

Технология оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по данным аэрокосмического мониторинга

Т.В. Кондранин¹, В.В. Козодеров², О.Ю. Казанцев³, В.И. Бобылев³, В.В. Борзяк²,
Е.Д. Дмитриев⁴, В.Д. Егоров⁴, В.П. Каменцев⁵, А.Ю. Беляков⁵

¹*Московский физико-технический институт (государственный университет)*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

³*НПО «Лептон»*

⁴*Институт вычислительной математики РАН*

⁵*Технопарк Тверского государственного университета*

На примере тестовых полигонов на территории Тверской области демонстрируются основные элементы разрабатываемой авторами технологии обработки данных дистанционного зондирования (ДЗ) с целью количественной оценки состояния наблюдаемых объектов. Данные ДЗ включают многоспектральные (6 каналов) космические изображения высокого (~ 30 метров – аппаратура ETM+/Enhanced Thematic Mapper спутника «Landsat-7») пространственного разрешения, а также изображения и спектры, полученные с борта ультра-легкого авианосителя - мотодельтаплана (МДП) с использованием созданного в НПО «Лептон» опытного образца гиперспектральной камеры (ГСК) видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. При использовании на борту МДП ГСК обеспечивает измерения абсолютных значений восходящего излучения в ~ 200 спектральных каналах при пространственном разрешении ~ 2 метров при высоте полета ~ 1000 метров. Показано, что использование обеих типов измерений, выявляет новые возможности повышения информативности решения практических задач количественной оценки состояния объектов природно-техногенной сферы.

Введение

Важнейшей современной тенденцией развития систем аэрокосмического дистанционного зондирования (ДЗ), наряду с улучшением пространственного и спектрального разрешения, является переход от измерений относительных многоспектральных (обычно не более десятка спектральных каналов) интенсивностей уходящего излучения к получению абсолютно калиброванных данных в нескольких десятках и даже сотнях каналов (гиперспектральные измерения). Информационная продукция, получаемая в результате обработки гиперспектральных данных, открывает новые возможности решения прикладных задач, главной особенностью которых является ориентация на получение количественных данных по сравнению с качественными оценками состояния наблюдаемых объектов природно-техногенной сферы в традиционных подходах.

Существующие в настоящее время программные средства обработки данных, поставляемые в основном зарубежными компаниями, позволяют проводить классификацию наблюдаемых объектов, рассчитывать относительные частоты появления тех или иных классов объектов, осуществлять цветокодирование результатов обработки и представлять выходную информационную продукцию в в таких упрощенных формах, как «вегетационные индексы» (различные комбинации измерительных каналов).

Преыдушие исследования авторов показали, что использование абсолютно калиброванных данных ДЗ позволяет, наряду с классификацией объектов, восстанавливать параметры состояния этих объектов для каждого элемента обрабатываемых изображений. Одним из таких параметров служит, например, объем зеленой фитомассы лесных и других экосистем, значения, которого рассчитываются в процессе трансформации регистрируемых данных с использованием вычислительных средств [1]. В работах [2, 3] показаны примеры решения прикладных задач восстановления указанных параметров при обработке многоспектральных космических изображений с помощью разработанного специального программного обеспечения обработки абсолютно калиброванных данных. Основными этапами реализуемой технологии обработки таких данных [3, 4] являются:

распознавание наблюдаемых объектов по пороговым уровням регистрируемой интенсивности излучения с использованием характерных мод гистограмм, другим характерным признакам математического описания образов; выделение классов «растительность», «водоемы», «облачность», «почвогрунты», как совокупности объектов дорожно-транспортной сети, населенных пунктов и т.п. Далее для элементов разрешения, относящихся к классу «растительность» осуществляется преобразование многоспектральных или гиперспектральных данных в количественные параметры состояния различного типа экосистем (лесные, болотные, луговые, сельскохозяйственные и др.).

Практическая отработка предлагаемой технологии осуществлялась для территории Тверской области по данным спектрорадиометра MODIS/Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer среднего пространственного разрешения (250-500 м) спутника Terra и аппаратуры ETM+/Enhanced Thematic Mapper спутника Landsat-7 высокого пространственного разрешения (30 м). В результате обработки для каждого элемента изображений восстанавливаются:

- тип объекта (1 – растительность, 2 – вода, 3 – облачность, 4 – почвогрунты; для класса «растительность» предусматривается программное разбиение на подклассы: лесная, болотная, луговая, сельскохозяйственная и другая растительность);

- прозрачность атмосферы (до 4-х типов: от прозрачной до сильно замутненной) с использованием данных, получаемых в самых коротковолновых каналах аппаратуры MODIS и ETM+;

- объем зеленой фитомассы растительности с типичными значениями от нуля до максимальных значений около 30 т/га (существуют эмпирические соотношения, позволяющие перейти от этой величины к общей биомассе древесной и другой растительности);

- среднеквадратические отклонения значений зеленой фитомассы растительности (соответствуют точности решения обратной задачи восстановления этой величины);

- тип растительности (для лесной растительности выделяется 11 классов породного состава: 1 – полностью лиственные породы, 11 – полностью хвойные породы; между ними – смешанные породы через каждые 10% преобладающих пород; для остальной растительности – болотно-луговая, сельскохозяйственные поля и др., также восстанавливаются значения объема фитомассы и их среднеквадратические отклонения);

- тип межкрупной лесной растительности (выделяется несколько классов в соответствии с исходными данными модельных представлений о спектральных образах: яркая трава, более темная трава, болотная (более темная и более светлая) растительность, мхи, кустарники, голая почва, открытая водная поверхность между кронами деревьев;

- сомкнутость полога (от нуля до единицы: 0 – отсутствие фитомассы; 1 – полное покрытие лесного полога или полога иной растительности);

- ажурность верхней границы полога (то же, что и сомкнутость, но на уровне одного дерева или другого элемента, рассеивающего падающее излучение).

В работе [4] показано, что при решении ряда практических задач, связанных, в первую очередь, с необходимостью восстановления специфических для конкретного зондируемого объекта его количественных характеристик, исходных данных ДЗ, получаемых в ~ 10 спектральных каналах, например, указанными выше типами многоспектральной спутниковой аппаратуры, оказывается недостаточным. Для обеспечения более высокой точности распознавания объектов наряду с многоспектральной информацией необходимо привлечение данных с существенно более высоким спектральным разрешением. В 2005-2006 годах в НПО «Лептон» при участии МФТИ разработан, не имеющий аналогов в России, опытный образец гиперспектральной камеры видимого и ближнего инфракрасного диапазонов со следующими основными техническими характеристиками:

- рабочая спектральная полоса, нм 390-900;
- число спектральных каналов в рабочей полосе 100 - 290;
- спектральное разрешение, нм 4 - 20;

- угловое разрешение, угл. мин не хуже 11 (соответствует пространственному разрешению при наблюдении в надир не хуже 3 м с высоты 1 км);

- радиометрическое разрешение, % не хуже 0.4;
- полоса захвата, км (с высоты полета 1 км не менее 1 км);
- масса бортового образца ГСК, кг не более 2;
- цифровой разрядный код сигнала в каждом спектральном канале 12;
- максимальное энергопотребление ГСК, Вт 10.

Рабочие углы Солнца, при которых не возникает проблем с освещенностью наблюдаемых объектов с использованием ГСК, составляют 10-90 град. Основной режим получения гиперспектральных изображений с борта авианосителя – режим *Pushbroom* (рис. 1). Важно подчеркнуть, что спектральное разрешение ГСК составляет величину ~ 1 нанометра, что открывает перспективы восстановления свойств зондируемых объектов, характеризующихся «тонкой» и «сверхтонкой» спектральной зависимостью. Поэтому единый процесс получения, анализа, обработки подобных данных и представление их в виде соответствующей информационной продукции целесообразно характеризовать термином *нанодиагностика* объектов природно-техногенной сферы.

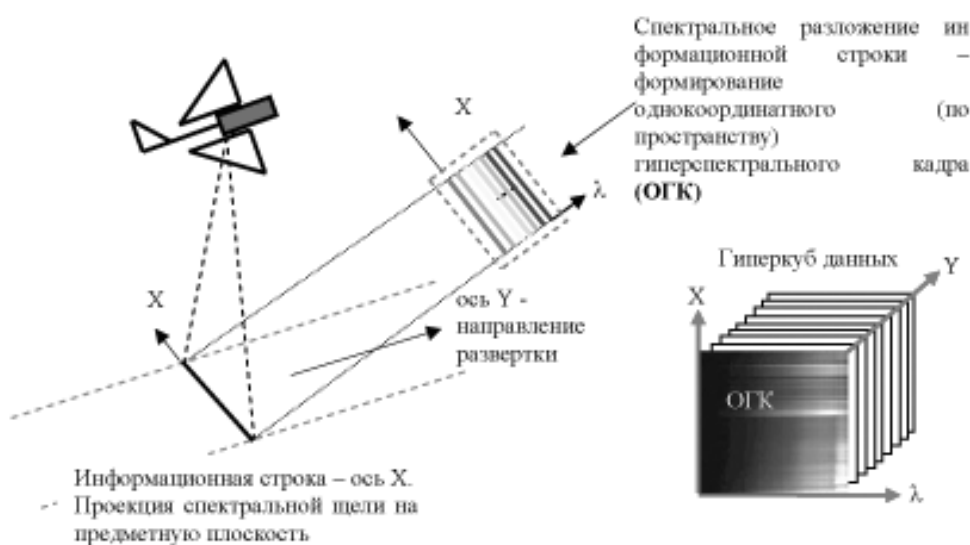


Рис.1. Схематическое представление режима получения гиперспектральных изображений с борта авианосителя

В сентябре 2007 года на авиасредствах технопарка Тверского государственного университета были проведены летные испытания этой аппаратуры на тестовых полигонах Тверской области. Обработка полученных данных проводилась по той же расчетной схеме, которая использовалась ранее при обработке многоспектральных спутниковых изображений. Возникли новые условия для интерпретации данных гиперспектрометра, в которых наблюдаются характерные линии (кислорода и др.) поглощения излучения атмосферной средой, характерные полосы поглощения хлорофилла – основного пигмента листовой (хвойной) поверхности, другие особенности тонкой структуры спектрального хода наблюдаемых объектов.

Ниже приводятся некоторые результаты рассматриваемой технологии оценки состояния выбранного региона по данным аппаратуры ЕТМ+ и совмещенных данных аэрофотосъемки и гиперспектрометра.

Исходные данные

В качестве спутниковых исходных данных в настоящей работе использовались цифровые изображения тестовых полигонов на территории Тверской области (Старицкий район), полученные аппаратурой ЕТМ+ на дату съемки 30.07.2001 г. Обработка данных космической съемки осуществлялась по расчетной схеме, изложенной в публикациях [1-4].

Данные гиперспектральной съемки, совмещенные с цифровыми фотоизображениями, для некоторых участков тестовой территории получены при трассовых съемках с борта МДП 18.09.2007 г. Результаты регистрировались с помощью бортового компьютера и записывались на DVD-диски. На предварительном этапе для обеспечения летно-съемочных работ были решены следующие задачи:

- разработка, изготовление и монтаж на МДП специальной подвески для крепления ГСК и другой аппаратуры;
- наземные испытания ГСК в составе бортового съемочного комплекса;
- сопряжение бортового компьютера (высокопроизводительный ноутбук, оснащенный общесистемным и специальным программным обеспечением) с ГСК и другими бортовыми системами;
- обучение оператора работе с измерительным комплексом.

Наземные испытания проводились на базе отряда МДП в г. Старица. По результатам испытаний было принято решение отказаться от подвесок с использованием маятниковых схем, гироскопов и электронного управления. Конструктивно подвес включает несущую штангу, выполненную из забужованных дюралевого труб, промежуточную площадку с авиационными амортизаторами, блоком крепления ГСК и фотокамеры, экранами жесткости и отсечки воздушного потока. Для синхронной с ГСК фотосъемки использовалась зеркальная цифровая камера Сони Альфа (матрица 10 мП, объективы - Минольта 50/1,4 и Минольта 28-135/4 с фиксацией трансфокатора и фокусного расстояния) с дистанционным управлением. В ходе наземных испытаний был уточнен ряд узлов и креплений подвески, отработана ее сборка на несущих элементах МДП и проведена пробная наземная съемка.

Полетное задание включало синхронную съемку объектов с помощью ГСК и цифровой фотокамерой с высот 500 м и 1000 м облете участка длиной не менее 1 км и шириной трека не более 180 м (для перекрытия всей поверхности тестового участка размером не менее 1х1 км). Летно-съемочные работы проводились с использованием легко-моторного самолета (Як-12) и МДП.

Обсуждение результатов

На рис. 2 по данным поисковой системы Google показана спутниковая фотография (летний

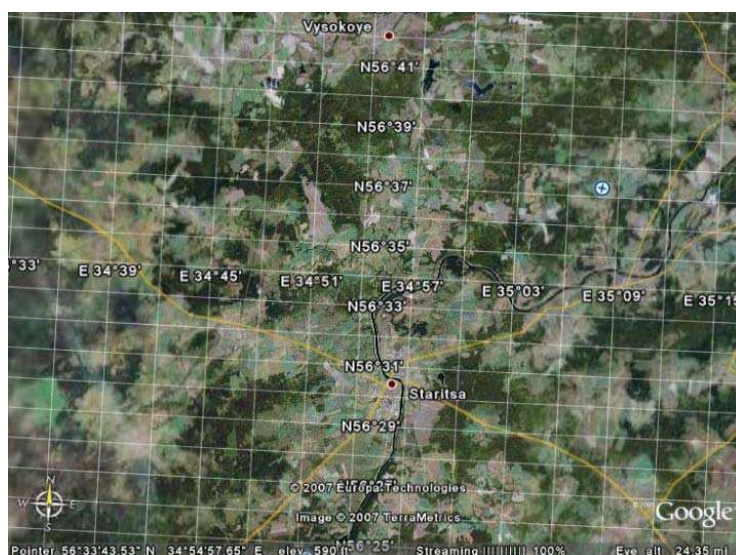


Рис. 2. Результаты космической фотосъемки выбранного региона в поисковой системе Google

сезон) части территории Старицкого района с выбранным тестовым полигоном. Географическое расположение полигона на рис. 2 – прямо над буквами «git» в написанной латинской транскрип-

ции «Staritsa» (в перекрестке дорожной сети как ориентир там видно озеро). Цветовая гамма рис. 2 в целом характеризует наличие лесных массивов (зеленые оттенки), перемежающихся с болотами (синие оттенки), другими объектами (коричневатые оттенки). Видна дорожно-транспортная сеть, городские территории (г. Старица) и т.д. Выбранный тестовый полигон на рис. 2 отображен в основном зеленым цветом.

На рис. 3 выбранная территория показана на топографической карте. Здесь оттенки цветов, определяют характерные для данного района физико-географические условия (зеленый и более светлый), природную гидрологическую сеть (синие цвета), транспортную инфраструктуру (коричневые цвета) и т.д. Указанное озеро как ориентир можно видеть к востоку от р. Волга в районе г. Старица (практически в центре рис.3) в перекрестке дорожно-транспортной сети.



Рис.3. Фрагмент топографической карты выбранного региона

Результаты обработки данных аппаратуры ETM+ (дата съемки - 21 июля 2001 года) для выбранной территории, состоящей из 1000 x 1000 элементов разрешения, приведены на рис. 4a,b,c. Представленные рисунки представляют собой иллюстрацию выходной информационной продукции, которая получается в предлагаемой технологии количественной оценки состояния объектов природно-техногенной сферы по многоспектральным спутниковым данным.

Данные рис. 4a демонстрируют результаты классификации объектов на обработанном изображении (водоемы – синий цвет; почвогрунты – серый цвет, смешанные объекты «почва-растительность» – черный цвет), а также результаты восстановления объема зеленой фитомассы лесной, болотной, луговой, сельскохозяйственной и других видов растительности для каждого

элемента класса «растительность». Цветовая шкала справа – объем зеленой фитомассы растительности в тоннах на гектар.

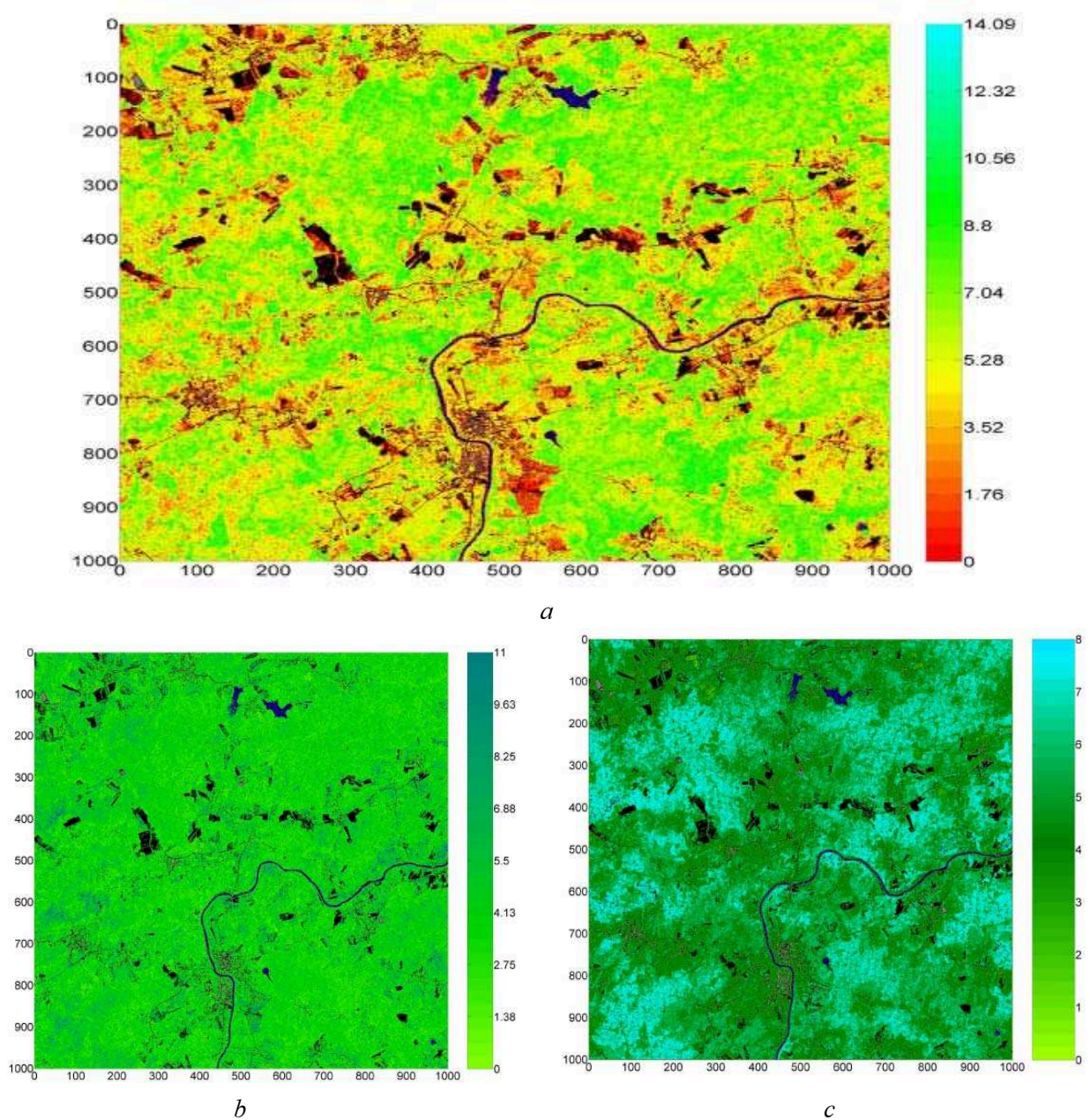


Рис. 4. Результаты обработки выбранного фрагмента данных аппаратуры ETM+ (дата съемки – 21 июля 2001 года):

a - выделены водоемы (синий цвет), почвогрунты (серый цвет) и переходные объекты между почвогрунтами и растительностью (торфоразработки и др.); шкала справа – объем зеленой фитомассы для элементов разрешения класса «растительность»;

b - породный состав лесной растительности (предельные значения: 1 – сплошной лиственный лес; 11 – сплошной хвойный лес);

c - типы межкрупной растительности (предельные значения: 1 – травянистая растительность; 8 - болота)

Видно, что г. Старица расположен в центральной нижней части рис. 4a (серые цвета асфальто-бетонного покрытия населенного пункта по обе стороны реки Волга). К юго-востоку от этого населенного пункта заметны контуры протяженного объекта красного цвета (малые значения

объема фитомассы растительности; скорее всего, это сельскохозяйственные поля), а к востоку – озеро (синий цвет) на фоне зеленого цвета средних значений объема фитомассы (7-9 т/га).

При сохранении полученных результатов классификации объектов (синие, серые, черные цвета), данные рис. 4b дают представление о породном составе лесной растительности. Наличие 6 исходных спектральных каналов аппаратуры ЕТМ+ позволяет проводить более углубленную оценку состояния класса «растительность». В частности, на рис. 4b приводятся примеры выходной продукции, характеризующие породный состав лесной растительности. На рис. 4b близкие к 1 значения данных соответствуют преимущественно лиственным породам деревьев, а также кустарникам, травянистому покрову и др. В то же время значения, близкие к 11, свидетельствуют о преобладании хвойных пород. Промежуточные значения по шкале рис. 4b относятся к смешанной лесной растительности.

Другим примером углубленной тематической обработки в рамках предлагаемой технологии являются данные на рис. 4с, которые позволяют уточнить тип межкроновой растительности: 1 – преобладание сухих почв; 8 – преобладание болот; 2-7 – промежуточные типы травянисто-кустарниковой растительности. Светло-зеленые оттенки шкалы рис. 4с соответствуют более сухим типам подстилающей поверхности, а сине-бирюзовые оттенки – преимущественно болотным экосистемам.

На следующих рисунках (рис. 5a и 5b) приводятся примеры съемки территории, охватывающей выбранный тестовый полигон, синхронно цифровой камерой (рис. 5a) и ГСК (рис. 5b) с борта МДП. Приведенная на рис. 5a рамка относится как раз к южной части упомянутого выше озера, которое служило ориентиром при проведении летных работ. Часть этого фрагмента, полученная синхронно гиперспектрометром (изображение – 1500x500 элементов), представлена на рис. 5b. Особенности отображения верхней и нижней частей рис. 5b обусловлено так называемым эффектом «виньетирования» – затемнения изображения по краям кадра, что связано с ослаблением проходящего под углом к оптической оси потока лучей в оптической системе.

На рис. 5с представлена упомянутая выше рамка с отмеченными звездочками тремя характерными типами объектов, показанных звездочками: типично лесная растительность, вода и трава. Данные рис. 5d дают представление о результатах восстановления объема фитомассы растительности выбранной территории на рассматриваемую дату аэросъемки по данным ГСК. В процессе обработки данных гиперспектрометра было проведено частичное устранение эффекта виньетирования с использованием косинусоидальной угловой функции.

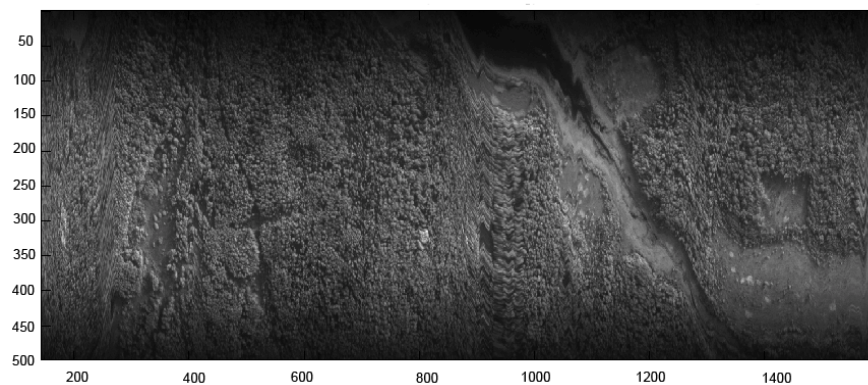
Приведенные на рис. 5d результаты аналогичны данным рис. 4a, но относятся к нижней центральной части этого последнего изображения. Здесь, как и на данных рис. 4a синий цвет – водоемы, объекты серого цвета (почвогрунты: асфальто-бетонные покрытия и др.) на этом фрагменте отсутствуют, черный цвет – переходные объекты между растительностью и почвогрунтами, остальные цвета – значения объема фитомассы в соответствии с приведенной справа шкалой. При этом следует иметь в виду, что данные рис. 5d относятся к дате съемки 18.09.2007 г., а данные рис. 4a – к 30.07.2001 г. В процессе получения данных рис. 5d использовался дискретный набор спектральных каналов ГСК по аналогии с предшествующими результатами обработки данных аппаратуры ЕТМ+.

Улучшение возможностей распознавания объектов по данным ГСК планируется на основе извлечения наиболее информативных каналов из непрерывного спектра зарегистрированных данных. Такая работа проводится в настоящее время.

Спектральные яркости трех объектов рис. 5с, зарегистрированные при прохождении отраженного от них излучения через атмосферу, приведены на рис. 6a, b, c, соответственно. Можно видеть, что для выбранного примера лесной растительности (рис. 6a) спектральная кривая сильно осциллирует на длинах волн 450-500 нм, имея абсолютные значения зарегистрированной интенсивности излучения в этом диапазоне около 0.002 Вт/(м² мкм стер). Эта область длин волн характеризует чисто атмосферные эффекты формирования данной спектральной кривой с минимумом вблизи 500 нм. Осцилляции менее заметны в диапазоне длин волн 500-600 нм; при этом зарегист-



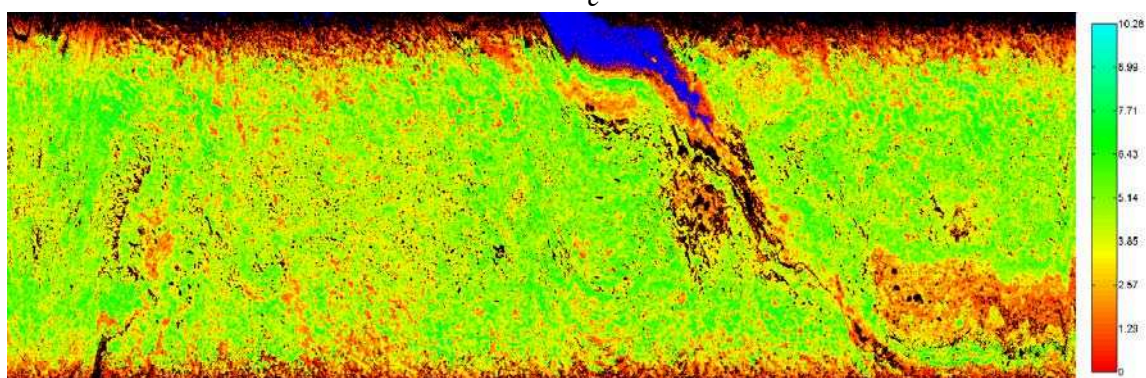
a



b



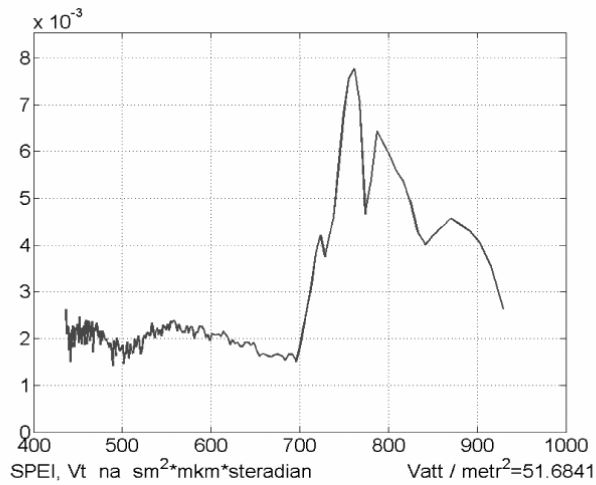
c



d

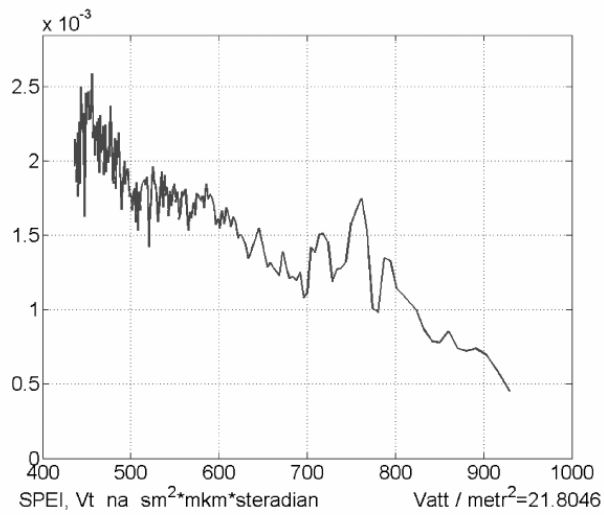
Рис. 5. Фрагмент синхронной съемки с мотодельтаплана выбранной территории с помощью аэрофотоаппарата с выделенной рамкой тестового участка (a) и гиперспектрометра (b), а также место размещения трех выделенных объектов в виде звездочек на выделенной рамке (c) и результаты восстановления объема фитомассы растительности данного фрагмента (d)

Спектр объекта класса «растительность»



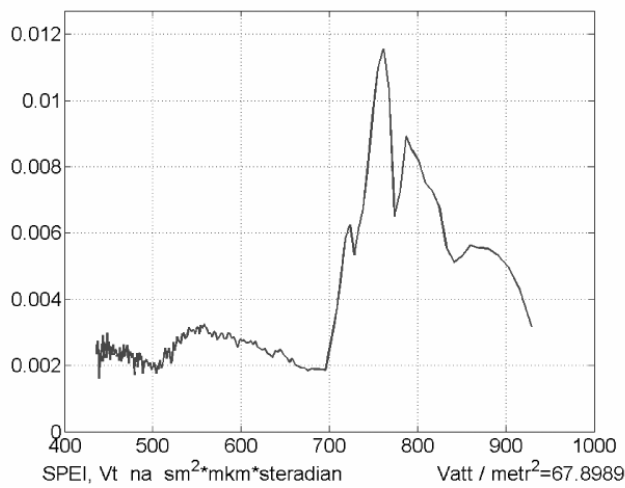
a

Спектр объекта класса «вода»



b

Спектр объекта класса «трава»



c

Рис.6. Примеры спектральной плотности энергетической яркости в $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{стер})$ для трех типов объектов, выделенных на рис.5с

рированный спектр сначала возрастает до максимальных значений, близких к $0.0023 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$ на длине волны около 550 нм , а затем убывает. Дальнейшее убывание кривой спектрального хода продолжается в сторону более длинных волн; минимум около $0.0016 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$ соответствует известной полосе поглощения излучения хлорофиллом вегетирующей растительности ($670\text{-}680 \text{ нм}$). Затем в сторону более длинных волн начинается резкое возрастание кривой на рис. *6a* до значений, близких к $0.0077 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$. При этом заметны две известные полосы поглощения излучения кислородом (718 и 762 нм) атмосферной среды, расположенной между объектами земной поверхности и приемником излучения. Для длин волн более 800 нм на спектре проявляются полосы известные поглощения излучения водяным паром атмосферы. Минимальные значения спектральной плотности энергетической яркости достигают $0.0027 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$ вблизи длины волны 920 нм .

Иной характер носит кривая рис. *6b*, иллюстрирующая зарегистрированный спектр объекта «водная поверхность». Здесь, как и на рис. *6a*, заметны флуктуации данной кривой в области длин волн $450\text{-}500 \text{ нм}$ на уровне $0.0017\text{-}0.0025 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$. Между 500 нм и 600 нм здесь максимум менее ярко выражен, чем на рис. *6a* при среднем уровне данных около $0.00175 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$. Можно отметить дальнейшее более резкое убывание спектральной кривой энергетической яркости данного объекта в области $600\text{-}700 \text{ нм}$. В области $700\text{-}800 \text{ нм}$ снова можно отметить существование двух упомянутых выше полос поглощения кислорода, но максимальные значения яркости между ними здесь не превышает $0.0017 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$. Минимальные значения спектральной плотности энергетической яркости данного объекта на длине волны 920 нм почти в 6 раз меньше, чем на рис. *6a*.

Данные рис. *6c* для травяного покрова по спектральному ходу близки к данным рис. *6a* для лесного покрова практически для всей спектральной области от 450 нм до 700 нм . Однако минимумы вблизи 500 нм , 680 нм и максимум вблизи 550 нм носят более резкий характер для рассматриваемого примера травяного покрова, чем для лесного покрова. Более резкими являются различия между основными максимумами зарегистрированных спектров (750 нм) и областью полосы поглощения хлорофилла (680 нм). На рис. *6c* область этого максимума соответствует $0.011 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$, в то время как на рис. *6a* – только $0.0077 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$. Объяснить эти различия почти в 1.5 раза можно тем, что вегетирующий травяной покров – это своего рода сплошная среда, а лесной полог – среда с просветами, взаимными затенениями и другими особенностями объемного слоя. Соответственно, эта среда выглядит как «более темная» в данной области длин волн. В итоге и убывание спектров на длине волны 920 нм останавливается на немного более высоком уровне около $0.0032 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ мкм стер})$ для данного примера травяной растительности.

В целом, полученные в работе предварительные результаты, показали, с одной стороны, работоспособность разрабатываемой авторами технологии обработки абсолютно калиброванных данных ДЗ применительно к гиперспектральным измерениям, а, с другой, реальные возможности повышения информативности выходной продукции при переходе от многоспектральных (в данном случае, 6-канальных данных аппаратуры ЕТМ+) к использованию ~ 200 спектральных каналов гиперспектрометра. Важным является также существенное различие в пространственном разрешении используемых типов измерительной аппаратуры. Следует также иметь в виду, что измерения, выполненные с использованием разработанного ГСК охватывают диапазон длин волн от 400 до 900 нм . В этом диапазоне аппаратура ЕТМ+ имеет только 4 спектральных канала; другие 2 канала соответствуют области $1500\text{-}2400 \text{ нм}$.

Заключение

Показаны результаты использования данных космической и аэросъемки для развития технологии распознавания образов объектов природно-техногенной сферы и количественной оценки их состояния. Продемонстрированы некоторые примеры обработки космических изображений и данных аэроизмерений на базе мотодельтаплана с помощью гиперспектрометра и совмещенной

аэрофотосъемки. Перспективы – в совместном анализе информационного содержания обоих типов измерений, в том числе для обоснования оптимального числа гиперспектральных измерений, обеспечивающих повышение точности решения рассматриваемых здесь прикладных задач.

Исследования проводятся в рамках проектов РФФИ №08-07-00284, 06-05-64916, проекта 4809 «Исследование и разработка методов повышения информативности количественной оценки состояния природно-техногенной сферы по совмещенным данным локального и космического мониторинга», выполняемого в рамках аналитической ведомственной целевой программы Федерального агентства по образованию «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)».

Литература

1. Козодеров В.В. Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исследование Земли из космоса, 2006. №2. С.79-88.

2. Кондранин Т.В., Топчиев А.Г., Никитин И.Е., Козодеров В.В., Чернигин О.Е., Головкин В.А., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д. Прикладные аспекты использования данных космического мониторинга и данных аэрофотосъемки на базе сверхлегких летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научн. статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2007. Выпуск 4. Т. 1. С.138-154.

3. Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головкин 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.

4. Козодеров 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.