

Летные исследования видеоспектрометров для малого космического аппарата

Б.В. Шилин¹, В.Н. Груздев¹, А.В. Марков²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр
экологической безопасности РАН,
197110, Санкт-Петербург, Корпусная, 18,
e-mail: vicgruz@gmail.com

² ФГБОУ «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского»,
e-mail: markov_av69@mail.ru

Проведены всесторонние летные исследования действующих образцов видеоспектрометров Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики (СПБУИТМО), получены монохромные видеоспектральные изображения высокого качества, спектры отраженного излучения большого количества объектов земной поверхности.

Ключевые слова: видеоспектрометр, монохромные изображения, дисперсия, спектры отражения объектов земной поверхности.

Введение

Современные системы регистрации спектров уходящего излучения объектов земной поверхности в оптическом диапазоне спектра 0,3...13,5 м — видеоспектрометры — позволяют осуществить на новом, более точном, чем существующие многоспектральные средства, определение вещественного состава и состояния объектов. Видеоспектрометры имеют высокое геометрическое (1 мрад и лучше) и спектральное (до 2 нм) разрешение и фиксируют спектры уходящего излучения объектов субпиксельного размера (до 10 см в авиационном варианте и до 10 м для космических платформ). Получаемые спектры близки по детальности к спектрам полевых наземных измерений.

Аппаратура

Видеоспектральные-гиперспектральные системы существуют сейчас в двух модификациях. Первые с помощью оптической системы с полихроматором разлагают излучение узкой полосы на земной поверхности в спектр на приёмную матрицу, вторые имеют сканирующий оптико-механический блок и полихроматор, разлагающий излучения пикселя (мгновенного поля зрения на земной поверхности) в спектр на приёмную ПЗС линейку.

Достоинство первых, видеоспектрометров — небольшие размеры, масса (5...8 кг), энергопотребление (20...40 Вт), недостаток — ограниченное поле обзора (до 40 угл.град). Достоинство вторых, гиперспектральных сканеров — возможность регистрации одновременно в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом диапазонах и широкое поле обзора — до 90 и более градусов, недостаток — существенно большие масса и энергопотребление, во много раз превышающие аналогичные характеристики видеоспектрометров.

За рубежом авиационные видеоспектрометры известны с начала 80-х гг. прошлого века, и в настоящее время существует более двадцати модификаций. В последнее десятилетие создаются и запускаются в экспериментальном плане видеоспектрометры космического базирования, причём этому направлению уделяется большое внимание

программами NASA и ESA. К сожалению, у нас в стране развитие видеоспектральной съёмки идёт очень медленно. В последние годы появились образцы авиационных видеоспектрометров, имеются предложения по созданию космических приборов (Батлер и др. 2007).

Видеоспектрометры СПБГУИТМО

В связи с вышеизложенным могут представлять реальный интерес действующие образцы двух видеоспектрометров, основные технические характеристики которых, представленные в таблице, удовлетворяют требованиям к проведению съёмок с космических платформ, в том числе с малых космических аппаратов. Видеоспектрометры построены по одной оптической схеме, но с различными фокусными расстояниями входных объективов.

Структурная схема видеоспектральной аэрокосмической съёмки представлена на рис. 1. Излучение, идущее от узкой полосы земной поверхности через входной объектив, входную щель полихроматора, нанесенную на плоскую поверхность линзы-коллектива и коллиматорный объектив, попадает на диспергирующий элемент — плоскую отражательную дифракционную решетку, разлагающую излучение в спектр. Направление входной щели полихроматора и плоскость дисперсии взаимно перпендикулярны. Развернутое диспергирующим элементом спектральное изображение щели отображается камерным объективом на матричном приемнике. При этом каждая строка считываемого полихроматического кадра соответствует монохромному (узкоспектральному) видеоспектральному изображению одной и той же узкой полосы земной поверхности. Все монохромные изображения формируют при движении носителя так называемый информационный параллелепипед (Шилин и др. 2001, Батын и др., 2002; *Imaging spectrometry*, 2006).

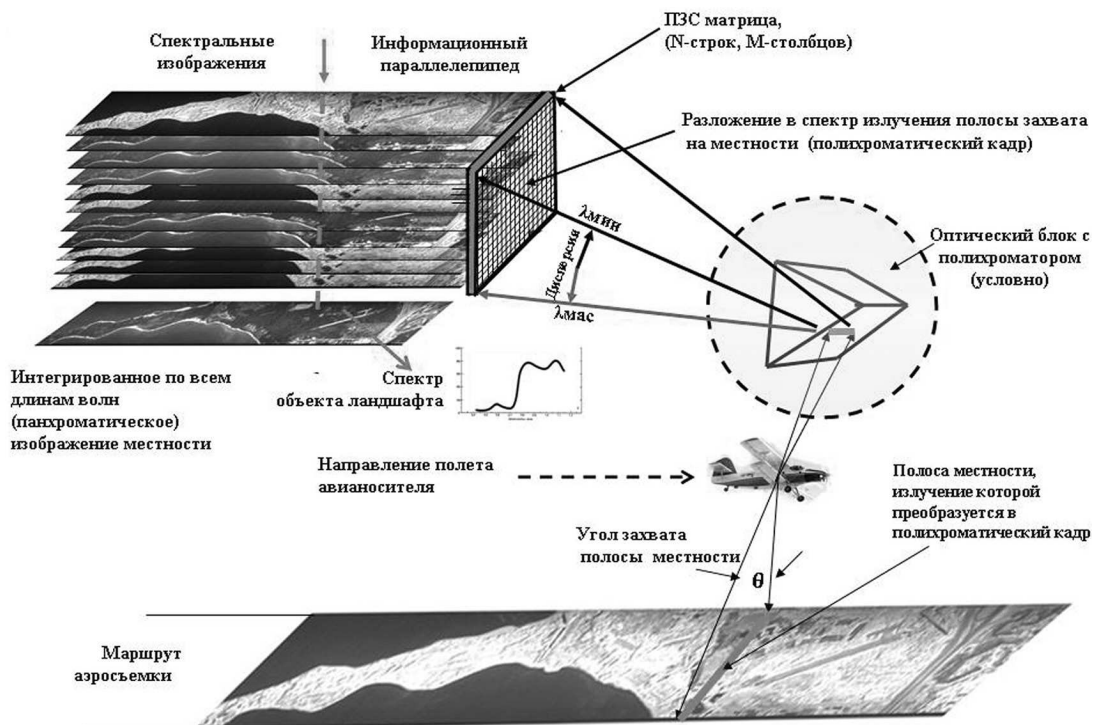


Рис. 1. Структурная схема видеоспектральной аэрокосмической съёмки

Информация по вертикальной координате информационного параллелепипеда представляет собой спектр излучения элемента земной поверхности в пределах мгновенного угла поля зрения прибора.

Основные технические характеристики видеоспектрометров

Параметр	Широкоугольный вариант	Узкоугольный вариант
Фокусное расстояние входного объектива, мм	19,2	100
Мгновенный угол поля зрения (минимальный), мрад	0,8	0,2
Относительное отверстие	1:4	1:4
Ширина входной щели, мм	0,1	0,05
Поле обзора, град	28,2×0,3	5,5×0,15
Спектральный диапазон, мкм	0,4...1,0	0,5...1,1
Спектральное разрешение, нм	>1,7	
Линейная дисперсия, мм/мкм	14	
Энергопотребление, Вт не более	10	10
Масса, кг	8	5
Габариты (высота × длина × ширина), мм	500×400×150	350×400×150

Оба прибора имеют значительные резервы по уменьшению массы и габаритов.

Видеоспектрометры СПбУИТМО используют в качестве диспергирующего элемента дифракционную решетку, что позволяет получить постоянное высокое разрешение по всему спектру. Это особенно важно для красного-ближнего ИК-участка, основного для диагностики и дифференциации растительности по высоте и форме ИК-плато в зоне 0,8...0,9 мкм и положению «красного края» в зоне 0,7...0,75 мкм. В схемах с призмой, которые используют некоторые отечественные разработчики, спектральное разрешение уменьшается по направлению к красному-ближнему ИК-участку в несколько раз, что очень существенно ухудшает возможности диагностики состава и состояния растительности. Это принципиальный недостаток.

Регистрация данных видеоспектральной съемки производится непосредственно на жесткий диск персонального компьютера.

Аэросъемочные работы

Перед началом экспериментальных полетов была выполнена лабораторная настройка оптического узла блока видеоспектрометров. Для этого использовался оптический стенд, состоящий из длиннофокусного зеркального коллиматора, в фокальной плоскости которого установлен механизм крепления щелевых диафрагм и диафрагм с осевыми отверстиями различного диаметра. Набор диафрагм позволяет получать на выходе коллиматора параллельные пучки лучей, соответствующие мгновенным углам зрения для входной оптики.

На оптическом стенде осуществляется проверка состояния и настройка оптической схемы, коррекция положения ПЗС матрицы, определение геометрического разрешения. При подаче на входные отверстия коллиматора эталонного излучения возбужденных паров химических веществ (Hg, Cd, Na и т. п.) производится калибровка рабочего спектрального диапазона видеоспектрометра.

В результате лабораторных испытаний получены данные, подтверждающие технические параметры, указанные в таблице. Мгновенное поле зрения (геометрическое разрешение) составило соответственно 1,0 и 0,15 мрад.

В качестве летательного аппарата при выполнении аэросъемки использовались вертолет Ми-8МТ, самолёты Ан-30 и Ан-2.

На авианосителях было установлено нештатное навигационное оборудование:

- GPS приемник,
- малогабаритные инерциальные системы, дающие информацию о параметрах эволюций авианосителя — углах крена, тангажа и сноса,
- навигационной вычислительный комплекс.

При наземной обработке данных аэросъемки восстанавливается траектория движения носителя и вычисляется истинное положение поля обзора на подстилающую поверхность (с учетом углов крена, тангажа и сноса). Полученное пространственное положение поля обзора позволяет корректировать положения строк и восстанавливать исходное изображения.

Обработка результатов лётных экспериментов проводилась оригинальным пакетом программ, разработанным для видеоспектральной информации. В частности решались задачи:

- получения любого количества монохромных узкоспектральных изображений с заданной шириной спектрального канала,
- получения синтезированного панхроматического изображения,
- получения изображений, синтезированных по любому количеству каналов,
- получение спектра уходящего излучения любого участка земной поверхности,
- коррекция геометрических искажений, возникающих за счет эволюций авианосителя.

Результаты летных работ

Некоторые результаты экспериментальных аэросъёмок с широкоугольным видеоспектрометром, в том числе примеры вывода большого числа монохромных узкоспектральных изображений, построения спектров уходящего излучения и их интерпретация представлены в работе (Марков, Шилин, 2009). Там же обсуждались вопросы терминологии и перспективы развития видеоспектральной аэросъёмки. Ниже (рис. 2–7) приведены новые материалы аэросъёмки с доработанным по приёмному блоку широкоугольным видеоспектрометром и узкоугольным прибором.

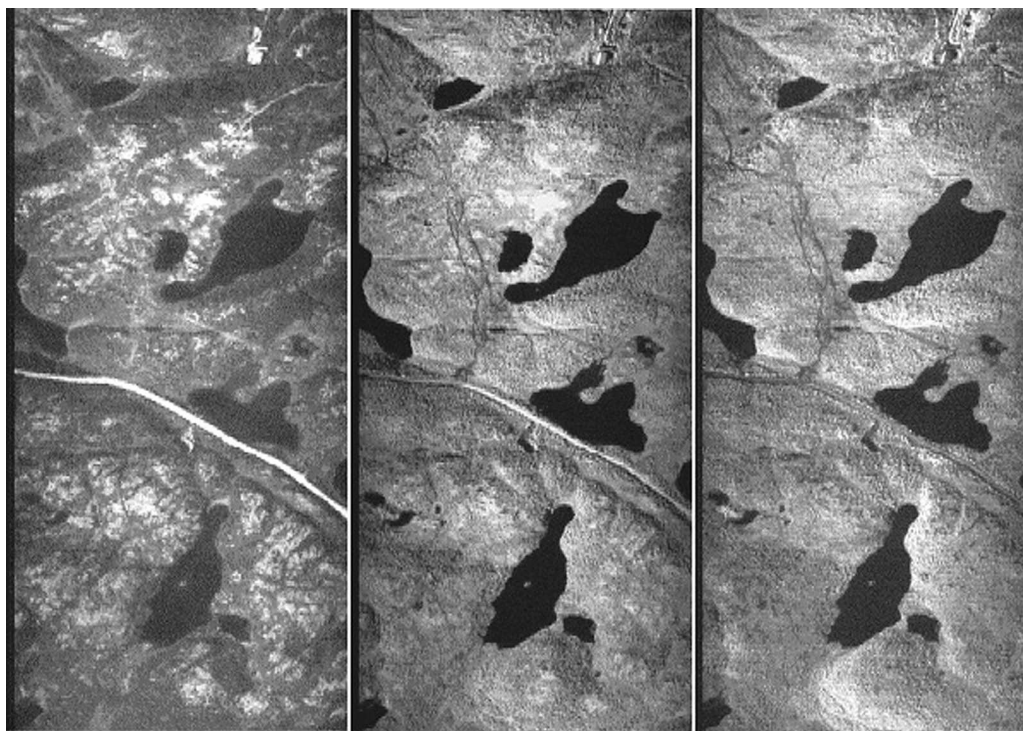


Рис. 2. Три монохромных видеоспектральных изображения тундрового ландшафта для спектральных каналов с центральными длинами волн 659, 683 и 804 нм (слева направо)

Аэросъемка первым прибором проводилась в летнее время в условиях хорошей освещённости на Кольском полуострове и на северо-западе РФ, вторым — ранней зимой во временном интервале с 11 до 13 ч местного времени в неблагоприятной метеорологической обстановке (сплошная облачность) при низкой освещённости, летом на северо-западе и на юге РФ.

Первый район представляет собой типичную горную тундру с озёрами в понижениях и выходами коренных пород на возвышенностях. Наблюдаются заболоченные луга и луговые болота, выше расположены заросли березы извилистой и ерниковые тундры из карликовой березы и вероники.

Обработка материалов информационного параллелепипеда позволила получить монохромные изображения высокого геометрического качества. Из всей серии монохромных изображений (около 100) выбраны два изображения (см. рис. 2), где выходы метаморфических горных пород (гнейсы?) — яркие изометрические пятна — выделяются наилучшим образом, и одно изображение в ближней ИК зоне (центральная длина волны 804 нм), на котором выходы горных пород не видны. Отметим, что грунтовая дорога, выделяемая уверенно на всех изображениях видимой и частично ближней ИК зоны, не выделяется на последних изображениях ближней ИК зоны (804 нм).

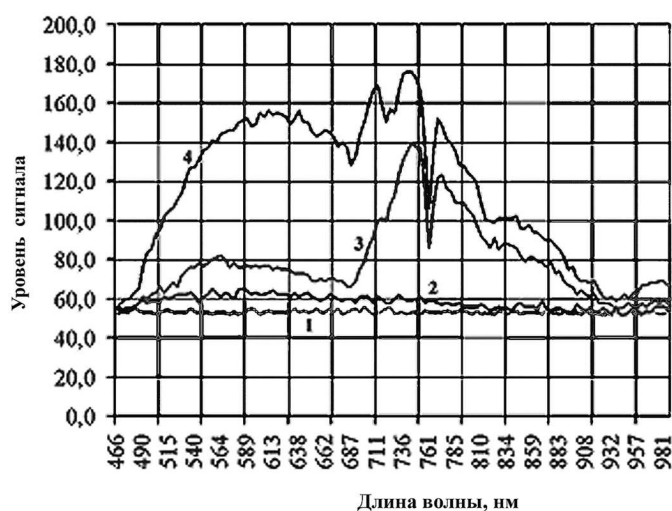


Рис. 3. Примеры спектров отраженного излучения для некоторых объектов тундрового ландшафта рис 2: 2 — водная поверхность; 3 — древесно-кустарниковая тундровая растительность; 4 — обнажения горных пород, предположительно гранито-гнейсы (1 — темновой ток светочувствительной матрицы)

Построенные спектральные кривые (см. рис. 3) имеют характерные для растительности особенности с резким подъёмом «красного края» в области 700 нм; «крутизна» подъёма различается для разных видов растительности. Она наиболее резкая у березы извилистой, наиболее плавная — у ерниковой тундры. Графики чётко показывают, что растительность наилучшим образом разделяется в ближнем ИК-диапазоне по высоте ИК плато. В видимом диапазоне разделение существенно хуже, разделяются только заболоченные луга от березы и ерниковых тундр. Последние между собой не разделяются.

Горные породы на фоне растительности наилучшим образом выделяются в видимом диапазоне. То же самое относится к грунтовой дороге, которая по вещественному составу идентична горной породе, но за счёт антропогенного воздействия (измельчение и уплотнение) изменила свою структуру и спектральные характеристики — увеличилось отражение в видимом диапазоне и уменьшилось в ближнем ИК. Во всех спектральных диапазонах по очень низкому отражению выделяются водные поверхности.

Второй район — сильно окультуренный ландшафт с большим количеством различных строений, дорог, видов растительности, естественных и искусственных покрытий, водных

объектов (рис. 4). Здесь представлены фрагменты монохромных изображений, выбранных из всего информационного параллелепипеда сцены рис. 1 для узких спектральных участков, наиболее ярко характеризующих инверсию спектральных контрастов компонентов ландшафта вблизи «красного края» 700 нм. В видимом диапазоне различные растительные сообщества выглядят тёмными, песчаные пляжи, бетонные покрытия, большинство строений — светлыми, просматриваются некоторые детали дна мелководья. В ближнем ИК-диапазоне растительность выглядит очень светлой, песчаные отложения на фоне воды и растительности не выделяются, тёмными выглядят бетонные покрытия и большинство сооружений, очень тёмными — водные поверхности. Эти известные общие закономерности чётко иллюстрируют вычисленные спектры различных компонентов ландшафта рис. 1 и 4.



Рис. 4. Монохромные изображения ландшафта с большим количеством различных строений, дорог, видов растительности, естественных и искусственных покрытий, водных объектов для центральных длин волн (слева направо) 660, 681, 738 и 771 нм

На рис. 5 — спектры горных пород и покрытий. Наибольшая интенсивность излучения наблюдается у светлых пляжных песков (5), несколько меньшая — у бетона (4), ещё меньшая — у гранита (2) и диорита (1), но все эти объекты чётко различаются. Наименьшее отражение наблюдается у диорита (3) и железного покрытия дороги, спектры которых не различаются.

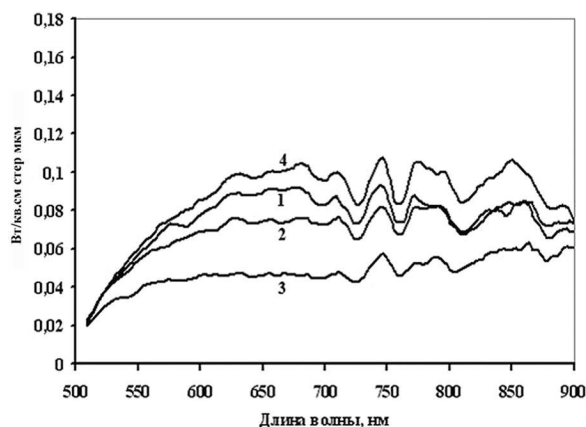


Рис. 5. Спектры отражения горных пород и покрытий: 1 — бетон; 2 — гранит; 3 — диорит; 4 — песок

На рис. 6 — спектры растительности. Все графики имеют характерный резкий подъём вблизи 700 нм («красный край») и «высокие» ИК-плато. Все объекты различаются в ближнем ИК-диапазоне, максимум отражения вблизи 740 нм отмечается у стриженного газона, несколько меньше он у разнотравья в неглубоком логу, ещё меньше — у ивы ломкой. Отметим, что различия вблизи 740 нм у ивы и ивы ломкой незначительны, но эти объекты хорошо различаются в видимом диапазоне. Столь же характерны по форме, но в целом меньше по интенсивности спектры древесной растительности — липа, ясень, клён. Эти виды отчётливо различаются в ближнем ИК диапазоне и неувверенно — в видимом.

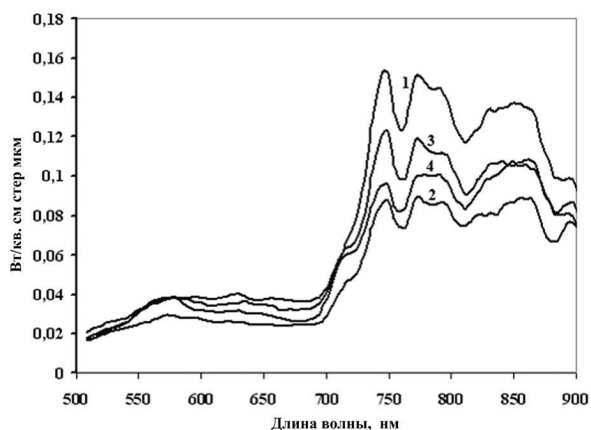


Рис. 6. Спектры отражения растительности: 1 — газон; 2 — ива ломкая; 3 — липа; 4 — ясень

На рис. 7 — спектры трех типов водной поверхности. Все они имеют заметные различия. Особенно резко выделяется поверхность покрытого ряской канала — здесь активно идёт процесс эвтрофикации. Ряска и определяет характерный вид спектра растительного покрова с высоким ИК плато. Для остальных поверхностей отмечается наименьшее отражение для чистой воды моря (3), несколько большее — для зоны мелководья (2) за счёт отражения от дна и ещё большее — для пруда, также затронутого процессом эвтрофикации.

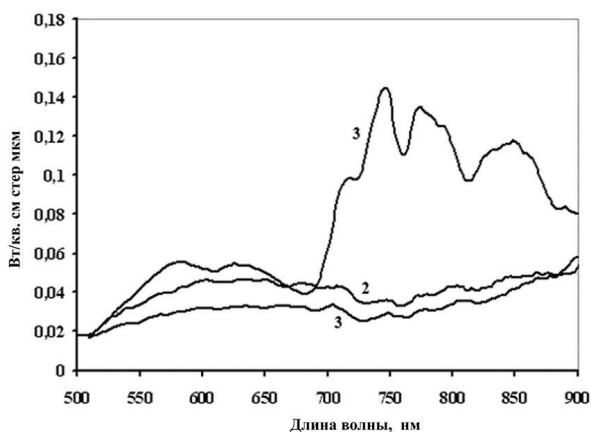


Рис. 7. Спектры отражения трех типов водной поверхности: 1 — вода в заливе; 2 — мелководье в заливе; 3 — ряска в канале

Для узкоугольного видеоспектрометра с мгновенным углом поля зрения 0,15 мрад представлены панхроматическое синтезированное по всем каналам изображение и спектр излучения покрытого тонким слоем снега ледяного покрова участка реки (рис. 8 и 9). Как обычно, снежный покров выглядит очень светлым (ярким); участки суши без снежного покрова в верхней и нижней частях аэроснимка имеют тёмный фототон. Очевидные особенности, характерные для снежного покрова, отмечаются для спектра уходящего излучения — максимум в фиолетовой и синей областях с постепенным падением интенсивности с увеличением длины

волны. Анализ спектров других объектов этой фоноцелевой ситуации показывает уменьшение интенсивности уходящего излучения с сокращением площади снежного покрова — поле со снегом в бороздах, мелколесье со слабой неравномерной снежной подложкой (см. рис. 9).

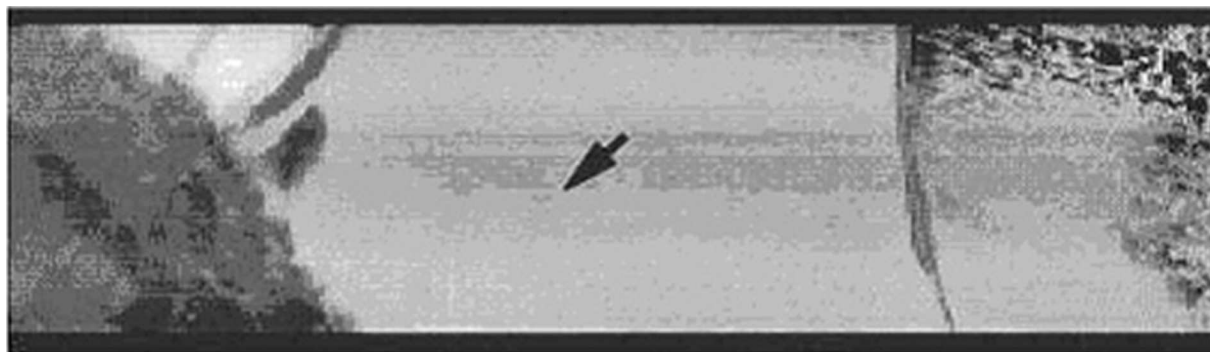


Рис. 8. Синтезированное по всем монохромным каналам панхроматическое видеоспектральное изображение ледяного покрова участка реки покрытого тонким слоем снега

Некоторые приведенные выше спектральные зависимости — кривые 1, 2, 4 на рис. 5, кривые 2, 3 на рис. 7 — указывают на необходимость использования для разделения объектов «полной спектральной информации», а не отдельных изображений традиционных многоспектральных систем. Соответствующие примеры приведены в работе (Imaging spectrometry, 2006).

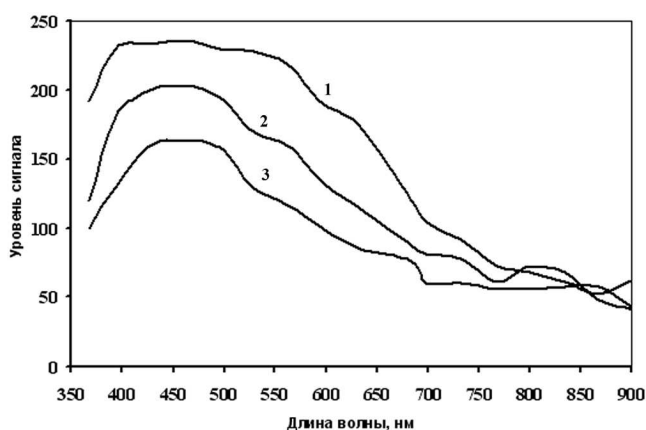


Рис. 9. Спектры отраженного излучения различных участков:
1 — занесенного тонким слоем снега ледяного покрова водной поверхности;
2 — покрытого снегом поля; 3 — лесного массива со слабой снежной «подложкой»

На рис. 10 представлены два монохромных изображения летнего сельскохозяйственного ландшафта северо-запада РФ. Сцена представлена пойменным сырým лугом вокруг мелководного озера, участком леса и небольшой деревней. Изображения выбраны вблизи зоны «красного края» для спектральных интервалов со средним значением длины волны 707 нм и 874 нм и на них отчетливо видна инверсия спектральных контрастов для прибрежно-водной растительности у берега, увлажнённых грунтовых дорог, тропинок на лугу и, несколько хуже, для некоторых объектов в деревне.

Заключение

Приведённые примеры, анализ всего объёма лётных исследований и зарубежных работ показывают, что в соответствии со своими техническими характеристиками «широкоуголь-

ный» видеоспектрометр будет решать задачи изучения природных ресурсов и охраны среды глобального, континентального и регионального масштабов, например, загрязнение крупных площадей океанов и морей, снежно-ледяного покрова Арктики и Антарктики, горных систем, поисков крупнейших геологических структур, перспективных на углеводороды и другие полезные ископаемые глубинного залегания и т.д. Для «узкоугольного» видеоспектрометра укажем следующие задачи:

- оценка продуктивности сельскохозяйственных культур, выявление на ранних стадиях стресса растений из-за деятельности вредителей, недостатка влаги, антропогенного воздействия;
- опознавание и картографирование видового состава растительности, например, для обнаружения плантаций наркотических культур;
- оценка антропогенного загрязнения почв;
- геологическое картографирование и поиски полезных ископаемых по спектральным (геохимическим) аномалиям;
- оценка экологического состояния водоёмов и т. д.

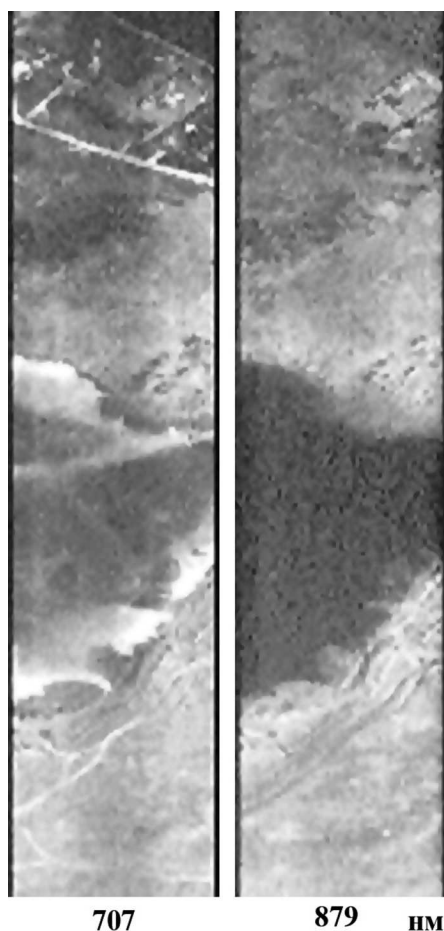


Рис. 10. Два монохромных изображения сельскохозяйственного ландшафта северо-запада РФ

В целом можно сделать вывод, что лётные исследования проведены успешно, получены видеоспектральные изображения хорошего качества и спектры излучения для наиболее характерных компонентов ландшафта (Марков, Шилин, 2009). Хотя крайне желательно иметь материалы залётов в других ландшафтных и сезонных условиях, представляется правомерным заключение, что действующие образцы видеоспектрометров могут быть взяты за основу создания опытных образцов для малого космического аппарата. Это тем более представляется реальным, что предложения о структуре всего комплекса хорошо проработаны (Батлер Д.Б и др. 2007).

Литература

1. Батлер Д.Б., Белов А.А., Воронцов Д.В., Ведешин Л.А., Егоров В.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.Н., Родионова И.П., Федунин Е.Ю. Проект спутникового гиперспектрометра, предназначенного для малого космического аппарата // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 43–55.
2. Батян П.В., Гуд В.В., Коняхин И.А., Красавцев В.М., Чиков В.В., Груздев В.Н., Шилин Б.В. Опыт использования видеоспектрометра ИТМО в натуральных условиях // Приборостроение. 2002. № 2. С. 46–51.
3. Марков А.В., Шилин Б.В. Проблемы развития видеоспектральной аэросъёмки // Оптич. журн. 2009. Т. 76. № 2. С. 20–27.
4. Шилин Б.В. и др., Груздев В.Н., Марков А.В., Мочалов В.Ф. Использование видеоспектральной аэросъёмки для экологического мониторинга // Оптич. журн. 2001. Т. 68. № 12. С. 41–49.
5. Imaging spectrometry / Eds. Meer F.D., van der, Jong S.M., de. Springer, 2006. 403 p.

Flight researches of imaging spectrometers for a small space vehicle

B.V. Shilin¹, V.N. Gruzdev¹, A.V. Markov²

¹ *St.-Petersburg research centre of ecological safety of the Russian Academy of Sciences,
197110, St.-Petersburg, Korpusnaya, 18
e-mail: vicgruz@gmail.com*

² *Military-space academy name of A.F. Mozhaisky
e-mail: markov_av69@mail.ru*

All-round flight researches of operating samples of imaging spectrometers manufactured by the St.-Petersburg university of information technologies, mechanics and optics (SPbUITMO) are carried out, monochrome spectral images of high quality, many reflection spectrum of different terrestrial surfaces are received.

Keywords: imaging spectrometer, monochrome images, dispersion, reflection spectrum.