

## Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гаях Марийского лесного Заволжья

О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов

*Поволжский государственный технологический университет  
Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов  
Йошкар-Ола, 424000, Россия  
E-mail: vorobievon@volgatech.net*

Лесные пожары являются главным фактором нарушения природных экосистем, особенно бореальных лесов. Мониторинг за динамикой восстановления растительного покрова в послепожарный период развития экосистемы является важным элементом при оценке состояния насаждений и проведении лесохозяйственных мероприятий. В работе на примере лесных гарей 2010 г. Куярского лесничества Марийского лесного Заволжья проведена оценка послепожарной динамики классов растительного покрова за 2011–2016 гг. по разновременным спутниковым снимкам Landsat и Канопус-В. Для валидации и оценки точности полученных тематических карт были использованы 80 тестовых участков независимых данных полевых исследований, а также снимки Канопус-В высокого пространственного разрешения. При работе со спутниковыми снимками были использованы вегетационный индекс NDVI и линейное преобразование спутниковых снимков Tasseled Cap. Исследование показало, что в послепожарный период на исследуемой территории максимально представлены тематические классы «Лесовосстановление средней и низкой густоты», составляющие суммарно до 44% от общей площади гари. На гаях 2010 г. наблюдаются процессы активного задернения нарушенных земель (до 20%) многолетними травами, также встречаются сухостои (15%) и открытые участки (10%). Общая точность проведенной неуправляемой классификации составила более 70%, что свидетельствует о высокой степени согласованности данных тематической карты с наземными исследованиями. На исследуемом участке в основном проходит естественное восстановление породного состава, произраставшего на нем до пожара. Лесные плантации занимают всего 2% от общей площади гари. К 2016 году показатели NDVI молодого растительного покрова стали восстанавливаться к значениям допожарного уровня. Результаты исследования могут быть использованы при проведении работ по долгосрочному мониторингу за сукцессией на нарушенных пожарами лесных территориях, а также при разработке плана лесохозяйственных мероприятий по их лесовосстановлению в Марийском Заволжье.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, Landsat, Канопус-В, NDVI, лесные гари, классификация изображений, тематическое картографирование, растительный покров

*Одобрена к печати: 29.03.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97*

### Введение

Лесные пожары являются главным фактором нарушения лесного насаждения, приводящим к серьезным изменениям его структуры и экологического баланса. В связи с этим в современных научных исследованиях большой интерес приобретает характер восстановления нарушенных участков древесной растительностью и динамика ее роста в послепожарный период развития экосистемы. Быстрое развитие спутниковых сенсоров среднего и высокого пространственного разрешения позволяет проводить такую оценку динамики возобновления растительности на лесных гаях (Барталев и др., 2015; Жирин и др., 2013; Лупян и др., 2011).

Архивные изображения с оптических сенсоров системы Landsat, имеющие 40-летнюю историю наблюдений поверхности Земли, представляют собой уникальные данные для проведения исследований по мониторингу за нарушениями и лесовосстановлением на гаях (Schroeder et al., 2012; Терехин, 2013; Барталев и др., 2014; Курбанов и др., 2014). Стоит отметить несколько исследований по оценке возобновления растительности на гаях. Наи-

более используемым показателем при оценке таких процессов является индекс NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index), который показывает высокую связь с наземной биомассой различных экосистем (Hope et al., 2012; Chen et al., 2014; Cuevas-Gonzalez et al., 2009; Елсаков, Телятников, 2013; Ireland, Petropoulos, 2015). Кроме того, при оценке возобновления растительного покрова после пожаров исследователи используют нормализованный индекс гарей (Brewer et al., 2005; Воробьев и др., 2014), выверенный почвенный индекс растительности (Soil-adjusted vegetation indice, SAVI)(Carreiras et al., 2006; Vila, Barbosa, 2010), индекс восстановления (RI, Regeneration index)(Riano et al., 2002; Lhermitte et al., 2011) и трансформацию Tasseled cap («Колпачок с кисточкой») (Song et al., 2007; Liu et al., 2008; Курбанов и др., 2015).

Использование вегетационных индексов в таких исследованиях основано на том, что соотношение красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов электромагнитного спектра для растительности меняется, когда во время пожара происходит уничтожение хлорофилла растительности (Барталев и др., 2010). Соответственно, такие спектральные индексы могут быть использованы при идентификации потенциальных изменений в динамике растительного покрова. Основными недостатками при оценке зарастания растительного покрова на гарях с помощью мультивременных спутниковых изображений являются спектральные шумы, топография местности, а также фенологические и сезонные факторы (Song et al., 2002).

При оценке и моделировании изменений в растительном покрове у исследователей находят широкое применение различные методы управляемой и неуправляемой классификации спутниковых данных: разновременной смешанный спектральный анализ, максимальное правдоподобие и анализ главных компонент (Rasi et al., 2011; Ohmann et al., 2012; Воробьев и др., 2015). Повышению точности картирования пространственно-временной динамики растительного покрова также способствуют многошаговые процедуры обработки разновременных спутниковых снимков (Manandhar et al., 2009). Такие подходы находят удачное применение в комбинировании с вегетационными индексами (NDVI, NPV, PV) (Elmore et al., 2000) и могут быть использованы для оценки динамики нарушений растительного покрова на региональном уровне (Курбанов и др., 2013).

В среднем через три года после пожара задачи лесного хозяйства смещаются от стабилизации состояния гарей к долгосрочной продуктивности и экологическому восстановлению. При этом основные мероприятия направлены на создание условий устойчивости лесных экосистем – восстановление основных лесообразующих пород, сохранение биоразнообразия, повышение биопродуктивности и т.п. Исследование долгосрочной динамики пост-пожарного восстановления лесов позволяет понять, как отдельные породы или вновь созданные плантации реагируют на эти нарушения, а также в какой мере она соответствует прогнозируемым моделям роста. Точная информация о послепожарной динамике восстановления растительного покрова может способствовать работам по выявлению территорий, требующих более интенсивного восстановления или специальных программ по лесовосстановлению, ставящих целью снизить эрозию почв и их заболачивание.

Изучение вышеназванных проблем особенно актуально для Марийского лесного Заволжья, которое за последние десятилетия было неоднократно подвергнуто сильным пожарам (Курбанов и др., 2016), приведшим к усыханию лесов, ветровалам и буреломам. Остаются недостаточно изученными вопросы классификации растительного покрова на зарастающих гарях, взаимосвязи процесса лесовозобновления со степенью их повреждения, а также использования снимков среднего и высокого пространственного разрешения при выполнении подобных исследований. Полученные данные могут быть использованы для выработки эффективных решений при проведении долгосрочного мониторинга за лесовозобновлением на гарях и мероприятий по повышению производительности и устойчивости лесов.

Цель работы – количественная оценка и мониторинг процесса восстановления растительности на гарях 2010 г. на примере Куярского лесничества Марийского лесного Заволжья на основе данных разновременных спутниковых снимков и пространственно-временного анализа ее динамики по вегетационному индексу NDVI.

### Объекты и методика исследований

Объектами исследования явились площади лесных гарей 2010 г. на территории Куярского лесничества в Марийском Заволжье. Площади гарей и степень их повреждения были исследованы нами ранее (Воробьев и др., 2014). Для оценки мониторинга лесовосстановления в исследуемом лесничестве в работе были использованы разновременные сцены спутниковых снимков Landsat и Канопус-В (табл. 1). В 2011–2016 гг. на изучаемой территории заложены 80 тестовых участков, которые были использованы для создания баз данных наземных наблюдений и оценки точности тематического картографирования по спутниковым снимкам. Тестовые участки площадью не менее 0,5 га для валидации тематического картографирования подбирались с таким расчетом, чтобы охватить основные классы наземного покрова, выделяемые на лесных гарях. Местами полевые исследования проводились в труднопроходимых условиях, вызванных наличием сухостоя и валежника на исследуемой территории, что также приводило к дополнительным временным затратам на проведение этих работ.

Таблица 1. Основные характеристики используемых спутниковых снимков

<i>Номер сцены</i>	<i>Покрывтие Path/Row</i>	<i>Покрывтие облаками, %</i>	<i>Дата съемки</i>	<i>Спутник</i>
ID 0101201050742_00050	172/21	0	11.07.2009	Landsat 5
ID 8881107110001_76189	172/21	0	01.07.2011	Landsat 5
ID LC81720212013139LGN01	172/21	0	19.05.2013	Landsat 8 OLI
ID LC81720212016132LGN00	172/21	0	11.05.2016	Landsat 8 OLI
KV1_21158_21149_02_3NP2_08_T_S_411416		0	14.05.2016	Канопус-В
KV1_21158_21149_02_3NP2_08_T_PSS1_500316		0	14.05.2016	Канопус-В

Спутниковые изображения были подобраны таким образом, чтобы избежать значительных фенологических и сезонных различий в структуре растительного покрова. Снимки на территорию исследований прошли атмосферную и геометрическую коррекцию в программном пакете ENVI-5.2 с использованием модуля FLAASH. Для обработки снимков был выбран алгоритм «атмосферная коррекция с постоянными атмосферными условиями» и с частичным устранением эффекта теней. Все разновременные снимки Landsat прошли процедуру линейного преобразования координат пространства спектральных признаков «Tasseled Cap» («Колпачок с кисточкой») (Healey et al., 2005; Курбанов и др., 2015) (рис. 1).

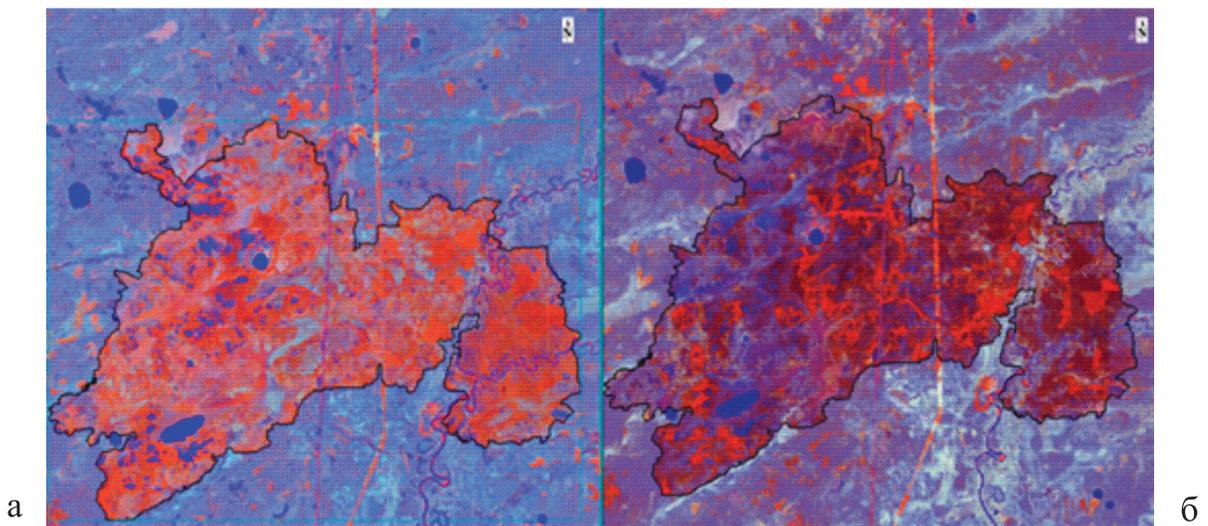


Рис. 1. Изображения гарей Куярского лесничества: а) ВГВ 2016 г.; б) ВГВ 2013 г. (где  $B$ ,  $G$  и  $W$  – компоненты нормализации яркости преобразованного изображения Tasseled Cap «яркость», «зеленость» и «влажность»)

В работе был использован векторный слой участков лесных гарей 2010 г. на территорию Куярского лесничества, полученный нами ранее с использованием Нормализованного индекса гарей (Normalized Burned Index) (Воробьев и др., 2014). Для оценки пространственно-временной структуры послепожарной сукцессии на лесных гарях были выделены 9 классов (страт) наземного покрова, различающихся проективным покрытием, породным составом, задержанием и уровнем увлажнения (табл. 2).

Для выделения классов растительного покрова на исследуемых гарях в каждом из полученных тематических слоев в программном комплексе ENVI-5.2 проводилась пошаговая неуправляемая классификация фрагмента сцены Landsat-8 способом «IsoData» на 20 классов и с режимом операции в 20 итераций. На следующем этапе проводились работы по объединению выделенных 20 тематических классов, сходных по своим спектральным характеристикам, в 9 основных доминирующих классов согласно принятой легенде (табл. 2). Для этого использовались данные полевых исследований и снимки высокого разрешения Канопус-В. Анализ делимости тестовых (эталонных) участков проводился с использованием метода декомпозиции спектральных смесей (Spectral Mixed Analysis) (Елсаков, Марущак, 2011; Zhu, 2005).

Таблица 2. Легенда 9 классов наземного покрова на примере гарей 2010 г. Куярского лесничества

№	<i>Наименование тематического класса</i>	<i>Описание класса</i>	<i>Фото</i>
1	Лесовозобновление высокой плотности (ЛВГ)	Смешанная древесно-кустарниковая растительность с проективным покрытием 85% и выше	
2	Лесовозобновление средней плотности (ЛСГ)	Смешанная древесно-кустарниковая растительность с проективным покрытием от 40% до 80%	
3	Лесовозобновление низкой плотности (ЛНГ)	Древесно-кустарниковая растительность с проективным покрытием менее 40% и частичным задернением, заболоченные и открытые участки	
4	Лес (Л)	Участки сохранившегося древостоя лиственных и хвойных пород деревьев	

Таблица 2. Продолжение

№	Наименование тематического класса	Описание класса	Фото
5	Сухостой (С)	Участки сухостоя различных пород деревьев, оставшихся после пожара 2010 г., частично или полностью задерненные	
6	Задернение (З)	Участки, полностью заросшие многолетними травами	
7	Открытые участки (ОУ)	Выход песчаных почв, а также участки искусственного происхождения (дороги, шоссейные и проселочные)	
8	Лесные посадки (ЛП)	Плантационные насаждения, в основном сосны	
9	Водные объекты (ВО)	Озера, болота	

Описание (легенда) классов наземного покрова было разработано на основании данных полевых исследований и анализа мультиспектрального снимка высокого разрешения российского спутника Канокус-В, пространственное разрешение которого после процедуры Fusion (Pansharpening) составило 2,7 м. Снимки Канокус-В позволили выделить растительный класс «лесные плантации» (рис. 2), который не различался на Landsat, сливаясь с классами «задернение», «открытые участки» и «сухостой».

На начальных стадиях лесовозобновления на исследуемых гарях участвуют до 10 видов древесно-кустарниковых пород, основными из которых являются береза (*Betula pendula*), сосна (*Pinus sylvestris*), ива (*Salix*), ольха серая (*Alnus incana*), осина (*Populus tremula*). В таких смешанных насаждениях главной породой является береза (до 80%), которая в большинстве случаев равномерно распределяется по площади гари.

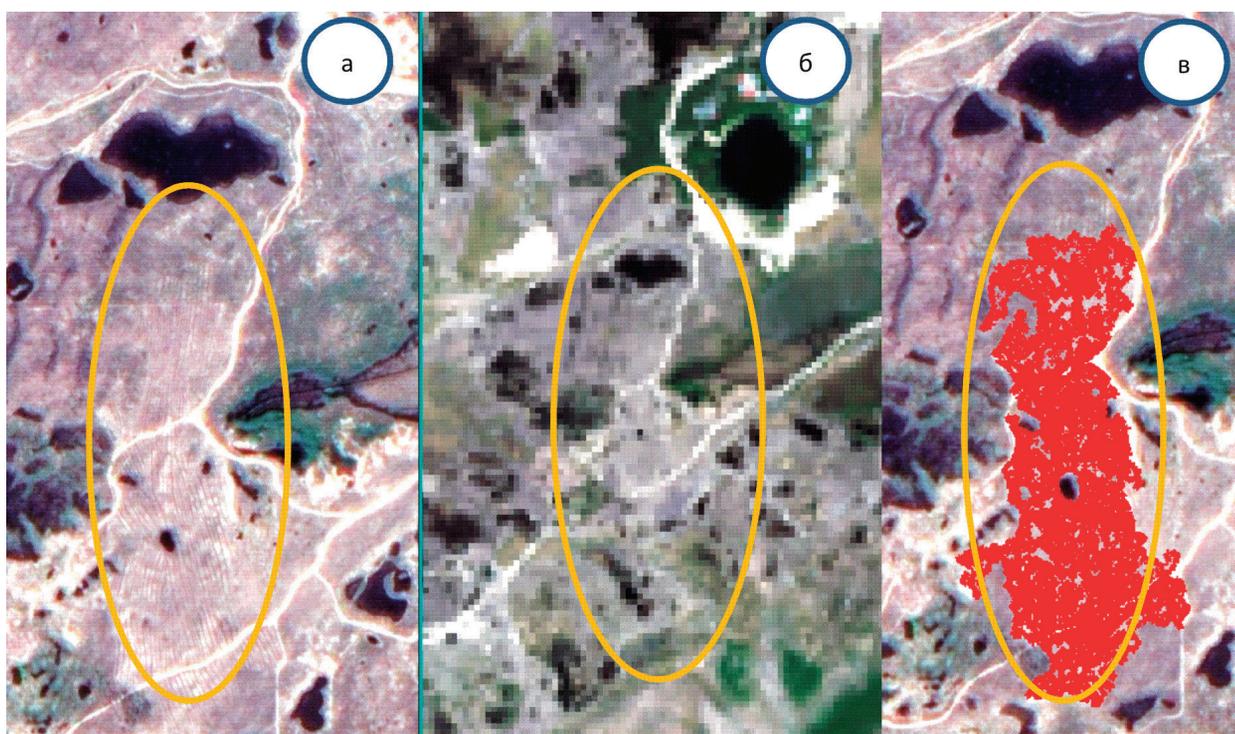


Рис. 2. Дешифрирование лесных плантаций сосны на гарях 2010 г. Куярского лесничества по снимкам: а) Канокус-В, 2016 г.; б) Landsat 8 OLI, 2016 г.; в) выделение тематического класса «ЛП» по результатам классификации снимка Канокус-В

Для количественной оценки динамики возобновления растительного покрова был использован индекс NDVI, который варьируется от -1 до +1. Нулевые и отрицательные значения этого индекса свидетельствуют об отсутствии растительности (Pettorelli et al., 2005), значения NDVI выше 0,1 показывают наличие (возобновление) растительности. Для каждого спутникового изображения также была использована описательная статистика по значениям NDVI, которая наряду с визуализацией была использована для пространственно-временного анализа динамики возобновления растительности на лесных гарях.

## Результаты исследований

Каждое из тематических изображений, полученных для лесной гари 2010 г., представляет собой векторный слой, который позволяет точно оценить площадь любого из 9 классов наземного покрова. Как видно из *табл. 3* и *рис. 3*, на исследуемой территории самыми большими по площади явились классы «лесовосстановление средней густоты» (ЛСГ) и «лесовосстановление низкой густоты» (ЛНГ), составляющие по площади на тематической карте Landsat 2016 г. до 22% от общей территории гари Куярского лесничества. Далее, на тематической карте 2016 г. следуют классы «задернение» (20%), «сухостой» (15%), «открытые участки» (10%) и «лесовосстановление высокой густоты» (7%). Лесные культуры сосны занимают всего 2% от общей территории гари Куярского лесничества. Таким образом, к 2016 году древесная растительность восстановилась только на половине территории гари, входящей в лесной фонд лесничества. Если в центральной и западной ее части процессы естественного зарастания древесной растительностью идут достаточно интенсивно, то в восточной, представленной в основном классами «сухостой», «открытые участки» и «зарастание», для обеспечения положительной динамики лесовосстановления требуется проведение дополнительных лесохозяйственных мероприятий (*рис. 3*).

Таблица 3. Динамика распределения классов наземного покрова на тематической карте гари Куярского лесничества

<i>Классы наземного покрова</i>	<i>2011, га</i>	<i>% от общей площади</i>	<i>2013, га</i>	<i>% от общей площади</i>	<i>2016, га</i>	<i>% от общей площади</i>
ЛВГ	0	0	1691	15	801	7
ЛСГ	0	0	2482	22	2502	22
ЛНГ	0	0	1313	12	2446	22
Л	130	1	190	2	163	1
С	3305	30	1917	17	1643	15
З	3392	30	2307	21	2077	19
ОУ	4072	36	790	7	1078	10
ЛП	0	0	180	2	180	2
ВО	276	2	305	3	286	3
Всего	11175	100	11175	100	11175	100

Оценивая динамику сукцессии на исследуемой лесной гари Куярского лесничества 2010 г., можно сказать, что со времени пожара на ней наблюдаются активные процессы зарастания растительностью различной степени интенсивности, ее агрегации в различные классы и их трансформации друг в друга в процессе развития экосистемы. Процессы сукцессии растительного покрова, выявленные на спутниковых снимках и на тестовых участках, хорошо согласуются с данными распределения NDVI по территории гарей за 2011, 2013 и 2016 года. Как видно из *рис. 4*, после лесных пожаров наблюдается резкое снижение значений NDVI по всей площади гарей до минимальных значений в 2011 г.

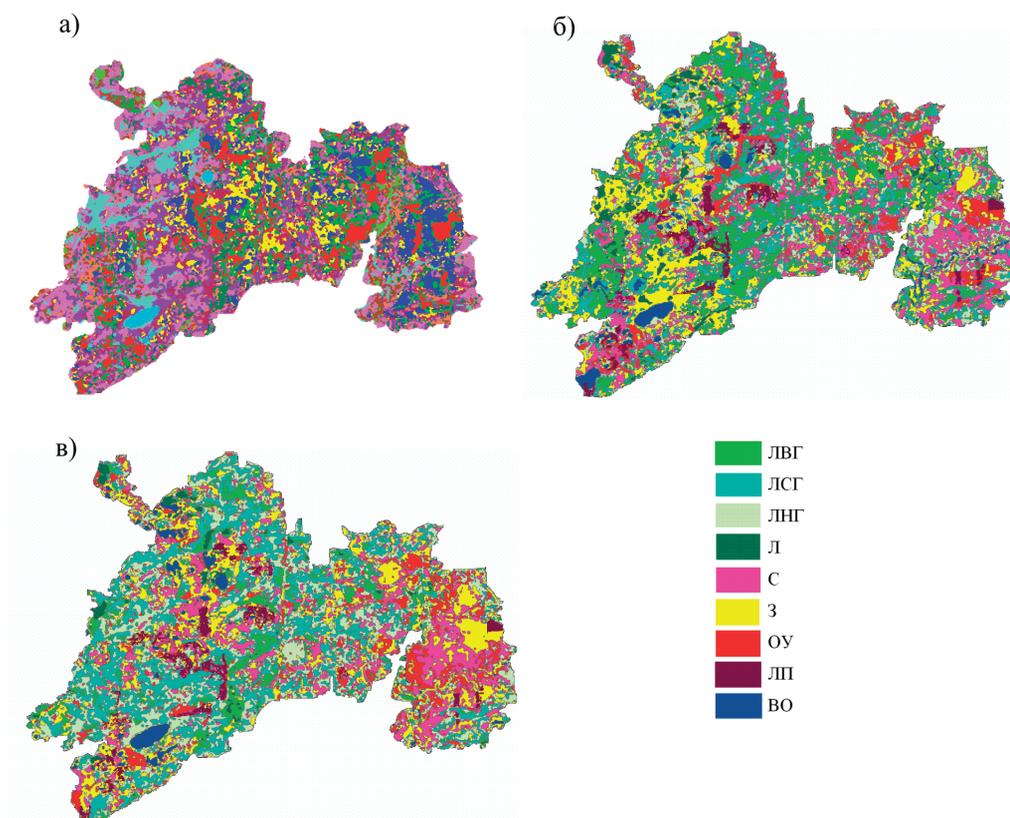


Рис. 3. Тематические карты распределения классов наземного покрова по площади гари Куярского лесничества: а) 2011 г.; б) 2013 г.; в) 2016 г.

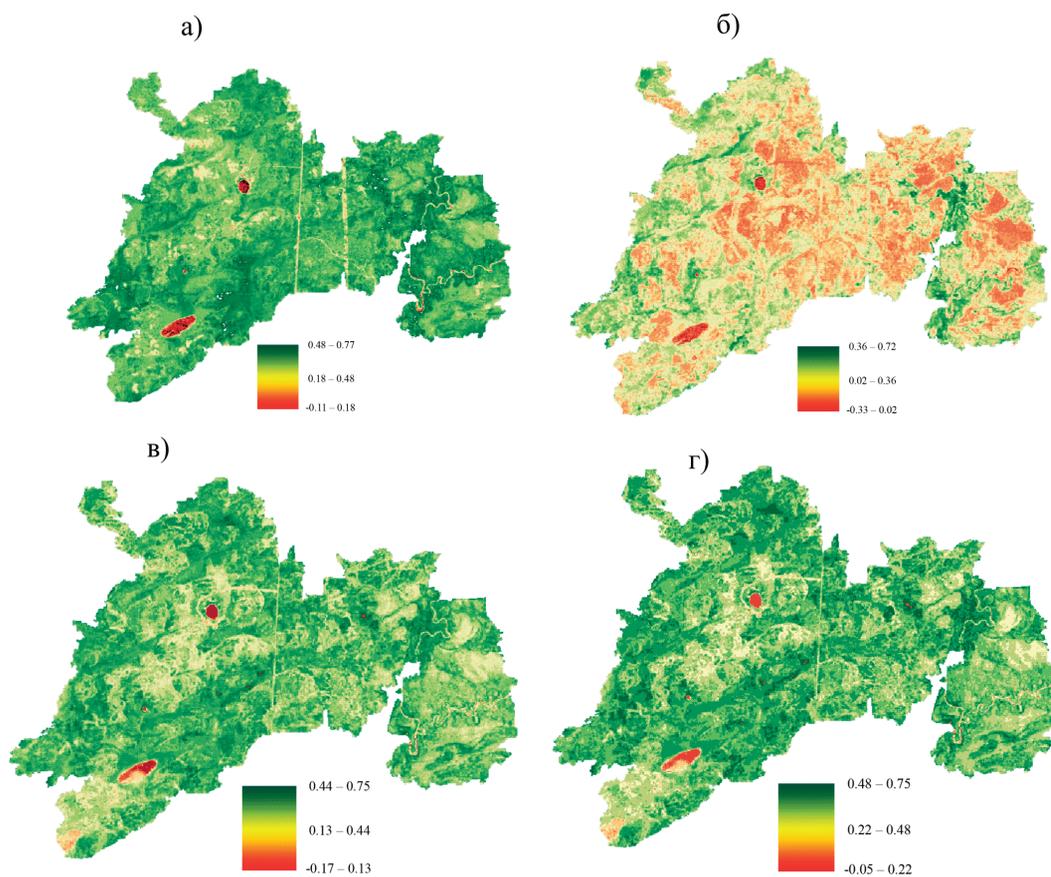


Рис. 4. Карты распределения NDVI на гарях 2010 г. по изображениям Landsat: а) июль 2009 (до пожара); б) июль 2011; в) май 2013; г) май 2016

Между 2013 и 2016 годами наблюдается существенное увеличение прироста фитомассы молодой древесной растительности (рис. 4). При этом происходит естественное восстановление древесных пород (береза, осина, ива), произрастающих на исследуемой территории до пожаров 2010 года.

Полученные с помощью программных пакетов ENVI и ArcMap тематические карты растительного покрова площадей лесных гарей, основанные на спутниковых снимках Landsat, прошли проверку на точность в соответствии с критериями, применяемыми большинством современных ученых, работающих в области геоинформационных систем и дистанционного зондирования. Общая точность классификации в большинстве случаев достигала 0,7 и более, что свидетельствует о высоком соответствии проведенной классификации на снимках полевым (эталонным) данным. Такая точность проведенных натуральных и камеральных исследований позволяет рекомендовать полученные тематические карты лесовозобновления на гарях лесохозяйственному производству Республики Марий Эл. Основная роль спутниковых снимков при таком виде дистанционного мониторинга будет заключаться в выявлении классов растительного покрова, появляющихся на гарях в процессе естественного зарастивания и создания лесных культур, а также определения динамики их биологической продуктивности.

Исследование процессов и мониторинг лесовозобновления на лесных гарях по спутниковым снимкам среднего и высокого разрешения сравнительно немногочисленны для Российской Федерации. Статистически обоснованные классы растительного покрова и закономерности распределения значений NDVI могут дополнить существующие знания при проведении работ по оценке процесса лесовозобновления на гарях методами дистанционного зондирования. Полученные в работе результаты могут иметь важное методическое применение при проведении долгосрочного мониторинга за сукцессией на нарушенных пожарами лесных территориях, а также при принятии практических решений по лесохозяйственным мероприятиям по их лесовосстановлению.

Работа выполнена по проекту № 2394 «Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем» в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации 2014–2016 гг. и программе Жана Монне Erasmus+ Европейского Союза.

## Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лулян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
2. *Барталев С.А., Егоров В.А., Крылов А.М., Стыценок Ф.В., Ховратович Т.С.* Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
3. *Барталев С.А., Лулян Е.А., Стыценок Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю.* Экспресс-картографирование поврежденных лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
4. *Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А., Демешева Е.Н.* Дистанционный мониторинг городских лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2015. № 1 (25). С. 5–21.

5. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А., Демешева Е.Н. Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 217–229.
6. Елсаков В.В., Телятников М.Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
7. Елсаков В.В., Марущак И.О. Спектрально-аналитические спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов приполярного Урала // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 2. С. 281–286.
8. Жирин В.М., Эйлина С.П., Князева С.В. Опыт лесоводственного анализа последствий пожаров по космическим изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 243–259.
9. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А., Губаев А.В., Полевщикова Ю.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. 126 с.
10. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 36–48.
11. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А., Демешева Е.Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2014. № 1 (21). С. 18–32.
12. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Оценка загрязнений древостоями отходами силикатного производства по снимку Rapid Eye // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 88–97.
13. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Бартаев С.А., Толтин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
14. Терехин Э.А. Применение данных спутниковой съемки для анализа многолетних изменений в лесах Белгородской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 70–80.
15. Brewer C.K., Winne J.C., Redmond R.L., Opitz D.W., Mangrich M.V. Classifying and mapping wildfire severity // Photogrammetric engineering and remote sensing. 2005. No. 71 (11). P. 1311–1320.
16. Carreiras J., Pereira J.M.C., Pereira J.S. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing // Forest Ecology and Management. 2006. No. 23. P. 45–53.
17. Chen W., Moriya K., Sakai T., Koyama L., Cao C. Monitoring of post-fire forest recovery under different restoration modes based on time series Landsat data // European Journal of remote Sensing. 2014. No. 47. P. 153–168.
18. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Baltzer H., Riano D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // Global change biology 2009. No. 15 (3). P. 561–577.
19. Elmore A., Mustard J.F., Manning S.J., Lobell D.B. Quantifying vegetation change in semiarid Environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the Normalized Difference Vegetation Index // Remote Sensing of Environment. 2000. No. 73. P. 87–102.
20. Healey S.P., Cohen W.B., Zhiqiang Y., Krankina O.N. Comparison of tasseled cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection // Remote Sensing of Environment. 2005. No. 97. P. 301–310.
21. Hope A., Albers N., Bart R. Characterizing post-fire recovery of fynbos vegetation in the Western Cape Region of South Africa using MODIS data // International Journal of Remote Sensing. 2012. No. 33 (4). P. 979–999.
22. Ireland G., Petropoulos G.P. Exploring the relationships between postfire vegetation regeneration dynamics, topography and burn severity: A case study from the montane cordillera ecozones of western Canada // Applied Geography. 2015. No. 56. P. 232–248.
23. Lhermitte S., Verbesselt J., Verstraeten W.W., Veraverbeke S., Coppin P. Assessing intra-annual vegetation regrowth after fire using the pixel based regeneration index // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. No. 66 (1). P. 17–27.
24. Liu W., Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data // International Journal of Remote Sensing. 2008. No. 29. P. 3855–3872.
25. Manandhar R., Inakwu O.A., Ancev T. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement // Remote Sensing. 2009. Vol. 1. P. 330–344.
26. Ohmann J.L., Gregory M.J., Roberts H.M., Cohen W.B., Kennedy R.E., Yang Z. Mapping change of older forest with nearest-neighbor imputation and Landsat time-series // Forest Ecology and Management. 2012. No. 272. P. 13–25.
27. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // Trends in Ecology and Evolution. 2005. No. 20. P. 503–510.
28. Rasi R., Bodart C., Stibig H.J., Eva H., Beuchle R., Carboni S., Simonetti D., Achard F. An automated approach for segmenting and classifying a large sample of multi-date Landsat imagery for pan-tropical forest monitoring // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. P. 3659–3669.
29. Riano D., Chuvieco E., Ustin S., Zomer R., Dennison P., Roberts D., Salas J. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains // Remote Sensing of Environment. 2002. No. 79. P. 60–71.
30. Schroeder T.A., Wulder M.A., Healey S.P., Moisen G.G. Detecting post-fire salvage logging from Landsat change maps and national fire survey data // Remote Sensing of Environment. 2012. No. 122. P. 166–174.
31. Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery // Remote Sensing of Environment. 2007. No. 106. P. 228–237.

32. Song C., Woodcock C.E., Li X. The spectral/temporal manifestation of forest succession in optical imagery: The potential of multitemporal imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2002. No. 82 (2). P. 285–302.
33. Vila G., Barbosa P. Post-fire vegetation regrowth detection in the Deiva Marina region (Liguria-Italy) using Landsat TM and ETM+ data // *Ecological Modelling*. 2010. No. 221 (1). P. 75–84.
34. Zhu H.L. Linear spectral unmixing assisted by probability guided and minimum residual exhaustive search for subpixel classification // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. No. 26 (24). P. 5585–5601.

## Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests

O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov

*Volga State University of Technology, Center of Sustainable Forest Management  
and Remote Sensing, Yoshkar-Ola 424000, Russia  
E-mail: vorobievon@volgatech.net*

Forest fires are the main disturbance factor for natural ecosystems, especially in boreal forests. Monitoring of the regeneration dynamics of vegetation cover in the post-fire period of ecosystem recovery is crucial for both estimation of forest stands and forest management. In this study, on the example of burnt areas of 2010 wildfires in Kuyarski forest district of Mari Zavolzhje forests we estimated the post-fire dynamics of different classes of vegetation cover between 2011–2016 years by use of Landsat and Canopus-B time series satellite images. To validate the newly obtained thematic maps we used 80 test sites with independent field data, as well as Canopus-B high spatial resolution images. For the analysis of the satellite images we referred to Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) and Tasseled Cap transformation. The research revealed that in the post-fire period, the area of thematic classes “Reforestation of the middle and low density” has maximum cover (44%) on the investigated burnt area. On the burnt areas of 2010, there is an active ongoing process of grass overgrowing (up to 20%), also there are thematic classes of deadwood (15%) and open spaces (10%). The overall unsupervised classification accuracy is more than 70% which shows high degree of consistency between the thematic map and the ground truth data. The results indicate that there is mostly natural regeneration of tree species pattern corresponding to the pre-fire condition. Forest plantations cover only 2% of the overall burnt area. By 2016, the NDVI parameters of young vegetation cover had recovered to the pre-fire level as well. The research results can be employed in long-term succession monitoring on the lands disturbed by fire and management plan development for the reforestation activities in Mari Zavolzhje.

**Keywords:** remote sensing, Landsat, Canopus-B, NDVI, forest burnt areas, image classification, thematic mapping, vegetation cover

*Accepted: 29.03.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-84-97*

### References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova Rossii (Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Krylov A.M., Stytsenko F.V., Khovratovich T.S., Issledovanie vozmozhnosti otsenki sostoyaniya povrezhdennykh pozharami lesov po dannym mnogosppektral'nykh sputnikovykh izmerenii (The evaluation of possibilities to assess forest burnt severity using multi-spectral satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 215–225.
3. Bartalev S.A., Loupian E.A., Stytsenko F.V., Panova O.Yu., Efremov V.Yu., Ekspres-kartografirovaniye povrezhdenii lesov Rossii pozharami po sputnikovym dannym Landsat (Rapid mapping of forest burnt areas over Russia using Landsat data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 9–20.
4. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Distantstionnyi monitoring gorodskikh lesov (Remote sensing monitoring of urban forests), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"*, 2015, No. 1 (25), pp. 5–21.

5. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Metodika vyyavleniya stepeni povrezhdeniya drevostoev posle pozharov 2010 goda v Srednem Povolzh'e (The method of identifying the measure of severity of disturbed forest stands after wild fires of 2010 in Middle Povolzhje), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 217–229.
6. Elsakov V.V., Telyatnikov M.Yu., Mezhdogodovye izmeneniya indeksa NDVI na territorii evropeiskogo severovostoka Rossii i zapadnoi Sibiri v usloviyakh klimaticheskikh fluktuatsii poslednikh desyatiletii (Effects of interannual climatic fluctuations of the last decade on NDVI in north-eastern European Russia and Western Siberia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 260–271.
7. Elsakov V.V., Marushchak I.O., Spektrozonal'nye sputnikovye izobrazheniya v vyyavlenii trendov klimaticheskikh izmenenii lesnykh fitotsenozov zapadnykh sklonov pripolyarnogo Urala (Spectrazonal satellite images in estimation of climatic trends of forest vegetation on west slopes of subpolar Ural), *Komp'yuternaya optika*, 2011, Vol. 35, No. 2, pp. 281–286.
8. Zhirin V.M., Eidlina S.P., Knyazeva S.V., Opyt lesovodstvennogo analiza posledstviy pozharov po kosmicheskim izobrazheniyam (Silvicultural analysis of the fires effects on the base of space images), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 243–259.
9. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A., *Tematicheskoe kartirovanie rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snirkam: validatsiya i otsenka tochnosti* (Thematic mapping of vegetation cover by satellite images: validation and accuracy assessment), Ioshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet, 2015, 126 p.
10. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Otsenka tochnosti i sopsostavimosti tematicheskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya (Assessment of accuracy and comparability of forest cover thematic maps of different spatial resolution by example of Middle Povolzhje), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 36–48.
11. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Chetyre desyatiletiiya issledovaniy lesov po snirkam Landsat (Four decades of forest research with the use of Landsat images), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"*, 2014, No. 1 (21), pp. 18–32.
12. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Otsenka zagryaznenii drevostoyami otkhodami silikatnogo proizvodstva po snimku Rapid Eye (Estimation of forest contamination by the waste of silicate production on RapidEye image), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 88–97.
13. Loupian E.A., Savin I.Ju., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E., Sputnikovyy servis monitoringa sostojaniya rastitel'nosti ("Vega") (Satellite monitoring service of the vegetation cover condition ("Vega")), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
14. Terekhin E.A., Primenenie dannykh sputnikovoi s'emki dlya analiza mnogoletnikh izmenenii v lesakh Belgorodskoi oblasti (Using remote sensing data for the analysis of long-term changes in the forests of the Belgorod region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 70–80.
15. Brewer C.K., Winne J.C., Redmond R.L., Opitz D.W., Mangrich M.V., Classifying and mapping wildfire severity, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2005, No. 71 (11), pp. 1311–1320.
16. Carreiras J., Pereira J.M.C., Pereira J.S., Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing, *Forest Ecology and Management*, 2006, No. 23, pp. 45–53.
17. Chen W., Moriya K., Sakai T., Koyama L., Cao C., Monitoring of post-fire forest recovery under different restoration modes based on time series Landsat data, *European Journal of Remote Sensing*, 2014, No. 47, pp. 153–168.
18. Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Baltzer H., Riano D., Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices, *Global change biology* 2009, No. 15 (3), pp. 561–577.
19. Elmore A., Mustard J.F., Manning S.J., Lobell D.B., Quantifying vegetation change in semiarid Environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the Normalized Difference Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 2000, No. 73, pp. 87–102.
20. Healey S.P., Cohen W.B., Zhiqiang Y., Krankina O.N., Comparison of tasseled cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection, *Remote Sensing of Environment*, 2005, No. 97, pp. 301–310.
21. Hope A., Albers N., Bart R., Characterizing post-fire recovery of fynbos vegetation in the Western Cape Region of South Africa using MODIS data, *International Journal of Remote Sensing*, 2012, No. 33 (4), pp. 979–999.
22. Ireland G., Petropoulos G.P., Exploring the relationships between postfire vegetation regeneration dynamics, topography and burn severity: A case study from the montane cordillera ecozones of western Canada, *Applied Geography*, 2015, No. 56, pp. 232–248.
23. Lhermitte S., Verbesselt J., Verstraeten W.W., Veraverbeke S., Coppin P., Assessing intra-annual vegetation regrowth after fire using the pixel based regeneration index, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, No. 66 (1), pp. 17–27.
24. Liu W., Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B., Predicting forest successional stages using multitemporal Landsat imagery with forest inventory and analysis data, *International Journal of Remote Sensing*, 2008, No. 29, pp. 3855–3872.
25. Manandhar R., Inakwu O.A., Ancev T., Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement, *Remote Sensing*, 2009, Vol. 1, pp. 330–344.
26. Ohmann J.L., Gregory M.J., Roberts H.M., Cohen W.B., Kennedy R.E., Yang Z., Mapping change of older forest with nearest-neighbor imputation and Landsat time-series, *Forest Ecology and Management*, 2012, No. 272, pp. 13–25.
27. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C., Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, No. 20, pp. 503–510.

28. Rasi R., Bodart C., Stibig H.J., Eva H., Beuchle R., Carboni S., Simonetti D., Achard F., An automated approach for segmenting and classifying a large sample of multi-date Landsat imagery for pan-tropical forest monitoring, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 3659–3669.
29. Riano D., Chuvieco E., Ustin S., Zomer R., Dennison P., Roberts D., Salas J., Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains, *Remote Sensing of Environment*, 2002, No. 79, pp. 60–71.
30. Schroeder T.A., Wulder M.A., Healey S.P., Moisen G.G., Detecting post-fire salvage logging from Landsat change maps and national fire survey data, *Remote Sensing of Environment*, 2012, No. 122, pp. 166–174.
31. Song C., Schroeder, T.A., Cohen W.B., Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2007, No. 106, pp. 228–237.
32. Song C., Woodcock C.E., Li X., The spectral/temporal manifestation of forest succession in optical imagery: The potential of multitemporal imagery, *Remote sensing of environment*, 2002, No. 82 (2), pp. 285–302.
33. Vila G., Barbosa P., Post-fire vegetation regrowth detection in the Deiva Marina region (Liguria-Italy) using Landsat TM and ETM+ data, *Ecological Modelling*, 2010, No. 221 (1), pp. 75–84.
34. Zhu H.L., Linear spectral unmixing assisted by probability guided and minimum residual exhaustive search for subpixel classification, *International Journal of Remote Sensing*, 2005, No. 26 (24), pp. 5585–5601.