

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.782.46.46.015.3: 528.854

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ВИДЕОСПЕКТРАЛЬНОЙ АЭРОСЪЕМКИ

© 2009 г. А. В. Марков, канд. техн. наук; Б. В. Шилин, доктор геол.-мин. наук

НИЦ ФГУ “4 ЦНИИ МО РФ”, Санкт-Петербург

На основе результатов многолетних летных исследований с действующим образцом отечественного видеоспектрометра показана возможность и приведены примеры построения узкоспектральных изображений и спектров излучения – индикаторов вещественного состава (вида) и состояния объектов земной поверхности.

Коды OCIS: 120.1880.

Поступила в редакцию 10.10.2008.

До настоящего времени дистанционные аэрокосмические методы видового наблюдения эффективно применялись только в первой обратной геофизической задаче – определении формы и размеров объектов. Вторая задача – идентификация вещественного состава (вида) и состояния – решалась в ограниченной степени по косвенным признакам либо с помощью различных спектральных приборов с профильным характером информации, которые могли обеспечить съемку лишь с низкой детальностью [1, 2]. Принципиальное решение данной проблемы стало возможным с появлением нового вида средств дистанционного зондирования – видеоспектрометров, имеющих высокое пространственное и спектральное разрешение.

Видеоспектрометры – это оптико-электронные приборы на основе матричных приемников и полихроматоров. С их помощью можно получить информацию с авиа- и космических носителей о тонких различиях свойств объектов земной и водной поверхности в диапазоне 0,4–2,4 мкм (в перспективе до 13,5 нм) по спектрам излучения, являющимся прямыми индикаторами вещественного состава и состояния объектов.

В 2000–2007 гг. под руководством авторов были проведены широкие летные исследования с действующим образцом видеоспектрометра [3, 4] (главный конструктор К.Н. Чиков). Эти исследования с доработанным для эксплуатации на авианосителях прибором включали в себя создание методик видеоспектральной аэросъемки, обработки и интерпретации видеоспектральных данных, оценку перспектив использования метода.

Принцип формирования видеоспектральных данных представлен на рис. 1.

В рассматриваемой схеме излучение, идущее от узкой полосы земной поверхности, попадает в оптический блок (входной объектив, входная щель полихроматора, коллиматорный объектив, диспергирующий элемент – плоская дифракционная решетка), разлагающий 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 спектрального или полихроматического кадра соответствует монохромному (узкоспектральному) видеоспектральному изображению одной и той же узкой полосы земной поверхности. Все монохромные изображения формируют так называемый информационный параллелепипед [4, 5].

Информация по вертикальной координате информационного параллелепипеда представляет собой спектр излучения элемента земной поверхности, соответствующего мгновенному полю зрения прибора.

Основные технические характеристики видеоспектрометра

Фокусное расстояние входного объектива, мм	19,2
Фокусное расстояние камерного объектива, мм	93,6
Эквивалентное фокусное расстояние, мм	18,5
Относительное отверстие входного объектива	1:4
Ширина входной щели, мм	0,1
Поле зрения, град	28,2×0,3
Угол мгновенного поля зрения, мрад	1,0
Спектральный диапазон, мкм	0,45–0,9
Спектральное разрешение, нм	7
Энергопотребление, Вт	10
Масса, кг	8

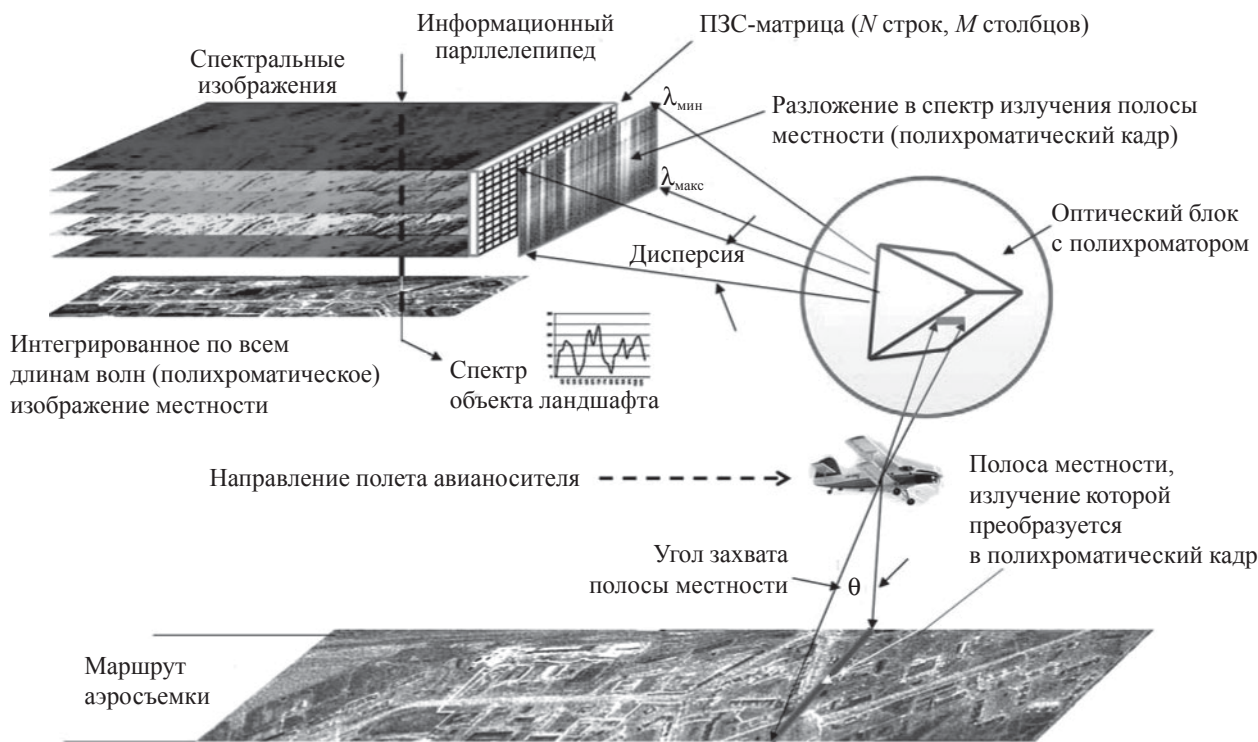


Рис. 1. Функциональная схема видеоспектральной аэросъемки.

Полевые авиационные экспериментальные работы проводились на самолете Ан-30 и вертолете Ми-8МТ. Минимальная высота полета рассчитывалась из условия проведения аэросъемки без пропусков на местности и составляла для самолета 500 м, для вертолета – 250 м. Видеоспектрометр устанавливался над третьим фотолюком самолета Ан-30 [4] и центральным люком вертолета без гиropлатформы. В полете осуществлялся непосредственный ввод данных видеоспектрометра в компьютер. Для этого использовалось устройство “Contrast”, преобразующее входной аналоговый сигнал видеоспектрометра в цифровой, сформированный для передачи по входу USB персонального компьютера. Запись данных видеоспектральной аэросъемки в этом случае производится непосредственно на жесткий диск персонального компьютера в формате “.mpeg2”, при этом устраняются искажения сигнала, присущие видеоманитонной записи. Доработки прибора позволили получить монохромные видеоспектральные аэроснимки, близкие по качеству к аэроснимкам, полученным цифровыми фотокамерами.

В настоящее время опрос ПЗС-матрицы проводится в телевизионном стандарте. Полный объем информации при использовании специальных программ сжатия телевизионного изображения и записи его в полете непосредственно на жесткий диск компьютера составляет примерно 30 Гбайт в час.

Значительный объем полученных в экспериментальных полетах 2000–2007 гг. материалов аэросъемок позволяет постепенно накапливать банк видеоспектральных данных для различных фоноцелевых ситуаций. Процесс этот достаточно трудоемкий и требует компьютеров с большим объемом свободного места на жестких дисках и разработки принципов архивации видеоспектральных данных.

На первых этапах исследований обработка данных видеоспектральных аэросъемок сводилась к созданию и использованию программы построения небольшого количества видеоспектральных изображений одного участка местности и анализу различий в спектральных контрастах объектов [4, 5].

В качестве примера такой обработки на рис. 2 приведены 20 из более чем 60 возможных видеоспектральных изображений одного участка местности на северо-западе РФ. Ширина каждого диапазона 7 нм, изображения “расположены” равномерно с шагом 20 нм (центры каналов указаны на рис. 2). Простое визуальное их сравнение дает возможность проследить очевидные различия и вариации спектральных контрастов летнего сельскохозяйственного ландшафта. Наиболее заметны изменения для таких компонентов ландшафта, как растительность – естественная и культурная (огороды), для которой интенсивность излучения увеличивается, начиная с $\lambda = 700\text{--}720$ нм. То же самое наблюдает-

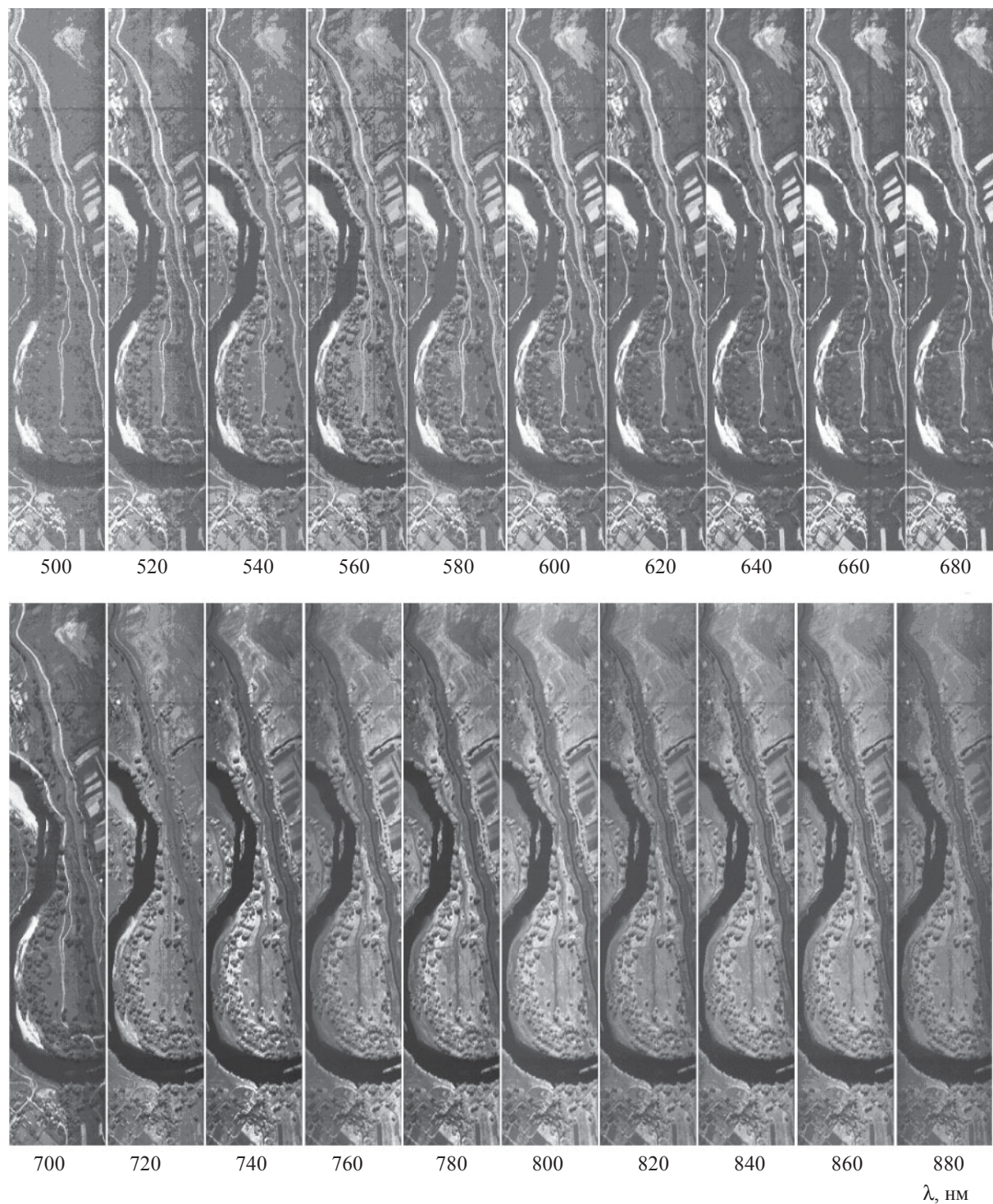


Рис. 2. Серия видеоспектральных изображений участка местности на Северо-западе РФ. Ширина полосы на местности около 300 м. Не исправлены искажения из-за эволюций авианосителя. Остальные пояснения в тексте.

ся для обнаженных почв (пашня), горных пород (пляжные пески) и некоторых антропогенных объектов (например, грунтовых дорог). Наименьшие изменения отмечаются у водной поверхности. Отметим, что постоянно положительные контрасты суша–вода увеличиваются с возрастанием длины волны примерно до 800 нм и потом слегка умень-

шаются. Хорошо видна инверсия контрастов некоторых объектов с фоном. Это обнаженные участки пашни – выравнивание контрастов отмечается в канале $\lambda = 720$ нм; до канала $\lambda = 720$ нм эти объекты светлые, начиная с канала $\lambda = 740$ нм – темные. Песчаные пляжи, песчаные дороги и тропинки выглядят очень светлыми до аэроснимка канала

$\lambda = 720$ нм. Далее контраст с фоном выравнивается и объекты выделяются как слабо темные, причем дороги имеют несколько больший контраст и дешифрируются более уверенно. Можно проследить изменение контрастов и других объектов.

Для подобных материалов – большого количества монохромных изображений, число которых может достигать первых сотен – можно использовать существующие программы обработки многоспектральных изображений, тем более, что визуальная интерпретация всего видеоспектрального-гиперспектрального ряда позволяет выбрать оптимальные каналы для этих программ. Для рис. 2 такими являются каналы $\lambda = 560, 620, 680, 740, 780, 840$ нм. В некоторой степени этот вывод может быть субъективен, но все-таки он позволяет существенно сократить “перебираемую колоду карт”. Однако по сравнению с программами обработки многоспектральных изображений принципиально более перспективен путь построения и интерпретации спектров излучения.

Для решения этой задачи программы обработки постепенно совершенствовались с выводом одновременно все большего количества видеоспектральных изображений и данных по вертикальной координате информационного параллелепипеда – спектров излучения для любого пиксела изображения. В дальнейшем легко рассчитываются усредненные данные для выбранного участка изображения.

Таким образом, программа решает задачу автоматизации процесса первичной обработки данных видеоспектральной аэросъемки (формирование из гиперспектральных массивов изображений для заданных спектральных каналов и сохранение их на жестком диске; расчет спектров излучения для конкретных объектов). Предусмотрена также возможность синтеза любого количества монохромных изображений, вплоть до построения интегрированного по всем каналам панхроматического аэроснимка. Работа с программой обработки видеоспектральных данных поясняется на рис. 3.

В левом верхнем углу оператор после открытия наблюдает преобразованные в формат “avi без сжатия” ранее записанные данные видеоспектральной аэросъемки (полихроматический кадр). Справа на выделенных полосах можно наблюдать монохромные видеоспектральные изображения для установленных ранее длин волн. На рис. 3 выведено только одно монохромное изображение.

В левом нижнем углу формируется спектр излучения для конкретного пиксела монохромного изображения (указан стрелкой), координаты которого заданы оператором.

В дальнейшем спектральная кривая для выбранной точки земной поверхности экспортируется в

офисную программу Excel, где стандартными средствами строятся соответствующие графики.

В качестве примеров покажем обработку данных видеоспектрометра для некоторых наиболее характерных объектов фоновой обстановки рис. 2 (рис. 4а, 4б). Участок для вычислений спектров выбран чуть выше середины сцены (см., например, канал $\lambda = 740$ нм), где на реке имеется остров, выше расположена деревня, справа железная дорога, а еще правей участки пашни. Для точной привязки объектов был использован крупномасштабный цифровой аэрофотоснимок (не приводится).

Наименьшая интенсивность отраженного излучения по всему спектру наблюдается у водной поверхности – река (3), пруд (4) (старица). Несколько большей интенсивностью спектра излучения с монотонным возрастанием примерно до 600 нм и плавным падением характеризуются такие объекты, как крыша дома (8, 9) и железная дорога (1). Еще бóльшую интенсивность излучения в диапазоне 540–890 нм имеют участки пашни (10), они значительно уступают по интенсивности только песчаному пляжу (5) и песчаной дороге (2). Хорошо известную для растительного покрова форму спектра с

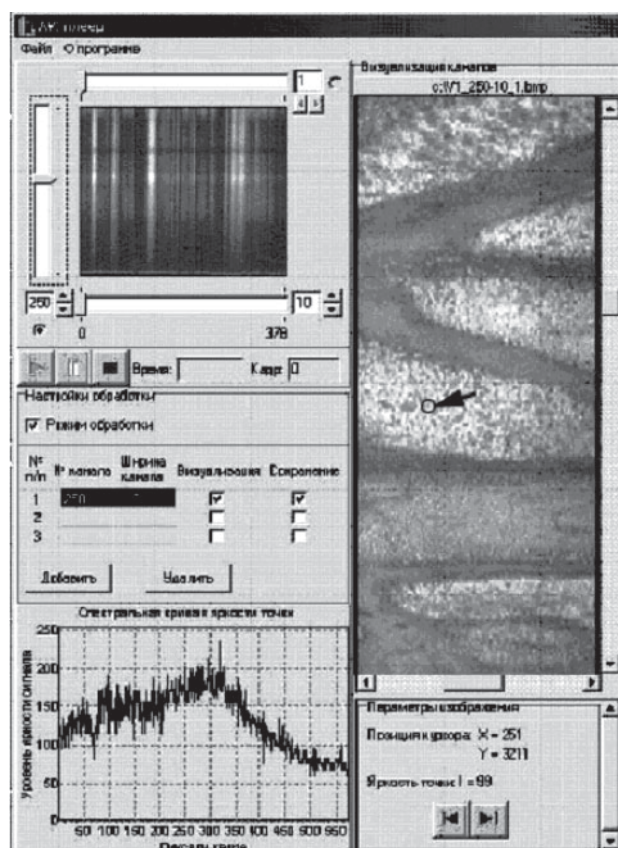


Рис. 3. Пример работы с программой обработки данных видеоспектрометра. Пояснения в тексте.

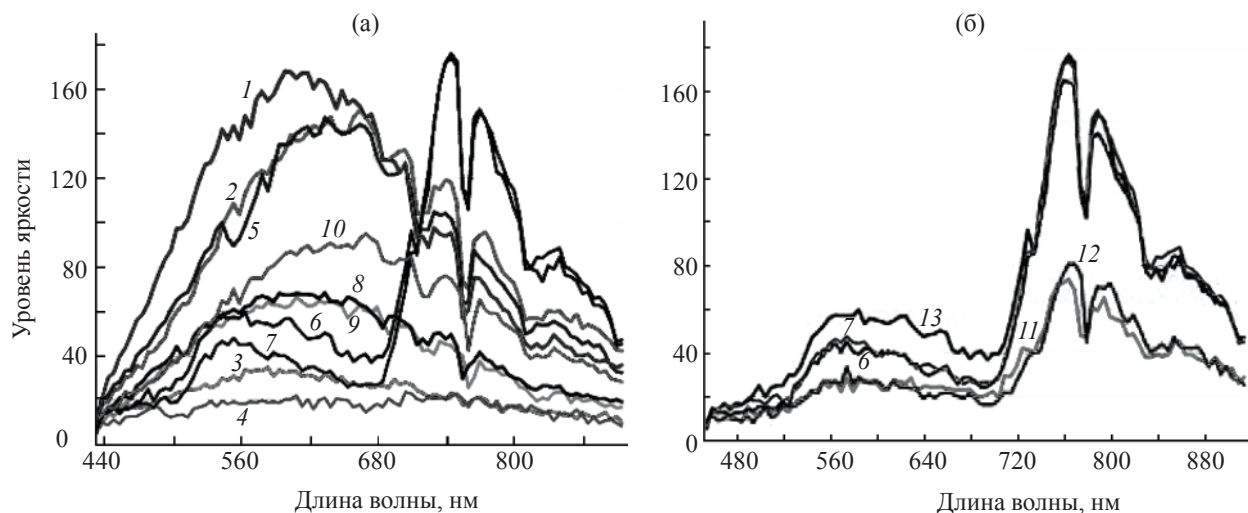


Рис. 4. а, б. Примеры обработки данных видеоспектральной аэросъемки. Спектры излучения для наиболее характерных объектов ландшафта рис. 2. 1 – железная дорога, 2 – грунтовая (песчаная) дорога, 3 – река, 4 – пруд, 5 – пляж, 6 – крона дерева на лугу, 7 – луг, 8 – скат крыши темный, 9 – скат крыши освещенной, 10 – пашня, 11 – крона дерева у шоссе, 12 – кустарник, 13 – крона дерева у реки.

резким возрастанием от 690 нм и четким “ИК плато” дают луг (7), кроны деревьев (6, 11, 13) и кустарник (12). Эти объекты различаются между собой по интенсивности в интервале длин волн 500–620 нм и в ближнем ИК диапазоне.

Проведенный анализ монохромных видеоспектральных изображений и спектров позволяет сделать вывод, что видеоспектральная аэросъемка решает обратную геофизическую задачу дистанционного зондирования, так как спектры излучения большинства объектов ландшафта существенно различаются. Однако следует отметить, что некоторые объекты, уверенно дешифрирующиеся на аэроснимках, имеют одинаковые спектры излучения. Так, например, не различаются грунтовая дорога (2) и пляж (5) (см. рис. 4а), скорее всего из-за одинакового вещественного состава (плотный песок); луг (7) и дерево на лугу (6) (см. рис. 4б). В то же время имеют место случаи, когда объекты, плохо разделяющиеся или совсем не разделяющиеся на аэроснимках, имеют существенные различия в спектрах. Это деревья у кромки берега (13) и тот же вид деревьев на лугу (6) – они различаются в видимой части спектра. Различия, по-видимому, обусловлены изменениями влагообеспеченности у кромки берега и вдали от реки, т. е. условиями жизнедеятельности. Аналогичным примером может служить водная поверхность реки (3) и пруда (старицы) (4), где спектральные различия с наибольшей вероятностью связаны с изменениями характеристик воды (содержание взвешенного вещества, водной растительности).

На рис. 5 представлены результаты обработки данных видеоспектральной аэросъемки водной поверхности. На синтезированном панхроматическом изображении выбраны три точки водной поверхности, отличающиеся тоном изображения. Для каждой вычислены спектры излучения. Различия существенны и связаны с разным количеством взвешенного вещества в воде в указанных точках, т. е. решается обратная геофизическая задача.

Укажем на некоторые особенности спектрального кадра на рис. 3 и спектров излучения на рис. 2. В первом случае хорошо видна темная горизонтальная полоса примерно на верхней четверти спектрального кадра, во втором – отчетливые минимумы вблизи $\lambda = 760$ нм. Все это соответствует линии поглощения кислорода и показывает принципиальные возможности метода для картографирования крупных скоплений различных газов естественного и антропогенного происхождения специально разработанными для этих целей видеоспектрометрами. Но для этого видеоспектральная аэросъемка должна перейти в длинноволновую область.

Как уже отмечалось выше, серии видеоспектральных изображений любых выборок из информационного параллелепипеда могут успешно обрабатываться различными методами классификации, разработанными для многоспектральных съемок, например, программами Erdas, Envi. Однако нам представляется более перспективной методика использования спектров излучения для идентификации (опознания) объектов, определения их вещественного состояния и состава.

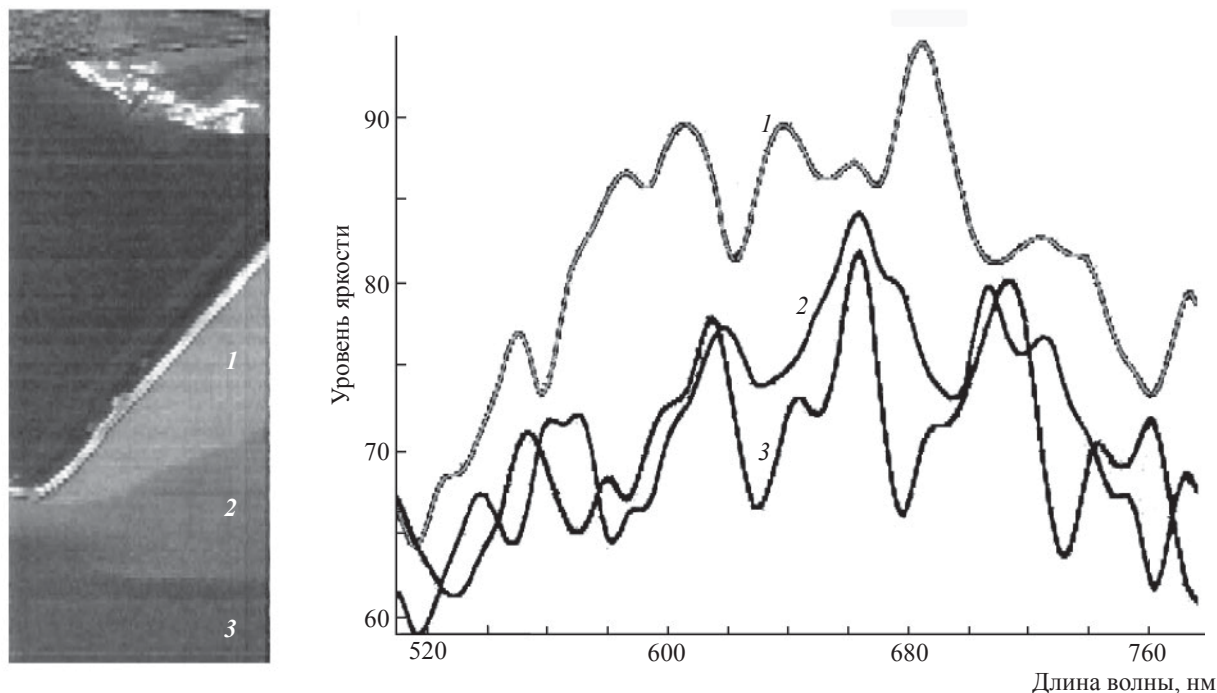


Рис. 5. Пример обработки данных видеоспектральной аэросъемки акватории. 1, 2, 3 – участки, где вычислены спектры отраженного излучения.

Для реализации этой методики могут быть рекомендованы два подхода.

- Сбор эталонных спектров (банков данных) для конкретных фоноцелевых ситуаций и использование их в дальнейшем при интерпретации данных аэросъемки.

- Решение конкретной научной или практической задачи определенной фоноцелевой обстановки с вычислением спектров объектов поиска на тест-участке и последующим проведением аэросъемки и выявлением объектов по их тест-спектру. В качестве примера можно указать задачу картографирования площадей пораженной болезнью растительности на ранних стадиях процесса, поиски полезных ископаемых в перспективном районе, военную разведку. Для космической съемки аналогичные задачи могут решаться в региональном масштабе и в режиме мониторинга.

Результаты проведенных за последние десять лет исследований показывают, что видеоспектральная съемка является принципиально новым методом дистанционного зондирования, решающим обратную задачу опознавания объекта, его вещественного состава и состояния по спектрам излучения. Это подтверждают и положительные данные работ за рубежом, где широким фронтом проводятся авиа- и даже космические видеоспектральные съемки в интересах геологии, сельского и лесного хозяйства,

экологической безопасности, создаются банки видеоспектральных данных, выпускаются различные модификации видеоспектрометров (AVIRIS, CASi, AISA, HyMap, Hyperion, ARIES и др.) [6–8]. Показаны новые возможности видеоспектральной съемки при поисках полезных ископаемых. Так, по результатам измерений в видимом – ближнем ИК диапазонах представлены примеры составления минералогических карт с выделением перспективных рудоконтролирующих зон. Используя видеоспектрометр теплового диапазона, регистрирующий различия в коэффициенте излучения, можно составить карты с перспективами на оруденение, в первую очередь сульфидное. В нефтяной геологии успешно изучаются в качестве поисковых признаков слабые спектрально-геохимические аномалии, формирующиеся над месторождениями углеводородов за счет миграции флюидов и вторичных изменений поверхностных отложений и растительного покрова. В последних это выражается в уменьшении “высоты ИК плато” (0,8–1,0 мкм), уменьшении отражения хлорофилла, сдвиге линейного участка подъема кривой спектральной яркости (0,70–0,75 мкм) в коротковолновую область – так называемый сдвиг красного края.

С изучением аналогичных изменений спектров излучения растительности связаны перспективы применения видеоспектральной аэросъемки в сель-

ском и лесном хозяйстве, экологии. Здесь регистрируются на ранних стадиях неблагоприятные изменения растений под воздействием антропогенных загрязнений почв и приземного слоя атмосферы, деятельности вредителей, недостатка влаги и т. п. В лесном хозяйстве значительно лучше, чем существующими многоспектральными методами, картографируется видовой состав и участки, пораженные заболеваниями и вредителями.

Эффективная оценка экологического состояния водоемов проводится по картам распределения хлорофилла, взвешенного вещества, продуктов разложения органики. В качестве примеров приведем видеоспектральную аэросъемку озер Финляндии с видеоспектрометром AISA, картирование распространения водорослей в прибрежной зоне морей, изучение коралловых рифов [6–8].

Ряд исследований выполнены при изучении городских агломераций. Созданы банки спектральных характеристик основных объектов городского хозяйства, показаны возможности их классификации с определением вещественного состава. Отдельно отмечаются перспективы мониторинга атмосферных загрязнений с высоким пространственным разрешением.

Для космических систем обсуждается концепция регистрации и использования полного объема информационного параллелепипеда в двух направлениях: для подстилающей поверхности (без влияния атмосферы) и для атмосферы. Для этого на борту будут получены два варианта информационного параллелепипеда: с высоким пространственным и спектральным разрешением и со средним пространственным и очень высоким спектральным разрешением. Рассматривается вариант управляемого комплекса, который может собирать информацию в нескольких узких спектральных интервалах – она позволит судить о наличии в определенном районе шлейфа конкретного загрязнителя атмосферы.

Появление видеоспектральной аэросъемки на рынке средств дистанционного зондирования ставит дополнительные проблемы обработки резко возрастающего потока информации. Так, для видеоспектрометра СПбГУ ИТМО скорость поступления данных составляет примерно 1,5 МБ/с. При увеличении спектрального и пространственного разрешения эта величина существенно возрастает. Все это открывает новые возможности обработки дистанционных данных, в том числе в рамках ГИС.

В настоящее время в РФ основной задачей видеоспектральной аэросъемки является ее практическое внедрение, что в первую очередь связано с выпуском малой серии авиационных видеоспектро-

метров. Обоснованные технические требования разработаны, и выпуск видеоспектрометров, включая и приборы космического базирования для малых космических аппаратов, вполне по силам отечественной оптической промышленности.

В заключение хотелось бы отметить и в какой-то степени предотвратить имеющиеся разночтения в терминологии, которые всегда характерны для нового развивающегося метода. Частично это уже обсуждалось в работах [4, 5]. В зарубежной литературе [8] принят термин “imaging spectrometry”, дословно переводящийся как “спектрометрия изображений, изображательная спектрометрия”. Спектральная информация может представляться и в виде монохромных изображений, однако по-русски эти формулировки звучат несколько странно, поэтому термин видеоспектральная съемка представляется оптимальным, тем более что и он, хотя и менее точно, отражает существо вопроса получения спектральной информации в виде изображения. За рубежом используется также термин “гиперспектральная аэросъемка”. При этом подразумевается получение очень большого количества узкоспектральных (гиперспектральных) изображений. По нашему мнению, этот термин подходит для данных, получаемых оптико-механическими сканерами (например, авиационные сканеры MIVIS – 125 каналов, GER 211–211 каналов). Эти приборы работают сразу во всем оптическом диапазоне 0,3–13,5 мкм и позволяют вычислять спектры, но спектральное разрешение у них хуже, чем у видеоспектрометров. Поэтому следует различать видеоспектральную съемку и гиперспектральную съемку с авиа- и космических носителей. За рубежом вместо термина “информационный параллелепипед” используется термин “гиперкуб”. Нам он представляется неточным, так как по горизонтальной координате (линии полета) он может быть сколь угодно большим. Не найдено в зарубежных публикациях [7, 8] понятие спектрального или полихроматического кадра, хотя на многочисленных рисунках “гиперкуба” он представлен его срезом. Конечно, могут иметь место и другие точки зрения, которые целесообразно обсудить на страницах “Оптического журнала”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федченко П.П., Кондратьев К.Я. Отражательная способность некоторых почв. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 231 с.
2. Чапурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. М.: Изд. МО СССР, 1986. 160 с.
3. Батян П.В., Гуд В.В., Коняхин И.А., Красавцев В.М., Чиков В.В., Груздев В.Н., Шилин Б.В. Опыт использо-

- вания видеоспектрометра ИТМО в натурных условиях // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 2002. № 2. С. 46–51.
4. Шилин Б.В., Груздев В.Н., Марков А.В., Мочалов В.Ф. Использование видеоспектральной аэро съемки для экологического мониторинга // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 12. С. 41–49.
5. Шилин Б.В., Хотяков В.В. Видеоспектральная аэро-съемка – ведущее направление дистанционного зон- дирования в оптическом диапазоне // Оптический жур- нал. 2004. Т. 71. № 3. С. 55–58.
6. Шилин Б.В., Шубина М.А. Методы дистанционного зондирования Земли // Геодезия и картография. 2000. № 9. С. 50–57.
7. Proc. of the Fifth Intern. Airborne Remote Sensing Symp. and Exhibit/ San Francisco, California, 17–20 Sept. 2001.
8. Imaging Spectrometry / Ed. F.D. van der Meer and S.M. de Long. Springer. 2006. 403 p.
-