

# **Основы технологии восстановления количественных характеристик лесных экосистем по многоспектральным и гиперспектральным данным аэрокосмического зондирования**

**Т.В. Кондранин<sup>1</sup>, В.В. Козодеров<sup>2</sup>, Е.В. Дмитриев<sup>3</sup>, О.Ю. Казанцев<sup>4</sup>, В.И. Бобылев<sup>4</sup>,  
В.В. Борзяк<sup>2</sup>, В.Д. Егоров<sup>3</sup>, В.П. Каменцев<sup>5</sup>, А.Ю. Беляков<sup>5</sup>, С.Б.Логинов<sup>5</sup>**

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

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

<sup>2</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
119991, Москва, ГСП-1, Воробьевы горы, МГУ, д. 1.*

*E-mail: vkozod@mes.msu.ru*

<sup>3</sup>*Институт вычислительной математики РАН  
119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 8.*

*E-mail: yegor@int.ras.ru*

<sup>4</sup>*НПО «Лептон»  
г. Москва, г. Зеленоград, Проезд 4806, 5, стр. 20.*

*E-mail: bob@lepton.ru*

<sup>5</sup>*Технопарк Тверского государственного университета  
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.*

*E-mail: kvp53@mail.ru*

Описываются основные элементы технологии распознавания образов природно-техногенных объектов и оценки параметров состояния почвенно-растительного покрова по многоспектральным и гиперспектральным данным аэрокосмического зондирования. Основное внимание уделяется сравнению результатов обработки совмещенных данных аэрофото- и гиперспектральной съемки с данными наземных лесотаксационных обследований выбранной территории. Демонстрируется более высокое качество получаемой информационной продукции обработки гиперспектральных изображений в сравнении с традиционными подходами, основанными на известной концепции «вегетационных индексов».

**Ключевые слова:** многоспектральные и гиперспектральные аэрокосмические изображения, обработка данных, распознавание образов объектов, лесные экосистемы, восстановление параметров состояния.

## **Введение**

Основу технологии решения прикладных задач оценки параметров, характеризующих состояние почвенно-растительного покрова для каждого элемента обрабатываемых многоспектральных и гиперспектральных аэрокосмических изображений, составляют методы, алгоритмы и расчетные программы реализации следующих взаимосвязанных вычислительных процедур:

– распознавание (классификация) образов наблюдаемых объектов на основе выбранной меры близости предъявляемых векторов спектральных образов соответствующих объектов (значений интенсивности регистрируемого излучения) некоторым «эталонным образам»;

– поэлементное восстановление количественных параметров состояния объектов почвенно-растительного покрова (объем зеленой фитомассы разных типов экосистем, породный состав лесной растительности, тип межкроновой растительности и др.) на основе обращения основного функционала расклассифицированных на первом этапе многоспектральных или гиперспектральных данных.

Многоспектральные изображения представляются в форме цифровых матриц исходных данных (до десяти спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области), в то время как гиперспектральные изображения содержат сотни каналов и отображаются в форме гиперкубов данных. Несмотря на успехи в использовании данных дистанционного зондирования (ДЗ) для самых различных приложений, общей проблемой развития этих приложений является необходимость обоснования оптимального числа спектральных каналов и их расположения по оси длин волн. Требуется понимание информационного содержания получаемых данных ДЗ для решения практических задач классификации объектов и оценки их состояния. При этом основой решения прикладных задач служит так называемая тематическая обработка данных, под которой понимается выделение на полученных изображениях объектов конкретной обрабатываемой сцены. Говорят также о распознавании объектов по их многоспектральным образам (функциональной связи энергетического спектра уходящего излучения с предметно-специфическими особенностями объектов), а также об анализе сцен, содержащих множество таких объектов.

При выделении конкретного класса объектов проводится сопоставление регистрируемых данных для каждого элемента разрешения с «эталоном» по некоторой функциональной мере сходства (например, используя процедуру нахождения минимума евклидова расстояния между сравниваемыми данными по всему спектру длин волн). Возникает задача выбора порога принятия решения о принадлежности предъявляемого спектра известным другим кривым спектрального хода яркостей из базы спектральных образов. Возникает также задача обоснования точности распознавания образов наблюдаемых объектов и оценки их состояния.

В работах [1-6] показаны примеры реализации оригинального программного обеспечения обработки данных ДЗ на основе новейших разработок в области вычислительной математики применительно к проблеме развития соответствующих приложений данных многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования. Примеры иллюстрируют результаты обработки данных аппаратуры MODIS/Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer («Видеоспектрорадиометр среднего разрешения») спутника Terra среднего пространственного разрешения, аппаратуры ETM+/Enhanced Thematic Mapper

(«Усовершенствованный тематический картограф») спутника Landsat-7 высокого пространственного разрешения и данных летных испытаний отечественной гиперспектральной аппаратуры разработки НПО «Лептон». Данные аппаратуры MODIS (7 спектральных каналов, пространственное разрешение около 500 м) покрывают всю территорию Тверской области и окружающие ее области. Для покрытия такой территории требовалась обработка около 300 изображений объемом 1000 x 1000 элементов разрешения аппаратуры ETM+. Данные гиперспектральной съемки (около 200 спектральных каналов, пространственное разрешение около 2 м с высоты около 1 км) охватывали выбранные тестовые участки Тверской области.

Для выбранных участков летных испытаний трех разных версий гиперспектральной аппаратуры в 2007-2009 годах проводились следующие научно-прикладные исследования:

1. Сбор и анализ данных гиперспектральной аэросъемки и их привязки к синхронным данным аэрофотосъемки (оба типа аппаратуры устанавливались на одной платформе) с последующей привязкой данных со щели гиперспектрометра к данным наземных лесотаксационных обследований выбранной территории.
2. Отработка расчетной схемы распознавания образов наблюдаемых объектов на основе гиперкубов данных аэроизмерений.
3. Адаптация разработанного программного обеспечения по оценке параметров состояния объектов почвенно-растительного покрова (объем зеленой фитомассы и др.) к новым наборам данных гиперспектрального зондирования.
4. Сравнение результатов распознавания объектов и поэлементного восстановления параметров состояния почвенно-растительного покрова с использованием наземных лесотаксационных обследований отдельных выделов.

В настоящей публикации рассматриваются некоторые примеры летних испытаний гиперспектральной аппаратуры во время измерительной кампании 2009 года.

### **Методика проведения авиаъемки**

Комплекс приборов, используемых в полете состоял из: гиперспектрометра; системы крепления и подвески гиперспектрометра на самолете; GPS-навигатора Garmin с внешней антенной; ноутбука. Аэрофотосъемка осуществлялась цифровой камерой (зеркальная Сони Альфа с матрицей 10 мП, объективами Минольта 50/1,4 и Минольта 28-135/4, с фиксацией трансфокатора и фокусного расстояния и дистанционным управлением). Съемка проводилась с самолета АН-2 на высоте 1200-2000 м.

Полетные задания включали следующие этапы. Перед каждым полетом его конкретный маршрут (он может состоять, например, из десятка характерных точек) заносится в GPS-приемник летчика и штурмана. В процессе полета штурман отслеживает траекторию движения самолета так, чтобы он прошел через выделенные точки маршрута с его корректировкой в соответствии со скоростью и направлением ветра, с учетом возможного появления слоев низких облаков и т.п. В соответствии с этой корректировкой из десятка выбранных маршрутов съемкой могут быть охвачены лишь единицы. Оператор гиперспектральной съемки, имея свой GPS-приемник, самостоятельно производит регистрацию спектров, ориентируясь на выделенные в полетном задании маршруты. Для каждого из выбранных полетных треков данные гиперспектральной съемки записываются на борту на DVD-диски в специальном wgs-формате, предлагаемом разработчиками аппаратуры. В процессе наземной обработки этих дисков в среде MATLAB данные wgs-формата, откорректированные с учетом геометрических искажений (после этой процедуры данные приобретают расширение wsp), переводятся в формат серий данных (расширение ser). В итоге появляется возможность автоматизации обработки таких серий данных гиперспектральной аэросъемки. При необходимости может осуществляться попиксельная визуализация каждого зарегистрированного спектра путем вывода его на дисплей компьютера.

### **Постановка задачи**

На рис.1 на примере обработки спутниковых данных показана блок-схема программы классификации объектов природно-техногенной сферы и восстановления параметров состояния объектов класса «растительность» по данным многоспектрального или гиперспектрального аэрокосмического зондирования. Два основных направления характеризуют входные данные: обрабатываемые изображения и параметры модельных расчетов. Изображения каждого канала содержат значения спектральных яркостей регистрируемого излучения и угловых координат каждого элемента разрешения, которые с помощью модулей автоматической проверки и преобразования данных о спектральной яркости и угловых координатах объединяются в модуле определения параметров каждого обрабатываемого цифрового изображения и разбиения на регионы. Модуль соединен, с одной стороны, с файлом параметров модельных расчетов прямой задачи формирования интенсивности уходящего излучения, регистрируемого соответствующей аппаратурой ДЗ, а с другой стороны, с входными данными модуля решения обратной задачи восстановления количественных параметров состояния разных типов растительного покрова. Прямая задача характеризуется расчетной схемой нахождения исходного функционала многоспектральных (гиперспектральных) яркостей разных типов почвенно-растительного покрова, обратная

задача – способом обращения этого функционала. На вход модуля решения обратной задачи поступают также данные из модуля расчета плотности биомассы растительности, соединенного с тем же самым файлом параметров модельных расчетов.

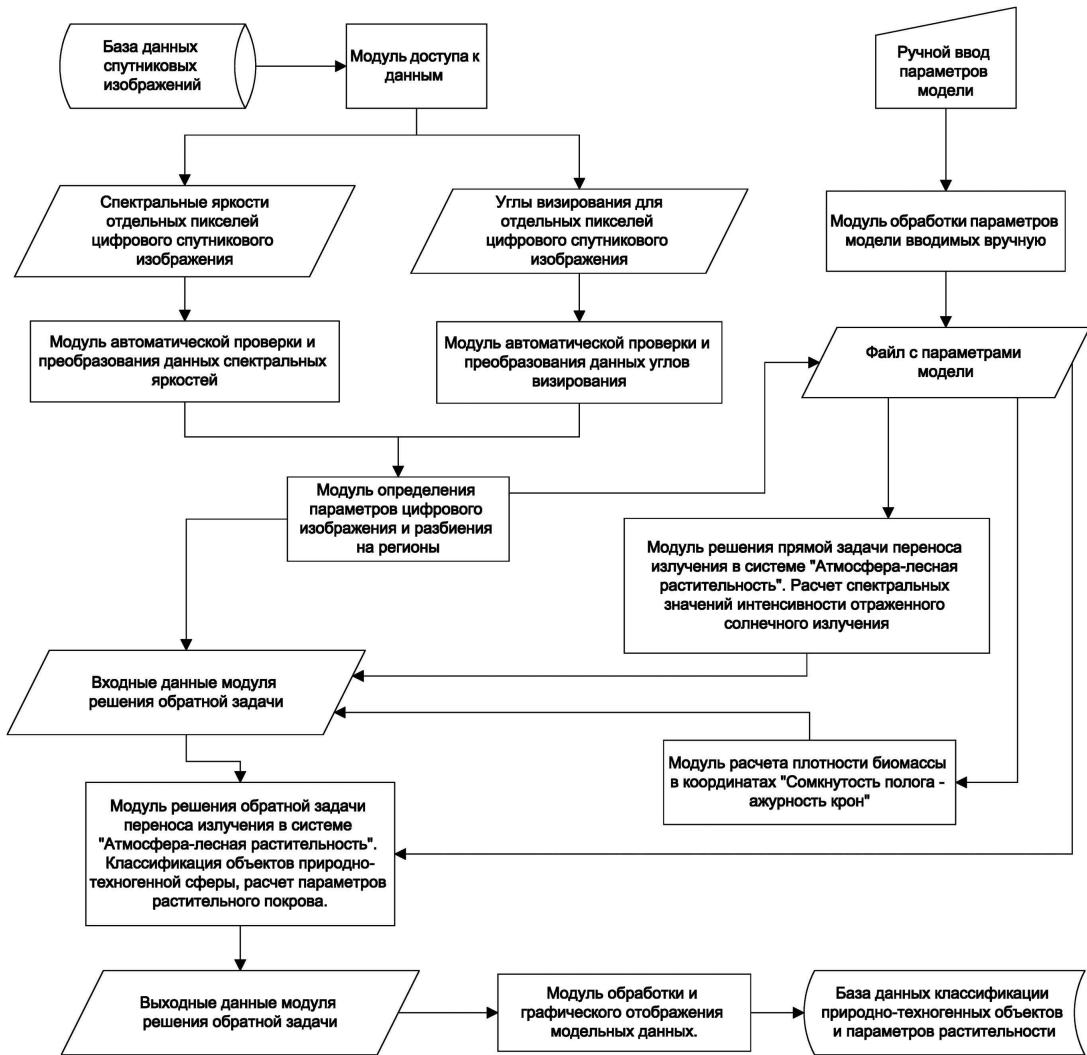


Рис. 1. Блок-схема программной реализации предлагаемой технологии

Модуль решения обратной задачи реализует программы классификации природно-техногенных объектов на конкретном обрабатываемом изображении и восстановления указанных параметров почвенно-растительного покрова. Еще одна функциональная связь модуля решения обратной задачи с файлом исходных параметров расчетной модели дает возможность получения выходных данных этого модуля. Наличие модуля соответствующей обработки и графического отображения модельных данных позволяет создать базу данных классификации природно-техногенных объектов и восстановления параметров состояния соответствующих объектов почвенно-растительного покрова.

## **Обсуждение результатов**

Тестовый участок летных испытаний гиперспектральной аппаратуры расположен к юго-востоку от г. Тверь и охватывает значительную часть территории Савватьевского лесничества при впадении р. Орша в р. Волга. На рис.2 приведены два трека пролета самолета со всем набором перечисленных выше аппаратурных комплексов на дату съемки 16 августа 2009 года, наложенные на карту наземных лесотаксационных обследований территории. Лесоустроительные работы регулярно проводятся соответствующими службами в пределах отдельных кварталов, внутри которых уточняются контура распределения (называются выделами) древостоев, занимаемых площадей конкретными породами, определенного возраста, качества древесины и т.п. В лесоведении приняты характерные записи указанных распределений в виде условного номера соответствующего выдела, среднего возраста древостоев в его пределах, площади выдела и бонитета (качества древесины). Бонитет леса – показатель его продуктивности, зависит от условий произрастания. Определяется по средней высоте деревьев главной породы с учетом среднего возраста. Лесные насаждения по бонитету делят на классы, к первому классу относят наиболее продуктивные. На данных рис.2 пронумерованы все выделы, но три остальные цифры (возраст, площадь, бонитет) проставлены не везде.

В лесоведении приняты также характерные цвета отображения разных пород на картосхемах типа рис.2. Для каждого выдела сосняки отображаются коричневым цветом (более возрастной состав древостоев имеет более темный цвет), ельники – фиолетовым цветом, березняки – синим цветом, болота – зеленым цветом, вырубки обозначаются горизонтальными цветными полосами. Можно видеть преобладание сосняков для выбранной тестовой территории, наличие вырубок (выдел 11 квартала 74; выдел 18 квартала 75; выделы 9 и 10 квартала 78; выдел 1 квартала 79 и т.д.). Преобладание ельников заметно лишь в выделе 13 квартала 75.

Несмотря на то, что данные наземных лесотаксационных обследований могут быть неполными, данные рис.2 могут в первом приближении использоваться для валидации результатов обработки данных гиперспектральной аэросъемки. Однако данные этой съемки могут быть более точными, чем данные лесотаксации, имея в виду возможные изменения этих выделов при вырубках, различиях в естественных вегетационных сезонах и др. Данные аэро- и гиперспектральной съемки тем самым могут использоваться для уточнения перечисленных особенностей формирования лесотаксационных описаний. В любом случае возникает необходимость совместной привязки данных аэрофотосъемки, гиперспектральной съемки и наземной лесотаксации выбранной территории.

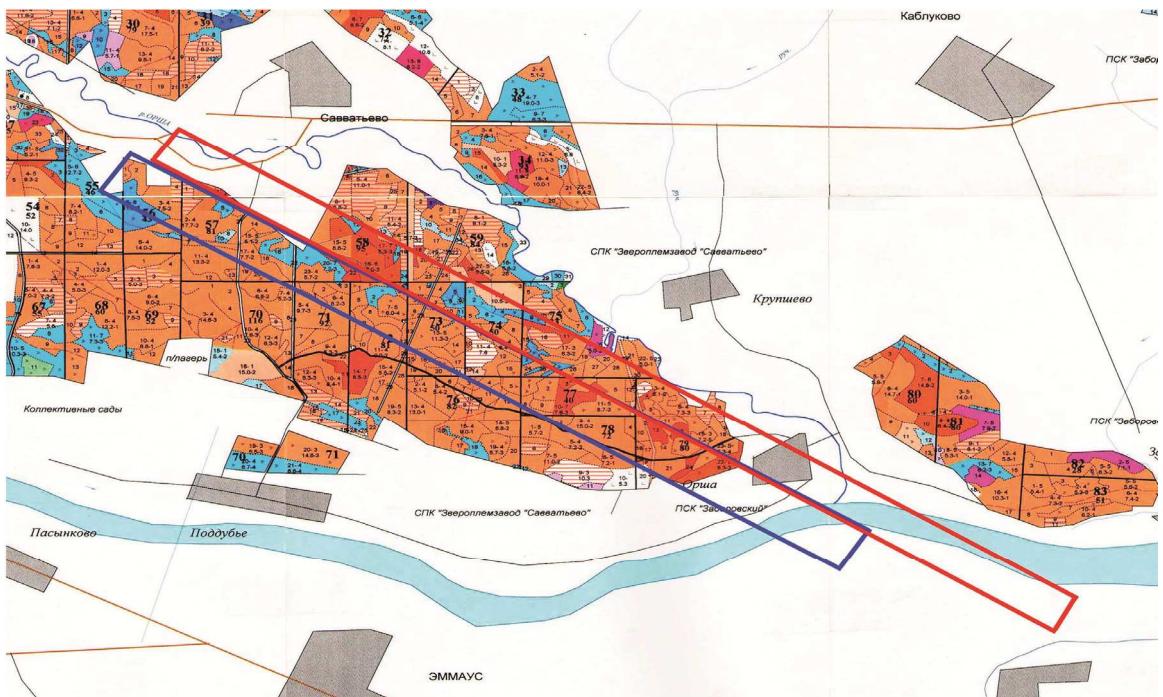


Рис. 2. Картосхема наземных лесотаксационных обследований тестовой территории в виде отдельных кварталов и выделов с двумя полосами рамок красного и синего цветов, соответствующими двум трекам пролета самолета с установленным на нем комплексом гиперспектральной и аэрофотосъемки

Как сказано выше, обработка данных гиперспектральной съемки состоит из двух этапов: распознавание образов объектов по имеющимся гиперкубам данных; восстановление объема фитомассы для элементов разрешения, относящихся к выделенному классу «растительность», а также определение породного состава лесной растительности и типа межкроновой растительности (трава, кустарники, болота и т.д.).

Рассматриваемый здесь алгоритм распознавания природных и антропогенных объектов по данным гиперспектральной съемки основан на методах дискриминантного анализа. Смысл данного подхода заключается в том, чтобы построить функцию в  $n$ -мерном пространстве признаков, в данном случае нормированных спектральных яркостей, такую, чтобы на конечном обучающем множестве обеспечить минимальную ошибку классификации в байесовском или минимаксном смысле. Данную функцию называют дискриминантной или решающей. Очевидно, что поиск решения в пространстве всех возможных функций обречен на неудачу, поскольку в данном всегда и бесконечным числом способов можно «идеально» разделить имеющийся конечный ансамбль измерений. Поэтому, для построения дискриминантной функции используют представления в виде того или иного конечномерного базиса. Наиболее часто для этого использую разложение по показательным функциям, т.е. дискриминантная функция представляется в виде многочлена  $n$ -й степени. В нашем случае мы ограничились рассмотрением линейных и квадратичных функций, поскольку, учитывая количество каналов гиперспектрометра, при использовании полиномов большей степени про-

блематично составить достаточно большой обучающий ансамбль. Численные эксперименты показали, что для разделения водных объектов, почвогрунтов и растительности вполне достаточно применения методов линейного дискриминантного анализа. Классификация типов растительности требует более сложных решающих правил. В этом случае оправдано применение квадратичного дискриминантного анализа.

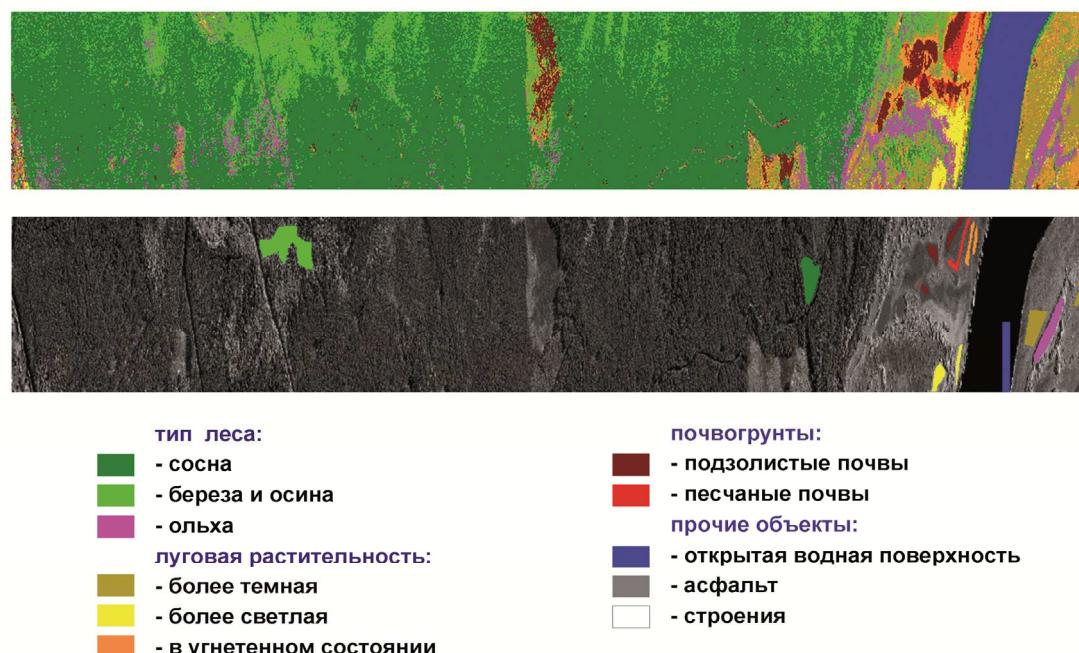


Рис. 3. Распознавание природных и антропогенных объектов по данным гиперспектральной съемки на выбранную дату 16 августа 2009 года. Верхний снимок - классификация на основе квадратичного дискриминантного анализа, нижний снимок - элементы разрешения, использованные для обучения процедуры классификации

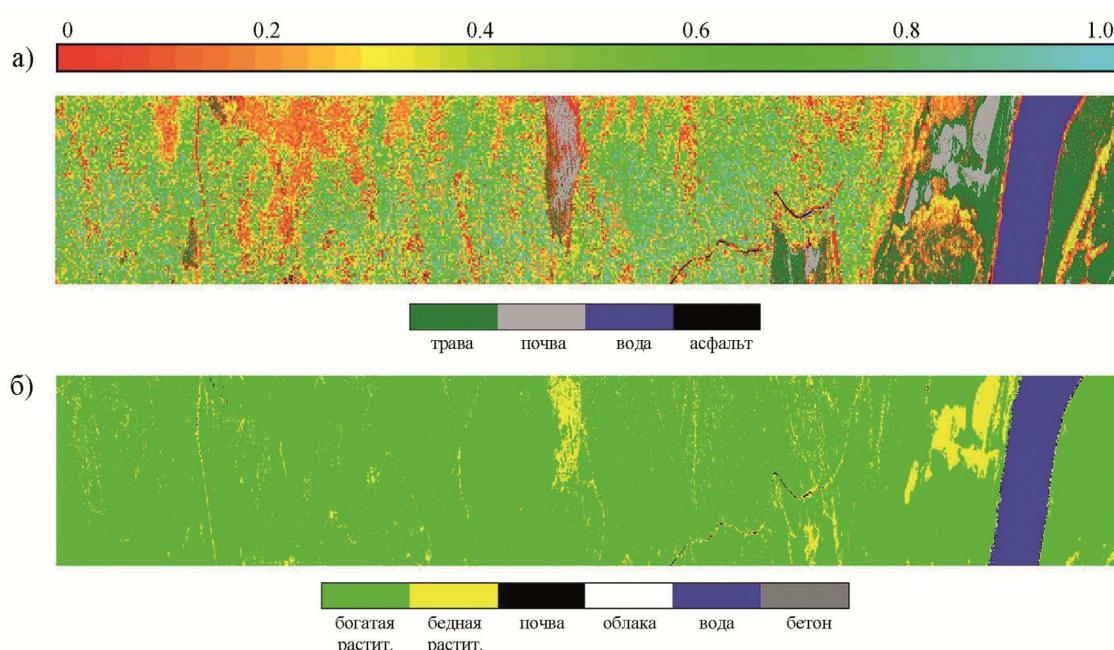


Рис. 4. Цветовое отображение результатов поэлементного восстановления объема фитомассы растительности (а – цветовая шкала вверху от нуля до  $1 \text{ кг}/\text{м}^2$ ) в сравнении с отображением всех элементов разрешения в терминах индекса NDVI (б)

На рис. 3 показаны примеры реализации предлагаемого подхода к распознаванию образов наблюдаемых объектов. Можно видеть качественно хорошее воспроизведение характерных особенностей рассматриваемой полосы аэросъемки при сравнении с данными наземной лесотаксации (рис. 2). В соответствии с данными рис. 3 выделяются следующие породы лесной растительности: сосняки (преобладают на рассматриваемой территории); березняки и остальные лиственные породы (ольха и т.п.). Ближе к правой части рис. 3 заметно преобладание разных типов луговой растительности и открытых почвогрунтов по обе стороны р. Орша. Можно отметить следующие характерные особенности территории, изображенной на рис. 3 (слева направо) – дорога поперек направления маршрута (квартал 73); вырубка (квартал 74, выдел 11, коричневый цвет на верхнем изображении рис.3); увеличение содержания луговой растительности и почвогрунтов по мере приближения к р. Орша.

Данные рис. 4 дают представление о значительно более высоком качестве предлагаемой в рамках настоящего проекта выходной информационной продукции (а) в сравнении с традиционным отображением (б) обрабатываемых данных гиперспектрометра с помощью «индекса нормализованной разности» (Normalized Difference Vegetation Index/NDVI). Как видно из данных рис. 4б, данные NDVI дают возможность различия лишь малой части объектов (растительность в «хорошем состоянии», растительность в «плохом состоянии», открытая почва, вода, бетон). Предлагаемая новая информационная продукция (рис. 4а) дает представление о тонкой структуре объектов почвенно-растительного покрова в терминах объема фитомассы и других параметров почвенно-растительного покрова.

## Заключение

Были продемонстрированы особенности получения новой информационной продукции обработки данных летних испытаний гиперспектральной аппаратуры при сравнении полученных данных с данными наземных лесотаксационных обследований выбранной территории. Планируется расширение модельной базы расчетных данных. Для этого будут проведены уточнения расчетной схемы формирования спектральных яркостей отраженного излучения для смешанного леса с конкретным видовым составом. Планируется также проведение исследований по уточнению, согласованию и дополнительной спецификации используемых параметризаций связей расчетных данных гиперспектрометрического дистанционного зондирования и наземных данных, касающихся породного состава лесных насаждений, их возраста, бонитета (качества древесины), свойств почв, межкроновой растительности, других особенностей структуры почвенно-растительного покрова.

Исследования проводятся при финансовой поддержке РФФИ (проекты №08-07-00284\_a 08-07-13515\_офи\_ц, 09-05-00171\_a) и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» проект № 2.1.2/ 286.

## Литература

1. Козодоров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головко В.А., Дмитриев Е.В. Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса, 2007. №1. С.57-65.
2. Козодоров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исследование Земли из космоса, 2008. №1. С.56-72.
3. Кондранин Т.В., Козодоров В.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю. Технология оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по данным аэрокосмического мониторинга // Сб. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: изд. «Азбука-2000», 2008. Вып. 5, Т. 2.С.512-522.
4. Козодоров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования // М.: изд. МФТИ, 2008. 222 с.
5. 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 // Исследование Земли из космоса, 2009. №2. С.50-68.
6. Кондранин Т.В., Козодоров В.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю. Повышение информативности данных многоспектрального авиакосмического дистанционного зондирования при решении прикладных задач количественной оценки состояния природно-техногенных объектов // Сб. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: изд. «Азбука-2000», 2009. Вып. 6. Т. 1. С.206-215.

# **Technological basis to retrieve quantitative parameters of forest ecosystems using multispectral and hyperspectral airspace remote sensing data**

**T.V.Kondranin<sup>1</sup>, V.V.Kozoderov<sup>2</sup>, E.V.Dmitriev<sup>3</sup>, O.Yu.Kazantsev<sup>4</sup>, V.I.Bobylev<sup>4</sup>,  
V.V.Borzyak<sup>2</sup>, V.D.Egorov<sup>3</sup>, V.P.Kamentsev<sup>5</sup>, A.Yu.Belyakov<sup>5</sup>, S.B.Loginov<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow Institute for Physics and Technology (State University)*

*141700, 9, Institutskii per., Dolgoprudny, Moscow Region*

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

<sup>2</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University*

*119991, Moscow, GSP-1, 1 Vorobievy gory, MSU*

*E-mail: vkozod@mes.msu.ru*

<sup>3</sup>*Institute of Numerical Mathematics of Russian Academy of Sciences*

*119333, Moscow, 8 Gubkina str.*

*E-mail: yegor@inm.ras.ru*

<sup>4</sup>*NPO “Lepton”,*

*Moscow, Zelenograd, 20 Proezd 4806, 5.*

*E-mail: bob@lepton.ru*

<sup>5</sup>*Technological Park of Tver State University*

*170100, Tver, 33 Zhelyabova str.*

*E-mail: kvp53@mail.ru*

Basic elements are described of technology of natural and anthropogenic objects pattern recognition and state parameters assessment for soil-vegetation cover using multispectral and hyperspectral airspace remote sensing data. Main attention is paid to comparison of data processing results for combined airphoto- and hyperspectral surveys and ground-based forest taxation data for a selected region. Higher quality is demonstrated of the gained information products of hyperspectral imagery processing as compared with the common-used approaches based on the well-known vegetation indices concept.

**Key words:** multispectral and hyperspectral airspace imagery, data processing, object recognition, forest ecosystems, state parameters retrieval.