

УДК 681.785.5 : 621.383.7

**В. В. Донец<sup>1</sup>, Л. И. Муравский<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ  
E-mail: vvdonets@ukr.net; vvdonets@voliacable.com

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів  
E-mail: murav@ipm.lviv.ua

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ В БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ**

---

*Розглянуто особливості використання лінійних і матричних приймачів випромінювання у бортових гіперспектрометрах авіаційного та космічного базування (AVIRIS першого та другого покоління, APEX, HYDICE, «Ресурс-П» та ін.) для спектрометричного дослідження земної поверхні, підсупутникової валідації спектрометричних даних, а також у компактних приладах M3 та CRISM для дослідження поверхні Місяця та Марса.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Растущий интерес в области дистанционного зондирования Земли из космоса для мониторинга природных ресурсов, растительного покрова и состояния посевов, разведки полезных ископаемых, предупреждения опасности, а также ряда других приложений, в том числе спектрометрического исследования поверхности других планет, требует оперативной регистрации гиперспектральных изображений. Для этого создан класс уникальных приборов — гиперспектрометров, которые базируются как на самолетах (гиперспектрометр AVIRIS [29, 44, 60] CASI [34, 50, 60], AHS [60, 75], MIVIS [60], ROSIS [58, 60, 74], HyMAP [38, 47, 58, 60], ARES [58, 79], APEX [58, 70, 75], HYDICE [63] и др.), так и на спутниках (гиперспектрометр «Hyperion» [60, 66], ARTEMIS [28], CHRIS [39, 60], PRISMA [60], EnMAP [40, 41, 52, 53, 60], «Ресурс-П» [2—4, 13, 18], M3 [33, 45, 57, 68], CRISM [33, 36, 59]).

### **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ**

Принципы работы бортовых гиперспектрометров базируются на одной из двух технологий

формирования и считывания аэрокосмоизображений — «whiskbroom» и «pushbroom» [1, 51, 58].

Технология «whiskbroom» (*венчиком метлы — по дорожке, поперек трека сканера*) в гиперспектральном исполнении базируется на использовании гиперспектрометра со сканером, зеркало которого осуществляет механическое сканирование анализируемого участка поверхности Земли поперек направления движения (траектории) спутника и отражает каждый элемент участка через диспергирующий узел на линейный многоэлементный сенсор, который в гиперспектрометре регистрирует один элемент (пиксел) разложенного в спектр изображения участка одновременно всеми элементами сенсора. Такая технология использовалась в гиперспектральных спектрометрах AVIRIS первого поколения [29, 44, 60], HyMap™ [33, 38, 47, 58], ARES [58, 79], DAIS [58, 76], AHS [60, 75], «Probe-1» [31] и в сканерах на борту спутников «Landsat». Сканеры, построенные на базе такой технологии, из-за наличия движущихся элементов более склонны к износу и требуют больших материальных затрат по сравнению со сканерами, построенными по технологии «pushbroom».

В технологии (конфигурации) «pushbroom» (*метлой — по курсу*) используется гиперспектрометр, в котором одновременно регистрирует-

ся линия разложенного в спектр изображения участка поверхности Земли при помощи матрицы сенсоров. Исследуемая поверхность изображается в виде последовательного набора ее полосок, зарегистрированных поперек направления движения (курса) носителя.

Гиперспектральные сканеры «pushbroom» не имеют подвижных частей, в них поперечная развертка осуществляется считыванием сигналов с линеек матричного приемника, ориентированных поперек траектории полета носителя. При этом продольная развертка обеспечивается движением летательного аппарата, на котором установлен сканер. Гиперспектральные сканеры «pushbroom», как правило, легче и дешевле, чем «whiskbroom». Это гиперспектрометры авиационного базирования AVIRIS второго поколения [46, 57, 61], APEX [58, 70, 75], HYDICE [63], CASI [50, 58, 60], CASI-2 [34, 58], ROSIS [58, 60, 74], DAIS [47, 58, 76] и гиперспектрометры, расположенные на борту спутников EO-1 («Hyperion») [60, 66], ARTEMIS [28], EnMAP [40, 41, 52, 53, 58–60].

Российские гиперспектрометры для космического аппарата «Ресурс-П» [3, 4, 13] и др. были построены по технологии (конфигурации) «pushbroom».

Недостатком таких гиперспектральных систем является неоднородность чувствительности

Диспергирующий элемент (решетка или призма)

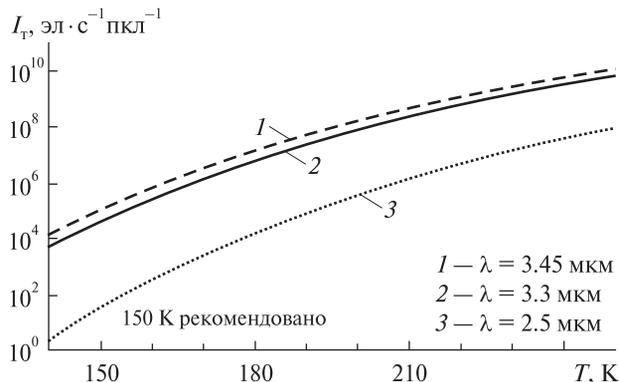
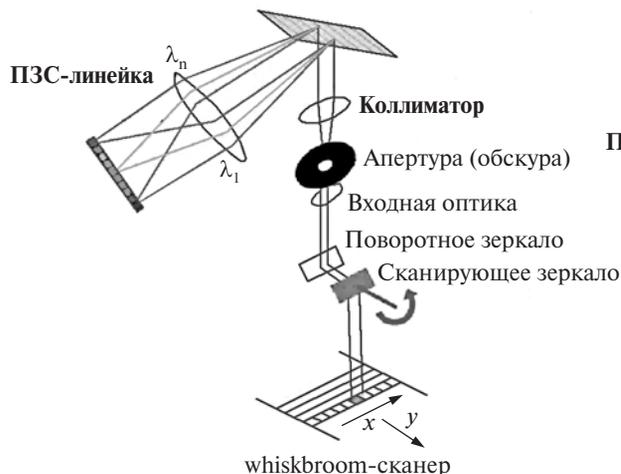


Рис. 1. Результаты измерений зависимости темного тока  $I_T$  от температуры  $T$  матричного HgCdTe-приемника с размерами пиксела  $30 \times 30$  мкм [37]

отдельных участков линейного или матричного сенсора [16]. При необходимости этот недостаток устраняется проведением специальной калибровки, при которой в память процессора вводятся поправочные коэффициенты для каждого пиксела линейного или матричного сенсора. При этом проводят также и коррекцию темнового тока сенсора. Пример результатов измерений зависимости темного тока матричного HgCdTe-приемника с размерами пиксела  $30 \times 30$  мкм от температуры (в диапазоне от 140 до 250 K) для трех длин волн (2.5, 3.3 и 3.45 мкм) [37] приведен на рис. 1.

Диспергирующий элемент (решетка или призма)

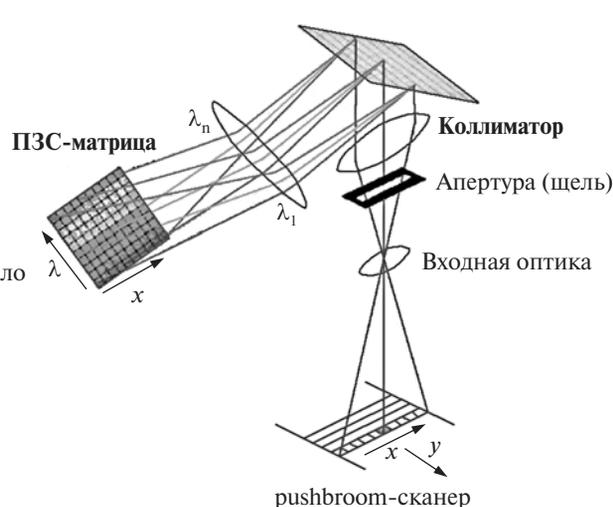


Рис. 2. Принцип действия гиперспектральных сканирующих систем типа «whiskbroom» и «pushbroom» [58]

## Основные технические характеристики гиперспектральных

| Авиа/космическая платформа                             | Гиперспектральная аппаратура (Изготовитель)          | Спектрометр  | Конфигурация сенсора  | Спектральный диапазон, нм   |
|--|--|--|---|---|
| АВИА<br>ER...2, WB-57                                  | AVIRIS-High Altitude [29, 43, 60]                    | 4 спектрометра на дифракционных решетках                           | Whiskbroom, 614 crosstrack (считываний по дорожке, поперек трека сканера) | 360...670<br>660...1280   |
| АВИА<br>Twin Otter                                     | AVIRIS-Low Altitude (США)                            |  |   | 1260...1880<br>1880...2510  |
| АВИА<br>Applanix 410                                   | ARES [58, 79] (Германия)                             | 5 дисперсионных спектрометров                                      | Whiskbroom  | 470...890<br>890...1350<br>1360...1800<br>2020...2420<br>8.1...12 мкм |
| АВИА<br>Twin Otter<br>ER-2, Proteus, Twin Otter, WB-57 | AVIRISng (США) [46, 49, 57, 61, 67]                  | Один спектрометр на выпуклой двухзональной дифракционной решетке   | Pushbroom   | 350...2510  |
| АВИА<br>Cessna-404                                     | HyMAP (Австралия) [33, 38, 47, 58]                   | 4 спектрометра на дифракционных решетках                           | Whiskbroom, 512 crosstrack (биконическая)                                 | 450...2500  |
| АВИА<br>Do228, Twin Otter, Short SC7, Falcon F20       | AREX [62, 69, 70, 75] (Германия, Бельгия, Швейцария) | Два спектрометра на дисперсионных призмах                          | Pushbroom   | 380...970<br>940...2500   |
| КА<br>SLV<br>VEGA, DNEPR, ROCKOT                       | EnMAP [40, 41, 52, 53, 60] (Германия)                | Два спектрометра на дисперсионных бипризмах                        | Pushbroom   | 420...1000<br>900...2450  |
| Авиа<br>CASA 212-200                                   | AHS [60, 75] (Бельгия)                               | Дихроичные фильтры и четыре дифракционных спектрометра на решетках | Whiskbroom 750 пиксел на линию  | 430...1030<br>1550...1750<br>1994...2540                              |
| КА   | ARTEMIS [28] (США)                                   | Один спектрометр на выпуклой двухзональной дифракционной решетке   | Pushbroom   | 3.3...5.4 мкм<br>8.2...12.7 мкм<br>400...2500                         |
| АВИА   | ROSIS-03 [58,60,74]                                  | Автоколлимационный спектрометр на плоской дифракционной решетке    | Pushbroom   | 430...860   |

систем космического, авиационного и наземного базирования

| Количество спектральных каналов | Спектральное разрешение, нм                           | Частота кадров (время интеграции) | Тип фотоприемника, розрядность АЦП                       | Дополнительные данные   |
|---------------------------------|---|-----------------------------------|--|---|
| 224                             | 9.7<br>9.5<br>10.0<br>10.0                            | 12<br>(87.5 мкс)                  | н/д, 12 бит<br>н/д, 12 бит<br>н/д, 12 бит<br>н/д, 12 бит | Линейка — 32 элемента (Si)<br>Охлаждаемая азотом линейка — 64 элемента из Si / InGaAs<br>Охлаждаемая азотом линейка — 64 элемента из антимонида индия (InSb)<br>Охлаждаемая азотом линейка — 64 элемента из антимонида индия (InSb) |
| 28<br>29<br>29<br>29<br>30      | 15...16<br>14...16<br>15...17<br>13...16<br>115...130 | 10...25 лин/с                     | 14...16 бит  | Охлаждаемые линейки Si (VIS), InSb (NIR и SWIR) и HgCdTe (TIR).   |
| 228                             | 5   | 10...100                          | КМОП Teledyne TCM6604A [30, 49, 67]                      | HgCdTe — 140 К, 640 × 480, 4 выхода, Ширина пикселя 27 мкм (используется 640 × 271)   |
| 126                             | 13...17   | 10                                | н/д<br>16 бит  | 4 линейки по 32 элемента (одна — Si и три InSb, с охлаждением 77 К)   |
| 114                             | 0.6...6.3   | 20...40                           | CCD 55-30 from E2V Technologies (GB)                     | 1252 × 1152 пикселей (используется 1000 × 393)<br>Размер пикселя 22.5 × 22.5 мкм  |
| 199<br>(221)                    | 13.5...7  |                                   | 1000x256 SWIR FPA (CMOS, Sofradir, France)               | HgCdTe — 130...165 К с сапфировым окном, 1000 × 256 пкл<br>Размер пикселя 30 мкм  |
| 94<br>155<br>(134 рабочих)      | 6.5<br>10   | 230 Гц<br>(4.4 мс)                | —<br>—   | Низкая чувствительность к поляризации   |
| 20<br>1                         | 30<br>200   | 12.5...35 Гц                      | 12 бит   | Линейка из кремния (Si)<br>Охлаждаемая линейка из антимонида индия (InSb)   |
| 42                              | 13  |                                   |  | Охлаждаемая линейка из антимонида индия (InSb)  |
| 7                               | 300   |                                   |  | КРТ   |
| 10                              | 400   |                                   |  | Охлаждаемая КРТ линейка   |
| 400                             | 5   | —                                 | н/д  | HgCdTe с охлаждением  |
| 115                             | 4   | 30...35 Гц                        | Thomson TNR 7895, THX7895 (с охлаждением)                | 552 × 516 пикселей (используется 512 × 115)<br>Размер пикселя 19 × 19 мкм   |

| Авиа/космическая платформа   | Гиперспектральная аппаратура (Изготовитель)                         | Спектрометр   | Конфигурация сенсора | Спектральный диапазон, нм   |
|------------------------------|---|---|----------------------|---|
| АВИА<br>Do 228               | DAIS 7915 [58, 76]  | Автоколлимационный спектрометр на плоских дифракционных решетках                          | Whiskbroom           | 400...1000<br>1500...1800<br>2000...2500<br>3.0...5.0 мкм<br>8.0...12.6 мкм |
| Авиа                         | AISA ID 1710 1996 [26], (Финляндия)                                 | Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)      | Pushbroom            | 400...1000  |
|                              | AISA Eagle [26], (Финляндия)  | Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)      | Pushbroom            | 400...970   |
|                              | AISA Hawk [26], (Финляндия)   | Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)      | Pushbroom            | 970...2450  |
|                              | AISA Dual [26], (Финляндия)   | Два спектрометра с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP) | Pushbroom            | 400...970<br>970...2450   |
| АВИА<br>King<br>Air C90A     | CASI-2 (Канада)<br>CASI-550 (Канада)<br>CASI-1500 (Канада)          | Спектрометры на дифракционных решетках [34, 50, 60]                                       | Pushbroom            | 405...950<br>400...1000<br>0.38...1.05                                      |
| КА<br>«Ресурс-П»             | ГСА для КА «Ресурс-П» (Красногорский ОМЗ, Россия) [4, 5, 6, 13, 18] | Спектрометр на дисперсионной призме [5, 6]  | Pushbroom            | 400...650<br>630...1000   |
| АВИА                         | ЗАО НПО ЛЕПТОН (Россия) [15]  | Спектрометр на дисперсионной призме   | Pushbroom            | 395...929   |
| АВИА<br>Ан-2                 | Бортовой видеоспектрометр (БВС) СОКОЛ-ГЦП (Россия) [1, 2]           | Спектрометр на дисперсионной призме   | Pushbroom            | 530...950   |
| КА «Астрогон»<br>и АВИА      | НТЦ «Реагент» (Россия) [20]   | Гиперспектральная видеокамера   | Pushbroom            | 450...900   |
| Наземный полевой спектрометр | ImSpector V8 [71] (Финляндия)                                       | Спектрометр с пропускающей решеткой (между двумя призмами) Prism-Grating-Prism (PGP)      | Pushbroom            | 380...780   |

Продолжение табл.

| Количество спектральных каналов | Спектральное разрешение, нм | Частота кадров (время интеграции)                     | Тип фотоприемника, разрядность АЦП                      | Дополнительные данные   |
|---------------------------------|-----------------------------|---|---|---|
| 32                              | 15...30                     | 6...24 Гц   | 15 бит  | Линейка 512 элементов ( Si)   |
| 8                               | 45                          |   |   | Линейка 32 элемента из антимонида индия (InSb)  |
| 32                              | 20                          |   |   | Линейка 32 элемента из антимонида индия (InSb)  |
| 1                               | 2 мкм                       |   |   | Антимонид индия (InSb) — одна площадка  |
| 6                               | 0.9 мкм                     |   |   | КРТ   |
| 244                             | 2.3                         | —   | Thomson TH7863  | 288 × 384 пкл (используется 1000 × 393)<br>Размер пикселя 23 × 23 мкм                                     |
| (126-программно)                |                             |   |   |   |
| 488                             | 2.9                         | —   | CCD камера 12 бит                                       | —   |
| 254                             | 8.5                         | —   | МТС камера 14 бит                                       | —   |
| 244                             | 2.9                         | —   | CCD камера 12 бит                                       | —   |
| 254                             | 8.5                         | —   | МТС камера 14 бит                                       | —   |
| 288                             | 1.8...2.2                   | —   | 512 пикселей по спектру, 14 бит                         | Программируется до 18 спектральных каналов  |
| 288                             | 1.9                         | —   |   | (используется 500 пикселей по спектру)  |
| 288                             | < 3.5 (2.3)                 | —   |   | (используется 1500 пикселей по спектру)   |
| ≥ 50                            | 5...7                       | —   | Матричные ФПЗС ВЗН-типа                                 | С охлаждением   |
| ≥ 50                            | 5...7                       | —   | формата 1024 × 256                                      |   |
| 290                             | 0.34...13.0                 | —   | KODAK KAI-4021 12 бит                                   | 2048 × 2048 пикселей<br>Размер пикселя 7.4 × 7.4 мкм<br>Размер 16.67 × 16.06 мм<br>Матрица без охлаждения |
| 105 (70...75)                   | 4.6...7.1                   | 25...50 Гц  | ФПЗС-камера 3.2 × 16 мм<br>Размер элементов 16 × 16 мкм | Размер кадра 200 × 1040 или 105 × 1040  |
| 250                             | —                           | —   | матрица IBIS-5.   | —   |
| 80                              | 5                           | 170 для 4 спектр. каналов и 90 для 16 спектр. каналов | Спектральная камера SpeCam 12 бит                       | 384 (по спектру) × 288 (по пространству)  |

| Авиа/космическая платформа   | Гиперспектральная аппаратура (Изготовитель) | Спектрометр   | Конфигурация сенсора   | Спектральный диапазон, нм |
|--|---|---|--|---------------------------|
| Наземный полевой аппаратно-программный спектрометрический комплекс | Проект 2416 УНТЦ [9, 14, 72] (Украина)      | Спектрометр на плоской дифракционной решетке                      | Pushbroom (один кадр, суммирование по столбцу)                           | 520...820                 |
| АВИА и КА  | Probe 1 [31, 60] США                        | —   | Whiskbroom 512 crosstrack (считываний по дорожке, поперек трека сканера) | 440...2430                |
| Микроспутник PROBA   | CHRIS (ESA's) [39, 60]                      | Спектрометр на дисперсионных призмах                              | Pushbroom  | 415...1050                |
| АВИА (Китай)   | PHI-1 [73]                                  | Спектрометр на отражающей дифракционной решетке                   | Pushbroom 376 пкл на линию   | 400...800                 |
|  | PHI-2 [73]                                  | Спектрометр на пропускающей дифракционной решетке                 | Pushbroom 652 пкл на линию   | 400...870                 |
|  | PHI-3 [73]                                  | Спектрометр на пропускающей дифракционной решетке                 | Pushbroom 1304 пкл на линию  | 410...980                 |
| КА 2011  | HypIRI VSWIR (США) [45, 77]                 | Спектрометр на двухзональной выпуклой дифракционной решетке       | Pushbroom  | 380...2510 (VSWIR)        |
| КА на Марс   | CRISM (США) [33, 36, 59]                    | —   | Pushbroom  | 3...12 мкм (TIR)          |
|  |   | Два спектрометра на выпуклых двухзональных дифракционных решетках |  | 362...1053<br>1002...3920 |
| КА на Луну 2008  | Moon M3 США-2008 [33, 45, 57, 68]           | Спектрометр на выпуклой трехзональной дифракционной решетке       | Pushbroom  | 430...3000                |

Основными рабочими параметрами гиперспектрометров являются:

- рабочий спектральный диапазон,
- количество спектральных зон и спектральное разрешение,
- пространственное разрешение,
- угол зрения (обзора),
- отношение сигнал/шум,
- динамический диапазон,
- разрядность цифровых данных,
- производительность (скорость записи информации и ее объем) и др.

Оптические схемы гиперспектрометров, построенных по технологиям «whiskbroom» и «pushbroom», приведены на рис. 2.

В таблице приведены основные технические характеристики известных гиперспектральных систем космического, авиационного и наземного базирования.

Основными узлами гиперспектрометров являются:

- входная оптическая система (как правило, телескопическая), со сканером или без него;

| Количество спектральных каналов | Спектральное разрешение, нм | Частота кадров (время интеграции) | Тип фотоприемника, разрядность АЦП                                | Дополнительные данные  |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---|--|
| ≥150                            | 2                           | Единичный пуск                    | Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS [54]<br>10 бит                | Матрица с внутренним АЦП, без охлаждения<br>1280 × 1024 пкл (используется: 1024 × 520 — измерительный канал; и 1024 × 334 — опорный канал)<br>Размер пикселя 6 × 6 мкм |
| 128                             | 12...16                     | —                                 | н/д<br>11 бит   | —  |
| 19 (при 25 м)<br>37 (при 50 м)  | 1.3...12                    | 12.7 мс                           | CCD 25-20 from E2V Technologies (GB) 12 бит                       | 1152 × 780 пкл<br>Размер пикселя 22.5 × 22.5 мкм   |
| 244                             | < 5                         | —                                 | CCD-камера 12 бит   | Приемник без охлаждения  |
| 247                             | < 5                         | —                                 | CCD-камера 14 бит   | Охлаждаемый приемник   |
| 124                             | < 5                         | —                                 | CCD-камера 14 бит   | Охлаждаемый приемник   |
| —                               | 10                          | 10...100                          | КМОП Teledyne TCM6604A<br>14 бит                                  | HgCdTe — 140 К,<br>640 × 480, 4 выхода,<br>Ширина пикселя 27 мкм   |
| 8                               | —                           | —                                 | HgCdTe  | —  |
| —                               | 6.55 нм/канал               | 1...30 Гц                         | Кремниевая ПЗС 14 бит<br>Teledyne TCM6604A [30, 49, 67]<br>14 бит | Охлаждение тремя криокулерами: (двух приемников и прибора)<br>Длинноволновая граница приемника 4050 нм   |
| 261                             | 10                          | —                                 | Teledyne TCM6604A [30, 49, 67]<br>14 бит                          | HgCdTe — 140 К,<br>используется 640 × 261 пикселей   |

• полихроматор, с входной щелью на входе, диспергирующим элементом и фотоприемником на выходе;

• электронные блоки управления, обработки и хранения информации.

Большинство полихроматоров выполнены с диспергирующим элементом на основе дифракционных решеток [25, 26, 28, 29, 43, 46, 50, 57, 58, 60, 61, 66, 74], работающих как на отражение, так и на пропускание [25, 26].

Часть гиперспектрометров, разработанных с участием европейских, в том числе и россий-

ских, специалистов, выполнена с призмными полихроматорами [2, 40, 41, 52, 53, 70, 75]. Есть также бортовые гиперспектрометры, использующие статические фурье-спектрометры [17, 21].

Небольшая часть гиперспектрометров использует и другие способы получения информации об интенсивности монохроматических составляющих анализируемого изображения, на основе, например, оптико-акустических фильтров [32, 43] и электронно-перестраиваемых фильтров на жидких кристаллах [32, 43].

## ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В БОРТОВЫХ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ

В бортовых гиперспектрометрах используются линейные и матричные сенсоры. Первые используются в приборах, имеющих технологию (конфигурацию) формирования и считывания аэро- и космоизображений — типа «whiskbroom». При этом съем информации поперек направления движения осуществляется благодаря использованию механического сканера — AVIRIS, ARES, NuMAP, DAIS [29, 38, 44, 46, 60, 76, 79].

В бортовых гиперспектрометрах аэро- и космоизображений, имеющих технологию (конфигурацию) формирования и считывания типа «pushbroom», используются матричные сенсоры [2, 18, 28, 34, 40, 41, 46, 50—53, 58, 60, 61, 63, 66, 70, 74, 75].

Приемниками излучения в бортовых гиперспектрометрах могут быть:

- линейные и матричные ПЗС (приборы с зарядовой связью);
- КМОП-приборы, т. е. КМОП-линейки и КМОП-матрицы, созданные по технологии построения электронных схем «комплементарный металл — оксид — полупроводник» (КМОП).

### *Сравнительный анализ ПЗС- и КМОП-сенсоров.*

К началу нынешнего столетия стало очевидным [23], что матричные ПЗС-сенсоры по сравнению с КМОП-сенсорами обеспечивают лучшие показатели при съемке динамичных и мелких объектов, поэтому их использование для построения систем, требующих высокого качества изображения (цифровых фото- и видеокамер, медицинского оборудования и т. д.), было более предпочтительным. Матричным КМОП-сенсорам же отводилась ниша устройств, для которых критична конечная стоимость (недорогие фотоаппараты, бытовая, офисная техника и игрушки).

Опыт производства, накопленный за годы развития КМОП, позволил с каждым новым поколением этих сенсоров существенно снижать фиксированные и случайные шумы, влияющие на качество изображения. Еще одно слабое место КМОП — искажения, появляющиеся при захвате динамического изображения вследствие слабой чувствительности сенсора. В современных устройствах их удается избежать, а захват

изображения без особых артефактов возможен со скоростью 15—30 кадров/с, и уже 0.3-мегапиксельные КМОП-сенсоры фактически избавлены от этой проблемы.

Однако победа в конкуренции технологий, скорее всего, лежит в плоскости уменьшения площади пиксела. Для успеха на рынке мегапиксельных сенсоров при диагонали 1/4 дюйма площадь пиксела должна составлять не более 3 мкм<sup>2</sup>. При всех усилиях производителей КМОП удовлетворить таким требованиям они пока не могут, поэтому, как считают эксперты, по крайней мере в ближайшее время в данной нише будет господствовать ПЗС.

В работе [65] приведены сравнительные характеристики некоторых ПЗС-матриц, используемых в мировом оптико-электронном приборостроении.

Проведем короткий сравнительный анализ ПЗС- и КМОП-матриц.

### **Преимущества ПЗС-матриц:**

- низкий уровень шумов,
- высокий коэффициент заполнения пикселей (около 100 %),
- высокая эффективность (отношение числа зарегистрированных фотонов к их общему числу, попавшему на светочувствительную область матрицы, для ПЗС — 95 %),
- высокий динамический диапазон (чувствительность).

### **Недостатки ПЗС-матриц:**

- сложный принцип считывания сигнала, а следовательно и технология,
- высокий уровень энергопотребления (до 2—5 Вт),
- дороже в производстве.

### **Преимущества КМОП-матриц:**

- высокое быстродействие (до 500 кадров/с),
- низкое энергопотребление (почти в 100 раз меньше по сравнению с ПЗС).
- дешевле и проще в производстве,
- перспективность технологии (на том же кристалле сравнительно легко реализовать все необходимые дополнительные схемы: аналого-цифровые преобразователи, процессор, память, получив, таким образом, законченную цифровую камеру на одном кристалле. Производством

такого устройства с 2002 г. занимаются совместно «Samsung Electronics» и «Mitsubishi Electric»).

#### **Недостатки КМОП-матриц:**

- низкий коэффициент заполнения пикселей, что снижает чувствительность (эффективная поверхность пикселя 75 %, остальное занимают транзисторы),
- высокий уровень шума (он обусловлен так называемыми темновыми токами — даже в отсутствие освещения через фотодиод течет довольно значительный ток), борьба с которым усложняет и удорожает технологию,
- невысокий динамический диапазон.

**Примеры использования КМОП- и ПЗС-сенсоров в бортовой аппаратуре.** Возможность совмещения на одном КМОП-кристалле функций приема и обработки изображений позволило создавать новую элементную базу для специальных применений, в том числе и для космической аппаратуры [8].

Видеосистема на основе цифрового КМОП приемника впервые была установлена в 1997 г. на КА «Arian 502» Европейского космического агентства, где успешно использовалась для наблюдения за процессом разделения спутников. Затем она была доработана для космического аппарата, который в 2003 г. полетел на Марс.

По заказу Европейского космического центра фирмой «Fill Factory» был разработан специальный КМОП-приемник для космической аппаратуры. Помимо фотоприемной секции на кристалле сформированы 10-бит АЦП, усилители, схемы ДКВ, схема поиска требуемого фрагмента изображения и гамма-корректор. Данные вводятся последовательно. Формат приемника —  $1280 \times 1024$  пкл (1.3 Мпкл) размером  $7 \times 7$  мкм, частота кадров —  $10 \text{ с}^{-1}$ , динамический диапазон — 76 дБ, напряжение питания — 5 В. Приемник может воспринимать как черно-белое, так и цветное изображение. Он характеризуется повышенной радиационной стойкостью и отвечает требованиям класса жесткости для космических применений. КМОП-приемники нашли применение в системе космической ориентации и звездных датчиках [22].

Фирмой «Cypress» созданы быстродействующие КМОП-приемники LUPA-1300 [55] и

LUPA-4000 [56] с прогрессивной разверткой и 16 аналоговыми выходами, что позволяет получить максимальную частоту кадров —  $450 \text{ с}^{-1}$ . Формат матрицы LUPA-1300 —  $1280 \times 1024$  пкл размером  $14 \times 14$  мкм, а матрицы LUPA-4000 —  $2048 \times 2048$  пкл размером  $12 \times 12$  мкм. Камера LUPA-1300 сформирована на кристалле размером  $19.2 \times 16.2$  мм, монтируемом в 145-выводной корпус, а камера LUPA-4000 — на кристалле  $24.6 \times 24.6$  мм, монтируемом в 127-выводной корпус. Приемники LUPA-1300 и LUPA-4000 нашли применения в современных приборах с цифровыми камерами. Так, например, в совместном белорусско-германском предприятии «Проскан Специальные инструменты» на базе матрицы LUPA-4000M создана система регистрации изображений [42], работающая в составе спектральных оптических приборов в диапазоне длин волн 400—1100 нм. Именно эти серии матричных приемников (LUPA-1300, LUPA-4000) [55, 56] и использовались при создании оригинальных оптико-электронных приборов и гиперспектрометров [7, 12, 42].

Сравнение КМОП и ПЗС показывает, что КМОП, работающие в видимом и ближнем ИК-диапазонах, уступают ПЗС по разрешающей способности, фоточувствительности, однородности и динамическому диапазону [8]. Поэтому космическую оптоэлектронную аппаратуру дистанционного зондирования Земли, высокоточные системы технического зрения, астрономическое, медицинское и биологическое оборудование предпочтительнее строить на основе ПЗС. Поскольку КМОП имеют свои преимущества, то это позволяет их также использовать в современных конструкциях бортовых оптико-электронных приборов, в частности гиперспектрометрах [7, 12, 19, 41, 56].

#### **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРАХ ЛИНЕЙНЫХ И МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Информация о разработке и производстве ПЗС-приборов приведена в работах [10, 11, 49, 78], а применение (включая калибровку) линейных и матричных приемников в составе оптико-электронных сканерах различного типа аэрофото-

снимков и спутниковых фотографий описаны в работах [8, 27, 49, 78]. Применение линейных и матричных приемников излучения в бортовых и полевых гиперспектрометрах имеет свои особенности, некоторые из них указаны ниже.

**В гиперспектрометре AVIRIS**, который имеет технологию формирования и считывания аэро- и космоизображений типа «whiskbroom», использованы четыре (сопрягаемые по спектру) спектрометра с индивидуальными охлаждаемыми жидким азотом (77 К) ПЗС-линейками из кремния, индия-галлия-арсенида и антимонида индия соответственно [29, 44, 60]. Спектральное изображение исследуемого пиксела на входной поверхности линеек каждого из спектрометров ориентировано вдоль направления движения носителя. При этом съем информации поперек направления движения осуществляется путем механического сканирования по второй координате.

**В гиперспектрометре AVIRISng-AVIRIS нового поколения** [46, 49, 57, 61, 67], в котором использована более совершенная технология формирования и считывания аэро- и космоизображений типа «pushbroom», применен один высококачественный (с перекрытием всего рабочего широкого спектрального диапазона) матричный охлаждаемый приемник излучения (сенсор) типа TSM6604A [30, 33, 45, 49, 67, 68], выполненный на основе полупроводникового соединения КРТ (кадмий-ртуть-теллур). В качестве охладителя используется миниатюрный кулер — криоохладитель.

Уникальность этого инфракрасного материала для сенсора ( $\text{HgCdTe}$ ) состоит в том, что его ширина запрещенной зоны, которая зависит от смеси ртути и кадмия, может быть настроена в широком диапазоне, примерно от 0.1 до 1 эВ и более. В соединении  $\text{HgCdTe}$ , описанному как  $\text{Hg}(1-x)\text{Cd}(x)\text{Te}$ , где атомы теллура составляют 50 %, а оставшаяся половина состоит из смеси ртути и кадмия (при  $x = 1$  остается  $\text{CdTe}$ ). Длинноволновая граница, при которой начинает работать полупроводниковый сенсор, обратно пропорциональна ширине запрещенной зоны. При комбинировании концентрации ртути и кадмия, что достигается технологией молеку-

лярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), появляется возможность обрезания длинноволновой границы сенсора в диапазоне от 1.7 до 16.5 мкм. С использованием технологии МЛЭ смеси  $\text{Hg}$ ,  $\text{Cd}$  и  $\text{Te}$ , а также дополнительные примеси можно точно контролировать. Этот метод «инженерной запрещенной зоны» позволяет растить сложные структуры в слое КРТ, которые обеспечивают высокий уровень производительности [49], в частности, при изготовлении универсального сенсора TSM6604A [30, 49, 67].

Этот уникальный охлаждаемый матричный приемник излучения TSM6604A был применен также в компактных спектрометрах типа M3 Spectrometer для исследования поверхности Луны [30, 33, 45, 67, 68] и CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) для исследования поверхности Марса [33, 36, 59]. Наличие одного широкодиапазонного приемника (TSM6604A) в выходной плоскости спектрометра, выполненного на базе дифракционной решетки и имеющего наложение спектров высших порядков, стало возможным благодаря использованию уникального (как по конструкции, так и по однородности спектральных параметров по двум координатам в рабочей зоне и по ее размерам) интерференционного клиновидного отрезающего спектроредительного фильтра перед приемником. Серии близких по конструкции (но предназначенные для работы только по одной координате) клиновидных фильтров для линейных ПЗС изготавливаются фирмой «Ocean Optics» (США) под шифром серии — LVF (Linear Variable Filters) [64].

**В гиперспектрометре APEX** [62, 69, 70, 75] в двух призмных полихроматорах, которые сопряжены с одним общим входным оптическим устройством, используются два типа матричных сенсоров:

- неохлаждаемый кремниевый ПЗС-приемник типа CCD 55-30 с размером пикселей  $22.5 \times 22.5$  мкм ( $1252 \times 1152$  пкл, из которых используется зона  $1000 \times 393$  пкл), производства фирмы «E2V Technologies» (GB), работающий в спектральном диапазоне 0.38—1.0 мкм;
- охлаждаемый парами азота с помощью микрокулера Стирлинга до температуры 130—165 К

КРТ (HgCdTe) КМОП-приемник типа 1000×256 SWIR FPA, производства фирмы SOFRADIR (F), работающий в спектральном диапазоне 0.94—2.5 мкм, имеющий размеры пикселей 30×30 мкм.

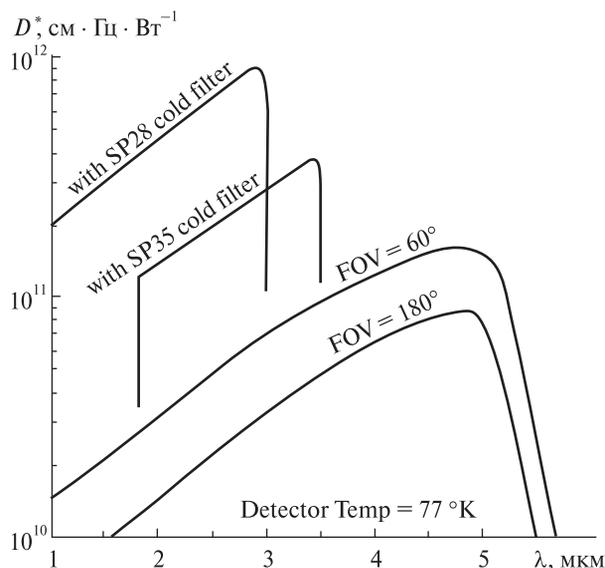
**В гиперспектрометре HYDICE [24, 35, 63]:**

- применение одного широкополосного матричного фотоприемника из антимолида индия, производства «Hughes Santa Barbara Research Center» (USA) с размером каждого пиксела 40 × 40 мкм. В этом приемнике применяется «холодный фильтр» (SP28 cold filter [48]), охлаждаемый до 65 К, чем было достигнута возможность сдвига кривой спектральной чувствительности в фиолетовую область спектра, обеспечив при этом работоспособность в спектральном диапазоне 400—2500 нм с минимально возможными шумами (рис. 3).

- для учета энергетических различий в разных частях видимого и коротковолнового ИК-спектра матрица разделена на три области (400—1000, 1000—1900 и 1900—2500 нм) с разными коэффициентами электронного усиления [24, 35].

**Гиперспектральная аппаратура для КА «Ресурс-П».** За основу построения гиперспектральной аппаратуры (ГСА) для КА «Ресурс-П» [2—4, 13, 18] по совокупности критериев сравнения в ФНПЦ ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» использована классическая схема спектрографа на основе диспергирующего призмного устройства [3, 4]. В каждом из каналов были применены оригинальные охлаждаемые трехканальные матричные ПЗС, работающие в режиме ВЗН (режим временной задержки и накопления) [13] формата 1024 × 256 пкл [4], созданные компаниями ЗАО НПП ЭЛАР — ЗАО НПП СИЛАР (г. Санкт-Петербург, Россия) [10, 11] специально для этой ГСА с размерами ячейки пиксела в три раза больше, чем в панхроматическом канале. Конструкция фотоприемной ячейки этих матриц обеспечивает расширенный в синюю область диапазон чувствительности [13].

**Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП».** В рамках Федеральной целевой Программы «Комплексные меры противодействия злоупотребления наркотикам и их незаконному обороту на 2005—2009 годы» ФНЦП ОАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» разработал и изготовил



**Рис. 3.** Спектральная обнаружительная способность  $D^*$  фотоприемников из антимолида индия с применением «холодных фильтров» (SP28 cold filter и SP35 cold filter [48])

экспериментальный образец бортового видеоспектрометра (БВС) «Сокол-ГЦП» [5, 6] для использования в составе авиационно-технического комплекса ФГУП «Госцентр «Природа». БВС работает в режиме «pushbroom» и выполнен по схеме дисперсионного спектрометра. При этом получено неискаженное изображение спектра входной щели на строках ПЗС-матрицы, а направление дисперсии строго согласовано с направлением столбцов ПЗС.

Бортовой видеоспектрометр предназначен для получения изображения поверхности Земли в 75 спектральных диапазонах (в интервале длин волн 530—950 нм со спектральным разрешением около 5 нм с аналогово-цифровым преобразованием и предварительной обработки гиперспектральной видеоинформации (ГВИ). Для этой конструкции использована ПЗС-матрица с размером чувствительного элемента 3.2 × 16.6 мм. Размер элементов (пикселей) составляет 16 × 16 мкм. Размер кадра — 200 × 1040 пкл (при частоте кадров около 25 Гц), с учетом бинирования строк — 105 × 1040 пкл (при частоте кадров около 50 Гц). Число спектральных каналов — 105, спектральное разрешение БВС в целом составляет 4.6—7.1 нм.

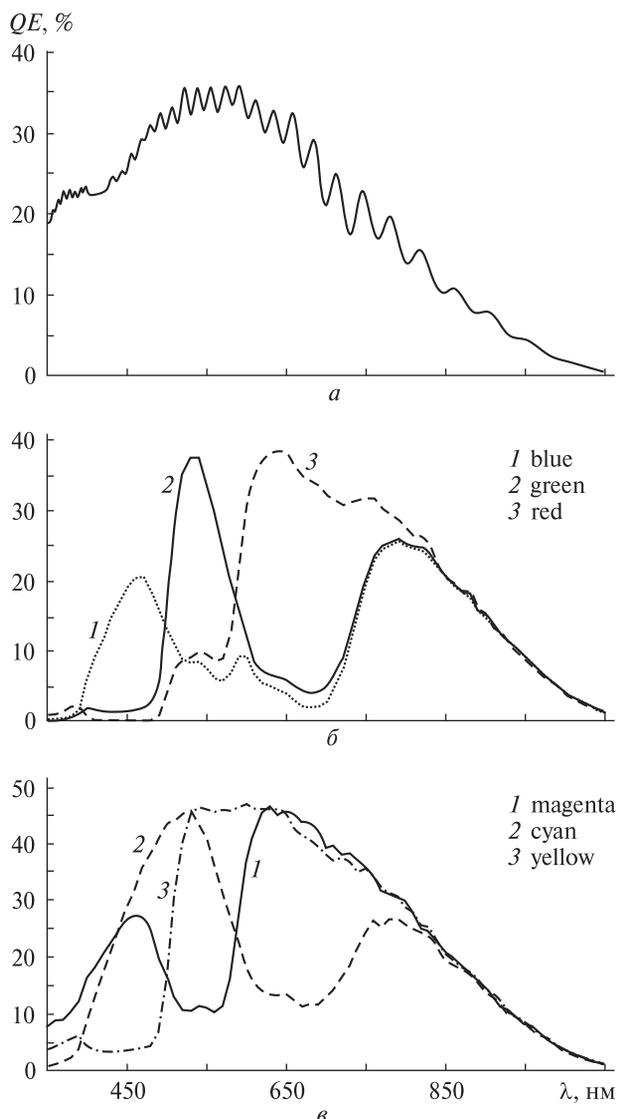


Рис. 4. Спектральная чувствительность и квантовый выход ( $QE$ ) трех модификаций матрицы «Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS» [54]

Из-за нелинейности дисперсии оптических материалов призм спектральное разрешение прибора в длинноволновой области спектра превышает разрешение в коротковолновой области примерно в десять раз. При заданном для БВС уровне спектрального разрешения в длинноволновой области, разрешение в коротковолновой области спектра оказывается избыточным ( $<0.7$  нм). Этот недостаток успешно исправляется при регистрации ин-

формации за счет использования нелинейного аналогового бинирования строк ПЗС.

**Проект УНТЦ 2416** [9, 14, 72]: применен один матричный КМОП-фотоприемник «Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS» [54], имеющий внутренний 10-битный АЦП) для одновременной регистрации двух информационных полей — измеряемого и опорного, как двух изображений в одном кадре. Одновременно используется прием для увеличения как чувствительности, так и соотношения «сигнал — шум» путем суммирования по столбцам; при этом полезный сигнал возрастает в  $N$  раз, а шум — в  $\sqrt{N}$  раз (так как это чисто фотонный шум, остальными шумами можно пренебречь). Темновой ток регистрируется отдельно в аналогичных условиях, но при закрытом затворе.

Матрица KAC-1310 [54] имеет три модификации спектральной чувствительности (см. рис. 4): монохромная (а) и два типа цветных матриц — RGB (б) и CMY (в), что удобно при конструировании гиперспектральной аппаратуры разного типа и назначения.

**Приборы для исследования поверхности Луны и Марса.** Для спектрометрического исследования поверхности Луны в NASA (США) создан компактный гиперспектрометр типа M3 Spectrometer [33, 45, 57, 68]. Он оригинальный по своей конструкции, выполнен в виде компактного внеосевого оффнер-спектрометра, имеющего сложную двухзональную выпуклую дифракционную решетку и один охлаждаемый матричный КРТ-сенсор типа TCM6604A фирмы «Teledyne» (США) [30, 49] ( $640 \times 480$  пкл), изготовленный на базе архитектуры КМОП, с трехзонным ИК-фильтром для отрезания трех порядков спектра и полосовой выборки в диапазоне  $0.4\text{--}3.5$  мкм (рис. 5) [49]. Охлаждение сенсора в гиперспектрометре M3 до температуры 150 К производится с помощью одного криокулера K508 фирмы «Ricor».

Для гиперспектрометрического исследования поверхности Марса предназначен компактный спектрометр типа CRISM [33, 36, 59]. Он тоже оригинален по своей конструкции, выполнен в виде одного 100-мм телескопа, спектроделителя и двух компактных спектрометров (видимого и

ИК-диапазонов). Каждый из этих спектрометров имеют двухзональную дифракционную решетку и охлаждаемый матричный сенсор. На каждой дифракционной решетке одна зона оптимизирована для более коротких длин волн, а вторая — оптимизирована для более длинных волн.

В первом спектрометре (*VNIR*-диапазона) кремниевый матричный сенсор (рис. 6) работает в области спектра 362 — 1053 нм, а во втором, в ИК-диапазоне, в интервале длин волн 1002—3920 нм, используется матричный КРТ-сенсор (рис. 7) типа TSM6604A 640 × 480 пкл с 3-зонным ИК-фильтром для отрезания трех порядков спектра. Длинноволновая граница этого приемника — 4050 нм [59].

Охлаждение кремниевого сенсора (*VNIR*-диапазона) до температуры 213 К позволяет сохранять квантовую эффективность при длинах волн более 900 нм. Охлаждение КРТ-сенсора до температуры не выше 150 К позволяет минимизировать его темновой ток.

Охлаждение гиперспектрометра CRISM производится с помощью трех криокулеров Стирлинга типа RICOR K508. При этом первые два криокулера индивидуально охлаждают матричные сенсоры (при 213 К и меньше 120 К соответственно), а третий выполняет следующие задачи:

- поддержание температуры спектрометров на уровне или ниже 198 К, чтобы минимизировать тепловое ИК-излучение фона;
- поддержание температуры оптики около 213 К — для минимизации ее теплового ИК-излучения;
- поддержание температуры механических кулеров выше 233 К для обеспечения эффективности охлаждения и для предотвращения утечки хладагента.

## ВЫВОДЫ

Последние разработки спутников наблюдения Земли и систем подспутниковой валидации (бортовых платформ авиационного базирования и наземных систем) продемонстрировали, что гиперспектральные системы и приборы являются ценным инструментом для количественной

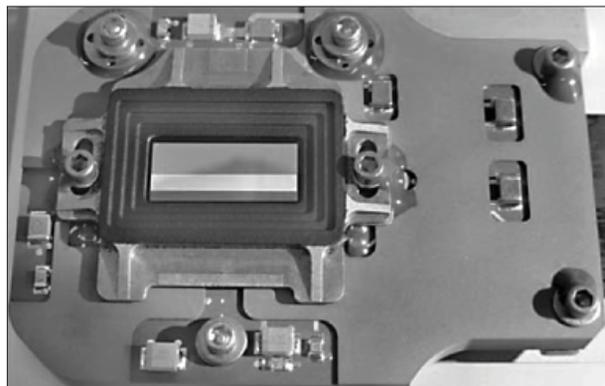


Рис. 5. Узел бортового спектрометра М3 с сенсором TSM6604A 640 × 480 пкл и трехзонным ИК-фильтром [49]



Рис. 6. Кремниевый матричный сенсор *VNIR*-диапазона с тепловой изоляцией и кабелями [30, 36]



Рис. 7. Матричный КРТ-сенсор ИК-диапазона с тепловой изоляцией [36]

оценки соответствующих параметров, поддерживающих процессы для наземных экосистем.

Немалую роль в работе каждой гиперспектральной системы играет правильно подобранное для конкретной задачи и оптической схемы фотоприемное устройство, содержащее матричный или линейный приемник излучения.

В данном обзоре рассмотрены как общий подход к проблеме, так и особенности использования приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах авиационного и космического базирования (AVIRIS первого и второго поколения, APEX, HYDICE, «Ресурс-П» и др.) для спектрометрического исследования земной поверхности, подспутниковой валидации спектрометрических данных, а также в компактных приборах типа M3 Spectrometer и CRISM для исследования поверхности Луны и Марса. Каждый из этих матричных фотоприемников обладает специфическими свойствами и особенностями его применения и эксплуатации.

Результаты обзора будут полезны исследователям и разработчикам оптико-электронных приборов, особенно гиперспектральной аппаратуры нового поколения.

*Частично поддержана проектом УНТЦ № 5240.*

1. Андрианов В. Ю. Англо-русский толковый словарь по геоинформатике [Электронный ресурс] // — Режим доступа: <http://www.dataplus.ru/Dict/show.asp?ID=1960>
2. Андронов А. «Новый спутник «Ресурс-П» не выведет Россию в лидеры» [Электронный ресурс] // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации. — 24 мая 2004 г. — Режим доступа: <http://www.gisa.ru/38142.html>
3. Архипов С. А., Линько В. М., Бакланов А. И. Гиперспектральная аппаратура для КА «Ресурс-П» и перспективы ее модернизации // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социальном развитии общества», Самара, 28 сентября — 3 октября 2009 г. — Самара, 2009. — С. 186.
4. Архипов С. А., Линько В. М., Бакланов А. И. и др. Выбор схемного решения гиперспектральной съемочной оптико-электронной аппаратуры для КА «Ресурс-П» [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2008\\_conf\\_pdf/C/Arxipov-linko.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/C/Arxipov-linko.pdf)
5. Архипов С. А., Линько В. М., Лукашевич Е. Л. Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП» // Шестая всерос. откр. ежегод. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, ИКИ РАН, 10—14 ноября 2008 г.: Сб. тез. конф. — М., 2008. — Режим доступа: <http://d902.iki.rssi.ru/theses-cgi/thesis.pl?id=1476>
6. Архипов С. А., Линько В. М., Лукашевич Е. Л. Бортовой видеоспектрометр «Сокол-ГЦП» [Электронный ресурс] // Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2008\\_conf\\_pdf/C/Arxipov%20-%20Sokol.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_conf_pdf/C/Arxipov%20-%20Sokol.pdf)
7. Белов А. А., Бер П., Воронцов Д. В. и др. Прототип распределенной бортовой вычислительной системы [Электронный ресурс]. — М., 2004. — (Препринт / РАН. Ин-т прикладной математики им. М. В. Келдыша (по проекту № 2323)). — Режим доступа: [http://www.keldysh.ru/papers/2004/prep25/prep2004\\_25.html](http://www.keldysh.ru/papers/2004/prep25/prep2004_25.html)
8. Богомолов Е. Н., Василец Н. В., Кривенков Б. Е. и др. Фотодиодный оптико-электронный измеритель размеров «СЕНСОР» // Автотметрия. — 1989. — № 5. — С. 83—91. — Режим доступа: [http://www.iae.nsk.su/images/stories/5\\_Autometria/5\\_Archives/1989/5/83-91.pdf](http://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/1989/5/83-91.pdf)
9. Виготовлення польового спектрофотометра для тестування стану рослинності [Електронний ресурс] // Науково-технічні (інноваційні) проекти НАН України. — Режим доступу: <http://www.nas.gov.ua/innovations/years/2008/802/Pages/default.aspx>
10. Вишневецкий Г. И., Коссов В. Г., Нестеров В. К. и др. Разработки и производство ФПЗС и цифровых камер на их основе. Часть I. [Электронный ресурс] // ТелеФото Техника: Интернет-журн. — 01.11.2008. — Режим доступа: <http://www.telephototech.ru>
11. Вишневецкий Г. И., Коссов В. Г., Нестеров В. К. и др. Разработки и производство ФПЗС и цифровых камер на их основе. Часть II. [Электронный ресурс] // ТелеФото Техника: Интернет-журн. — 04.06.2009. — Режим доступа: <http://www.telephototech.ru>
12. Воронай Е. С., Гулис И. М., Купреев А. Г., Костюкевич А. Г. Спектральные приборы на основе дисперсионного модуля с микрозеркальной матрицей [Электронный ресурс]. — Минск. — Режим доступа: [http://www.oop-ros.org/maket/part1/refl\\_1/1.2.2.pdf](http://www.oop-ros.org/maket/part1/refl_1/1.2.2.pdf)
13. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Стратилатов Н. Р. и др. Космический аппарат «Ресурс-П» // Геоматика. — 2010. — № 4. — С. 23—26. — Режимы доступа: [http://geomatika.ru/pdf/2010\\_04/2010\\_04\\_004.pdf](http://geomatika.ru/pdf/2010_04/2010_04_004.pdf), [http://geomatika.ru/pdf/2010\\_04/2010\\_04.pdf](http://geomatika.ru/pdf/2010_04/2010_04.pdf)
14. Донец В. В. Обгрунтування структури апаратурно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2010. — 19 с.
15. Кондратин Т. В., Козодеров В. В., Топчиев А. Г. и др. Технология оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по данным аэрокосмического мониторинга [Электронный ресурс]. — М.: МФТИ, МГУ, Институт выч. математики РАН, НПО «Леп-

- тон», 2007. — Режим доступа: [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2007\\_pdf/rasten/kondratin.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2007_pdf/rasten/kondratin.pdf)
16. Кулев М. О., Барышникова Е. В., Павлов А. Н. и др. Оценка влияния неоднородности чувствительности ячеек ПЗС на погрешность датчика координат очага возгорания [Электронный ресурс] // Ползуновский Вестник. — 2007. — № 3. — С. 56—58. — Режим доступа: [http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2007\\_03/pdf/056%20kule.pdf](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2007_03/pdf/056%20kule.pdf)
  17. Лапчук В. П., Ивченко В. Н. Статический фурье-спектрометр видимого диапазона для микроспутников [Электронный ресурс] // Вторая всерос. отк. ежегод. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. тез. конф. — М.: ИКИ РАН, 2004. — Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/earth/tes.pdf>
  18. Новый российский спутник дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» будет работать на орбите не менее пяти лет [Электронный ресурс] // Новости космонавтики: Архив новостей. — 2009. — Вып. 790. — Режим доступа: <http://www.novostikosmonavtiki.ru/content/news.shtml>
  19. Овчинников А. М., Платонов А. К. Гиперспектральная система зрения для мобильных роботов [Электронный ресурс] // Photogr. Eng. and Remote Sens. — 1997. — 63, N 7. — Режим доступа: <http://tz2010.cosmos.ru/ppt/platonov.ppt>
  20. Орлов А. Г. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М.: ИКИ РАН, 2008. — 26 с. — Режим доступа: <http://www.iki.rssi.ru/rus/orl.pdf>
  21. Попов М. А., Станкевич С. А., Ковальчук С. П. и др. Возможности спутниковых гиперспектрометров при решении тематических задач природопользования, экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс] // 8-ма Міжнар. наук.-практична конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях», Київ — Харків — АР Крим, 7—11 вересня 2009 р.: Зб. наук. праць. — Режим доступа: [http://www.itel.nas.gov.ua/activity/nauk\\_trud\\_8\\_2009\\_web.pdf](http://www.itel.nas.gov.ua/activity/nauk_trud_8_2009_web.pdf)
  22. Стемповский А., Шилин В. КМОП — фотодиодные СБИС. Перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.electronics.ru/issue/2003/2/3/>
  23. Чем матрица CCD отличается от матрицы CMOS? [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.spusams.ru/ccd-cmos.html>
  24. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
  25. Aikoi Mauri. Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph [Электронный ресурс]. — Finland ES-POO 2001. — Режим доступа <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P435.pdf>
  26. AIS4 Dual [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.channelsystems.ca/documents/AISADualver1-07.pdf>
  27. Aksakal S. KOCAMAN sensor modeling and validation for linear array aerial and satellite imagery DISS. N 18120 [Электронный ресурс]. — Turkey, Middle East Technical University, 2008. — Режим доступа: [www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue\\_Berichte\\_PDF/106.pdf](http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/106.pdf)
  28. ARTEMIS (Advanced Responsive Tactically Effective Military Imaging Spectrometer) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://events.eoportal.org/presentations/9911/14941.html#footback12%29>
  29. AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) — eoPortal [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.eoportal.org/directory/pres\\_AVIRISAirborneVisibleInfraredImagingSpectrometer.html](http://www.eoportal.org/directory/pres_AVIRISAirborneVisibleInfraredImagingSpectrometer.html)
  30. Bai Yibin, Bajaj J., Beletic J. W., et al. Teledyne imaging sensors: Silicon CMOS imaging technologies for x-ray, UV, visible and near infrared [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.rockwellscientific.com/infrared\\_visible\\_fps/Teledyne%20Imaging%20Sensors%20-%20Visible%20SPIE%20Paper%20\\_7021-01\\_.pdf](http://www.rockwellscientific.com/infrared_visible_fps/Teledyne%20Imaging%20Sensors%20-%20Visible%20SPIE%20Paper%20_7021-01_.pdf)
  31. Bannari A., Chevrier M., Staenz K., McNairn H. Potential of hyperspectral indices for estimating crop residue cover [Электронный ресурс] // Rev. Télédétection. — 2007. — 7, N 1-2-3-4. — P. 447—463. — Режим доступа: <http://www.teledetection.net/upload/TELEDETECTION/pdf/20080527120832.pdf>
  32. Bianco A. D., Serafino G., Spock G. An introduction to spectral imaging [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://english.ctr.at/carinthian\\_tech\\_research\\_english/dokumente/Daten\\_u\\_Produktblaetter/optSysteme/IntSpImg\\_web.pdf](http://english.ctr.at/carinthian_tech_research_english/dokumente/Daten_u_Produktblaetter/optSysteme/IntSpImg_web.pdf)
  33. Bridges N. T. et al. Simulating CRISM and HIRES data using airborne hyperspectral imagery [Электронный ресурс] // Lessons learned from ground truth / 41<sup>st</sup> Lunar and Planetary Science Conference. — 2010. — Режим доступа: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/1887.pdf>
  34. CASI-2 sensor, Overview of Configuration & Specification [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arsf.nerc.ac.uk/documents/casi2.pdf>
  35. CHAPTER 1 The Nature of Remote Sensing (Remote Sensing Models and Methods for Imaging Processing by Robert Schowengerdt..., [Электронный ресурс] — 2007. USA. — Режим доступа: <http://v5.books.elsevier.com/bookscat/samples/9780123694072/9780123694072.pdf>
  36. CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://crism.jhuapl.edu/instrument/innoDesign.php>

37. *Cristina Antonella Maria, Nathues Andreas, Eng Pascal, et al.* VIS-IR imaging spectrometer for MARCO POLO [Электронный ресурс] // 18–20 May 2009. — Marco Polo Symposium — Режим доступа: <http://sci.esa.int/science-e/www/object/doc.cfm?fobjectid=45193>
38. *Cocks T., Janssen R., Stewart A., et al.* The HyMAP™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance T [Электронный ресурс] // Presented at 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, — October 1998. — Zurich. — Режим доступа: [http://www.aigllc.com/pdf/EARSEL98\\_HyMap.pdf](http://www.aigllc.com/pdf/EARSEL98_HyMap.pdf)
39. *Cutter M. A.* Compact high resolution imaging spectrometer (CHRIS) [Электронный ресурс] // — Режим доступа: <http://ftp.rta.nato.int/public/PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-061/MP-061-24.pdf>
40. EnMAP hyperspectral imager (HSI) [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.enmap.org/sensors>
41. *Folientitel Kein* EnMAP — Режим доступа: [http://earth.esa.int/workshops/4th\\_chris\\_proba/CHRIS\\_WS4\\_KAUFMANN.pdf](http://earth.esa.int/workshops/4th_chris_proba/CHRIS_WS4_KAUFMANN.pdf)
42. *FPGA-based CMOS Matrix Controller for Digital Camera* [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://www.promwad.com/markets/digital-camera-cmos-fpga.html>
43. *Gat N.* Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review [Электронный ресурс] // Proc. SPIE. — 2000. — **4056**. — P. 50–64. — Режим доступа: <http://www.techexpo.com/WWW/opto-knowledge/E-tunable-filters.pdf>
44. *Green R., et al.* Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIRIS // Remote Sens. Environ. — 1998. — **65**. — P. 227–248. — Режим доступа: <http://www.utsa.edu/lrsg/Teaching/ES6973/AVIRIS.pdf>
45. *Green R. O., et al.* HypSIRI Decadal Survey Mission Development Status [Электронный ресурс] // Decadal Survey Symposium. — 2009. — Режим доступа: [http://decadal.gsfc.nasa.gov/documents/12\\_HypSIRI.pdf](http://decadal.gsfc.nasa.gov/documents/12_HypSIRI.pdf)
46. *Hamlin L., Green R. O., Mouroulis P., et al.* Imaging Spectrometer Science Measurements for Terrestrial Ecology: AVIRIS and the Next Generation AVIRIS Characteristics and Development Status [Электронный ресурс] // Jet Propulsion Laboratory, California Ins@tute of Technology Pasadena, CA, 91109 22 June 2010. — NASA Earth Science Technology Forum. — Режим доступа: [http://esto.nasa.gov/conferences/estf2010/presentations/Hamlin\\_Green\\_ESTF2010\\_B4P4.pdf](http://esto.nasa.gov/conferences/estf2010/presentations/Hamlin_Green_ESTF2010_B4P4.pdf)
47. *HyMap DAIS Airborne Hyperspectral Scanner* [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://www.op.dlr.de/dais/hymap/hymap\\_info.htm](http://www.op.dlr.de/dais/hymap/hymap_info.htm)
48. *Indium Antimonide Detectors* [Электронный ресурс] — Teledyne Judson Technologies — 2003. — LLC. — USA. — Режим доступа: <http://www.teledynejudson.com/indiumant.html>
49. *Infrared Focal Plane Arrays* [Электронный ресурс] // Opt. and Photonics News. — June 2008. — **19**, N 6. — Режим доступа: [http://www.ee.ucla.edu/~leosla/documents/James\\_Beletic\\_OPN.pdf](http://www.ee.ucla.edu/~leosla/documents/James_Beletic_OPN.pdf)
50. *Ires Research of Canada* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.itres.com/products/imagers/casi1500>
51. *Kempeneers P.* Information Extraction from Hyperspectral Images [Электронный ресурс] // Antwerpen. — 2007. — Режим доступа: <http://www.vliz.be/imisdocs/publications/121922.pdf>
52. *Kaufmann H., Segl K., Chabrilat S., et al.* ENMAP — An advanced optical payload for Earth observation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.asdi.com/getmedia/0382afb3-531e-42dc-9cca-368224d86478/ENMAP—An-Advanced-Optical-Payload-for-Earth-Observation.pdf.aspx>
53. *Kaufmann H., Segl K., Chabrilat S., et al.* ENMAP — An advanced hyperspectral mission [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.earsel.org/workshops/IS\\_Warsaw\\_2005/papers/Sensors\\_Missions/03\\_Kaufmann\\_31\\_34.pdf](http://www.earsel.org/workshops/IS_Warsaw_2005/papers/Sensors_Missions/03_Kaufmann_31_34.pdf)
54. *Kodak Digital Science KAC — 1310* [Электронный ресурс] — Режим доступа: [http://ljr.bagn.obs-mip.fr/observing/docu/KAC1310\\_datasheet.pdf](http://ljr.bagn.obs-mip.fr/observing/docu/KAC1310_datasheet.pdf)
55. *LUPA-1300-C-1. 3 M pixel high speed CMOS image sensor* [Электронный ресурс] — Cypress Semiconductor. — Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/129200/CYPRESS/LUPA-1300-C.html>
56. *LUPA-4000: 4M Pixel CMOS image sensor* [Электронный ресурс] — Cypress Semiconductor. — Режим доступа: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/106605/CYPRESS/LUPA-4000.html>
57. *Mouroulis P., Sellar R. G., Wilson D. W., et al.* Optical design of a compact imaging spectrometer for planetary mineralogy [Электронный ресурс] // Opt. Eng. — 2007. — **46**, N 6. — Режим доступа: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/40926/1/06-1912.pdf>
58. *Müller A.* The new frontiers of hyperspectral imaging sensors [Электронный ресурс] // — Режим доступа: [http://hyperinet.multimediacampus.it/images/Mueller\\_1.pdf](http://hyperinet.multimediacampus.it/images/Mueller_1.pdf)
59. *Murchie S., Arvidson R., Bedini P.* Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) [Электронный ресурс] // J. Geophys. Res. — 2007. — **112**. — Режим доступа: <http://www.planetary.brown.edu/pdfs/3554.pdf>
60. *Neural network architectures for information extraction from hyper...* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.disp.uniroma2.it/geoinformation/students/geoinformation-dissertations/hyper-spectral-images.pdf>
61. *Next Generation Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRISng)* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://airbornescience.jpl.nasa.gov/avirisng/>

62. Nieke Jens, Kaiser J. W., Schlöpfer D., et al. Calibration methodology for the Airborne Dispersive Pushbroom Imaging Spectrometer (APEX) [Электронный ресурс] // Proc. SPIE. — 2004. — 5570. — Режим доступа: [http://earth.esa.int/workshops/ivos05/pres/09\\_nieke.pdf](http://earth.esa.int/workshops/ivos05/pres/09_nieke.pdf)
63. Nischan M. L., Kerekes J. P., Baum J. E., et al. Analysis of HYDICE noise characteristics and their impact on sub-pixel object detection // Proc. SPIE. — 1999. — 3753. — P. 112–123. — Режим доступа: <https://ritdml.rit.edu/bitstream/handle/1850/3210/JKerekesConfProc07-19-1999.pdf>
64. Ocean Optics, LVF-series Linear Variable Filters [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.oceanoptics.com/products/lvflinearvariablefilters.asp>
65. Parameters of selectable CCD area array [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://space.univ.kiev.ua/~lapchuk/ccdarea1.htm>
66. Pearlman J. S., Barry P. S., Segal C. C., et al. Hyperion, a space-based imaging spectrometer [Электронный ресурс] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. — 2003. — 41. — P. 1160–1173.
67. Richardson B. S., Eastwood M. L., Bruce C. F., et al. Mercury-cadmium-telluride focal plane array performance under non-standard operating conditions [Электронный ресурс] // Aerospace Conf. — March 2011. — P. 1–6. — Режим доступа: [http://journals2.scholarsportal.info/details.xqy?uri=/1095323x/v2011/none/1\\_mfrapunoc.xml](http://journals2.scholarsportal.info/details.xqy?uri=/1095323x/v2011/none/1_mfrapunoc.xml)
68. Roden N. C., et al. Mineral Mapping and Applications of Imaging Spectroscopy [Электронный ресурс] // IG-ARSS, August 1, 2006. — Режим доступа: [http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental\\_Applications\\_Imaging\\_Spectroscopy/9\\_Clark\\_Mineral/Clark\\_Mineral.pdf](http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/9_Clark_Mineral/Clark_Mineral.pdf)
69. Schaepman M., Alberti E., Dell'Endice F., D'Odorico P. APEX Airborne Prism Experiment [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://hyspiri.jpl.nasa.gov/downloads/2009\\_Workshop/day3/day3\\_5\\_20090813\\_APEX\\_HyspIRI\\_Schaepman.pdf](http://hyspiri.jpl.nasa.gov/downloads/2009_Workshop/day3/day3_5_20090813_APEX_HyspIRI_Schaepman.pdf)
70. Schlöpfer D., Kaiser J. W., Nieke J., et al. Modeling and correcting spatial non-uniformity of the APEX pushbroom imaging spectrometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rs11/Spec2004/AVWS2004\\_apex\\_ds.pdf](http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rs11/Spec2004/AVWS2004_apex_ds.pdf)
71. SPECIM ImSpectors [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.specim.fi/media/pdf/imspector-datasheets/vis-vnir-imspectors-ver1-2009.pdf>
72. Semeniv O., Yatsenko V., Khandriga P., Shatokhina Yu. A hyperspectrometer for remote sensing of biochemical components in the vegetation [Электронный ресурс] // 37th COSPAR Scientific Assembly. 13–20 July 2008, in Montréal, Canada. — P. 2806. — Режим доступа: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2008cosp...37.2806S>
73. Tong Q. Hyperspectral remote sensing technology and applications in China [Электронный ресурс] / Tong Qingxi, Zhang Bing, Zheng Lanfen // Proc. of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Italy 28–30 April 2004. — Режим доступа: [http://earth.esa.int/workshops/chris\\_proba\\_04/papers/39\\_tong.pdf](http://earth.esa.int/workshops/chris_proba_04/papers/39_tong.pdf)
74. The Airborne Imaging Spectrometer ROSIS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.opairs.aero/media/download/pdf/rosis-description.pdf>
75. The AHS2005 Flight Campaign APEX [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://campaigns.vgt.vito.be/documents/IR-AHS2005.pdf>
76. The DAIS 7915 System Specifications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.op.dlr.de/dais/dais-scr.htm>
77. Turner W. Status of HyspIRI Mission [Электронный ресурс] // HyspIRI Sci. Symp., 2011, May 17–18. — Режим доступа: [http://hyspiri.jpl.nasa.gov/downloads/2011\\_Symposium/Summary\\_2011\\_HyspIRI\\_Symposium\\_2.pdf](http://hyspiri.jpl.nasa.gov/downloads/2011_Symposium/Summary_2011_HyspIRI_Symposium_2.pdf)
78. Weatherup Cliff CCD and CMOS imaging Where are we? [Электронный ресурс] — 12th May 2010. — Режим доступа: <http://www.qi3.co.uk/wp-content/uploads/2010/05/Cliff-Weatherup-Web-version.pdf>
79. Wilson I. J., Cocks T. D. Development of the airborne reflective emissive spectrometer (ARES) A Progress Report [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.earsel.org/workshops/imaging-spectroscopy-2003/papers/sensors\\_and\\_missions/wilson.pdf](http://www.earsel.org/workshops/imaging-spectroscopy-2003/papers/sensors_and_missions/wilson.pdf)

Надійшла до редакції 12.09.11

V. V. Donets, L. I. Muravskiy

#### SOME FEATURES OF THE USE OF EMISSION DETECTORS IN ON-BOARD HYPERSPECTROMETERS

We consider some features of the application of linear and matrix emission detectors in on-board air- and space-based hyperspectrometers (AVIRIS of the first and second generations, APEX, HYDICE, RESURS-P and others) for the spectrometric study of the Earth's surface, for spectrometric data subsatellite validation and also in compact devices for the exploration of the Moon's and Mars' surfaces (M3, CRISM).