Место видеоспектральной съёмки среди методов дистанционного зондирования

Б. В. Шилин [1, 2], **А. Ю. Кузнецов** [3]

[1] *Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского Санкт-Петербург, 197198, Россия*

[2] *Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия*
E-mail: bshilin@rambler.ru

[3] *Национальный исследовательский университет ИТМО Санкт-Петербург, 197101, Россия*
E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

Проанализирован и обобщён многолетний опыт ряда ведущих организаций в развитии полевой и авиационной видеоспектральной съёмки как фундаментальной и методической основы космических съёмок и возможности оценки эффективности последних. Проводится ознакомление специалистов в области дистанционного зондирования с возможностями полевой и авиационной видеоспектральной съёмки (в том числе в комплексе с «имитационной» аэросъёмкой с видеоспектрометром для малого космического аппарата) на конкретном примере 20-летних совместных работ некоторых организаций. Приводится структурная схема авиационной и полевой видеоспектральной съёмки, оптическая схема и технические характеристики опытных образцов видеоспектрометров Национального исследовательского университета ИТМО. Представлены результаты работы видеоспектрометров «Фрегат» и «Бурелом» в полевых и авиационных условиях. Приведены результаты использования в различных условиях видеоспектрометров на авианосителях и в поле в виде серий узкоспектральных монохромных изображений различных фоноцелевых ситуаций и спектров уходящего излучения объектов съёмок на примере решения задач выявления ранних стрессов растительности от загрязнений тяжёлыми металлами. Оценивается практическая значимость полевых и лабораторных спектрорадиометрических измерений на разных диапазонах оптического спектра с применением современных зарубежных спектрорадиометров. Проведено сравнение достижений за рубежом и в нашей стране. Сделаны выводы о развитии спектрорадиометрических исследований в нашей стране.

Ключевые слова: видеоспектрометр, гиперспектрометр, спектральные характеристики, монохромные изображения, спектрорадиометр

Одобрена к печати: 17.01.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-9-24

Введение

Цель работы — ознакомить специалистов в области дистанционного зондирования с возможностями полевой и авиационной видеоспектральной съёмки (в том числе в комплексе с «имитационной» аэросъёмкой с видеоспектрометром для малого космического аппарата) на конкретном примере 20-летних совместных работ некоторых организаций.

Уже в начале развития аэрофотосъёмки исследования спектральных характеристик объектов земной поверхности с помощью точечных (профильных) спектрорадиометров проводились параллельно в лаборатории, в поле, а позднее и с авианосителей. На первом этапе — в видимом диапазоне 0,4–0,7 мкм, далее — до 2,5 мкм и в диапазоне 8,0–13,5 мкм. Эти исследования позволили понять фундаментальные различия спектральных характеристик объектов, правильно подойти к проектированию нового аэросъёмочного оборудования и дешифрированию аэроснимков. Спектрорадиометры впервые позволили подойти к решению задачи определения вещественного состава и состояния объектов, так как спектры отражения (излучения) — важный индикатор этих характеристик. Однако в авиационном варианте возможности профильных спектрорадиометров были ограничены изучением протяжённых объектов:

акваторий, лесов, крупных массивов посевов, снежно-ледяного покрова моря и суши и т. п. (Чапурский, 1986).

Параллельно с созданием более чувствительных приёмников излучения разрабатывались авиационные многоспектральные-гиперспектральные оптико-механические сканеры с всё большим количеством спектральных каналов. В 70–90-х гг. прошлого века наиболее известными были разработки компаний Daedalus и GER (США). Ими выпускались сканеры с количеством узкоспектральных монохромных изображений от двух до первых сотен. Оптико-механические сканеры имеют широкое поле обзора (90° и более), что обеспечивает захват большой полосы съёмки на местности и высокую производительность аэросъёмочных работ. Основные недостатки сканеров — значительные масса, габариты, энергопотребление и стоимость. Важнейшее достоинство — возможность получения изображений и спектров во всём оптическом диапазоне 0,3–13,5 мкм, что существенно увеличивает достоверность тематической интерпретации.

Объединить достоинства обеих групп приборов, т. е. реализовать высокое пространственное и спектральное разрешение, небольшую массу, размеры и энергопотребление, оказалось возможным с появлением видеоспектрометров-гиперспектрометров — приборов на основе полихроматоров и приёмников матричного типа.

Структурная схема гиперспектральной-видеоспектральной аэросъёмки представлена на *рис. 1* (Марков, Шилин, 2009).

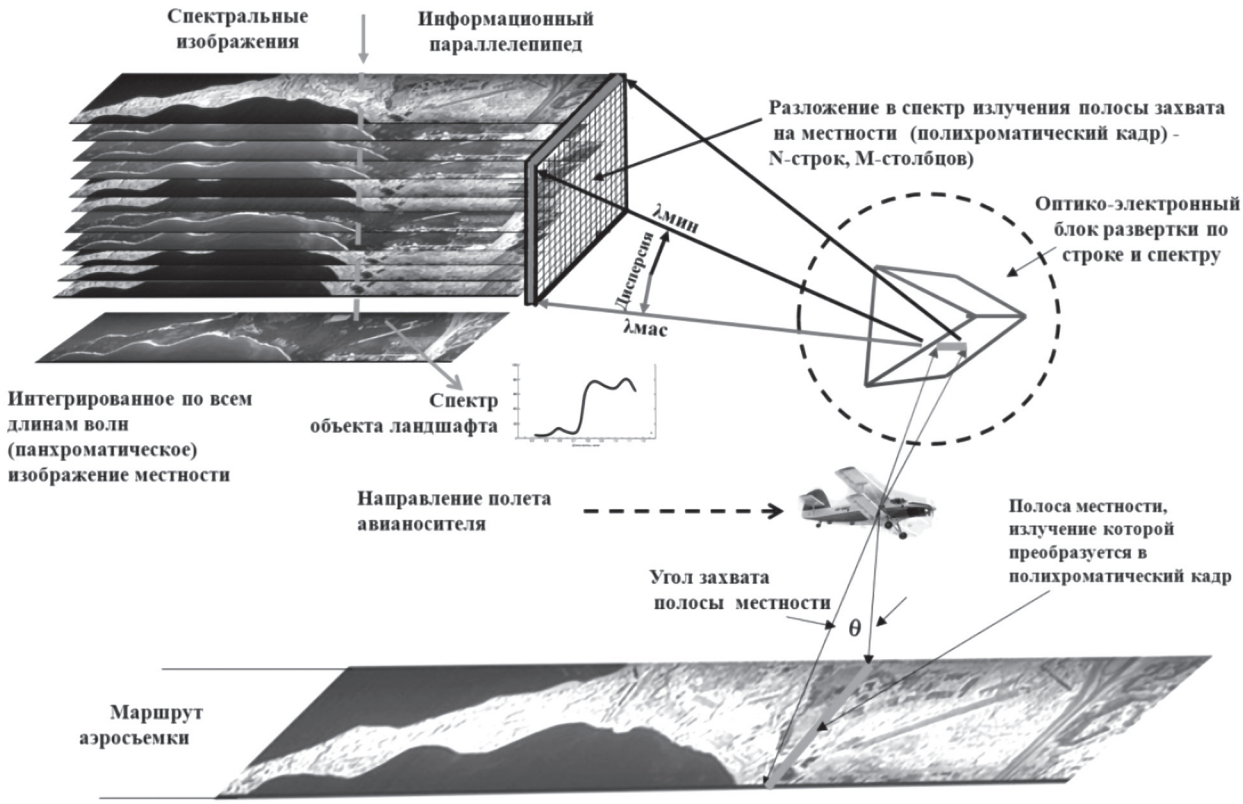

Рис. 1. Структурная схема видеоспектральной аэросъёмки

В рассматриваемой схеме в видеоспектрометре или гиперспектральном сканере излучение, идущее от узкой полосы земной поверхности, попадает в оптико-электронную систему развёртки по строке и спектру (ОЭССС). В гиперспектральных сканерах это оптико-механический блок, объектив, диспергирующие устройства, блок приёмников с различной спектральной чувствительностью, усилители и т. д. В видеоспектрометрах — объектив, полихроматор, приёмная матрица.

Система ОЭССС формирует так называемый полихроматический или спектральный кадр — серию монохромных изображений (строк) узкой полосы местности в узких спектральных интервалах. За счёт движения авианосителя или спутника каждая строка формирует так называемый информационный параллелепипед (Марков, Шилин, 2009).

Информация по вертикальной координате информационного параллелепипеда представляет собой спектр уходящего (собственного или отражённого) излучения элемента земной поверхности, соответствующего мгновенному полю зрения прибора. Аналогичную структурную схему имеет съёмка с космических носителей.

При полевых работах съёмка выполняется видеоспектрометром, установленном на поворотной или движущейся платформе. Обычно платформа создаётся на базе киноустановки, и при её вращении формируется информационный параллелепипед, «ориентированный горизонтально» на вертикальную панораму (*рис. 2*) (Алексеев и др., 2012). Возможно проведение съёмки с каких-либо возвышенностей на наклонных трассах.

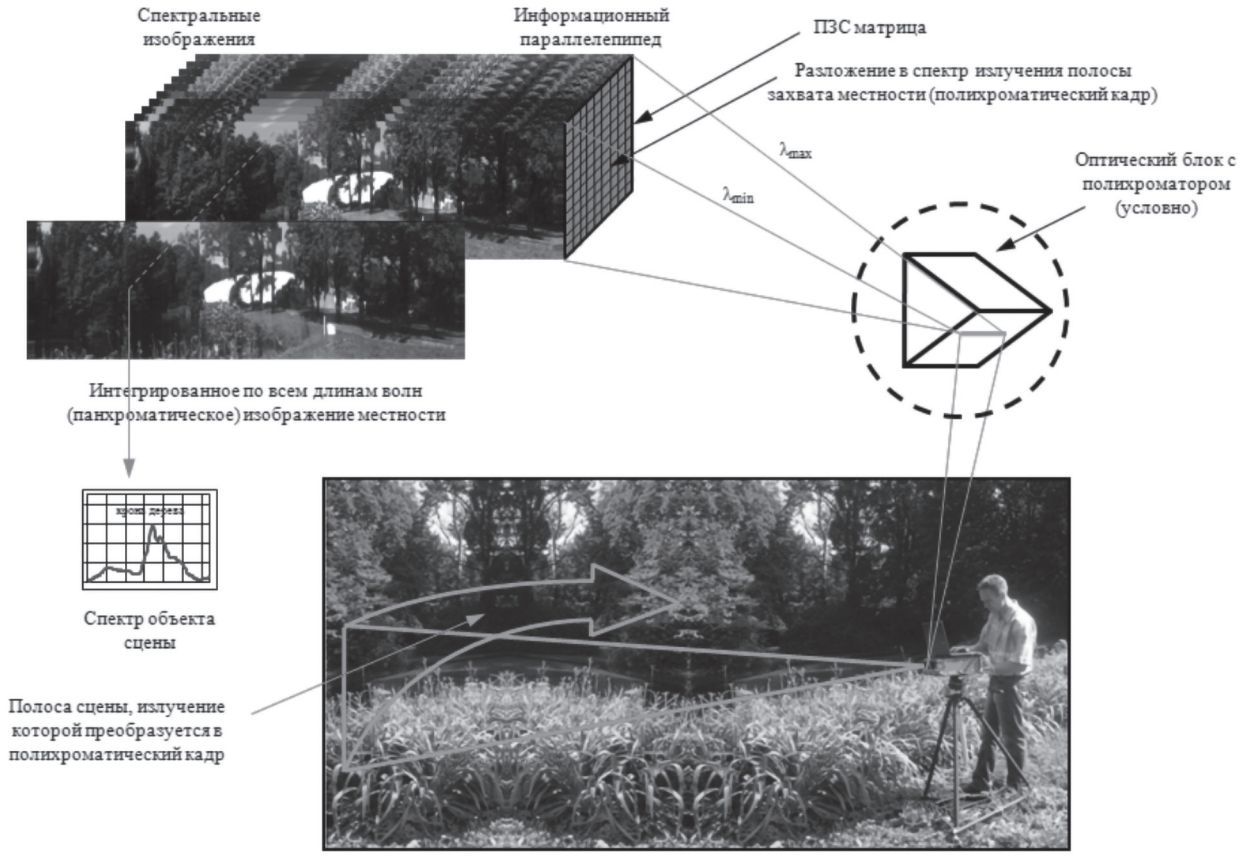

Рис. 2. Структурная схема полевой видеоспектральной съёмки

В информационный параллелепипед входят все методы дистанционного зондирования оптического диапазона. Так, панхроматическая аэрофотосъёмка представляет один горизонтальный срез параллелепипеда в виде изображения, суммирующего излучение по всем длинам волн видимого диапазона. Многозональная аэрофотосъёмка представляет несколько срезов, каждый из них характеризует излучение значительной части (примерно 100 нм) видимого или ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов. Спектральные характеристики объектов описываются одной точкой для панхроматического снимка и несколькими точками для многозональной съёмки. Для многоспектральной-гиперспектральной аэросъёмки сканерами типа GER-211 имеем, соответственно, 211 срезов (монохромных изображений) и столько же точек на спектральной кривой уходящего излучения объекта.

Видеоспектрометры

За рубежом авиационные видеоспектрометры известны с начала 80-х гг. прошлого века, и в настоящее время существуют десятки модификаций. В последнее десятилетие создаются и запускаются в экспериментальном плане видеоспектрометры космического базирования (Шилин и др., 2013), этому направлению уделяется большое внимание программами NASA (*англ*. National Aeronautics and Space Administration, НАСА — Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, США) и ESA (*англ*. European Space Agency, ЕКА — Европейское космическое агентство). Видеоспектральные аэрокосмические съёмки ведутся в интересах геологии, сельского и лесного хозяйства, экологической безопасности, создаются банки видеоспектральных данных.

К сожалению, у нас в стране развитие видеоспектральной съёмки идёт очень медленно. В последние годы появились опытные образцы авиационных и космических видеоспектрометров. В качестве примера приводится краткое описание отечественных видеоспектрометров Национального исследовательского университета ИТМО (*таблица*). Видеоспектрометры построены по одной оптической схеме (*рис. 3*) с небольшими различиями по входному объективу (Груздев и др., 2010).

Основные технические характеристики видеоспектрометров Университета ИТМО

Параметр	Вариант видеоспектрометра	
	широкоугольный	узкоугольный
Фокусное расстояние входного объектива, мм	19,2	100
Относительное отверстие	1:4	
Ширина входной щели, мм	0,1	
Поле зрения, 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	10	
Поток информации	Примерно 1,5 МБ/с	
Масса, кг	8	5
Габариты (высота×длина×ширина), мм	500×400×150	350×400×150

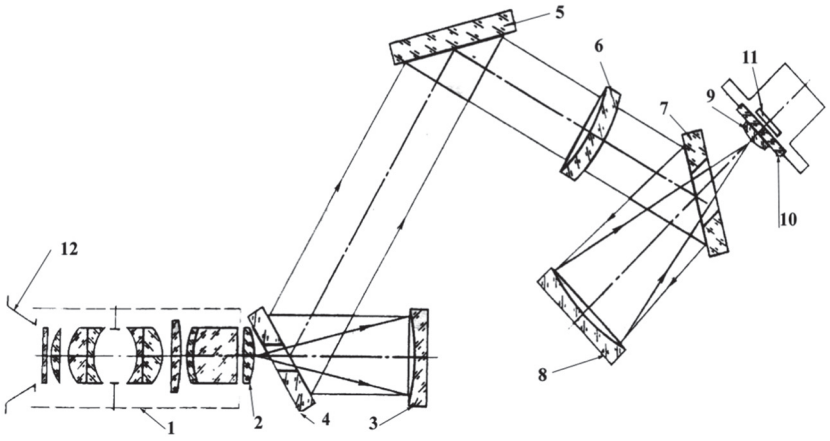

Рис. 3. Оптическая схема видеоспектрометра: 1 — входной объектив; 2 — плосковыпуклая линза-коллектив с нанесённой на неё входной щелью; 3 — коллиматорный объектив; 4, 7 — плоские зеркала; 5 — дифракционная решётка; 6 — вогнуто-выпуклый мениск; 8 — камерный объектив; 9 — составная выпукло-плоская линза; 10 — защитное стекло; 11 — ПЗС-матрица; 12 — бленда

В рассматриваемой схеме излучение, идущее от узкой полосы земной поверхности через девятилинзовый или трёхлинзовый входной объектив, входную щель полихроматора, нанесённую на плоскую поверхность линзы-коллектива, и коллиматорный объектив, попадает на диспергирующий элемент — плоскую отражательную дифракционную решётку, разлагающую излучение в спектр. Направление входной щели полихроматора и плоскость дисперсии взаимно перпендикулярны. Развёрнутое диспергирующим элементом спектральное изображение щели отображается камерным объективом на матричном приёмнике. При этом каждая строка считываемого спектрального или полихроматического кадра соответствует монохромному (узкоспектральному) видеоспектральному изображению одной и той же узкой полосы земной поверхности. Все монохромные изображения формируют информационный параллелепипед.

Данные матрицы считываются с периодом, обеспечивающим непрерывность изображения при аэросъёмке или полевой съёмке. Программы опроса матриц индивидуальны, но формат сформированного файла выбирается доступным для применения стандартных программных продуктов обработки многоспектральной информации: ENVI (*англ.* Environment for Visualizing Images), ERDAS Imagine и др.

Оба прибора имеют резервы по уменьшению массы и габаритов. Внешний вид видеоспектрометров представлен на *рис. 4*.

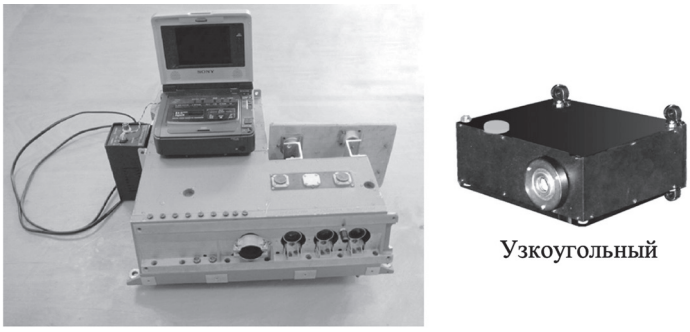

Рис. 4. Внешний вид видеоспектрометров университета ИТМО

В последние годы в ЗАО «Реагент» создана линейка опытных образцов видеоспектрометров (гиперспектральных модулей) видимого и ближнего ИК-диапазонов 0,4–1,0 мкм с полем обзора 20–60 угл. град и разрешением примерно 0,3–1,0 мрад. В работе (Виноградов и др., 2015) детально рассмотрены основные технические особенности приборов и результаты испытаний, подтвердивших приведённые в техническом задании параметры. Разработки могут быть положены в основу серийных изделий. Представляет интерес узкоугольной прибор ЗАО «Реагент» (Виноградов и др., 2016), который по характеристикам пригоден для установки на малом космическом аппарате.

Первым видеоспектрометром, выпущенным малой серией, был прибор CASi (*англ.* Compact Airborne Spectrographic Imager) фирмы Itres Research Ltd. (Канада). Он имеет диапазон спектральной чувствительности 0,4–0,9 мкм, спектральное разрешение от 1,8 нм (может быть выбрано по желанию исследователя), мгновенное поле зрения 1,0 мрад (это соответствует разрешению на местности примерно 1,0 м при высоте полёта 1000 м), угол обзора 45°. В конце 1990-х гг. был выпущен усовершенствованный вариант видеоспектрометра — CASi 2. Модернизация оказалась связанной с расширением области спектральной чувствительности до 1000 нм, улучшением методики спектральной калибровки, уменьшением массы, габаритов и энергопотребления. В последнее время известны модификации приборов этой фирмы для ближнего ИК и теплового диапазонов. Видеоспектрометр CASi сразу нашёл широкое применение в исследовательских работах по изысканию принципиально новых возможностей многоспектральных средств дистанционного зондирования.

Заметным конкурентом CASi стал видеоспектрометр AISA (*англ.* Airborne Imaging Spectrometer for Applications) (Spectral Imaging Ltd., Финляндия), который успешно используется в лесном хозяйстве при изучении спектральных различий на разных стадиях вегетации, при обнаружении сорняков, поражённых болезнью участков посевов и т. д. Фирма Spectral Imaging Ltd. выпускает видеоспектральные приборы для видимого, ближнего ИК (380–2500 нм) и теплового диапазонов. Они имеют отношение сигнал/шум (600–1000):1 и работают в 620 спектральных каналах. Данные видеоспектрометры обладают низкими массогабаритными характеристиками и могут быть установлены на беспилотные летательные аппараты средних размеров.

Для зарубежных видеоспектрометров следует отметить использование в подавляющем большинстве случаев в качестве полихроматора дифракционной решётки. Очень редко в диапазоне 0,4–1,0 мкм используются призмы, которые имеют некоторые преимущества: большую светосилу и простоту изготовления. По этому пути пошли отечественные разработчики опытных образцов — ЗАО «Лептон», ЗАО «Реагент», Красногорский ОМЗ. Приборы с полихроматором на призме имеют принципиальный недостаток — переменное разрешение по спектру: от 1,5 мкм в фиолетовом участке до 10–13 мкм в ближнем ИК. Красный и ближний ИК-участки — основные для диагностики и дифференциации растительности по положению и крутизне «красного края» в интервале 700–750 нм и высоте «ИК-плато» 750–950 нм. Ухудшение детальности спектральных кривых в диапазоне 600–1000 нм заметно ограничивает возможности решения прикладных тематических задач. Поэтому оптимальным представляется использование видеоспектральной системы видимого и ближнего ИК-диапазонов на дифракционной решётке (Григорьева и др., 2019).

Как показывает анализ зарубежных материалов и результатов отечественных полевых и авиасъёмок, в том числе имитирующих космические, приведённые выше характеристики видеоспектрометров близки к оптимальным для авиационных и космических приборов.

В последние годы за рубежом проводится геохимическое картографирование площадей, загрязнённых тяжёлыми металлами, углеводородами, мышьяком и т. п., на выделенных под строительство участках и зонах, прилегающих к разработкам месторождений полезных ископаемых (Slonecker, Fisyer, 2014). В основу положено явление стресса растений, выражающееся в изменении их спектральных характеристик под влиянием конкретных загрязнителей. В комплекс работ входит видеоспектральная аэросъёмка с сопутствующими полевыми и лабораторными спектральными измерениями, полевыми определениями содержания тяжёлых металлов в почве, отбором проб и установлением корреляционных связей между спектральными индексами, фиксирующими стресс растений.

К сожалению, следует отметить отсутствие в нашей стране организаций, готовых эффективно использовать видеоспектральную технику, тем более в упомянутом выше комплексе наблюдений видеоспектрометр/спектрорадиометр. Единственным исключением стали работы Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского и Всероссийского геологического института (Кирсанов и др., 2019).

Анализ общего состояния разработок видеоспектральных авиационных систем и их практического применения позволяет сделать вывод, что для решения широкого круга задач изучения природных ресурсов на носителе должна стоять система, регистрирующая в видеоспектральном режиме весь оптический диапазон 0,4–13,0 мкм. Это или три видеоспектрометра: 0,4–1,0; 1,8–2,5 и 8,0–13,0 мкм, или многоспектральный оптико-механический сканер.

В заключение хотелось бы отметить и в какой-то степени исключить имеющиеся разночтения в терминологии, которые всегда характерны для нового развивающегося метода. В зарубежной литературе (Imaging..., 2006; Elerding et al., 1991) принят термин imaging spectrometry, дословно переводящийся как «спектрометрия изображений», «изображательная спектрометрия». Спектральная информация действительно может представляться также и в виде монохромных изображений, однако по-русски эти формулировки звучат несколько странно, поэтому термин «видеоспектральная съёмка» представляется оптимальным, тем более что и он, хотя и менее точно, отражает существо вопроса получения спектральной информации в виде изображения. Используемый в нашей стране термин «гиперспектральная аэросъёмка»

неточен. Вместо термина «информационный параллелепипед» за рубежом используется термин «гиперкуб»; нам он также представляется неточным, так как по горизонтальной координате (линии полёта) он может быть сколь угодно большим, и здесь скорее подходит термин «гиперпараллелепипед». Не найдено в зарубежных публикациях понятие спектрального (или полихроматического) кадра, хотя на многочисленных рисунках «гиперкуба» он представлен его срезом.

Материалы видеоспектральных съёмок

Аэросъёмка

В качестве примера материалов видеоспектральных съёмок на *рис. 5* приведены 11 из 128 возможных монохромных изображений участка летнего сельскохозяйственного ландшафта. Ширина каждого диапазона — 7 нм, изображения расположены равномерно с шагом 15 нм (центры каналов указаны на *рис. 5*). Простое визуальное их сравнение даёт возможность проследить очевидные различия и вариации спектральных контрастов сельскохозяйственного ландшафта, которые подтверждаются результатами вычислений спектров отражения некоторых его объектов (*рис. 6*, см. с. 16). Наиболее заметны изменения для таких компонентов ландшафта, как растительность — естественная и культурная, для которой интенсивность излучения резко увеличивается, начиная с длины волны 700–720 нм.

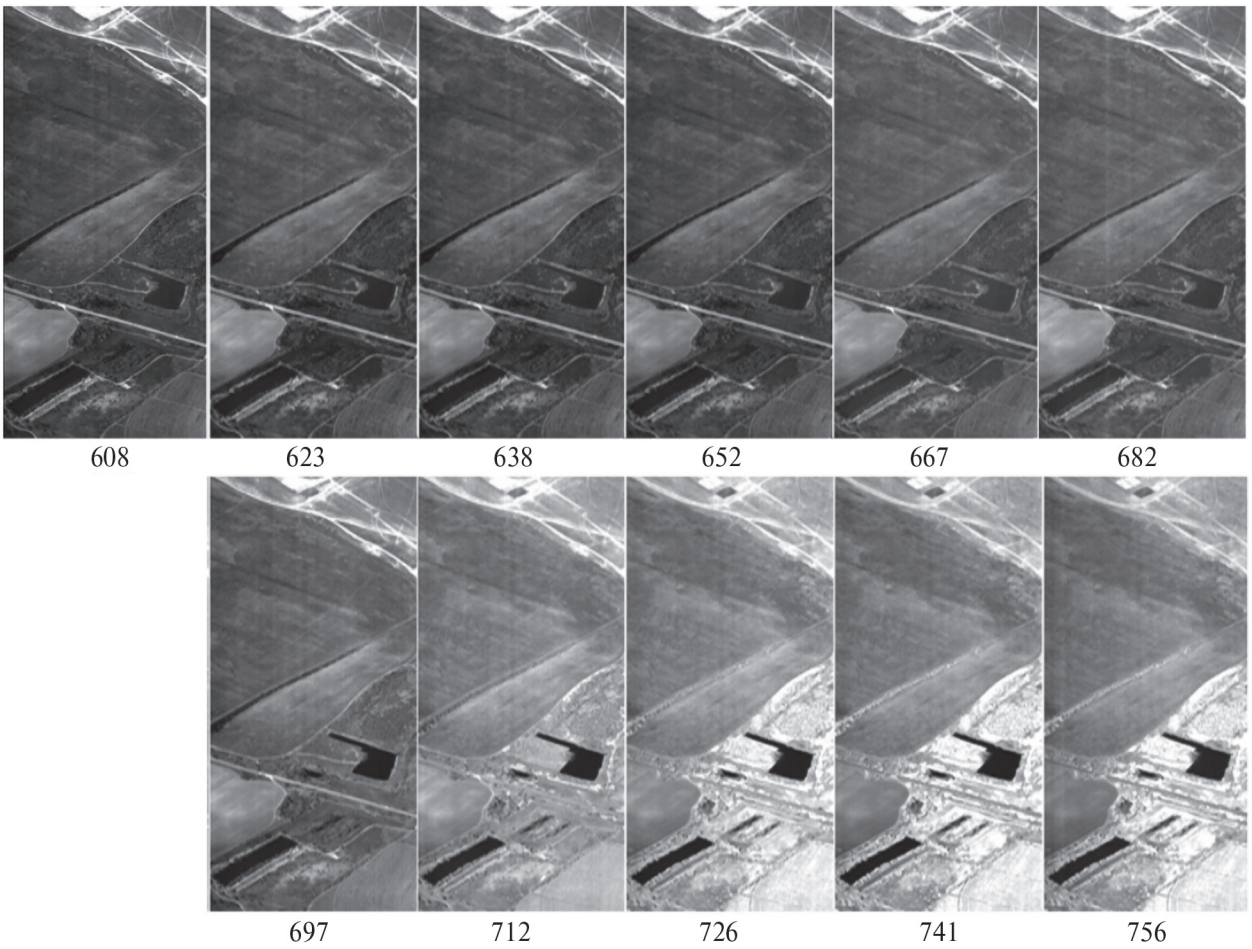

Рис. 5. Серия монохромных изображений сельскохозяйственного ландшафта на юге РФ; 21 июля, 13:03 по местному времени. Широкоугольный видеоспектрометр «Фрегат»

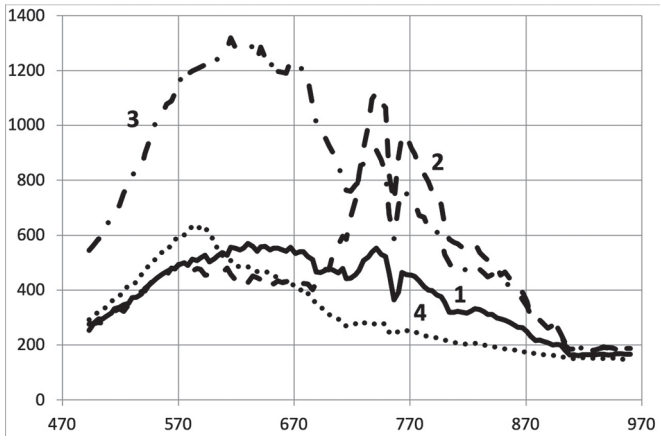

Рис. 6. Спектральные характеристики некоторых элементов ландшафта на *рис. 5*:
1 — вспаханное поле; 2 — кустарник; 3 — дорога; 4 — водоём

На изображениях каналов до 697 нм растительность выглядит тёмной, далее на каналах ближнего ИК-диапазона — светлой. Наименьшие изменения отмечаются у водной поверхности (водоём прямоугольной формы в нижней части снимка). Отметим, что постоянно положительные или близкие контрасты «суша – вода» на коротковолновых снимках увеличиваются с возрастанием длины волны в ближнем ИК-диапазоне примерно от 700 нм. Хорошо видна инверсия контрастов некоторых объектов. Это обнажённые участки пашни — выравнивание контрастов отмечается в каналах 697 и 712 нм; до канала 697 нм эти объекты светлые, начиная с канала 726 нм — тёмные. Интересно отметить, что асфальтовая дорога в нижней части изображений хорошо видна на всех изображениях видимого диапазона (до 697 нм) на окружающем тёмном фоне и не видна на светлых фонах ближних ИК-каналов.

Проведённый анализ монохромных видеоспектральных изображений и спектральных характеристик позволяет сделать вывод, что видеоспектральная аэросъёмка решает обратную геофизическую задачу дистанционного зондирования, так как спектральные характеристики излучения большинства объектов ландшафта существенно различаются. Однако следует отметить, что некоторые объекты, уверенно дешифрирующиеся на монохромных изображениях, имеют одинаковые спектральные характеристики.

Полевая съёмка. Измерения и сравнение спектральных характеристик фоноцелевых ансамблей

На *рис. 7* (см. с. 17) на серии монохромных изображений (6 из 128) панорамы тестового участка представлены шпалеры кустарника (барбарис Тунберга), газон, гравийная дорожка, яркостные эталоны, искусственные объекты (куртки на кустах справа вверху, крышки, мерные флажки). Специфика измерений (они проводятся практически одновременно, за 10–20 с, для всех объектов) позволяет объективно сравнивать спектральные характеристики (*рис. 8*, *9*, см. с. 17, 18), проследить их изменения в видимом и ближнем ИК-диапазонах и делать обоснованные выводы о возможностях их регистрации и дифференциации видеоспектральным методом.

Монохромные изображения представляют часть ансамбля с основными объектами, а их положение на шкале видимого и ближнего ИК-диапазонов определяется значениями длин волн до «красного края» и сразу за его пределами на «ИК-плато». Изображения наглядно иллюстрируют инверсию спектральных контрастов в интервале длин волн «красного края». В видимом диапазоне примерно до 700 нм на монохромных изображениях светлыми выглядят гравийная дорожка, яркостные миры, зелёная металлическая крышка ящика (стоит вертикально справа от миры), мерные флажки, а также хлопчатобумажная куртка на кустах. Тёмной выглядит растительность — кусты барбариса Тунберга, газон.

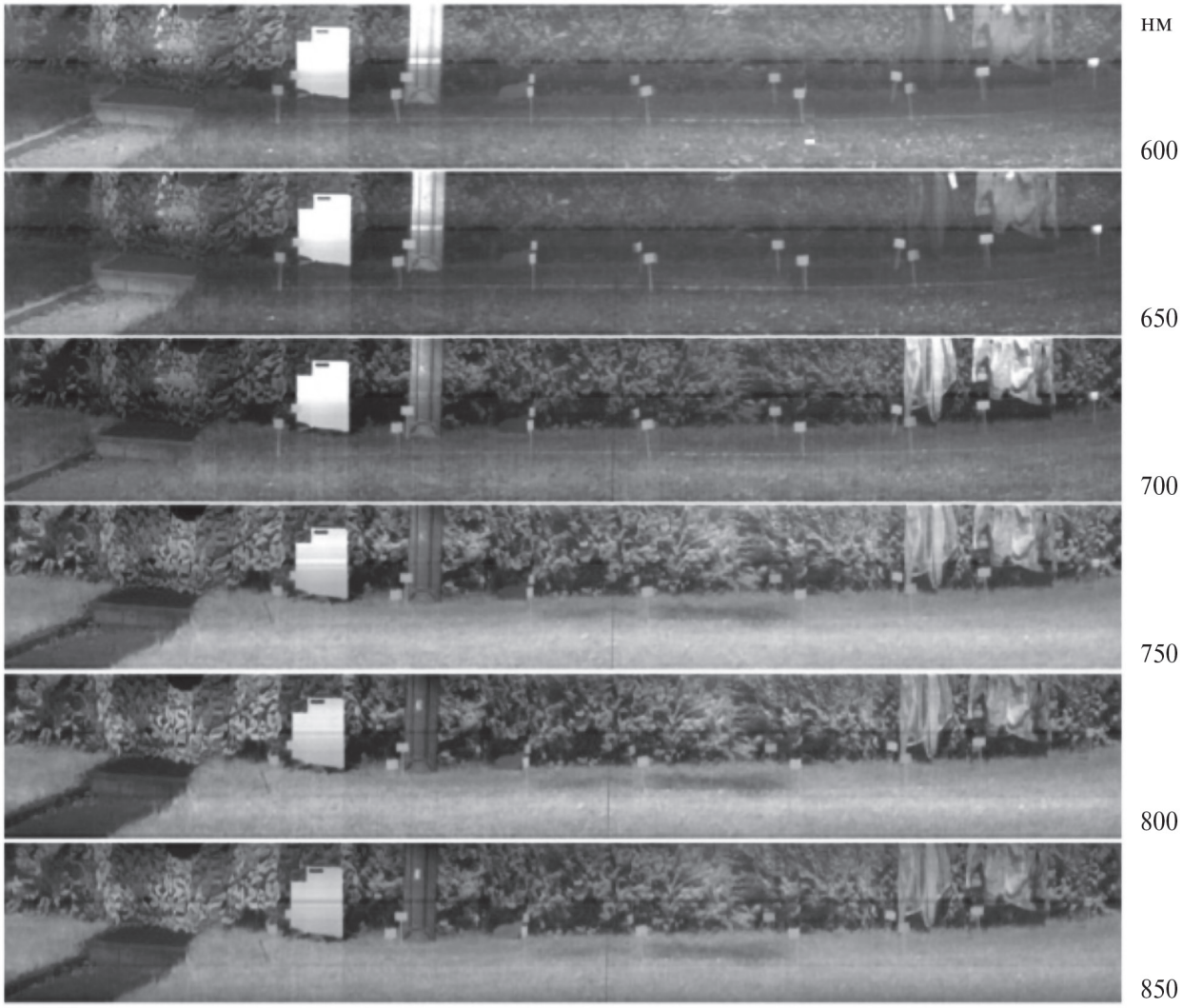

Рис. 7. Серия монохромных изображений тестового участка; 19 июля, 12:50 по местному времени. Широкоугольный видеоспектрометр «Фрегат»

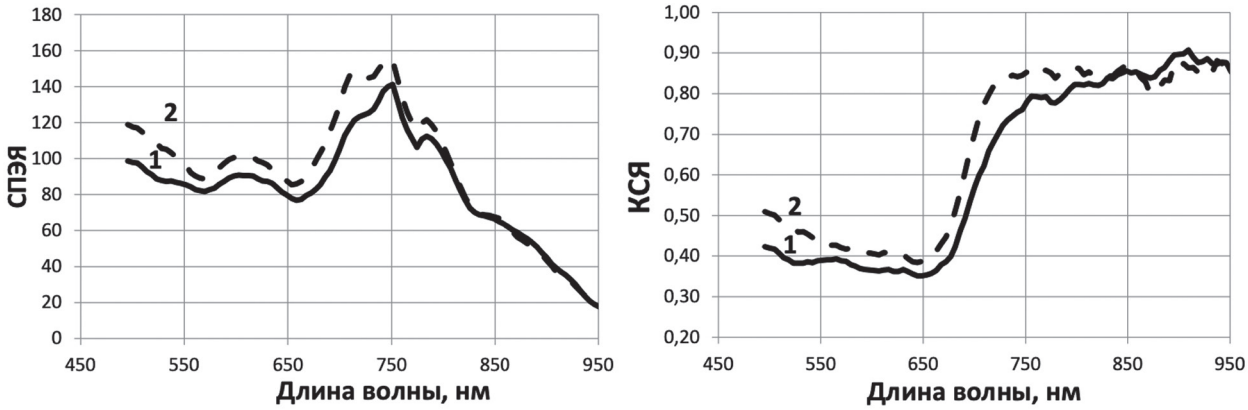

Рис. 8. Спектральные характеристики элементов панорамы на *рис. 7* (куртки, наброшенные на кусты), полученные при обработке информационного параллелепипеда *рис. 7*: 1 — синяя куртка; 2 — зелёная куртка

На длине волны 700 нм контрасты «растительность – горная порода» (гравий) выравниваются, падает контраст крышки, яркими выглядят хлопчатобумажная и синтетические куртки,

миры и флажки. В ближнем ИК-диапазоне на монохромных изображениях 750, 800, 850 нм возникает и увеличивается положительный контраст «растительность – горная порода», уменьшается положительный контраст «куртки – растительность».

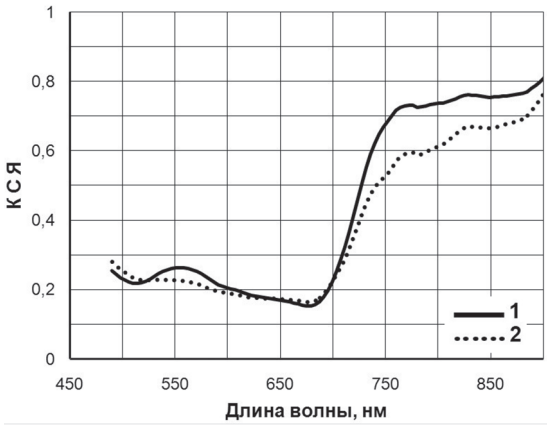

Рис. 9. КСЯ барбариса Тунберга. Измерения 29 июня 2016 г. Видеоспектрометр «Фрегат»: 1 — контрольная площадка; 2 — площадка, загрязнённая сульфатом меди (через полтора месяца после полива фиксируется отрицательная спектральная аномалия в ближнем ИК-диапазоне)

В целом можно сделать вывод, что основы динамики спектральных контрастов монохромных изображений определяются различным характером спектральных кривых живого объекта — растительности — с резким подъёмом вблизи 700 нм и наличием ИК-плато и монотонным возрастанием у неживых объектов — горных пород, антропогенных образований и т. п. При наличии в ландшафте водных объектов важную роль также играют низкие значения их спектральных характеристик по всему видимому и ближнему ИК-диапазону.

Сравнивая кривые спектральной яркости «живых организмов» — растений (см. *рис. 6* и др.) и человека (Шилин и др., 2019) — можно заметить их существенное сходство: имеются участки резкого подъёма коэффициента спектральной яркости (КСЯ) и следующие за ними участки «высоких плато». Но для человека подъём приходится на диапазон 560–600 нм, а для растительности — 675–725 нм; для человека плато связано с красной зоной, а для растительности — с ближней инфракрасной. Известно, что растительность отражает ненужный для фотосинтеза ближний ИК-диапазон; можно предположить, что и человек отражает ненужную и, возможно, даже вредную часть видимого диапазона.

Обнаружение стресса растений при кратковременном разовом воздействии различных стрессоров до появления у растений видимых морфологических изменений и возможность обнаружения и картографирования этих изменений

Тяжёлые металлы. Экспериментальные исследования (Бакина и др., 2016; Григорьева и др., 2018) включали дозированное загрязнение объектов — трав и кустарников — хлористым натрием (засоление) и солями тяжёлых металлов (Cu, Ni, Cd. Pb), по возможности с начала вегетационного сезона с последующими периодическими видеоспектральными наблюдениями соответствующих фоноцелевых ситуаций на тестовых участках с целью выявления «спектральных аномалий», времени их появления и возможного исчезновения. Отбирались пробы листьев древесных и надземных частей растений для определения содержания тяжёлых металлов. Полевые наблюдения осуществлялись широкоугольным видеоспектрометром (см. *таблицу*, *рис. 2*). Обработка данных и их интерпретация включали вывод серии монохромных изображений (*рис. 7*), построение спектров отражения и КСЯ растительных объектов (см. *рис. 6*, *9*, *10*, см. с. 19).

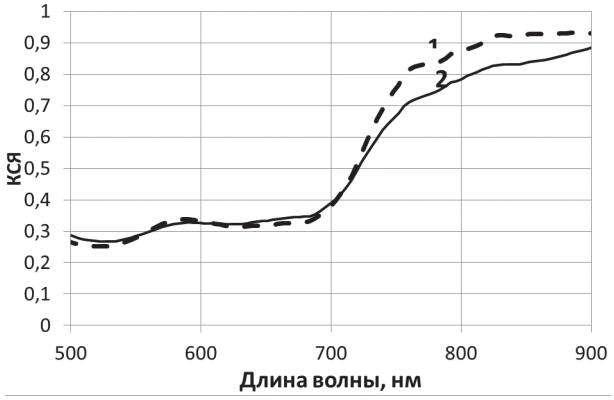

Рис. 10. КСЯ сирени венгерской. Измерения 19 сентября 2016 г. Видеоспектрометр «Фрегат»: 1 – контрольная площадка; 2 – площадка, загрязнённая сульфатом кадмия (после полива 17 августа фиксируется положительная спектральная аномалия в ближнем ИК-диапазоне)

Ионизирующие излучения. Совершенно не изучено, но представляется весьма актуальным обнаружение влияния на спектральные характеристики растений кратковременного воздействия ионизирующих излучений небольшой интенсивности, например при несанкционированном распылении радиоактивных изотопов при техногенных утечках или террористических актах и т. п. Они могут быть обнаружены дистанционно аэрогаммасъёмкой, однако возможности метода ограничены высотой полёта 50–75 м из-за полного поглощения гамма-излучения атмосферой. Кроме того, из-за низкого пространственного разрешения с помощью авиационных приборов можно получить распределение радиоактивного изотопа с разрешением на местности в десятки метров при больших затратах лётного времени.

В экспериментах были исследованы несколько видов растений: фасоль, герань, сингониум, клён и дуб. В качестве источников излучения были использованы диск диаметром 4 см — часы с циферблатом и стрелками, светящимися за счёт радиоактивного изотопа, и образец горной породы с урановым оруденением. По гамма-излучению мощность экспозиционной дозы для первого источника составила около 130–140 мкр/ч, т. е. примерно 4–5 фоновых значений, для второго — около 250 мкр/ч. Источники располагались непосредственно под листом растения на время от нескольких часов до нескольких суток. Наиболее детальные исследования (более 500 спектров) были проведены для сингониума в течение 45 дней для разных интервалов воздействия и сроков измерений. На основе анализа результатов (некоторые наиболее характерные материалы представлены на *рис. 11*) можно сделать следующие основные выводы.

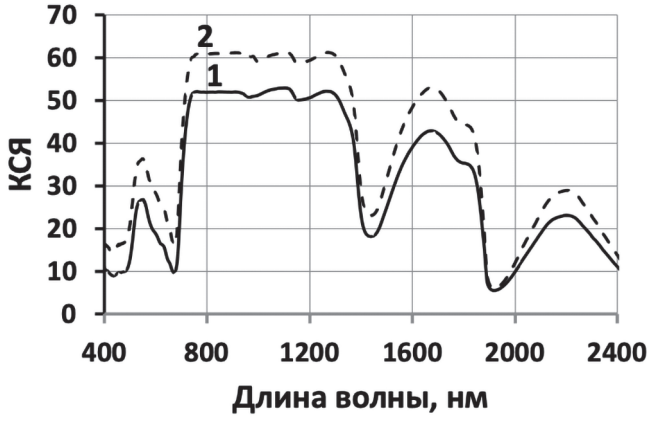

Рис. 11. КСЯ листьев сингониума под воздействием ионизирующих излучений через трое суток: 1 — контрольный чистый лист; 2 — облучённый лист. Спектрорадиометр PSR 3500, в диапазоне 450–1000 нм спектральное разрешение — 3 нм

Практически во всех случаях наблюдаются спектральные аномалии до появления у растений видимых морфологических изменений. Так, при воздействии обоих источников в течение суток на следующий день зафиксированы положительные аномалии КСЯ 5 % в ближнем ИК-диапазоне 700–900 нм. При воздействии первого источника в течение трёх дней измерения через 10 сут дали положительную аномалию около 10 % (см. *рис. 11*), а через 40 сут — почти 100%-ю аномалию. Для «рудного» источника при его установке под листом сингониума на 14-й день зафиксировали положительную аномалию около 10 %.

Нефтепродукты. Методики и технические средства аэрокосмического контроля в оптическом диапазоне загрязнений нефтепродуктами почв хорошо известны и успешно развиваются. Однако все они разработаны для условий длительного или постоянного воздействия загрязнений, и совершенно не исследован вопрос изменения спектральных характеристик на ранних стадиях стресса до появления у растений видимых изменений. Для решения этой задачи на первом этапе в условиях оранжереи была создана тестовая обстановка с посадками фасоли, клёна и дуба. Загрязнение осуществлялось различными объёмами дизельного топлива или нефти специальным шприцом в нижний слой почвы. Для всех растений зафиксированы положительные спектральные аномалии (стимулирующее воздействие) на следующие сутки. На втором этапе при загрязнении нефтью в объёмах 1, 2, 4 мл для сингониума была зафиксирована небольшая положительная аномалия на третьи сутки, аномалия существенно возросла через 14 и 20 сут (*рис. 12*). Для дуба зафиксированы отрицательные аномалии.

Из других стрессоров можно отметить и необходимо исследовать дефицит и избыток влаги, механическое воздействие на растения (*рис. 13*) и т. д.

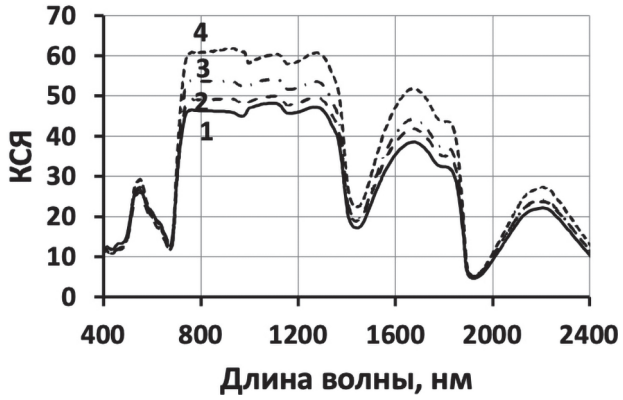

Рис. 12. КСЯ листьев сингониума под воздействием нефти, загрязнение 27 октября: 1 — чистый лист; 2 — через 3 сут; 3 — через 14 сут; 4 — через 20 сут. Спектрорадиометр PSR 3500

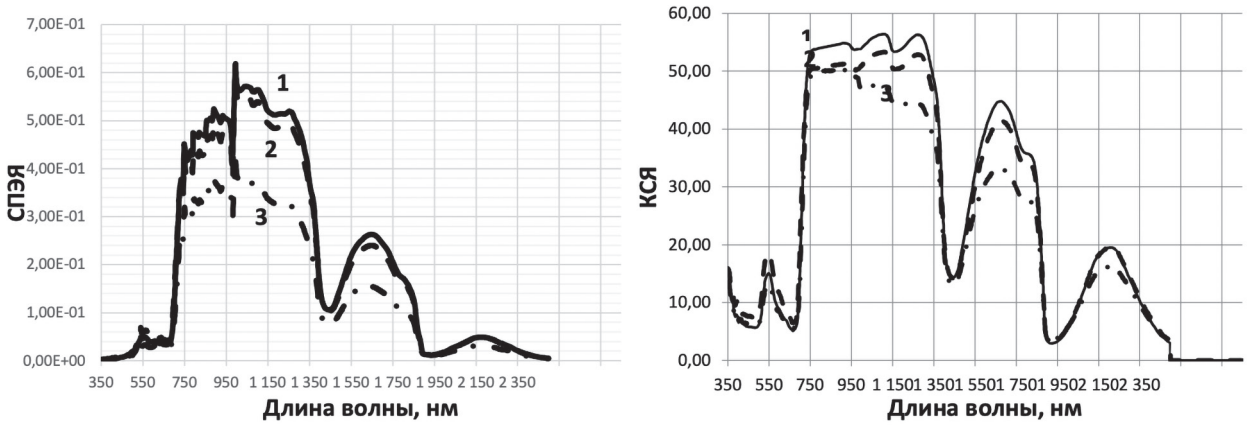

Рис. 13. Спектры отражения (*вверху*) и коэффициенты спектральной яркости (*внизу*) листа подсолнечника: 1 — у сразу сорванного листа; 2 — у сорванного листа через 40 мин; 3 — у сорванного листа через 3 ч. Спектрорадиометр PSR 3500

Анализ этих материалов показал следующее:

1. Влияние на растения Na и тяжёлых металлов Ni, Cu, Cd, Pb, ионизирующих излучений, нефтепродуктов на ранних стадиях воздействия существенно сказывается на изменениях спектров отражения коэффициентов спектральной яркости. Это может служить ранним и важнейшим индикатором стресса растений до появления у них морфологических изменений. За короткий срок — от нескольких часов до нескольких дней — возникает положительная или отрицательная спектральная аномалия, которая может быть зафиксирована повторными съёмками из космоса. Особенно это важно для объектов атомной энергетики.

2. Полевая видеоспектральная съёмка высокого пространственного и спектрального разрешения является быстрым и эффективным методом обнаружения и картографирования вышеуказанных закономерностей благодаря возможности получения в реальном масштабе времени спектральной информации (серий монохромных изображений и спектров уходящего излучения (см. *рис. 10–13*)) больших площадей с фоновыми и тестовыми объектами. Значения спектральных аномалий и длительность их существования позволяют сделать вывод о возможности их регистрации и мониторинга аэрокосмическими видеоспектральными системам.

3. Для диагностических целей следует использовать весь диапазон спектральной чувствительности 400–900 нм, а не ограничиваться, как это было принято до настоящего времени, выбором «оптимальных» спектральных интервалов. Индикационная роль ближней ИК-зоны 1,0–2,5 нм невелика (эта зона значима для геологии).

Особенности измерений видеоспектрометром и спектрорадиометром

Оба типа приборов регистрируют спектр уходящего излучения объектов земной поверхности, но так как видеоспектрометр регистрирует его в пределах площади (кадра съёмки), а спектрорадиометр — по трассе, объём спектральной информации в первом случае в тысячи раз больше. То есть видеоспектрометр превосходит спектрорадиометр по производительности и позволяет выполнять картографирование «спектральных объектов» в пределах снимаемой площади. Это решающее преимущество видеоспектрометров. Но имеются и недостатки. Результаты видеоспектральных измерений существенно зависят от внешних условий, и при повторных наблюдениях той же самой сцены это может существенно повлиять на результаты сравнения сцен (двух циклов измерений). Результаты полевых измерений спектрорадиометром ещё более зависят от внешних условий, в том числе и при сопоставлении спектральных характеристик объектов, разнесённых даже на краткий промежуток времени в полёте. В строго контролируемых лабораторных измерениях спектрорадиометр с периферийным оборудованием (выносной головкой с осветителем и объективом) позволяет получать исключительно стабильные, независящие от внешних условий результаты, особенно для плоских поверхностей листьев или материалов. Противоположный пример — хвойные деревья, где предпочтительнее использовать видеоспектрометр, осуществляющий осреднение данных по большой площади хвойного покрытия.

Таким образом, при фундаментальных исследованиях закономерностей формирования спектральных характеристик объектов оптимально использование и видеоспектрометра, и спектрорадиометра. При решении картографических задач эффективны только видеоспектрометры на самолётах и космических носителях.

Видеоспектрометр и спектрорадиометр регистрируют спектры отражённого излучения (спектральную плотность энергетической яркости — СПЭЯ) в диапазоне 0,3–3,5 мкм. При наличии у приборов соответствующих эталонов вычисляется коэффициент излучения КСЯ (Чапурский, 1986). В мировой практике эта характеристика используется для составления каталогов и атласов и сравнения данных по различным регионам, так как КСЯ меньше зависит от условий измерений. Кривые КСЯ имеют более сглаженный вид, и у них пропадают некоторые особенности — локальные максимумы и минимумы, могущие иметь важную

индикационную значимость, особенно для растительности (см. *рис. 13*). Возникают также искажения в соотношениях спектральных кривых СПЭЯ и КСЯ. Так, на *рис. 13* соотношение кривой 3 (сорванный лист через три часа) с кривыми 1 и 2 по СПЭЯ существенно изменилось по амплитуде на графике КСЯ, особенно для спектрального диапазона 750–1000 нм. Аналогичные искажения, а также искажения в виде спектрального сдвига кривых СПЭЯ и КСЯ наблюдались нами и ранее (Шилин и др., 2019). Таким образом, возникает требующий дальнейших исследований вопрос об искажениях при вычислениях КСЯ.

В практических условиях эталон часто может отсутствовать, например при аэросъёмке, когда требуется обработка информации в близком к реальному масштабе времени. В этом случае для сравнения объектов в пределах сцены (аэросъёмочного маршрута) реально используются спектры отражения (см. *рис. 6*). В качестве примера укажем на работу (Elerding et al., 1991), где опознание самолётов и объектов инфраструктуры аэродрома проводилось по спектрам отражения.

Заключение

Приведённые результаты многолетних экспериментальных полевых и авиационных съёмок, в том числе в комплексе с «имитационными» аэросъёмками с видеоспектрометром для малого космического аппарата (Шилин, Груздев, 2016), показывают ожидаемую высокую эффективность космических видеоспектральных съёмок при тематическом картографировании, в первую очередь геоэкологическом и геологическом мелких масштабов (от 1:100 000). Полевые и авиационные съёмки должны входить в комплекс с космическими съёмками как средства обоснования их конкретного применения и проверки результатов последних.

Видеоспектральная съёмка — космическая, авиационная, полевая, лабораторная — за рубежом развивается быстрыми темпами благодаря наличию большого перечня видеоспектрометров различного назначения. Растущее количество публикаций иллюстрирует соответствующие достижения. В нашей стране видеоспектральная съёмка находится на стадии становления из-за отсутствия серийных приборов. Проводится ограниченный объём исследований и опытно-методических работ. При небольших инвестициях в технику и методику можно ожидать быстрого развития метода.

Литература

1. *Алексеев А. А.*, *Шилин Б. В.*, *Шилин И. Б.* Опыт полевых видеоспектральных исследований // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 89–94.
2. *Виноградов А. И.*, *Егоров В. В.*, *Калинин А. П.*, *Родионов А. И.*, *Родионов И. Д.* Линейка гиперспектральных сенсоров оптического диапазона: препринт. М.: ИКИ РАН, 2014. Пр-2176. 20 с.
3. *Виноградов А. И.*, *Егоров В. В.*, *Калинин А. П.*, *Родионов А. И.*, *Родионов И. Д.*, *Родионова И. П.* Узкоугольный гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона: препринт. М.: ИКИ РАН, 2016. Пр-2181. 16 с.
4. *Григорьева О. В.*, *Дроздова И. В.*, *Шилин Б. В.* Экспериментальное обоснование возможностей видеоспектральной дистанционной индикации кратковременного стресса растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 78–88. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88.
5. *Григорьева О. В.*, *Груздев В. Н.*. *Кузнецов А. Ю.*, *Чапурский Л. И.*, *Шилин Б. В.* Сравнение авиационных видеоспектрометров с различными типами полихроматоров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 143–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-143-149.
6. *Груздев В. Н.*, *Красавцев В. М.*, *Марков А. В.*, *Чиков К. Н.*, *Шилин Б. В.* Действующие образцы видеоспектрометров для малого космического аппарата // Региональная экология. 2010. № 3(29). С. 112–117.
7. *Кирсанов А. А.*, *Липияйнен К. Л.*, *Смирнов М. Ю.*, *Кирсанов Г. А.*, *Смирнова О. И.*, *Павлова В. О.* Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе обработки аэро- и космических гиперспектральных данных // Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 82–90.

8. *Марков А. В.*, *Шилин Б. В.* Проблемы развития видеоспектральной аэросъёмки // Оптический журн. 2009. Т. 76. № 2. С. 20–27.
9. *Шилин Б. В.*, *Груздев В. Н.* Летные и полевые исследования видеоспектрометра для малого космического аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 224–232. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-224-232.
10. *Шилин Б. В.*, *Груздев В. Н.*., *Алексеев А. А.* Видеоспектральные исследования за рубежом // Контенант. Научно-техн. журн. 2013. Т. 12. № 1. С. 15–20.
11. *Шилин Б. В.*, *Иванова Г. П.*, *Золотухина А. В.* Исследование спектральных характеристик кожного покрова спортсмена // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. 2019. Вып. 7. С. 341–344.
12. *Elerding G. T.*, *Thunen J. G.*, *Woody L. M.* Wedge imaging spectrometer: application to drug and pollution law enforcement // Proc. SPIE. 1991. V. 1479. P. 380–392. https://doi.org/10.1117/12.44546.
13. Imaging spectrometry / eds. van der Meer F. D., de Long S. M. Springer, 2006. 403 p.
14. *Slonecker E. T.*, *Fisyer G. B.* An evaluation Remote Sensing Technology for the detection on Residual Contamination at Ready for Anticipated use Sites: Open-File Report 2014–1197 / U. S. Geological Survey. Reston, Virginia, 2014. 32 p.

Place of video spectral imaging among remote sensing methods

B. V. Shilin [1, 2], **A. Yu. Kuznetsov** [3]

[1] *A. F. Mozhaisky Military Space Academy*, *Saint Petersburg 197198*, *Russia*
[2] *Saint Petersburg Scientific Research Center for Ecological Safety RAS*
Saint Petersburg 197110, *Russia*
E-mail: bshilin@rambler.ru
[3] *National Research University ITMO*, *Saint Petersburg 197101*, *Russia*
E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

The long-term experience of a number of leading organizations in the development of field and aerial video spectral imagery as a fundamental and methodological basis of space imagery and the possibility of assessing the effectiveness of the latter is analyzed and summarized. Experts in the field of remote sensing are being familiarized with the capabilities of field and air (including in the complex "imitation" aerial photography with a video spectrometer for a small spacecraft) video spectral surveys using the specific example of 20-year joint work of some organizations. The block diagram of aerial and field video spectral surveys, optical diagram and technical characteristics of prototypes of ITMO university video spectrometers are presented. The results of the work of the Fregat and Burelom video spectrometers in field and aviation conditions are presented. The results of using video spectrometers on aircraft carriers and in the field in various conditions are presented in the form of a series of narrow-spectrum monochrome images of various background-target situations and spectra of outgoing radiation of surveyed objects by the example of solving problems of identifying early vegetation stress from pollution with heavy metals. The practical significance of field and laboratory spectroradiometric measurements in different ranges of the optical spectrum using modern foreign spectroradiometers is estimated. A comparison is made with the achievements abroad and in our country. Conclusions are drawn about the development of spectroradiometric research in our country.

Keywords: video spectrometer, hyperspectrometer, spectral characteristics, monochrome images, spectroradiometer

Accepted: 17.01.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-9-24

References

1. Alekseev A. A., Shilin B. V., Shilin I. B., Experience in field video spectral research, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp 89–94 (in Russian).
2. Vinogradov A. I., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodionov A. I., Rodionov I. D., *A range of hyperspectral optical sensors*, Moscow: IKI RAN, 2015, Pr-2176, 20 p. (in Russian).
3. Vinogradov A. I., Egorov V. V., Kalinin A. P., Rodionov A. I., Rodionov I. D., Rodionova I. P., *Narrow-angle hyperspectrometer of visible and near infrared range*, Moscow: IKI RAN, 2016, Pr-2181, 16 p. (in Russian).
4. Grigorieva O. V., Drozdova I. V., Shilin B. V., Experimental substantiation of the capabilities of video-spectral remote indication of short-term stress of vegetation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 72, pp. 78–88 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-78-88.
5. Grigorieva O. V., Gruzdev V. N., Kouznetsov A. Yu., Chapursky L. I., Shilin B. V., Comparison of aircraft imaging spectrometers with different types of polychromators, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 143–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-143-149.
6. Gruzdev V. N., Krasavtsev V. M., Markov A. V., Chikov K. N., Shilin B. V., Working samples of video spectrometers for small spacecraft, *Regionalnaya ekologia*, 2010, No. 3(29), pp. 112–117 (in Russian).
7. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A., Smirnova O. I., Pavlova V. O., Identification of areas perspective for gold mineralization, based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing, *Regionalnaya geologiya i metallogeniya*, 2019, No. 78, pp. 82–90 (in Russian).
8. Markov A. V., Shilin B. V., Problems of the development of aerial video spectral photography, *Opticheskii zhurnal*, 2009, Vol. 76, No. 2, pp. 20–27 (in Russian).
9. Shilin B. V., Gruzdev V. N., On-board and field tests of an imaging spectrometer for a small spacecraft, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 224–232, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-224-232.
10. Shilin B. V., Gruzdev V. N., Alekseev A. A., Video spectral studies abroad, *Contenant. Nauchno-tekhniceskii zhurnal*, 2013, Vol. 12. No. 1, pp. 15–20 (in Russian).
11. Shilin B. V., Ivanova G. P., Zolotukhina A. V., Spectral characteristics of the skin cover of the sportsmen, *Regional informatics and information security*, Proc., 2019, Vyp. 7, pp. 341–344 (in Russian).
12. Elerding G. T., Thunen J. G., Woody L. M., Wedge imaging spectrometer: application to drug and pollution law enforcement, *Proc. SPIE*, 1991, Vol. 1479. pp. 380–392, https://doi.org/10.1117/12.44546.
13. *Imaging spectrometry*, van der Meer F. D., de Long S. M. (eds.), Springer, 2006, 403 p.
14. Slonecker E. T., Fisyer G. B., *An evaluation Remote Sensing Technology for the detection on Residual Contamination at Ready for Anticipated use Sites: Open-File Report 2014–1197*, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2014, 32 p.