

А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
А. И. Родионов, И. Д. Родионов, И. П. Родионова

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА БИК1

**А. Н. Виноградов, В. В. Егоров, А. П. Калинин,
А. И. Родионов, А. И. Родионов, И. П. Родионова**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА
БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО
ДИАПАЗОНА БИК1**

Представлено к печати
заместителем директора ИКИ РАН
Р. Р. Назировым

Design and Examination of the Near Infrared Band Hyperspectrometer BIK1

*A. N. Vinogradov¹, V. V. Egorov², A. P. Kalinin³,
A. I. Rodionov¹, I. D. Rodionov¹, I. P. Rodionova¹*

¹ Joint Stock Company “Reagent” Research and Development Center, Moscow

² Space Research Institute of Russian Academy of Sciences (IKI RAN), Moscow

³ A. Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow

The description of on-board near infrared (900–1700 nm) hyperspectrometer is given. Sensor is dedicated for monitoring of agricultural and forest objects status, environment of cities and big industrial centers, as well as for the decision of geophysical and medical tasks. Flight tests of hyperspectrometer confirmed its capability for work, correctness of the main technical decisions, and allowed to appraise the spectral (3 nm) and angular ($2 \cdot 10^{-3}$ rad) resolution.

Keywords: hyperspectrometer, near infrared band, image, spectrum, monitoring, state, resolution, environment.

Разработка и исследование гиперспектрметра ближнего инфракрасного диапазона БИК1

*А. Н. Виноградов¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин³,
А. И. Родионов¹, И. Д. Родионов¹, И. П. Родионова¹*

¹ Закрытое акционерное общество Научно-производственный центр «Реагент» (ЗАО «НППЦ «Реагент»), Москва

² Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

³ Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), Москва

Приводится описание бортового гиперспектрметра ближнего инфракрасного диапазона (900–1700 нм), предназначенного для мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий, лесных массивов, экологии городов и крупных промышленных центров, а также решения геофизических и медицинских задач. Лётные испытания гиперспектрметра подтвердили его работоспособность, правильность основных технических решений, позволили оценить спектральную (менее 3 нм) и угловую разрешающую способность ($2 \cdot 10^{-3}$ рад).

Ключевые слова: гиперспектрметр, ближний инфракрасный диапазон, изображение, спектр, мониторинг, состояние, разрешение, экология.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и за рубежом все больший интерес проявляется к использованию гиперспектрометров ближнего инфракрасного (ИК) диапазона для дистанционного зондирования земной поверхности с борта космических и авиационных носителей. Специфика работы гиперспектрометра ближнего ИК-диапазона и, в частности, диапазона 900–1700 нм состоит в том, что спектр принимаемого им сигнала является особенно чувствительным к ряду важных экологических и биосферных процессов и, в частности, абиотическим процессам, протекающим в растительном покрове. Такие процессы часто связаны с недостатком влаги в листьях, дефицитом питательных веществ в почве, а также с воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды, например, длительной засухи (Кринов, 1947; Егоров, Тарнопольский, 1977; Алтынов и др., 2010).

Корректное и эффективное решение задач мониторинга состояния растительного покрова (сельскохозяйственных угодий и лесов) возможно только при обеспечении высокой чувствительности сенсора, т. е. при отношении сигнал/шум много больше единицы, что накладывает жёсткие условия на его конструкцию, шумовые характеристики детектора (фотоприёмной матрицы) и др. (Непобедимый и др., 2008; Формозов, 2002). Очевидно, что на результаты оценки состояния объекта зондирования оказывают влияние и условия съёмки (наличие облачности, атмосферной дымки, высоты Солнца и т. п.). Учесть влияние всех этих факторов на работу гиперспектрометра на этапе его проектирования достаточно сложно, поэтому целесообразно проверить его работоспособность в полевых условиях (лётных экспериментах).

В России и за рубежом разработка бортовых гиперспектрометров получила развитие с начала 80-х гг. прошлого столетия (Аванесов, Снеткова, 1981). В настоящее время среди отечественных разработчиков таких сенсоров следует выделить ЗАО «НПЦ «Реагент», в котором разработка гиперспектрометров велась с середины 90-х гг. прошлого века (Rodionov et al., 2014). В частности, в последнее время была создана линейка современных гиперспектрометров, по своим основным параметрам не уступающих лучшим зарубежным образцам (Виноградов и др., 2016).

Целью работы является описание конструкции, принципов работы гиперспектрометра ближнего ИК-диапазона (БИК1), который может использоваться как для авиационных исследований, так и в наземных и лабораторных условиях. Кроме того, в данной работе проводились одновременные совместные измерения гиперспектрометром БИК1, гиперспектрометром ВИД-ИКЗ (Виноградов и др., 2016) в диапазоне 400–1000 нм и видеокамерой. Эти исследования позволили получить данные по коэффициенту спектральной яркости (КСЯ) в диапазоне от 400 до 1700 нм для различных типов зондируемой поверхности.

ОБЗОР ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

Ближний инфракрасный диапазон (short-wave infrared, SWIR) простирается на длины волн от 800 до 2500 нм. В табл. 1 приведены основные технические характеристики некоторых зарубежных гиперспектрометров, охватывающих ближний инфракрасный диапазон. Внешний вид приведённых в табл. 1 гиперспектрометров показан на рис. 1.

Первоначально сенсоры SWIR разрабатывались и использовались в основном для обнаружения и картирования различного рода минералов открытых горных пород. Кроме того, проводились съёмки естественной и культурной растительности, а также лесных массивов (Pu et al., 2003). Эти работы в 80-х гг. прошлого века были направлены, прежде всего, на проведение научных исследований. Практическое применение они начали находить в конце 1990-х, начале 2000-х гг. На этом этапе хорошо зарекомендовал себя такой гиперспектрометр, как AVIRIS (Airborne visible/infrared imaging spectrometer, США), который нашёл применение во многих странах. Близкими характеристиками обладали гиперспектрометры HYDICE (Hyper-spectral Digital Imagery Collection Experiment) и HyMap (Hyperspectral Mapper). Как и всякие приборы, реализующие новые технологии, они страдали невысокой радиометрической калибровкой, низкой геометрической верностью, малым отношением сигнал/шум. Используемые в то время самолётные гиперспектрометры обладали пространственным разрешением 10–20 м на высотах порядка 3 км. В настоящее время гиперспектрометры типа AVIRIS продолжают совершенствоваться и, в частности, в 2016 г. появился AVIRIS-NG (AVIRIS Next Generation).



Рис. 1. Зарубежные гиперспектрометры ближнего инфракрасного диапазона: *а* – AVIRIS; *б* – HYDICE; *в* – Pika NIR; *г* – SWIR-640; *д* – HyMap; *е* – SPECIM FX17; *ж* – AISA Fenix1K-SWIR; *з* – SASI-1500A; *и* – SWIR-384; *к* – ODIN-1024 (SWIR)

Таблица 1. Основные технические характеристики некоторых зарубежных гиперспектрометров ближнего инфракрасного диапазона

Название	Производитель	Диапазон, мкм	Ширина каналов средняя, нм	Число каналов	Угловое разрешение, $\times 10^{-3}$, рад	Поле зрения поперёк трека, град
AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)	NASA Jet Propulsion Lab (США)	0,4–2,45	9,7	224	1	30
HYDICE (Hyperspectral Digital Imagery Collection-Experiment)	Naval Research Lab (США)	0,4–2,5	13,4	210	0,5	9
Pika NIR	Resonon (США)	0,9–1,7	4,9	164	0,4–6,3	7,3–90
SWIR-640	NovaSol (США)	0,85–1,7	8,33	102	0,4	15
HyMap	Integrated Spectronics (Австралия)	0,45–2,5	14,3	126	2	60
SPECIM FX17	Specim Spectral Imaging (Финляндия)	0,9–1,7	8	224	1	38
AISAFenix1K-SWIR	Specim Spectral Imaging (Финляндия)	0,97–2,5	14	256	0,68	40
SASI-1500A	ITREX (Canada)	0,95–2,45	15	100	0,7	40
SWIR-384	HySpecx (Норвегия)	0,93–2,5	5,45	384	0,73	16
ODIN-1024 (SWIR)	HySpecx (Норвегия)	0,95–2,5	6,1	427	0,25	15

Приборы нового поколения (Pika NIR, SWIR-384, SWIR-640, Aisa Fenix-1k, SASI, ODIN-1024) имеют мгновенное угловое поле зрения (Instantaneous Field of View, IFOV) менее $1 \cdot 10^{-3}$ рад, что позволяет им получать изображения с детальностью до одного метра при высоте полёта носителя 1 км. Кроме того, гиперспектрометры SWIR-384 и ODIN-1024 имеют в своём составе почти в два раза боль-

ше спектральных каналов и ширину 5,45 и 6,1 нм, соответственно. Существенно улучшены были и другие их параметры и, в частности, характеристики радиационной и радиометрической калибровки, геометрической верности и отношения сигнал/шум за счёт соответствующего совершенствования программно-аппаратных средств.

Что же касается массогабаритных показателей, то здесь наблюдается большой разброс. Так, например, SPECIM FX17 обладает весьма малыми габаритами и массой: соответственно, 150×85×75 мм и 1,7 кг. Для сравнения гиперспектрометр ODIN имеет размеры 113,4×42,3×72,6 см. Это связано с тем обстоятельством, что для достижения более качественных технических характеристик разрабатываемых приборов приходится жертвовать увеличением их массогабаритных параметров.

Области применения гиперспектрометров ближнего инфракрасного диапазона помимо традиционных приложений типа дистанционного зондирования и связанных с ним отраслей хозяйства включают в себя медицину (анализ крови, спермограммы, гистология и др.), криминалистику, навигацию (выбор места посадки летательных аппаратов). Гиперспектральная информация о зондируемых объектах занимает особое место в военном деле, поскольку именно спектр содержит всю информацию о них, заключающуюся в принимаемом излучении (Исимару, 1980).

Следует сказать, что в России до настоящего времени не было создано образцов гиперспектрометров инфракрасного диапазона. Поэтому разработанный в ЗАО «НПЦ «Реагент» гиперспектрометр БИК1 может рассматриваться как первый отечественный сенсор, охватывающий большую часть указанного диапазона.

КОНСТРУКЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА БИК1 И ЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Гиперспектрометр БИК1, разработанный в ЗАО «Научно-производственный центр «Реагент», предназначен для получения ИК-изображений как в режиме авиационной съемки, так и в наземных условиях. Реализуемый в гиперспектрометре спектральный диапазон интересен с точки зрения исследования растительного покрова и, в частности, изучения его стрессового состояния, связанного с дефицитом влаги в листьях и питательных веществ в почве, а также с точки зрения исследования различных динамических процессов, протекающих в антропогенных и природных объектах.

Гиперспектрометр БИК1 построен по типу push broom сенсора. Поэтому формирование гиперспектрального изображения земной поверхности в диапазоне длин волн $\lambda = 900\text{--}1700$ нм узкой поперечной полосой области обзора осуществляется при перемещении летательного аппарата. Использование БИК1 в лабораторных и наземных экспериментах требует наличия поворотного устройства.

Гиперспектрометр БИК1, оптическая система которого приведена на рис. 2, содержит входной объектив 1, диафрагменный узел 2, коллиматор 3, состоящий из двух секций 4 и 5. Названные секции установлены под углом друг к другу, оптимальное значение угла поворота — 90° . Между секциями коллиматора размещено зеркало 6. За секцией 5 коллиматора установлен диспергирующий блок, выполненный в виде дифракционной решётки 7. Далее по ходу лучей установлен выходной объектив 8 и фотоприёмное устройство (фотоприёмная матрица) 9.

В ходе модельных экспериментов с помощью программы Zemax были выполнены расчёты координат хода лучей в гиперспектрометре и пятен рассеяния точки в плоскости фотоприёмной матрицы на предмет оценки его потенциальной пространственной разрешающей способности.

На рис. 3 приведён пример расчёта пятен рассеяния для визирования точечного источника, а на рис. 4 — координаты лучей для различных длин волн в плоскости изображения гиперспектрометра.

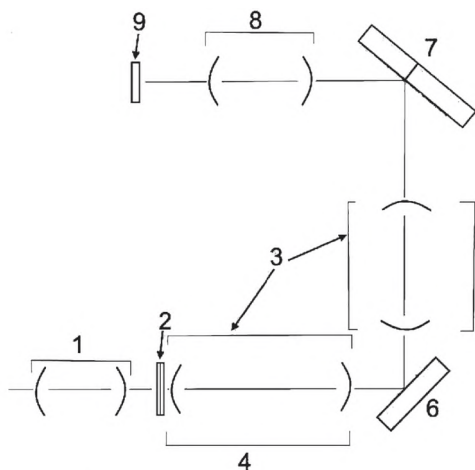


Рис. 2. Оптическая система гиперспектрометра БИК1

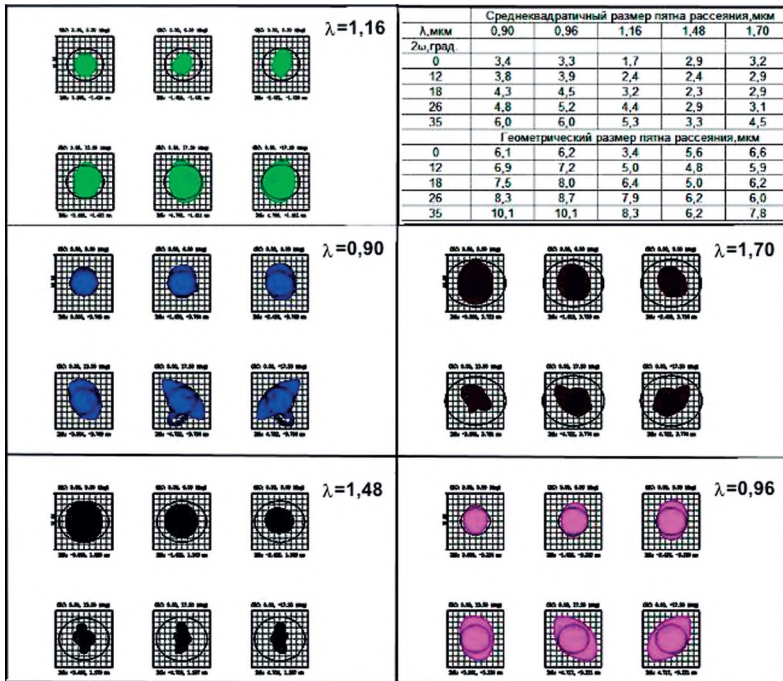


Рис. 3. Диаграммы пятен рассеяния для мгновенного поля зрения прибора БИК1

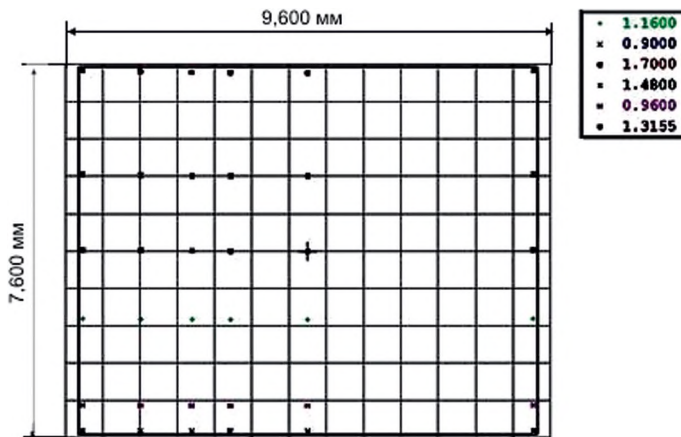


Рис. 4. Координаты лучей для различных длин волн в плоскости изображения гиперспектрометра

Таким образом следует, что размеры пятен рассеяния лежат в диапазоне 1,7–10 мкм в зависимости от длины волны λ и углового поля 2ω вдоль поперечной полосы области обзора (см. табл. в верхней правой части рис. 3). То есть пятно существенно меньше размеров пикселя использованной при разработке матрицы (30×30 мкм). При фокусном расстоянии объектива 15,4 мм размер пикселя на земной поверхности с высоты съёмки в 1 км будет равен 2 м (т. е. угловое разрешение будет $2 \cdot 10^{-3}$ рад). На основе этих расчётов была выбрана оптимальная конструкция гиперспектрометра.

Гиперспектрометр (см. рис. 2) функционирует следующим образом. Восходящее от объекта зондирования излучение после прохождения через входной объектив в фокальной плоскости диафрагменного узла 2 со щелью шириной 30 мкм, подвергается процедуре пространственной селекции, в результате чего вырезается узкая полоска на земной поверхности. Далее это излучение с выхода щели проходит через коллиматор 3. Так как для уменьшения габаритов коллиматор выполнен из двух секций 4 и 5, излучение после прохождения первой секции 4 попадает на отклоняющее зеркало 6, а затем проходит вторую часть 5 коллиматора.

Совместно с коллиматором 3 входной объектив образует телескопическую систему, направляющую излучение в диспергирующий блок 7. В качестве диспергирующего блока применена дифракционная решётка. После диспергирующего блока (дифракционной решётки) разложенное по спектру излучение через выходной объектив 8 попадает на матрицу фотоприёмного устройства 9, на которой формируется гиперспектральное изображение.

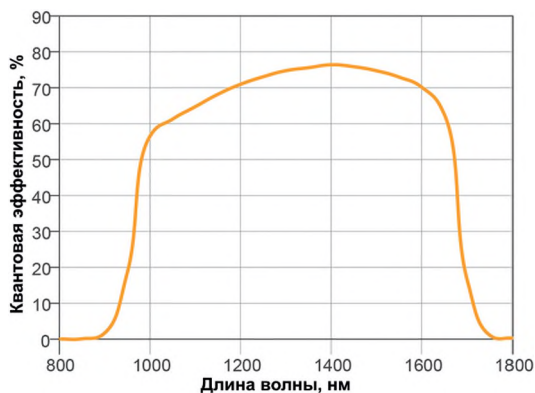


Рис. 5. График квантовой эффективности

Фотоприёмным устройством служит камера с матрицей InGaAs PIN-фотодиодов, обеспечиваемая термоэлектрическим охлаждением и обладающая спектральным диапазоном 900–1700 нм. Число элементов матрицы 320×256 с пикселем 30×30 мкм.

График квантовой эффективности элементов матрицы для различных длин волн приведён на рис. 5.

Как показали тестовые испытания гиперспектрометра БИК1, при интенсивном входном излучении спектральные составляющие в области 0,9 мкм превышают шум прибора и уверенно регистрируются матрицей.

Основные характеристики гиперспектрометра БИК-1 приведены ниже.

Технические характеристики гиперспектрометра БИК-1

Спектральный диапазон	90; 900–1700 нм
Угол поля зрения	35°
Ширина спектрального канала	3,2 нм
Число спектральных каналов	250
Число пикселей по пространственной координате . . .	320
Угловое разрешение.	$2 \cdot 10^{-3}$ рад
Линейный размер пикселя (с высоты 1000 м)	2,0 м
Масса	8 кг

Корпус гиперспектрометра БИК-1 выполнен в виде герметичного блока (рис. 6) с заполнением внутреннего объёма азотом особой чистоты 1 сорта. Он снабжён системой термостабилизации, обеспечивающей прогрев оптико-механических узлов до рабочей температуры.



Рис. 6. Внешний вид гиперспектрометра БИК1

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА БИК1

Целью лабораторных испытаний прибора было определение его пространственных и спектральных характеристик.

С помощью монохроматора была проведена калибровка гиперспектрометра по соответствию номера пикселя матрицы длине волны (чёрные квадраты на рис. 7).

Красной прямой на рис. 7 показана аппроксимация результатов измерений линейной зависимостью. Можно констатировать хорошее совпадение измерений и линейной зависимости, что свидетельствует об эффективности расчётов конструкции гиперспектрометра.

На рис. 8 показан измеренный гиперспектрометром БИК1 спектр ртутной лампы, а в табл. 2 приведены длины волн линий спектра, полученные по измерениям БИК1, паспортные данные ртутной лампы, а также значения разности между соответствующими длинами волн.

Из последнего столбца следует, что среднеквадратичное отклонение оказалось равным 0,95 нм. Таким образом, истинное положение экспериментальных линий значительно меньше ширины спектрального канала, что свидетельствует о правильности заложенных в проектирование гиперспектрометра условий и его хорошее техническое исполнение.

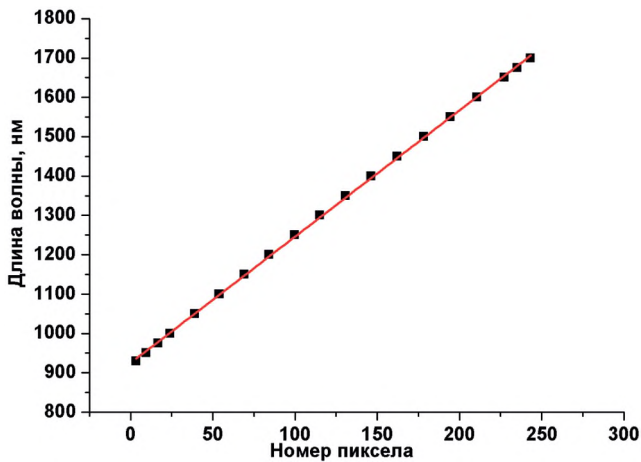


Рис. 7. График соответствия номера пикселя матрицы и длины волны светового луча

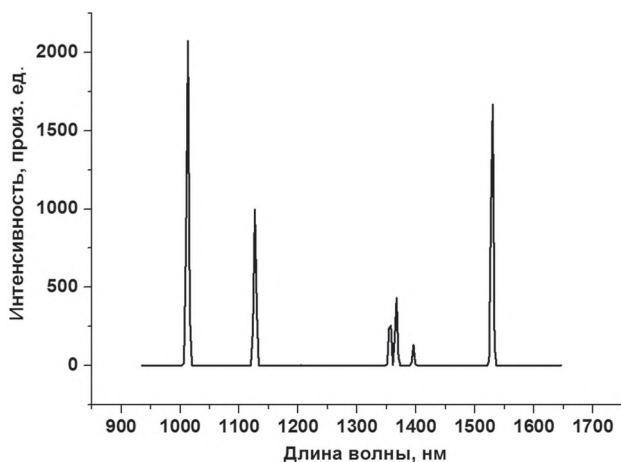


Рис. 8. Спектр ртутной лампы, измеренный гиперспектрометром БИК1

Таблица 2. Значения длин волн спектра ртутно-неоновой лампы, измеренного гиперспектрометром БИК1, длины волн, полученные из литературных источников, и их разность

Длины волн, измеренные гиперспектрометром БИК1, нм	Длина волны спектральных линий эталонной лампы, нм	Разность соответствующих длин волн, нм
1013,09	1013,98	0,9
1126,5	1128,74	2,3
1357,32	1357,02	0,3
1366,88	1367,35	0,47
1529,94	1529,58	0,36

Также были определены калибровочные процедуры для коррекции спектральных и пространственных дисторсий. Кроме того, была получена радиометрическая калибровочная кривая. Пример того, как на основе калибровочных процедур происходит исправление спектральных дисторсий, показан на рис. 9.

Кроме того, были исследованы спектры эталонной ксеноновой лампы. На рис. 10а приведён график спектра указанной лампы, выполненный с помощью гиперспектрометра БИК1, а на рис. 10б — соответственно распределение интенсивности излучения, падающего на его фотоприёмную матрицу. Следует отметить, что на рис. 10б видны пиксели матрицы.

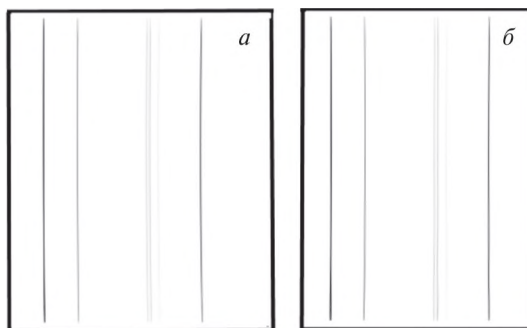


Рис. 9. Исправление дисторсии (распределение спектральной интенсивности линий ртутной лампы): *a* – исходное распределение; *б* – откорректированное распределение

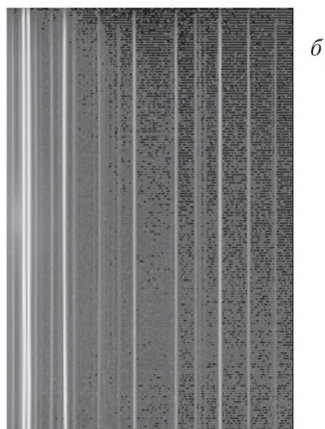
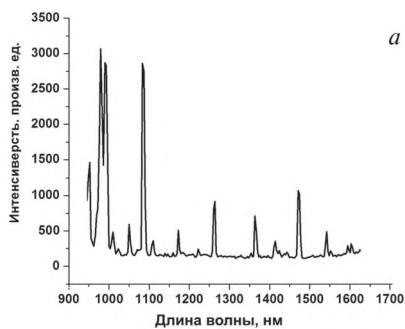


Рис. 10. Спектр ксеноновой лампы: *a* – измеренный БИК-1; *б* – распределение интенсивности спектра на фотоприемной матрице

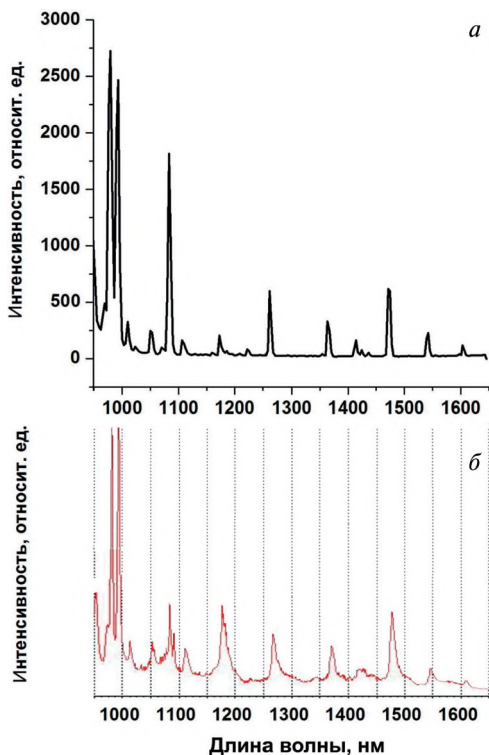


Рис. 11. Спектры ксеноновой лампы: *a* — спектр, измеренный гиперспектрометром БИК1; *б* — соответствующий эталонный спектр (<http://www.spectra-magic.de/E-Illumination.htm>)

На рис. 11*a* и *б* приведено сравнение измеренных и эталонных спектров ксеноновой лампы.

Сравнение рис. 11*a* и *б* показывает хорошее соответствие этих двух спектров.

Для работы с гиперспектрометром БИК1 был изготовлен блок предварительной обработки (рис. 12), который способен проводить инициализацию гиперспектрометра, управлять им и получать данные от него по интерфейсу CameraLink. В блоке предварительной обработке на основе известных калибровочных кривых с помощью встроенного вычислителя происходит исправление первичных данных, так, как это показано на примере исправления дисторсии спектральных линий на рис. 11. Полученные калибровочные данные выдаются по интерфейсу Ethernet.



Рис. 12. Блок предварительной обработки данных

ЛЁТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ БИК-ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Бортовой аппаратный комплекс

Целью проводимых лётных испытаний на самолёте Ан-2 (рис. 13) была проверка работоспособности гиперспектрометра БИК1 и оценка основных его технических характеристик.

Гиперспектрометр был установлен на гиостабилизированной платформе Somag SSM 350. Помимо гиперспектрометра БИК1 на гиروطформе были размещены цветная Full HD-видеокамера, гиперспектрометр видимого диапазона ВИД-ИК3 (рис. 14), технические характеристики которого приведены ниже, а также GPS-приёмник. Данные с GPS-приёмника передавались в блок предварительной обработки, к которому были подключены видеокамера и гиперспектрометр БИК1. GPS-координаты записывались непосредственно в метаданные видеокамеры и гиперспектрометра БИК1. Размещение съёмочной аппаратуры на гиروطформе показано на рис. 15.

Характеристики гиперспектрометра ВИД-ИК3

Спектральный диапазон	400–1000 нм
Угол поля зрения	35°
Ширина спектральных каналов в пределах указанного спектрального диапазона	от 0,3 до 10 нм
Число спектральных каналов	до 500
Число пикселей по пространственной координате	320
Угловое разрешение	$3 \cdot 10^{-4}$
Линейный размер пикселя (с высоты 1000 м)	0,3 м
Масса	8 кг



Рис. 13. Самолёт Ан-2, на котором была установлена съёмочная аппаратура



Рис. 14. Гиперспектрометр ВИД-ИК3

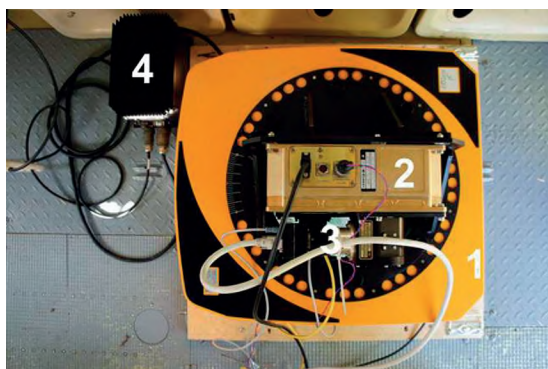


Рис. 15. Размещение съёмочной аппаратуры на гиropлатформе: 1 — гиropлатформа; 2 — БИК-гиперспектрометр; 3 — гиперспектрометр ВИД-ИК3; 4 — блок управления гиropлатформой

Оптические оси трёх приборов — видеокамеры, гиперспектрометров БИК1 и ВИД-ИК3 — были съюстированы, и съёмка с них проводилась одновременно.

Результаты лётных испытаний

Высота полёта самолёта варьировала в пределах 800–900 м. Время съёмки 5 июля 2016 г. с 12:00 до 14:00 по московскому времени, что соответствовало высоте Солнца 56–53°. Гиперкубы изображений земной поверхности регистрировались на бортовом компьютере. Их обработка проводилась в камеральных условиях. Помимо RGB-изображений в ходе обработки были получены графики

коэффициентов спектральной яркости выбранных участков зондируемой поверхности.

Первый этап обработки гиперспектральных данных (гиперкубов) включал в себя процедуру пересчёта измеренных значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), причём в качестве эталонного отражателя использовалось специальное прорезиненное полотно белого цвета размером 3×3 м, которое подвергалось съёмке в начале и в конце полёта. Переход от СПЭЯ к КСЯ позволяет в значительной степени исключить влияние атмосферы на результаты спектральных измерений.

На рис. 16 представлены карта и изображения одного из участков Домодедовского района Московской области, полученные тремя приборами: БИК-гиперспектрометром, гиперспектрометром ВИД-ИКЗ и видеокамерой. Плановая кадровая съёмка видеокамерой позволяет получать изображения с минимальными геометрическими искажениями, а её результаты могут служить своего рода эталоном для гиперспектральных изображений.

Цифрами на рис. 16а и б показаны площадки, выделенные для спектрального изучения: 1 — асфальтированная дорога; 2 — пожухлая трава; 3 — зелёная трава; 4 — зелёные деревья. Сравнение рис. 16а и б с изображениями на рис. 16в и г позволяет утверждать, что оба гиперспектрометра обеспечивают достаточную геометрическую верность получаемых кадров.

На рис. 17 приведены графики коэффициента спектральной яркости для площадок 1–4 (см. рис. 16в), составленные из двух графиков, полученных гиперспектрометром ВИД-ИКЗ и БИК1. Тёмно-серыми вертикальными полосками на рисунке закрыты участки спектров, в которых из-за сильного поглощения излучения водяным паром возникают большие искажения при пересчёте значений СПЭЯ в КСЯ.

Как видно на рис. 17, графики КСЯ напоминают хорошо известные результаты, полученные в работах (Кринов, 1947; Егоров, Тарнопольский, 1977; Алтынов и др., 2010). Для асфальта (площадка 1), как и следовало ожидать, характерен слабый подъём спектра с длиной волны. На спектрах площадок 2–4 чётко выделяется локальный максимум на длине волны 550 нм, характерный для хлорофилла зелёни и резкий подъём КСЯ в интервале 700–750 нм. Далее, с увеличением длины волны значения КСЯ меняются незначительно вплоть до 1300 нм, после чего наблюдается спад с минимумом в области 1450 нм, связанный с поглощением падающего на растительность излучения влагой, содержащейся в листьях и стеблях травы.

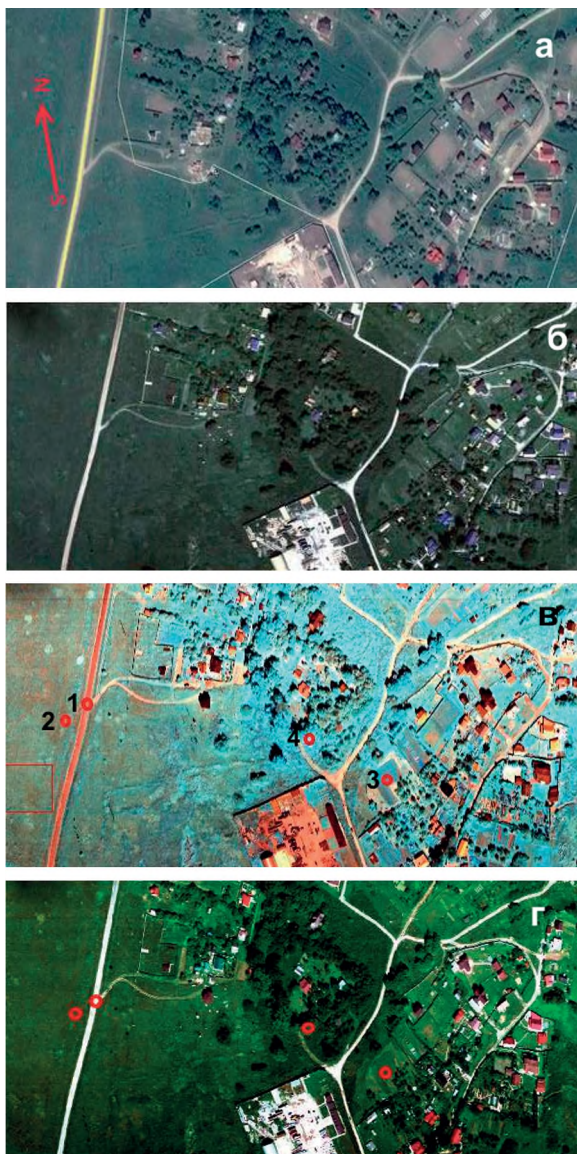


Рис. 16. Карта и изображения участка поверхности Домодедовского района: *а* — карта исследуемого участка, построенная по спутниковому изображению; *б* — цветное изображение, снятое видеокамерой Full HD; *в* — RGB-изображение, полученное БИК1; *г* — RGB-изображение, полученное гиперспектрометром ВИД-ИКЗ

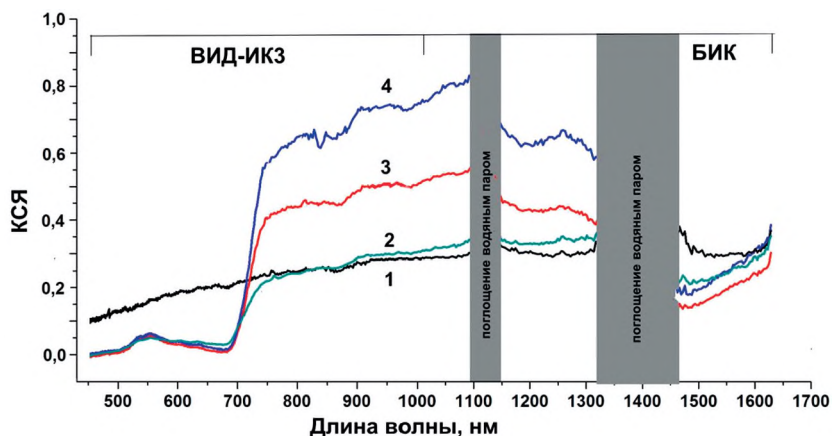


Рис. 17. Графики КСЯ для площадок 1–4 (см. рис. 10): 1 — асфальт; 2 — пожелтая трава; 3 — зеленая трава; 4 — зеленые деревья

Результаты лётных испытаний подтвердили работоспособность гиперспектрометра БИК1 как в автономном режиме, так и в комплексе с другими приборами, а также правильность заложенных в него технических решений. Характеристики изображений спектров полностью соответствуют предъявляемым к сенсору требованиям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гиперспектрометр ближнего ИК-диапазона, разработанный и созданный в ЗАО «НПЦ «Реагент», представляет собой эффективный инструмент для решения ряда научных и прикладных задач аэрокосмического мониторинга земной поверхности и др. Лабораторные и летные испытания сенсора в комплексе с другими приборами видимого диапазона продемонстрировали его работоспособность и подтвердили правильность основных технических решений, заложенных в его конструкцию. Обработка полученных в ходе испытаний результатов позволила оценить величины угловой и спектральной разрешающей способности гиперспектрометра, соответственно, в $2 \cdot 10^{-3}$ рад и менее 3 нм, что хорошо согласуется с расчётными данными.

Сравнение результатов лабораторных и лётных испытаний и данных табл. 1 позволяют утверждать, что гиперспектрометр БИК1 находится на уровне лучших мировых образцов.

Что касается перспектив использования описанного гиперспектрометра БИК1, то помимо таких областей, как дистанционное зондирование Земли, он может найти применение для целей мониторинга состояний сельскохозяйственных угодий и лесных массивов, обнаружения и контроля пожаров, определения экологического состояния воздушного бассейна городов, следует отметить возможность его применения в лабораторных исследованиях процессов горения и взрыва и в медицинской практике.

ЛИТЕРАТУРА

- Аванесов Г. А., Снеткова Н. И.* Многозональные аэрокосмические съёмки Земли. М.: АН СССР. 1981. С. 100–117.
- Алтынов А. Е., Малинников В. А., Попов С. М., Стеценко А. Ф.* Спектрометрирование ландшафтов: учеб. пособие для студентов М.: Изд-во. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010. 120 с.
- Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов А. И., Родионов И. Д.* Линейка авиационных гиперспектрометров ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов // Оптич. журн. 2016. Т. 88. № 4. С. 54–62.
- Егоров В. В., Тарнопольский В. И.* Физические основы дистанционного зондирования Земли из космоса. Баку: Изд-во «Элм». 1977. С. 38–100.
- Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. М.: Мир. 1980. 280 с.
- Кринов Е. Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР. 1947. 271 с.
- Непобедимый С. П., Балтер Б. М., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов И. Д., Родионова И. П., Стальная М. В.* Имитационное моделирование данных гиперспектрального зондирования Земли // Докл. Академии наук РАН. 2008. Т. 420. № 5. С. 623–627.
- Формозов Б. Н.* Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах: учеб. пособие. СПб: СПбГУАП, 2002. 120 с.
- Pu R., Gong P., Biging G. S.* Simple calibration of AVIRIS data and LAI mapping of forest plantation in southern Argentina // Intern. J. Remote Sensing. 2003. V. 24. No. 23. P. 4699–4714.
- Rodionov I. D., Rodionov A. I., Vedeshin L. A., Egorov V. V., Kalinin A. P.* Airborne hyperspectral systems for solving remote sensing problems // Izvestija, Atmospheric and Oceanic Physics. 2014. V. 50. No. 9. P. 983–1003.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Обзор гиперспектрометров ближнего инфракрасного диапазона	4
Конструкция гиперспектрометра БИК1 и его технические характеристики	7
Лабораторные испытания гиперспектрометра БИК1	12
Лётные испытания БИК-гиперспектрометра и их результаты. . .	16
Бортовой аппаратный комплекс	16
Результаты лётных испытаний.	17
Заключение	20
Литература	21

055(02)2

ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 17.03.2017 г.

Заказ 4160

Формат 60×84/16

Тираж 100

1,47 усл.-печ. л.

ДЛЯ ЗАМЕТОК
