

Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичных видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратуры ДЗ3

Л.Н.Чабан¹, Г.В. Вечерук¹, Т.В. Кондранин¹,
С.В. Кудрявцев², А.А. Николенко¹

¹Московский физико-технический институт,
141700 Московская область, г.Долгопрудный,
Институтский пер. 9

E-mail: georg@geo.mipt.ru, alex_nikolenko@mail.ru

²ЗАО «НПО «Лептон»,
124498 Москва, г.Зеленоград, проезд 4806, д.5, стр.23
E-mail: ksv@lepton.ru

На основе самолетных гиперспектральных съемок смоделированы изображения, идентичные по пространственному разрешению и актуальному динамическому диапазону готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной космической аппаратуры ДЗ3. На примере тематической обработки смоделированного изображения участка леса показаны возможности использования гиперспектральных изображений для классификации лесов по нескольким показателям при различном пространственном разрешении. Обсуждаются результаты тематической обработки гиперспектральных изображений нескольких типов сцен на тестовом полигоне.

Ключевые слова: аппаратура ДЗ3, гиперспектральные изображения, пространственное разрешение, динамический диапазон, атмосферная коррекция, спектры отражения, тематическая обработка, классификация лесов, дешифрирование растительности

В целях изучения возможностей решения тематических задач на основе материалов перспективной космической гиперспектральной съемки на кафедре СУМГФ МФТИ проводилось моделирование космических изображений с пространственным разрешением, идентичным готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратурой ДЗ3. Необходимость специального моделирования обусловлена тем, что относительное количество отраженного от земной поверхности солнечного излучения, регистрируемое аппаратурой за пределами атмосферы, следовательно, и информативный для тематической обработки динамический диапазон изображений, будут существенно отличаться от таковых при самолетной гиперспектральной съемке. Поэтому некоторые выводы о возможностях практического применения космической гиперспектральной съемки, сделанные на основе обработки самолетных гиперспектральных изображений без учета влияния атмосферы и пространственного слаживания сцены (Козодеров и др., 2009), могут потребовать существенного уточнения.

Специально для моделирования была выполнена самолетная гиперспектральная съемка тестовых полигонов в Тверской области со сплошным покрытием тестовых участков съемочными треками, с перекрытием треков до 50%. Съемка выполнялась самолетным видеоспектрометром, имеющим 290 каналов в диапазоне 400–1000 нм, разработанным в ЗАО НПО «Лептон». Пространственное разрешение пикселей для полученных гиперспектральных изображений при высоте съемки около 2 км, составило 1–1.5 м в зависимости от скорости и направления полета. Параллельно со съемочными работами на тестовых полигонах выполнялись наземные обследования и сбор спектров отражения калибровочных эталонов с помощью полевого спектрорадиометра.

В процессе моделирования использовались разработанное в МФТИ программное обеспечение обработки гиперспектральных изображений, а также программные средства пакетов ERDAS Imagine и MODTRAN.

Методика моделирования включала следующие этапы.

1. Геометрическая коррекция и составление гиперспектральных мозаик

Поскольку съемка выполнялась с использованием гиростабилизированной платформы, геометрические искажения были в основном обусловлены отклонениями курса самолета от заданного направления. Географическая привязка самолетных треков осуществлялась по опорным точкам с использованием космических снимков Landsat и Ресурс-ДК, а также, фрагментарно, с использованием изображений из Google с пространственным разрешением около 4 м на пиксель и материалов самолетных съемок за предыдущие годы. С целью минимизации искажений при трансформировании привязка каждого трека выполнялась по кускам с перекрытием, полиномами второй, в отдельных случаях третьей степени. После этого составлялась мозаика для каждого отдельного трека путем сшивки кусков по линиям наиболее точного совпадения линейных и площадных ориентиров. Далее по этому же принципу была составлена мозаика из отдельных треков.

Итоговая точность привязки самолетных треков составила 5-15 м в зависимости от пространственного разрешения использованной картографической основы. В связи с этим за основу для тематического анализа было принято изображение с пространственным разрешением 10 м на пиксель.

Основной проблемой моделирования данных космической съемки по самолетным изображениям является изменение условий освещенности территории за время съемки тестового полигона. С учетом этого фактора, а также изменения отношения сигнал/шум по строке изображения, обусловленного эффектом виньетирования, точность классификации одних и тех же объектов подстилающей поверхности неизбежно будет ухудшаться на отдельных участках полученной мозаики. Чтобы минимизировать эти факторы, для выполнения экспериментальной тематической обработки выбирались участки мозаики с наиболее близкими условиями освещенности. Изображение одного из таких участков, выбранных на тестовом полигоне «Саввательево», показано на рис.1.

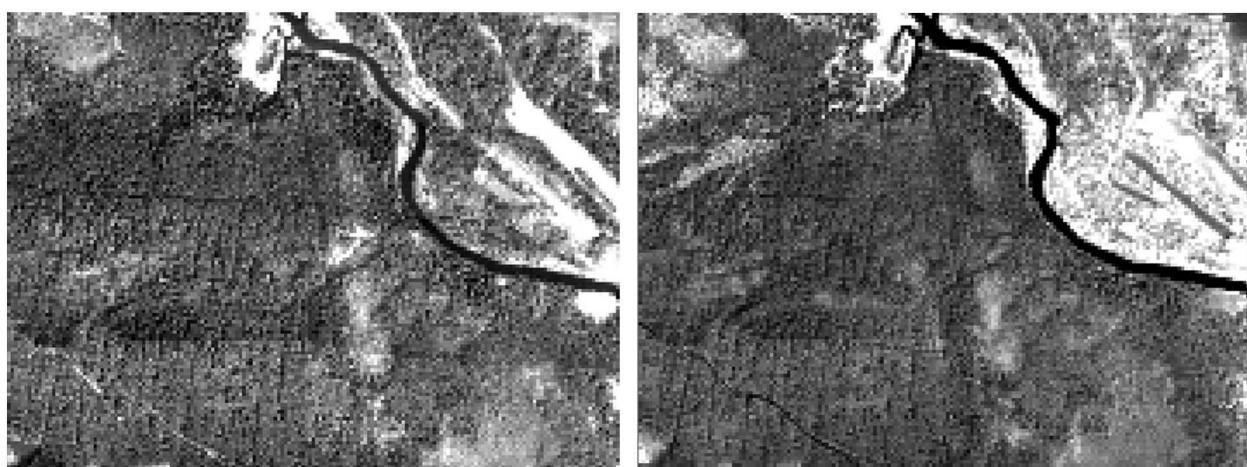


Рис. 1. Выбранное для обработки изображение участка леса из гиперспектральной мозаики по полигону «Саввательево»: слева – изображение в видимом диапазоне (550 нм), справа – в ближнем ИК диапазоне (805 нм)

2. Расчет ожидаемого информативного динамического диапазона яркости по каналам за пределами атмосферы

Для изучения влияния атмосферы на величину видеосигнала, а также получения данных, требуемых для проведения атмосферной коррекции, с помощью пакета MODTRAN проводилось численное моделирование радиационных потоков, приходящих на аппаратуру ДЗЗ при самолетной съемке с высоты 2 км и за пределами атмосферы (100 км).

Для моделирования использовалась заложенная в пакет MODTRAN модель безоблачной атмосферы, соответствующая летним условиям субарктических широт при наличии сельского аэрозоля. Такая модель атмосферы наиболее близка к условиям, при которых проводилась съемка.

Результаты моделирования показали, что наиболее существенными атмосферными составляющими, влияющими на перенос излучения в данном диапазоне, являются: рассеяние на аэрозолях, молекулярное рассеяние, поглощение водяным паром, кислородом и озоном. Значительное влияние рассеивающих компонент на функцию пропускания даже для высоты полета 2 км указывает на необходимость атмосферной коррекции и для самолетных гиперспектральных изображений. Расчеты радиационных потоков на участке, показанном на рис.1, выполнялись для альбедо объекта земной поверхности «смешанный лес». Выбор объекта обусловлен преобладанием данного типа растительного покрова на обследуемой территории.

При одних и тех же атмосферных условиях и идентичной геометрии наблюдений для диапазона длин волн $400 \leq \lambda \leq 1000$ нм были рассчитаны:

- функция спектральной плотности яркости $B_o(\lambda)$, поступающей на приемник на высоте 2 км ($B_{0a}(\lambda)$) и на высоте 100 км ($B_{0s}(\lambda)$);
- функция спектральной плотности яркости рассеянного излучения (дымки) $B(\lambda)$ на высоте 2 км ($B_a(\lambda)$) и на высоте 100 км ($B_s(\lambda)$);
- функции спектральной плотности компоненты излучения $B_g(\lambda)$, отраженного от земной поверхности: $B_{ga}(\lambda)$ и $B_{gs}(\lambda)$ соответственно.

Информативный для тематической обработки динамический диапазон D_g определяется количеством уровней АЦП, соответствующих компоненте излучения, отраженной от земной поверхности. Его доля в полном динамическом диапазоне определяется отношением B_g/B_o . Тогда долю уровней АЦП, приходящихся на информативный динамический диапазон на длине волны λ за пределами атмосферы (высота 100 км) можно определить как

$$D_{gs}(\lambda) = \frac{B_{gs}(\lambda)}{B_{0s}(\lambda)} \cdot \frac{B_{0a}(\lambda)}{B_{ga}(\lambda)}$$

Из рассчитанных функций спектральной плотности яркости и калибровочных характеристик гиперспектрометра для всех 290 каналов были определены поправочные коэффициенты $k(\lambda) = \int_{\Delta\lambda} D_{gs}(\lambda) f(\lambda) d\lambda$, где $\Delta\lambda$ - ширина канала, $f(\lambda)$ – его функция спектральной чувствительности. График зависимости поправочных коэффициентов от длины волны для 290 каналов гиперспектрометра в рабочем диапазоне 400-1000 нм показан на рис.2.

После вычитания темнового фона и умножения значений пикселей в каждом канале на поправочный коэффициент выяснилось, что динамический диапазон яркости каналов в интервале 400-440 нм (каналы 1-90) составляет около 30 уровней АЦП. Этот диапазон может быть полезен только при выделении объектов с устойчивым спектром отражения, инвариантным к сезону съемки и климатическим факторам. Для разделения большей части почвенно-растительных классов его использование нецелесообразно. При классификации лесной растительности, имеющей большую дисперсию яркости, требуется значительно большее количество уровней АЦП. В итоге для тематической обработки были использованы каналы 101-290 (450-1000 нм).

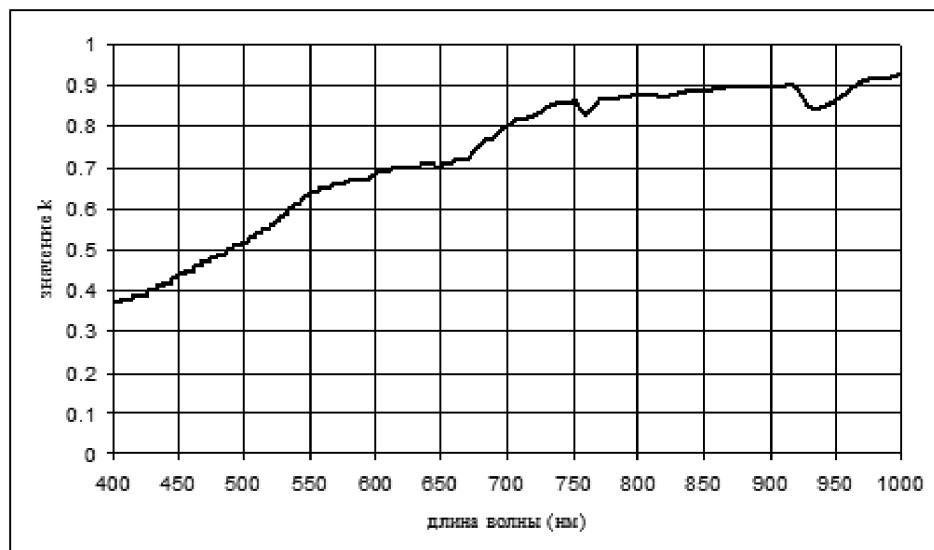


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента, усредненного по каналам гиперспектрометра, от длины волны

4. Создание наборов эталонов тематических классов на основе материалов наземных обследований

Набор эталонов тематических классов по полигону «Савватьево» создавался с учетом лесотаксационных данных и их актуализации на основе материалов наземных обследований. Основным требованием к исходным эталонам было преобладание на участке определенного типа лесной растительности. Учитывался возраст, состав пород второго яруса и характер напочвенного слоя, а также сомкнутость крон пород первого яруса.

В процессе наземных обследований было обнаружено значительное повреждение лесов тестового полигона жуком топографом-короедом. При этом леса, произрастающие в менее благоприятных условиях, сильнее подвержены поражению этим вредителем; на этих участках обнаружено значительное количество погибших и погибающих деревьев.

Для анализа спектральных отражательных свойств эталонных данных значения уровней АЦП по эталонным участкам были пересчитаны в коэффициенты отражения с использованием метода «плоского поля» (IMAGINE Spectral Analysis. User's Guide, 2003). В качестве «плоского поля» использовался объект с известным спектром отражения в рабочем диапазоне длин волн. Опыт обработки материалов съемки за предыдущие годы показал, что наиболее подходящим объектом с устойчивым спектром отражения является сухой асфальт на дорогах второстепенного значения. Однако при пространственном разрешении от 10 м и более на пиксель спектр асфальтированной дороги представляет собой «смесь» спектров отражения асфальта и окружающей растительности. В связи с этим по материалам самолетной съемки предыдущих лет с разрешением около 0.5 м на пиксель была создана библиотека эталонных «спектральных смесей» в рабочем диапазоне длин волн 450-1000 нм. Для пересчета уровней АЦП в коэффициенты отражения по обоим участкам полигона «Савватьево» использовался эталонный спектр «асфальт в лесу». На рис.3 приведены некоторые типичные эталонные спектры участков леса, полученные в результате пересчета уровней АЦП к коэффициентам отражения. Здесь необходимо обратить внимание на особенности поведения спектров отражения в диапазоне 500-600 нм. Эти особенности невозможно выявить при мультиспектральной съемке, а при этом именно они в значительной степени обуславливают возможность разделения большого количества растительных классов.

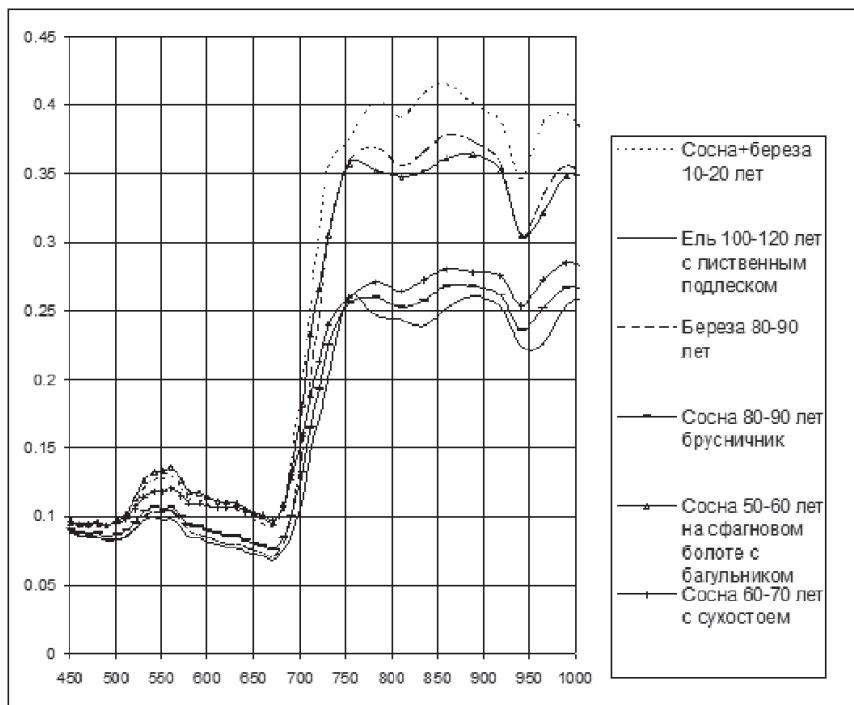


Рис. 3. Спектры отражения некоторых типов леса на тестовом участке

5. Тематическая классификация

Ранее проведенные исследования на материалах полевой гиперспектральной съемки показали, что использование всех каналов гиперспектрального изображения не имеет смысла из-за высокой корреляции части каналов. При этом для различных сцен наиболее коррелированными оказываются различные группы каналов (Чабан, Вечерук, Гаврилова, 2009). В связи с этим перед тематической обработкой проводился отбор каналов путем преобразования гиперкуба яркостей к главным компонентам. После этого был проведен визуальный отбор наиболее информативных из первых 10 главных компонент. Визуальный отбор позволил сократить вклад в результаты обработки эффектов неравномерной освещенности, поскольку они проявлялись не во всех 10 компонентах.

Для оценки вклада каждого канала в отобранные компоненты использовалась сумма модулей проекций каналов на каждую из этих компонент:

$$A_j = \sum_{k=1}^p |\alpha_{jk}|, \text{ где } j - \text{номер канала, } k - \text{номер информативной компоненты, } p - \text{количество}$$

отобранных компонент.

Так как векторы нового ортогонального базиса при преобразовании гиперкуба яркостей ориентированы в направлениях наибольшего разброса диаграммы рассеяния спектральных сигналов пикселей, то естественно, что значение критерия пропорционально динамическому диапазону уровней АЦП в соответствующем канале (рис.4). Размер этого диапазона зависит от значения функции спектральной чувствительности прибора – значения плотности спектральной яркости, приходящейся на 1 уровень АЦП (максимум функции приходится на диапазон 600-700 нм). Поэтому наиболее приемлемым условием отбора каналов является локальный максимум критерия, удовлетворяющий условию:

$$A_{j-1} < A_j > A_{j+1}.$$

Выполнение этого условия означает, что в соответствующем диапазоне длин волн, при близких значениях функции спектральной чувствительности, различия между яркостными характеристиками объектов сцены проявляются наиболее сильно именно в данном канале.

Приведенный на рис. 4 график показывает, что положение пиков критерия непосредственно связано с диапазонами наиболее выраженного изменения яркости различных типов растительности. Первая группа близко расположенных локальных максимумов (485-550 нм) приходится на участок подъема спектра отражения растительности в зелено-голубой зоне. Заметим, что именно в этом диапазоне хорошо различается ель, имеющая относительно небольшой подъем спектра в сравнении с другими типами здоровой лесной растительности. Следующая группа максимумов (582-632 нм) приходится на участок «спада» спектра отражения растительности и характеризует относительное содержание в растительном покрове желто-оранжевых пигментов (каротиноидов) и красного пигмента – антоцианина (Свейн, Дэйвис и др., 1983). Максимум 675 нм соответствует красной полосе поглощения солнечного излучения хлорофиллом.

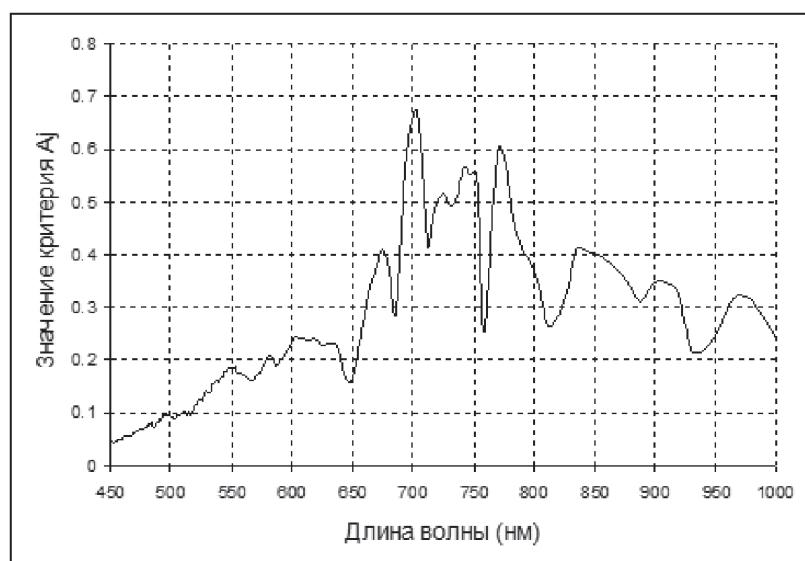


Рис. 4. График значений критерия Aj по каналам 101-290 для изображения леса

В ИК-области провалы графика в основном обусловлены линиями поглощения излучения водяными парами, поэтому имеет смысл отбор всех локальных максимумов критерия, которые соответствуют «окнам прозрачности» атмосферы, тем более что каналы в этом диапазоне существенно шире, чем в коротковолновом.

При пространственном разрешении 10 м по локальным максимумам для участка леса всего было отобрано 36 каналов из 190. Для различных сцен при указанном пространственном разрешении число отобранных каналов изменялось от 30 до 40. При переходе к более низкому разрешению число каналов постепенно сокращалось, что обусловлено пространственным слаживанием сцены и образованием смесей спектральных классов. Так при разрешении 40 м на пиксель для изображения леса число отобранных каналов сократилось до 14. Однако во всех случаях набор обязательно содержал каналы из диапазона 540-560 нм (зеленый максимум) и один и тот же канал «красного минимума» (675 нм).

Классификация изображений выполнялась методом максимума правдоподобия. Для подготовки обучающих выборок использовалась наиболее информативная RGB-композиция из отобранных каналов. Количество классов определялось следующими факторами:

- 1) наличием однородного по цвету участка достаточно большого размера, для возможности сопоставления результатов при различном пространственном разрешении;

- 2) точностью классификации на наборе эталонов не хуже 95%;
- 3) полным охватом всех представленных на территории классов при выполнении двух предыдущих условий.

Результаты тематической классификации участка леса при различном пространственном разрешении и интерпретации выделенных классов приведены на рис.5. Все результаты классификации были сглажены по преобладающему классу в окне 3×3 для удаления ошибочно классифицированных пикселей и локализации контуров классов.

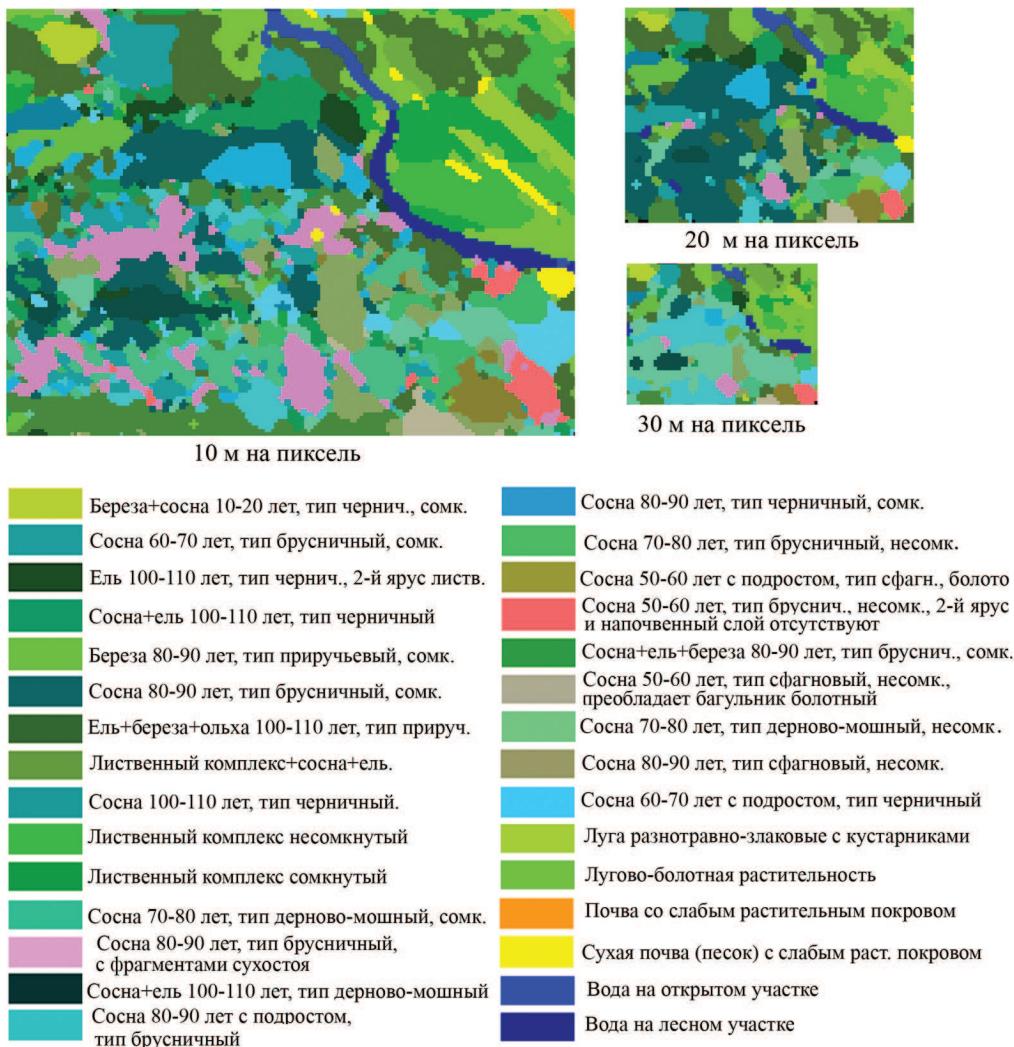


Рис. 5. Результаты классификации и интерпретации выделенных на тестовом участке классов растительности

Интерпретация результата показывает, что по гиперспектральным изображениям удается выделить существенно большее количество растительных классов, чем по любым мультиспектральным космическим изображениям. Однако если при пространственном разрешении 20 м на пиксель положение контуров значительной части классов для выбранного набора эталонов еще остается в приемлемых для тематического картографирования границах, то при разрешении 30 м на пиксель контуры классов претерпевают значительные изменения.

Для оценки возможностей классификации лесной растительности по определенным таксономическим характеристикам (возраст, породный состав, тип леса) на основе полученных результатов классификации с использованием одних и тех же автоматических процедур ГИС-анализа было составлено несколько тематических карт (рис. 6–8).

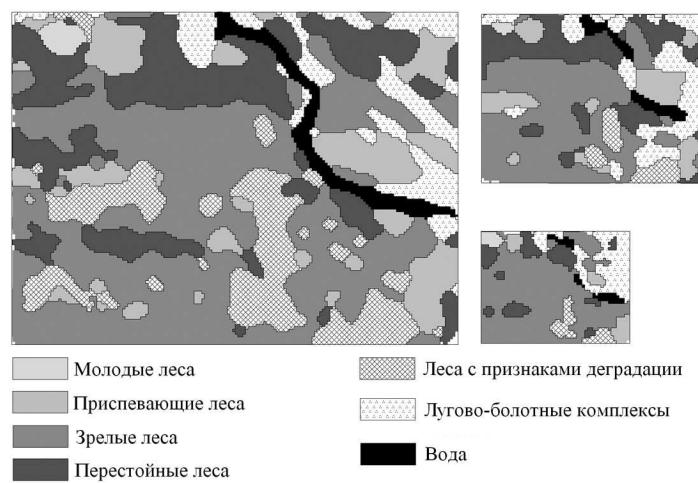


Рис. 6. Карта возрастных категорий леса, составленная по результатам классификации изображений с разрешением 10, 20 и 30 м на пиксель

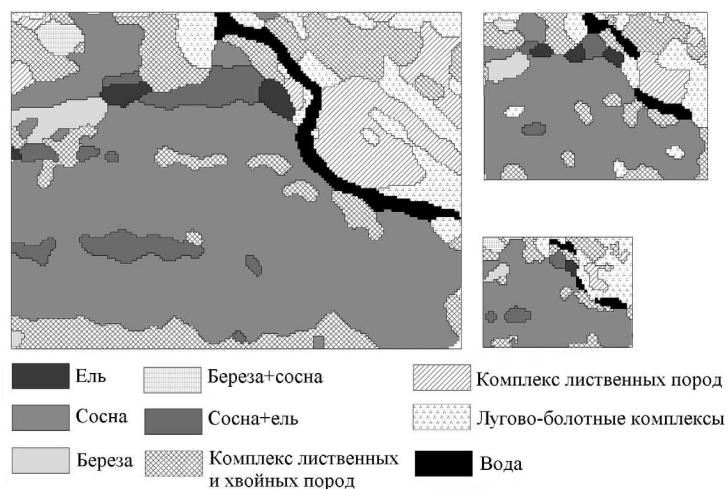


Рис. 7. Карта породного состава леса, составленная по результатам классификации изображений с разрешением 10, 20 и 30 м на пиксель

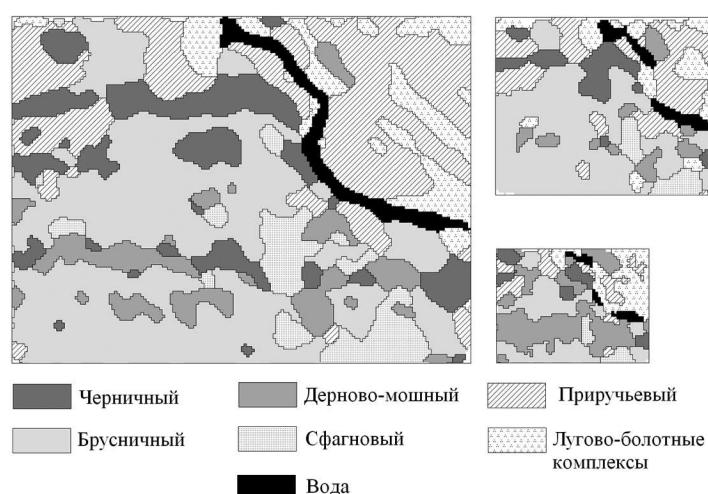


Рис. 8. Карта типов леса, составленная по результатам классификации изображений с разрешением 10, 20 и 30 м на пиксель

По приведенным картам видно, что локализация крупных контуров при изменении пространственного разрешения оказывается наиболее устойчивой для породного состава лесов. Неплохо определяются крупные участки леса с признаками деградации. Локализация же контуров различных возрастных категорий существенно нарушается при пространственном разрешении 30 м на пиксель, а контуров типов леса – уже при пространственном разрешении 20 м на пиксель. Последний факт объясняется тем, что при пространственном разрешении 10 м на пиксель на спектр отражения соответствующего участка леса, при неполной сомкнутости крон, еще влияют спектральные отражательные свойства растительности напочвенного слоя, состав которой зависит от условий произрастания. При меньшем пространственном разрешении влияние этого фактора становится менее заметным из-за сглаживания сцены.

6. Обсуждение результатов

Кроме приведенного в качестве примера участка леса, на тестовом полигоне была выполнена тематическая классификация участка поймы р. Волга и имеющихся в окрестности г. Тверь сельскохозяйственных угодий. Полученные результаты тематической классификации всех отобранных для обработки участков при различном пространственном разрешении и количестве каналов показали следующее.

1. Главным преимуществом гиперспектральной аппаратуры перед мультиспектральной аппаратурой аналогичного пространственного разрешения является возможность оптимального подбора узких каналов для каждого типа сцены и сезона съемки. При этом критерий отбора каналов на основе анализа главных компонент позволяет выявить участки спектра в видимом диапазоне, характеризующие наиболее заметные различия в типах растительного покрова по особенностям пигментации.
2. Следует ожидать, что при космической гиперспектральной съемке решение наибольшего количества тематических задач будет обеспечивать спектральный диапазон 480-1000 нм. Наиболее детальная классификация различных типов почвенно-растительного покрова по спектральным признакам возможна при пространственном разрешении пикселя 10-20 м. Наилучшие результаты при пространственном разрешении хуже 10 м на пиксель можно ожидать для задач, связанных с классификацией природных ландшафтов. Результаты классификации и особенно идентификации состояний сельскохозяйственных культур по спектрам отражения значительно ухудшаются уже при разрешении 20 м на пиксель из-за образования сложных смесей спектров растительности и почвы. Тем не менее, использование материалов аэрокосмической гиперспектральной съемки даже при разрешении хуже 10 м на пиксель будет иметь чрезвычайно большое значение для тематического картографирования труднодоступных территорий.

Использование гиперспектральной аппаратуры значительно повышает достоверность идентификации погибающих и погибших лесов. На мультиспектральных изображениях сигнатуры этих классов часто совпадают с таковыми для несомкнутого леса со слабым напочвенным слоем. Различия могут быть надежно определены только при одновременном использовании нескольких участков зелено-голубой, красно-оранжевой и ближней инфракрасной зон спектра.

На пойменных территориях по спектральным признакам выделяются разнообразные болотные и луговые комплексы с определенным составом растительности. Решение этой задачи имеет большое значение для оценки качества земель и сенокосных угодий в поймах крупных рек. Ограниченные возможности классификации растительного покрова пойм по мультиспектральным изображениям приводят к сложным

интерактивным процедурам интерпретации выделенных классов с привлечением большого объема картографических и справочных данных (Андреев, Афанасьева, Чабан, 1997). Классификация гиперспектральных изображений пойм позволяет выделить значительно большее количество интерпретируемых спектральных классов, что в несколько раз сокращает затраты на интерактивный тематический анализ с использованием справочных и картографических материалов.

3. Тематическая обработка гиперспектральных изображений требует разработки специальных методик анализа спектральных признаков объектов подстилающей поверхности. Такие методики должны обеспечивать возможности сравнения спектров отражения по различным критериям, в том числе с учетом дисперсии коэффициентов отражения по каналам. Для тематической интерпретации классов растительных комплексов необходима разработка аппарата моделирования смесей спектральных классов, в том числе с учетом рассеянной компоненты. Нужно отметить, что в существующих пакетах тематической обработки данных ДЗЗ, в том числе в ERDAS Imagine и ENVI, эти возможности весьма ограничены.
4. Поскольку при тематической интерпретации выделенных по спектральным признакам классов используются эталонные данные из спектральных библиотек, большое значение имеет качество атмосферной коррекции. При этом расчет дымки для самолетных гиперспектральных изображений требует более точного подбора альбедо подстилающей поверхности, чем для космических изображений. Разброс рассчитанных коэффициентов отражения одного типа растительности в видимом диапазоне, в зависимости от выбранного альбедо, для самолетных изображений при высоте съемки 2 км может достигать 50 %.

Перечисленные особенности тематической обработки гиперспектральных изображений требуют создания соответствующих программных средств, которые предполагается включить в разрабатываемое в МФТИ программное обеспечение тематической обработки гиперспектральных видеоданных.

Литература

1. Козодоров В.В., Кондранин Т.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Щербаков М.В., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов // Исследования Земли из космоса, 2009. №2. С. 36–54.
2. Дистанционное зондирование: количественный подход. Ред. Ф.Свейн, Ш.Дэйвис. М., Недра, 1983, 401с.
3. IMAGINE Spectral Analysis. User's Guide. Leica Geosystems GIS & Mapping, LLC, 2003.
4. Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Гаврилова Т.С. Исследование возможностей классификации растительного покрова по гиперспектральным изображениям в пакетах тематической обработки данных дистанционного зондирования // Труды МФТИ, Т.1, №3, 2009, С. 171–180.
5. Андреев Г.Г., Афанасьева Т.В., Чабан Л.Н.. Автоматизированная тематическая обработка много-зональных космических изображений пойм при составлении почвенных карт и оценке качества пойменных земель // Исследования Земли из космоса, 1997. №1. С. 89–100.

Modeling and thematic processing of images identical to the imagery from workable and preparing for the space launch hyperspectral remote sensors

L.N. Chaban¹, G.V. Vecheruk¹, T.V. Kondranin¹, S.V. Kudriavtsev², A.A. Nikolenko¹

¹Moscow Institute for Physics and Technology (State University)

141700 Dolgoprudny Moscow region, 9 Institutsky per.

E-mail: georg@geo.mipt.ru, alex_nikolenko@mail.ru

²ZAO «NPO «Lepton»,

124498 Moscow, Zelenograd, proezd 4806, d.5, str.23

E-mail: ksv@lepton.ru

By using the aircraft hyperspectral imagery some images identical on spatial resolution and actual intensity range to workable and preparing for space launch remote sensors were simulated. On the example of forestry image thematic processing the possibilities of forestry classification according to several taxation indicators at different spatial resolution of images are shown. The results of several simulated images thematic processing in the testing area of Tver region are discussed.

Keywords: remote sensors, hyperspectral images, spatial resolution, intensity range, atmospheric correction, spectral reflectance, thematic processing, forestry classification, interpretation of vegetation.