

# Прикладные аспекты использования данных космического мониторинга и данных аэросъемки на базе сверхлегких летательных аппаратов

Т.В. Кондранин<sup>1</sup>, А.Г. Топчиев<sup>2</sup>, И.Е. Никитин<sup>3</sup>, В.В. Козодеров<sup>2</sup>, О.Е. Чернигин<sup>4</sup>,  
В.А. Головко<sup>5</sup>, Е.В. Дмитриев<sup>6</sup>, В.Д. Егоров<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

<sup>3</sup>Объединенная Федерация Сверхлегкой Авиации РФ

<sup>4</sup>ООО «Дельтаавиаком»

<sup>5</sup>Научно-исследовательский центр космической метеорологии «Планета»

<sup>6</sup>Институт вычислительной математики Российской академии наук

Рассматриваются особенности подходов к обработке многоспектральных аэрокосмических изображений разного пространственного разрешения. Предлагаются новые возможности и практическая реализация результатов восстановления таких количественных параметров состояния, как объем фитомассы вегетирующей растительности, для каждого элемента обрабатываемого изображения. Приведены примеры решения задач количественной оценки биомассы вместе с классификацией объектов природно-техногенной сферы на соответствующих изображениях, определения породного состава лесных экосистем и решения других прикладных задач по данным космического мониторинга. Обоснованы возможности использования легкомоторных мотодельтапланов для аэромониторинга объектов и валидации результатов обработки материалов космической съемки. Дано общее описание конструкции разработанной системы локального мониторинга на базе ультралегкого мотодельтаплана «Поиск\_НТ06» и особенности проведения летно-съемочных работ. Демонстрируются новые технические решения созданного программно-аппаратного комплекса локального аэромониторинга (ПАКЛАМ) и примеры реализации летно-съемочных работ.

## Введение

Спутниковые системы наблюдений позволяют осуществлять мониторинг больших территорий на основе обработки многоспектральных изображений с использованием географически привязанной информации для выбранных регионов. Соответствующие технологии географических информационных систем (ГИС) развиваются в направлении интегрирования баз данных различного назначения с использованием данных аэрокосмических и наземных измерений.

В практических приложениях при решении задач интерпретации спутниковой информации ориентируются на формирование наземной сети тестовых участков, на которых изучается экофизиологическое состояние выбранных типов растительного покрова. Речь идет о нормальном или стрессовом состоянии вегетирующей растительности за счет дефицита увлажнения территорий, загрязнений окружающей среды и т.п. Одновременно идут по пути оперативного сбора, систематизации и предоставления пользователям информационной продукции, получаемой при обработке многоспектральных изображений в форме «вегетационных индексов» - определенных комбинаций измерительных каналов сканирующих спутниковых радиометров.

Основу практических приложений данных спутниковых и наземных измерений составляют стандартные преобразования изображений (географическая привязка, выделение характерных контуров, классификация объектов и др.), модели многофакторной регрессии и эмпирическая концепция вегетационных индексов. Несмотря на существенные достижения последних лет, связанные с появлением новой многоспектральной аппаратуры, методы развития приложений обрабатываемых изображений остались фактически неизменными (не охватывают использование данных всех измерительных каналов сканирующих спутниковых радиометров).

Новые возможности использования всего многообразия измерительных каналов аэрокосмического ДЗ требуют развития математических моделей формирования полей регистрируемого аппаратурой уходящего излучения и адекватных вычислительных процедур анализа и интерпретации

получаемых данных. В отличие от традиционных подходов по использованию относительных градаций регистрируемых многоспектральных яркостей в новых подходах возрастают требования к получению абсолютных значений интенсивности уходящего солнечного излучения [1].

При реализации отмеченных новых возможностей учитываются достижения вычислительной математики при переходе от исходных измерительных данных к параметрам состояния, с которыми имеют дело пользователи соответствующей информационной продукции. Для лесных экосистем одним из таких параметров является объем зеленой фитомассы растительности, который, с одной стороны, увязывается эмпирическими соотношениями с общим объемом биомассы древесины, а с другой – содержанием углерода (основным параметром климатических моделей). В такой возможности получения количественных показателей экологического состояния выбранных регионов состоят преимущества предлагаемых подходов перед существующими аналогами. Вместо различных преобразований исходных яркостных образов, изменчивых от одной сцены к другой на изображениях, каждый элемент разрешения представляется в терминах указанных параметров состояния, инвариантных относительно условий аэрокосмической съемки выбранной территории.

Однако, одних спутниковых данных часто бывает недостаточно для получения достоверной информации о состоянии природно-техногенной сферы вследствие сложностей оперативного получения исходных данных наблюдений для конкретных регионов (по условиям облачности, пространственного разрешения, прохождения орбит космических носителей и др.). Одним из эффективных путей решения проблемы является создание на базе малой авиации системы локального мониторинга (бортового программно-аппаратного комплекса) обеспечивающего решение функциональных задач. В этой связи представляет интерес развитие новых технологий контроля и мониторинга соответствующих объектов, основанных на совместном использовании данных космического дистанционного зондирования и данных, получаемых средствами локального мониторинга на базе ультра-легких авиасредств [2, 3].

В данной публикации остановимся на развитии новых приложений дистанционного аэрокосмического зондирования в применении к реализации методов количественной оценки состояния почвенно-растительного покрова на основе обработки многоспектральных космических изображений и созданию системы локального аэромониторинга для решения задач валидации получаемой информационной продукции и решения других прикладных задач.

### **Недостатки существующих подходов и новые решения**

Существующие подходы с использованием данных MODIS/Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer спутника Terra и других аналогичных данных позволяют:

- Строить карты вегетационных индексов, которые в первом приближении дают представление о типах природных объектов на наблюдаемых территориях;
- Получать композитные изображения за несколько суток непрерывных спутниковых наблюдений (для частичного устранения влияния облачности, осреднение информации за несколько сроков наблюдений и т.п.);
- Проводить классификацию типов растительности в среде ГИС для наглядного отображения имеющихся информационных слоев конкретной территории, включая текущие данные дистанционного космического зондирования;
- Добиваться получения оценок лесистости (проективного покрытия территорий лесами) за достаточно длительные периоды космических наблюдений;
- Иметь эмпирические возможности оценки таких характеристик, как «площадь листовой поверхности» (Leaf Area Index - LAI), на интуитивном уровне описывающих плотность полога соответствующих видов растительности;
- Развивать эмпирические возможности построения моделей биопродуктивности и оценки урожайности сельскохозяйственных культур без проведения дорогостоящих полевых изме-

рений на больших площадях (в моделях используются также дискретные данные наземных сетевых наблюдений: среднесуточных значений влажности атмосферы, минимальной и максимальной температуры воздуха, суммы атмосферных осадков и солнечной радиации и др.).

Основным недостатком развиваемых в настоящее время приложений данных ДЗ является отсутствие развитой базы решения обратных задач восстановления свойств природных объектов. В приложениях по атмосферной оптике известны компиляции программных средств типа LOWTRAN, MODTRAN, HITRAN и др. Эти программы позволяют проводить компьютерные расчеты полей солнечного излучения на разных уровнях атмосферы и на уровне ее верхней границы, а также на уровне земной поверхности. В этих программах заложены те или иные возможности переноса солнечного излучения в моделях атмосферы разной степени замутнения при заданных условиях на верхней границе атмосферы и на уровне земной поверхности. Имеется необходимость разработки аналогичных программных средств для восстановления объема биомассы растительности для каждого элемента обрабатываемых многоспектральных изображений на основе современных методов вычислительной математики.

Другим недостатком существующих разработок является то, что на практике при построении тематических карт вегетационных индексов используется лишь ограниченное число каналов соответствующих аппаратурных средств. В частности, в применении к данным сканирующего радиометра MODIS преимущественно два спектральных канала составляют основу развития приложений: это каналы, охватывающие полосу поглощения хлорофилла (основного пигмента фотосинтезирующей листовой поверхности) и область максимума спектральной отражательной способности вегетирующей растительности в ближней инфракрасной части спектра. Требуется использование данных, по крайней мере, семи каналов видимой и ближней инфракрасной областей спектра. Такая необходимость возникает для того, чтобы проводить классификацию типов лесных (лиственные, хвойные, смешанные) и других экосистем (болотные, сельскохозяйственные и т.п.).

Наконец, еще один недостаток существующих подходов – использование преимущественно относительных градаций регистрируемых многоспектральных яркостей дистанционного аэрокосмического зондирования для наблюдения пространственного распределения объектов природно-техногенной сферы. Как сказано выше, по абсолютно калиброванным данным дистанционного зондирования возможно получение количественной оценки состояния почвенно-растительного покрова для каждого элемента многоспектрального изображения вместо традиционных качественных оценок.

### **Постановка новых задач**

Основы развития региональных приложений данных дистанционного космического зондирования среднего пространственного разрешения (на примере аппаратуры MODIS) изложены в работе [1]. Там же показаны возможности традиционных подходов, в основе которых заложена концепция «вегетационных индексов», и новых подходов к решению задачи восстановления количественных параметров состояния растительности по исходным абсолютно калиброванным данным аппаратуры MODIS, которые соответствуют значениям регистрируемых интенсивностей уходящего излучения в Вт/(м<sup>2</sup> мкм стер), привязанных к соответствующим широтам – долготам, на выбранные даты съемки. Данные взяты из таблиц каждого из семи hdf/Hierarchical Data Format-файлов исходного информационного продукта MOD02HKM (5 каналов с разрешением 500 метров плюс 2 канала с разрешением 250 метров, приведенные к разрешению 500 метров).

Задача восстановления объема фитомассы растительности для каждого элемента изображений сводится к нахождению различий между текущими данными измерений и данными модельных расчетов функционала многоспектральных яркостей для лиственных, хвойных и смешанных пород деревьев [4]. Для элементов разрешения, распознаваемых как «преобладание травянистой или болотной растительности», восстанавливаются объемы фитомассы таких «нелесных» экосистем. Расчетная программа поиска решений для каждого элемента изображения в момент съемки обеспечивает на момент съемки:

- выделение конкретного класса состояния лесной растительности из исходных 11 классов (1-100% лиственные породы; 11 – 100% хвойные породы; 6 – смешанный лес: наполовину лиственный, наполовину хвойный; 2-5 – смешанный лес с преобладанием лиственных пород при наличии хвойных пород на заданной площади от 10% до 40%, соответственно; 7-10 – смешанный лес с преобладанием хвойных пород при наличии лиственных пород на заданной площади от 40% до 10%, соответственно);
- выделение конкретного класса состояния атмосферы из исходных 4 классов (4 – прозрачная атмосфера; 1 – сильно замутненная; 2-3 – промежуточные значения между указанными крайними значениями; при этом значения яркости атмосферной дымки функционально связаны с прозрачностью атмосферы);
- нахождение общего числа решений обратной задачи: определение пересечений пар спектральных каналов на плоскости «плотность лесного полога – ажурность крон деревьев» и соответствующих им значений объема зеленой фитомассы лесной растительности выделенного породного состава (лиственные, хвойные, смешанные).

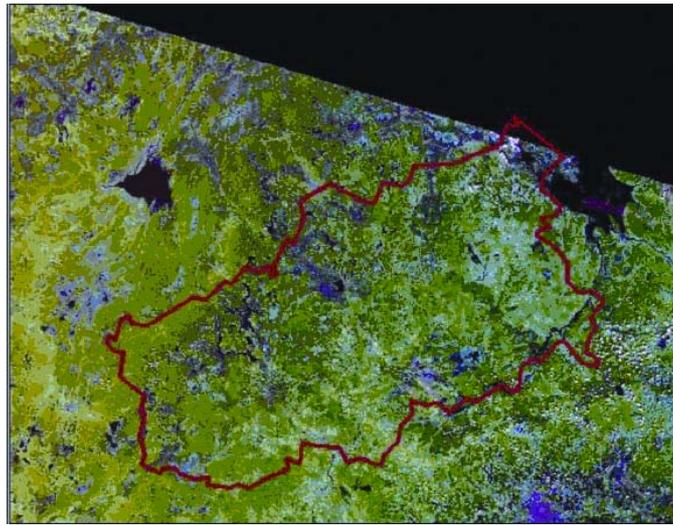
В [1] приведены результаты классификации объектов на выделенных фрагментах территории Тверской области. Здесь рассмотрим результаты для всей территории области и окружающих ее других субъектов Российской Федерации. Исходные данные 7 каналов аппаратуры MODIS в виде hdf-файлов вводились в компьютерную программу, которая давала возможность представления каждого элемента разрешения соответствующих изображений в терминах объема фитомассы растительности с классификацией объектов на этих изображениях (выделялись открытые водные поверхности, облачность, а также «особые объекты», не попавшие в исходную базу данных спектральных образов). Эти особые объекты в реальности представляют различные типы почвогрунтов, городских территорий и т.п. Ниже иллюстрируются некоторые результаты применения разработанной технологии на основе следующих данных аппаратуры MODIS:

- на 30 мая 2002 года (7-канальные матрицы 836 x 700 элементов исходных данных – по столбцам с 593-го по 1428-й элемент, по строкам с 1-го по 700-й элемент);
- на 6 июля 2005 года (7-канальные матрицы 471 x 561 элементов исходных данных – по столбцам с 210-го по 680-й элемент, по строкам с 4360-го по 4920-й элемент);
- на 26 августа 2005 года (7-канальные матрицы 811 x 571 элементов исходных данных – по столбцам с 700-го по 1510-й элемент, по строкам с 4910-го по 5480-й элемент).

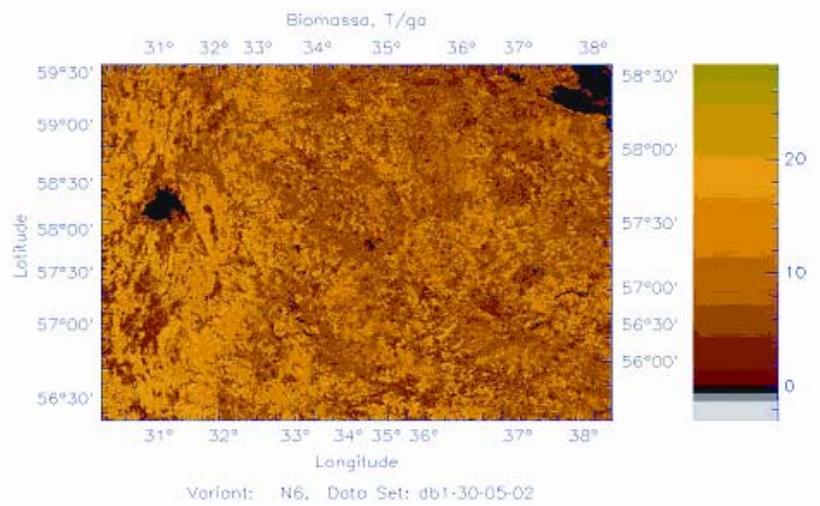
### Обсуждение результатов

Стандартным образом синтезированное изображение (по трем каналам RGB цветокодирования) аппаратуры MODIS на первую из указанных дат съемки для выделенной территории Тверской области и прилегающих к ней территорий представлено на рис. 1а. Характерные ориентиры географической привязки данных рис. 1а: озеро Ильмень слева и Рыбинское водохранилище справа. Можно видеть урбанизованные районы окрестностей г. Москва, г. Тверь, другие части наблюдаемого региона.

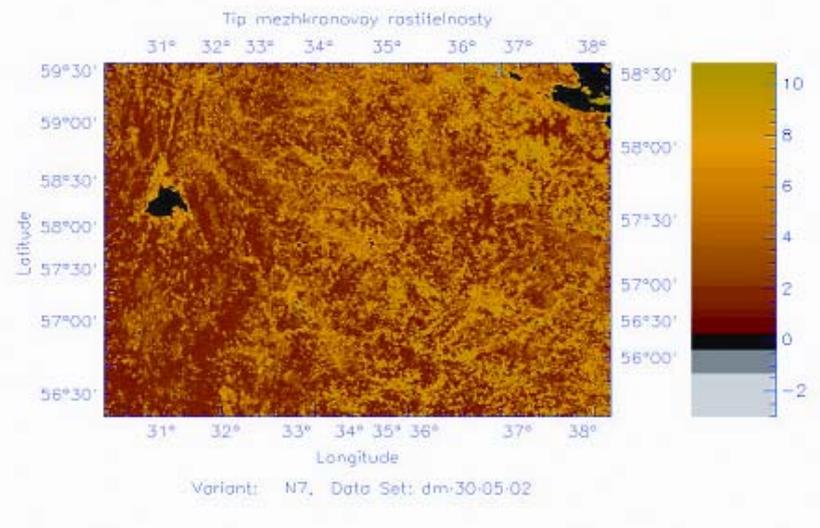
На рис. 1б показаны результаты восстановления значений объема фитомассы растительности на выбранную дату съемки. Иллюстрируемые результаты приведены к проекции, в которой каждый элемент разрешения характеризуется соответствующей строкой и столбцом в прямоугольной системе координат. Уточненная географическая привязка строк и столбцов проводилась по характерным контурным точкам в соответствии с данными сайта <http://earth.google.com>. Приведенная шкала цветов на изображении рис. 1б характеризует различия в значениях объема фитомассы для каждого элемента разрешения. Элементы разрешения, относящиеся к открытым водным поверхностям, обозначены черным цветом, к специфическим объектам сложного спектрального хода – серым цветом (на шкале как -1), а к облакам – белым цветом (как -2). Число таких элементов серого и белого цвета на изображении рис. 1б невелико.



*a*



*b*



*c*

*Рис. 1. Исходное синтезированное изображение аппаратуры MODIS выбранной территории на дату съемки 30 мая 2002 года с границами Тверской области (a), отображение выделенной территории в терминах значений объема фитомассы растительности (b) и поэлементное распределение породного состава лесной растительности (c). Значения фитомассы, близкие к нулю, могут относиться к травянистой, болотной и другой растительности*

На рис. 1*b* просматриваются контуры Верхневолжских озер (чуть правее от диагонали, проведенной из нижнего левого в правый верхний угол, в левом нижнем сегменте), контура водохранилища вблизи Вышнего Волочка (практически по центру изображения), контура реки Волга от Верхневолжских озер до Рыбинского водохранилища и т.п. На данной территории находится Валдайская возвышенность (к югу и северу от Верхневолжских озер) и Клинско-Дмитровская гряда (в нижней части рис. 1*b* в направлении с запада на восток от Валдайской возвышенности). Как видно из данных рис. 1*b*, преобладание желтого цвета (достаточно большие объемы фитомассы, близкие к 15 т/га) характерно в первую очередь как раз для области обоих этих поднятий рельефа местности. Такие же достаточно высокие значения объема фитомассы на выбранную дату съемки заметны и к западу от Валдайской возвышенности, где преобладает болотистая местность. На остальной части наблюдаемой территории (в основном, равнинная местность) преобладают красные цвета (объемы фитомассы на уровне 3-5 т/га), но можно заметить отдельные линии, полосы и пятна более высоких значений фитомассы.

Данные рис. 1*c* дают представление о том, каким преобладающим лесным породам (хвойным, лиственным, смешанным) соответствуют данные рис. 1*b*. Можно отметить, например, что хвойные породы приурочены к рельефу местности, бассейнам рек, другим особенностям территории (зеленые цвета). Для равнинных районов территории и болотистой местности характерно преобладание лиственных пород и кустарников с малыми значениями объема фитомассы растительности (красные цвета).

На рис. 2*a* дан пример витка спутниковых наблюдений с помощью данных аппаратуры MODIS от Средиземного моря на юге до Баренцева моря на дату съемки 6 июля 2005 года. Данные синтезированы по соответствующим каналам используемой аппаратуры и представлены в близких к естественным цветах. Интересующая нас территория Тверской области и прилегающих к ней областей выделена прямоугольником на рис. 2*a*. Можно видеть, что для значительной части выделенной территории характерны зенитные углы визирования более 30 градусов. Следует отметить, что максимальные углы визирования соответствуют около 50 градусов влево и вправо относительно надира, но для углов более 30 градусов существенное влияние начинают оказывать искажения исходных данных радиометрической калибровки. Пространственное разрешение таких элементов при достаточно сильном наклонном зондировании территории оказывается ниже, чем тех, которые находятся вблизи надирных углов.

Выделенная рамкой часть иллюстрируемой территории покрыта облачностью, которая видна также на данных рис. 2*b*, характеризующих значения объема фитомассы растительности. Преобладание зеленого цвета в левой части рис. 2*b* является следствием отмеченных выше искажений исходных данных при больших зенитных углах визирования. На остальной части наблюдаемой территории данные рис. 2*b* мало отличаются от данных рис. 1*b*: преобладающие зеленые оттенки характеризуют высокие значения объема фитомассы растительности, красные – малые значения.

То же самое можно сказать о сходных пространственных распределениях хвойных пород леса по данным рис. 2*c* в сравнении с данными рис. 1*c* всюду, за исключением районов, покрытых облачностью, а также наблюдаемых при больших зенитных углах визирования. В частности, зеленые цвета вблизи облачных полей ближе к левому верхнему углу изображения рис. 2*c* – это артефакт, обусловленный особыми условиями формирования интенсивности уходящего излучения вблизи ярких облачных полей.

На рис. 3*a* видно, что рамка выделенной территории соответствует углам, значительно более близким к надиру, чем на данных рис. 2*a* при практически той же области охвата общей территории данным витком.

Из данных рис. 3*b*, характеризующих пространственное распределение объема фитомассы растительности, видно, что на выбранную дату съемки 26 августа 2005 года значения этой величины близки к 13-15 т/га (желтые цвета) всюду, за исключением отдельных пятен более низких ее значений (красные цвета). В некоторых районах эти низкие значения также являются артефактом.

Например, низкие значения становятся заметными для урбанизованных территории г. Москва, г. Тверь и др. Аналогичный вывод относительно особых условий формирования интенсивностей уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой MODIS на выбранную дату съемки, можно сделать по данным рис. 3с. Обращает на себя внимание, тот факт, что по сравнению с другими датами съемки породный состав леса урбанизованных районов отображается иным образом. При этом для остальных территорий согласие с данными рис. 1с и рис. 2с наблюдается.

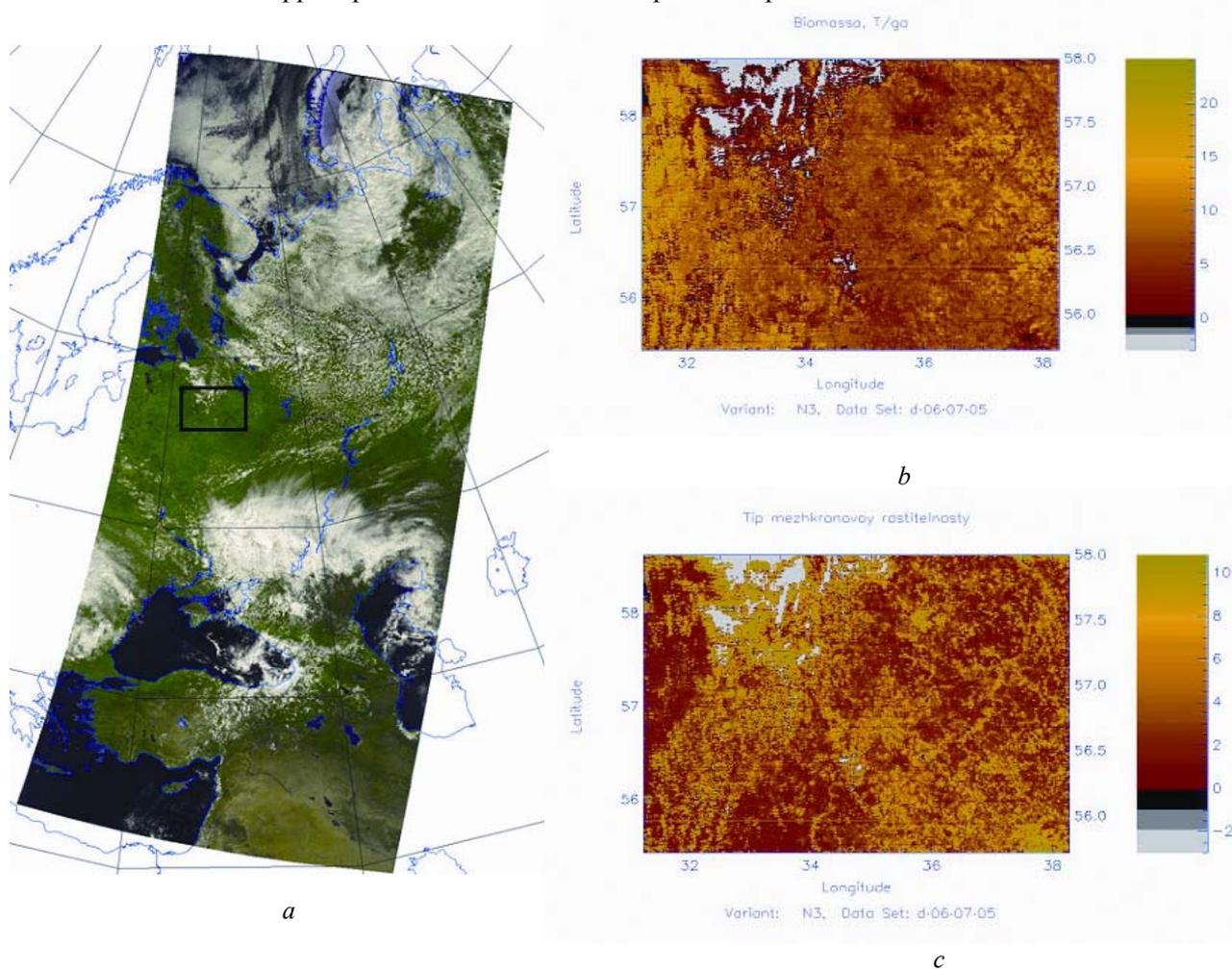


Рис. 2. Рамка региона для заданного витка космической съемки на дату 6 июля 2005 года (а), значения объема фитомассы растительности (b) и поэлементное распределение породного состава лесной растительности (с)

Возникает необходимость валидации (дополнительного наземного подтверждения) представленных здесь результатов обработки данных космической съемки. Качественное сравнение с существующими картами лесов выбранной территории показывает соответствие полученных результатов, но на существующих картах приводятся распределения породного состава лесных территорий и качества древесины за предшествующие сроки проведения наземных обследований (эти сроки могут достигать десятков лет). Текущее экологическое состояние лесных экосистем может отличаться от имеющихся статичных данных лесоинвентаризации (проводится один раз в несколько лет). В предлагаемых в настоящей работе приложениях получается новая информационная продукция, которая характеризует текущее состояние экосистем, а также их возможные изменения в течение вегетационного периода.

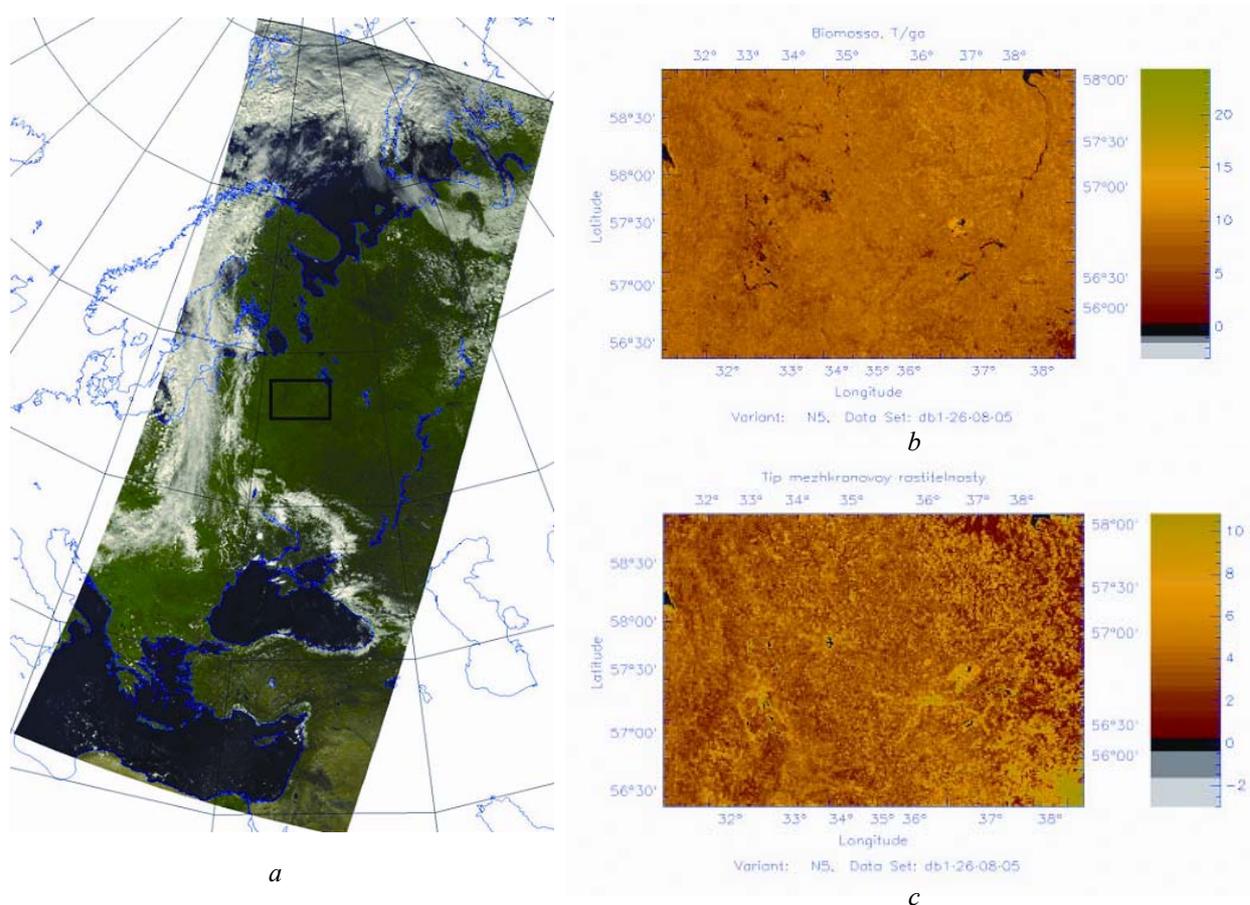


Рис. 3. Те же характеристики выбранной территории (a, b, c), что на рис.2, но на дату съемки 26 августа 2005 г.

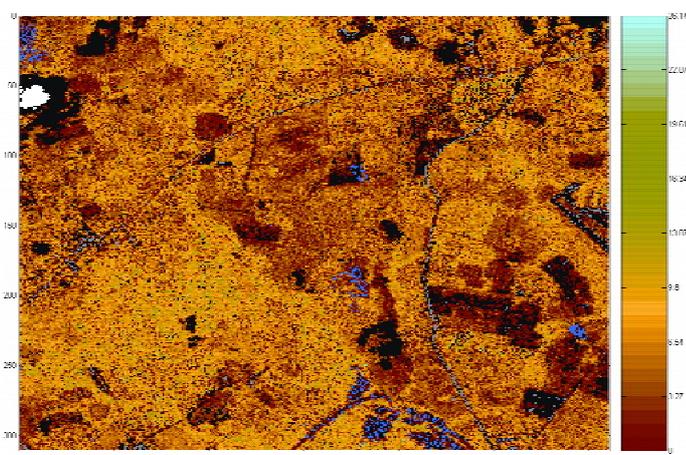
Первым этапом валидации может служить использование данных космической съемки более высокого пространственного разрешения, чем данные MODIS. Для этих целей можно использовать, например, данные аппаратуры ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) спутника Landsat-7 для отдельных фрагментов выбранной территории. Пространственное разрешение этой аппаратуры более чем на порядок лучше, чем аппаратуры MODIS. Уточнение результатов валидации может проводиться далее на основе данных локального аэромониторинга.

На рис. 4a приведены результаты обработки одного из изображений аппаратуры ETM+ на 30 июля 2005 года для выбранной тестовой территории Тверской области. Исходными являются данные 6 спектральных каналов (у аппаратуры ETM+ отсутствует канал 1.23-1.25 мкм), близких по расположению и ширине к каналам аппаратуры MODIS. Эти новые наборы данных также представлены в абсолютных энергетических единицах, что позволяет аналогичным образом подключить результаты модельных расчетов к решению обратной задачи классификации объектов на изображениях ETM+ и восстанавливать значения объема фитомассы для выделенного класса «растительность».

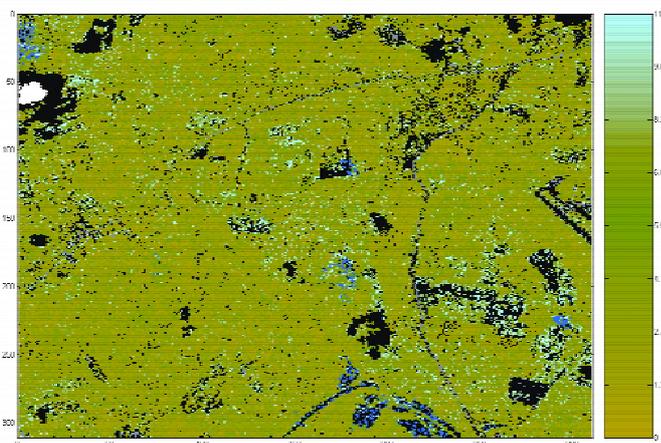
Сложная схема распознавания объектов на данном многоспектральном изображении включает использование всех 6 задействованных спектральных каналов. Выделяются водные поверхности, облака и тени от них, дорожно-асфальтовые покрытия, городские территории и другие объекты, не относящиеся к классу «растительность». Для элементов изображения, относящихся к этому классу, проводится восстановление объема фитомассы лесных, травянистых, болотных, сельскохозяйственных и других экосистем. При этом для сокращения расчетного времени внутри

класса «растительность» выделяется подкласс, который характеризуется элементами разрешения, относящимися к объектам, не попавшим в исходную базу спектральных образов модельных расчетов. Тем самым число элементов, относящихся к классу «чистой растительности», уменьшается на число элементов, относящихся к указанному подклассу.

На рис. 4а показаны результаты классификации выбранного изображения и восстановления объема фитомассы растительности для упомянутого класса «чистой растительности». Разные значения восстановленной величины фитомассы соответствуют на рис.4а цветовой гамме от красных оттенков (малые значения фитомассы) до голубых оттенков (большие значения фитомассы). Можно отметить преобладание сравнительно небольших значений фитомассы растительности на данном изображении. Видны облака (белый цвет) и тени от них (отображаются синими и черными оттенками). Объекты, отображенные серым цветом (городские территории, асфальтовое покрытие и т.п.), можно объединить с объектами, отображенными черным цветом (эти элементы разрешения характеризуются специфическим спектральным ходом отражательной способности в исходной базе расчетных спектральных образов).



a



b

Рис. 4. Результаты классификации исходного 6-канального изображения аппаратуры ETM+ на дату съемки 30 июля 2005 года (a) и выделения породного состава лесной растительного (b). Представленные на рис.4b значения, которые близки к единице, могут относиться к травянистой, болотной и другой растительности. Цветовая шкала, приведенная справа, соответствует значениям объема фитомассы растительности от нуля до близких к большим значениям. Синие тона – открытые водные поверхности (озера, реки). Белый цвет – облака. Серый цвет – дорожно-асфальтовые покрытия, городские территории, распаханные почвы. Черный цвет – объекты, относящиеся к классу «растительность», но не входящие в исходную базу расчетных спектральных образов разных типов почвенно-растительного покрова. Тени от облаков Частично отображаются черным цветом, частично – синими тонами

На данных рис. 4а можно видеть мелкую структуру отдельных фрагментов иллюстрируемого изображения. Регистрируемые данные спутниковых измерений оказываются очень чувствительными к характерным условиям солнечного освещения фитоэлементов, их взаимного затенения и т.п. В модели формирования интенсивности уходящего излучения фиксируются все эти изменения условий освещения. Именно поэтому на данных рис. 4а проявляется такая детализация отдельных элементов разрешения. Возможно проведение фильтрации (сглаживания) этих деталей при осреднении соседних элементов в пределах соответствующего окна (например, 3 x 3 элемента). Данные рис.4б позволяют уточнить особенности распределения породного состава лесной растительности при сравнении этих данных с данными рис. 4а. Можно видеть пятна хвойных пород леса (близкие к 11 значения) на фоне «остальной растительности», которая характеризуется на данном фрагменте наличием болот и лиственных пород деревьев с невысокими значениями объема фитомассы (15 т/га).

Дальнейшее развитие полученные здесь результаты должны получить на основе данных аэро-съемки на базе сверхлегких летательных аппаратов.

### **Использование легкомоторных мотодельтапланов (МДП) для дистанционного контроля и мониторинга объектов природно-техногенной сферы и подспутниковых измерений**

Для тестирования, калибровки данных ДЗ, а также валидации данных ДЗ, технология получения которой описана выше, необходимо синхронно с космическими съемками проводить наземные обследования и съемки с использованием авианосителей. Данные, полученные путем контактных и дистанционных измерений, дополняют друг друга и только вместе дают объективную и полную картину наблюдаемых явлений.

В качестве основы для использования системы локального мониторинга (СЛМ) на базе ультралегкого мотодельтаплана (МДП) в задачах калибровки и валидации спутниковых данных принят подход от частного к общему [3]. В отличие от традиционного ландшафтно-ключевого метода получение таких данных осуществляется с использованием бортового программно-аппаратурного комплекса (БПАК) в составе СЛМ. СЛМ размещается на борту МДП и получила название «Программно-аппаратный комплекс локального авиационного мониторинга» («ПАКЛАМ»). СЛМ разработана в 2005 - 2006 гг. в Московском физико-техническом институте (государственном университете) в рамках различных грантов и проектов. Общий вид СЛМ показан на рис.5. Эффективность применения СЛМ по сравнению с традиционно применяемыми аэросъемочными системами, обусловлена следующими факторами:

1. СЛМ «ПАКЛАМ» является компактным, легко транспортируемым средством, может быть развернута в предельно сжатые сроки непосредственно вблизи полигонов (подлет составляет не более 5%-7% от общего времени ДЗ), что позволяет обеспечить экономию летного времени, расходуемого на перелет к объекту от аэродромов постоянного базирования.
2. Возможность взлета и посадки МДП практически на любую твердую поверхность позволяет осуществить подбор места базирования в пределах полигона, следовательно, воспользоваться оптимальными метеоусловиями на локальном участке, которые могут установиться даже на незначительный период времени.
3. Крейсерская скорость МДП (50-140 км/час) и широкий диапазон рабочих высот (от 50 м до 3-4 км) позволяют оперативно выбирать оптимальные съемочные условия объектов, в том числе, производить измерения на предельно малых высотах, что особенно важно при решении задач крупномасштабного тематического картографирования (геологического, инженерно-геологического, почвенно-геоботанического, экологического и др.).
4. Базирование СЛМ «ПАКЛАМ» в непосредственной близости к контрольно-измерительному полигону позволяет оптимально организовывать синхронные наземные обследования. При этом эталонные объекты выбираются по данным локального мониторинга, а оперативный

просмотр дистанционной информации осуществляется с помощью технических средств мобильного полевого центра обработки данных, что обеспечивает наилучшую координацию взаимодействия групп специалистов, выполняющих комплекс наземных контактных измерений и ЛСР.

5. При решении задач мониторинга динамично изменяющихся объектов, такая методика калибровки и валидации спутниковых данных обеспечивает повышение достоверности выходных данных и эффективности всего комплекса выполнения полевых работ.

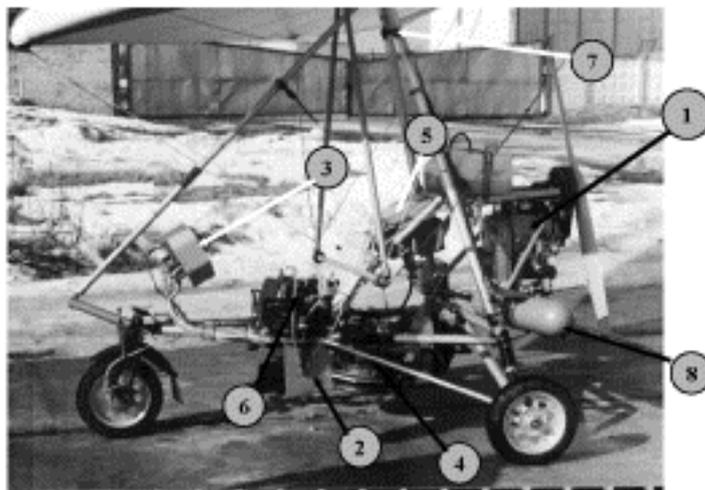


Рис. 5. Общий вид бортового программно-аппаратурного комплекса (БПАК), размещенного на борту МДП: 1 – силовая установка на базе двигателя РМЗ-640; 2 – телевизионная камера в маятниковом карданном подвесе; 3 – командный прибор АФА, блок размещения навигационной и контрольно-измерительной аппаратуры; 4 – АФА ТЭ 140 в маятниковом карданном подвесе; 5 – блок электронного управления системой сельсинного привода разворота съемочных платформ; 6 – блок регистрации видеоинформации и данных GPS привязки; 7 – GPS приемник GPSMAP 76CS; 8 – авиационно-десантная система спасения

В случае применения СЛМ на базе МДП локальный мониторинг тестовых полигонов площадью менее 10 кв. км, размещенных на объектах наиболее нарушенных элементов биосферы (например, нефтяных месторождений), исключает непроизводительные затраты на съемку всей площади, когда до 80% материалов аэросъемки оказываются невостребованными. Важнейшим преимуществом применения МДП при этом является возможность участия местных специалистов (заказчиков) в планировании летно-съемочных работ непосредственно на объекте мониторинга. Оперативное управление летно-съемочным процессом, исходя из функциональных задач мониторинга, корректирование параметров летных работ в зависимости от изменяющихся метеоусловий, особенностей динамики спектральных и калориметрических характеристик объектов ДЗ, освещенности и оптико-физических свойств ландшафта, обеспечивают повышение эффективности всей программы мониторинга в целом.

Итогом комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по этой проблеме стало Решение Роспатента от 27.11.2006. Бюлл. №33 о выдаче авторскому коллективу А.Г.Топчиеву, Т.В.Кондранину, В.В.Козодерову патента на полезную модель [5].

#### Общее описание конструкции СЛМ «ПАКЛАМ» на базе МДП «Поиск 06ТМ»

МДП состоит из крыла (площадь - 18 кв. м), мототележки, на которой расположены: винтомоторная установка, шасси, кресла пилота, пассажира и бортовой специализированный комплекс «ПАКЛАМ» (рис.6). Несущая платформа МДП - панельной схемы, отличается рациональностью технических решений и хорошим дизайном. Шасси повышенной прочности с мощной амортизацией и колесами диаметром 400 мм и дисковой системой торможения позволяет эксплуатировать дельтаплан с неподготовленных площадок. Силовой каркас мототележки представляет собой

шарнирно-ванто-стержневую конструкцию, состоящую, из трубчатых элементов. Нижняя панель мототележки представляет собой треугольник, основанием которого служит опора шасси, катетами - продольные трубы, соединяемые при вершине стальным тройником, от которого отходит бушприт. Силовая установка состоит из двухцилиндрового двухтактного двигателя HIRT (ROTEX), ременного редуктора, воздушного винта, подmotorной рамы и двух подкосов, топливного бака и топливопроводов, устройства запуска, педали и проводки управления дроссельными заслонками карбюраторов. Соединение крыла и мототележки осуществляется через узел подвески, обеспечивающем *продольное и поперечное угловое перемещение мототележки относительно крыла*. На трапеции расположен ЖК монитор, а на пульте управления GPS-приемник; для лучшего захвата спутников антенна приемника вынесена на плоскость крыла.



Рис. 6. Общий вид МДП «Поиск 06 ТМ» в базовой комплектации БПАК «ПАКЛАМ»

При выполнении съемки подвес обеспечивает возможность “просмотра” камерой подстилающей поверхности или “отслеживания” в течение определенного времени заданного объекта. Таким образом, комбинируя режимы управления платформами аэрофотографической и телевизионной систем, пилот-оператор в интерактивном режиме осуществляет выполнение синхронной плановой и перспективной телевизионной аэросъемок, не отвлекаясь от процесса пилотирования.

*Навигационное оборудование* (рис.7) *используется в нескольких режимах*. При плановой съемке оператор использует заранее введенные данные запланированных маршрутов с использованием путевых точек. На дисплей выводятся название и номер текущей путевой точки, значения высоты, курса, дальности, ухода с курса, а также графическое представление отклонения от запланированного маршрута. Точность определения для данного применения составляет 5 - 15 метров. Одновременно в фоновом режиме происходит регистрация траектории для дальнейшей приближенной привязки съемочной информации. В режиме “свободного поиска” GPS приемник используется в качестве регистратора полетных точек с запоминанием времени пролета, высоты полета, плановых координат точки, и др. Этот режим используется для поиска нарушений и подозрительных территорий, обнаруженных при немаршрутных полетах путем привязки видеоряда по времени к координатам полетных точек. Для обеспечения автоматической привязки видеоряда к данным GPS-измерений предусмотрена возможность использования тайм-кода или впечатываемой в кадр метки времени в соответствующем видео оборудовании, в противном случае для возможности привязки видеоряда по времени необходимо вручную сверять шкалу времени GPS-

приемника и ноль счетчика ленты ВМ перед взлетом СЛМ. Для регистрации или аэросъемки отдельных известных нарушений используется режим “выхода на точку”, при котором борт-оператор выходит в необходимый район съемки, используя GPS - оборудование. Для этого координаты всех подобных точек заранее вводятся в память GPS приемника как путевые, а далее пилот использует навигационную информацию, выдаваемую аппаратурой, аналогично режиму площадной съемки. При этом даже точности простого определения в 100 м вполне достаточно для выхода в назначенный район. Кроме того, при работе в любом режиме GPS оборудование используется для собственной привязки МДП в любой момент работ, а так же в аварийных ситуациях и при возвращении на базу. Выполнение работ осуществляется поэтапно в соответствии с регламентами и инструкциями, разработанными для конкретного вида локального мониторинга. Широкий спектр микросамолетов класса «Ультра-лайт» позволяет рассматривать их в качестве возможного варианта авиационной платформы для размещения средств и систем ДЗ. Важнейшим показателем для таких авиасредств является допустимая дополнительная нагрузка (исключая вес горючего, пилота и борт оператора). Для МДП «Поиск 06» по сравнению с другими аналогами этот показатель составляет беспрецедентно высокое значение равное 1,6-2. Это означает, что при собственной массе 150-160 кг МДП МФТИ принимает на борт полезной нагрузки до 350 кг. Приведенные данные позволяют сделать однозначный вывод в пользу выбора МДП «Поиск 06 ТМ» в приведенной комплектации в качестве авиационной платформы для размещения бортового программно-аппаратурного комплекса. В качестве дополнительной опции в комплект МДП входит авиационно-десантная система спасения (пиротехническая или пневматическая).



Рис. 7. Приборная доска и GPS приемник с жидкокристаллическим видеомонитором на борту МДП

Основная задача, которая решалась СЛМ «ПАКЛАМ», состояла в синхронном получении высококачественных *позиционированных с точностью до 25-50 см по центру цифровых видеок кадров*. Важной особенностью БПАК является возможность приведения его по углу места и азимуту в оптимальное положение по отношению к индикатрисе рассеяния объекта съемки. Поворотная платформа бортового комплекса обеспечивает также режим отработки углов ветрового скольжения (компенсацию угла разворота продольной оси летательного аппарата относительно съемочного галса при боковом ветре). В целях увеличения производительности при выполнении ЛСР по тестовым полигонам, содержащим линейно-протяженные инженерные сооружения (нефтегазопроводы, шоссе, промышленно освоенные прибрежные зоны и т.п.), решена задача сканирования подтрассовой полосы съемки методом ритмичного качания платформы. Оптические оси

съемочных систем отклоняются на заданный угол с требуемой для обеспечения покрытия периодичностью в плоскости, перпендикулярной съемочному галсу. В дополнение к этому БПАК обеспечивает возможность включения в состав гиперспектральной камеры, тепловизора, других средств ДЗ. В состав БПАК включены следующие основные блоки: аэросъемочной аппаратуры, навигационных данных, управления платформой, контроля параметров бортовой аппаратуры.

Блок аэросъемочной аппаратуры размещен на поворотной платформе, обеспечивающей разворот аппаратуры в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Блок навигационных данных на базе РС, сопряженного с GPS-приемником, включает топографическую электронную карту местности с проложенными маршрутами, точками наземных геодезических измерений, объектами мониторинга в соответствии с поставленной функциональной задачей.

Блок управления поворотной платформой предусматривает следующие режимы выполнения летно-съемочных работ (ЛСР) для получения серии снимков:

- с заданным продольным перекрытием при выполнении маршрутной съемки линейных объектов с компенсацией угла разворота съемочной платформы при ветровом сносе МДП, и, соответственно, отклонении оси МДП от направления съемочного галса;
- на площадные объекты при выполнении плановой съемки с заданным продольным и поперечным перекрытием при смещении оптических осей аэросъемочной аппаратуры в плоскости перпендикулярной направлению съемочного галса и последующей геометрической коррекцией изображений;
- с заданным перекрытием при выполнении съемки линейных объектов (линии электропередачи) и полете МДП вдоль объекта съемки на высоте его размещения.

Блок контроля параметров бортовой аппаратуры позволяет выполнять текущую регистрацию и контроль функционирования всех блоков и систем бортового комплекса. На рис.8 показано положение поворотной платформы на борту МДП. В ходе ЛСР бортовая аппаратура включается с командного прибора и непрерывно передает данные в бортовой РС. Сброс данных в компьютер, содержащий электронную карту местности с проложенными аэросъемочными маршрутами, точками наземных геодезических измерений, объектами мониторинга в соответствии с поставленной функциональной задачей, осуществляется после завершения очередного цикла ДЗ.



*Рис. 8. Положение поворотной платформы (белый цвет) на борту МДП с закрепленной на ней съемочной аппаратурой*

### Примеры результатов ЛСР, выполненных с использованием БПАК МДП

На рис.9-12 приводятся примеры съемок различных объектов природно-техногенной сферы, полученные с использованием СЛМ «ПАКЛАМ» различных объектов природно-техногенной сферы на тестовых полигонах в районе г. Истра Новорижского шоссе Московской области. ЛСР проводились 18.05.2006 в вечернее время с 19:40 до 20:15 в практически безоблачную погоду с высоты полета МДП – 350 м.

Остановимся более подробно на деталях технологии получения выходной информационной продукции с использованием уже существующего комплекса БПАК. На рис.13 приведен пример отработки предлагаемой технологии локального мониторинга.



*Рис.9, 10, 11, 12. Примеры исходных изображений, полученных с использованием СЛМ «ПАКЛАМ»*

Точность позиционирования центра видеокadra составляет 10-12 м. Рис.13 дает представление о том, как отдельный видеокادر отображается на карте выбранной территории прохождения газопровода. В системе MapInfo Professional для каждого выделенного видеокadra, привязанного к используемой топографической основе, дается план прохождения газопровода с характерными особенностями расположения населенных пунктов, дорожной сети, гидрологических объектов, а также расположения пунктов наземной диагностики газотранспортной системы. Совмещение данных бортовой GPS – системы и топографических материалов любого масштаба позволяет архивировать данные координатной привязки каждого из цветных телевизионных кадров, полученных на выбранную территорию линейной части магистрального газопровода (каждому штриху кодировки на карте рис.13 соответствует кадр, полученный с интервалом 4 секунд). Кадры телевизионной аэросъемки отобраны для обеспечения покрытия коридора магистральных трубопро-

водов в полосе 350 м, продольное перекрытие кадров составляет 10%-20%. Центральные точки кадров привязаны к соответствующей системе координат с точностью до 3.5-5 метров, пронумерованы и занесены в каталог. Получаемые видеоданные помещаются в программную оболочку MapInfo для последующего анализа методом послыного совмещения с сопутствующей информацией об объектах.

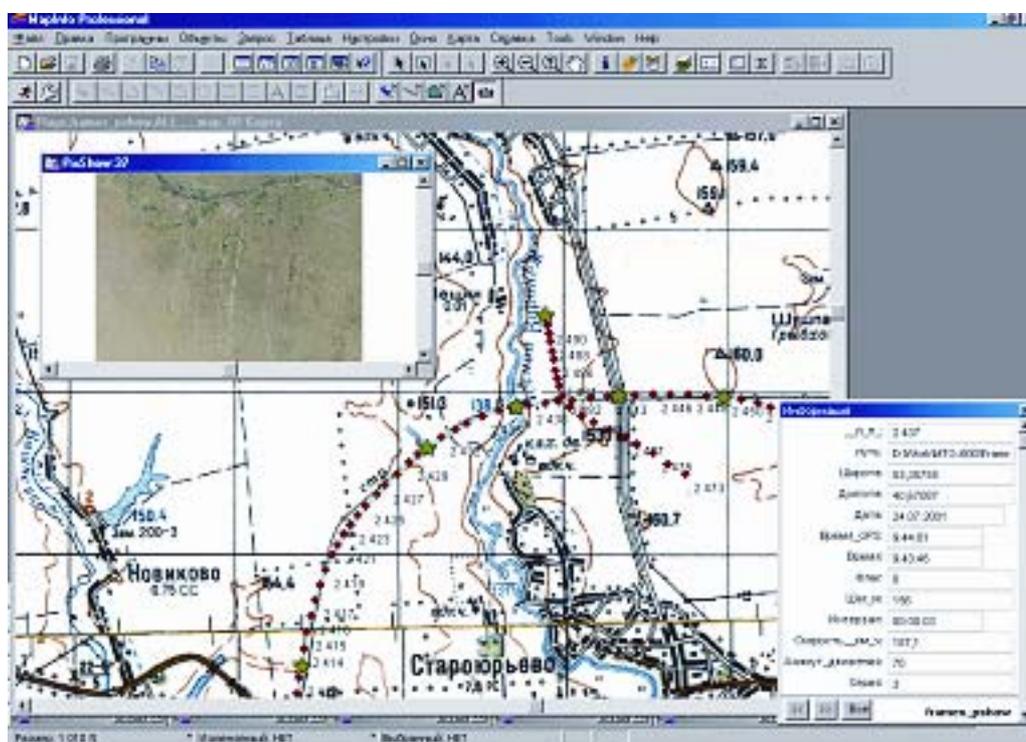


Рис.13. Пример выходной ГИС информационной продукции. Фрагмент изображения, полученный в ходе ЛСР «привязан» к топографической основе с соответствующей легендой

## Заключение

Показаны возможности использования новых подходов к количественной оценке объема биомассы растительности одновременно с классификацией объектов природно-техногенной сферы на многоспектральных космических изображениях. Продемонстрированы новые технические решения по использованию результатов аэросъемки на основе оригинального программно-аппаратного комплекса локального мониторинга объектов природно-техногенной сферы. Перспективы развития данного направления – в совместном использовании данных космического мониторинга разного пространственного разрешения и данных локального аэромониторинга для валидации полученных результатов и уточнения особенностей выбранной территории.

Исследования проводятся в рамках проектов РФФИ №05-05-64199, 05-05-08004\_офи, 05-07-90176, 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)».

Авторы выражают признательность Инженерно-технологическому центру (ИТЦ) «СканЭкс», НИЦ «Планета» Росгидромета и ЗАО «Совзонд» за предоставление данных, которые использовались при подготовке настоящей публикации.

## Литература

1. *Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головки В.А., Дмитриев Е.В.* Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений. Исслед. Земли из космоса, 2007, №1, с.50-61.
2. *Кондранин Т.В., Козодеров В.В., Топчиев А.Г., Головки В.А., Косолапов В.С.* Информационное обеспечение задач оценки состояния природно-техногенной сферы с использованием данных космического и локального мониторинга. Сб. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», вып.3, т.1. М., изд. ООО «Азбука-2000», 2006, с.185-191.
3. *Топчиев А.Г., Кондранин Т.В., Козодеров В.В.* Системы локального мониторинга природно-техногенной сферы. Экология и промышленность России, 2006, №11, с.4-6.
4. *Козодеров В.В., Косолапов В.С.* Оценка точности аэрокосмического многоканального метода восстановления плотности лесной зеленой фитомассы по результатам моделирования. Исслед. Земли из космоса, 2002, №1, с.72-80.
5. Патент на полезную модель № 58696 «Бортовая система локального мониторинга объектов природно-техногенной сферы». Авторы: Топчиев А.Г., Кондранин Т.В., Козодеров В.В. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 27 ноября 2006 года.