

УДК 28.835.042.3

Бортовой узкоугольный гиперспектрометр, работающий в режиме перенацеливания

© 2019 г. **А. Н. Виноградов***, канд. физ.-мат. наук; **В. В. Егоров****, канд. техн. наук;
А. П. Калинин***, доктор физ.-мат. наук, **А. И. Родионов******, канд. физ.-мат. наук;
И. Д. Родионов****, доктор физ.-мат. наук;
И. П. Родионова****, канд. физ.-мат. наук

*Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр «Реагент», Москва

**Институт космических исследований РАН, Москва

***Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

****Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

E-mail: victor_egorov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-02-62-67

Описывается узкоугольный гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона (430–900 нм), предназначенный как для детального авиационного мониторинга объектов земной поверхности, так и проведения наземных исследований. Его угловое поле зрения составляет четыре градуса. Работа сенсора предусматривает проведение предварительного обнаружения малоразмерного объекта другим сенсором с большим угловым полем зрения с последующим наведением узкоугольного гиперспектрометра на этот объект и его детальным анализом. Наземные натурные испытания подтвердили работоспособность гиперспектрометра в части получения изображений объектов с высоким пространственным разрешением.

Ключевые слова: гиперспектрометр, сенсор, спектральный диапазон, изображение, мониторинг, разрешение, наведение.

Коды OCIS: 280.0280, 110.4234.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и за рубежом всё больший интерес проявляется к разработке и практическому использованию гиперспектрометров видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазона (400–1000 нм) [1]. Особое внимание уделяется гиперспектрометрам, обладающим узким мгновенным угловым полем зрения, что при их высоком пространственном разрешении позволяет успешно идентифицировать малоразмерные объекты, а также определять тип зондируемых природных и антропогенных образований. Анализ литературных источников показывает, что разработки авиационных приборов с полем зрения в единицы градусов за рубежом находят всё большее развитие [2]. В России разработки бортовых гиперспектрометров с различным по величине угловым полем зрения проводились в ЗАО «НТЦ «Реагент». В частности, был создан гиперспектрометр [3], предназначенный для дистанционного зондирова-

ния (ДЗ) земной поверхности с авиационных носителей. Он имеет относительно небольшой угол зрения (12°), однако, как показывает практика, этого недостаточно для надёжной идентификации различных земных объектов, особенно малоразмерных.

Для решения проблемы получения детальных изображений малоразмерных объектов в ЗАО «НТЦ «Реагент» был разработан бортовой сенсор, обладающий мгновенным угловым полем зрения в 4°, получивший название узкоугольного гиперспектрометра (УГС). Следует отметить, что для обеспечения оперативности и эффективности работы УГС необходимо сопровождать его работу информацией об обнаружении и координатах малоразмерных объектов или о пространственном положении участков зондируемой поверхности, подлежащих детальному изучению. Эта информация используется для наведения оптической оси УГС на изучаемый объект с помощью специального

устройства наведения (УН). В этом случае УГС должен работать совместно с широкоугольным сенсором (ШУС), который может обладать невысоким пространственным разрешением.

Целью данной работы является описание принципов функционирования узкоугольного гиперспектрметра видимого и ближнего ИК диапазона, его конструкции, устройства наведения, а также результатов лабораторных и натурных испытаний.

КОНСТРУКЦИЯ УЗКОУГОЛЬНОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА И ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Гиперспектрметр, разработанный в ЗАО «Научно-технический центр «Реагент», предназначен для формирования изображений видимого и ближнего ИК диапазона (430–900 нм) узкой поперечной полосой области обзора в режиме авиационной съёмки, а также в наземных условиях с использованием поворотного устройства. Прибор работает по схеме push broom, т.е. изображение формируется узкой щелью в диафрагменном узле посредством перемещения прибора летательным аппаратом.

Гиперспектрметр, оптическая система которого приведена на рис. 1, содержит входной объектив 1, диафрагменный узел 2, коллиматор 3, дифракционную решётку 4, выходной объектив 5, фотоприёмное устройство (фотоприёмная матрица) 6 и отклоняющие зеркала 7. Такой вариант оптической схемы был выбран для уменьшения габаритов сенсора.

В ходе модельных экспериментов с помощью программы Zemax были выполнены расчёты координат хода лучей в гиперспектрметре и пятен рассеяния точки в плоскости фотоприёмной матрицы

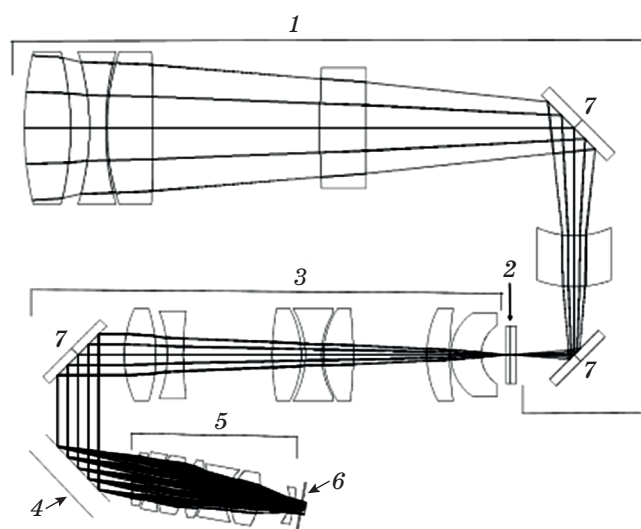


Рис. 1. Оптическая схема узкоугольного гиперспектрметра.

на предмет оценки его потенциальной пространственной разрешающей способности. Результаты расчётов показывают, что размеры пятен рассеяния зависят от длины волны спектрального канала гиперспектрметра, а также от угла визирования элемента поверхности. Указанные вариации размеров пятен отображены в табл. 1.

Из табл. 1 следует, что средний геометрический размер пятна равен примерно 7 мкм, что при эффективном фокусном расстоянии объектива гиперспектрметра в 138 мм будет соответствовать размеру пиксела на земной поверхности, равном 0,05 м, с высоты 1 км.

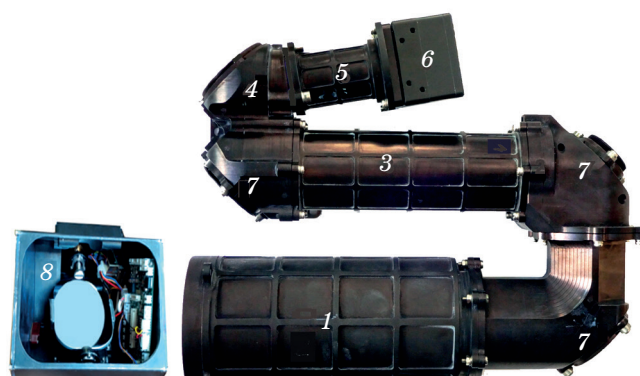


Рис. 2. Внешний вид узкоугольного гиперспектрметра с устройством наведения 8.

Таблица 1. Геометрический размер пятен рассеяния

Угол визирования, град.	Длина волны, нм				
	430	520	640	820	900
	Геометрический размер пятен рассеяния, мкм				
0	4,6	7,1	3,7	10,0	4,2
1,112	4,1	8,5	2,2	7,3	4,3
1,375	4,9	10,0	2,2	6,8	6,1
1,227	8,3	11,9	5,2	10,0	8,0
1,75	11,9	13,1	3,8	6,6	7,2

Таблица 2. Тактико-технические характеристики гиперспектрметра

Наименование параметра	Значение
Спектральный диапазон, нм	430–900
Угол поля зрения, град	4
Ширина спектральных каналов, нм	1,5
Число спектральных каналов	310
Геометрический размер пиксела с высоты 1000 м, м	0,05
Масса, кг	4,5

Таким образом, на основе анализа параметров элементов конструкции и результатов модельных расчётов были определены тактико-технические характеристики гиперспектрометра, которые приведены в табл. 2.

На рис. 2 показан внешний вид узкоугольного гиперспектрометра с устройством наведения (цифры соответствуют цифрам на рис. 1).

ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УГС

Как уже было сказано выше, УГС должен работать в комплексе с сенсором, имеющим широкое угловое поле зрения, но сравнительно невысокое пространственное разрешение (видеокамера, монофотонный УФ-С сенсор [4], широкоугольный гиперспектральный модуль [1], бортовой радиолокатор переднего обзора и т.п.). Полученная от широкоугольного сенсора информация об обнаружении объекта или участка поверхности, представляющих интерес, оперативно обрабатывается с целью определения их положения в пределах полосы обзора широкоугольного сенсора. Далее выдается команда управления на исполнительный механизм устройства наведения, обеспечивающий ориентацию оптической оси поля зрения узкоугольного гиперспектрометра на линию трассы полёта, проходящую через обнаруженный объект.

УСТРОЙСТВО НАВЕДЕНИЯ УГС

Устройство наведения (УН), показанное на рис. 2, служит для ориентации оптической оси входного объектива УГС на линию наземной трассы, проходящую через объект или участок поверхности, обнаруженные широкоугольным сенсором и представляющие интерес для наблюдателя.

Особенность работы УН определяется тем, что высота полёта летательного аппарата обычно задана и постоянна, поэтому угол визирования УГС α (рис. 3) устанавливается в ручном режиме перед полётом. Азимут ориентации УГС угол β рассчитывается на основе информации о пространственном положении интересующего наблюдателя объекта (угловые координаты центра которого ϕ и φ), обнаруживаемым широкоугольным сенсором (ШУС), и устанавливается с помощью поворотного зеркала, приводимого в действие электродвигателем в процессе полёта. Направление оптической оси ШУС смещено на угол γ относительно надира. Такое смещение предусмотрено для обеспечения дополнительного времени на обнаружение и наведения УГС на трек объекта. Величина угла γ выбирается относительно небольшой (до 10°) для того, чтобы уменьшить влияние индикатрисы рассеяния на принимаемое ШУС излучение.

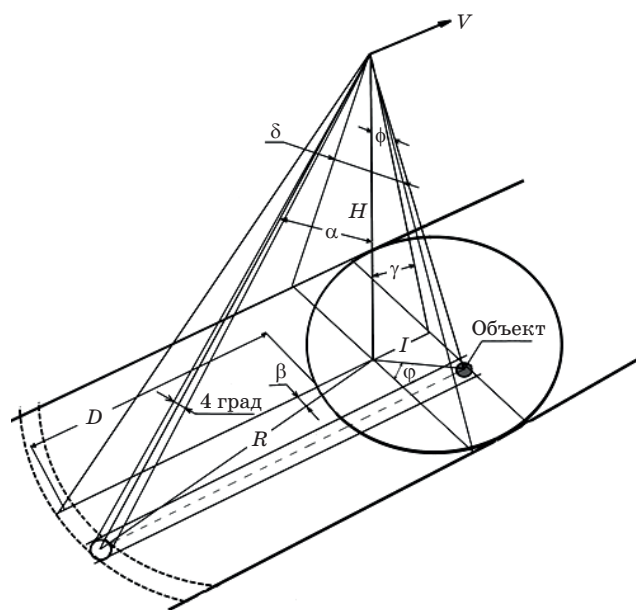


Рис. 3. Схема, поясняющая работу устройства наведения. δ — угол поля зрения широкоугольного сенсора, H — высота полёта носителя, V — скорость носителя.

Оптическая ось УГС с помощью поворотного зеркала перемещается по образующей конуса на требуемую линию наземной трассы, т.е. на угол β . Рис. 3 выполнен при использовании в качестве ШУС сенсора с углом поля зрения δ .

Минимально допустимое расстояние D между обнаруженным с помощью ШУС объектом и пятном на земной поверхности (см. рис. 3) определяется скоростью полёта носителя, временем, необходимым для обнаружения объекта t_{ob} и минимальным временем t_m , необходимым для уверенного наведения УГС на трек, проходящий через объект исследования.

$$D = V(t_{ob} + t_m) = R - H \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} + l,$$

где $l = H \operatorname{tg} \gamma$, $R = H \operatorname{tg} \alpha$

При известных значениях скорости носителя V , высоты его полёта H , требуемых величинах t_{ob} и t_m и значениях углов δ и γ из приведённых выше формул можно рассчитать установочный угол α .

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(\frac{V(t_{ob} + t_m)}{H} + \operatorname{tg} \frac{\delta}{2} - \operatorname{tg} \gamma \right).$$

Очевидно, что УГС выполняет роль своеобразной «лупы», позволяя детально рассмотреть исследуемый малоразмерный объект или участок зондируемой поверхности. В обоих случаях полученная гиперспектральная информация может использоваться при реализации процедур контролируемой классификации.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ УЗКОУГОЛЬНОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА

В лабораторных условиях проводились работы по спектральной калибровке каналов гиперспектрометра и оценке его спектральной разрешающей способности. Для этих целей использовалась ртутная лампа 6035 фирмы Newport.

На рис. 4 представлен измеренный гиперспектрометром спектр ртутной лампы, а в табл. 3 приведены длины волн линий спектра, полученные по измерениям гиперспектрометром, и паспортные данные ртутной лампы, а также значения разности между соответствующими длинами волн.

Из анализа двоянной линии на рис. 4 можно заключить, что спектральное разрешение УГС составляет порядка 1,5 нм.

Из табл. 3 следует, что среднеквадратическое отклонение длин волн, измеренных гиперспектрометром и задаваемых паспортом ртутной лампы, равно 0,19 нм. Таким образом, неопределённость истинного положения экспериментальных линий существенно меньше ширины спектрального канала (1,5 нм), что свидетельствует о правильности заложенных в проектирование гиперспектрометра условий и его хорошем техническом исполнении.

Кроме того, были выполнены калибровочные процедуры коррекции спектральных и пространственных дисторсий.

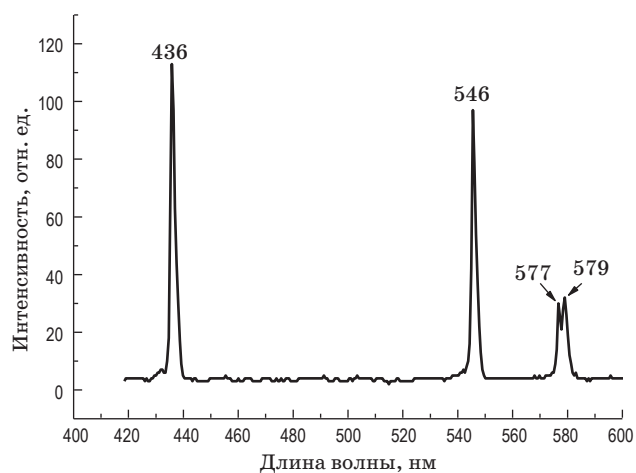


Рис. 4. Спектр ртутной лампы, измеренный гиперспектрометром.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА

Испытания проводились с целью подтверждения работоспособности узкоугольного гиперспектрометра и оценки его пространственной разрешающей способности. Так, на рис. 5 приведено RGB-изображение городского пейзажа, полученное из окна экспериментальной лаборатории. Цифрами 1–3 на рис. 5 отмечены точки, для которых на основе измеренного гиперкуба были получены значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). На врезке показан фрагмент изображения (см. красный прямоугольник), полученный гиперспектрометром, ось визирования которого при съёмке была наклонена на 5°, и который использовался для вычисления частотно-контрастной характеристики гиперспектрометра по методу наклонного края.

На рис. 6 представлены графики значений КСЯ для площадок: 1 — деревья, 2 — красная труба, 3 — стена дома (рис. 5).

Анализ значений светимости для точек 1–3 указывает на то, что они хорошо воспроизводят линии, связанные с поглощением спектра Солнца атмосферой Земли. Также для КСЯ деревьев (1)



Рис. 5. RGB-изображение городского пейзажа, полученное узкоугольным гиперспектрометром.

Таблица 3. Значения длин волн спектра ртутной лампы, измеренного гиперспектрометром, длины волн эталонной ртутной лампы (6035) и их разность

№ пп.	Длины волн, измеренные гиперспектрометром, нм	Длина волны спектральных линий ртутной лампы, нм	Разность соответствующих длин волн, нм
1	436,01	435,82	0,13
2	545,97	545,52	0,45
3	576,67	576,12	0,55
4	578,85	579,07	0,22

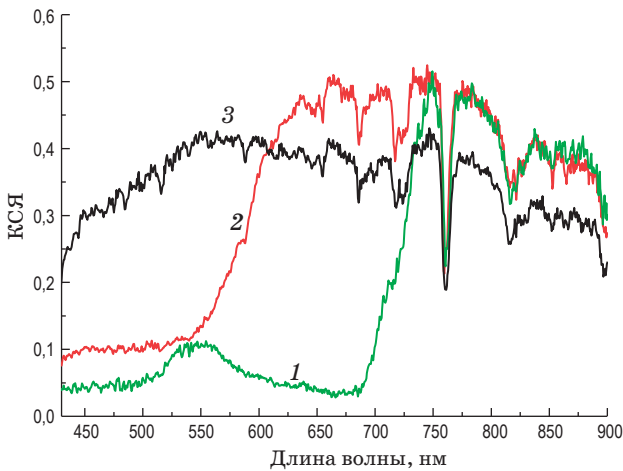


Рис. 6. Графики КСЯ для точек 1–3, показанных на рис. 5.

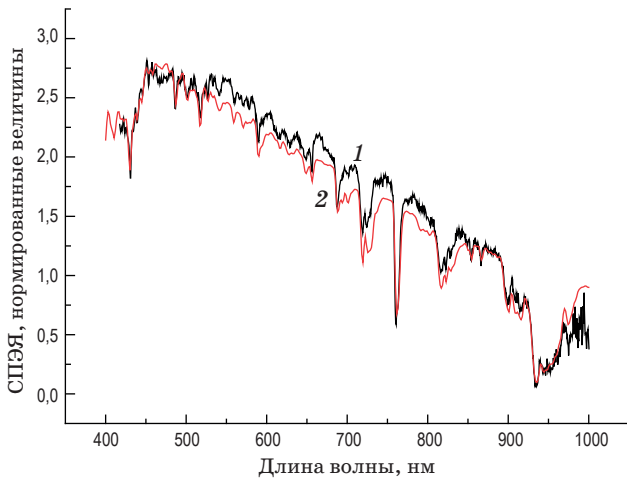


Рис. 7. Графики СПЭЯ небосвода. 1 — измерения, выполненные с помощью УГС, 2 — спектр, рассчитанный по модели MODTRAN.

хорошо виден пик на длине волны 550 нм, связанный с отражением хлорофилла, а также имеют место две полосы поглощения, обусловленные тем же хлорофиллом.

Кроме того, проводились гиперспектральные измерения СПЭЯ небосвода, результаты которых сравнивались с графиком, рассчитанным по модели MODTRAN [5] (см. рис. 7). Выбор параметров модели осуществлялся в соответствии с условиями проведения эксперимента.

Из сравнения графиков видно, что они достаточно хорошо согласуются друг с другом. Их небольшое отличие может быть обусловлено неточным соответствием параметров состояния атмосферы на момент съёмки параметрам модели. Это служит дополнительным подтверждением того, что созданный гиперспектрометр обладает высоким спектральным разрешением.

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УГС ПО РЕАЛЬНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

Размер поля зрения для пиксела матрицы гиперспектрометра $r_{\text{ном}}$ рассчитывался, исходя из значений его параметров, согласно формуле

$$r_{\text{ном}} = \frac{R}{f}d,$$

где фокусное расстояние объектива $f = 138$ мм, линейный размер детекторного элемента матрицы $d = 5,5$ мкм и дальности объекта зондирования R , принятой равной 1 км. При этом $r_{\text{ном}} = 0,04$ м.

Для вычисления реальной пространственной разрешающей способности гиперспектрометра по RGB-изображению определим вначале его частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) с помощью метода наклонного края [6] по фрагменту изображения, выделенному на рис. 5 красной рамкой. На врезке этот фрагмент показан при проведении съёмки гиперспектрометром в условиях, когда его щелевая диафрагма повернута на 5° относительно края контрастного объекта.

Согласно [6] последовательность процедур вычисления ЧКХ сводилась к следующим шагам: определению 60 профилей яркости поперёк контрастного края для фрагмента на рис. 5, пространственному совмещению наклонных участков профилей с целью их усреднения, вычислению производной полученного усреднённого профиля, вычислению ЧКХ, посредством осуществления дискретного преобразования Фурье графика производной. На рис. 8 представлен полученный график нормированной ЧКХ гиперспектрометра.

Линейный размер объекта r , разрешаемый гиперспектрометром с заданным уровнем контраста, определяемого по ЧКХ, вычислялся по формуле (на уровне контраста, равном 0,4)

$$r = \frac{Rd}{f\omega}.$$

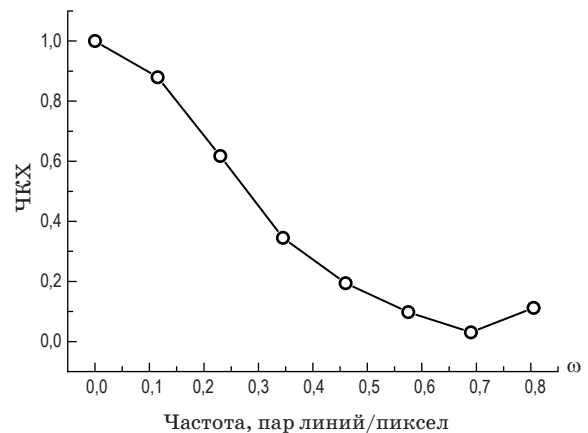


Рис. 8. График ЧКХ гиперспектрометра, полученный с использованием метода наклонного края, для фрагмента изображения, показанного на врезке (см. рис. 5).

Здесь ω — частота пар линий на пиксел. При расстоянии R до выделенного фрагмента изображения 1 км, $d = 5,5$ мкм, $f = 138$ мм, $\omega = 0,32$ м⁻¹, разрешение $r = 0,124$ м.

Следует отметить, что величина реального разрешения в полтора раза превышает удвоенное значение поля зрения пиксела. Это объясняется тем, что, как показано выше, средний размер пятен рассеяния точки гиперспектрометра равен 7 мкм, т.е. такое пятно проецируется на два детекторных элемента матрицы. Кроме того, оценка поля зрения пиксела матрицы проводилась на основе расчёта оптического тракта, а в результате измерений вносил свой вклад весь оптико-электронный тракт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный ЗАО «НТЦ «Реагент» узкоугольный гиперспектрометр обладает высоким пространственным (12 см на дальности 1 км) и спектральным (менее 1,5 нм в спектральном диапазоне 430–900 нм) разрешением. Совместная работа гиперспектрометра, широкоугольного сенсора и устройства наведения на борту летательного ап-

парата создаёт уникальные возможности для получения детальных изображений малоразмерных объектов и их идентификации в пределах широкой виртуальной полосы обзора, задаваемой широкоугольным сенсором. Кроме того, высокая детальность гиперспектральных изображений позволяет обеспечивать надёжную классификацию объектов земной поверхности после выполнения процедуры кластеризации, не прибегая к использованию данных наземных тестовых измерений. Лабораторные и натурные эксперименты, проведённые с узкоугольным гиперспектрометром, доказали правильность заложенных при его проектировании технических решений и возможность получения гиперспектральной информации с заданными характеристиками.

В части разработки конструкции гиперспектрометра работа выполнена в рамках государственного заказа № гос. рег. АААА-А17-117112240026-5, в части разработки функционирования устройства наведения — в рамках государственного заказа № гос. рег. АААА-А18-118022790133-1, в части проведения лабораторных и натурных экспериментов — в рамках государственного заказа № гос. рег. АААА-А17-117021310376-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D. A line of aviation hyperspectrometers in the UV, visible, and near IR ranges // J. Opt. Technol. 2016. V. 83. P. 237–243.
2. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P., Rodionov A.I., Rodionov I.D. Hyperspectrometer for the 900–1700 nm near-infrared region // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. P. 683–687.
3. Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2006. № 3. С. 11–24.
4. Belov A.A., Egorov V.V., Kalinin A.P., Korovin N.A., Rodionov A.I., Rodionov I.D., Stepanov S.N. Ultraviolet monophoton sensor «Korona» // Automation and Remote Control. 2014. V. 75. № 12. P. 345–349.
5. http://modtran.spectral.com/modtran_home
6. Burns P.D. Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis // Proc. IS&T. PICS Conference. 2000. P. 135–138.