

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ**

### ***Георгий Георгиевич Горбунов***

ОАО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», 199053, Россия, Санкт-Петербург, Кадетская линия В. О., 5, корп. 2, доктор технических наук, научный руководитель отделения, тел. (812)269-24-94, e-mail: gggorbunov@mail.ru

### ***Константин Никитич Чиков***

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, тел. (812)232-14-01, e-mail: otzi@mail.ifmo.ru

### ***Виктор Брунович Шлишевский***

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, доктор технических наук, профессор кафедры наносистем и оптоэлектроники, тел. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

Рассматриваются особенности построения и методологические возможности типичных видеоспектрометров для дистанционного зондирования с борта самолета и спутника. Эти приборы предназначены для эффективного решения геологических и экологических задач.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, самолетные и спутниковые видеоспектрометры, геологическая и экологическая интерпретация (снимков).

## **GEOLOGY AND ECOLOGY APPLICATIONS OF REMOTE SENSING IMAGING SPECTROMETER APPARATUS**

### ***George G. Gorbunov***

Federal State Unitary Enterprise Scientific and Industrial Corporation «Vavilov State Optical Institute», 199034, Russia, St. Petersburg, 12 Birzhevaya line, Doctor of Technical Science, Research Head of Department, tel. (812)269-24-94, e-mail: gorbunov@mail.ru

### ***Konstantin N. Tchikov***

ITMO University, 197101, Russia, St. Petersburg, 49 Kronverksky Ave., Associate professor, Associate professor of Department of Computer Systems Design and Security, tel. (812)305-89-47, e-mail: otzi@mail.ifmo.ru

### ***Viktor B. Shlishevsky***

Siberian State University of Geosystems and Technology, 630108, Russia, Novosibirsk, 10 Plakhotnogo St., Doctor of Technical Science, Professor of Nanosystems and optical devices department, tel. (383)343-91-11, e-mail: kaf.nio@ssga.ru

The features of the construction and methodological capacities airborne and satellite typical imaging spectrometers for remote sensing are considered. These devices are intended for efficient decision of the multiple geological and ecological problems.

**Key words:** remote sensing, airborne and satellite imaging spectrometers, geologic and ecological interpretation.

Современная тенденция к организации глобального спектрозонального мониторинга, направленного на обнаружение и изучение природных и антропогенных образований, базируется на приборном обеспечении, позволяющем оперативно решать задачи их поиска и ситуационного анализа на обширных территориях. Выполнению поставленных задач в полной мере отвечают спектральные дистанционные методы и средства, применение которых при исследовании естественных и искусственных объектов не искажает поля измеряемых характеристик, в частности, спектральных коэффициентов яркости (СКЯ), что повышает достоверность получаемой информации. В настоящее время одной из наиболее перспективных реализаций таких средств и методов считаются видеоспектрометры (imaging spectrometers) [1, 2]. Как правило, эти приборы устанавливаются на борту авиационных и космических носителей.

Классические спектральные приборы при аэро- и космических наблюдениях обычно регистрируют лишь усредненные по приборному полю зрения СКЯ земной поверхности, которые могут существенно отличаться от данных, полученных при измерениях на местности. Результаты же видеоспектрометрической съемки практически неотличимы от данных наземных измерений СКЯ не только для каждого малого объекта на местности, но и для его элементов или фрагментов, в том числе, находящихся на пределе пространственного разрешения. Иначе говоря, видеоспектрометры способны поэлементно опознавать тонкие тоновые оттенки смежных предельно близких по «цвету» объектов во многих (более 100) спектральных интервалах, сочетая при этом высокое пространственное и спектральное разрешение [3].

Схемной основой большинства видеоспектрометрической аппаратуры служит дисперсионный полихроматор, включающий входную щель, коллиматорный и камерный объективы, диспергирующий элемент и размещенный в выходной фокальной плоскости (плоскости спектра) матричный приемник излучения, ориентированный своими строками строго параллельно входной щели. В качестве диспергирующего элемента могут использоваться спектральные призмы или дифракционные решетки, что позволяет условно разделить подобные видеоспектрометры на призмные и дифракционные. В обоих типах приборов входной проецирующий объектив (аналог аэрофотообъектива) строит изображение исследуемой местности в неразложенном свете в плоскости входной щели полихроматора (см. рис.). Тогда на выходе полихроматора формируется континуум монохроматических изображений щели, представляющий собой многополосный спектральный кадр, каждая монохроматическая (или, точнее, квазимонохроматическая) полоса которого совпадает со строкой фотоприемника. Особенностью такой компоновки является статическое состояние всех конструктивных элементов, т. е. у работающего прибора отсутствует какое-либо механическое движение кинематических цепей и пар (оптико-механическое сканирование), что является существенным преимуществом аппаратуры данного класса по сравнению, например, с гиперспектральными сканерными системами [4].

Так как входная щель полихроматора посредством входного объектива оптически сопрягается с земной поверхностью, то ее длина определяет протяженность полосы обзора, а ширина – геометрическую и спектральную разрешающие способности видеоспектрометра на местности.

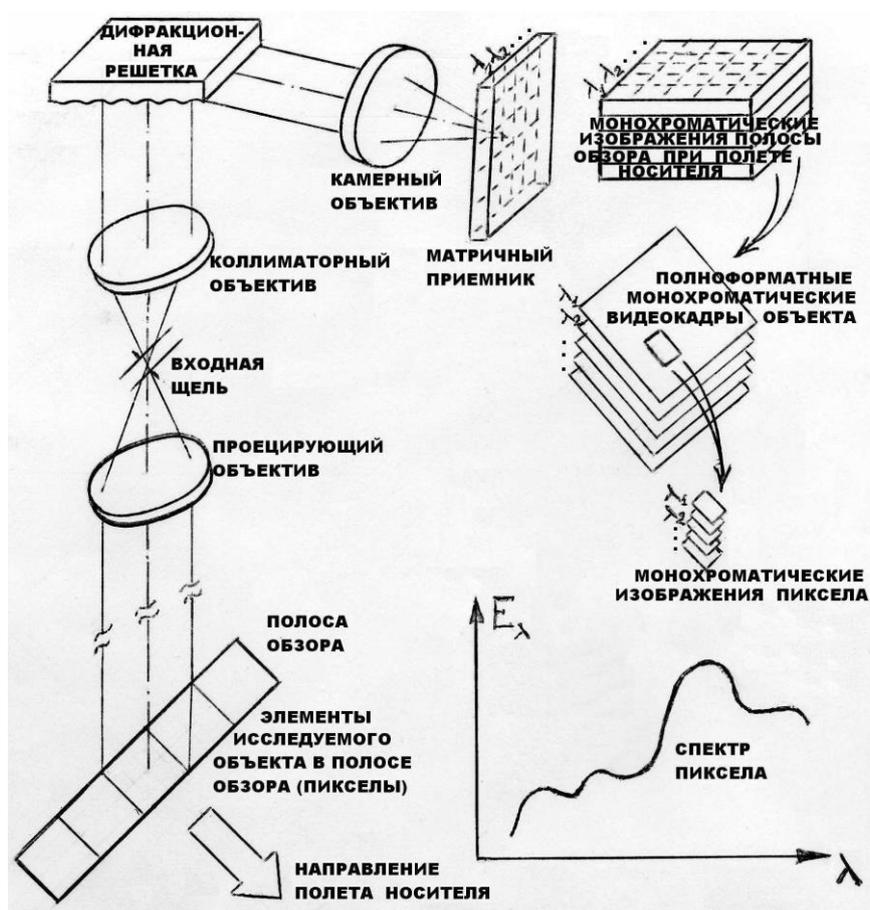


Рис. Принцип действия дифракционного видеоспектрометра

В процессе измерений проекция щели на местность, ортогональная направлению полета, перемещается шаг за шагом по земной поверхности, что приводит к обновлению изображений в монохроматических строках. Это позволяет сформировать в запоминающем устройстве, входящем в состав бортовой видеоспектрометрической аппаратуры, полноформатные монохроматические видеокадры для каждой отдельной рабочей длины волны из складываемых монохроматических строк (или, другими словами, из «одноцветных» строк, последовательно соединяемых «бок о бок»), согласно «пошаговому» движению носителя. Поскольку каждая отдельная строка фактически регистрирует детализируемое монохроматическое изображение узкой полосы земной поверхности, сопряженной с входной щелью полихроматора, то, сколько таких строк имеет фотоприемник, столько, в принципе, можно зарегистрировать монохроматических узкополосных изображений участка местности, над которой пролетает носитель.

В последнее время стали также интенсивно развиваться и применяться интерференционные видеоспектрометры, основанные на методе фурье-спектрометрии, позволяющем значительно расширить регистрируемый спектральный диапазон, улучшить пороговую чувствительность, а в некоторых случаях – упростить прибор и уменьшить его массогабаритные характеристики [5–8].

В полной мере позитивные свойства бортовой видеоспектрометрической аппаратуры, как нового эффективного инструмента познания, раскрываются при выполнении природно-ресурсных и экологических изысканий, когда требуется получить высококачественные монохроматические аэрокосмические изображения поверхности Земли [9], что способствует правильной постановке поисковых работ.

Так, одними из важных элементов структуры земной коры, выявляемых видеоспектрометрами со спутниковых и подспутниковых высот, являются разломы, по которым отдельные крупные блоки горных пород или целые горные массивы смещались в прошлые геологические эпохи друг относительно друга в вертикальном или горизонтальном направлениях. Разломы, разные как по характеру движения (сдвиги, сбросы, надвиги), так и по времени своего образования, а также по глубине проникновения в земную кору, хорошо выделяются и визуализируются в видеоспектральных изображениях даже в тех случаях, когда при наземных исследованиях обнаружение их затруднено. Особую ценность получаемой информации придает то обстоятельство, что многие разломы служили путями подъема с больших глубин горячих рудоносных вод, которые, приближаясь к поверхности и остывая, формировали, в частности, так называемые гидротермальные месторождения вольфрама, молибдена, ртути и некоторых других металлов. Нефть и газ легче воды, двигавшейся по разломам, и поэтому на глубине они чаще всего скапливаются в куполообразных или удлиненных (антиклинальных) поднятиях слоев, служащих коллекторами углеводородов. Такие куполовидные поднятия также легко обнаруживаются в аэрокосмических изображениях, получаемых с помощью видеоспектрометров. Зная, что месторождение попадает в зону разлома или конкретно – в зону куполовидного поднятия, отчетливо видимого в видеоспектральном изображении, целесообразно организовывать (вести) поисковые работы не по всему прилегающему району, а только узким фронтом вдоль протяженной зоны разлома, что приводит к значительной экономии сил, средств и времени.

При выполнении экологических исследований бортовые видеоспектрометры в последние десятилетия успешно применяются в ходе решения региональных и локальных задач [10, 11], причем во многих случаях информационный вклад аэрокосмических данных оказывается неопределимым. В особенности, это относится к антропогенным бедствиям (авариям на нефтепроводах и нефтедобывающих морских платформах, прорывам подводных газопроводов, «залповым» выбросам загрязнений и т. д.), когда необходимо получение в реальном масштабе времени оперативной информации о процессах, происходящих нередко в труднодоступных местах и районах.

Большое значение для решения экологических задач первостепенной важности [12, 13] приобретает разработка и совершенствование видеоспектрометрической аппаратуры с целью улучшения ее пространственного разрешения. Это связано с высокой эффективностью применения видеоспектрометров в случае, когда, например, необходим анализ загрязняющих веществ, попадающих в атмосферу с дымовыми газами тепловых электростанций (ТЭС), теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) и других аналогичных источников. Выбрасываемые в атмосферу вредные вещества при этом можно условно классифицировать на две группы. К первой относятся вещества, количество которых определяется, в основном, составом топлива (оксиды серы, летучая зола, токсичные примеси, содержащиеся в золе, соединения ванадия). Во вторую группу входят вещества, образование которых в значительной мере зависит от технологии, в том числе, от режимов сжигания топлива (оксиды азота и углерода, канцерогенные вещества). Выявление с помощью видеоспектрометрической аппаратуры источников таких выбросов и внедрение средств, контролирующих вредные вещества, особенно второй группы, позволяет достигнуть оптимальности режимов сжигания топлива, что приводит к его экономии при одновременном снижении вредных выбросов в атмосферу.

Повышенное внимание экологов привлечено и к анализу загрязнения атмосферы долгоживущими радиоактивными продуктами, образующимися при работе предприятий атомной промышленности и атомных электростанций (АЭС), что требует глобального мониторинга концентрации радиоактивных изотопов в атмосфере, например, инертного газа криптона. Дистанционное выявление выбросов вредных веществ конкретными трубами ТЭС, ТЭЦ и АЭС обеспечивается только с помощью видеоспектрометров, потому что классические спектральные методы и средства обычно интегрируют по полю зрения картину подстилающей поверхности, сведя к нулю пространственное разрешение на ней, что делает абсолютно невозможной привязку выполненного спектрального анализа к конкретному источнику загрязнений.

В настоящее время наметилась определенная тенденция к объединению видеоспектрометрической аппаратуры с искусственным интеллектом, способным опознавать и идентифицировать исследуемые объекты. Необходимость такого объединения можно проиллюстрировать на следующих примерах.

Было замечено, что повышенное содержание некоторых металлов в почве, например меди или молибдена, по-разному меняет оттенки естественной окраски лесной растительности, надежно распознаваемые видеоспектрометрическими методами и средствами. Другим примером могут служить месторождения алмазов, отождествляемые с кимберлитовыми трубками. Любая такая трубка резко отлична по химическому составу от окружающих ее осадочных отложений. В ней много магния, но полностью отсутствуют необходимые растениям калий и фосфор. Поэтому на кимберлитовых трубках лесная растительность изменяет свой «цветовой облик», что можно увидеть на видеоспектрометрических полноформатных изображениях. Подобные обстоятельства положили начало новому направлению в геологии – геоботанике. Как показала практика

последних десятилетий, надежная дешифровка и идентификация геологических пород и месторождений по растительному покрову не представляет чрезмерной трудности для современных систем искусственного интеллекта, способных к самообучению при обработке больших информационных объемов видеоспектрометрических изображений.

Опыт использования видеоспектрометрической аппаратуры в современных условиях приводит к выводу, что разрабатываемые в последние годы наукоемкие автоматизированные геоинформационные системы целесообразно базировать на новой технологии, интегрирующей итоговую видеоспектрометрическую и компьютерную картографию с системами управления базами данных. Органичное слияние этих двух перспективных направлений дает основание прогнозировать создание многослойных электронных видеоспектрометрических карт, опорный слой которых описывает базовое состояние природных и антропогенных объектов, а каждый из последующих слоев выявляет один из частных аспектов или процессов, интересующих потребителя при получении оперативной экологической, гидрометеорологической и природно-ресурсной информации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van der Meer F. D, De Jong S. M. *Imaging Spectrometry. Basic Principles and Prospective Applications*. – New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 403 p.
2. Шилин Б. В., Хотяков В. В. Видеоспектральная аэросъемка – ведущее направление дистанционного зондирования в оптическом диапазоне // *Оптический журнал*. – 2004. – Т. 71, № 3. – С. 55–58.
3. Красавцев В. М., Семенов А. Н., Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометры – новая перспективная аппаратура для дистанционных исследований // *ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 89–94.
4. Петров С. Б., Смирнов А. П. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды // *Оптический журнал*. – 2000. – Т. 67, № 5. – С. 82–93.
5. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. О возможности построения гиперспектральной аппаратуры на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения скрытых объектов в полевых условиях // *ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4, ч. 1. – С. 74–79.
6. Афонин А. В., Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Видеоспектрометрическая аппаратура на основе метода фурье-спектрометрии для обнаружения малых газовых примесей в атмосфере // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – Т. 21, № 9. – С. 823–826.
7. Горбунов Г. Г., Шлишевский В. Б. Статический фурье-спектрометр как основной элемент построения современного гиперспектрального видеоспектрометра // *ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 20–24 апреля 2009 г.)*. – Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 4, ч. 1. – С. 87–88.
8. Горбунов Г. Г. Многоспектральная и гиперспектральная аппаратура, мировой уровень, состояние вопроса в России // *Оптический вестник*. – 2011. – № 132. – С. 5–6.
9. Чиков К. Н., Гуд В. В., Красавцев В. М. Бортовой видеоспектральный комплекс для целей геолого- и экологического картирования // *Научные исследования высшей школы по*

экологии и рациональному природопользованию. Сб. статей. СПб.: Санкт-Петербургский горный институт, 2000. – С. 173–175.

10. Чиков К. Н., Гуд В. В., Красавцев В. М., Сандаков А. Н. Видеоспектрометры для экологического мониторинга // Известия вузов. Приборостроение. – 1998. – Т. 41, № 3. – С. 5–10.

11. Шилин Б. В., Груздев В. Н., Марков А. В., Мочалов В. Н. Использование видеоспектральной аэросъемки для экологического мониторинга // Оптический журнал. – 2001. – Т. 68, № 12. – С. 41–49.

12. Красавцев В. М., Семенов А. Н., Чиков К. Н., Шлишевский В. Б. Некоторые особенности расчета и проектирования перспективных видеоспектральных систем для дистанционного зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21, № 2. – С. 164–169.

13. 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. – С. 112–117.

© Г. Г. Горбунов, К. Н. Чиков, В. Б. Шлишевский, 2015