Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 70–80

Применение данных спутниковой съемки для анализа многолетних изменений в лесах Белгородской области

Э.А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Федерально-региональный центр аэрокосмического
и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов
308015 Белгород, ул. Победы, 85
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

На основе анализа и обработки спутниковых данных Landsat TM исследованы изменения в состоянии лиственных и хвойных лесов Белгородской области, произошедшие в период с 1986 по 2011 гг. Установлено соотношение между антропогенными и природными изменениями, происходящими в лесах, и динамикой спектральных яркостей среднего инфракрасного диапазона. Выявленное соотношение позволило с высокой степенью точности выполнить анализ сплошнолесосечных рубок, очагов гибели древостоев и обнаружение новых лесопосадок на территории Белгородской области.

Ключевые слова: изменения в лесах, снимки Landsat TM, средний инфракрасный диапазон, сплошнолесосечные рубки, Белгородская область.

Введение

Автоматизированное обнаружение происходящих в лесах изменений является одним из ключевых направлений совершенствования системы лесного мониторинга и повышения его эффективности. Данные спутниковых наблюдений благодаря одномоментному охвату значительных территорий и наличию различных спектральных диапазонов являются эффективным средством контроля изменений в лесах. Однако применение космических снимков для автоматизированного поиска изменений требует анализа динамики спектрального отклика лесных массивов в зависимости от типа изменений, изучения особенностей спектральных свойств различных типов лесных насаждений. В настоящее время значительная часть исследований в данной отрасли направлена на решение этих проблем (Жирин, 2004; Барталев, 2005; Пономарёв, 2010; Кардаков, 2013). Материалы спутниковых съемок в настоящее время достаточно активно применяются для выявления изменений на глобальном уровне и уровне крупных регионов (Исаев, 2003; Флитман, 2011). Значительный интерес представляет дистанционный контроль незаконных рубок в лесах, для которого уже разработаны научные основы (Сухих, 2006). При этом с точки зрения лесного хозяйства и лесопользователей особую актуальность представляет высокоточный контроль изменений, происходящих в лесах на уровне кварталов и таксационных выделов, который наряду со спутниковыми данными требует также применения геоинформационных технологий (Синкевич, 2009; Терехин, 2012а).

В Белгородской области, лесные массивы которой в подавляющем большинстве представлены нагорными дубравами и сосновыми лесными насаждениями, с 1991 г. рубки главного пользования не ведутся, так как все леса отнесены к первой группе (защитные и водоохранные лесные массивы). Территория региона практически полностью расположена в зоне лесостепи, и лесистость в настоящее время составляет 8,3%.

Леса региона играют значительную экологическую роль, и контроль их состояния и изменений, происходящих в них, очень актуален. В настоящей работе предложен новый подход, позволяющий с высокой точностью идентифицировать изменения, происходящие в лесах, на детальном уровне. На его основе проведена оценка изменений, произошедших в лесах Белгородской области в период с 1986 по 2011 гг., связанных со сплошнолесосечными рубками, пожарами, усыханиями древостоев.

Материалы и методика исследования

Исследование изменений в состоянии лесных массивов Белгородской области за 25-летний период требовало создания покрытия спутниковых снимков на ее территорию за 1986 и 2011 гг. и разработки методики автоматизированного выявления изменений в лесах на основе динамики их спектральных признаков.

Для оценки изменений в лесах на уровне кварталов или выделов насаждений необходим подбор спутниковых данных, имеющих достаточное пространственное разрешение и спектральные каналы. Снимки Landsat TM, имеющие пространственное разрешение 30 м/пиксель, вполне удовлетворяют требованиям исследований; кроме того, значительный архив указанных спутниковых данных позволяет создать полное покрытие многих регионов, в том числе и региона исследования за максимально удаленные друг от друга сроки.

Территория Белгородской области покрывается космическими снимками Landsat-5 из четырех спутниковых сцен, которые в мировой системе снимков Landsat 4, 5, 7 (WRS-2) обозначаются номерами 178025, 177025, 176025 и 177024, соответственно. При создании покрытия снимков на территорию области с учетом задачи анализа многолетних изменений на основе динамики значений спектральных признаков лесов были установлены дополнительные требования к материалам спутниковых съемок.

1. Снимки разных лет должны быть получены на максимально близкие друг к другу сезонные сроки, желательно на период активной вегетации.
2. Все снимки должны быть получены с одного сенсора и пройти предварительную радиометрическую корректировку.

С учетом перечисленных требований была выполнена подборка снимков со спутника Landsat-5, характеристики которых представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. Покрытие Белгородской области снимками Landsat-5

Координаты снимков в системе WRS-2		***Покрытие области снимками 1986 г.***	***Покрытие области снимками 2011 г.***
Path	Row	Дата съемки	
177	25	13.06.1986	2.06.2011
177	24	13.06.1986	2.06.2011
176	25	22.06.1986	8.06.2011
178	25	7.08.1986	28.08.2011

Теоретической основой исследования является отражение изменений, происходящих в лесах в их спектральных свойствах. Необходимо отметить, что не все спектральные диапазоны достаточно информативны для анализа изменений. Исследование информативности спектральных каналов Landsat TM показало, что наиболее эффективным для оценки возраста, высоты насаждений и их динамики является 5-й канал снимка, охватывающий средний инфракрасный диапазон (1,55–1,75 мкм) (Терехин, 2012б). Соответственно, динамика его значений была положена в основу выявления изменений. В то же время необходимо количественно оценить соответствие динамики значений 5-го канала типам и масштабам, происходящим в лесах изменений.

Одним из элементов, повышающих эффективность исследования спектральных свойств по космическим снимкам, является применение растровых или векторных масок конкретного типа объектов для исключения из анализа спектральных признаков остальных типов объектов. Установлено, что спектральные свойства лесных массивов близки к отражательным свойствам крупных садовых участков, некоторым видам густой травянистой растительности (Терехин, 2010). Так как объектами настоящего исследования являются леса, то целесообразно исключить из анализа спектральные свойства всех остальных объектов, представленных на территории. Для этой цели была создана векторная карта лесопокрытых земель Белгородской области в масштабе 1 : 50 000. Карта включала исключительно внешние контуры лесных массивов без уточнения их внутренней структуры, в которых на протяжении исследуемого периода происходили изменения. При подготовке карты исходили из того, что за период с 1986 по 2011 гг. внешние контуры лесов поменялись несущественно. Принципиальные изменения произошли внутри самих лесных массивов. Создание карты требовало специальной подборки спутниковых данных на ее территорию. Карта была создана на основе комбинированного использования данных Landsat TM, ETM+ следующим образом.

1. Руководствуясь принципом использования спутниковых данных наиболее высокого пространственного разрешения, сделали подборку из снимков Landsat ETM+ за летний период (август) 2002 г. из всех зон Landsat, покрывающих территорию Белгородской области. Более поздние снимки ETM+ использовать не представлялось возможным по причине потери около 18% данных во всех изображениях, полученных данным сенсором после мая 2003 г. (Wulder, 2008).
2. С помощью процедуры улучшения пространственного разрешения, реализуемого в программе ERDAS IMAGINE, повысили до 15 м/пиксель разрешение зональных каналов снимка.
3. По полученным изображениям выполнили визуальное дешифрирование лесопокрытых земель Белгородской области и на его основе подготовили карту лесопокрытых земель области в масштабе 1 : 50 000 по состоянию на 2002 г.
4. Создали подборку снимков Landsat TM на территорию области по состоянию на 1986 г. и по ней провели уточнение контуров лесных массивов. Таким образом была получена электронная карта лесопокрытых земель Белгородской области на сроки, с которых была начата оценка изменений (*рис. 1*). Карта включала в себя разделение лесных массивов по породному составу (на лиственные и хвойные).

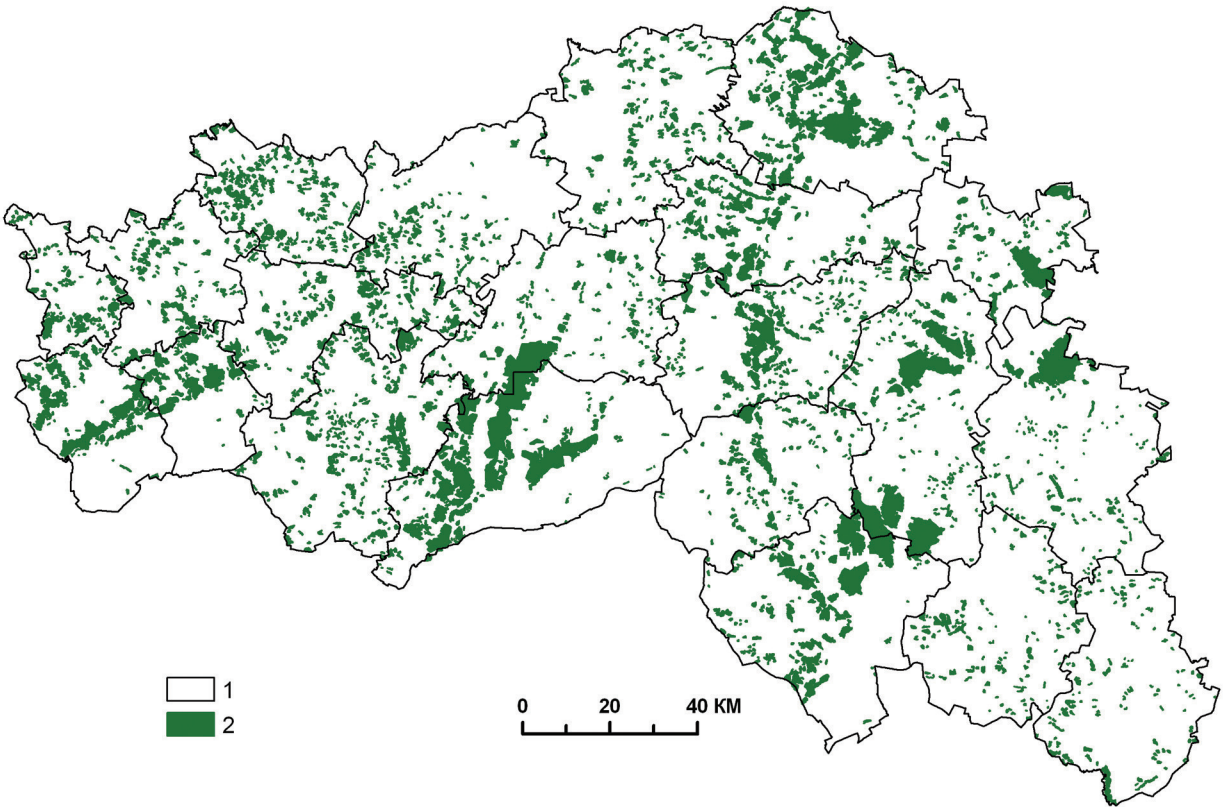

Рис. 1. Карта лесопокрытых земель Белгородской области, созданная путем дешифрирования снимков Landsat-5, 7. 1 – граница Белгородской области и административных районов; 2 – лесопокрытые земли

Трудоемкость ее создания оправдана тем, что карта такого типа подготавливается один раз и на длительное время, так как ее обновление значительно менее проблематично. Полученную карту можно применять для геоинформационного анализа структуры лесопокрытых земель, эффективной оценки спектральных свойств конкретных лесных массивов и их динамики автоматизированным способом. Кроме того, полученная карта позволила выполнить автоматизированную оценку соотношения лесных массивов Белгородской области, различных по площади. В частности, установлено, что на территории Белгородской области лиственные лесные массивы, площадью до 50 га составляют 78% общего числа лиственных лесопокрытых участков, а сосновые насаждения площадью менее 50 га составляют 66,5% числа сосновых лесных участков, т.е. на территории региона значительно распространены небольшие по площади лесные массивы. Картографирование лесопокрытых земель позволило выявить участки смешанных лесных массивов в Борисовском, Грайворонском и Старооскольском районах, однако площадь этих лесов незначительна.

Однако электронной карты лесопокрытых земель недостаточно для детального анализа динамики спектрального отклика отдельных лесных массивов. Обусловлено это тем, что при оценке спектрального отклика лесного участка значения спектра в нем усредняются, в результате чего спектральные изменения, связанные, например, с небольшими рубками, будут нивелироваться спектральным откликом соседних участков. Идеальным вариантом для решения указанной проблемы является применение векторной

карты лесоустройства, на которой обозначены границы всех кварталов и выделов лесных массивов. В таком случае спектральные характеристики усреднялись бы внутри таксационных выделов, максимально обеспечивая возможную точность оценки спектральных характеристик отдельных выделов. Однако в настоящее время такие карты в электронном варианте отсутствуют, а их создание на всю территорию Белгородской области очень трудоемко и требует значительных временных и материальных затрат. В связи с этим было предложено решение этой проблемы путем создания аналога векторной карты лесоустройства. Оно заключалось в автоматизированном разбиении векторной карты лесопокрытых земель Белгородской области (в геоинформационной системе ArcGIS) на сеть прямоугольных участков (ячеек) равной площади, размер которых был приблизительно равен наиболее распространенному размеру таксационных выделов лесов области (4–6,5 га). Так как лесные массивы имеют сложную форму, то на прямоугольные ячейки были разбиты только их центральные части; краевые, соответственно, имели более сложную форму и были меньше по площади. Проверка полученной сети ячеек показала, что все ячейки площадью менее 0,3 га не позволяют достоверно оценивать их спектральный отклик. С учетом того, что площадь таких ячеек крайне незначительна, они были исключены из анализа. Наложение полученной сети ячеек на снимки и анализ размеров выделов показали, что размер ячеек оптимален для точного анализа спектрального отклика лесных массивов, так как подавляющее большинство ячеек меньше размеров лесотаксационных выделов. Таким образом, была получена возможность детальной оценки изменения спектрального отклика лесных участков, так как, несмотря на то что полученная сеть ячеек не является реальной картой лесоустройства, она позволяет выявлять изменения спектральных признаков внутри небольших по площади участков и автоматически наносить их на карту.

Для повышения скорости выполняемых расчетов территория Белгородской области была разделена на группы административных районов, покрывающихся различными сценами Landsat-5, создание сети участков и анализ спектральных характеристик проводились в пределах каждой группы районов. Административное деление Белгородской области (совпадающее с границами лесничеств) было положено в основу проведения расчетов в связи с тем, что полученную информацию в дальнейшем будет более удобно использовать для практических целей лесопользования, учета изменений в лесах, сопоставления с данными официальной статистики. Административные районы Белгородской области были сгруппированы в четыре группы, максимально соответствующие спутниковым сценам Landsat-5. Технология оценки спектральных характеристик заключалась в извлечении из снимка значений среднего инфракрасного диапазона для каждой ячейки векторной сети по снимкам 1986 и 2011 гг., получении разности значений среднего инфракрасного канала за 1986 и 2011 гг. После этого производилось установление соотношения между типами изменений в лесах и динамикой значений среднего инфракрасного диапазона, картографировании изменений на территории Белгородской области и проверка точности полученных результатов. Принципиальная схема исследования в упрощенном варианте показывает основные стадии выполненных работ (*рис. 2*).

Рис. 2. Схема исследования изменений в лесах Белгородской области за период с 1986 по 2011 гг.

В приведенной схеме зональная статистика значений среднего инфракрасного диапазона была рассчитана на основе снимков Landsat TM 1986 и 2011 гг. Итоговой стадией данной схемы является выявления ареалов различных типов изменений, происходящих в лесах, оценка их площади и точности определения.

Результаты и их обсуждение

Изучение связи между происходящими в лесах Белгородской области изменениями и соответствующей динамикой среднего инфракрасного диапазона позволило установить соотношение, позволяющие автоматизированно картографировать вновь появившиеся сплошнолесосечные рубки, имеющиеся зарастающие рубки, очаги гибели лесных массивов и участки леса без существенных изменений. Типы изменений выявлялись путем визуального дешифрирования снимков и оценки состояния лесов в процессе наземных наблюдений на ряде участков Борисовского, Шебекинского, Старооскольского и Чернянского районов. Установление соотношения между происходящими в лесах изменениями и соответствующей им динамикой спектра среднего инфракрасного диапазона проводилось путем анализа на снимках структуры лесопокрытых земель и определения диапазона динамики значений, соответствующих каждому типу изменений, которые подробно расписаны в *табл. 2* и *3*.

Анализ был выполнен отдельно для сосновых и лиственных лесов (с помощью созданной карты лесопокрытых земель), что обусловлено существенными отличиями спектрального отклика разнопородных лесных насаждений и практическими соображениями, так как сточки зрения лесопользования удобнее отдельно характеризировать лиственные и сосновые леса. В таблицах указано число участков (ячеек) сгенерированной сети, соответствующих различным типам изменений в лесах.

Таблица 2. Соотношение между типами изменений
и динамикой значений среднего инфракрасного диапазона
(разница между начальной и конечной датами)
для хвойных лесов

Диапазон изменения значений	***Тип изменений***	***Число участков***	***Площадь, га***	***%***
[– 100–20]	Практически полное сведение лесных массивов, значительное изреживание и ухудшение состояния древостоя	780	2 676,5	11,2
(– 20–10]	Менее значительное изреживание древостоя	1436	5 513,5	23,0
(– 10–3]	Без существенных изменений	3514	11 574,0	48,2
(3–11]	Незначительное увеличение сомкнутости	942	2 383,3	9,9
(11–66]	Значительное увеличение сомкнутости и полное зарастание лесом	837	1 850,3	7,7
Всего		7509	23 997,6	100

* [ ] – включая, ( ) – не включая.

Сосновые леса Белгородской области в подавляющем большинстве имеют искусственное происхождение и по площади значительно уступают лиственным насаждениям. Участки, на которых произошло полное сведение сосновых лесов, в наибольшей степени распространены в Белгородском и Старооскольском административных районах. Кроме того, выявлено, что сосновые насаждения Старооскольского района в наибольшей степени пострадали от пожаров 2010 г. В значительном количестве участков сосновых насаждений произошло существенное изреживание древостоев, что нашло четкое отражение в спектральном отклике. В то же время установлено, что за анализируемый период вследствие лесопосадок произошло появление новых сосновых насаждений на территориях, где до этого лес отсутствовал. На многих участках произошло увеличение сомкнутости сосновых насаждений. Однако суммарная площадь таких участков меньше площади, на которой выявлено исчезновение или сильное ухудшение состояния сосновых лесов. На почти половине площадей сосновых лесов (48,2%) существенных изменений не обнаружено.

Для лиственных лесов характерно менее достоверное отражение происходящих изменений в спектральном отклике. Все типы изменений в лиственных лесах менее четко проявляются в динамике спектра по сравнению с хвойными лесами. Тем не менее, удалось установить соотношение, которое позволило выполнить автоматизированное картографирование динамики структуры лесопокрытых земель (*табл. 3*).

Таблица 3. Соотношение между типами изменений
и динамикой значений среднего инфракрасного диапазона
(разница между начальной и конечной датой)
для лиственных лесов

Диапазон изменения значений	***Тип изменений***	***Число участков***	***Площадь, га***	***%***
[– 53–37]	Отсутствие физического смысла, обусловленное влиянием облаков, теней	24	42,5	0,02
(– 37–15]	Новые сплошнолесосечные рубки	862	2 630,9	1,25
(– 15–3]	Без существенных изменений	25 044	111 745,8	53,05
(– 3–3]	Зарастающие рубки прошлых лет	18 535	66 304,5	31,48
(3–27]	Зарастание лесом безлесных участков и зарастающие недавние вырубки	11 795	29 488,9	14,00
(27–134]	Отсутствие физического смысла, обусловленное влиянием облаков, теней	210	416,3	0,20
Всего		56 470	210 628,9	100

* [ ] – включая, ( ) – не включая.

Из *табл. 3* можно сделать вывод, что интенсивность сплошнолесосечных рубок значительно снизилась за период после 1986 г. На это указывает то, что зарастающие вырубки прошлых лет (до 1986 г.) составляют 31,5%. При этом новые сплошнолесосечные рубки проводились только на 1,25% лиственных лесов. Для 53% лиственных лесов существенных изменений не обнаружено. Вследствие наличия облачности на снимках на 0,22% лесопокрытых земель не удалось оценить происходящие изменения. На *рис. 3* показан фрагмент космического снимка на Старооскольский район, демонстрирующий применение предложенного способа картографирования изменений в лесах.

На *рис. 3* приведен пример картографирования только исчезнувших насаждений. Следует отметить, что на фрагменте снимка наблюдаются также участки, заросшие лесом после 1986 г. Результат их картографирования на рисунке не отображен.

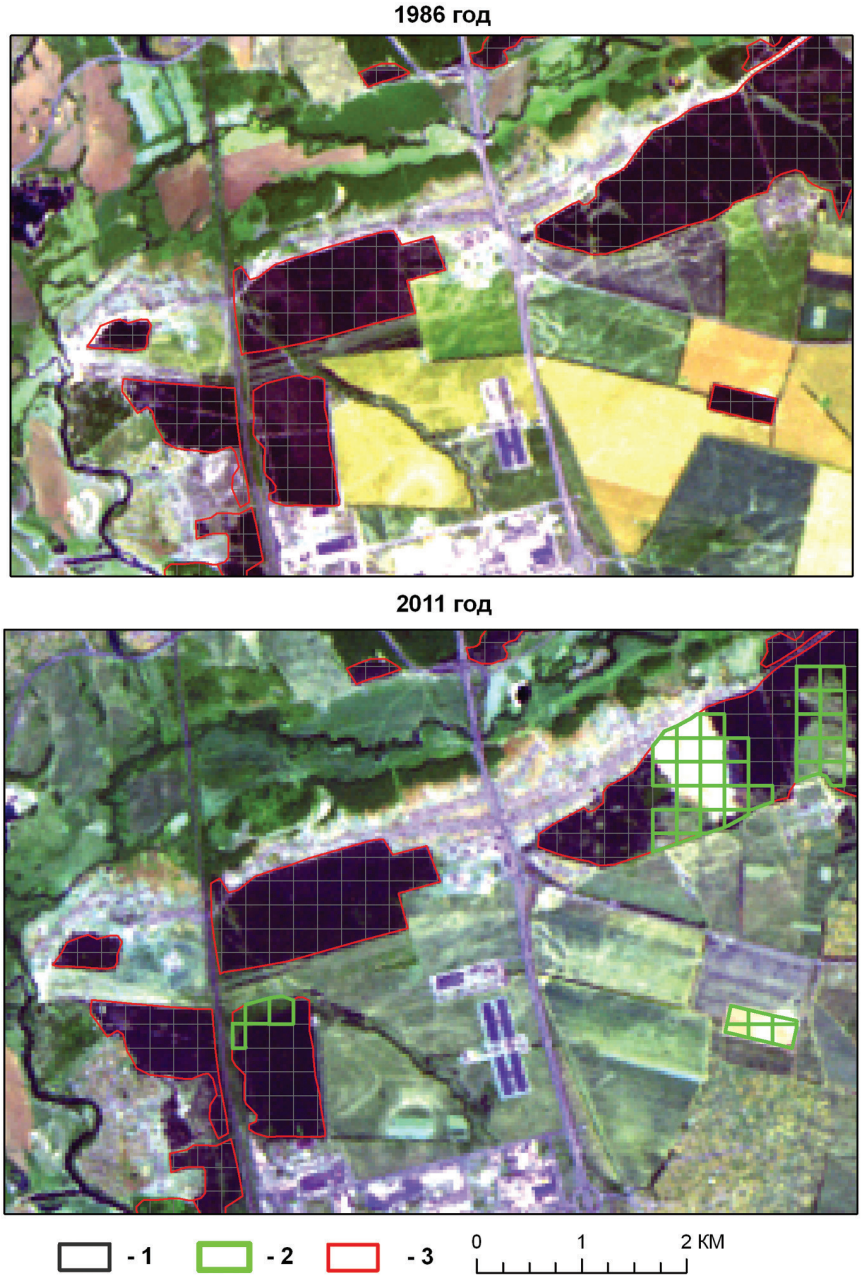

Рис. 3. Пример автоматизированного картографирования исчезнувших лесных массивов. 1 – сеть ячеек для анализа изменений; 2 – участки, на которых исчезли леса; 3 – покрытые хвойным лесом земли

Установлено, что интенсивность сплошных рубок и полного сведения сосновых насаждений (11,2%) Белгородской области значительно превышает эти показатели для лиственных лесов (1,25%). В целом изменения в сосновых лесах нашли большее отражение в спектральном отклике по сравнению с лиственными массивами. Применение динамики значений среднего инфракрасного диапазона сосновых лесов для автоматизированного картографирования изменений оказалось более эффективным по сравнению с лиственными лесами, что установлено в процессе проверки соответствия групп значений среднего инфракрасного диапазона реальным изменениям. Более детально точность контроля изменений с помощью предложенного метода будет установлена в процессе последующего изучения динамики структуры лесопокрытых земель.

Выводы

Для детальной оценки изменений, происходящих в структуре лесопокрытых земель, предложен прием, заключающийся в автоматической генерации векторного аналога сети лесотаксационных выделов. По результатам дешифрирования снимков подготовлена карта лесопокрытых земель Белгородской области, которая была включена в алгоритм автоматизированного выявления изменений в лесах, связанных со сплошнолесосечными рубками, усыханием и гибелью древостоев, воздействием пожаров. Получены результаты оценки перечисленных изменений в сосновых и лиственных лесах Белгородской области. Исследование показало, что динамика спектральных характеристик сосновых лесов более надежно отражает происходящие в лесах изменения, чем динамика спектральных особенностей лиственных (преимущественно дубовых) насаждений. Предложенный метод может быть применен для перспективного анализа изменений в лесах аналогичного породного состава (например, лесов Центрального Черноземья) по снимкам серии Landsat TM, ETM+. Диапазоны значений среднего инфракрасного канала снимка, соответствующие изменениям в лесах, возможно, будут несколько отличаться от установленных градаций, что обусловлено особенностями яркостных значений отдельных снимков.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.A18.21.1151 от 14.09.2012 г.

Литература

1. *Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю.* Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 217–227.
2. *Жирин В.М., Сухих В.И., Шаталов А.В., Бутусов О.Б., Эйдлина С.П.* Использование космических снимков для изучения динамики зарастания гарей // Исследование Земли из космоса. 2004. № 5. С. 69–76.
3. *Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // Лесоведение. 2003. № 2. С. 3–9.
4. *Кардаков А.А., Кивисте А.К., Петерсон У.К.* Формирование яркостных значений восстанавливающихся сплошных рубок на зимних изображениях среднего пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2013. № 1. С. 48–59.
5. *Марущак И.О., Елсаков В.В.* Материалы спутникового мониторинга в анализе сомкнутости лесных фитоценозов приполярного Урала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 310–318.
6. *Пономарёв Е.И., Исмаилова Д.М., Назимова Д.И.* Спутниковый мониторинг горных лесных экосистем на южной окраине бореальной области // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 342–352.

7. *Синкевич А.Е., Березин М.В.* Экологический мониторинг лесов с применением гис-технологий как элемент инструментария оценки устойчивого управления лесами; результаты, перспективы // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2009. Т. 3. № 2. С. 58–62.
8. *Сухих В.И., Гиряев М.Д., Архипов В.И., Атаманкин Е.М., Березин В.И., Дворяшин М.В., Жирин В.М., Потапов И.М., Скудин В.М., Соболев А.А., Шаталов А.В.* Научные основы и первые результаты дистанционного мониторинга незаконных рубок леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. № 1. С. 32–38.
9. *Терехин Э.А.* Анализ текстурных признаков земельных угодий по космическим снимкам Landsat TM // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2010. № 8. С. 47–52.
10. *Терехин Э.А., Пилипенко Ю.В., Пичура В.И., Чепелев О.А., Бреус Д.С.* Использование данных дистанционного зондирования Земли и нейротехнологий для совершенствования мониторинга лесных массивов // Агроекологічний журнал. 2012. № 4. С. 41–47.
11. *Терехин Э.А.* Анализ каналов спутниковых данных LANDSAT TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // Исследования Земли из космоса. 2012. № 2 С. 53–61.
12. *Флитман Е.В., Балашов И.В., Бурцев М.А., Галеев А.А., Егоров В.А., Котельников Р.В., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Прошин А.А.* Построение системы работы с данными прибора MODIS для решения задач мониторинга лесных пожаров и их последствий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 127–138.
13. *Wulder M.A., Ortlepp S.M., White J.C., Maxwell S.* Evaluation of Landsat-7 SLC-off image products for forest change detection // Canadian Journal Remote Sensing. 2008. V. 34. No. 2. P. 93–99.

Using remote sensing data for the analysis of long-term changes in the forests of the Belgorod region

E.A. Terekhin

Belgorod State University
Federal and Regional Centre For Aerospace Monitoring of Natural Resources
308015 Belgorod, 85 Pobedy Str.
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Based on the analysis and processing of Landsat TM satellite data changes in the deciduous forest and coniferous forests of the Belgorod region, took place in the period from 1986 to 2011 has been examined. The relationship between human and natural changes in the forests and the dynamics of the spectral brightness of the mid-infrared range has been established. Ratio allowed a high degree of accuracy to parse clear-felling of trees and destruction of centers to identify new plantations in the Belgorod region.

Keywords: changes in forests, Landsat TM, the mid-infrared range, clear-cutting, the Belgorod region.