

## **Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области**

**Е.А. Гаврилюк, Д.В. Ершов**

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,  
117997 Москва, Профсоюзная ул., 84/32  
E-mails: egor@ifl.rssi.ru,ershov@ifl.rssi.ru*

В статье изложена методика моделирования динамики спектральных яркостей основных типов наземных экосистем в течение вегетационного сезона с использованием временных серий спутниковых изображений Landsat-TM. В качестве базового изображения для определения однородных в спектральном отношении участков растительности используется летнее безоблачное изображение. Апробация методики выполнялась на территории Московской области с целью подготовки сезонных безоблачных композитных изображений и построения карты растительности наземных экосистем на региональном уровне.

**Ключевые слова:** Landsat-TM, пространственное и временное моделирование, композитные изображения, наземные экосистемы, классификация многозональных изображений, тематическое картографирование.

### **Введение**

Одним из важных направлений развития методов картографирования наземных экосистем и, прежде всего, лесов является адаптация существующих методов и алгоритмов обработки спутниковых изображений для построения карт растительности на региональном уровне. Для этого наилучшим образом могут подходить данные высокого пространственного разрешения серии спутников LANDSAT, находящиеся в открытом доступе в мировых каталогах и архивах.

Преимуществом использования этих данных является пространственное разрешение, составляющее 30 метров на местности (0,09 га), и семь спектральных каналов в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. В дополнение к этому преимуществу, можно добавить также, что за последние двадцать лет накоплен огромный архив изображений LANDSAT, многократно покрывающий территорию России.

Недостатком является низкая периодичность съемки одной и той же территории (один раз в 16 дней), что для бореальной зоны становится критичным при учете облачного покрова и теней от облаков.

Поэтому для картографирования растительности на региональном уровне необходимо разрабатывать и применять методы построения сезонных безоблачных композитных изображений (Белова, Ершов, 2010). При этом удается достичь желаемого результата только для летних периодов вегетационного сезона, так как наибольшее число измерений приходится на этот период года.

В свете этого, необходимы подходы, позволяющие моделировать поведения спектральных яркостей различных типов подстилающей поверхности в весенний и осенний периоды года с использованием летнего безоблачного композитного изображения. Это позволяет повысить информативность данных и улучшить распознавание различных видов лесной и нелесной растительности наземных экосистем исследуемого региона. В рамках статьи на примере Московской области рассмотрена методика пространственно-временного моделирования динамики спектральных яркостей основных типов наземных экосистем в течение вегетационного сезона с целью подготовки сезонных безоблачных композитных изображений и построения карты растительности наземных экосистем.

## **Создание сезонных безоблачных композитных изображений**

### *Исходные данные*

Для моделирования динамики спектральных яркостей разных типов подстилающих поверхностей в весенний и осенний периоды года и последующего создания карты наземных экосистем Московской области использовались следующие материалы:

1). Разновременные космические изображения Landsat-5/TM с пространственным разрешением 30 м на следующие гранулы в разметке WRS2: p177r021, p177r022, p178r020, p178r021, p178r022, p179r020, p179r021, p179r022, p180r020, p180r021. Временной охват снимков составляет период наблюдения с 6 мая по 24 сентября за 2010, 2009 и 2007 годы.

2). Безоблачное летнее композитное изображение (летняя мозаика) 2010 года по методике (Белова, Ершов, 2010) для трех спектральных каналов, а именно красный (0,63-0,69 мкм), ближний ИК (0,76-0,90) и средний ИК (1,55-1,75).

В пределах указанных выше гранул из архива было отобрано 48 сцен оптимального качества на период с начала мая до конца сентября преимущественно 2010 и 2009 годов. Из них 9 изображений приходятся на май, 14 – на сентябрь и 25 – на летние месяцы. Часть сцен, полученных в мае, датируются 2007 годом по причине отсутствия качественных снимков 2010 года. Это позволяет расширить временной диапазон наблюдения региона с начала мая по конец сентября. Фактически, подбираются изображения с минимальной облачностью, охватывающие по времени весь вегетационный сезон. Все отобранные снимки подвергаются предварительной обработке, включая фильтрацию облачности/тени от облаков и атмосферную коррекцию (Белова, Ершов, 2011).

После предварительной обработки по каждой сцене отбираются указанных выше три канала, и упорядочиваются по времени в соответствии с датой съемки. Для каждого спектрального канала создаются временные серии изображений, ограниченные периодами вегетационного сезона, а именно весна, лето, осень. Так как дата съемки каждой сцены, использованных для формирования временных серий внутри каждого сезона, в большинстве случаях не совпадает, то и их пространственное положение по территории Московской области различно. По этой причине возникает необходимость моделирования динамики спектральных яркостей для тех участков земной поверхности области, где отсутствует наблюдения Landsat-TM. Полученные временные серии спутниковых изображений условно дадим название, как «исходные сезонные стеки».

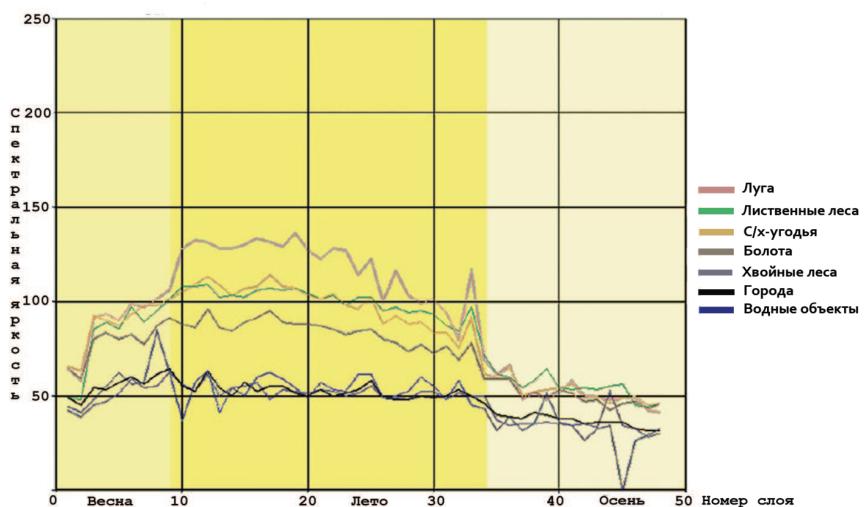
### *Моделирование динамики спектральных яркостей спутниковых изображений*

В методике предусматривается этап проведения неконтролируемой классификации летней безоблачной мозаики алгоритмом ISODATA (Рук. польз. ERDAS, 2006) с большим числом классов (10,000). Результатом классификации является разбиение территории на множество зон (кластеров), однородных по спектральным яркостям в трехмерном пространстве красного и двух инфракрасных каналов. При этом предполагается, что с некой вероятностью пиксели этих зон могут встречаться по всему изображению. Это условие необходимо для последующего моделирования спектральных яркостей поверхности по всей территории рассматриваемого региона.

Как отмечалось ранее, из-за того, что космическая съемка наблюдаемой территории тематическим картографом Landsat-TM производится в разное время, а полоса захвата территории (185 км) не позволяет одномоментной съемкой покрывать большие территории (например, Московскую область), то при построении временных серий сцены располагаются неравномерно с различным перекрытием. В связи с этим необходимо проводить моделирование спектральных яркостей поверхности для тех участков, где отсутствует космическая

съемка. Таким образом, целью этой процедуры является «перенос» значений спектральных яркостей с каждой сцены временной серии на всю территорию исследуемого региона посредством вычисления среднего значения спектральной яркости пикселей в пределах каждого кластера. После чего, это среднее значение присваивается всем пикселям этого кластера летнего композитного изображения.

Полученные в результате этой процедуры сезонные стеки по каждой дате съемки полностью покрывают территорию Московской области. Окончательно для тематического анализа формируются три *временных стека* (по одному на канал) со слоями, расположенных в хронологическом порядке от начала мая до конца сентября. Эти изображения, по сути, и являются *моделями поведения спектральных яркостей в течение вегетационного сезона*. Наглядно проиллюстрировать динамику значений спектральной яркости некоторых типов растительности и объектов земной поверхности в ближнем ИК канале позволяет спектральный профиль, который строится для любого пикселя изображения (рис.1).



*Рис. 1. Спектральный профиль основных типов поверхности в ближнем ИК-диапазоне*

Примечание: Спектральная яркость приведена в относительных единицах (шкала от 0 до 255)

## Анализ и обработка временных стеков

### Выравнивание спектрального профиля

Неоднородность исходных данных, а также специфика моделирования временных стеков обуславливает наличие на спектральном профиле аномальных «выбросов» (резкое изменение яркости типа поверхности) и «провалов» (отсутствие значения яркости на слое). Причинами могут быть остаточная облачность или тени от облаков (неотфильтрованные участки изображения на краях облаков, или мелкая облачность меньше разрешения снимка), а также изменения в растительном покрове (пожар, вырубка и т.п.) в течение вегетационного сезона.

Эти флюктуации спектральной яркости приводят к ошибкам при тематической обработке, и поэтому встает необходимость в процедуре сглаживания спектральных яркостей временных серий методом скользящего окна с размерностью  $[1 \times 7]$  для определения среднего значения и среднеквадратического отклонения (СКО) спектральной яркости вдоль профиля спектральной кривой. Из анализа исключаются нулевые значения, условно отнесенные к пропускам в данных. Если значение анализируемого пикселя отклоняется от среднего значения более чем на две величины СКО, то оно заменяется средним значением между двумя ближайшими значимыми измерениями в стеке. В противном случае значения остаются без изменений:

$$R_i = \begin{cases} [\mu - 2 \cdot \sigma] < R_i < [\mu + 2 \cdot \sigma], R_i \\ \frac{(R_{i-1} + R_{i+1})}{2} \end{cases}$$

$R_i$  – спектральная яркость пикселя в  $i$  слое стека;  
 $\mu_i$  – среднее значение пикселей в скользящем окне  $[1 \times 7]$  профиля;  
 $\sigma_i$  – среднеквадратическое отклонение яркостей пикселей в скользящем окне  $[1 \times 7]$  профиля.

### Осреднение спектрального профиля

Полученные временные профили детально иллюстрируют динамику спектральной яркости основных наземных экосистем региона в течение вегетационного сезона. Данные изображения занимают относительно большие объемы памяти (десятки гигабайт), что делает проблематичным их автоматическую классификацию, в частности методом ISODA-TA. Кроме того, часть слоев может нести в себе зашумленную информацию, которая снижает точность тематической классификации.

Для минимизации влияния данных факторов производится уменьшение количества слоев сезонного стека спектральных профилей за счет осреднения их спектральных яркостей. Другими словами, выполняется сокращение пространства признаков (слоев) для каждого спектрального канала в течение вегетационного сезона (рис.2). В результате вместо шести последовательных яркостей в профиле создается один, значения пикселей которого соответствуют среднему из этих шести измерений.

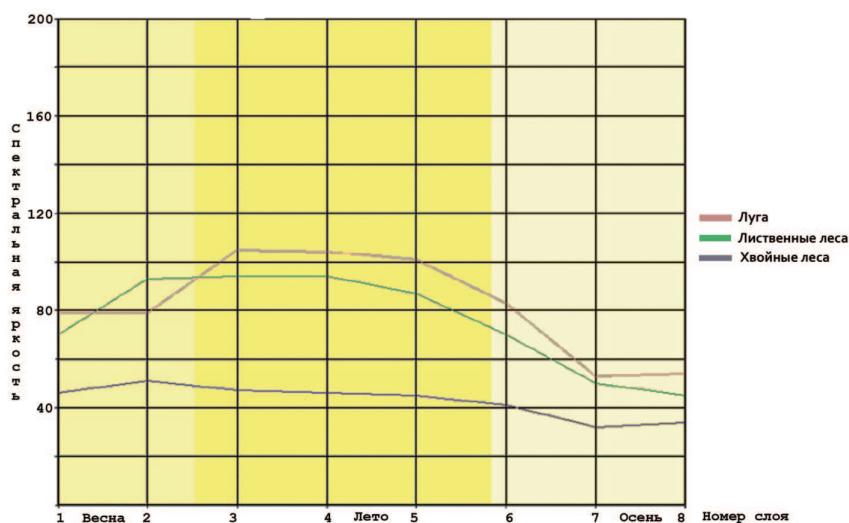


Рис. 2. Осредненный спектральный профиль для трех типов поверхности

Примечание: Спектральная яркость приведена в относительных единицах (шкала от 0 до 255)

Завершающим этапом подготовительных работ к тематической классификации является формированием единого изображения для трех спектральных диапазонов (красный канал, БИК и средний ИК), объединяющего все три периода вегетационного сезона (весна, лето и осень). Окончательно на Московскую область подготовлено 18-канальное безоблачное композитное изображение, состоящее из 6 осредненных временных периода съемки вегетационного сезона на каждый из трех информативных каналов. Обозначим его как «финальный стек». Примеры разносезонных финальных стеков, синтезированных по трем спектральным каналам, приводится на рисунке 3.

## Классификация изображения

На начальном этапе классификации финального стека выполняется стандартная неконтролируемая классификация алгоритмом ISODATA с последующим визуальным анализом и распределением кластеров по тематическим классам, соответствующим основным наземным экосистемам региона.

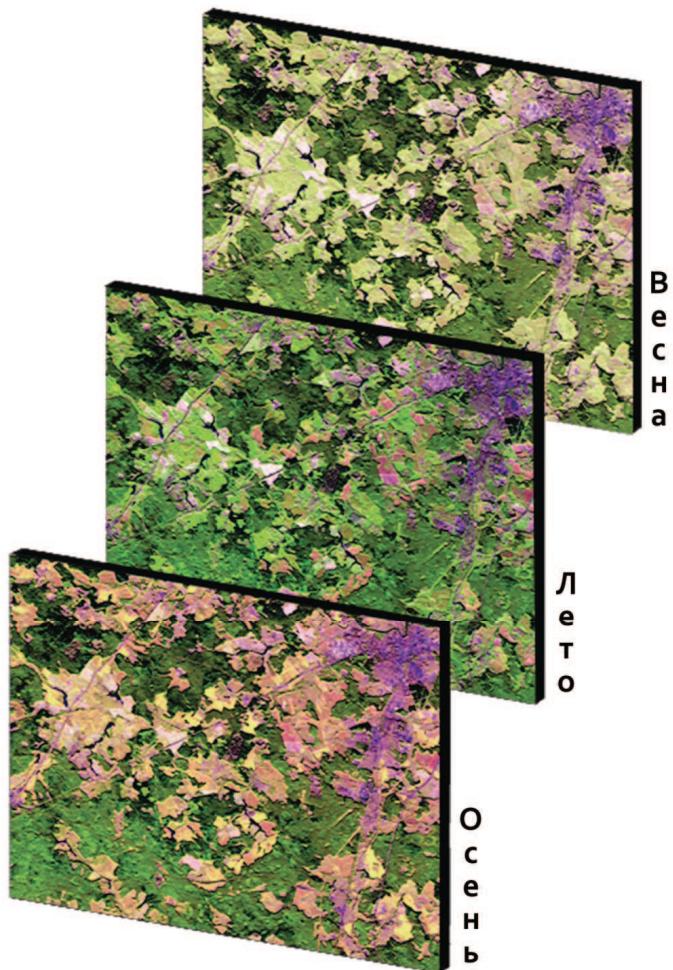


Рис. 3. Фрагменты псевдо-синтезированных изображений за весенний, летний и осенний периоды вегетационного сезона

Для Московской области рассматриваются следующие типы наземных экосистем и объектов земной поверхности:

1. Темнохвойные леса
2. Светлохвойные леса
3. Лиственные леса
4. Смешанные леса с преобладанием хвойных пород
5. Смешанные леса
6. Смешанные леса с преобладанием лиственных пород
7. Болота
8. Луговая растительность
9. Сельскохозяйственные угодья
10. Открытая почва
11. Урбанизированные территории
12. Водные объекты

Для определения состава классов использовалась легенда карты растительности России (Барталев и др., 2011), которая является продолжением научных работ, выполненных в рамках международного проекта GLC-2000 с целью создания карты наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2002).

С помощью карты растительности и другой дополнительной информации определяются тематически идентифицированные кластеры или эталоны в качестве опорной информации для формирования обучающей выборки. На этом же этапе проводится количественная оценка в пикселе спутникового изображения доли площади, покрытой хвойными и лиственными породами. В качестве подхода используется метод декомпозиции спектральных смесей Mathieu (Mathieu et al., 1994), апробированный во многих исследованиях авторов по оценке различных характеристик лесов (Барталев и др., 1999). Эта информация используется для настройки порогов при определении соотношения хвойных и лиственных лесов в пространстве красного и ближнего инфракрасного каналов летних изображений.

Дополнительным источником информации при идентификации кластеров на этапе экспертного анализа также использовались межклассовые расстояния между средними значениями опорных спектров тематических классов и кластеров в многомерном пространстве. На основе этих расстояний определялись три ближайших тематических класса в качестве кандидатов для идентификации кластеров на этапе экспертного анализа.

В случае, когда результаты первичной кластеризации были неудовлетворительными, т.е. образовывались семантически смешанные кластеры (например, луга и с/х-угодья), то этап классификации повторялся с ограничением области кластерного анализа по отдельным участкам покрытых и непокрытых лесом территорий.

После того, как для всех классов наземных экосистем сформированы обучающие выборки на основе эталонных кластеров, проводится контролируемая классификация финального стека по методу наименьших расстояний и ее результат объединяется с результатами экспертного анализа «проблемных» семантически смешанных кластеров. Последовательность этапов классификации изображения для создания карты растительности по данным высокого разрешения приводится на рисунке 4.



Рис. 4. Блок-схема тематической обработки временных серий спутниковых изображений

## Коррекция результатов классификации

Поскольку часть объектов городской застройки, транспортной сети, а также гидрографии не могут быть корректно распознаны при кластерном анализе, то они используются в качестве принудительных масок при отнесении кластеров нелесным объектам. Для этого использовались картографические слои цифровых топографических карт крупного масштаба (1:100000 для Московской области). Кроме того, проводится ряд процедур по устранению ошибок первого и второго рода, возникающих при неконтролируемой классификации. В частности, исключение из классово-однородных областей тематического изображения одиночных пикселей, относящихся к другим классам. На завершающем этапе выполняется преобразование полученной тематической карты в географическую систему координат.

Результатом проделанной работы является карта наземных экосистем Московской области по состоянию на 2010 год (рис.5).

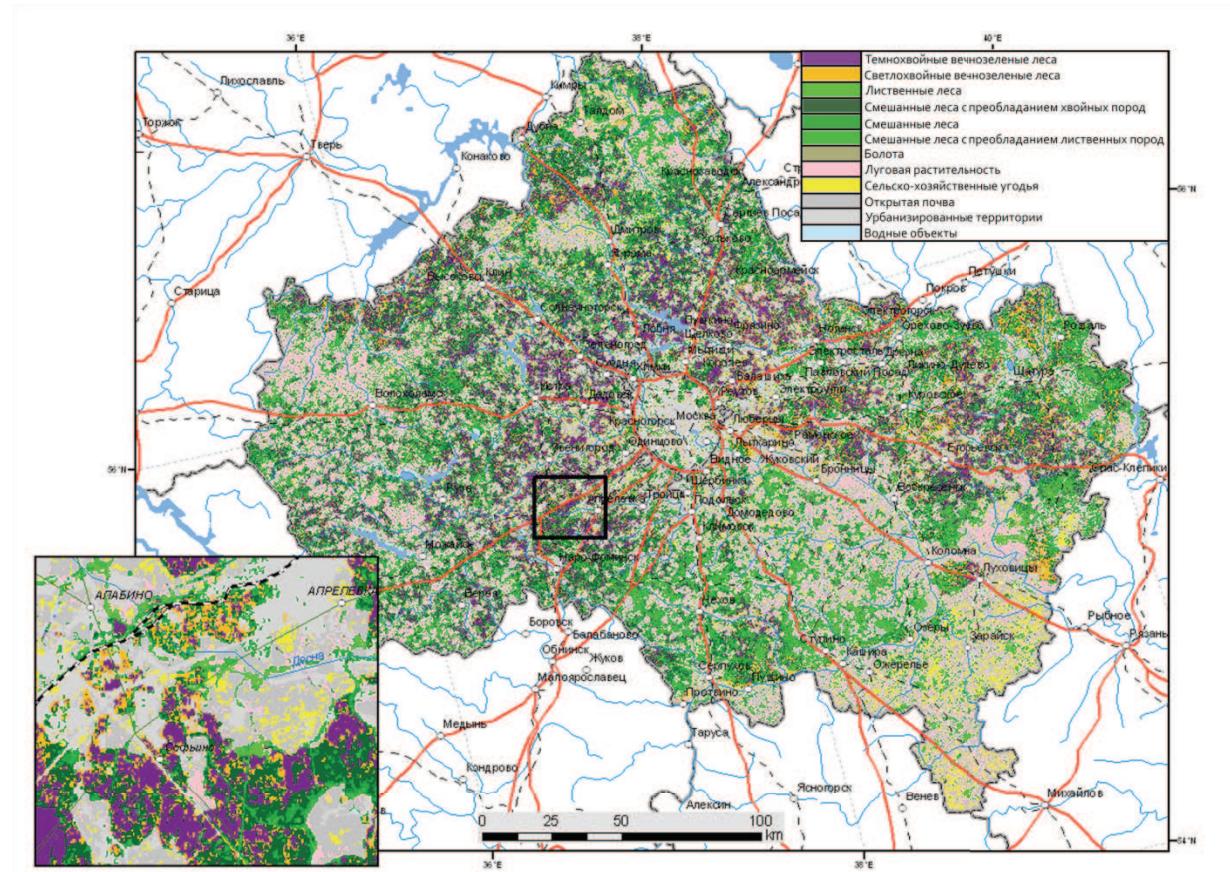


Рис. 5. Карта основных наземных экосистем Московской области по данным космической съемки Landsat-TM (30 м) 2010 года

## Валидация карты наземных экосистем по картам лесоустройства

В качестве первичных данных для проверки точности классификации лесных классов при создании карты Московской области были использованы лесоустроительные планы на различные лесничества субъекта, объединенные в единую растровую карту, по состоянию на начало 2000-х годов. Планы представляют собой карты лесонасаждений, окрашенные по преобладающим породам в принятой для лесоустройства цветовой палитре. Оценка точности проводится по методу случайных контрольных точек, с учетом различий в условных обозначениях на планах и на тематической карте растительности.

Поскольку состав классов легенды лесных планов отличается от состава классов, выделенных на карте наземных экосистем, проверка точности проводилась для следующих классов с определенными условиями:

1. Темнохвойные леса (1 класс) – соответствуют массивам ели на плане;
2. Светлохвойные леса (2) – соответствуют массивам сосны на плане;
3. Смешанные леса с преобладанием хвойных пород (4) – соответствуют массивам ели или сосны на плане;
4. Лиственные леса и смешанные леса с преобладанием лиственных пород (3 и 6) – соответствуют массивам любых лиственных пород на плане.

Проверку точности классификации для других классов по данным планам проводить не представляется возможным.

Анализ точности классификации проводится методом набора случайных контрольных точек в пределах каждого проверяемого класса на карте и сравнения их с планом лесоустройства. Результаты анализа приведены в таблице 1.

*Таблица 1 – Анализ точности классификации основных классов лесов на карте Московской области по сравнению с картой лесоустройства (%)*

Класс на карте	Класс на плане									Итого
	1	2	3	4	6	9	10	11	12	
Темнохвойные (1)	<b>69,34</b>	24,66	3,33	0	0	0	1,33	1,33	0	<b>100</b>
Светлохвойные (2)	9,34	<b>78,00</b>	8,66	0	0	0	0,66	2,00	1,33	<b>100</b>
Лиственные (3)	8,06	1,61	<b>79,04</b>	0	0	1,61	9,68	0	0	<b>100</b>
С преобладанием хвойных (4)	0	0	0	<b>80,00</b>	18,00	0	1,34	0	0,66	<b>100</b>
С преобладанием лиственных (6)	7,96	2,27	0	0	<b>87,50</b>	0	2,27	0	0	<b>100</b>

Анализ значительного числа точек (600 площадок), дает от 70 до 87,5 % совпадений в зависимости от класса, и среднюю точность классификации 77,83% лесных классов. Полученный уровень точности является закономерным при сравнении карты наземных экосистем по спутниковым данным с лесоустроительными планами. Учитывая большую разницу во времени (порядка 10 лет), некоторые несоответствия в классификации, а также определенную условность картографического изображения на планах по сравнению с реальностью, данный результат можно признать удовлетворительным.

## Выводы

- Данные высокого пространственного разрешения LANDSAT являются на данный момент оптимальным и наиболее доступным решением для тематического картографирования наземных экосистем в региональном масштабе.
- Предложенная в данной статье методика позволяет решать одну из главных проблем при использовании данных LANDSAT для тематической классификации – отсутствие однородного и непрерывного ряда разновременных данных в пределах вегетационного сезона на всю территорию картографирования.
- Сочетание методов неконтролируемой и контролируемой классификации представляется наиболее обоснованным и перспективным выбором в плане автоматизации при создании тематических карт наземных экосистем, позволяющие получать на выходе относительно высокие и стабильные показатели точности.

## **Литература**

1. Белова Е.С., Еришов Д.В. Методика создания безоблачных композитных изображений по спутниковым данным Landsat // Восьмая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 15-19 ноября 2010 г. Сборник тезисов конференции.
2. Белова Е.С., Еришов Д.В. Предварительная обработка временных серий изображений Landsat-TM/ETM+ при создании безоблачных изображений местности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 73-82.
3. Руководство пользователя: Erdas Imagine field guide, 2006, 316 с.
4. Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. Т. 8. № 4. С. 285-302.
5. Bartalev S.A., Belward A.S., Erchov D.V., and Isaev A.S. A new SPOT4-VEGETATION derived Land Cover Map of Northern Eurasia // Int. J. Remote Sens., 2002, Reference No: RES 103841 and associated cover (reference RES 107158).
6. Mathie S., Berthod M., Leymarie P. Determination of proportions and entropy of land use mixing in pixels of a multispectral satellite image // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing symposium (IGARSS 94), 1994. Р. 1154 – 1156.
7. Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С. Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исследование Земли из космоса. 1999. № 4. С. 76-86.
8. Landsat Glovis USGS archive [Электронный ресурс]: <http://glovis.usgs.gov/>, режим доступа: свободный.
9. Сервис ВЕГА: спутниковый сервис анализа вегетации [Электронный ресурс]: <http://vega.smislab.ru/>, режим доступа: регистрация.