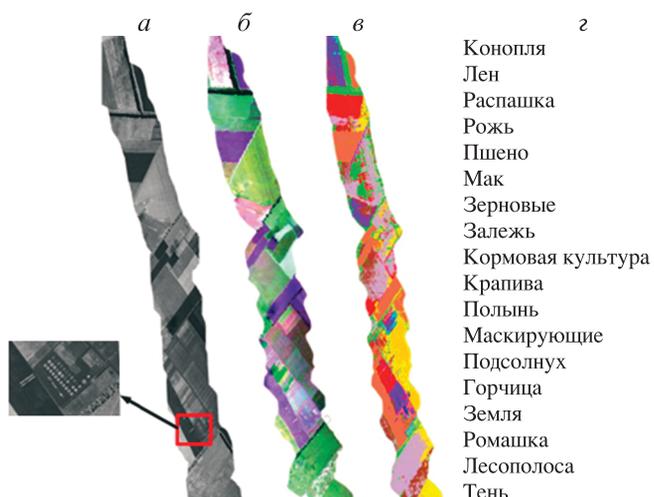


Рис. 7

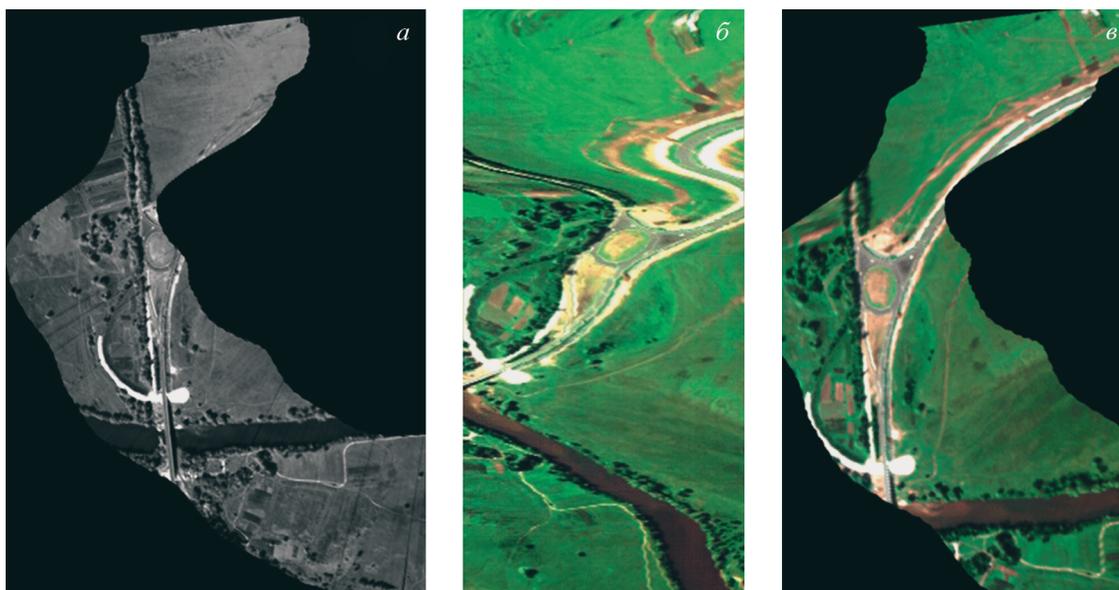


Рис. 6

Рис. 3. Гиперспектральный модуль видимого и ближнего ИК-диапазона.

Рис. 6. Пример геометрической коррекции гиперспектральных изображений: *а* – видеоизображение корректируемого участка; *б* – исходное гиперспектральное изображение этого же участка; *в* – результат геометрической коррекции.

Рис. 7. Пример использования материалов авиационной гиперспектральной съемки для классификации растительности: *а* – трассовая видеосъемка (на врезке показан тестовый полигон); *б* – исходное гиперспектральное RGB-изображение трассы; *в* – результаты классификации с обучением; *г* – легенда.



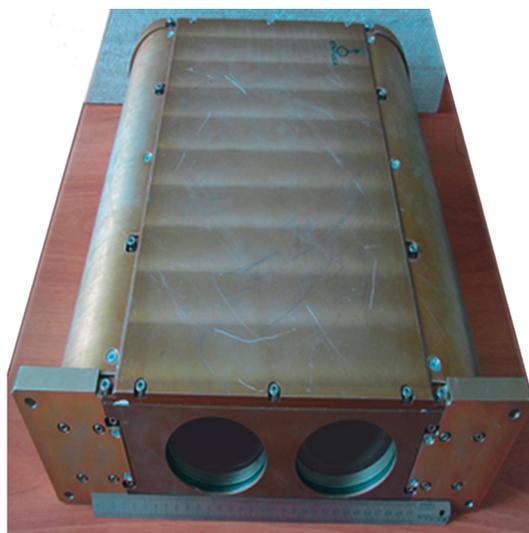


Рис. 8



Рис. 9



Рис. 11

Рис. 8. Макет бортового гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением.

Рис. 9. Гиперспектральное RGB-изображение поселка и его окрестностей.

Рис. 11. Гиперспектральное RGB-изображение просеки в лесу с линией электропередачи, полученное с борта самолета.



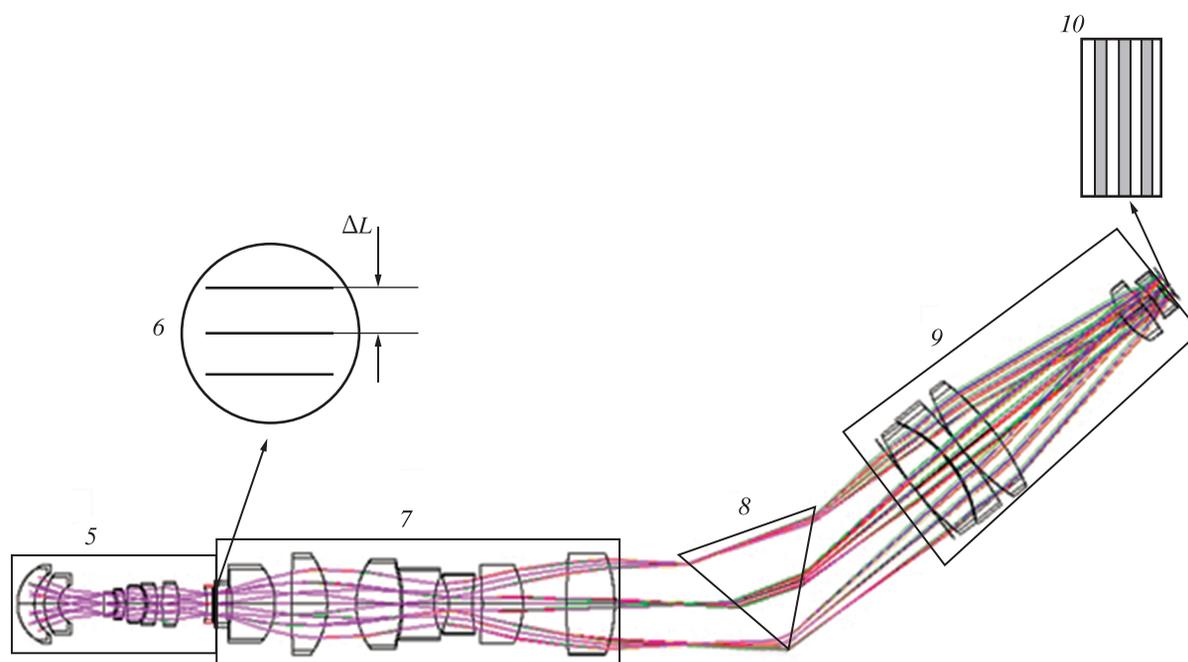


Рис. 12. Оптическая схема многоканального (трехщелевого) гиперспектрометра.



Рис. 15. Гиперспектральный RGB-снимок, полученный из окна сканированием гиперспектрометром ВИД-ИК-2.

