

Проблемы классификации лесной растительности по гиперспектральным авиакосмическим изображениям

Т.В. Кондранин¹, В.В. Козодоров², О.Ю. Казанцев^{3,1}, В.И. Бобылев^{3,1},
Е.В. Дмитриев^{4,1}, В.Д. Егоров⁴, В.П. Каменцев⁵, В.В. Борзяк²

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)
141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

E-mail: kondr@kondr.rector.mipt.ru

²Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Воробьевы горы, МГУ, д. 1.

E-mail: vkozod@mes.msu.ru

³НПО «Лептон»
г. Москва, г. Зеленоград, Проезд 4806, 5, стр. 20.

E-mail: bob@lepton.ru

⁴Институт вычислительной математики РАН
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8.

E-mail: yegor@imt.ras.ru

⁵Технопарк Тверского государственного университета
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.

E-mail: kvp53@mail.ru

Изучаются возможности приложения данных авиакосмической гиперспектрометрии для решения задач классификации разных типов лесной растительности. Обсуждаются основные этапы разработки классификаторов (вычислительных процедур) обработки гиперспектральных изображений. Приведены примеры реализации программного обеспечения, позволяющего строить контуры отдельных элементов пространственного распределения RGB-синтезированных изображений. Демонстрируются характерные особенности исходных спектров и их стандартных отклонений в пределах выделенных контуров для распознавания трех классов лесной растительности (ельников, сосняков и березняков) на выбранной тестовой территории.

Ключевые слова: гиперспектральные авиакосмические изображения, обработка данных, классификация лесной растительности.

Введение

Авиакосмическая гиперспектрометрия – общее определение измерительных средств, методов обработки и интерпретации гиперспектральных изображений (hyperspectral images) на основе данных авиационного или космического дистанционного зондирования. В гиперспектральной аппаратуре спектральное разрешение достигает единиц нанометров; поэтому при реальном числе спектральных каналов ≥ 100 открываются перспективы решения более широкого круга прикладных задач по сравнению с традиционными системами многоспектрального зондирования (число каналов ~ 10). Существенное увеличение числа информативных каналов в гиперспектральной аппаратуре обусловливает соответственное увеличение объемов исходных данных в каждом гиперспектральном изображении. Принято говорить об обработке гиперкубов данных, имея в виду, наряду с двумя горизонтальными координатами изображений, третью координату – длину волны. При сверхвысоком спектральном разрешении различия между данными соседних спектральных каналов обычно незначительны, так что информация, извлекаемая из этих каналов, может оказаться избыточной. Возникает задача оценки информационного содержания получаемых данных.

В работе в качестве исходных использовались данные, полученные ходе летных экспериментов (2010 г.) по тестовым участкам Тверской области с помощью установленной на борту авианосителя гиперспектральной камерой видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра (Кондранин и др., 2010).

Разработанные ранее вычислительные средства обработки многоспектральных изображений (Козодеров, Кондранин, 2008) были модернизированы для обработки данных летних испытаний гиперспектральной аппаратуры (Кондранин и др., 2010). Были показаны широкие возможности аэрокосмической гиперспектрометрии для распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова (Козодеров и др., 2010).

Данная работа посвящена описанию ключевых проблем обработки гиперспектральных данных видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра применительно к решению важной прикладной задачи: классификации лесной растительности. Описывается специализированный формат представления данных гиперспектрального зондирования. Приводятся характерные примеры спектров «чистых пород» лесных объектов, полученные гиперспектральной камерой в разные сезоны летней кампании 2010 года на выбранной тестовой территории. Исследованы возможности использования соответствующих классификаторов (вычислительных процедур) для решения поставленной прикладной задачи.

Основные этапы реализации вычислительных процедур обработки данных гиперспектрального зондирования

Тематической обработке гиперспектральных изображений, которая в данном случае сводится к задаче распознавания классов лесных объектов, предшествуют предварительные процедуры, связанные с систематизацией данных, реализации процедур предварительной обработки (пре-процессинга) и получению априорных оценок возможностей разделения интересующих классов по спектральным признакам. Основными этапами обработки гиперспектральных изображений являются:

- реализация процедур доступа и форматов хранения данных, обеспечивающих быстрое считывание гиперспектральной информации;
- разработка процедур коррекции гиперспектральных изображений;
- систематизация ранее полученных обработанных результатов гиперспектральных дистанционных измерений, дополненные синхронными фотоизображениями и данными лесотаксации;
- выделение основных классов исследуемых объектов, соответствующих им ансамблей спектров отраженного излучения при различных условиях освещения, определение границ и центров полученных классов;
- определение различимости выбранных классов, с учетом заданных информационных мер.

В процессе съемки для записи гиперспектральных измерений используется специализированный формат WSP, который обеспечивает: объединение поступающих одновременно нескольких потоков данных и записи их в один файл, а также совместимость файлов WSP и программного обеспечения (ПО) при добавлении или исключении потоков данных.

Для решения первой задачи каждый поток разбивается на блоки данных, которые записываются в файл по мере поступления. Решение второй задачи подразумевает, что ПО, предназначенное для работы с некоторым набором потоков данных, должно корректно обрабатывать файлы более новых версий, в которых могут присутствовать новые потоки данных, информации о которых не имелось на этапе разработки ПО. Аналогично, некоторые потоки могут быть исключены. Для обеспечения совместимости, каждому потоку данных присваивается идентификатор, затем потоки данных разбиваются на блоки фиксированного размера, а информация о содержащихся в файле потоках и размерах соответствующих блоков записывается в заголовок WSP файла, представляющий собой таблицу типов блоков данных, содержащую:

1) число – количество потоков данных (типов блоков) (32-битное беззнаковое целое – далее БЦ32);

2) набор пар, описывающих отдельные потоки данных, такие как идентификатор потока данных (типа блока) (БЦ32) и размер информационной части блока данных в байтах (БЦ32). Каждый блок данных составляют идентификатор потока данных (тип блока, БЦ32) и информационная часть. Блоки записаны один за другим в порядке поступления данных.

Формат WSP обеспечивает быструю запись данных при проведении измерений и достаточно эффективное сжатие без потери точности. Однако, даже, несмотря на использование достаточно мощных компьютеров, обработка подобных данных, как правило, требует существенных временных затрат. В частности, весьма актуален вопрос обеспечения быстрого доступа к калиброванным данным. Проблема заключается в следующем. В отличие от данных гиперспектральных измерений 1-го уровня, представленных 2-байтовыми целыми числами (поскольку эти данные соответствуют уровням АЦП), калиброванные данные представляются 8-байтовыми числами с плавающей точкой. Таким образом, объем информации существенно возрастает. Например, стандартный размер трека (спектрального куба данных) составляет 500x2000x290x8 ~ 2.3 Гб. Загружать такие массивы в память персонального компьютера и проводить с ними манипуляции не представляется возможным. Поэтому единственным способом решения данной проблемы является создание процедур для быстрого чтения с жесткого диска. Современные жесткие диски обладают большой производительностью при последовательном чтении данных (50-100 Мб/с). Однако, при произвольном чтении происходят постоянные перемещения считывающей головки и скорость становится, как минимум, на порядок меньше. Таким образом, если при чтении больших объемов информации необходимо постоянно перемещать указатель более чем на один шаг, то этот процесс может занять существенное время.

Важным этапом предварительной обработки данных является привязка объектов на гиперспектральном изображении к информации, полученной по наземным измерениям, картографической продукции и аэрофотоснимкам. Наиболее удобной формой для этого является синтезированное RGB изображение. В работе реализована интерактивная процедура, позволяющая проецировать спектральный куб данных на базисные функции RGB стандарта CIE XYZ. Данный стандарт был апробирован Международной Комиссией по Овеществлению (Commission Internationale de l'Eclairage) в 1931 году и по сей день является одним из основных представлений спектральных изображений в удобном цветном формате. Процедура позволяет интерактивно изменять общую яркость и вклад каждого из цветов (при правильной калибровке прибора баланс цветов остается без изменений), менять пропорции изображения, производить отражения вокруг вертикальной и горизонтальной оси, увеличивать любой участок изображения. Важным инструментом является возможность отображения спектров каждого пикселя, на который помещен специальный указатель.

Примеры спектров «чистых пород» лесной растительности

Число обучающих спектров для каждого из выделенных участков тестовой территории Тверской области приведено в таблице 1.

Таблица 1. Размеры ансамблей обучающих спектров

N	Число обучающих спектров	Название объекта	Сезон
1	5633	ель	весна
2	4935	ель	лето
3	5955	ель	осень
4	1178	сосна	весна
5	1730	сосна	лето
6	722	сосна	осень
7	859	береза	весна
8	452	береза	лето
9	4018	береза	осень

RGB-синтезированное отображение выделенных контуров ельников приведено на рис.1 a , b , в по данным весенней, летней и осенней съемок, соответственно. Видно, что в пределах выделенных контуров для каждого из рассматриваемых сезонов ельники отличаются более темным тоном на фоне окружающих их других типов растительности.

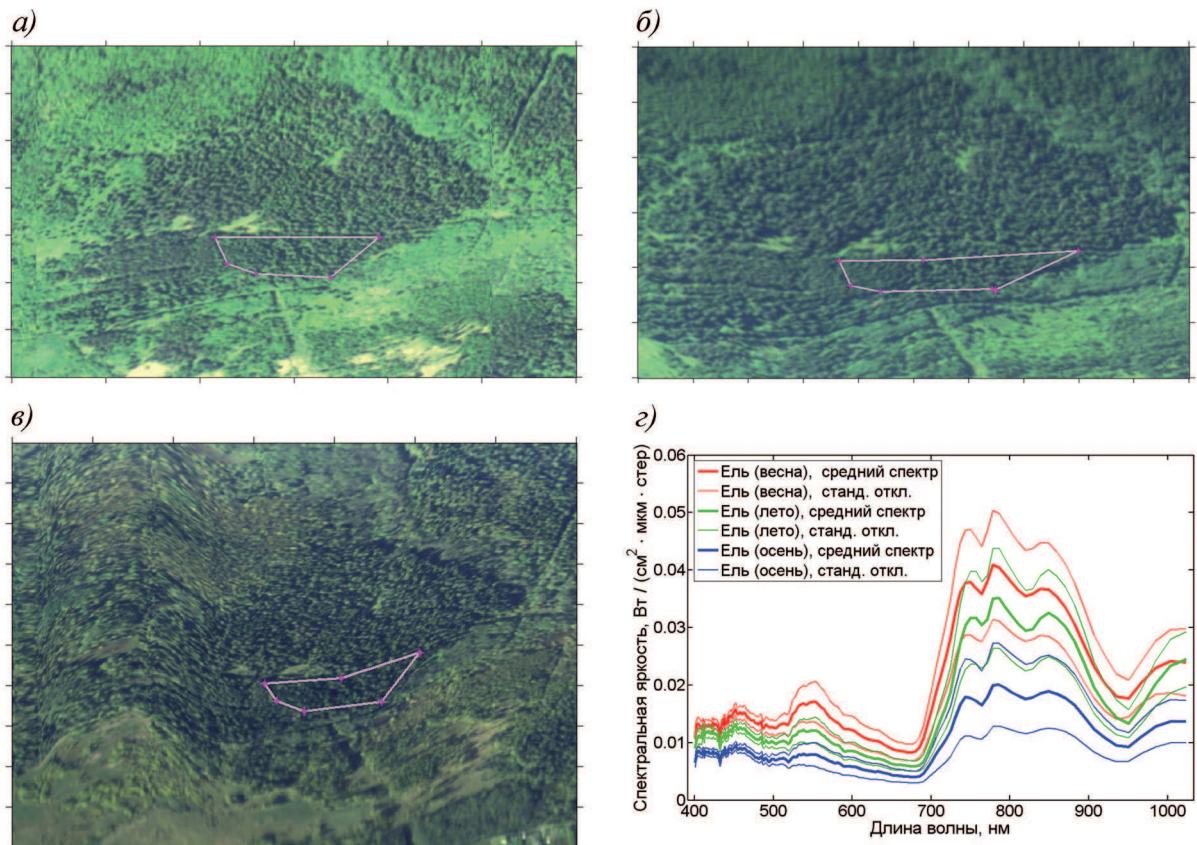


Рис.1. Выделенные контуры «чистых ельников» в период их весенней (а), летней (б) и осенней (в) гиперспектральной аэросъемки, а также средние спектры и их стандартные отклонения (красный, зеленый и синий цвета для трех указанных периодов съемки, соответственно) (г)

На рис.1 ε для объектов чистые ельники представлены средние по соответствующему ансамблю обучающих спектров значения спектральной яркости (далее спектры) и соответствующие им среднеквадратические отклонения, характеризующие разброс спектров пикселей в пределах выделенных контуров. Видно, что в коротковолновой области спектра ($\lambda \leq 700$ нм) спектры ельников особенно значительно различаются в весенний период. Но, в то же время, в ближней инфракрасной области спектра ($\lambda \geq 700$ нм) изменчивость спектров также достаточно велика. Такая высокая изменчивость приводит к пересечению доверительных интервалов спектров весенней и летней съемки на этих длинах волн (красные и зеленые линии, соответственно). При этом спектры ельников в период осенней съемки (синие линии) существенно отличаются от данных, полученных в весенней и летней гиперспектральной съемке.

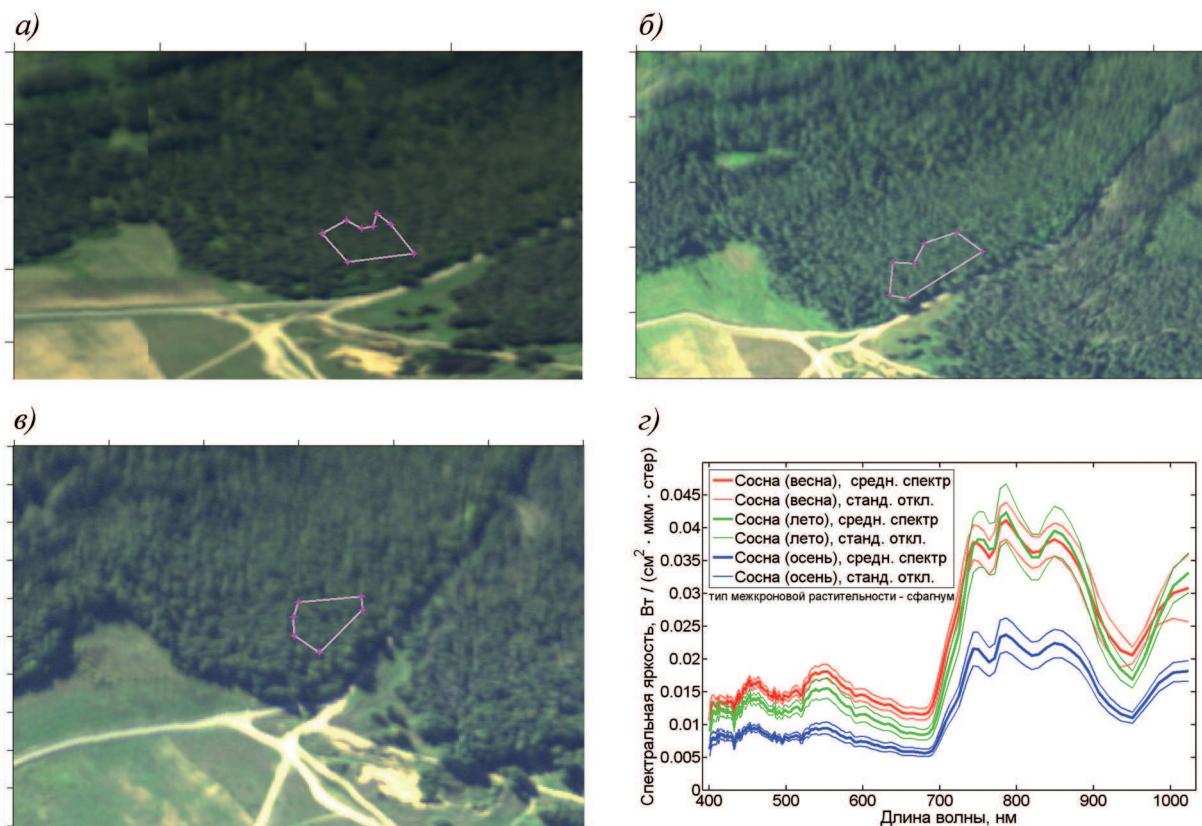


Рис.2. Выделенные контуры «чистых сосняков» в период их весенней (а), летней (б) и осенней (в) гиперспектральной аэросъемки, а также средние спектры и их стандартные отклонения (красный, зеленый и синий цвета для трех указанных периодов съемки, соответственно) (г)

На рис. 2 a , b , c в представлены спектры, аналогичные рис.1, полученные по контурам преобладающих сосняков-сфагнумов на тестовой территории для каждого из трех сезонов (весна, лето, осень). Визуальная оценка представленных RGB-синтезированных изображений показывает, что для условий весенней съемки сосняки выглядят более темными по сравнению с данными летней съемки, незначительно отличаясь от данных осенней съемки. Для осеннего сезона можно отметить достаточно близкий характер изменчивости средних спектров и их среднеквадратических отклонений для выделенных контуров сосняков (рис. 2 ε) в сравнении с данными, характерными для ельников (рис. 1 ε). Для весеннего и летнего сезонов обращают на себя внимание различия в спектрах, особенно, для $\lambda \geq 700$ нм: достаточно равномерное покрытие кривыми практически всей оси ординат для ельников

(рис. 1 σ) сменяется фактическим объединением этих кривых для сосняков (рис. 2 σ). Следовательно, появляются реальные признаки различия этих хвойных пород не только в осенний, но и в весенний и летний сезоны.

Примеры рис. 3 a , b , в для типичных березняков демонстрируют характерные особенности пространственного распределения лиственных пород деревьев. Средние спектры и их среднеквадратические отклонения для выделенных контуров приведены на рис. 3 σ . Можно видеть, что RGB-синтезированные изображения в пределах выделенных контуров березовых насаждений выглядят самыми темными в весенний сезон, более светлыми в летний сезон и совсем светлыми в осенний сезон. Следует отметить хорошую различимость спектров практически во всей рассматриваемой области; минимальная различимость наблюдается в области полосы поглощения хлорофилла (650-700 нм). Наибольшая различимость наблюдается в длинноволновой области, однако, различимость в весенний и летний сезоны (красные и зеленые кривые) тем не менее, оказывается малой.

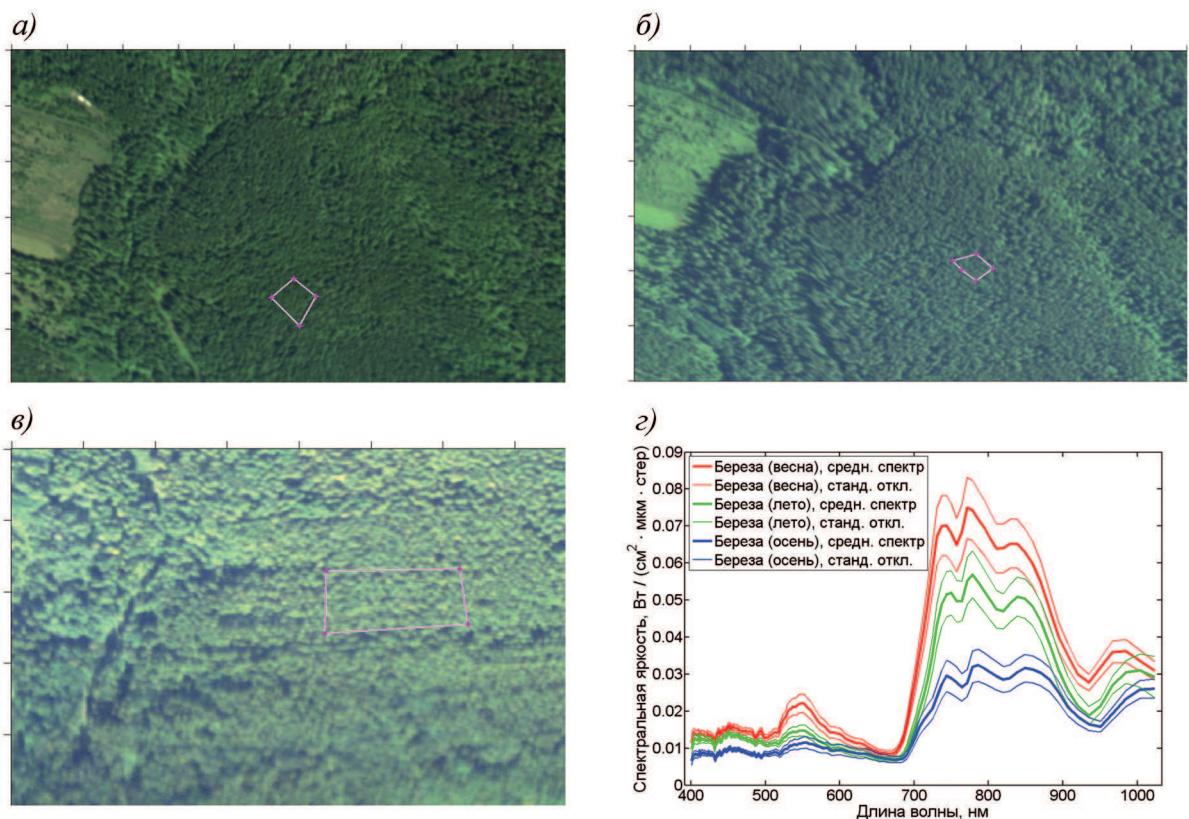


Рис.3. Выделенные контура «чистых березняков» в период их весенней (а), летней (б) и осенней (в) гиперспектральной аэросъемки, а также средние спектры и их стандартные отклонения (красный, зеленый и синий цвета для трех указанных периодов съемки, соответственно) (г)

Отмеченные особенности и закономерности в поведении спектров рассматриваемых пород лесной растительности используются для изучения возможностей разных классификаторов с обучением по выделенным в пределах контуров выборочным данным. При этом должны учитываться отмеченные выше особенности формирования гиперспектральных изображений. Исследования авторов показали, что в качестве адекватного инструментария может использоваться квадратичный дискриминантный анализ – статистический классификатор, который позволяет генерировать оптимальные в байесовском смысле разделяющие

поверхности второго порядка. На ансамбле эталонных спектров такой классификатор обеспечивает минимум полной вероятности ошибки.

Пример использования данного метода для классификации гиперспектральных изображений приведен на рис. 4. Рассматриваемая сцена находится вблизи села Саввательево в Тверской области содержит различные объекты природно-техногенной сферы и, в частности, интересные с точки зрения целей данной работы лиственные, хвойные и смешанные лесные массивы. Общее представление об истинном положении присутствующих на ней объектов (границы лесов, дороги, луга, здания, водные объекты) можно составить визуально на основе синтезированного RGB-изображения (рис. 4a). Для данной сцены имеются также цифровые и картографические данные лесотаксационных описаний, полученные в ходе наземных измерений. На рис. 4б представлена соответствующая часть лесотаксационной карты, на которой фиолетовой рамкой выделена рассматриваемая сцена. Основную часть лесных выделов составляют спелые сосняки (оранжевый цвет) и березняки (синий цвет), 1-го и 2-го бонитетов. Также присутствуют молодые (5-7 лет) березовые насаждения, например, выдел 8 квартала 5,. По данным, представленным на рис. 4б, можно составить качественное представление об ошибках классификации. При этом необходимо учитывать устаревание данных, ошибки, связанные с методикой наземных измерений и то, что измерения проводились далеко не для всех лесных массивов на рассматриваемой сцене.

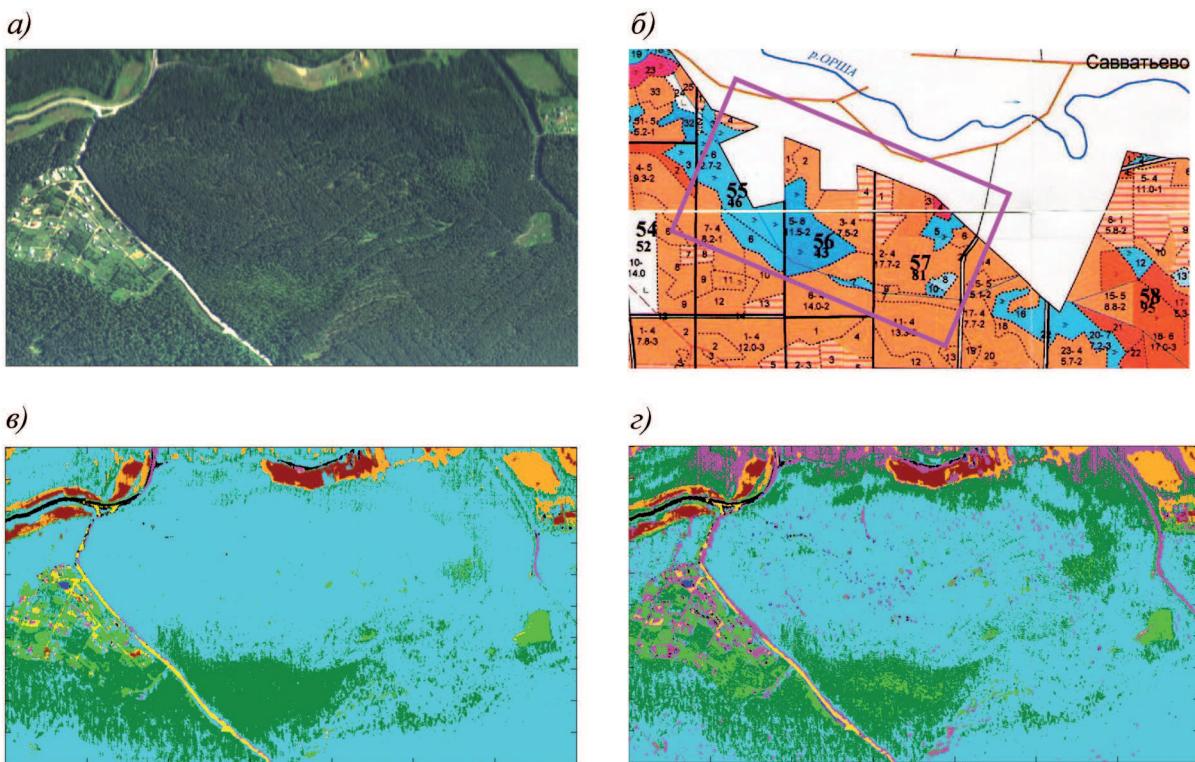


Рис. 4. Результаты классификации гиперспектрального изображения для летнего сезона:
 (а) – синтезированное RGB-изображение рассматриваемой сцены; (б) – соответствующая карта наземных лесотаксационных данных, синий цвет – березовые выделы, оранжевый – сосновые;
 (в) – классификация изображения с использованием информации в 48 объединенных спектральных каналах (10 нм, гиперспектральное разрешение); (г) – классификация изображения с использованием информации в 6 объединенных спектральных каналах (100 нм, мультиспектральное разрешение). Цветовые обозначения для (в) и (г): синий – вода, черный – асфальт, желтый – песчаный грунт, темно-красный – плодородная почва, оранжевый – трава, светло-зеленый – молодняк березы, темно-зеленый – зрелый березняк, сине-зеленый – зрелый сосновый лес, фиолетовый – прочие объекты

На этапах предварительной обработки гиперспектральных данных проводились нормализация спектров на соответствующую интегральную яркость и редукция спектрального разрешения объединением каналов. Нормализация позволяет классифицировать объекты, основываясь на форме спектров, и в значительной степени уменьшает вариации спектральной яркости при изменении условий освещения; редукция обеспечивает регуляризацию решения. Использование слишком большого числа каналов, которые могут быть коррелированы, приводит к проблеме переобучения. Заметим также, что объединение спектральных каналов позволяет значительно уменьшить шумовую составляющую в диапазоне 400-550 нм, связанную с высоким спектральным разрешением гиперспектрометра (до 0.5 нм) в данной области.

На рис. 4в представлены результаты классификации с использованием 48 объединенных каналов с максимальным разрешением не выше 10 нм. Полученные результаты показывают хорошее соответствие имеющимся данным. В частности, хорошо видны выделы 5-6 квартала 55, выделы 5 и 7 квартала 56, выдел 10 квартала 57 с преобладанием бересы (70-80%) в возрасте около 70 лет. Выделяется молодняк бересы (5-8 лет), например, выдел 8 квартала 57. Соответствуют действительности сосновые выделы (в основном 90-100%). Асфальтированные и грунтовые дороги выделяются не полностью. Это обусловлено наличием теней деревьев, растущих на обочине, которые существенно меняют форму спектра. Правильно классифицируется небольшой пруд. Фиолетовым цветом обозначены прочие объекты, которые не вошли в обучающие ансамбли. В частности, такими объектами являются здания.

Пример классификации изображения с низким спектральным разрешением, соответствующим разрешению обычной многоспектральной аппаратуры приводится на рис. 4г. В качестве исходной использовалась информация, полученная в 6 объединенных спектральных каналах с разрешением 100 нм. Цветовое представление объектов и используемые обучающие выборки идентичны рис. 4в. Анализ показывает, что обработка данных с «грубым» спектральным разрешением, позволяет составить качественное представление об объектах сцены, однако, при этом существенно возрастают ошибки классификации, в особенности, ошибки ложной тревоги. Также существенно возрастает и неопределенность решения (фиолетовые точки). Ошибки возникают даже при классификации таких хорошо различимых объектов, как вода и сосновый лес – некоторые участки межкроновых просветов классифицируются как открытая водная поверхность. Это обусловлено тем, что в обучающую выборку вошли не только пиксели чистой воды, но и пиксели прибрежной зоны, спектры которых находятся под влиянием водной растительности и излучения, рассеянного деревьями и кустарниками на берегу. Приведенный пример показывает преимущества использования данных гиперспектральной съемки для создания тематических карт.

Заключение

Основные проблемы построения классификаторов при обработке гиперспектральных изображений на данном этапе летних испытаний гиперспектральной аппаратуры обозначены как проблемы нахождения «чистых спектров» для обучения по тестовым выборкам, относящимся к выделенным трем классам лесной растительности. Показаны особенности форматов исходных данных для реализации требуемых вычислительных процедур класси-

ификации лесной растительности. Продемонстрированы преимущества использования данных высокого спектрального разрешения. Дальнейшие исследования сводятся к построению оптимальных классификаторов для распознавания соответствующих объектов с заданной точностью.

Исследования выполняются при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы НК-568П Гос. контракт П349, Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2010 – 2013 годы), проекта РФФИ №09-05-00171.

Литература

1. Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования // М., изд. МФТИ, 2010. 222 с.
2. Кондранин Т.В., Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Борзык В.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б. Основы технологии восстановления количественных характеристик лесных экосистем по многоспектральным и гиперспектральным данным аэрокосмического зондирования. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2010. Вып.7. Т.1. С.299-309.
3. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Райкунов Г.Г., Казанцев О.Ю., Белоцерковский А.В., Асташкин А.А., Бобылев В.И., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Борзык В.В., Щербаков М.В., Лесуновский А.А. Аэрокосмическая гиперспектрометрия: летные испытания аппаратуры, программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных // Исследование Земли из космоса, 2010, №5. С.59-68.

Problems of hyperspectral remote sensing imagery classification

T.V. Kondranin¹, V.V. Kozoderov², O.Yu. Kazantsev³, V.I. Bobylev,
E.V. Dmitriev⁴, V.D. Egorov⁴, V.P. Kamentsev⁵, V.V. Borzyak²

¹*Moscow Institute for Physics and Technology (State University)*

E-mail: kondr@kondr.rector.mipt.ru

²*M.V.Lomonosov Moscow State University*

³*NPO “Lepton”*

⁴*Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences*

⁵*Technological Park of Tver State University*

Opportunities are studied of remote sensing hyperspectral data to solve classification problems of various types of forested vegetation. Main stages are shown of the classifiers (computational procedures) elaboration to process hyperspectral images. Examples are revealed of the software tool realization that enables to draw up contours of separate pixels on the spatial distribution of the RGB-synthesized images. Characteristic features are demonstrated of initial spectra and their standard deviations within the selected contours to recognize three classes of forested vegetation (spruce, pine, birch) on a particular test area.

Keywords: hyperspectral remote sensing imagery, data processing, forested vegetation classification.