

## Сравнение авиационных видеоспектрометров с различными типами полихроматоров

О. В. Григорьева<sup>1</sup>, В. Н. Груздев<sup>2</sup>, А. Ю. Кузнецов<sup>3</sup>,  
Л. И. Чапурский<sup>1</sup>, Б. В. Шилин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, 197198, Россия  
E-mail: alenka12003@mail.ru

<sup>2</sup> Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН  
Санкт-Петербург, 197110, Россия  
E-mail: bshilin@rambler.ru

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики  
Санкт-Петербург, 197101, Россия  
E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com

Большинство разрабатываемых в РФ видеоспектрометров видимого-ближнего ИК-диапазона 0,4–1,0 мкм построены по схеме с полихроматором на призме, что, в отличие от полихроматоров на дифракционной решётке с постоянным спектральным разрешением, даёт переменное спектральное разрешение от 1,5 нм в фиолетовой части спектра до 10 нм в ближнем ИК-диапазоне. Красный-ближний ИК-участок спектра 0,6–1,0 мкм является важнейшим для диагностики и дифференциации растительности по положению и крутизне «красного края» вблизи 700 нм и высоте «ИК-плато» 700–900 нм, поэтому ухудшение детальности спектральных кривых и увеличение «спектральной ширины» монохромных изображений в диапазоне 600–900 нм в приборах на призме может ограничить возможности решения прикладных тематических задач. Это подтверждается экспериментальным сравнением в лётных исследованиях на самолёте Ан-30 видеоспектрометров СПБУИТМО (с дифракционной решёткой) и ЗАО «Лептон» (с призмой).

**Ключевые слова:** видеоспектрометр, полихроматор, спектры отражения

Одобрена к печати: 10.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-143-149

### Постановка задачи

В настоящее время одним из основных направлений развития дистанционных аэрокосмических средств оптического диапазона является видеоспектральная (гиперспектральная) съёмка, позволяющая регистрировать уходящее излучение объектов земной поверхности с высоким пространственным и спектральным разрешением. За рубежом видеоспектрометры активно разрабатываются с начала 80-х гг. прошлого века, и сейчас известно более сорока модификаций только для авианосителей. Для видимого-ближнего ИК-диапазона 0,4–1,0 мкм известны приборы с полихроматорами на призме и дифракционной решётке.

Область длин волн, в которых могут применяться призмы, ограничивается диапазоном прозрачности материала призмы. Для охвата широкой области спектра необходимы несколько сменных призм, тогда как одна решётка в спектрах различных порядков может использоваться в широком диапазоне длин волн.

Угловая дисперсия призм значительно меняется с длиной волны, резко возрастая при приближении к коротковолновой или длинноволновой границе поглощения материала. Для решётки эта характеристика мало меняется с длиной волны, что позволяет упростить интерпретацию измеренных данных. Угловая дисперсия решётки даже в первом порядке в несколько раз больше, чем у призмы (за исключением коротковолновой УФ-области, где угловая дисперсия кварцевой призмы существенно больше). Поэтому у приборов с решёткой могут использоваться короткофокусные коллиматорный и камерный объективы, что

позволяет минимизировать габариты устройства. Для конкретного диспергирующего элемента его разрешающая способность пропорциональна угловой дисперсии, поэтому приборы с решёткой обладают более высоким спектральным разрешением. Эффективность дифракционной решётки не зависит от её размеров, тогда как поглощение в призме возрастает с её размерами по экспоненте. Трудности в производстве призм больших размеров обусловлены сложностью изготовления крупных блоков прозрачного и оптически однородного материала. Дифракционные решётки можно изготавливать с размерами заштрихованной части до  $300 \times 300$  мм. Использование вогнутых решёток с криволинейными штрихами (нарезных и голографических) позволяет минимизировать число оптических элементов, что обуславливает большую светосилу полихроматоров.

Однако, несмотря на ряд преимуществ решёток по сравнению с призмами, они обладают и серьёзными недостатками. Призма даёт только один спектр, решётка — много налагающихся друг на друга спектров различных порядков: так называемое переналожение порядков. Для устранения этого недостатка необходимо применение светофильтров или дополнительных диспергирующих элементов. В области прозрачности призмы пропускание меняется незначительно, тогда как у решётки её эффективность в пределах одного порядка может меняться более чем вдвое. Для приборов космического базирования призмённые диспергирующие элементы способны менять своё пропускание за счёт воздействия жёсткого коротковолнового излучения, что может привести к значительным искажениям результатов.

Таким образом, применение того или иного типа диспергирующего элемента должно обуславливаться назначением прибора, задачами, которые он решает, и базированием. Как показывает опыт различных изготовителей (Шилин и др., 2013), предпочтение отдаётся приборам с дифракционной решёткой.

В нашей стране активный интерес к этим приборам проявился в последнее десятилетие, о чём, в частности, свидетельствуют материалы конференции «Гиперспектральные приборы и технологии», проводившейся на базе Красногорского завода им. С. А. Зверева 17–18 января 2013 г. Однако большинство разрабатываемых в РФ приборов видимого-ближнего ИК-диапазона  $0,4\text{--}1,0$  мкм, в том числе космического базирования, построены по схеме с полихроматором на призме. Известны только два действующих образца видеоспектрометров на дифракционной решётке Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики (Алексеев и др., 2013). Для устранения влияния наложения дифракционных порядков проведены теоретические расчёты значений сигналов с учётом конструктивных особенностей видеоспектрометра «Фрегат». Расчёты подтверждены экспериментом (Кузнецов, 2015). При установке в видеоспектрометр линзы из двух полулинз, пропускающих свет в диапазоне  $200\text{--}500$  нм, получены результаты, доказывающие регистрацию матрицей длин волн первого порядка.

С точки зрения конечного пользователя особенность приборов на призме — переменное спектральное разрешение от около  $1,0$  нм в синефиолетовой части спектра до  $10$  нм в ближнем ИК-диапазоне — является принципиальным недостатком и не компенсируется достоинствами призмённых приборов. Красный-ближний ИК-участок спектра ( $0,6\text{--}1,0$  мкм) является важнейшим для диагностики и дифференциации растительности по положению и крутизне «красного края» вблизи  $700$  нм и высоте «ИК-плато»  $700\text{--}900$  нм (Шилин, Груздев, 2016; Imaging..., 2006). Поэтому целесообразно экспериментально выяснить, насколько уменьшается «детальность» спектральных кривых в этом диапазоне.

С этой целью была выполнена видеоспектральная аэросъёмка одновременно двумя приборами: видеоспектрометрами «Фрегат» СПбУИТМО (на дифракционной решётке с постоянным разрешением по спектру) и ЗАО «Лептон» (на призме), установленными на самолёте Ан-30. Проведена также наземная полевая видеоспектральная съёмка.

## Результаты экспериментов

Как известно из работ (Алексеев и др., 2013; Шилин, Груздев, 2016), результаты видеоспектральной съёмки (полевой, авиационной, космической) регистрируются в форме информационного параллелепипеда (гиперкуба). Специальные программы обработки информационного параллелепипеда позволяют построить серии (до нескольких сотен) монохромных узкоспектральных (видеоспектральных) изображений, спектры отражения и коэффициенты спектральной яркости любого пикселя изображения, соответствующего мгновенному полю зрения прибора. Сравнимые здесь устройства имеют сопоставимые характеристики (*таблица*) по полю обзора и мгновенному полю зрения; у видеоспектрометра «Лептон» они меньше, что обеспечивает этому прибору более высокое визуальное качество изображений.

Сравнительные характеристики видеоспектрометров «Лептон» и «Фрегат»

| Параметр                    | «Фрегат»    | «Лептон»      |
|-----------------------------|-------------|---------------|
| Спектральный диапазон       | 400–1000 нм | 390–1001,4 нм |
| Спектральное разрешение     | 4 нм        | 0,35–12,7 нм  |
| Угол обзора                 | 28,2°       | 16°           |
| Мгновенный угол поля зрения | 1,0 мрад    | 0,6 мрад      |

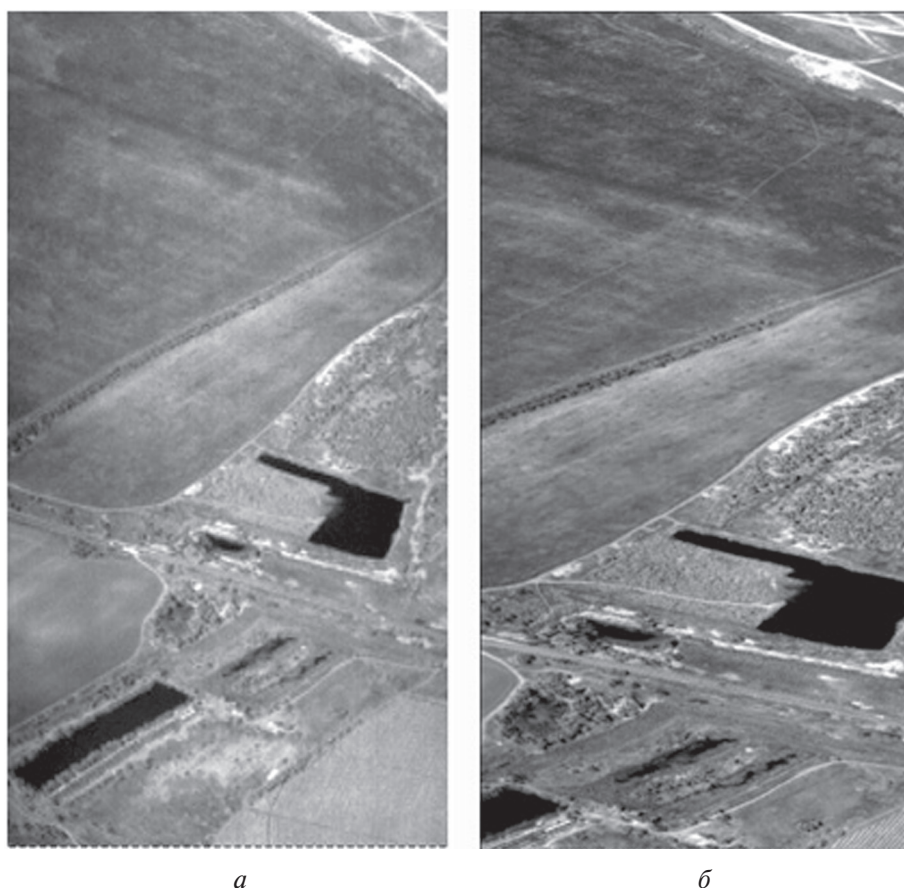


Рис. 1. Два монохромных видеоспектральных аэроснимка, полученные видеоспектрометрами «Фрегат» (а) и «Лептон» (б); юг РФ, июнь

На рис. 1 приведены монохромные видеоспектральные аэроснимки, полученные двумя приборами для длины волны 720 нм. Эта длина волны находится в пределах «инфракрасного плато», и на изображениях хорошо видна известная инверсия спектральных контра-

стов — растительность ярче (светлее) почвенного покрова. Отметим, что за счёт меньшего поля обзора и мгновенного угла поля зрения аэроснимок видеоспектрометра «Лептон» имеет лучшее геометрическое разрешение. Несколько различаются и контрасты ряда объектов, по-видимому, за счёт более широкого спектрального интервала монохромного аэроснимка прибора «Лептон».

На рис. 2 и 3 представлены спектральные плотности энергетической яркости различных объектов ландшафта на аэроснимках рис. 1. Для пашни (см. рис. 2) в видимом диапазоне спектральные кривые у двух приборов повторяют друг друга. Исключение составляет коротковолновый «хвост», сильно изрезанный у видеоспектрометра «Лептон» из-за его очень высокого спектрального разрешения в этой зоне. От 700 нм у «Фрегата» наблюдаются дополнительные перегибы кривой вблизи длин волн 730 и 750 нм; дополнительные перегибы отмечаются и в интервале 780–850 нм.

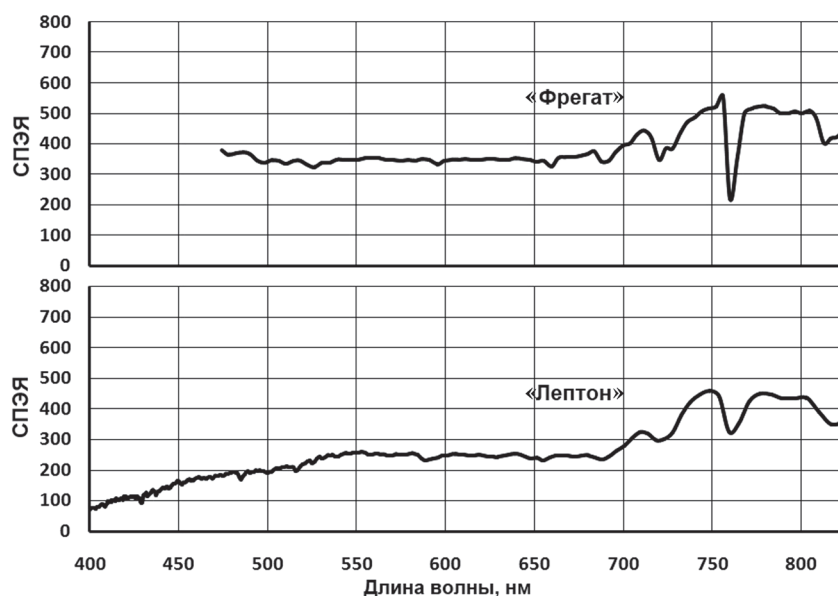


Рис. 2. Спектры отражения пашни на рис. 1, полученные видеоспектрометрами «Лептон» и «Фрегат»

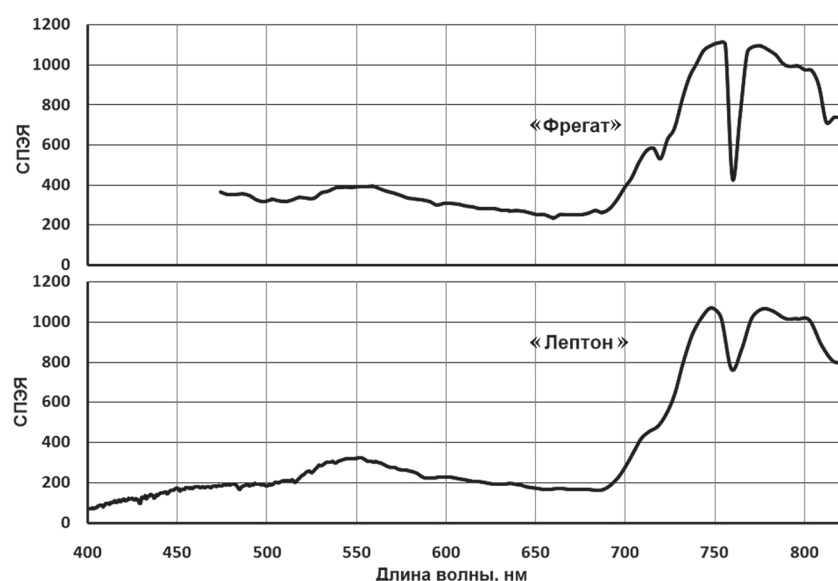


Рис. 3. Спектры отражения древесной растительности на рис. 1, полученные видеоспектрометрами «Лептон» и «Фрегат»

Аналогичные характерные особенности отмечаются для растительности: дополнительные экстремумы и перегибы в интервале длин волн 650–850 нм (см. *рис. 3*). Например, минимум в области 730 нм соответствует полосе поглощения растительного пигмента — фитохрома, а значение яркости вблизи длины волны 750 нм используется для расчёта индекса PSRI, отражающего общее количество «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы, который присутствует в больших количествах в древесине и мёртвых или сухих растительных тканях.

Все эти мелкие детали — локальные минимумы, максимумы, перегибы — могут иметь важное индикационное значение при тематических работах, отражая особенности вещественного состава почв и растений, а для последних — также их физиологическое состояние (Imaging..., 2006).

Подтверждением результатов авиационных экспериментов могут служить материалы полевых наземных наблюдений (*рис. 4*), проведённых видеоспектрометрами «Фрегат» и «Лептон» и спектрометрией ASD HandHeld 2 Pro для травяного газона. Дополнительные перегибы кривых спектров отражения для видеоспектрометра «Фрегат», по сравнению с видеоспектрометром «Лептон», отмечаются вблизи длин волн 730, 750, 775, 800 и 820 нм. Практически идентичны результаты сравнения спектров отражения видеоспектрометров и спектрометра ASD HandHeld 2 Pro.

Аналогичные материалы получены авторами по результатам большого объёма полевых и авиационных исследований, что подтверждает значимость выводов. Из них главный — предпочтительность изготовления и широкого применения видеоспектрометров на дифракционной решётке.

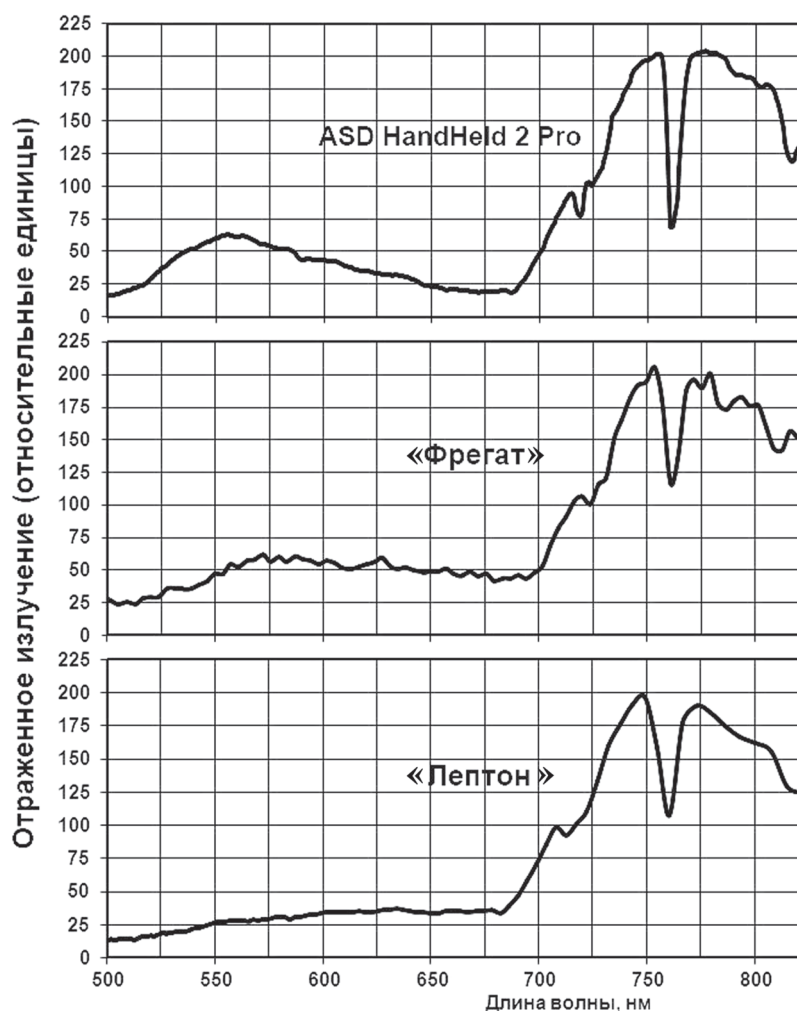


Рис. 4. Спектры отражения газона, полученные видеоспектрометрами «Лептон», «Фрегат» и спектрометрией ASD HandHeld 2 Pro



## Заключение

1. Выполнены оригинальные исследования по экспериментальному сравнению различного типа видеоспектрометров с одного летательного аппарата.
2. Показано, что для изучения и картографирования растительности предпочтительнее использование видеоспектрометров с полихроматором на дифракционной решётке.

Работы проводятся при поддержке РФФИ (проект 16-29-09499).

## Литература

1. *Алексеев А. А., Груздев В. Н., Шилин Б. В., Красавцев В. М., Чиков К. Н.* Лётные испытания видеоспектрометра с полихроматором на дифракционной решётке // Электрон. научно-техн. журн. «Контенант». 2013. Т. 12. № 1. С. 29–35.
2. *Кузнецов А. Ю.* Проблемы создания отечественных видеоспектрометров на примере гиперспектрального комплекса «Фрегат» // Научное обозрение. 2015. № 2. С. 118–123.
3. *Шилин Б. В., Груздев В. Н.* Лётные и полевые исследования видеоспектрометра для малого космического аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 224–232.
4. *Шилин Б. В., Груздев В. Н., Алексеев А. А.* Видеоспектральные исследования за рубежом // Электрон. научно-техн. журн. «Контенант». 2013. Т. 12. № 1. С. 15–20.
5. *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications / Ed. F. D. van der Meer, S. M. de Long.* Springer, 2006. 403 p.

## Comparison of aircraft imaging spectrometers with different types of polychromators

**O. V. Grigorieva<sup>1</sup>, V. N. Gruzdev<sup>2</sup>, A. Yu. Kouznetsov<sup>3</sup>, L. I. Chapursky<sup>1</sup>, B. V. Shilin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg 197198, Russia  
E-mail: alenka12003@mail.ru*

<sup>2</sup> *Scientific-Research Centre for Ecological Safety RAS, Saint Petersburg 197110, Russia  
E-mail: bshilin@rambler.ru*

<sup>3</sup> *Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,  
Mechanics and Optics, Saint Petersburg 197101, Russia  
E-mail: al.ur.kouznetsov@gmail.com*

Most of the visible-near infrared spectrometers developed in the Russian Federation are constructed with a polychromator based on the prism. This type gives an alternating spectral resolution from 1.5 nm in the violet to 10 nm in the near-IR range. Another type of imaging spectrometers uses polychromators with a diffraction grating which provide a constant spectral resolution. The red-close IR region of the spectrum of 600–1000 nm is the most important for the diagnosis and differentiation of vegetation by the position and steepness of the “red edge” near 700 nm and the height of the “IR plateau” 700–900 nm. Most of the visible-near infrared spectrometers developed in the Russian Federation are constructed with a polychromator based on the prism. This type gives an alternating spectral resolution from 1.5 nm in the violet to 10 nm in the near-IR range. Another type of imaging spectrometers uses polychromators with a diffraction grating which provide a constant spectral resolution. The red-close IR region of the spectrum of 600–1000 nm is the most important for the diagnosis and differentiation of vegetation by the position and steepness of the “red edge” near 700 nm and the height of the “IR plateau” 700–900 nm. This is confirmed by an experimental comparison in flight studies by aircraft An-30. Both devices of imaging spectrometers — “Fregat” (with a diffraction grating) and “Lepton” (with a prism) were installed on board simultaneously.

**Keywords:** video spectrometer, polychromator, reflection spectra

Accepted: 10.01.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-143-149

## References

1. Alekseev A. A., Gruzdev V. N., Shilin B. V., Krasavtsev V. M., Chikov K. N., Letnye ispytaniya videospetrometra s polikhromatorom na difraktsionnoi reshetke (On-board research of the imaging spectrometer based on polychromator with diffraction grating), *Elektronnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal "Kontenant"*, 2013, Vol. 12, No. 1, pp. 29–35.
2. Kuznetsov A. Yu., Problemy sozdaniya otechestvennykh videospetrometrov na primere giperspektral'nogo kompleksa "Fregat" (Problems of creating domestic video spectrometers on the example of the hyperspectral complex "Fregat"), *Nauchnoe obozrenie*, Moscow, 2015, No. 2, pp. 118–123.
3. Shilin B. V., Gruzdev V. N., Letnye i polevye issledovaniya videospetrometra dlya malogo kosmicheskogo apparata (Flight and field research of the imaging spectrometer for a small space vehicle), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 224–232.
4. Shilin B. V., Gruzdev V. N., Alekseev A. A., Videospektral'nye issledovaniya za rubezhom (Foreign research based on using of the imaging spectrometer), *Elektronnyi nauchno-tekhnicheskii zhurnal "Kontenant"*, 2013, Vol. 12, No. 1, pp. 15–20.
5. *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*, F. D. van der Meer, S. M. de Long (eds.), US, Springer, 2006, 403 p.