

Обработка гиперспектральных данных, получаемых с авиационных и космических носителей

В.Н. Остриков¹, О.В. Плахотников¹, А.В. Кириенко²

¹ Санкт-Петербургский филиал ОАО КБ «Луч»

E-mail: mail@spb.vega.su

² Санкт-Петербургский филиал ОАО Концерн «Вега»

E-mail: luchmail@spb.vega.su

Рассмотрена последовательность обработки данных, получаемых гиперспектральной съемкой. По дистанционным и синхронным наземным измерениям проводятся предварительная обработка, внешняя калибровка и оценка характеристик материалов съемки. Для тематической обработки применяются различные методы обнаружения и идентификации с использованием базы спектральных характеристик. Имитационная модель позволяет прогнозировать свойства разрабатываемого средства наблюдения в различных условиях.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, внешняя калибровка, предварительная, тематическая обработка, имитационное моделирование.

Введение

В последнее десятилетие и в настоящее время в РФ для решения народно-хозяйственных задач разрабатываются системы получения видовых данных на базе авиационных, а также космических носителей («Ресурс-П», малый космический аппарат), с аппаратурой гиперспектральной съемки (ГСС) в диапазоне 0,4–1,0 мкм. Эффективность применения ГСС обусловлена возможностью автоматизированного спектрального анализа и идентификации наблюдаемых поверхностей Земли в интересах геологоразведки, экологических и сельскохозяйственных задач, прогнозирования и оценки развития чрезвычайных ситуаций. В последнее время рассматривается также возможность построения систем ГСС на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА), особенно в части контроля функционирования трубопроводных систем и управления урожайностью в сельском хозяйстве. Особую роль играют системы ГСС, установленные на БЛА для подспутниковой валидации калибровки космической аппаратуры ГСС по пространственно протяженным спектрально однородным полигонам.

Для получения и обработки данных ГСС характерны специфические особенности, связанные с влиянием значительной совокупности внешних и внутренних факторов. В частности, для успешного использования результатов съемки необходима, во-первых, качественная предварительная обработка получаемых данных, во-вторых, реализация достаточно точной внутренней и внешней радиометрической калибровки в сочетании с обеспечением режима сбора и формирования базы спектральных характеристик. Кроме того, в ходе проектирования аппаратуры ГСС целесообразно проведение имитационного моделирования процессов получения и обработки данных для предсказания информационных возможностей создаваемой системы в различных условиях эксплуатации. Учет совокупности означенных особенностей в значительной степени обеспечивается использованием рассматриваемой последовательности обработки данных ГСС.

Выполняется широкий набор функций предварительной обработки, включая радиометрическую и геометрическую коррекцию, обеспечивается решение задач внутренней и внешней калибровки, оценка качества результатов съемки по получаемой текущей информации. По результатам предварительной обработки решаются тематические задачи в части обнаружения спектральных аномалий и спектральной идентификации объектов, представленных коэффициентами спектральной яркости (КСЯ) в накопленной базе спектральных характеристик. Решаются задачи специальной обработки, состоящей в пересчете авиационных данных ГСС на другие условия наблюдения, отличные от условий получения, а также оценки возможностей спектрального различия отдельных пар «объект–фон» гиперспектрометрами с заданными параметрами (спектрального, пространственного и радиометрического разрешения). Используемая при этом имитационная модель позволяет прогнозировать возможности аппаратуры ГСС по выявлению спектральных аномалий и идентификации заданных объектов на известных фонах по набору специально созданной базы спектральных характеристик.

Возможности последовательной обработки

К особенностям данных ГСС, получаемых аппаратурой как авиационного, так и космического базирования, относится наличие регулярных (полосовых) шумов, обусловленных сканирующими (обычно по схеме «push–broom») системами формирования. Их компенсация требует применения специальной первичной обработки, сочетающей в себе отсутствие влияния на форму спектральных характеристик наблюдаемых элементов сцены. Разработанный оригинальный метод коррекции, совместно с известным способом компенсации кадровой неравномерности, позволяет подавлять регулярные шумы данных, что приводит к существенному повышению качества материалов съемки (Остриков и др., 2010, 2011).

Для снижения уровня случайных шумов без потерь применительно к данным ГСС часто используется преобразование на основе метода главных компонент. Его основной недостаток состоит в значительном времени обработки. Разработанный оригинальный алгоритм подавления случайных шумов на основе использования специального спектрального фильтра позволяет в несколько раз повысить скорость подавления шумов без снижения качества результата (Остриков, Плахотников, 2011).

Для проведения объективного анализа применимости совокупности разработанных методов их отработка проводилась по реальным данным, полученным авиационной аппаратурой ГСС (трех типов) в ходе весенне-летне-осенних экспедиций в районах северо-запада и центральной России в различных условиях наблюдения, включая 100%-ю облачность. Применялась специальная методика синхронной авиационной и наземной съемки, при этом, судя по известным авторам отечественным публикациям, такая отработка внешней калибровки по натурным данным проводилась впервые в России. Используемый подход позволил получить количественные результаты по оценкам точности пересчета данных дистанционной съемки в распределения коэффициентов

спектральной яркости (КСЯ). При этом контроль качества осуществлялся по дополнительным эталонам, не используемым в ходе собственно самого пересчета. В качестве примера на *рис. 1* приведены данные «попадания» пересчета по двум дополнительным эталонным поверхностям (etalon-1, etalon-2). Как это следует из анализа *рис. 1*, «пересчитанные» данные гиперспектральной съемки полностью укладываются в вариабельность измерений, полученных наземным спектрорадиометром после их приведения к шкале авиационного прибора.

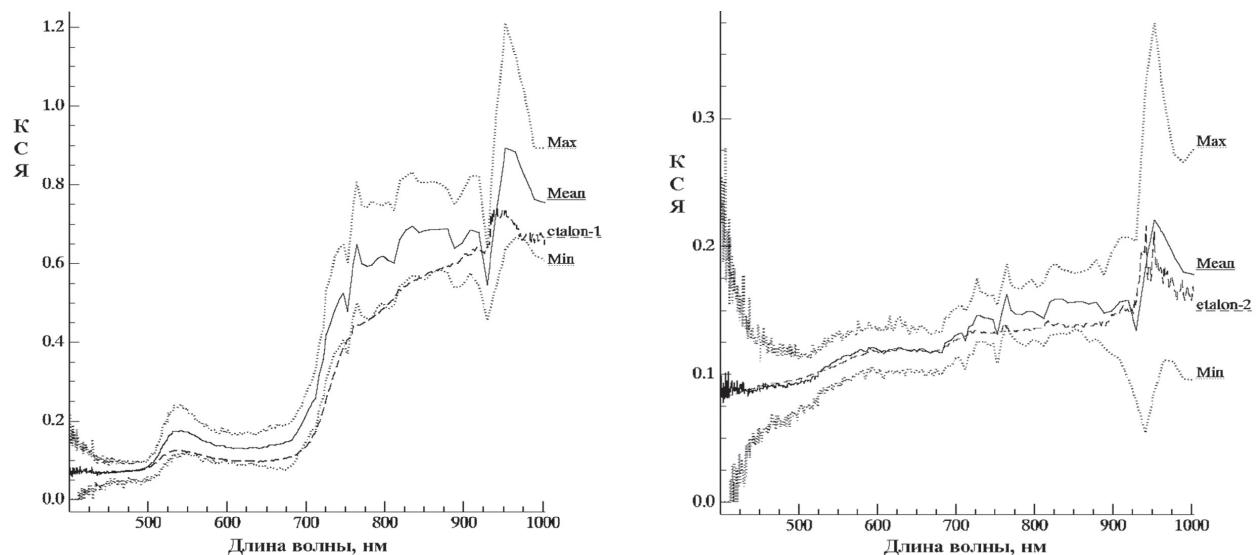


Рис. 1. Данные «попадания» пересчета по двум дополнительным эталонным поверхностям: Mean – среднее значение КСЯ эталонной поверхности по данным гиперспектральной съемки; Max, Min – максимальное и минимальное значения КСЯ эталонной поверхности по данным гиперспектральной съемки, соответственно; etalon-1, etalon-2 – КСЯ эталонных поверхностей, полученных наземным спектрорадиометром

Отдельно рассматривалась возможность атмосферной коррекции получаемых данных на базе модели MODTRAN 5.2. Отработка проводилась по данным финского гиперспектрометра AISA фирмы Specim (<http://www.specim.fi>). На *рис. 2* в качестве примера приведены расчеты по двум элементам сцены на основе модели MODTRAN в соответствии с принятым алгоритмом пересчета, а также, для сравнения, аналогичные результаты, полученные специалистами финской фирмы Specim. Сигнальные и пересчитанные данные видеоспектрометра были взяты по урбанизированной сцене городского типа – город Reno, USA. Сравнение показывает, что полученные оценки в основном близки к данным, полученным финскими специалистами в пределах обычно реализуемой такими методами точности.

Используемая оценка качества материалов съемки строится по основному показателю «линейное разрешение на местности (ЛРМ)».

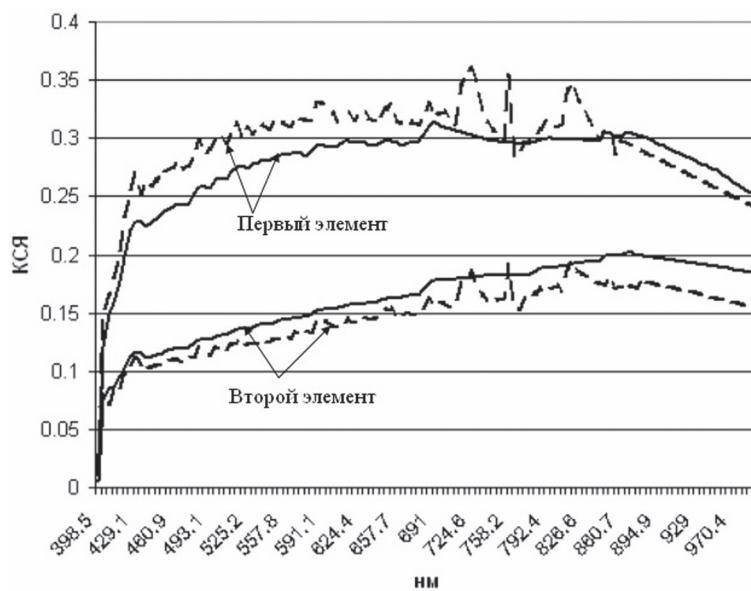


Рис. 2. Собственные (штриховые) и рассчитанные специалистами фирмы Specim (сплошные) оценки КСЯ по двум элементам сцены

Для определения ЛРМ на отдельной спектральной линии по выделенному фрагменту оценивается функция рассеяния точки (ФРТ) и уровень шума в соответствии с подходом, изложенным в (Остриков, 2011, 2012). Затем синтезируется эквивалентная тестовая мира, по ней оператором визуально фиксируется разрешаемая группа штрихов. На основе известных геометрических соотношений – высота и угол наблюдения, а также по параметрам аппаратуре рассчитывается пересчитанный на местность размер разрешаемой шпалы, который и определяет собственно ЛРМ для данного фрагмента. На рис. 3 приведен пример полученной оценки ФРТ на отдельных линиях (15-а), (67-б), (101-в) спектра прибора в диапазоне 0,4–0,9 мкм (всего 105 линий) и синтезированных эквивалентных тестовых мир. Наглядно видно снижение ЛРМ прибора по мере увеличения длины волны.

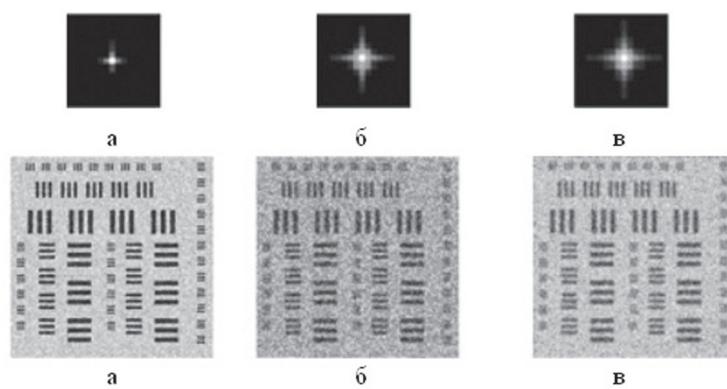
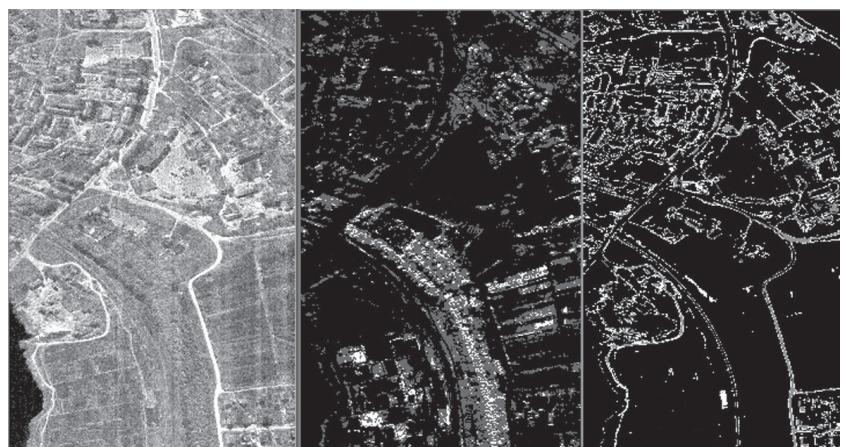


Рис. 3. Полученные оценки ФРТ (эквализовано и увеличено) и соответствующие им синтезированные образы эквивалентных тестовых мир

Тематическая обработка данных ГСС предусматривала реализацию двух основных подходов – обнаружение спектральных аномалий и собственно спектральную идентификацию элементов сцен. В части обнаружения аномалий был реализован ряд традиционных,

а также вновь разработанных алгоритмов. Для этого используются, помимо широко применяемых, оригинальные метрики – Теребижа (Теребиж, 2005) и специально разработанная «метрика отношений» (Остриков и др., 2011, 2012). Последняя, в силу простоты вычислений, при хорошем качестве данных ГСС позволяет выделять объекты со скоростью обработки, на порядок выше известных методов. Кроме того, реализован сравнительно новый подход на основе аппарата анализа независимых компонент (Huvarinen, Oja, 2000), характеризующийся специфическими свойствами. Для «тонкого» выделения элементов сцен применяется предварительная обработка вышеозначенными методами в сочетании с метрикой Теребижа. В качестве примера на *рис. 4* приведены результаты обработки авиационного снимка. Анализ показывает, что применение разработанного метода позволяет «отрывать» травяной покров от крон деревьев, а также отдельно выделять грунтовые дороги от дорог с твердым покрытием, что обычно достаточно трудно достижимо в силу близости их спектральных ходов.

Для реализации собственно спектральной идентификации разработана пополняемая база спектральных характеристик высокого спектрального разрешения (от 3,5 нм), полученная, в том числе, на основе наземных измерений. Собственно сама спектральная идентификация полученных распределений КСЯ сцены строится на основе предварительного отбора кластеров для поиска, «схожих» нормированных характеристик на основе специального критерия, функционирующего на один–два порядка быстрей применения обычных метрик сравнения. По отобранным характеристикам проводится суженный поиск. При этом используются уже известные метрики – евклидова, спектрального угла, Махalanобиса, информационные – Кульбака, количества взаимной информации и др., в зависимости от их эффективности применительно к решению конкретных тематических задач. При этом опорные данные выбираются из пополняемой базы, которая подвергается предварительной обработке для селекции только значимых спектральных векторов.



*Рис. 4. Результаты тематической обработки авиационного снимка:
а – исходный полутоновой образ; б – выделение крон деревьев (яркие)
и травяной растительности (серые); в – выделение грунтовых дорог
и спектрально аналогичных элементов сцены (яркие и серые)*

В качестве реализованной специальной обработки используется, во-первых, имитационный пересчет данных авиационной ГСС на другие, в том числе космические, условия наблюдения (Остриков и др., 2011, 2012). Во-вторых, разработана и реализована специальная модель оценки возможностей аппаратуры по спектральной различимости произвольных пар «объект–фон».

На рис. 5 приведены примеры преобразования спектральных кривых в зависимости от состояния атмосферы и высоты Солнца применительно к пересчету распределения КСЯ данных, полученных с авиационного носителя, на космические условия наблюдения. Расчет проведен для съемки гиперспектрометром с орбиты высотой 425 км, для входной апертуры прибора 35 см, пространственного разрешения 8*8 м и спектрального разрешения 5 нанометров (наблюдение «в надир»). Результаты анализа позволяют сделать вывод о потенциальной возможности спектрального различия такого типа данных при «хорошем» состоянии атмосферы (метеодальность видимости у поверхности земли (МДВ) 23 км) и углах Солнца не ниже 30–35 градусов. Однако такого рода данные, полученные на имитационной модели, не дают объективного свидетельства о возможностях используемой аппаратуры в тех или иных условиях наблюдения. По этой причине разработана дополнительная имитационная модель, позволяющая давать численный анализ качества применяемой аппаратуры в различных условиях.

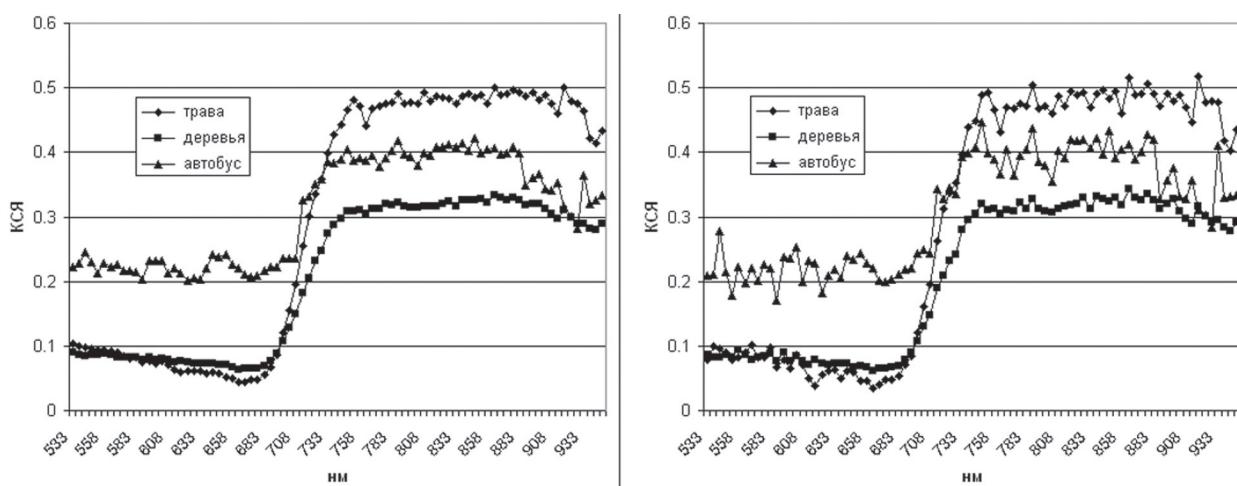


Рис. 5. Результаты преобразования спектральных кривых при пересчете на космические условия наблюдения: а – МДВ = 23 км, высота Солнца 51 градус; б – МДВ = 5 км, высота Солнца 35 градусов

Для оценки такого качества и возможностей применения аппаратуры ГСС в различных условиях введен специальный показатель – *спектральная различимость пары «объект–фон»* (СРП). Показатель определяется как площадь, занимаемая объектом в пространственном элементе разрешения аппаратуры, на заданном фоне, отнесенная к площади этого элемента разрешения, на уровне, при котором обеспечивается бинарное спектральное различие объекта с заданной вероятностью (не хуже 0,8). Разработанная имитационная модель формирует совокупность имитируемых элементов разрешения, достаточную для их обоснованного статистического анализа (всего

64 элемента), каждый из которых разбивается на совокупность более мелких элементов. Например, каждый исходный имитируемый элемент разрешения 8×8 м разбивается на более мелкие части так, что он в исходном виде содержит 4×4 элементарных частей (каждая размером на земле 2×2 м). Эти элементарные части заполняются таким образом, чтобы в каждом случайном испытании от 1 до 15 элементарных частей заполнялись спектральной характеристикой наблюдаемого объекта, а остальная часть исходного элемента разрешения – фоновой. Так имитируется относительный состав объекта и фона в исходном элементе разрешения прибора. При этом датчиком случайных чисел в соответствии с заданным законом распределения каждая элементарная часть заполняется спектральной характеристикой в пределах ее вариабельности по объекту либо фону. Диапазон вариабельности таких спектральных характеристик и закон их распределения содержатся в специальной базе экспериментально измеренных данных. Синтезированная фоно-объектовая обстановка пропускается через передаточную функцию трассы и приборного тракта с учетом всех основных влияющих факторов, включая имитацию внешней калибровки (Остриков и др., 2011) и бинарного спектрального различия «объект–фон».

В качестве примера на *рис. 6* приводятся рассчитанные кривые вероятностей бинарной спектральной различимости «объект–фон» в зависимости от величины коэффициента заполнения применительно к паре «самолет АН-2 – асфальтовая дорога» для различных высот Солнца (48, 35 и 30 градусов) и двух величин МДВ. Принятые параметры аппаратуры и высота наблюдения соответствуют приведенным выше значениям. Как это видно из данных кривых, в этом примере оценка показателя СРП для случая МДВ = 23 км составила диапазон 0,0625–0,1. Для МДВ = 5 км оценка СРП составляет уже диапазон значений 0,1–0,3, т.е. для уверенного спектрального различия рассматриваемой пары при ухудшении состояния атмосферы требуется примерно в 3 раза большая площадь, занимаемая объектом в элементе разрешения.

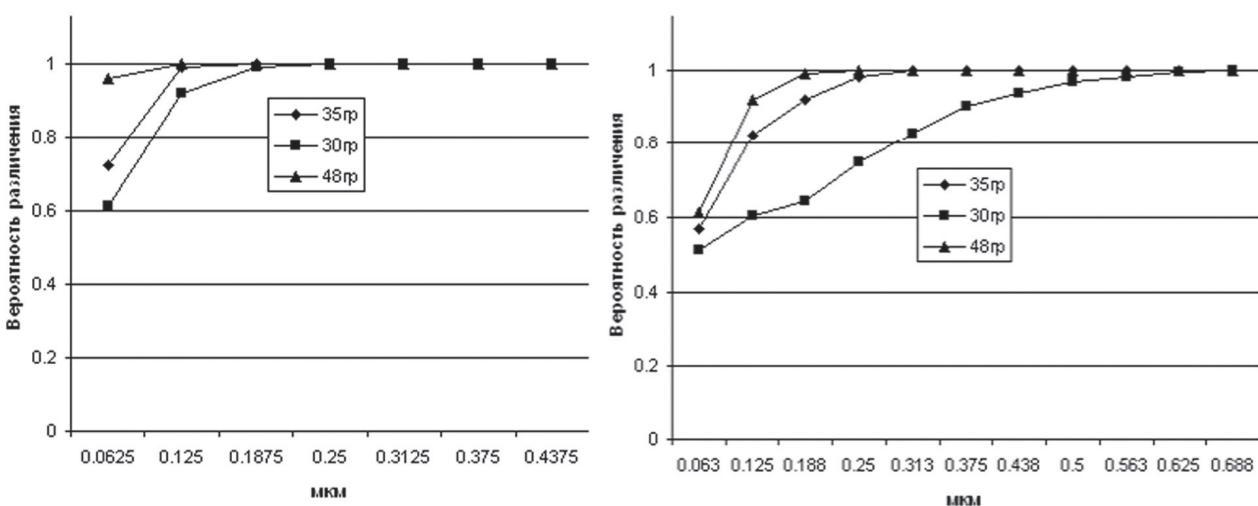


Рис. 6. Зависимости вероятностей бинарного различия пары «самолет АН-2 – асфальт» от коэффициента заполнения элемента разрешения объектом для различных высот Солнца: а – МДВ = 23 км; б – МДВ = 5 км

Разработанная модель и введенный показатель СРП позволяют прогнозировать возможности любой аппаратуры, заданной основными параметрами. При этом учитываются произвольно выбранные условия наблюдения и исходные контрасты, обусловленные спектральными и пространственными свойствами выбранного сочетания «объект–фон» из имеющейся базы данных.

Литература

1. *Остриков В.Н.* Оценка функции рассеяния точки на произвольном снимке посредством слепого восстановления // Техническое зрение в системах управления. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 16–20.
2. *Остриков В.Н.* Оценка функции рассеяния точки произвольного канала гиперспектральной съемки методом слепого поиска. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616762, 31.08.2011.
3. *Остриков В.Н., Плахотников О.В.* Фильтрация спектральных шумов данных аппаратуры гиперспектральной съемки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616765, 31.08.2011.
4. *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Шулика К.М.* Имитационная оценка потенциальных возможностей гиперспектральной съемки бортовой аппаратурой систем дистанционного зондирования земли. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616767, 31.08.2011.
5. *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Шулика К.М.* Имитационная модель преобразования снимков авиационного гиперспектрометра на условия наблюдения из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 167–172 .
6. *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Шулика К.М., Соболев А.А.* Адаптивная строчная радиометрическая коррекция для компенсации аппаратурного строчного шума данных гиперспектральной съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Тезисы докладов VIII конференции. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 14–15.
7. *Остриков В.Н., Плахотников О.В., Шулика К.М.* Адаптивная строчная радиометрическая коррекция для компенсации аппаратурного строчного шума гиперспектральной съемки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616764, 31.08.2011.
8. *Теребиж В.Ю.* Введение в статистическую теорию обратных задач. М.: Физматлит, 2005.
9. *Hyvärinen A., Oja E.* Independent component analysis. Algorithms and applications // Neural Networks. 2000. 13 (4–5). P. 411–430.

Hyperspectral images processing from aircraft and satellite vehicle-born carriers

V.N. Ostrikov¹, O.V. Plakhotnikov¹, A.V. Kirienko²

¹LUCH Company, St. Petersburg branch

E-mail: luchmail@spb.vega.su

²VEGA Radio Engineering Corporation, St. Petersburg branch

E-mail: mail@spb.vega.su

Processing of hyperspectral images are considered. The preprocessing, external calibration and quality image estimation apply to remote sensing and synchronous surface measurements. Some methods of processing for detection and identification were used with the spectral data base utilize. The simulation model estimate the possibilities hyperspectral remote sensing devices on different observe conditions.

Keywords: hyperspectral images, external calibration, preprocessing, thematic processing, simulation modeling.