

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
БОРТОВОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО
КОМПЛЕКСА В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ**

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

Research of Aboard Hyperspectral Complex Possibilities in Decision of Earth Remote Sensing Problems

*A. N. Vinogradov¹, V. V. Egorov², A. P. Kalinin³,
A. I. Rodionov¹, I. D. Rodionov⁴, I. P. Rodionova⁴*

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

⁴ N. N. Semyonov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow

The problems of Earth aviation hyperspectral remote sensing by means of visible and near infrared sensors are considered. The description of flying experiment and technical characteristics of onboard hyperspectral sensors are given. Processing technic of hyperspectral cubes are based on the algorithm of control and non-control classification. The processing results are RGB images of terrestrial scene, principal components, histograms of first principal components and matrixes of classification accuracy.

Keywords: hyperspectrometer, visible and near infrared band, natural object, principal components, classification, cluster, false alarm, matrix of accuracy.

Исследование возможностей бортового гиперспектрального комплекса в решении задач дистанционного зондирования Земли

*А. Н. Виноградов¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин³,
А. И. Родионов¹, И. Д. Родионов⁴, И. П. Родионова⁴*

¹ Закрытое акционерное общество Научно-производственный центр «Реагент» (ЗАО «НПЦ «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

⁴ Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН (ИХФ РАН), Москва

Рассматриваются вопросы авиационного гиперспектрального зондирования земной поверхности с использованием сенсоров видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Приводится описание лётного эксперимента и технических характеристик бортовых гиперспектральных сенсоров. Методика обработки полученных гиперспектральных кубов базируется на использовании алгоритмов контролируемой и неконтролируемой классификации. Результатами обработки являются RGB-изображения участков местности, их первые главные компоненты, гистограммы изображений первых главных компонент, а также матрицы точности классификации.

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

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционный мониторинг земной поверхности, осуществляемый с помощью гиперспектральных сенсоров, в последние годы становится все более актуальным. Это обусловлено двумя факторами: созданием новых образцов гиперспектрометров с повышенным пространственным и спектральным разрешением [Виноградов и др., 2017а, б; Rodionov et al., 2014] и их высокой информативностью, поскольку именно в спектре восходящего от объекта зондирования излучения заключена вся доступная полезная информация [Исимацу, 1980]. Вместе с тем, исследование проблем глубокой тематической обработки данных гиперспектральной съёмки земной поверхности и потенциальной возможности использования бортовых гиперспектрометров в решении задач дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических платформ остаётся весьма злободневным. Действительно, одна из актуальных проблем состоит в извлечении полезной смысловой информации из данных, регистрируемых сотнями спектральных каналов. Кроме того, важно определить: каковы реальные количественные характеристики, касающиеся определения точности классификации и оценки состояния зондируемых объектов по данным гиперспектрального зондирования. Здесь в качестве первого шага целесообразно изучить возможности классификации (контролируемой и неконтролируемой) заданного вида объектов земной поверхности по материалам авиационной гиперспектральной съёмки в диапазоне 400–1700 нм. В данном исследовании этот диапазон был разбит на два поддиапазона: 400–1000 и 900–1700 нм и каждый из них был реализован в отдельном приборе комплекса. Такое разбиение было сделано исходя из конструктивных соображений, позволивших получить максимальные значения разрешающей способности сенсоров как пространственному, так и спектральному разрешению [Vinogradov et al., 2016].

Целью статьи является демонстрация возможностей гиперспектральной съёмки в диапазоне 400–1700 нм, с использованием комплекса двух гиперспектрометров — видимого и ближнего инфракрасного диапазона на основе материалов лётного эксперимента, а также их тематической обработки.

КОНСТРУКЦИЯ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ

При проектировании гиперспектральных модулей перед разработчиками была поставлена задача получения максимально возможных значений по пространственному и спектральному разрешению при заданных величинах поля зрения. В связи с этим был использован подход, основанный на поиске различного рода компромиссных решений, что позволило найти оптимальный вариант конструкции в виде комплекса, состоящего из двух модулей, для которых были рассчитаны оптические схемы, представленные ниже. Гиперспектральный модуль диапазона 400–1000 нм получил название ВИД-ИКЗ, а модуль диапазона 900–1700 нм был обозначен как БИК1. Оба модуля работают в режиме push-broom, т. е. осуществляют развёртку изображения зондируемой поверхности за счёт перемещения узкой полоски, формируемой диафрагменной щелью, ориентированной перпендикулярно линии полёта носителя.

В ходе модельных экспериментов, с помощью программы Zemax были выполнены расчёты хода лучей в гиперспектрометрах и пятен рассеяния точки в плоскости фотоприёмной матрицы на предмет оценки потенциальной пространственной разрешающей способности гиперспектральных модулей. На основе этих расчётов были выбраны конструкции указанных модулей.

Оптическая схема гиперспектрометра ВИД-ИКЗ и расчёт пятен рассеяния

На рис. 1 показан ход световых лучей в модуле ВИД-ИКЗ, а на рис. 2 приведён пример расчёта пятен рассеяния для этого же модуля при различных углах визирования точечного источника (0; 6,3; 9,0; 12,6 и 18° — точки 1–5) и для двух длин волн (450 и 900 нм).

Из анализа рис. 2 следует, что размеры пятен лежат в диапазоне от 8 до 16 мкм, это при фокусном расстоянии модуля в 17 мм будет соответствовать размерам пиксела на земной поверхности с высоты съёмки в 1 км — от 0,3 до 0,6 м.

В гиперспектрометре ВИД-ИКЗ использовались стеклянная призма с преломляющим углом 60° и призма постоянного угла отклонения. В первом случае ещё не происходит полного внутреннего отражения от второй поверхности и достигается высокая дисперсия. Для спектральных приборов призмы изготавливают из флинтгов и тяжёлых флинтгов, поскольку эти стекла обладают высокими показателями преломления и дисперсией.

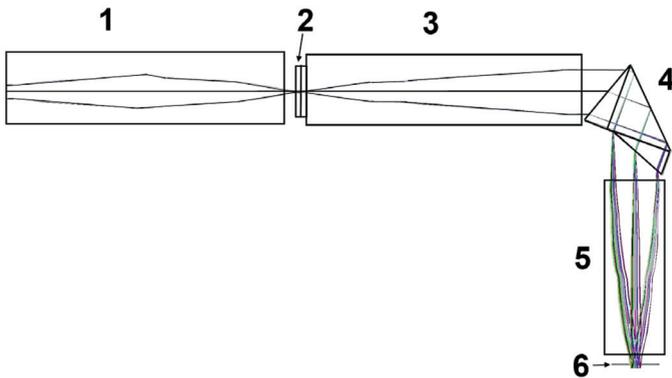


Рис. 1. Рассчитанный ход лучей в гиперспектральном модуле: 1 — входной объектив; 2 — диафрагменный узел со щелью; 3 — коллиматор; 4 — диспергирующий элемент; 5 — проекционный объектив; 6 — фотоприёмная матрица

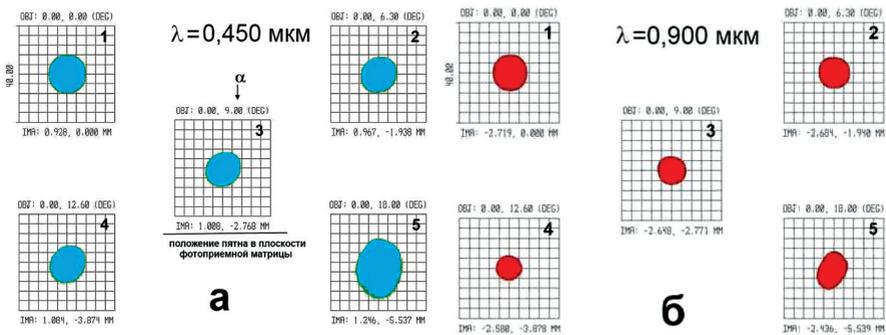


Рис. 2. Пятна рассеяния точки в плоскости изображения для длины волны: *a* — 450 нм; *б* — 900 нм

Технические характеристики гиперспектрального модуля ВИД-ИКЗ

Были проведены калибровочные измерения спектральной разрешающей способности гиперспектрального модуля. На рис. 3 цифрой 1 показана измеренная зависимость разрешающей способности $\Delta\lambda$ модуля ВИД-ИКЗ от длины волны, а цифрой 2 — аппроксимация $\Delta\lambda \sim \lambda^3$ где λ — длина волны, что соответствует теоретическим расчётам для призмного гиперспектрометра.

Следует отметить, что неравномерность разрешения по спектральной координате (см. рис. 3), свойственная всем призмным спектрометрам, имеет два противоположных эффекта: с одной стороны она приводит к ухудшению спектрального разрешения на красной границе спектра (разрешение ухудшается до 2–3 нм), а с другой, — ведёт к более густому расположению эквивалентных передаточных функций в сине-зелёной области спектра. Это свойство призм обеспечивает чёткое выделение спектральных линий поглощения во всем диапазоне длин волн.

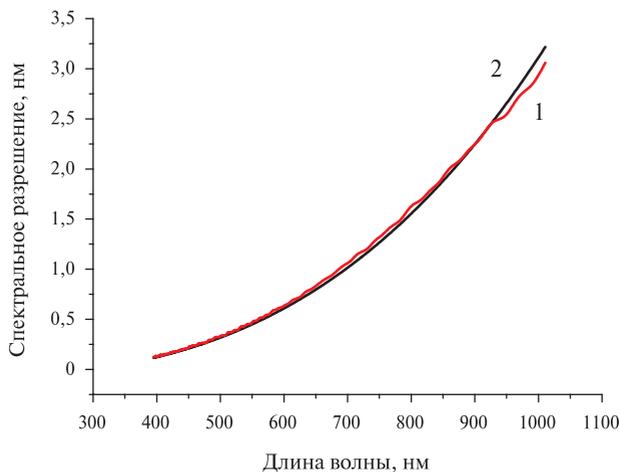


Рис. 3. Зависимость разрешающей способности модуля ИК-ВИДЗ от длины волны: 1 — измеренная; 2 — подгонка $\Delta\lambda \sim \lambda^3$



Рис. 4. Гиперспектральный модуль ВИД-ИКЗ

Анализ кривых, приведённых на рис. 3, позволяет утверждать, что на разработанных для серийного производства опытных образцов гиперспектрометров получено не только высокое для широкоугольной гиперспектрометрии пространственное разрешение, но одновременно, фактически, достигнуто ультраспектральное разрешение (в сине-зелёной области спектра) — порядка 0,2 нм.

Основные тактико-технические характеристики ВИД-ИКЗ приведены ниже, его внешний вид — на рис. 4.

Тактико-технические характеристики гиперспектрального модуля ВИД-ИКЗ

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	980
Число пикселей по пространственной координате	2048
Угловое разрешение	$3 \cdot 10^{-4}$ рад
Масса	8 кг

Оптическая схема гиперспектрометра БИК1 и расчёт пятен рассеяния

Гиперспектрометр БИК1, оптическая система которого приведена на рис. 5, 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 9 (фотоприёмная матрица).

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.

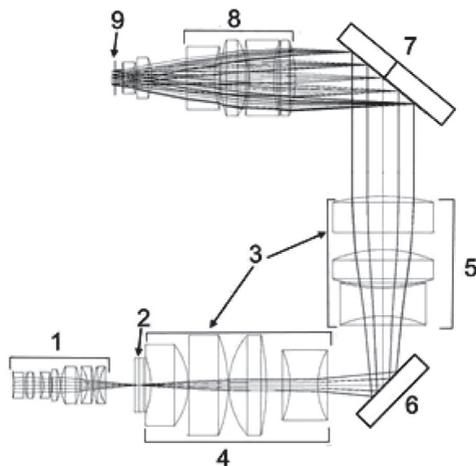


Рис. 5. Оптическая система гиперспектрометра БИК1

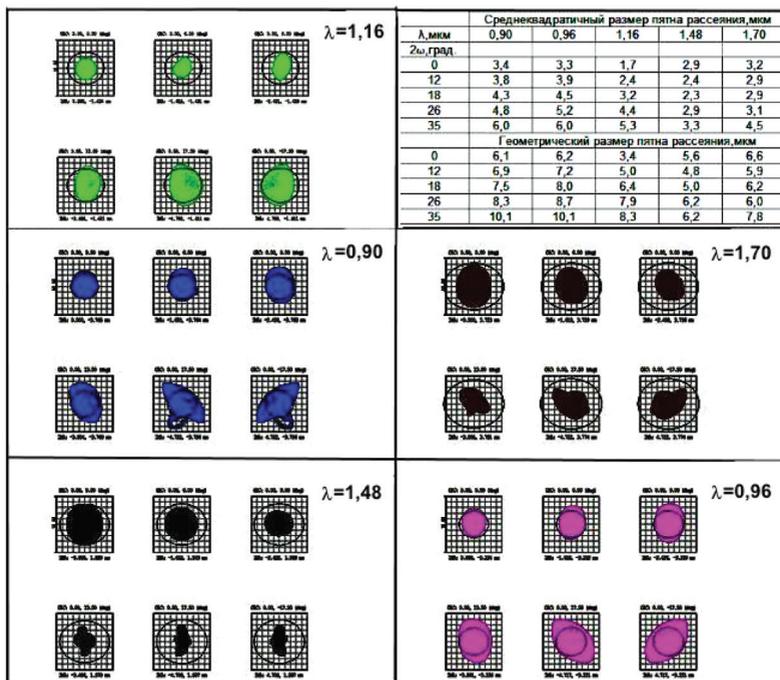


Рис. 6. Диаграммы пятен рассеяния для мгновенного поля зрения прибора БИК1

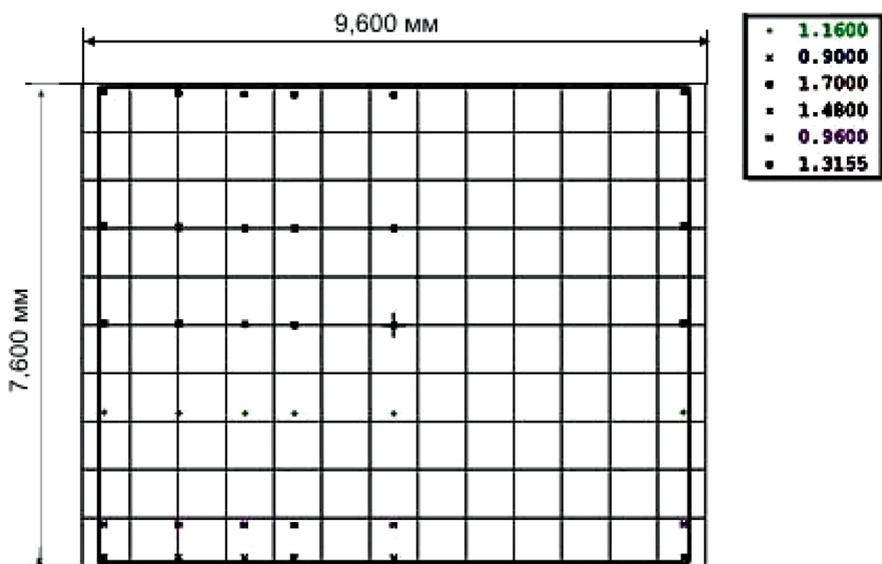


Рис. 7. Координаты лучей для различных длин волн в плоскости изображения гиперспектрометра

На рис. 6 приведён пример расчёта пятен рассеяния для визирувания точечного источника, а на рис. 7 — координаты лучей для различных значений длины волны в плоскости изображения гиперспектрометра.

Из анализа рис. 6 и 7 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. таблицу в верхней правой части рис. 6), т.е. пятно существенно меньше размеров пиксела использованной фотоприёмной матрицы (30×30 мкм). При фокусном расстоянии объектива в 15,4 мм размер пиксела на земной поверхности с высоты съёмки в 1 км будет равен 2 м (т.е. угловое разрешение составит $2 \cdot 10^{-3}$ рад). На основе этих расчётов была выбрана оптимальная конструкция гиперспектрометра БИК1.

Технические характеристики гиперспектрального модуля БИК1

С помощью монохроматора была проведена спектральная калибровка гиперспектрометра БИК1 по соответствию номера пиксела матрицы длине волны (чёрные квадраты на рис. 8).

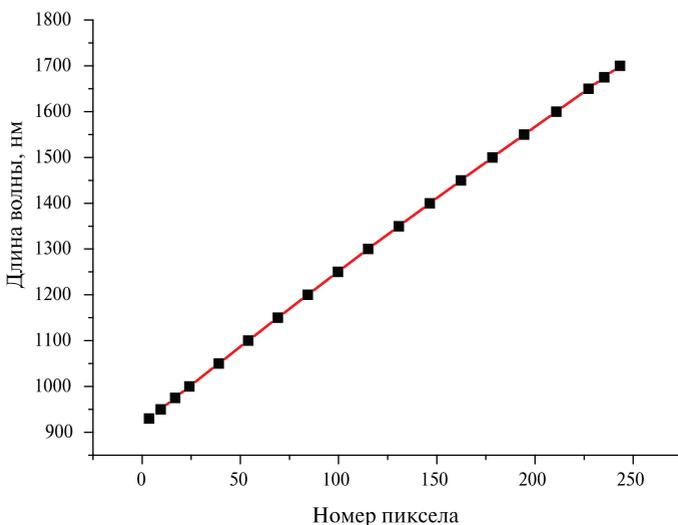


Рис. 8. График соответствия номера пикселя матрицы и длины волны светового луча



Рис. 9. Гиперспектрметр БИК1

Красной прямой на рис. 8 показана аппроксимация результатов измерений линейной зависимостью. Можно констатировать хорошее совпадение измерений и линейной зависимости, что свидетельствует об эффективности расчётов конструкции гиперспектрметра.

Тактико-технические характеристики модуля БИК1 приведены ниже, а его внешний вид — на рис. 9.

Основные тактико-технические характеристики модуля БИК1

Спектральный диапазон	900–1700 нм
Угол поля зрения	35°
Ширина спектральных каналов в пределах указанного спектрального диапазона	3,2 нм
Число спектральных каналов	250
Число пикселей по пространственной координате	320
Угловое разрешение	$2 \cdot 10^{-3}$ рад
Масса	8 кг

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

В лабораторных условиях проводились работы по спектральной калибровке каналов гиперспектрометров и оценке их спектральной разрешающей способности.

Гиперспектральный модуль ВИД-ИКЗ

На рис. 10 представлен измеренный гиперспектрометром ВИД-ИКЗ спектр ртутной лампы, а в табл. 1 приведены длины волн линий спектра, полученные по измерениям ВИД-ИКЗ, паспортные данные ртутной лампы (6035 фирмы Oriel instruments), а также значения разности между соответствующими длинами волн.

Таблица 1. Значения длин волн спектра ртутной лампы, измеренного гиперспектрометром ВИД-ИКЗ, длины волн эталонной ртутной лампы (6035 фирмы Oriel instruments) и их разность

Длины волн, измеренные гиперспектрометром ВИД-ИКЗ, нм	Длина волны спектральных линий эталонной лампы, нм	Разность соответствующих длин волн, нм
404,83	404,69	0,14
436,01	435,82	0,19
545,97	545,52	0,45
576,67	576,12	0,55
578,85	579,07	0,22

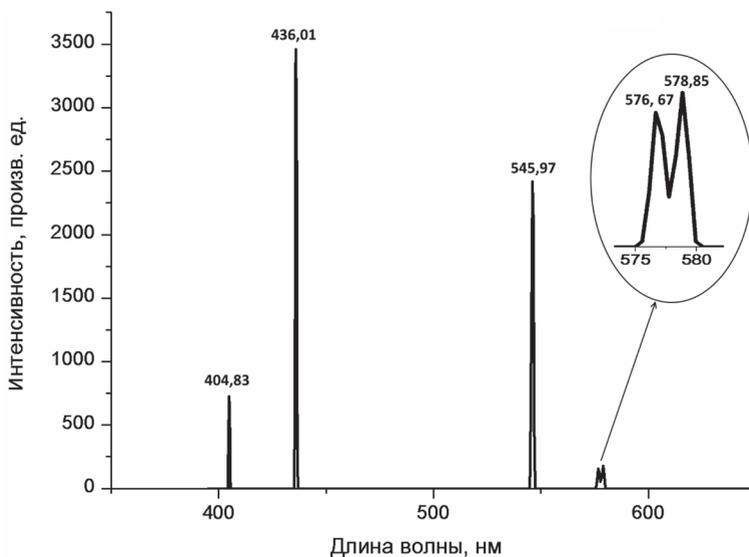


Рис. 10. Спектр ртутной лампы, измеренный гиперспектральным модулем ВИД-ИКЗ

Точность спектральной калибровки модуля ВИД-ИКЗ оценивалась сравнением положения пиков измеренного спектра ртутной лампы с её паспортными данными (см. табл. 1).

Из табл. 1 следует, что среднеквадратичное отклонение σ длин волн, измеренных ВИД-ИКЗ и задаваемых паспортом ртутной лампы, равно 0,348 нм. Таким образом, неопределённость истинного положения экспериментальных линий значительно меньше ширины спектрального канала, что свидетельствует о правильности заложенных в проектирование гиперспектрометра условий и его хорошее техническое исполнение. Кроме того, как видно из врезки на рис. 10, реальное спектральное разрешение модуля ВИД-ИКЗ составляет немногим больше 2 нм.

Гиперспектральный модуль БИК1

На рис. 11 показан измеренный гиперспектрометром БИК1 спектр ртутной лампы, а в табл. 2 приведены длины волн линий спектра, полученные по измерениям БИК1, паспортные данные ртутной лампы 6035 фирмы Oriel instruments, а также значения разности между соответствующими длинами волн.

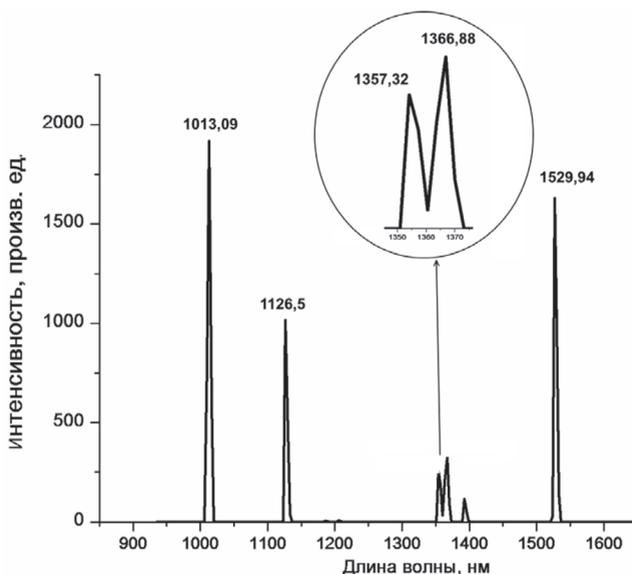


Рис. 11. Спектр ртутной лампы, измеренный гиперспектрометром БИК1

Таблица 2. Значения длин волн спектра ртутной лампы, измеренного гиперспектрометром БИК1, длины волн, полученные из литературных источников (паспорт лампы) 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	0,90
1126,50	1128,74	2,30
1357,32	1357,02	0,30
1366,88	1367,35	0,47
1529,94	1529,58	0,36

Из последнего столбца табл. 2 следует, что среднеквадратичное отклонение σ для разности длин волн первого и второго столбцов равно 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.

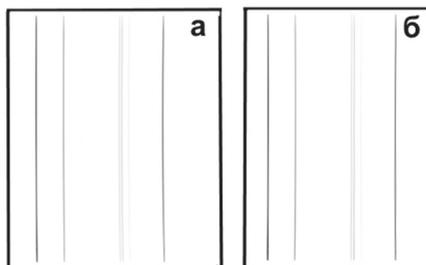


Рис. 12. Исправление дисторсии (распределение спектральной интенсивности линий ртутной лампы): *а* — исходное распределение; *б* — откорректированное распределение

Также были определены калибровочные процедуры для коррекции спектральных и пространственных дисторсий. Кроме того, была получена радиометрическая калибровочная кривая. Пример, как на основе калибровочных процедур происходит исправление спектральных дисторсий, показан на рис. 12.

ДАННЫЕ ЛЁТНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, ИХ ОБРАБОТКА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью проводимых лётных испытаний на самолёте Ан-2 стала проверка работоспособности гиперспектрометров ВИД-ИКЗ и БИК1 и оценка их основных технических характеристик. Съёмка проводилась 5 июля 2016 г. с 12:00 до 14:00 по московскому времени, что соответствовало высоте Солнца $56-53^\circ$. Скорость полёта самолёта составляла 120 км/ч, а высота — 800–900 м. Результаты съёмки регистрировались на борту самолёта в блоке управления и предварительной обработки. В нём наряду с данными гиперспектрометров записывались материалы синхронной чёрно-белой видеосъёмки и данные GPS-приёмника.

На этапе предварительной обработки гиперкубов, полученных обоими гиперспектрометрами, проводился пересчёт значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в значение коэффициента спектральной яркости (КСЯ), причём в качестве эталона использовалось белое прорезиненное полотно размером 3×3 м. Съёмка эталона проводилась в начале и в конце полёта. Переход от СПЭЯ к КСЯ позволил в значительной степени избавиться от мешающего воздействия атмосферы.

Материалы гиперспектральной съёмки

На рис. 13 приведены RGB-изображения (для БИК1 в условных цветах) одного и того же участка трассовой съёмки, полученные гиперспектрометрами ВИД-ИКЗ и БИК1. Цифрами на рисунках показаны объекты сцены, которые соответствуют: 1 — участку, занятому лесом; 2 — сельскохозяйственному посеву; 3 — участкам, занятым травой; 4 — приусадебным участкам и грунтовыми дорогам.

Сравнение гиперспектральных изображений с изображением, полученным с помощью кадровой видеосъёмки, позволило сделать вывод, что первые изображения практически не отличаются от видеокadra по своим геометрическим характеристикам. Таким образом, оба гиперспектрометра обладают достаточно высокой геометрической верностью. На снимках различаются детали размером в единицы метров (БИК1) и менее (ВИД-ИКЗ).

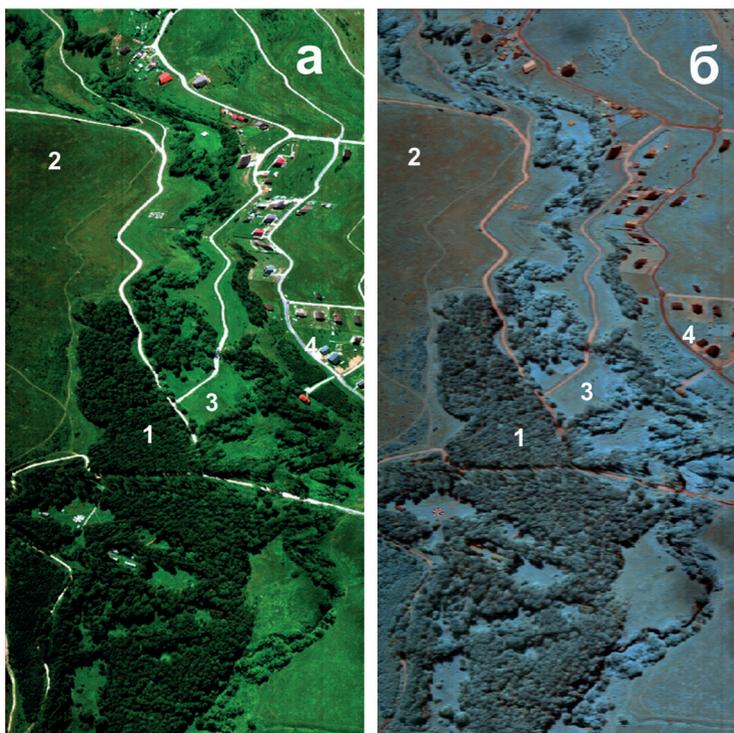


Рис. 13. RGB-изображения (в условных цветах) одного и того же участка трассы, полученные гиперспектрометрами: *а* — ВИД-ИКЗ; *б* — БИК1

Как видно на обоих рисунках, местность, подвергнутая съёмке, занята в основном тем или иным видом растительности и поэтому различать её по категориям с помощью формальных алгоритмов будет достаточно сложно.

Методика обработки гиперспектральных данных

Методика обработки гиперспектральных данных сенсоров ВИД-ИКЗ и БИК1 сводилась к следующему.

1. Формировались изображения первых главных компонент по данным гиперкубов обоих сенсоров (рис. 14).
2. Вычислялись гистограммы яркостей обеих первых главных компонент (рис. 15).
3. Выполнялась процедура представления гистограмм первых главных компонент в виде суммы гауссовых кривых (процедура «разделения смеси») [VanderPlas, 2016] (рис. 16).
4. Вычислялись матрицы точности классификации объектов 1–4 (см. рис. 13) по гистограммам первых главных компонент (вероятности ошибок первого и второго рода и вероятности правильной классификации) с использованием критерия «идеального наблюдателя».

Результаты обработки и их обсуждение

Переход от гиперспектральных изображений к изображениям первых главных компонент был вызван следующими соображениями: во-первых, значения спектральной яркости во многих каналах сильно коррелированы и потому не вносят дополнительного информационного вклада и, во-вторых, дисперсии яркости первых главных компонент составляют, как правило, более 70 % дисперсий исходных гиперспектральных изображений, т.е. первые главные компоненты содержат в себе большую часть информации, содержащейся в гиперкубах. Это обеспечивает получение максимального контраста изображений первых главных компонент. Рассмотрим изображения, представленные на рис. 14.

Визуальный анализ обоих изображений показывает, что они существенно различаются по контрасту. И если изображение первой главной компоненты для данных гиперспектрометра БИК1 позволяет сравнительно легко выделять различные классы объектов, то аналогичное изображение для ВИД-ИКЗ с трудом поддаётся интерпретации. Очевидно, это связано с тем, что большая часть сцены (см.

рис. 14) занята растительностью (лес, посев, трава), спектры которых в видимом диапазоне различаются не сильно. Это подтверждается структурой гистограмм первых главных компонент, полученных на основании рис. 14.

Действительно, как и следовало ожидать, формы гистограмм для гиперспектральных изображений существенно различаются (рис. 15). Гистограмма первой главной компоненты по данным БИК1 оказалась значительно шире, чем для аналогичной компоненты ВИД-ИКЗ. Это говорит о том, что данные гиперспектрметра БИК1 более информативны, чем данные ВИД-ИКЗ. Однако контрасты объектов 1–4 (см. рис. 13 и 14) невелики (особенно на изображении ВИД-ИКЗ), поскольку обе гистограммы практически не разделяются на парциальные составляющие, особенно гистограмма первой главной компоненты, полученной по данным ВИД-ИКЗ (см. рис. 15а).

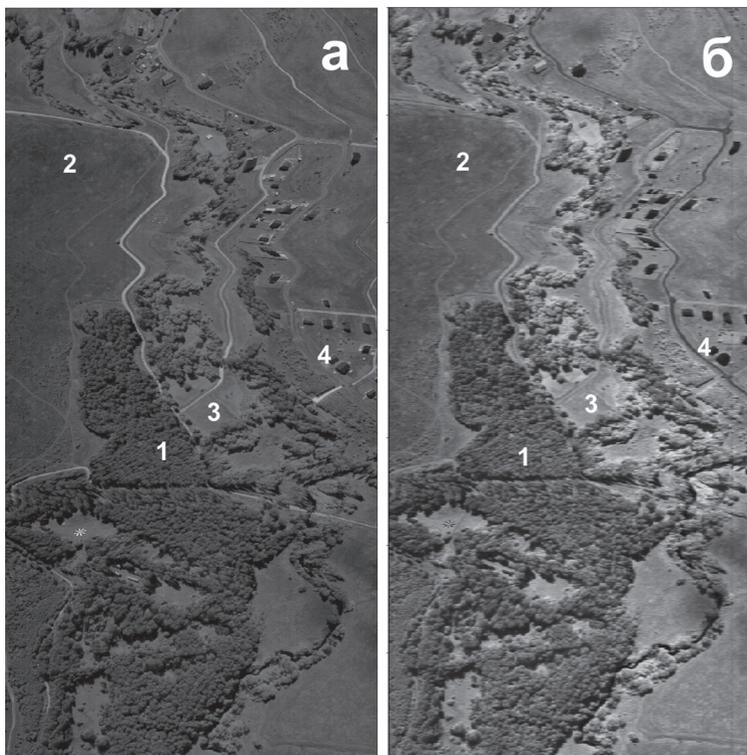


Рис. 14. Изображения снятой территории с помощью первых главных компонент: *а* — по данным ВИД-ИКЗ; *б* — по данным БИК1

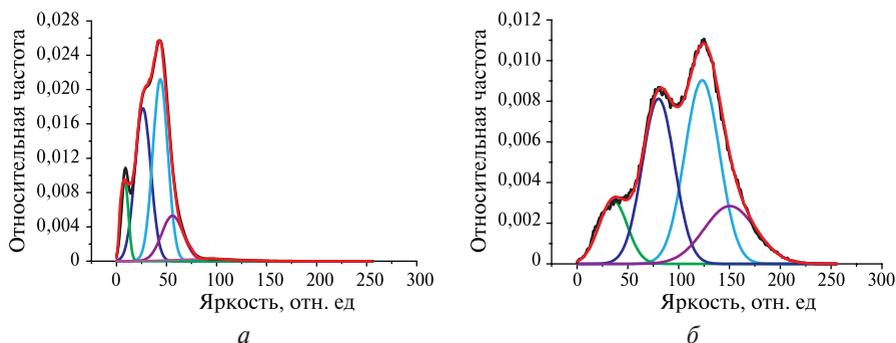


Рис. 15. Гистограммы изображений первых главных компонент: *а* — по данным ВИД-ИКЗ; *б* — по данным БИК1

Несмотря на то, что в формирование первых главных компонент вносят свой вклад все спектральные каналы гиперспектрометров, их относительные веса могут сильно отличаться. Анализ диагональных элементов ковариационной матрицы показывает, что основной вклад присущ таким участкам спектра с центрами: 478, 544, 670, 773, 860, 934, 961, 1019, 1241, 1560.

Следует отметить, что обе гистограммы достаточно хорошо аппроксимируются набором из четырёх гауссовых функций. Здесь зелёным цветом выделена парциальная гистограмма, соответствующая лесу (1 на рис. 13 и 14), синим — сельскохозяйственному посеву (2 на рис. 13 и 14), голубым — траве (3 на рис. 13 и 14) и сиреневым — приусадебным участкам и грунтовым дорогам (4 на рис. 14 и 15). Удовлетворительная аппроксимация парциальных гистограмм функцией Гаусса, во-первых, говорит о сравнительной однородности классифицируемых объектов, а во-вторых, позволяет утверждать, что основных типов объектов действительно четыре. Такое разделение обеих гистограмм на сумму гауссиан («разделение смеси») [VanderPlas, 2016] позволяет вычислить матрицы точностей (табл. 3 и 4) для соответствующих гистограмм, включающие в себя вероятности ошибок первого рода, находящиеся ниже диагонали матриц, и ошибок второго рода — выше диагонали. По диагоналям матриц располагаются значения вероятностей правильной классификации. Как и следовало ожидать, величины вероятностей ошибок первого и второго рода для некоторых объектов (например, травы, приусадебные участки и дороги) достаточно велики, а, соответственно, вероятности правильной классификации не слишком значительны. Например, вероятность правильной классификации объекта «приусадебные

участки и дороги» может даже считаться неудовлетворительной — порядка 0,5. Остальные объекты классифицируются отдельными гиперспектральными модулями с вероятностью 0,85 (в среднем).

Таблица 3. Матрица точности по данным гиперспектрометра ВИД-ИК3

Объект	Лес	Посев	Трава	Приусадебные участки и дороги
Лес	0,898	0,101	~0	~0
Посев	0,0437	0,810	0,0089	~0
Трава	0,00151	0,114	0,840	0,0458
Приусадебные участки и дороги	0,00206	0,0215	0,479	0,492

Таблица 4. Матрица точности по данным гиперспектрометра БИК1

Объект	Лес	Посев	Трава	Приусадебные участки и дороги
Лес	0,873	0,126	1.586e-04	~0
Посев	0,0359	0,859	0,104	~0
Трава	0,00134	0,089	0,848	0,0619
Приусадебные участки и дороги	0,00363	0,0217	0,457	0,521

Если предположить, что флуктуации спектральных яркостей в гиперспектрометрах ВИД-ИК3 и БИК1 независимы и вычислить для этого случая вероятности правильной классификации объектов зондирования при совместном использовании гиперспектральных данных, используя соотношение $p_{\Sigma} = p_1 + p_2 - p_1 p_2$, где p_1 и p_2 , соответственно, вероятности правильной классификации, взятые из диагоналей табл. 3 и 4, то их средние значения (за исключением объекта «приусадебные участки и дороги») окажутся порядка 0,98. Это является хорошим результатом, учитывая, что характер анализируемой сцены, касающийся типов объектов, был достаточно однородным (растительность). Что же касается такого объекта как «приусадебные участки и дороги», то вероятность его правильной классификации остаётся невысокой — 0,757, а вероятность перепутывания с объектом «трава» весьма неудовлетворительной — 0,218. Действительно, на приусадебных участках могут располагаться травяные газоны и огороды, что и приводит к таким результатам (табл. 5).

Таблица 5. Матрица точности по данным гиперспектрометров ВИД-ИКЗ и БИК1

Объект	Лес	Посев	Трава	Приусадебные участки и дороги
Лес	0,987	0,013	~0	~0
Посев	0,0016	0,973	0,001	~0
Трава	2e-05	0,010	0,976	0,003
Приусадебные участки и дороги	7e-05	5e-04	0,218	0,757

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка новых образцов авиационных гиперспектрометров видимого и ближнего инфракрасного диапазона — актуальное научно-техническое направление отечественного приборостроения. Использование гиперспектрометров (imaging spectrometers) вместо многозональных сканеров позволяет улучшить вероятностные характеристики распознавания и оценки состояния зондируемых объектов по сравнению с многозональными сканерами, поскольку полезная информация заключена во всей огибающей спектра принимаемого сигнала, а не в отдельных её спектральных выборках. Одним из важных этапов создания бортовых гиперспектральных сенсоров является этап проведения лётных испытаний для определения работоспособности, оценки технических характеристик и возможности сенсоров в части дистанционного распознавания типа и состояния зондируемых природных и антропогенных объектов. Выполненные исследования, в том числе и лётные эксперименты, позволили сделать вывод, что оба гиперспектрометра комплекса действительно обладают характеристиками, заложенными при их проектировании относительно пространственного разрешения и геометрической верности получаемых изображений. Кроме того, результаты правильной классификации объектов зондируемой сцены оказались вполне удовлетворительными, исключая объект «приусадебные участки» (в среднем равные вероятности 0,85), несмотря на то, что большинство объектов принадлежали одной категории (растительность). Совместное использование приборов комплекса позволяет повысить эту вероятность в среднем до 0,98. В то же время для такого объекта как «приусадебные участки и дороги», вероятность его правильной класси-

фикации остаётся невысокой — 0,757, а вероятность перепутывания с объектом «трава» неудовлетворительной — 0,218.

Совместное использование приборов комплекса позволяет повысить эту вероятность до 0,98, что свидетельствует о целесообразности использования комплекса гиперспектрометров в диапазоне длин волн 400–1700 нм для мониторинга объектов земной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

- [Виноградов и др., 2017а] *Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов А. И., Родионов И. Д., Родионова И. П.* Разработка и исследование гиперспектрометра ближнего инфракрасного диапазона БИК1: Препринт ИКИ РАН. Пр-2182. 2017. 22 с.
- [Виноградов и др., 2017б] *Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П., Родионов А. И., Родионов И. Д., Родионова И. П.* Авиационная система дистанционного мониторинга Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне (400–1700 нм) // Датчики и системы. 2017. № 5. С. 32–36.
- [Исимару, 1980] *Исимару А.* Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. Т. 2. М.: Мир, 1980. 280 с.
- [Rodionov et al., 2014] *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.
- [VanderPlas, 2016] *VanderPlas J.* Python Data Science Handbook. O'Reilly Media, 2016. 541 p.
- [Vinogradov et al., 2016] *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. Optical Technology*. 2016. V. 83. Iss. 4. P. 237–243.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Конструкция гиперспектрометров	4
Оптическая схема гиперспектрометра ВИД-ИКЗ и расчёт пятен рассеяния	4
Технические характеристики гиперспектрального модуля ВИД-ИКЗ	5
Оптическая схема гиперспектрометра БИК1 и расчёт пятен рассеяния	7
Технические характеристики гиперспектрального модуля БИК1	9
Лабораторные испытания гиперспектральных модулей	11
Гиперспектральный модуль ВИД-ИКЗ	11
Гиперспектральный модуль БИК1	12
Данные лётного эксперимента, их обработка и обсуждение результатов	14
Материалы гиперспектральной съёмки	15
Методика обработки гиперспектральных данных	16
Результаты обработки и их обсуждение	16
Заключение	20
Литература	21

055(02)2

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

Подписано к печати 24.11.2017 г.

Заказ 4166

Формат 60×84/16

Тираж 50

1,47 усл.-печ. л.

