

# Аппаратура, методики и результаты использования материалов видеоспектральной и тепловой аэросъемки для экологического мониторинга территорий и акваторий

О.В. Бровкина<sup>1</sup>, О.В. Григорьева<sup>1</sup>, В.Н. Груздев<sup>2</sup>, С.В. Захаров<sup>1</sup>,  
С.А. Пономарев<sup>1</sup>, Л.И. Чапурский<sup>1</sup>, К.Н. Чиков<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИЦ (СПб) 4 ЦНИИ  
197 110 Санкт-Петербург, Ждановская, 41  
<sup>2</sup> НИЦ ЭБ РАН,  
197 110 Санкт-Петербург, Корпусная, 18  
E-mail: [img@at1895.spb.edu](mailto:img@at1895.spb.edu)  
<sup>3</sup> СПб ГУИТМО  
197101 Санкт-Петербург, Кронверкский, 49

Работа посвящена решению проблемы практического использования средств и методов многоспектральной съемки при космических и авиационных исследованиях Земли. Приводятся основные тактико-технические характеристики комплекса авиационных и наземных приборов, а также методики и результаты их использования для экологического мониторинга территорий и акваторий.

Одним из перспективных направлений решения проблемы мониторинга полигонов твердых промышленных и бытовых отходов (ТПБО), несанкционированных свалок, комплексов очистных сооружений, последствий техногенных аварий и катастроф является разработка эффективных средств и методов дистанционных исследований (ДИ) земной поверхности на различных длинах волн электромагнитного спектра излучений. В настоящее время актуальной задачей отечественных специалистов по ДИ является преодоление отставания в области создания систем и практического использования видеоспектральной съемки [1]. В докладе излагаются новые результаты исследований, связанных с решением данной проблемы.

В работе [2] были представлены результаты самолетных испытаний видеоспектрометра «Фрегат», разработанного в СПб ГУИТМО. В приборе, работающем на длинах волн от 0,4 до 0,68 мкм, использовалась матрица ПЗС, размеры которой были меньше размеров выходного окна монохроматора. Система регистрации сигналов и несовершенство программ обработки данных не позволяли в полном объеме реализовать потенциальные возможности аппаратуры данного класса для решения научных и прикладных задач.

В 2005 г. была выполнена модернизация прибора и существенно усовершенствованы программы предварительной обработки массивов видеоспектральных данных. Модернизация заключалась в установке новой ПЗС-матрицы ICX423AL с устройством считывания сигналов, работающего в телевизионном стандарте PAL, и применении цифрового видеоматричного со встроенным АЦП. Размеры матрицы почти полностью соответствуют размерам выходного окна оптической системы.

Система регистрации принимает аналоговый видеосигнал, переводит видеосигнал в цифровую форму (с размером кадра  $720 \times 576$  пикселей) и осуществляет его запись на видеокассету. Функционирование видеоспектрального комплекса в полете контролируется оператором по телевизионному экрану матричного, на котором отображаются «полихроматические кадры» (чередования спектров строк изображения). В лабораторных условиях была исследована степень однородности чувствительности элементов матрицы ПЗС и выполнена калибровка шкалы длин волн прибора. Регулировка чувствительности

видеоспектрометра в полете не предусмотрена. Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) аппаратуры «Фрегат» приведены в табл.1.

Таблица 1. Существующие и потенциально возможные ТТХ видеоспектрометра «Фрегат»

Характеристики прибора	Значения характеристик	
	При существующей элементной базе	При элементной базе, согласованной с параметрами монохроматора
Ширина входной щели монохроматора	0,1 мм	0,05 мм
Угол поля зрения	26,5°	28,2°
Мгновенный угол зрения по кадру	5,2 мрад	3 мрад
Мгновенный угол зрения по строке	1 мрад	0,8 мрад
Рабочий диапазон длин волн	440...891 нм	400...1000 нм
Спектральное разрешение	7 нм	3,5 нм

Для обработки материалов съемки информация вводится в компьютер через цифровой порт IEEE-1394. С использованием усовершенствованной программы ввода и обработки данных результаты маршрутной видеоспектральной съемки представляются как файлы изображений размерностью до 30 тыс. строк, по 720 пикселей изображения на строке, на 65 длинах волн в каждом пикселе изображения. Интенсивность сигналов на каждой длине волны выражается 256 уровнями яркости. Имеется возможность суммировать интенсивности сигналов в соседних спектральных каналах. Формат видеоспектральных файлов позволяет выполнять тематическую обработку материалов съемки с использованием существующих пакетов программ обработки многоспектральных изображений типа ERDAS. Используемый в настоящее время телевизионный стандарт считывания информации с частотой 25 Гц и параметры оптических узлов прибора определяют оптимальное соотношение путевой скорости полета к высоте съемки (отношение W/H), равное 0,13 с<sup>-1</sup>.

Лётные испытания модернизированного видеоспектрометра «Фрегат», установленного на вертолете МИ-8МТ, были проведены летом 2006 г. Одновременно с видеоспектральной съемкой выполнялись фотографическая и тепловизионная съемки с помощью установленных на вертолете цифровой фотокамеры (ЦФК) «NIKON D2X», имеющей угол поля зрения 60° × 43°, и аппаратуры «Малахит» [3], основные ТТХ которой представлены в табл. 2.

Таблица 2. Основные ТТХ модернизированного ИК сканера «Малахит»

Характеристики	Значения характеристик
Рабочий спектральный диапазон	8...14 мкм
Угол поля зрения	120°
Мгновенный угол поля зрения	1,5 мрад
Разность температур, эквивалентная шуму	0,15 К
Радиометрическое цифровое разрешение	12 бит
Отношение W/H	0,23 с <sup>-1</sup>

Для калибровки сигналов многоспектральных и тепловых изображений ландшафта при выполнении полетов проводились синхронные наземные измерения коэффициентов интервальной яркости (КИЯ) элементов ландшафта с помощью полевого многоканального фотометра (ПМКФ), разработанного Э.В. Кувалдиным в ФГУП ГОИ им С.И. Вавилова (основные ТТХ ПМКФ приведены в табл. 3) и радиационных температур поверхностей с помощью пирометра «Термопоинт-40», основные характеристики которого даны в табл. 4.

Таблица 3. Основные ТТХ полевого многоканального фотометра ПМКФ

Характеристики и функции	Значения характеристик, названия устройств						
	1	2	3	4	5	6	7
№ канала							
Длина волны в макс. чувствительности, нм	345	460	540	640	780	1050	1600
Границы каналов на уровне 0,5 от макс. чувствительности, нм	300... ...400	400... ...500	520... ...600	620... ...700	760... ...900	900... 1100	1550.. ..1750
Угол поля зрения, град	33	20	12	15	15	20	35
Диапазон изменений чувствительности, раз	1; 3; 10; 30						
Относительная погрешность измерения КИЯ, %	± 1						
Обработка, хранение результатов 470 измерений	Встроенный микропроцессор						
Индикация и вывод результатов измерений	ЖК дисплей, порты паралл. LPT, последоват. COM						
Эталонирование измерений в полевых условиях	По аттестованной белой поверхности оргалита						

Таблица 4. Основные ТТХ пирометра «Термопонт-40»

Характеристики и функции	Значения характеристик, названия устройств
Спектральный диапазон, мкм	8...14
Угол поля зрения, град	1,2
Погрешность измерения температуры, К.	±1
Погрешность определения контрастов РТ, К	±0,2
Частота регистрации сигналов, Гц	4
Расчет статистик за период измерений	Макс, Мин, Среднее
Индикация	ЖК дисплей
Вывод результатов измерения	Паралл. LPT, последоват. COM

Кроме того, проводились наблюдения и измерения метеорологических параметров, а также измерения прямой и рассеянной солнечной освещенности в диапазоне 0,3...3 мкм с помощью пиранометра М-83.

В процессе летних испытаний аппаратуры в июне и августе 2006 г. были получены многоспектральные видео данные, содержащие изображения санкционированных и несанкционированных свалок и водоемов.

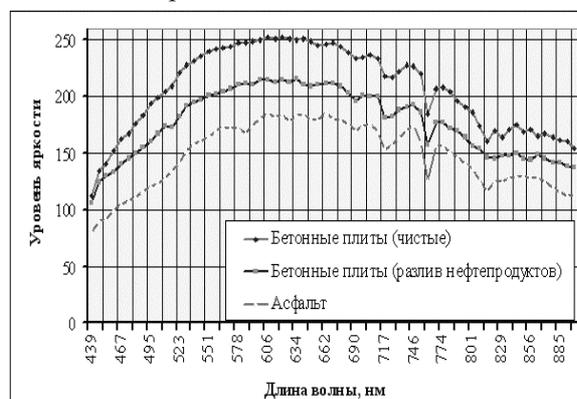


Рис. 1. Спектры сигналов от твердых дорожных покрытий по данным аппаратуры «Фрегат», зарегистрированным 19 июня с высоты 300 м

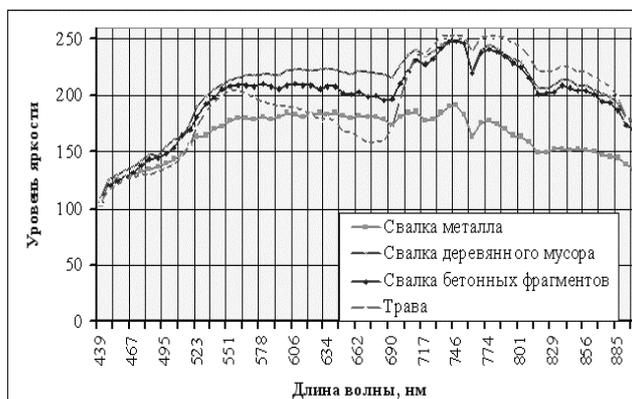


Рис. 2. Спектры сигналов от поверхностей несанкционированных свалок и травы по данным аппаратуры «Фрегат», зарегистрированным 19 июня с высоты 300 м

На рис. 1 и 2 представлены графики спектрального хода значений сигналов видеоспектрометра от твердых дорожных покрытий различного типа, а также несанкционированных свалок строительных и промышленных отходов, частично покрытых травяной и кустарниковой растительностью. Съемка выполнялась 19.06.06 с высоты 300 м при зенитном расстоянии Солнца 48 град. На графиках четко прослеживаются минимумы,

обусловленные поглощением атмосферного кислорода и водяного пара вблизи 0,76, 0,72 и 0,82 мкм, а также хлорофилла вблизи 0,66 мкм. Обращает на себя внимание искажение (насыщение) сигналов от травы на участке 0,72-0,76 мкм (рис. 2). Характеристика сквозного тракта прибора исследована не была, и именно поэтому на рис. 1 и 2 нами представлены спектры сигналов прибора, не привязанные к шкале коэффициентов спектральной яркости или к значениям спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ).

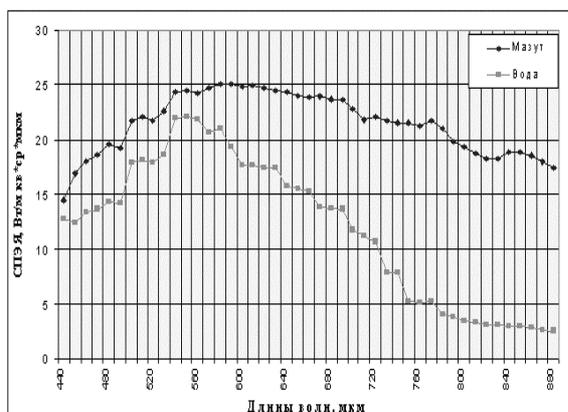


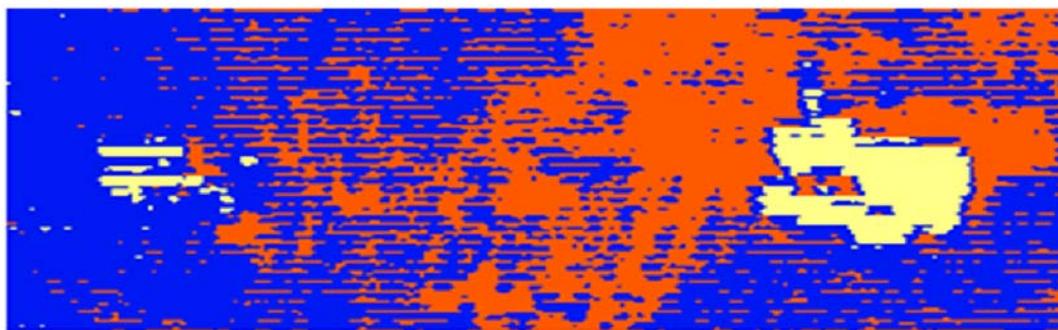
Рис. 3. Спектры сигналов от чистой воды и от пятна мазута на поверхности водоема, рассчитанные по материалам измерений и видеоспектральной съемки 30.08.06 при зенитном расстоянии Солнца 65°

На рис. 3 приведены графики СПЭЯ чистой воды и пятна мазута на поверхности водоема. Калибровка шкалы интенсивности сигналов выполнена с использованием результатов измерения значений КИЯ элементов наземной тестовой мишенной обстановки с помощью ПМКФ на длинах волн, соответствующих максимальной чувствительности прибора в каналах 2 - 5, а также результатов расчета освещенности сюжета при высоте Солнца и параметрах атмосферы, которые соответствовали моментам получения многоспектральных изображений 30.08.06 г. с высоты 300 м.

Автоматизированный анализ результатов видеспектральной съемки был выполнен с использованием общедоступной программы обработки многоспектральных и гиперспектральных изображений "MultySpec" [4]. При этом из 65 изображений ландшафта, полученных с помощью аппаратуры «Фрегат», было отобрано 12 на длинах волн 440(40)880 нм. В результате использования различных методов кластерного анализа были получены изображения, на которых выделялись классы и подклассы таких элементов ландшафта, как дорожная сеть (разные типы твердых покрытий, проселочные и грунтовые дороги, тропы), травяной покров (покосы и луга с различными видами травяных сообществ), свалки деревянных, металлических, бетонных конструкций и водоемы с разной степенью загрязнения поверхности. В один класс выделились изображения автомобильной техники, сараев с железными крышами разной окраски и свалки металлоконструкций.



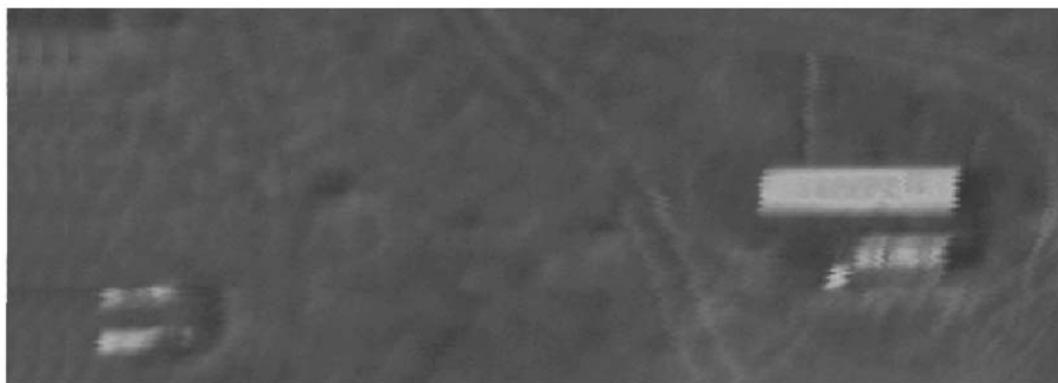
А)



Б)



В)



Г)



Д)

*Рис. 4. Результаты обработки с средствами программы «MultySpect» фрагмента многоспектрального изображения, полученного с помощью видеоспектрометра «Фрегат», (А – изображение, синтезированное из 12 спектральных каналов, Б – Использование метода гауссова правдоподобия, В – использование метода спектральной корреляции), и изображения той же сцены в ИК (Г) и в видимом (Д) диапазонах спектра, полученные с помощью тепловизора «Малахит» и ЦФК «NIKON D2X»*

Результаты обработки фрагмента многоспектрального изображения сарая и двух свалок металлических конструкций представлены на рис. 4 (А, Б, В). Изображения той же сцены в ИК и в видимом диапазонах спектра, полученные с помощью тепловизора «Малахит» и ЦФК «NIKON D2X», приведены на рис. 4Г и 4Д. Интересно отметить, что синтезированное средствами программы “MultySpec” цветное изображение сарая и металлоконструкций (рис. 4А) по информативности мало отличается от цветного снимка, зарегистрированного фотокамерой «NIKON D2X». Благодаря наличию в анализируемом многоспектральном изображении четырех каналов ближнего ИК-диапазона и меньшей отражательной способности ржавого металла по сравнению с травой в левых частях синтезированных снимков (рис. 4Б и 4В) и на ИК-изображении (рис. 4Г) четко выделяются две полосы металлоконструкций, сквозь которые проросла трава.

Для расширения возможностей обнаружения и распознавания состояния свалок и других элементов ландшафта к многоспектральным изображениям свалки твердых ТПБО, полученным с помощью аппаратуры «Фрегат», было добавлено ИК изображение этой же сцены. Пространственное совмещение теплового и многоспектрального изображений выполнено с помощью комплекса программ «Талка» [5]. Благодаря такому совмещению диапазонов на поверхности свалки обнаружены очаги подповерхностного самовозгорания органических веществ. Радиационная температура (РТ) поверхности свалки над такими очагами отличалась от соседних участков свалки на 10...30 град. В табл. 5 приведены результаты синхронных наземных измерений РТ и КИЯ элементов поверхности полигона ТПБО.

Таблица 5. Радиационные температуры и коэффициенты интервальной яркости  $\beta$  полигона ТПБО по измерениям с помощью пирометра «Термопоинт-40» и ПМКФ

Названия и характеристика поверхностей	РТ, °С	№ канала, длины волн в макс. чувствительности, нм							NDVI= ( $\beta_5 - \beta_4$ ) / ( $\beta_5 + \beta_4$ )
		1	2	3	4	5	6	7	
		345	460	540	640	780	1050	1600	
Рабочая карта: свежие отходы	20,3	0,13	0,18	0,27	0,31	0,37	0,40	0,18	0,09
Полиэтилен	15,3	0,13	0,19	0,24	0,29	0,35	0,40	0,16	0,10
Подповерхностное возгорание	47,0	0,08	0,13	0,17	0,20	0,23	0,27	0,12	0,08
Отходы вне очага возгорания	18,2	0,08	0,13	0,18	0,20	0,23	0,27	0,12	0,07
Трава на грунте, 80% зеленой	17,6	0,02	0,06	0,10	0,08	0,32	0,38	0,14	0,58
Куст шиповника зеленый	16,4	0,01	0,03	0,06	0,04	0,26	0,32	0,13	0,75

На изображениях видимого и ближнего ИК-диапазонов подповерхностные очаги самовозгорания не обнаруживаются. При выходе процесса горения на поверхность свалки, в отсутствие задымления, место пожара на изображениях видимого и ближнего ИК-диапазонов обнаруживается по пламени и по обуглившимся материалам свалки. В диапазоне 8-14 мкм дымовое облако прозрачно, поэтому очаг пожара, имеющий значения РТ, превышающие 150 °С, и обнаруживается, и распознается.

Таким образом, создан комплекс авиационной и наземной аппаратуры, работающей на различных участках оптического диапазона спектра от 0,3 до 14 мкм. Отработаны методики многоспектральной съемки и калибровки сигналов изображений по наземной тестовой мишенной обстановке. Разработанные средства и методики могут найти применение при комплексных космических, авиационных и наземных исследованиях с целью калибровки бортовой спутниковой аппаратуры в полете.

Программы обработки материалов видеоспектральной и гиперспектральной съемки позволяют реализовать все потенциальные преимущества средств и методов дистанционных исследований с использованием видеоспектральной аппаратуры: получать спектры сигналов от

элементов поверхности ландшафта, формировать изображения сюжета на разных длинах волн, и в зависимости от решаемых задач и условий освещения сюжета варьировать спектральным разрешением и числом спектральных каналов. Формат получаемых материалов видеоспектральной съемки позволяет использовать существующие специализированные программы тематической обработки многоспектральных изображений, реализующие математические методы обнаружения и распознавания объектов и фонов по их спектральным и пространственно-частотным свойствам.

В заключение следует отметить, что выполнение представленных результатов исследований стало возможным благодаря кооперации и усилиям специалистов НИЦ (СПб) 4 ЦНИИ, НИЦ ЭБ РАН, ГУ ИТМО, ФГУП ГОИ им С.И. Вавилова (Кувалдина Э.В., Самкова В.М.) и ООО «Аэрэкология» (Гаврилова Д.С.).

### Литература

1. *Шилин Б.В., Хотяков В.В.* Видеоспектральная аэросъемка – ведущее направление развития дистанционного зондирования в оптическом диапазоне // *Оптический журнал*. 2004. Т.71. №3. С. 55-58.
2. *Шилин Б.В., Груздев В.Н., Марков А.В., Мочалов В.Ф.* Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга // *Оптический журнал*, 2001. Т.68. №12. С. 41-49.
3. *Гаврилов Д.С., Шилин Б.В.* Мониторинг загрязнений акваторий с помощью авиационного тепловизионного комплекса // *Оптический журнал*, 2004. Т.71. №3. С. 77-82.
4. *David Landgrebe.* Multispectral Data Analysis: A Signal Theory Perspective // School of Electrical & Computer Engineering Purdue University. West Lafayette IN 47907-1285. [landgrebe@ecn.purdue.edu](mailto:landgrebe@ecn.purdue.edu).
5. Цифровая фотограмметрическая станция «Талка-3.3». М., 2005. [WWW.talka-tdv.ru](http://WWW.talka-tdv.ru).