

ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИКИ РАН)

Пр-2176

**А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
Е. М. Мельникова, А. И. Родионов, И. Д. Родионов**

ЛИНЕЙКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Представлено к печати
заместителем директора ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

**МОСКВА
2015**

The Set of Hyperspectral Sensors in the Optical Band

*A. N. Vinogradov, V. V. Egorov, A. P. Kalinin,
E. M. Melnikova, A. I. Rodionov, I. D. Rodionov*

The hyperspectral complex of aviation sensor location working in 0.30...1.0 μm is described. The devices are designed on the scheme using prism as a dispersing unit. The registration of hyperspectral data is produced by the CMOS matrix. The main technical characteristics of sensors as well as the examples hyperspectral RGB pictures and spectra received during the field tests are given.

Keywords: hyperspectrometer, objective, diaphragm unit, dispersing unit, photo-sensitive matrix, prism, resolution, sensor.

Линейка гиперспектральных сенсоров оптического диапазона

*А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
Е. М. Мельникова, А. И. Родионов, И. Д. Родионов*

Описан комплекс гиперспектральных сенсоров, работающих в диапазоне 0,30...1,0 мкм. Приборы построены по оптической схеме, использующей призму в качестве диспергирующего устройства. Регистрация гиперспектральных изображений производится фотоприёмной КМОП-матрицей. Приведены основные тактико-технические характеристики сенсоров и примеры гиперспектральных RGB-изображений, полученных в ходе натурных испытаний.

Ключевые слова: гиперспектрометр, объектив, диафрагменный узел, диспергирующее устройство, фотоприёмная матрица, призма, разрешение, сенсор.

ВВЕДЕНИЕ

Современные гиперспектрометры позволяют получать высокодетальную пространственную и спектральную информацию о типе и состоянии зондируемых природных и антропогенных объектов земной поверхности, а также о различных динамических процессах, например, процессах горения и взрыва. Интерес, проявляемый к такого рода приборам, объясняется тем, что в силу гауссовского распределения мгновенных значений электромагнитного поля, поступающего в объектив сенсора, вся содержащаяся в оптическом сигнале полезная информация отображается именно в спектре.

Чем точнее воспроизводится огибающая спектра принимаемого излучения, тем большее количество информации можно извлечь из него [Исимацу, 1980]. Не случайно, поэтому стремление разработчиков к увеличению числа спектральных каналов и большей спектральной разрешающей способности сенсоров: от единиц спектральных каналов многоспектральных устройств к нескольким сотням и вплоть до полутора тысяч каналов в гиперспектрометрах.

Гиперспектрометры могут применяться с авиационных (самолётов, вертолётов, беспилотных летательных аппаратов), спутников, в наземных исследованиях и лабораторных условиях. Данные гиперспектральных измерений особенно полезны для решения таких сложных задач, как детектирование малых объектов, идентификация состава объектов земной поверхности и происходящих динамических процессов, дифференциация близких классов 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 потребителя объектов и процессов на поверхности Земли.

К сожалению, в России в этой области техники наблюдалось определённое отставание от разработок, выполненных рядом зарубежных стран. Для коренного исправления сложившейся ситуации в России прилагаются значительные усилия, направленные на создание перспективных образцов гиперспектральных сенсоров. В частности, коллектив, в который вошли сотрудники ЗАО «НПЦ «Реагент», ИКИ РАН, Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в течение многих лет разрабатывал гиперспектральные сенсоры оптического диапазона [Виноградов и др., 2012; Воронцов и др., 2002; Егоров и др., 2007; Калинин и др., 2006, 2008; Непобедимый и др., 2004; Родионов и др., 2013]. Накопленный в ходе этих разработок опыт позволил создать линейку гиперспектрометров диапазона 0,30...1,0 мкм по своим основным тактико-техническим характеристикам не уступающих аналогичным зарубежным образцам.

При проектировании линейки гиперспектрометров особое внимание было уделено расчету их оптических схем, диспергирующих устройств и выбору детекторов. В связи с этим целью настоящей работы является описание разработанной линейки гиперспектральных модулей, работающих в указанном диапазоне, их тактико-технических характеристик, результатов натурных экспериментов, выполненных с их помощью, а также возможных областей применения научного и прикладного характера.

1. ЛИНЕЙКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

В период 2011–2013 гг. в ЗАО «НПЦ «Реагент» была разработана, прошла приёмочные (O_1), лабораторные и лётные испытания, а также выпущена в виде опытной серии линейка малогабаритных гиперспектральных модулей УФ-ВИД, ВИД-ИК1, ВИД-ИК2 и ВИД-ИК3. Тем самым был завершён важный этап исследовательской работы по апробации гиперспектральной технологии и осуществлён переход к следующему этапу — промышленному освоению производства современных гиперспектральных сенсоров и их серийного производства.

Все гиперспектрометры построены по типу push-broom. Они в каждый момент времени регистрируют узкую полосу зондируемой поверхности. Выделение узкой полоски производится посредством щели, расположенной в диафрагменном узле. Диафрагменный узел

помещается в плоскость наилучшего изображения входного объектива (фокальная плоскость).

При проектировании гиперспектральных модулей диапазона 0,30...1,0 мкм перед разработчиками была поставлена задача получения максимально возможных значений по пространственному и спектральному разрешению при заданных величинах поля зрения. В связи с этим был использован подход, основанный на поиске различного рода компромиссных решений, что позволило найти оптимальный вариант конструкции, для которого была рассчитана оптическая система гиперспектральных модулей. В частности, было принято решение о создании нескольких гиперспектральных модулей с возможностью перекрытия всего указанного спектрального диапазона.

В ходе модельных экспериментов, с помощью программы Zemax были выполнены расчеты хода лучей в гиперспектрометре и пятен рассеяния точки в плоскости фотоприёмной матрицы на предмет оценки потенциальной пространственной разрешающей способности гиперспектральных модулей. На основе этих расчётов были выбраны конструкции гиперспектральных модулей. На рис. 1 показан ход лучей в одном из гиперспектральных модулей, (который в дальнейшем получил название ВИД-ИКЗ), а на рис. 2 приведён пример расчёта пятен рассеяния для этого же модуля при различных углах визирования точечного источника (0; 6,3; 9,0; 12,6 и 18° — точки 1–5) и для двух длин волн (450 и 900 нм).

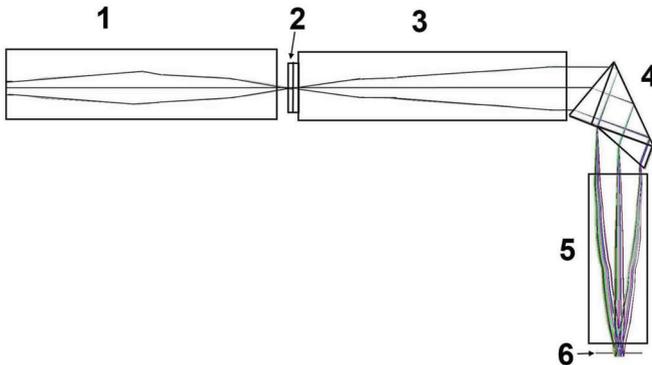


Рис. 1. Рассчитанный ход лучей в гиперспектральном модуле ВИД-ИКЗ: 1 — входной объектив; 2 — диафрагменный узел со щелью; 3 — коллиматор; 4 — диспергирующий элемент; 5 — проекционный объектив; 6 — фотоприёмная матрица

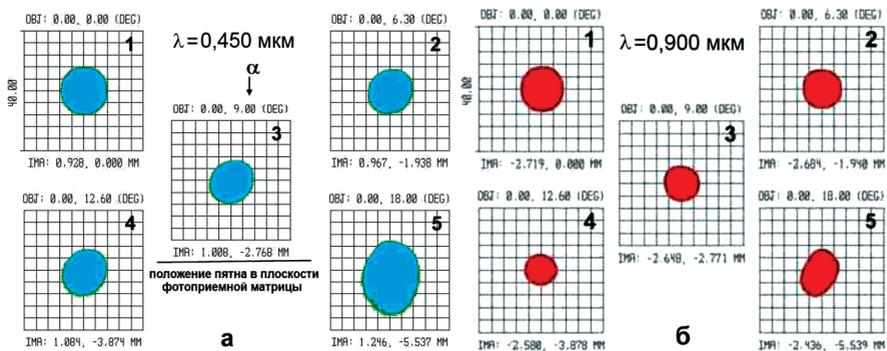


Рис. 2. Пятна рассеяния точки в плоскости изображения для длины волны: а — 450 нм; б — 900 нм

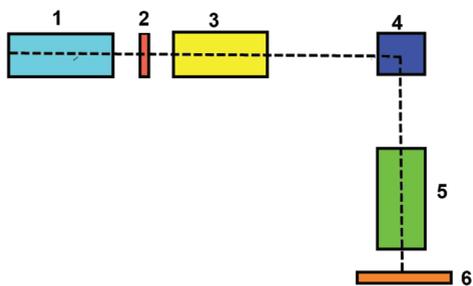


Рис. 3. Функциональная схема гиперспектральных модулей (соответствие цифр элементам совпадает с рис. 1)

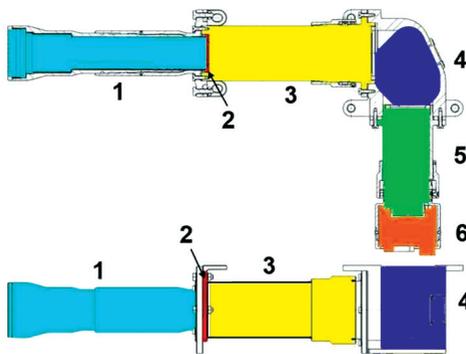


Рис. 4. Конструкция модуля ВИД-ИКЗ (соответствие цифр элементам совпадает с рис. 1)

Из анализа рис. 2 следует, что размеры пятен лежат в диапазоне от 8 до 16 мкм, что при фокусном расстоянии модуля в 17 мм будет соответствовать размерам пиксела на земной поверхности с высоты съёмки в 1 км — от 0,3 до 0,6 м.

На основании выполненных расчётов была разработана соответствующая конструкторская документация и изготовлена опытная серия гиперспектрометров.

В гиперспектрометрах могут использоваться различные диспергирующие элементы: дифракционная решётка, голографическая решётка, призма, сочетание призм, сочетание оптических клиньев и дифракционной решётки и др. Одним из наиболее простых вариантов реализации диспергирующего элемента является стеклянная призма. Для спектральных приборов призмы изготавливают из флинтгов и тяжёлых флинтгов, поскольку эти стекла обладают высокими показателями преломления и дисперсией. Нами использовались призмы как с преломляющим углом 60° , так и постоянного угла отклонения. В случае призмы с преломляющим углом 60° ещё не происходит полного внутреннего отражения от второй поверхности и достигается высокая дисперсия. В одном из гиперспектральных модулей с целью уменьшения его размеров использовалась призма постоянного угла отклонения 90° (призма Аббе) (см. рис. 1, элемент конструкции 4).

Все гиперспектральные модули имеют одинаковую функциональную схему (рис. 3).

Конструктивно каждый модуль линейки выполнен в виде моноблока без единой крепежной плиты.

На рис. 4 показана конструкция модуля ВИД-ИК3.

Были проведены измерения спектральной разрешающей способности гиперспектральных модулей. На рис. 5 цифрой 1 показана измеренная зависимость разрешающей способности $\Delta\lambda$ модуля ВИД-ИК3 от длины волны, а цифрой 2 — подгонка $\Delta\lambda \approx \lambda^3$, где λ — длина волны, что соответствует теоретическим расчётам для призматического гиперспектрометра.

На рис. 6 представлены фотографии разработанных гиперспектральных модулей.

Гиперспектральные модули имеют небольшие вариации по значению спектрального диапазона и существенно отличаются по величине угла поля зрения и потому выбор их конкретного варианта должен определяться комплексом решаемых задач. Различные значения угла поля зрения гиперспектральных модулей достигались за счёт изменения фокусного расстояния их оптических систем. Кроме того, модуль ВИД-ИК1 в отличие от трёх других модулей снабжён

системой термостабилизации, что привело к увеличению его массы до 11 кг. Технические характеристики гиперспектральных модулей приведены в табл. 1.

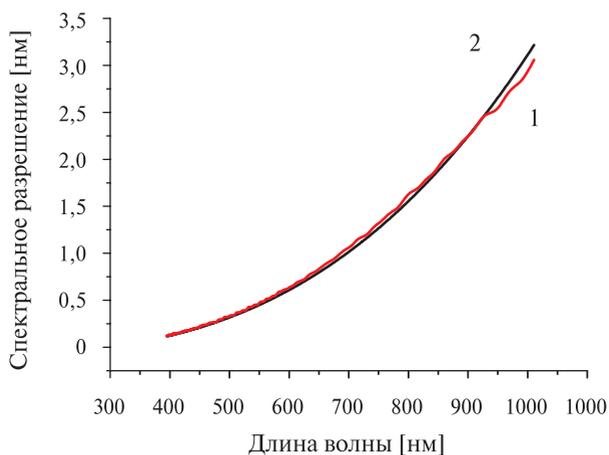


Рис. 5. Зависимость разрешающей способности модуля ИК-ВИД3 от длины волны: 1 — измеренная; 2 — подгонка $\Delta\lambda \approx \lambda^3$

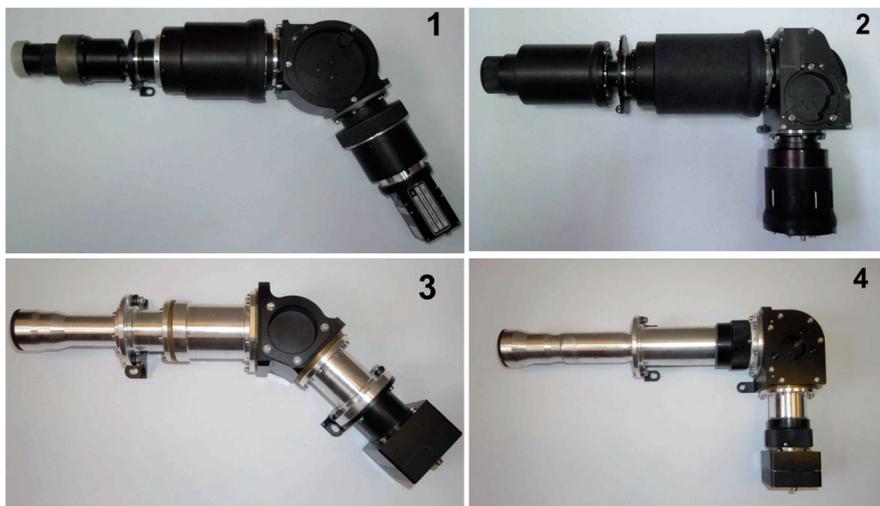


Рис. 6. Линейка гиперспектральных модулей: 1 — УФ-ВИД (0,30...0,5 мкм); 2 — ВИД-ИК1 (0,45...1,0 мкм) (с термостабилизацией); 3 — ВИД-ИК2(4) (0,45...0,9 мкм); 4 — ВИД-ИК3(2) (0,4...1,0 мкм)

Таблица 1. Характеристики гиперспектральных модулей

Характеристика	Гиперспектральные модули			
	УФ-ВИД	ВИД-ИК1	ВИД-ИК2	ВИД-ИК3
1. Спектральный диапазон [мкм]	0,35...0,55	0,45...1,0	0,45...0,9	0,4...1,0
2. Угловое поле [град]	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 70			
6. Масса, кг	6,6	11	1,95	3,2
7. Габариты (длина × ширина × высота) [мм]	590×310×102	575×315×135	400×180×80	425×230×84

Все гиперспектральные модули могут снабжаться компактной системой обработки (предобработка, включающая калибровку, а также тематическую обработку) и хранения данных в реальном времени. В случае использования разработанных гиперспектрометров на авиационных носителях они интегрируются с бортовой навигационной системой и обеспечивают передачу данных в каналы связи. Эти системы адаптируются по требованию потребителя к конкретным носителям и целевым назначениям.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Разработанные гиперспектрометры могут применяться как на борту авиационных носителей, так и в наземных и лабораторных экспериментах. Для обеспечения сканирования по пространству в случае установки гиперспектрометров на авиационные и космические носители используют движение аппарата-носителя (самолёта, вертолёта или спутника), а в случае наземных и лабораторных исследований для сканирования гиперспектрометра используется поворотная платформа (рис. 7), которая управляется компьютером.



Рис. 7. Поворотная платформа, на которой установлен гиперспектрометр

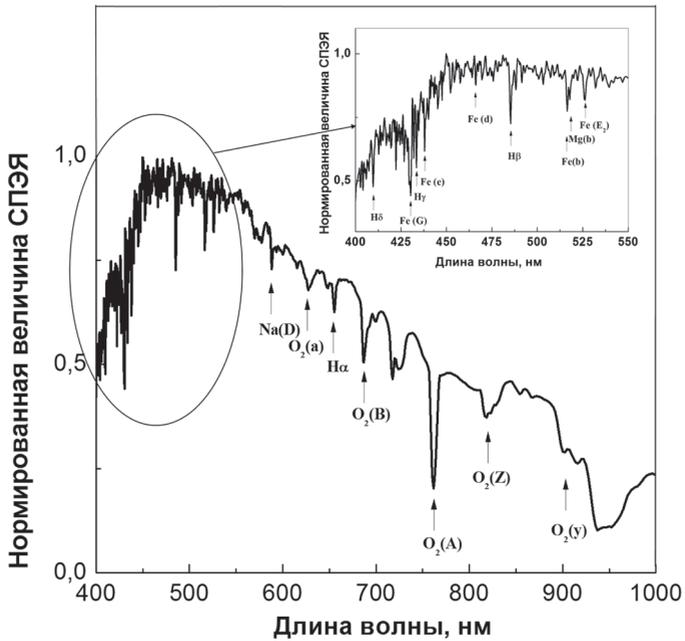


Рис. 8. Значение спектральной плотности энергетической яркости рассеяния атмосферой солнечного излучения, приведённое к единице

Целью экспериментов являлась проверка характеристик гиперспектральных модулей в режиме дистанционного зондирования различных природных и антропогенных объектов при проведении натурных измерений.

В одном из первых экспериментов изучались возможности гиперспектрометров применительно к исследованию тонкой структуры спектров городской атмосферы (Москва), характеризуемой наличием большого числа различных примесей. Так, на рис. 8 показан график нормированного рассеянного атмосферой солнечного излучения, полученный с помощью модуля ВИД-ИКЗ. На рисунке хорошо видны линии поглощения различных газов и аэрозолей природного и антропогенного происхождения (обозначены в основном линии солнечного излучения). Анализ спектральной кривой, приведённой на этом рисунке, позволяет утверждать, что на разработанных для серийного производства опытных образцах гиперспектрометров получено не только высокое для широкоугольной гиперспектрометрии угловое (пространственное) разрешение порядка 1 мрад (около 2000 точек в поле зрения), но одновременно, фактически, достигнуто очень хорошее спектральное разрешение (в сине-зелёной области спектра) — порядка 0,2 нм.

Следует отметить, что неравномерность разрешения по спектральной координате (см. рис. 5), свойственная призмным спектрометрам, имеет два противоположных эффекта: с одной стороны она приводит к ухудшению спектрального разрешения на красной границе спектра (разрешение ухудшается до 2...3 нм, а с другой, — имеет очень хорошее разрешение в сине-зелёной области спектра. Это свойство призм обеспечивает чёткое выделение спектральных линий поглощения во всем диапазоне длин волн.

Далее, в качестве одной из площадок, на которой выполнялась гиперспектральная съёмка, был выбран аэродром в Жуковском в период проведения на нем авиасалона МАКС. Другим полигоном являлась территория местности, с происходящим на ней пожаром.

Для демонстрации возможностей созданных модулей на верхней части рис. 9 показан гиперспектральный в псевдо-RGB представлении снимок, полученный с помощью модуля ВИД-ИКЗ. В нижней части рис. 9 приведены нормированные графики спектральной плотности энергетической яркости рассеяния (СПЭЯ) для пронумерованных объектов (цифры 1—4, указанные на спектральных графиках, соответствуют точкам на изображении; цифра 5 соответствует точке на белой крыше ангара, спектр которой выбран в качестве нормирующей функции).

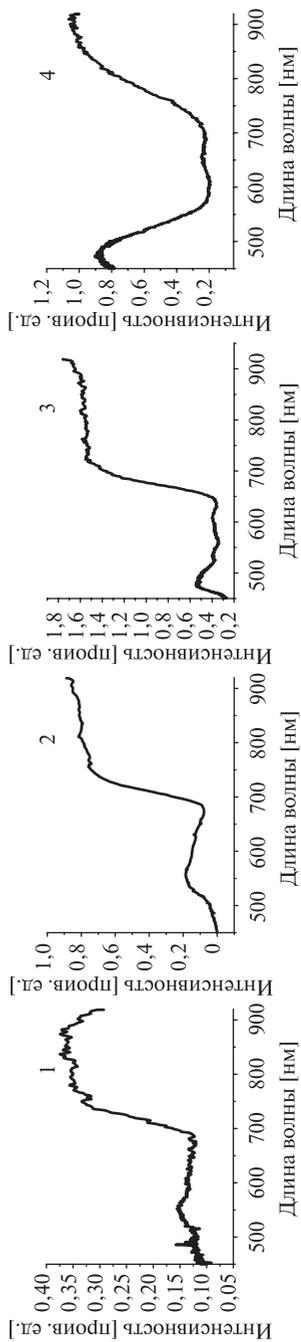
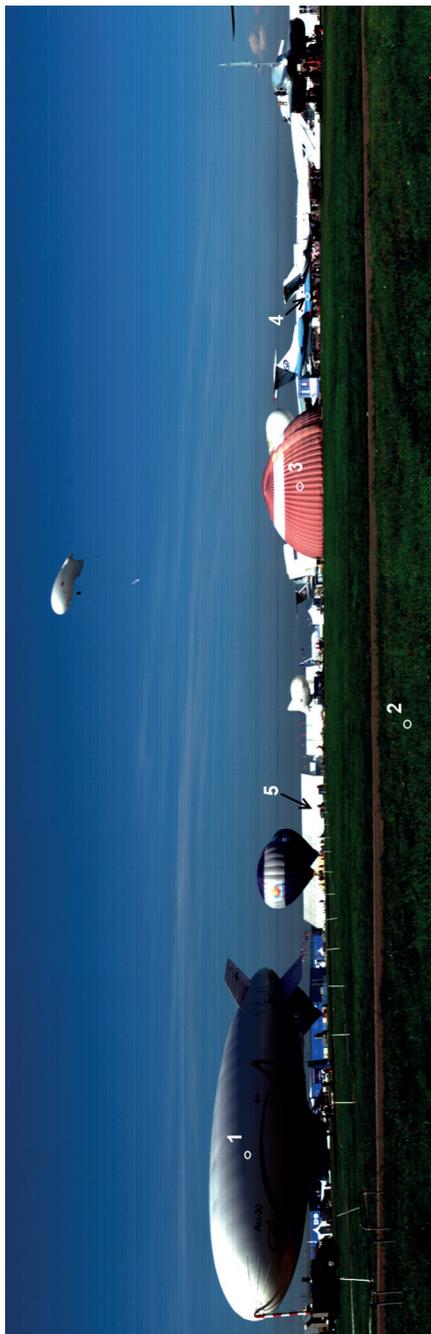


Рис. 9. RGB-изображение территории аэродрома и графики нормированной спектральной плотности энергетической яркости в точках 1—4

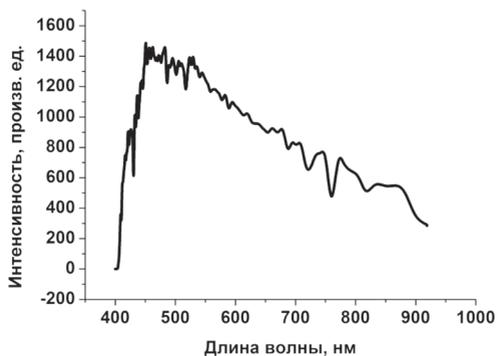


Рис. 10. График спектральной плотности энергетической яркости в точке 5 рис. 9

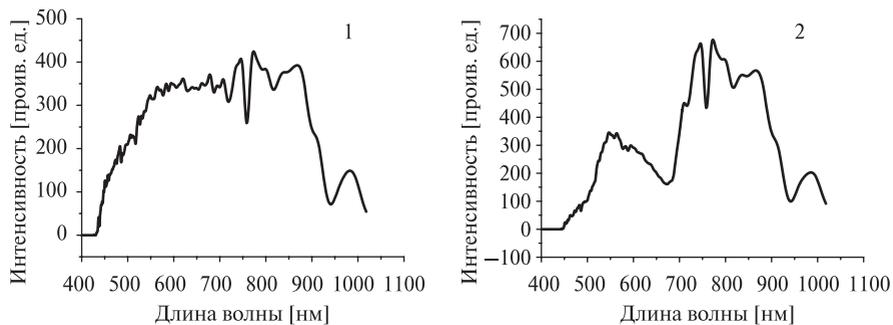


Рис. 11. Результаты полевого эксперимента

Гиперспектральные данные, псевдоцветное изображение которых приведено на рис. 9, подверглись нормировке на функцию спектра отражения (рис. 10) в точке 5 (белая крыша ангара (см. рис. 9)). Это позволило удалить пики, соответствующие линиям поглощения атмосферных газов.

Поведение кривых на графиках рис. 9 качественно соответствует спектральным образам зондируемых объектов: серая поверхность аэростата 1, зелёная трава газона 2, розовый ангар 3 и серебристая поверхность самолёта 4.

На рис. 11 показаны результаты полевого эксперимента, проводимого с использованием гиперспектрального модуля ВИД-ИКЗ на тестовом полигоне, где в верхней части приведено псевдоцветное RGB-изображение территории тестового полигона; в нижней части рисунка приведены графики СПЭЯ для точек 1 и 2, показанных на RGB-изображении. Точка 1 была выбрана в месте, которое подверглось пожару, а точка 2 соответствует участку, неповреждённому пожаром. В отличие от рис. 9, гиперкуб для этого рисунка не был нормирован и поэтому на спектрах хорошо выделяются линии, соответствующие линиям поглощения атмосферными газами.

Спектр в точке 1 соответствует СПЭЯ (спектральная плотность энергетической яркости) растительности с характерным пиком в диапазоне длин волн 500...600 нм. Спектр поверхности в точке 2 имеет совершенно другую структуру, поскольку сам объект зондирования представлял собой участки почвы, подвергшийся действию пожара, причём, по-видимому, небольшая часть почвенного покрова была покрыта травяной растительностью. Действительно, кривая СПЭЯ для этой точки практически не имеет голубого и зелёного цвета, а имеет место преобладание красной и инфракрасной составляющих и не демонстрирует полос поглощения, обусловленных хлорофиллом.

3. ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ СЕНСОРАМИ ЛИНЕЙКИ

Разработанная ЗАО «НПЦ «Реагент» линейка гиперспектрометров может способствовать решению целого комплекса научных и прикладных задач как самостоятельно, так и в комплексе с авиационными средствами дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), осуществляя съёмку районов, не охваченных космическим мониторингом, выполняющая калибровочные измерения на тестовых полигонах, проводя изме-

рения спектров зондируемых объектов в целях создания базы данных (БД) спектральных и связанных с ними предметно-специфических характеристик (ПСХ) и метаданных. Кроме того, гиперспектрометры являются уникальными средствами лабораторных исследований, в частности, изучения быстропротекающих динамических процессов.

Среди множества научных и прикладных задач, решаемых с помощью данных гиперспектрального зондирования, главными можно считать следующие:

- исследования, проводимые на тестовых аэрокосмических полигонах;
- обнаружение предвестников и мониторинг чрезвычайных ситуаций;
- экологический мониторинг;
- мониторинг в интересах лесного и сельского хозяйства;
- обнаружение зон, перспективных для поиска полезных ископаемых;
- исследование процессов горения и взрыва.

Рассмотрим перечисленные задачи более подробно.

3.1. Исследования, проводимые на тестовых аэрокосмических полигонах

Дистанционные (авиационные) спектральные съёмки и измерения *in situ*, проводимые на тестовых полигонах вплоть до начала 2000-х гг. были нацелены на выявление инвариантных зависимостей спектральных характеристик различных природных и антропогенных объектов и их ПСХ, исследование пространственно-временной динамики этих характеристик, а также на выполнение измерений для калибровки данных, получаемых со спутников ДЗЗ, находящихся в полете. К сожалению, в России, по различным причинам эти работы были сведены к минимуму или вообще прекращены. Однако развитие передовых аэрокосмических технологий ДЗЗ невозможно без постоянного проведения подобного рода работ, особенно с появлением таких мощных исследовательских инструментов как современные гиперспектрометры.

3.2. Обнаружение предвестников и мониторинг чрезвычайных ситуаций

Здесь можно выделить следующие актуальные проблемы:

- краткосрочное прогнозирование сильных землетрясений;

- своевременное прогнозирование (предупреждение об угрозах возникновения) лесных пожаров;
- своевременно прогнозирование (предупреждение об угрозах возникновения) природных наводнений;
- предупреждение о ЧС техногенного характера на объектах техносферы таких как:
 - геотехнические объекты и системы;
 - высокоэнергетические технические объекты и системы;
 - технические объекты и системы, функционирование которых связано с угрозой взрывов и утечек и/или выбросов вредных и особо опасных (химических, радиоактивных, биологических) веществ (объекты оборонно-промышленного комплекса);
 - объекты транспортной инфраструктуры;
- объекты и системы и транспортировки нефти и природного газа;
- высокоэнергетические/динамические объекты и системы.

3.3. Экологический мониторинг

Проблемы, решаемые по данным гиперспектрометров:

- загрязнение воздушного бассейна городов и крупных промышленных центров;
- обнаружение несанкционированных свалок твёрдых отходов;
- мониторинг водоохраных зон, в том числе обнаружение мест незаконного лова рыбы;
- мониторинг эрозии почв (водной, воздушной) и их загрязнения разливами нефтепродуктов и солями твёрдых металлов;
- контроль состояния лесов, обнаружение очагов насекомых вредителей.

3.4. Мониторинг в интересах сельского и лесного хозяйства

Среди наиболее актуальных проблем мониторинга, решаемых с помощью гиперспектральных сенсоров можно выделить следующие:

- определение фенофаз развития растений и своевременное выявление их аномалий;
- обнаружение процессов полегания, вымокания и увядания посевов, связанного с недостатком влаги;
- контроль фитосанитарного состояния посевов и лесных массивов;
- прогноз урожайности посевов.

3.5. Обнаружение зон, перспективных на поиск полезных ископаемых

Эти проблемы достаточно хорошо изучены, но по-прежнему остаются актуальными:

- обнаружение регионов, перспективных на поиск новых месторождений нефти и газа;
- обнаружение геологических объектов, приуроченных к залежам полиметаллических руд, урановой руды, алмазов в других полезных ископаемых;
- поиск запасов пресной воды в аридных районах.

3.6. Исследование процессов горения и взрыва

Проблемы исследования процессов горения и взрыва с помощью гиперспектрометра представляют большой интерес, так как позволяют получать спектральную информацию одновременно по всей длине узкой полосы зондируемой поверхности, вырезаемой щелью. С помощью гиперспектрометра можно изучать как природные пожары, пожары, связанные с антропогенными процессами, так и взрывы и процессы горения в лабораторных условиях [Калинин и др., 2008].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность проводимых в России работ по созданию новых типов авиационных гиперспектральных модулей определяется их способностью извлекать максимум информации из оптического излучения, восходящего от дистанционно зондируемых объектов, а также наметившимся в 90-е годы прошлого столетия отставанием отечественных разработок от разработок, выполненных за рубежом. Разработанные в ЗАО «НПЦ «Реагент» гиперспектральные модули по своим тактико-техническим характеристикам не уступают и даже превосходят современные зарубежные авиационные изображающие спектрометры. В частности, это касается пространственного разрешения и числа спектральных каналов модулей. ЗАО «НПЦ «Реагент» освоено промышленное производство гиперспектральных модулей УФ, видимого и ближнего ИК-диапазона. Натурные испытания одного из модулей подтвердили правильность заложенных в них конструкторских решений и возможность по данным гиперспектрального зондирования уверенно определять тип и состояние зондируемых природных

и антропогенных объектов в интересах решения множества научных, отраслевых и военных задач. Обнадёживающими являются также результаты лабораторных экспериментов по исследованию динамических процессов горения и взрыва.

ЛИТЕРАТУРА

- [Виноградов и др., 2012] *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. 2012. Т. 8. № 2. С. 101–107.
- [Воронцов и др., 2002] *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. М.: ИПМ РАН, 2002. № 702. 35 с.
- [Егоров и др., 2007] *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. 2007. № 8. С. 33–35.
- [Исимару, 1980] *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир. 1980. 280 с.
- [Калинин и др., 2006] *Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д.* Авиационный гиперспектрометр // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2006. № 3. С. 11–24.
- [Калинин и др., 2008] *Калинин А. П., Трошин К. Я., Орлов А. Г., Родионов А. И.* Гиперспектрометр как система контроля и изучения процессов горения и взрыва // Датчики и системы. 2008. № 12. С. 19–21.
- [Непобедимый и др., 2004] *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. 2004. Т. 397. № 1. С. 45–48.
- [Родионов и др., 2013] *Родионов И. Д., Родионов А. И., Ведешин Л. А., Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П.* Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 81–93.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Линейка гиперспектральных модулей	4
2. Результаты натурных и лабораторных испытаний гиперспектральных модулей	9
3. Области возможного применения гиперспектральных данных, получаемых сенсорами линейки	14
3.1. Исследования, проводимые на тестовых аэрокосмических полигонах	15
3.2. Обнаружение предвестников и мониторинг чрезвычайных ситуаций	15
3.3. Экологический мониторинг	16
3.4. Мониторинг в интересах сельского и лесного хозяйства.	16
3.5. Обнаружение зон, перспективных на поиск полезных ископаемых	17
3.6. Исследование процессов горения и взрыва	17
Заключение	17
Литература	18

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 12.12.2014 г.

Заказ 3344

Формат 70×108/32

Тираж 75

1,22 уч.-изд. л.