

К. В. Бондаренко¹✉

Гиперспектральные приборы, тенденции и перспективы развития

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: banderars001@gmail.com

Аннотация. Гиперспектральные сенсоры революционизируют методы изучения земных покровов, обеспечивая беспрецедентную детализацию спектральных характеристик объектов. В представленном исследовании проведен комплексный анализ современных гиперспектральных технологий, включающий, рассмотрение физических принципов работы датчиков различных типов, критическую оценку их возможностей в прикладных задачах, мониторинг состояния окружающей среды, разведку полезных ископаемых, управление природными ресурсами. Особый акцент сделан на сравнительном анализе технических параметров современных гиперспектральных камер (SOC710VP, Headwall Nano-Hyperspec, Specim FX и др.) с указанием их эксплуатационных характеристик. Подробно обсуждаются ключевые технологические ограничения, перспективные направления развития, практические аспекты применения в российских климатических условиях.

Ключевые слова: гиперспектральная визуализация, методы дистанционного зондирования, геологоразведка, эко диагностика, спектрометрический анализ, БПЛА-носители

К. В. Bondarenko¹✉

Hyperspectral instruments, trends and development prospects

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: banderars001@gmail.com

Abstract. Hyperspectral sensors are revolutionizing Earth observation methods by providing unprecedented detail in the spectral characteristics of objects. This study presents a comprehensive analysis of modern hyperspectral technologies, including: a detailed examination of the physical operating principles of various sensor types, a critical assessment of their capabilities in applied tasks, such as environmental monitoring, mineral exploration, and natural resource management. Special emphasis is placed on a comparative analysis of the technical parameters of state-of-the-art hyperspectral cameras (e.g., SOC710VP, Headwall Nano-Hyperspec, Specim FX), with a focus on their operational performance. Key technological limitations, future development trends, and practical aspects of deployment in Russian climatic conditions are discussed in detail.

Keywords: hyperspectral imaging, remote sensing methods, geological exploration, ecological diagnostics, spectrometric analysis, UAV platforms

Введение

Современные гиперспектральные технологии совершили революцию в дистанционном зондировании Земли. В отличие от традиционных мультиспектральных систем, обеспечивающих 5-10 спектральных каналов, современные гиперспектральные датчики способны регистрировать от 200 до 300 узких спек-

тральных интервалов в видимых и ближних инфракрасных диапазонах. Такое высокое спектральное разрешение открывает уникальные возможности для детального анализа состава земной поверхности.

Как показали исследования последних лет, точность идентификации материалов по гиперспектральным данным достигает 85-92 % для большинства геологических объектов [1]. Однако эффективное использование этих технологий требует решения ряда проблемных вопросов:

- обработки больших массивов данных (один гиперспектральный снимок может занимать десятки гигабайт);
- необходимости специальных алгоритмов обработки;
- высокой стоимости оборудования и съемки.

В данной работе особое внимание уделено возможностям применения гиперспектральных технологий в условиях российских регионов, где особую актуальность приобретает мониторинг:

- состояния вечной мерзлоты в Арктике;
- последствий добычи полезных ископаемых;
- лесных экосистем Сибири.

Принципы работы гиперспектральных систем

Современные гиперспектральные датчики формируют спектральный куб данных, где каждому пикселю изображения соответствует полный спектр отражения в диапазоне 400-2500 нм. В зависимости от конструкции прибора различают три основных типа систем.

Линейные сканеры (whiskbroom) обеспечивают построчное сканирование местности с высоким пространственным разрешением (до 0,5-1 м при аэро-съемке). Основное преимущество – стабильность геометрических характеристик получаемых данных [2].

Пушбрумовые системы (pushbroom) регистрируют целую строку изображения одновременно, что существенно (в 5-7 раз) увеличивает производительность съемки. Однако, как отмечают Артюхина и Котов [3], такие системы требуют тщательной радиометрической калибровки.

Фурье-спектрометры – обеспечивают наивысшее спектральное разрешение (до 0,1 нм), но их применение ограничено необходимостью сложной математической обработки интерферограмм [4].

Для обработки гиперспектральных данных сегодня активно применяются методы машинного обучения, в частности:

- алгоритмы линейной декомпозиции спектров [5];
- нейронные сети глубокого обучения;
- методы кластерного анализа.

Эти подходы позволяют автоматизировать процесс выделения спектральных сигнатур различных материалов с точностью до 85-90 % [6].

Обзор современных гиперспектральных камер для дистанционного зондирования

1. Камера SOC710VP (Surface Optics Corporation) (рис.1.). Данная модель отличается уникальной конструкцией, в которой перемещение сенсора происходит непосредственно в плоскости за объективом. Как показали испытания, такая схема обеспечивает стабильную работу без необходимости сложных расчетов скорости сканирования в зависимости от экспозиции. В отличие от аналогов, система не требует использования специализированных поворотных столов.

Основные характеристики:

- спектральный диапазон: 400-1000 нм (видимый и ближний ИК диапазоны);
- спектральное разрешение: 4,68 нм (216 спектральных каналов);
- пространственное разрешение: 640×480 пикселей.

Особенности:

- компактный корпус (320×140×140 мм);
- вес 3,2 кг;
- встроенная система охлаждения.

Преимущества:

- возможность интеграции с различными платформами (наземные установки, БПЛА);
- встроенная система калибровки;
- низкий уровень шумов (SNR> 500:1)



Рис. 1. Гиперспектральная камера SOC710VP

2. Система Headwall Nano-Hyperspec (рис. 2). Разработанная специально для аэрофотосъемки, эта камера сочетает высокое спектральное разрешение с минимальным весом.

Технические параметры:

- спектральный диапазон: 400-1000 нм (видимый и ближний ИК диапазон);
- спектральная чувствительность: 6 нм;
- спектральная ширина: 20 нм;
- скорость сканирования: до 120 линий/сек;
- вес: 520 грамм.



Рис. 2. Гиперспектральная камера Headwall Nano-Hyperspec

3. Гиперспектральные камеры SPECIM FX10 (рис.3) демонстрируют надежные и точные результаты классификации на основе химического состава цели. Неконтактный неразрушающий оптический метод предлагает 100% охват визуализации.

Камеры серии «SPECIM» — это первые гиперспектральные инструменты, разработанные специально для промышленного машинного зрения. Высокая частота камер соответствует требованиям к скорости в отрасли, а надежная структура и небольшой размер позволяют реализовать гибкую установку.

Характеристики базовой модели:

- спектральный диапазон: 400-1000 нм;
- спектральное разрешение: 5,5 нм;
- спектральная чувствительность: 2,7 нм.



Рис. 3. Гиперспектральная камера SPECIM FX10

4. Pika L (рис.4) — это легкая и компактная гиперспектральная камера. Она предназначена для видимого и ближнего инфракрасного спектрального диапазона это позволяет её использовать для воздушного удаленного зондирования.

Основные параметры:

- спектральный диапазон: 400-900 нм (видимый и ближний ИК диапазон);
- спектральное разрешение: 2,1 нм (240 каналов);
- пространственное разрешение: 1600×1200 пикселей;
- динамический диапазон: 12 бит.

Преимущества для научных задач:

- открытый SDK для разработки алгоритмов;
- поддержка различных интерфейсов подключения;
- модульная конструкция для модернизации.



Рис. 4. Гиперспектральная камера Resonon Pika L

5. Профессиональная система HySpex VNIR-1600 (рис.5). Разработанная норвежской компанией Norsk Elektro Optikk – эта камера устанавливает новые стандарты точности в гиперспектральной съемке. Лабораторные тесты подтверждают превосходство системы по параметру SNR (>800 :1) в своем классе.

Технические особенности:

- спектральный диапазон: 400-1000 нм (видимый и ближний ИК диапазоны);
- спектральное разрешение: 3,5 нм (1600 каналов);
- пространственное разрешение: до 1600 пикселей по линии сканирования;
- скорость сканирования: программируемая до 300 линий/сек.

Ключевые применения:

- геологическая разведка;
- экологический мониторинг;

- точное земледелие;
- военные задачи.

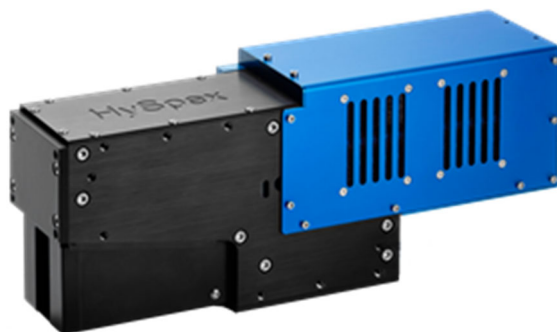


Рис. 5. Гиперспектральная камера HySpex VNIR-1600

Все рассмотренные системы прошли полевые испытания в различных климатических условиях и показали надежную работу при температурах от минус 20°C до плюс 50°C. Выбор конкретной модели должен основываться на требованиях конкретного проекта и учитывать такие факторы как:

- допустимое спектральное и пространственное разрешение;
- условия эксплуатации;
- бюджетные ограничения;
- необходимость обработки данных в реальном времени.

Сравнительная характеристика камер представлена в табл. 1

Таблица 1

Сравнительные характеристики

Модель	Спектральный диапазон, нм	Спектральное разрешение, нм	Пространственное разрешение, пиксели	Основные особенности
SOC710VP	400–1000	4,68	640×480	Компактность, универсальность
Headwall Nano-Hyperspec	400–1000	3,5	640	Легкий вес, адаптация для БПЛА
Specim FX10	400–1000	5,5	1024×1024	Высокая производительность, реальное время
Resonon Pika L	400–900	2,1	1600×1200	Низкая стоимость, доступность
HySpex VNIR-1600	400–1000	3,5	1600	Высокая точность, профессиональное применение

Практическое применение гиперспектральных технологий

Гиперспектральные технологии стали незаменимым инструментом в различных сферах деятельности благодаря своей способности детально анализировать спектральные характеристики объектов. Рассмотрим ключевые области их применения с конкретными примерами.

1. Сельское хозяйство [7]

В Израиле (компания Taranis) гиперспектральные камеры на БПЛА выявляют дефицит азота у пшеницы с точностью до 92 %.

В США (проект Sentera) технология используется для раннего обнаружения фитофтороза на картофельных полях, что позволяет сократить потери урожая на 30%.

Мониторинг орошения:

В Австралии (CSIRO) гиперспектральные системы применяются для оценки уровня влажности почвы, помогая фермерам сократить расход воды на 20-25 %.

2. Лесное хозяйство

Борьба с короедом: в Германии (European Space Agency) спутниковые гиперспектральные данные (Sentinel-2) помогают выявлять очаги поражения еловых лесов на ранних стадиях.

Оценка последствий пожаров: в Сибири (Институт космических исследований РАН) с помощью гиперспектральных систем определяют степень повреждения лесов после пожаров, что ускоряет восстановительные работы.

3. Экологический мониторинг [8]

Нефтяные разливы: в Мексиканском заливе (NASA AVIRIS) гиперспектральные снимки использовались для оценки масштабов разлива нефти после аварии на платформе Deepwater Horizon.

Загрязнение воды: в Финляндии (Specim) гиперспектральные камеры на дронах обнаруживают цветение токсичных водорослей в озерах, предотвращая экологические катастрофы.

4. Горнодобывающая промышленность

Поиск месторождений: в Чили (BHP) гиперспектральные системы на БПЛА обнаруживают залежи меди по спектральным аномалиям, сокращая затраты на разведку на 40 % [9]

Контроль добычи: в России (Росгеология) технология используется для мониторинга карьеров и предотвращения незаконной добычи полезных ископаемых.

5. Управление природными ресурсами

Эрозия почв: в Китае (Peking University) гиперспектральные данные со спутников помогают прогнозировать эрозию и планировать меры по защите сельхозугодий.

Мониторинг водных ресурсов: в Бразилии (INPE) технология используется для оценки потери леса в бассейне Амазонки и его влияния на местные реки.

6. Медицина и пищевая промышленность

Контроль качества продуктов: в Нидерландах (VanderSat) гиперспектральные системы на конвейерах позволяют выявлять плесень на фруктах с точностью до 95 %.

Диагностика заболеваний: в Японии (Tokyo University) разрабатываются гиперспектральные системы для неинвазивного обнаружения рака кожи на ранних стадиях.

7. Археология и культурное наследие

Поиск древних объектов: в Египте (University of Alabama) с помощью гиперспектральной съемки обнаружены неизвестные ранее гробницы под слоем песка.

Реставрация памятников: в Италии (CNR) технология помогает анализировать состав красок на фресках эпохи Возрождения, что упрощает их восстановление.

Технологические ограничения

Производство гиперспектрального оборудования требует дорогостоящих оптических компонентов и сложных инженерных решений, что значительно увеличивает конечную стоимость приборов. Например, цена промышленных гиперспектральных камер начинается от 50-70 тысяч долларов.

Проблемы обработки данных [10] Один час гиперспектральной съемки может генерировать до 1-2 ТБ информации, что требует:

- мощных вычислительных ресурсов;
- специализированного программного обеспечения;
- квалифицированных операторов.

Эксплуатационные сложности:

- приборы должны сохранять работоспособность в экстремальных условиях;
- температурные перепады (от минус 40°C до +60°C);
- повышенная влажность и запыленность;
- вибрационные нагрузки при аэросъемке.

Обсуждение

Исследуя все существующие способы регистрации спектров, мы пришли к выводу что, существует несколько основных проблем:

- скорость работы сканирования пространства;
- ширина спектрального диапазона в настоящее время представлена лишь в инфракрасном и видимом спектре;
- современные приборы имеют низкую спектральную чувствительность.

Таким образом, можно отметить следующую тенденцию в развитии приборов. Применение современных методов гиперспектрального сканирования, таких как интерференционный способ, позволяет значительно увеличить объем спектров, содержащихся в спектральном кубе местности или объекта. Это достигается за счет сокращения времени сканирования, что обусловлено уменьшением количества подвижных частей в конструкции прибора. При использовании ин-

терференции для сканирования можно также увеличить спектральный диапазон и спектральную чувствительность.

Также задача состоит в расширении границ применения гиперспектральных систем.

После выполнения всех описанных задач гиперспектральные приборы можно будет применять для следующих целей:

- военные цели (для обнаружения дронов, минных заграждений, людей и др) [11];
- производство лекарств;
- для поиска и обнаружения пропавших людей (для МЧС и полиции, при проведении поисковых методов);
- мониторинга в реальном времени любого объекта на земле и любого события.

Заключение

Гиперспектральные системы открывают новые горизонты для геологоразведки и экологического мониторинга. Их уникальная способность детектировать химический состав объектов на расстоянии уже сегодня позволяет:

- выявлять месторождения полезных ископаемых с точностью до 85 %;
- контролировать состояние окружающей среды в режиме реального времени;
- оптимизировать сельскохозяйственные процессы.

Ключевые направления совершенствования технологий гиперспектральных систем:

- снижение массогабаритных показателей (современные образцы весят уже менее 500 г);
- разработку эффективных алгоритмов сжатия данных;
- расширение спектрального диапазона до 2500 нм;
- адаптацию к российским климатическим условиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адамович Т. А. Изучение сезонной динамики вегетационного индекса NDVI по данным Landsat // Перспективы развития научных исследований в 21 веке: материалы XIII Международной научно-практической конференции. Махачкала: Общество с ограниченной ответственностью «Апробация». – 2017. – С. 99–100.
2. Magendran T., Sanjeevi S. Hyperion image analysis and linear spectral unmixing to evaluate the grades of iron ores in the part of Noamundi, Eastern India // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2016. – Vol. 27. – P. 117–127. – DOI: 10.1016/j.jag.2013.09.004.
3. Артюхина Н. К., Котов М. Н. Особенности построения видеоспектрометров дистанционного зондирования Земли из космоса // Приборы и методы измерений. – 2010. – № 1. – С. 56–62.
4. Гапонов М. И., Пожар В. Э., Мачихин А. С., Шерышев А. Е. Бортовой акустооптический гиперспектрометр для дистанционного зондирования // Материалы Международной научной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обра-

ботки информации» : сб. ст. Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН. – 2017. – С. 259–261.

5. Ломако А. А., Ширяева А. А. Методы и алгоритмы анализа гиперспектральных изображений // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы IV Международной научно-практической конференции. Минск: Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко – 2017. – С. 85–87.

6. Ramakrishnan D., Bharti R. Hyperspectral remote sensing and geological applications // Current Science. – 2015. – Vol. 108, No. 5. – P. 879–891.

7. Rianza A., Buzzi J., Garcia-Melendez E., Vazquez I., Bellido E. et al. Pyrite mine waste and water mapping using Hymap and Hyperion hyperspectral data // Environmental Earth Sciences. – 2011. – DOI: 10.1007/s12665-011-1422-0.

8. Pyankov S. V., Maximovich N. G., Khayrulina E. A. et al. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images // Mine Water and the Environment. – 2021. – DOI: 10.1007/s10230-021-00761-7.

9. Kumar C., Shetty A., Raval S., Champatiray P. K., Sharma R. Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – Vol. XL-8. – P. 455–461. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-8-455-2014.

10. Перцев Д. Ю. Система сжатия гиперспектральных данных // Информационные технологии в промышленности, логистике и социальной сфере : X Международная научно-техническая конференция : тез. докл. Брест : БрГТУ. – 2019. – С. 165–166.

11. Антонова В. А. Возможности гиперспектрального дистанционного зондирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2019. – № 11-2. – С. 35–38.

© К. В. Бондаренко, 2025