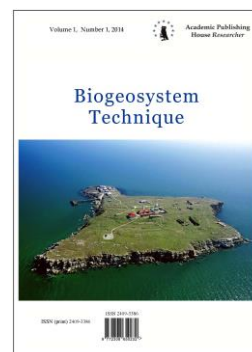


Copyright © 2017 by Academic Publishing House Researcher s.r.o.



Published in the Slovak Republic
Biogeosystem Technique
Has been issued since 2014.
ISSN: 2409-3386
E-ISSN: 2413-7316
2017, 4(1): 95-108

DOI: 10.13187/bgt.2017.1.95
www.ejournal19.com



UDC 528.88

Influence of the Forest Ecosystems Disturbance on their Spectral Reflectance Properties Dynamics

Edgar A. Terekhin ^{a, *}^a Belgorod State National Research University, Russian Federation

Abstract

The forest ecosystem disturbance is the key criterion characterizing the current state of forest stand. This paper presents the estimation of spectral reflectance properties of forest stands at different degree of forest's disturbance in Belgorod Region forest-steppe zone. Transformation of forest stand was estimated using Landsat TM data dynamics of reflectance (1,55-1,75 mkm) and Tasseled Cap brightness component. The spectral response was studied for 6 categories of forest stands disturbance. The increase of both spectral parameters is due to deterioration of forest stand. The decrease of values is related to increase of forest crown closure or the new forest areas growing. Deterioration of forest stand is manifested in its desiccation or even complete disappearance due to impact of natural or man-made factors. It was found that the highest difference of spectral response is intrinsic for destructed forest stands or cultural forest ecosystems. Increasing forest ecosystems disturbance is accompanied by increased difference of both spectral parameters between the final and the initial estimated date. Forest stands, according to degree of the spectral response increment compared to other categories of forest ecosystems, are to be ranked as follows: cultural, destroyed, greatly disturbed, medium disturbed, weakly disturbed.

Keywords: forests, ecosystem disturbance, remote sensing, Landsat, geoinformation technologies, south-west of Central Russian Upland.

1. Введение

Многие изменения, происходящие в лесах и особенно затрагивающие верхние ярусы, проявляются в динамике их спектрально-отражательных свойств (Кондратьев, Федченко, 1982; Жирин, 2013), в том числе, обусловленной влиянием антропогенных факторов (Leon et al., 2012; Василевич и др., 2014). Совершенствование технологий получения и обработки спутниковых данных за последние десятилетия обусловило расширяющееся применение материалов дистанционного зондирования Земли для оценки состояния лесных экосистем (Lutz et al., 2008; Vogelmann et al., 2009; Барталев, Лупян, 2013). На территории Среднерусской возвышенности, включая ее юго-запад, доминируют лесостепные ландшафты (Lisetskii et al., 2016). Лесные массивы являются одним из наименее измененных в процессе антропогенной деятельности компонентов растительного покрова и играют важную роль для сохранения биоразнообразия. Являясь динамической экосистемой, леса региона, в то же время претерпевают существенные изменения в связи с воздействием ряда

* Corresponding author

E-mail addresses: terekhin@bsu.edu.ru (E.A.Terekhin)

факторов, что приводит к нарушениям в их структуре. К таким факторам, в частности, относились или относятся проведение сплошных лесосечных рубок, воздействие пожаров, различная хозяйственная деятельность. Мониторинг и оценка происходящих нарушений являются важнейшей задачей для управления лесами и сохранения естественного потенциала лесных экосистем (Лисецкий, 2008; Кузьменко и др., 2013).

Направление, связанное с оценкой нарушенности лесных сообществ, в значительной степени основывается на разработке подходов к детектированию происходящих нарушений на основе динамики спектрально-отражательных признаков (Gerylo et al., 2002; Boyd, Danson, 2005; Hall et al., 2006). Необходимо отметить использование таких показателей как Disturbance Index (Healey et al., 2005; Frantz et al., 2016; Воробьев и др., 2016) и индекс термодинамической нарушенности (Горный и др., 2013). Для выявления изменений используются методы поканальных разностей взаимно нормализованных изображений (Барталев и др., 2005) и декомпозиции спектральных смесей (Lu et al., 2004; Michishita et al., 2012). Лесные массивы, длительное время произрастающие вблизи объектов добычи полезных ископаемых, могут аккумулировать в себе загрязняющие элементы, что может приводить к медленно протекающим изменениям. Особенно это касается хвойных лесов, по причине того, что хвоя в отличие от листвы опадает не каждый год, а ее смена происходит раз в несколько лет. Подобные изменения также могут проявиться в спектрально-отражательных свойствах лесной растительности (Елсаков, 2012), которые в свою очередь, могут быть изучены на основе разновременных материалов дистанционного зондирования Земли.

В основе выявления изменений, обуславливающих формирование ареалов нарушенных лесных экосистем, лежит анализ разновременных многозональных спутниковых снимков (Jing et al., 2009; DeVries et al., 2015) и разработка индексов, позволяющих исследовать пространственно-временные трансформации в лесном покрове (Lu et al., 2004; King et al., 2005; Schroeder et al., 2007).

Цель настоящего исследования заключалась в оценке спектрально-отражательных характеристик лесных массивов различных категорий нарушенности, типичных для юго-запада Среднерусской возвышенности. Рабочая гипотеза формулировалась следующим образом: степень нарушенности лесных экосистем статистически достоверно влияет на особенности их спектрально-отражательных свойств и их временные изменения.

2. Материалы и методы исследований

Исследование было проведено в несколько этапов: выявление и картографирование категорий нарушенности лесных экосистем, подбор и предварительная обработка разновременных спутниковых данных, расчет спектральных показателей для каждого анализируемого лесного массива, статистический анализ данных.

Территория, на которой были выполнены исследования, охватывала северо-восточную часть Белгородской области, географически совпадающую со Старооскольским, Губкинским и Чернянским районами. Вся анализируемая территория расположена в зоне лесостепи и характеризуется наличием лесных массивов различных категорий нарушенности, что было установлено на основе спутниковых и полевых данных.

Достижение цели, поставленной в исследовании, обуславливало необходимость анализа спутниковой и наземной информации, интеграция которой была проведена в геоинформационной среде ArcGIS. Количественная оценка спектрально-отражательных характеристик различных категорий нарушенности лесов требовала их предварительного картографирования. Для этой цели нами на основе материалов полевых исследований, проведенных в период 2010-2016 гг., и разновременных спутниковых данных были установлены основные категории нарушенности лесных экосистем, типичные для территории региона и выполнено их геоинформационное картографирование. Нарушенность оценивалась на основе таких факторов, как сплошнолесосечные рубки, лесные пожары. Также учитывалось наличие признаков усыхания верхнего яруса. По нарушениям в нем были выделены слабонарушенные, средненарушенные, сильнонарушенные, разрушенные лесные насаждения. Отдельной категорией были выделены культурные (преимущественно хвойные) лесные массивы, получившие определенное распространение в регионе. Полностью ненарушенных лесных экосистем на территории исследования не обнаружено.

На следующем этапе было проведено геоинформационное картографирование установленных категорий нарушенности лесов на анализируемой территории (4441 км²). Создание векторной основы, характеризующей расположение лесных массивов разной степени нарушения, позволило впоследствии на основе спутниковых данных с применением методов геоинформационного анализа рассчитать разновременные значения спектральных характеристик для каждого лесного массива и выполнить их количественную оценку. Для анализа динамики спектрально-отражательных свойств лесных массивов была использована серия снимков со спутника-сенсора Landsat TM, полученных в период 1986-2011 гг. (Табл. 1).

Выбор изображений с сенсора Landsat TM связан с возможностью покрытия значительного временного диапазона и оптимальным пространственным разрешением (30 м/пиксель). Данные Landsat зарекомендовали себя информативным источником информации при изучении динамики природных экосистем (Wilson, Sader, 2002; Giri, Muhlhausen, 2005; Song et al., 2007; Зинченко и др., 2013; Baumann et al., 2014). Они могут быть использованы для оценки различных параметров лесных насаждений (Trigg et al., 2006; Chen et al., 2016; Fassnacht et al., 2016), включая сомкнутость (Pu et al., 2003) и биомассу (Phua, Saito, 2003; Samimi, Kraus, 2004). Применение снимков только с одного типа сенсора является необходимым условием для достоверной оценки изменений в спектрально-отражательных свойствах лесных экосистем. Это было бы сделать крайне проблематично при использовании данных с различных съемочных систем.

Количественная оценка изменений в спектрально-отражательных свойствах обуславливала необходимость радиометрической корректировки изображений, полученных в разные годы (Chander et al., 2007). Поэтому все снимки прошли радиометрическую коррекцию, которая заключалась в переводе исходных яркостей снимка сначала в коэффициенты излучения, приходящего на сенсор, а затем в безразмерные коэффициенты спектральной яркости (Chander et al., 2009). Для нивелирования возможных различий в спектрально-отражательных свойствах, обусловленных влиянием разных периодов года, анализируемые снимки были подобраны примерно на один и тот же сезон (июнь).

Таблица 1. Используемые в исследовании спутниковые данные

Спутник-сенсор	Дата получения	Сектор в системе WRS-2
Landsat TM	13.06.1986	177024
Landsat TM	24.06.1996	177024
Landsat TM	22.05.2007	177024
Landsat TM	28.06.2009	177024
Landsat TM	02.06.2011	177024

При анализе спектрально-отражательных характеристик учитывали, что нарушенность экосистем оценивалась на конечную анализируемую дату, т.е. на 2011 год. Оценка спектрального отклика лесов в этот год представляла первоочередный интерес. С другой стороны нарушенность лесных сообществ может быть оценена путем вычисления разности спектральных показателей между начальной и конечной датами. Теоретически наиболее значительные изменения должны быть характерны для случаев разрушенных и культурных лесных экосистем, т.к. при этом кардинально меняются коэффициенты отражения территорий, на которых расположены леса.

Таким образом, исследование отражательных свойств насаждений включало следующие компоненты:

– количественная оценка динамики спектральных показателей, обусловленная изменениями в древостое;

– анализ достоверности различий спектральных характеристик для лесных экосистем разной степени нарушенности по состоянию на 2011 год.

Исходя из предыдущего опыта анализа спектрально-отражательных свойств лесных экосистем, типичных для региона, и оценки спектрально-отражательных признаков лесных массивов нами были использованы коэффициенты отражения в средней инфракрасной (SWIR) зоне (1,55-1,75 мкм), являющиеся наиболее чувствительными среди каналов Landsat

к изменениям в структуре лесного полога (Терехин, 2012). Кроме них была изучена динамика яркостной компоненты спектральных преобразований Tasseled Cap (Crist, Cicone, 1984). Этот вид спектральных трансформаций обнаружил эффективность для анализа нарушений лесных экосистем (Franklin et al., 2002, 2005). Оба показателя были рассчитаны на каждую анализируемую дату для каждого выделенного ареала нарушенности лесных экосистем. Для расчета был использован метод зональной статистики, заключающийся в вычислении средних значений спектральных характеристик в пределах векторных контуров лесных массивов. Применение такого способа позволило сформировать выборку лесных насаждений различной степени нарушенности и соответствующих им спектрально-отражательных характеристик, а впоследствии провести их статистический анализ (в программе STATISTICA).

3. Результаты и их обсуждение

По результатам изучения спутниковых и наземных данных было проанализировано более 980 лесных массивов, для которых была оценена нарушенность верхнего яруса (Табл. 2).

Таблица 2. Характеристика проанализированных лесных массивов

Тип нарушенности	Средняя площадь, га	Количество объектов	Суммарная площадь, га
Слабонарушенные	58,2	486	28264,5
Средненарушенные	34,8	318	11068,6
Разрушенные	33,4	66	2205,6
Культурные	12,7	66	837,9
Сильнонарушенные	8,8	45	396,0
Всего	43,6	981	42772,8

Наличие разрушенных лесных экосистем обусловлено тем, что на северо-востоке Белгородской области за анализируемый период времени наблюдалось полное сведение части сосновых насаждений вследствие пожаров, усыханий и других факторов. К сильнонарушенным лесным экосистемам относятся леса, в которых с 1990-х гг. проводились сплошнолесосечные рубки и лесовосстановление полностью не завершилось. Основной отличительной чертой средненарушенных лесов является отсутствие признаков нарушенности верхнего яруса на протяжении последних 25-30 лет, слабонарушенных – на протяжении последних 40-50 лет. Такие лесные насаждения доминируют на исследуемой территории, что во многом обусловлено значительным снижением масштабов сплошных лесосечных рубок в регионе с начала 1990-х годов.

Как изменения положительного (увеличение сомкнутости, появление новых лесов), так и отрицательного характера на разновременных спутниковых данных в большей степени проявляются в хвойных лесных насаждениях, чем лиственных лесах, что во многом обусловлено более высокой интенсивностью изменений в них. При этом установлено, что существенные изменения в древостое отражаются в динамике спектрально-отражательных характеристик как сосновых, так и лиственных лесных массивов. В связи с этим она была изучена для коэффициентов отражения в инфракрасной зоне спектра (1,55-1,75 мкм) и яркостной компоненты спектральных преобразований Tasseled Cap для ареалов разной степени нарушенности.

Резкие скачки коэффициентов отражения (коэффициентов спектральной яркости) указывают на значительные изменения в структуре лесного полога. Установлено, что резкие увеличения коэффициентов отражения в средней инфракрасной (SWIR) зоне спектра (например, рост с 0,10 до 0,15), произошедшие за интервал в 1 год или большее число лет, обусловлены значительными изменениями в верхнем ярусе, включая полное исчезновение лесного массива (Рис. 1).

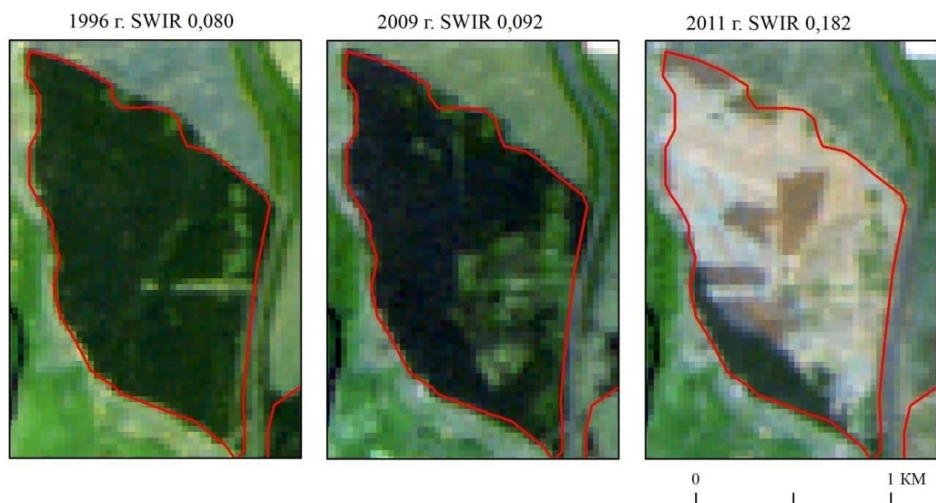


Рис. 1. Динамика коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1,55-1,75 мкм (SWIR), обусловленная снижением сомкнутости и гибелью древостоя

Соответственно наличие существенного роста коэффициентов спектральной яркости в средней инфракрасной области спектра может быть использовано для выявления ареалов ухудшения в состоянии растительного покрова. Обусловлено это тем, что при сильном изреживании насаждений вследствие усыхания, пожаров или вырубок, спектральный отклик территорий, на которых были леса, начинает формировать и почвенный покров, а он характеризуется более высокими коэффициентами отражения в этой спектральной области (Кринов, 1947).

Это условие может быть использовано для анализа изменений в лесных сообществах. С другой стороны, резкое снижение коэффициентов отражения в этой области спектра (например, с 0,192 до 0,136) может быть применено для выявления появившихся лесных насаждений, либо участков, на которых произошло заметное увеличение сомкнутости лесов (рис. 2). В таком случае наблюдается обратный процесс: покрытие территории древесной растительностью и последовательное увеличение сомкнутости насаждений обуславливает снижение коэффициентов отражения в этой спектральной области. Необходимо отметить, что такой подход для выявления изменений в лесных насаждениях и оценки нарушенности их верхнего яруса эффективно может быть использован при условии использования радиометрически откорректированных снимков, полученных с одного и того же сенсора.

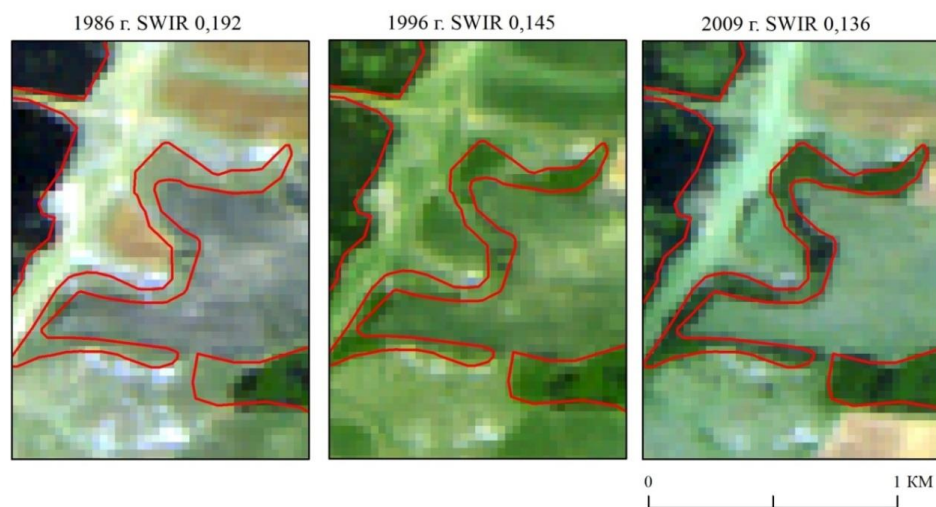


Рис. 2. Динамика коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1,55-1,75 мкм, обусловленная формированием лесного массива на месте безлесного участка

Хвойные леса характеризуются несколько меньшими коэффициентами отражения в инфракрасной области спектра по сравнению с лиственными лесными массивами. С другой стороны, если анализируются не сами коэффициенты, а их динамика, например, рост или снижение на определенное количество процентов, то применение данного подхода может быть применено как для лиственных, так и для хвойных лесных насаждений. Для оценки спектральных показателей, соответствующих классам нарушенности лесных экосистем для каждого лесного массива была рассчитана разность значений коэффициентов отражения в диапазоне 1,55-1,75 мкм и яркостной компоненты Tasseled Cap между конечной и начальной датой (1986-2011 гг.). После этого был выполнен статистический анализ рассчитанной величины для различных классов нарушенности лесных массивов, а также культурных насаждений. Проведенная оценка методом Краскела-Уоллиса (непараметрический аналог дисперсионного анализа) показала статистически значимые различия между большинством классов нарушенности лесных массивов для обоих спектральных показателей. По степени увеличения статистически значимых отличий (по обоим спектральным показателям) категории нарушенности выстраиваются следующим образом: культурные, разрушенные, сильнонарушенные, средненарушенные, слабонарушенные. Эти отличия наглядно видны на графической интерпретации результатов (Рис. 3).

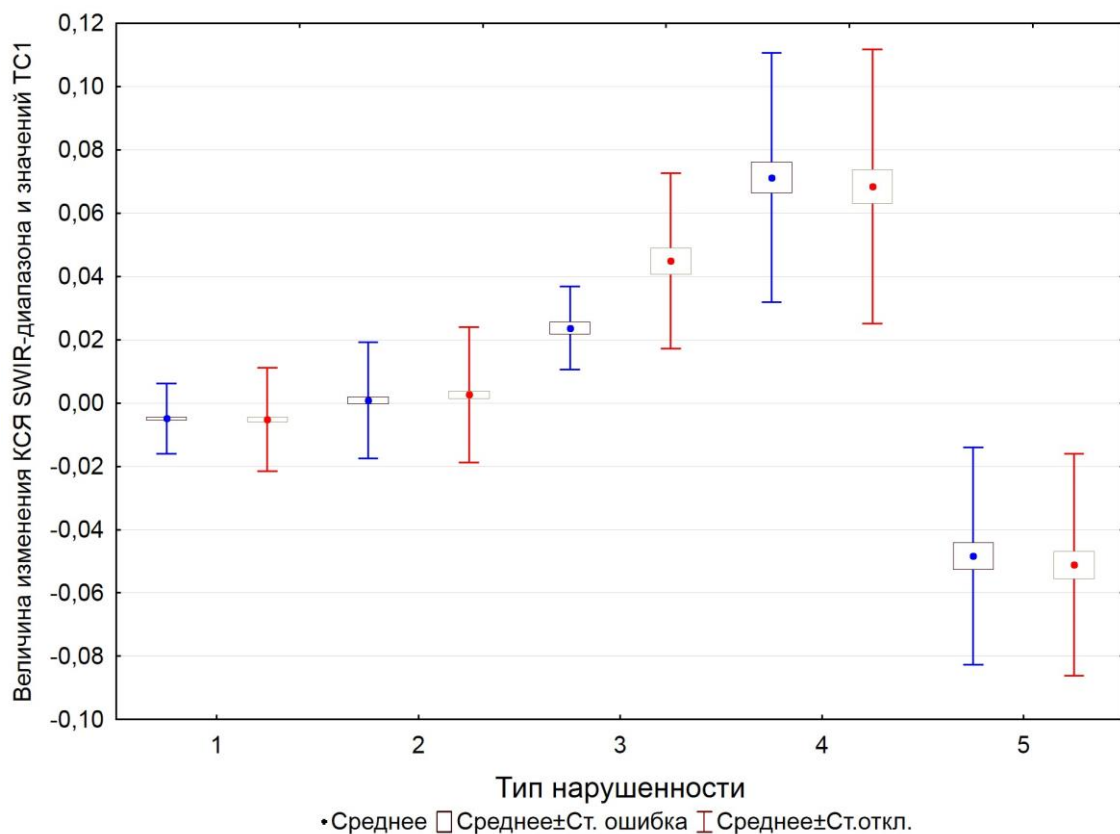


Рис. 3. Величина изменения КСЯ в диапазоне 1,55-1,75 мкм (синий график) и 1-й компоненты Tasseled Cap (красный график) для классов нарушенности древостоя. 1 – слабонарушенные, 2 – средненарушенные, 3 – сильнонарушенные, 4 – разрушенные, 5 – культурные насаждения

При этом коэффициенты отражения в SWIR-диапазоне характеризуются несколько большей чувствительностью к разной степени нарушенности верхнего яруса лесных экосистем. Из графика на Рис. 3 видно, что динамика коэффициента спектральной яркости наиболее четко различается для сильнонарушенных, разрушенных и культурных лесных экосистем.

В связи с тем, что коэффициенты отражения хвойных насаждений несколько ниже, чем лиственных, нами была проанализирована динамика спектрально-отражательных характеристик для лесных массивов лиственного и хвойного породного состава (разных категорий нарушенности). Ее анализ позволил также определить промежутки времени, в которые произошли основные нарушения древостоя, либо в его развитии наблюдались положительные тенденции.

Анализ динамики коэффициентов спектральной яркости в инфракрасной зоне для лиственных лесов (Рис. 4) позволил выявить основные особенности их категорий нарушенности.

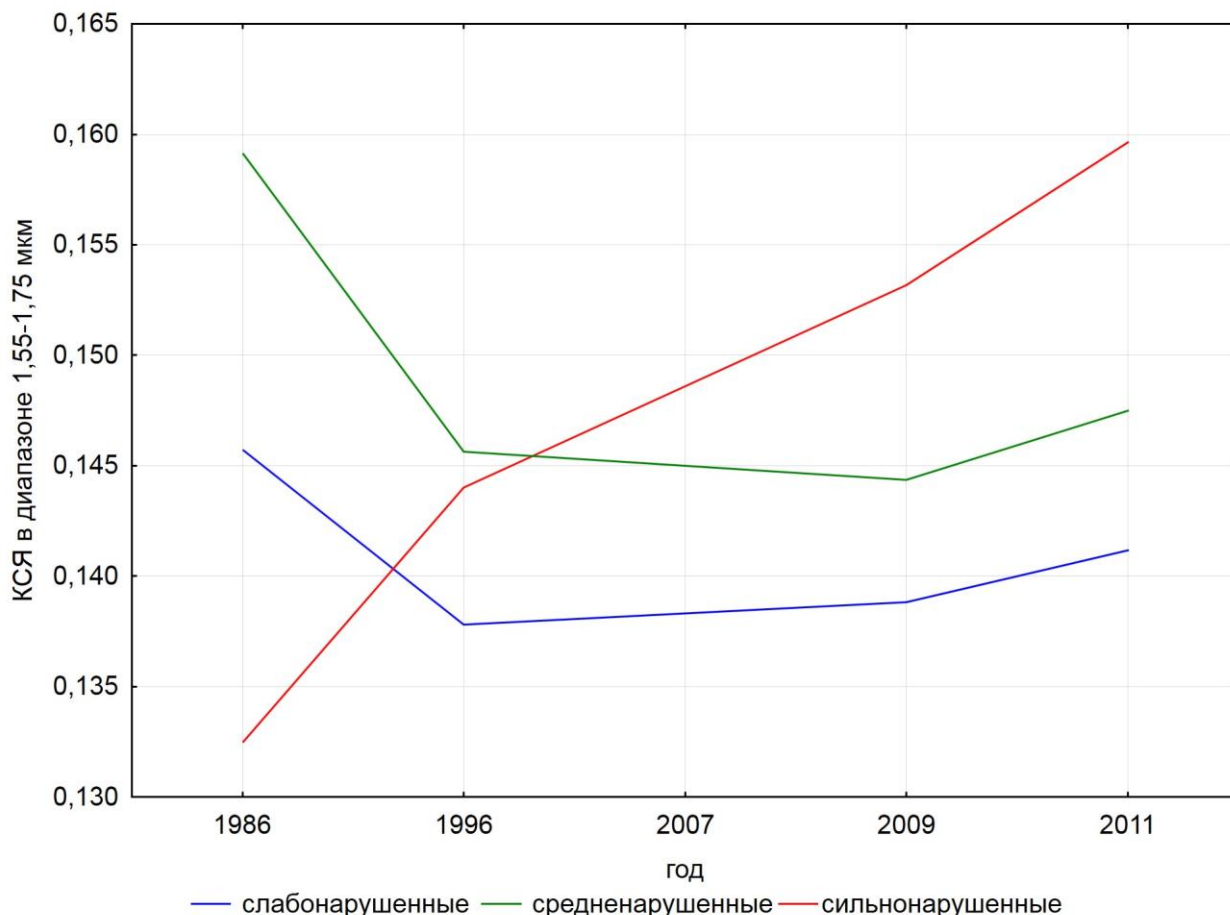


Рис. 4. Динамика КСЯ в диапазоне 1,55-1,75 мкм для различных категорий нарушенности лиственных лесных экосистем

Оценка динамики КСЯ сильнонарушенных лиственных лесных экосистем показала, что на протяжении оцениваемого периода для них было характерно последовательное увеличение спектрального показателя, что указывает на то, что нарушение древостоя на большинстве из них происходило продолжительное время. Необходимо отметить, что разрушенных лиственных экосистем на исследуемой территории не выявлено. Динамика зональных коэффициентов отражения для средненарушенных и слабонарушенных лесных экосистем имеет примерно одинаковый вид. На протяжении основной части анализируемого периода времени она имела тенденцию к снижению. В средне- и слабонарушенных лесных экосистемах воздействие нарушающих факторов (вырубки, пожары) в верхнем ярусе проявлялось последний раз более 30, либо более 50 лет назад. Т.е. такие насаждения состоят преимущественно из средневозрастных и приспевающих деревьев, для которых характерна либо слабая динамика коэффициентов отражения, либо же ее отсутствие.

Анализ динамики коэффициентов спектральной яркости в инфракрасной зоне для категорий нарушенности хвойных лесных насаждений (Рис. 5) наглядно показал существенное увеличение спектрального показателя за 25 лет, наблюдающееся для

разрушенных лесных экосистем, его постепенное снижение для культурных насаждений и отсутствие существенной динамики для средненарушенных лесных массивов.

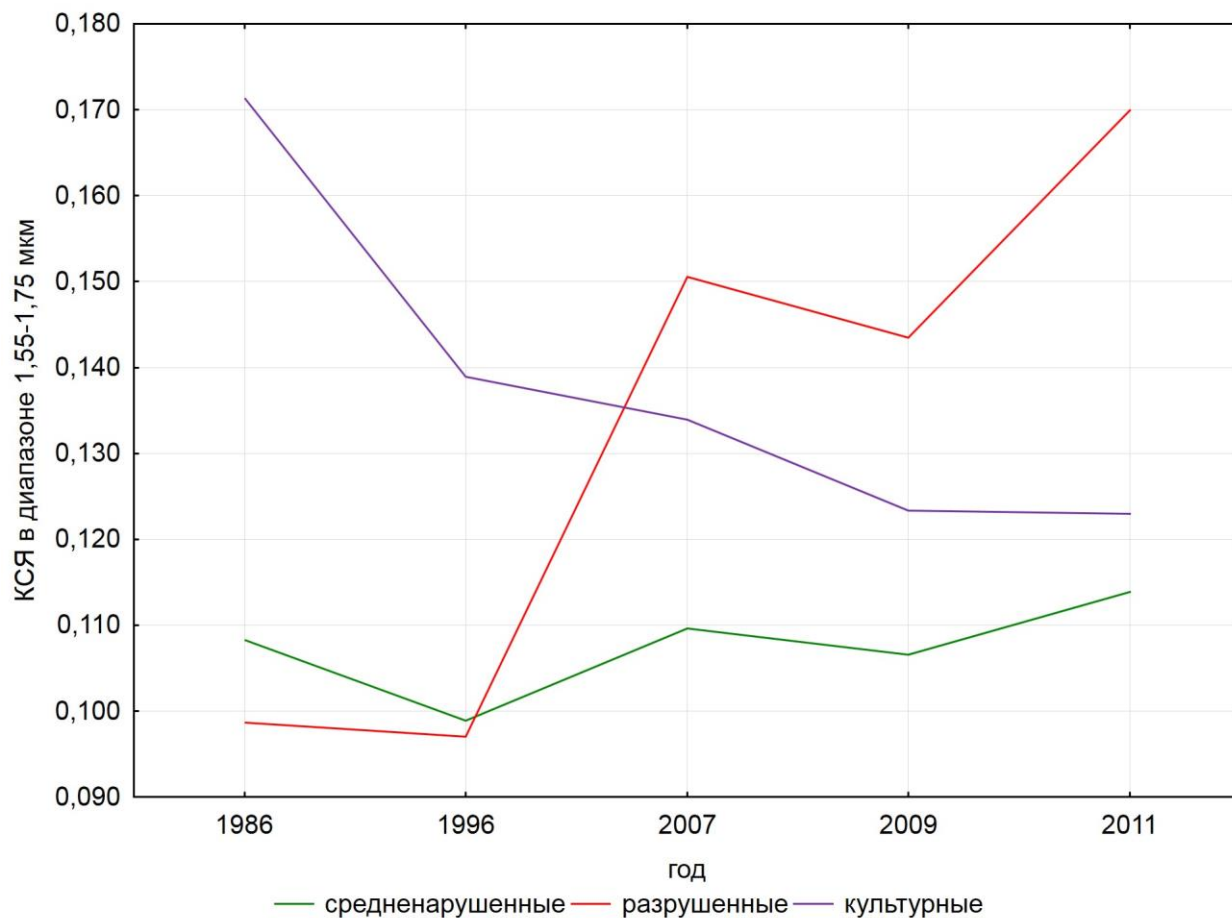


Рис. 5. Динамика КСЯ в диапазоне 1,55-1,75 мкм для различных категорий нарушенности хвойных лесных экосистем

Анализ спектральных кривых позволил понять, каким образом меняются спектрально-отражательные характеристики лесных насаждений на протяжении времени. В частности, динамика КСЯ инфракрасного диапазона для культурных лесных экосистем показала, что наибольшая степень изменения спектрального показателя наблюдалась в первое анализируемое десятилетие (1986-1996 гг.). В следующие пятнадцать лет также наблюдалось снижение отражательной способности, но оно было не такое интенсивное. Обусловлено это тем, что большинство проанализированных культурных лесных экосистем создавалось в 1980-х гг. и, соответственно, в первые десять лет наблюдался их интенсивный рост, сопровождающийся увеличением проективного покрытия и сменой спектрально-отражательных свойств территории. Разрушенные хвойные лесные экосистемы наоборот характеризуются ростом отражательной способности в инфракрасной зоне спектра. Максимальный рост коэффициентов отражения (характеризующий наибольшую степень разрушения для основной части проанализированных лесных экосистем) наблюдался между 1996 и 2007 годами.

Для средненарушенных хвойных лесных экосистем характерна минимальная динамики коэффициентов отражения в инфракрасной спектральной области. Этот тип лесных сообществ включает насаждения, в которых проведение сплошнолесосечных рубок, либо влияние других факторов, нарушающих структуру древостоя, наблюдалось более 30 лет назад. Такие лесные массивы состоят преимущественно из средневозрастных деревьев, характеризующихся невысокой динамикой спектрально-отражательных свойств, что характерно и для слаборазрушенных лесных сообществ.

4. Заключение

Нарушенность верхнего яруса лесных экосистем, обусловленная в первую очередь влиянием сплошнолесосечных рубок, пожаров и усыханий, проявляется в динамике спектрально-отражательных свойств. Для лесных экосистем, характеризующихся разной степенью нарушенности верхнего яруса, установлены достоверные различия в таких спектральных показателях как коэффициенты отражения в среднем инфракрасном диапазоне (1,55-1,75 мкм) и яркостная компонента преобразований Tasseled Cap. По мере ухудшения состояние древостоя для обоих показателей наблюдается рост значений, который может быть использован для выявления категорий нарушенности лесных насаждений при условии, что спектральные характеристики рассчитываются для каждого анализируемого лесного массива. Повышение сомкнутости или же появление лесных массивов на месте не покрытых лесом земель сопровождается последовательным снижением абсолютных величин обоих спектральных показателей.

5. Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-4611.2016.5.

Литература

Барталев и др., 2005 – Барталев С.А., Курятникова Т.С., Стибиг Х.Ю. (2005). Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таежных лесов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 2, № 2, С. 217–227.

Барталев, Лупян, 2013 – Барталев С.А., Лупян Е.А. (2013). Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 10, № 1, С. 197–214.

Василевич и др., 2014 – Василевич М.И., Елсаков В.В., Щанов В.М. (2014). Применение спутниковых методов исследований в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 11, № 1, С. 30–42.

Воробьев и др., 2016 – Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.А., Лещин С.А. (2016). Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам landsat // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 13, № 4, С. 124–134.

Горный и др., 2013 – Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Храмцов В.Н. (2013). Верификация крупномасштабных карт индекса нарушенности экосистем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 10, № 4, С. 201–212.

Елсаков, 2012 – Елсаков В.В. (2012). Спутниковая съемка в экологическом мониторинге регионов добычи углеводородов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, Т. 9, № 5, С. 133–139.

Жирин и др. 2013 – Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П. (2013). Эколого-динамическое исследование лесообразовательного процесса по космическим снимкам // *Лесоведение*, № 5, С. 76–85.

Зинченко и др., 2013 – Зинченко В.Е., Лохманова О.И., Калиниченко В.П., Глухов А.И., Повх В.И., Шляхова Л.А. (2013). Космический мониторинг земель сельскохозяйственного назначения юга России // *Исследование Земли из космоса*, № 3, С. 33-45.

Кондратьев, Федченко, 1982 – Кондратьев К.Я., Федченко П.П. (1982). Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеиздат, 216 с.

Кринов, 1947 – Кринов Е.Л. (1947). Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 273 с.

Кузьменко и др., 2013 – Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Кириленко Ж.А., Григорьева О.И. (2013). Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, Т. 15, № 3-2, С. 652–657.

Лисецкий, 2008 – Лисецкий Ф.Н. (2008). Почвообразовательный потенциал лесных насаждений при облесении песков в условиях лесостепи и степи // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, № 4, С. 13-20.

Терехин, 2012 – Терехин Э.А. (2012). Анализ каналов спутниковых данных landsat TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности // *Исследование Земли из космоса*, № 2, С. 53–61.

Baumann et al., 2014 – Baumann M., Ozdogan M., Wolter P.T., Krylov A., Vladimirova N., Radeloff V.C. (2014). Landsat remote sensing of forest windfall disturbance // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 143, pp. 171–179.

Boyd, Danson, 2005 – Boyd D.S., Danson F.M. (2005). Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development // *Progress in Physical Geography*, Vol. 29, No. 1, pp. 1–26.

Chander et al., 2007 – Chander G., Markham B., Barsi J. (2007). Revised landsat-5 thematic mapper radiometric calibration // *Geoscience and remote sensing letters* // Vol. 4, No. 3, pp. 490–494.

Chander et al., 2009 – Chander G., Markham B., Helder D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, No. 5, pp. 893–903.

Chen et al., 2016 – Chen D., Loboda T.V., Krylov A., Potapov P.V. (2016). Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 187, pp. 320–331.

Crist, Cicone, 1984 – Crist E.P., Cicone R.C. (1984). A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data – The TM Tasseled Cap // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 22, No. 3, pp. 256–263.

DeVries et al., 2015 – DeVries, B., Decuyper, M., Verbesselt, J., Zeileis, A., Herold, M., Joseph S. (2015). Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 169, pp. 320–334.

Fassnacht et al., 2016 – Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K., Modzelewska A., Lefsky M., Waser L.T., Straub C., Ghosh A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 186, pp. 64–87.

Franklin et al., 2002 – Franklin S.E., Lavigne M.B., Wulder M.A., McCaffrey T.M. (2002). Large-area forest structure change detection: An example // *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 588–592.

Franklin et al., 2005 – Franklin S.E., Jagielko C.B., Lavigne M.B. (2005). Sensitivity of the Landsat enhanced wetness difference index (EWDI) to temporal resolution // *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 32, No. 2, pp.149–152.

Frantz et al., 2016 – Frantz D., Röder A., Udelhoven T., Schmidt M. (2016). Forest Disturbance Mapping Using Dense Synthetic Landsat/MODIS Time-Series and Permutation-Based Disturbance Index Detection // *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 4, pp. 277–299.

Gerylo et al., 2002 – Gerylo G.R., Hall R.J., Franklin S.E., Smith L. (2002). Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada // *Can. J. Rem. Sens.*, Vol. 28, No.1. pp. 68–79.

Giri, Muhlhausen, 2005 – Giri C., Muhlhausen J. (2008). Mangrove Forest Distributions and Dynamics in Madagascar (1975–2005) // *Sensors*, No. 8, pp. 2104–2117.

Hall et al., 2006 – Hall, R.J., Skakun, R.S., Arsenault, E.J., Case, B.S. (2006). Modeling forest structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume // *Forest Ecology and Management*, Vol. 225, No. 1-3, pp. 378–390.

Healey et al., 2005 – Healey S., Cohen W. B., Zhiqiang Y., Krankin O.N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, No. 3, pp. 301–310.

Jing et al., 2009 – Jing X., Wang J., Huang W., Liu L.Y., Wang J. (2009). D. Study on forest vegetation classification based on multi-temporal remote sensing images // *Computer and Computing Technologies in Agriculture*, 2009, Vol. 1, pp.115–123.

King et al., 2005 – King D. J., Olthof I., Pellikka K. E., Seed E. D., Butson C. (2005). Modelling and Mapping Damage to Forests from an Ice Storm Using Remote Sensing and Environmental Data // *Natural Hazards*, Vol. 35, No. 3, pp. 321–342.

Leon et al., 2012 – Leon J.R.R. van Leeuwen W.J.D., Casady G.M. (2012). Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments // *Remote sensing*, Vol. 4, pp. 598–621.

Lisetskii et al., 2016 – Lisetskii F.N., Tokhtar V.K., Ostapko V.M., Prykhodko S.A. Petrunova T.V. (2016). Regularities and Features of Differentiation and Anthropogenic Transformation of Steppe Vegetation // *Terrestrial Biomes: Geographic Distribution, Biodiversity and Environmental Threats*. Editors: Marlon Nguyen. USA, Nova Science Publishers, Inc., Chapter 4. pp. 103–126.

Lu et al., 2004 – Lu D., Mausel P., Batistella M., Moran E. (2004). Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection // *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, pp. 87–100.

Lu et al., 2004 – Lu D., Mausel P., Brondzio E., Moran E. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM Spectral responses in the Brazilian Amazon Basin // *Forest Ecology and Management*, Vol. 198, No. 1–3, pp. 149–167.

Lutz et al., 2008 – Lutz D.A., Washington-Allen R. A., Shugart H.H. (2008). Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review // *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 34, No. 2, pp. 286–313.

Michishita et al., 2012 – Michishita R., Xu B., Gong P. (2012). Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data // *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 11, pp. 3373–3402.

Phua, Saito, 2003 – Phua M., Saito H. (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data // *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4. pp. 429–440.

Pu et al., 2003 – Pu R., Xu B., Gong P. (2003). Oakwood crown closure estimation by unmixing Landsat TM data // *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 24, No. 22. pp. 4433–4445.

Samimi, Kraus, 2004 – Samimi C., Kraus T. (2004). Biomass estimation using Landsat-TM and ETM+. Towards a regional model for Southern Africa // *GeoJournal*, Vol. 59, No. 3. pp. 177–187.

Schroeder et al., 2007 – Schroeder T.A., Cohen W.B., Yang Z. (2007). Patterns of forest regrowth following clearcutting in western Oregon as determined from a Landsat time-series // *Forest Ecology and Management*, No. 243, pp. 259–273.

Song et al., 2007 – Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. (2007). Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 106. pp. 228–237.

Trigg et al., 2006 – Trigg S.N., Curran L. M., McDonald A. K. (2006). Utility of Landsat 7 satellite data for continued monitoring of forest cover change in protected areas in Southeast Asia // *Singapore Journal of Tropical Geography*, 2006, Vol. 27, No. 1, pp. 49–66.

Vogelmann et al., 2009 – Vogelmann J.E., Tolk B., Zhu Z. (2009). Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, pp. 1739–1748.

Wilson, Sader, 2002 – Wilson E.H., Sader S.A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery // *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, pp. 385–396.

References

Bartalev et al., 2005 – Bartalev S.A., Kuryatnikova T.S., Stibig Kh.Yu. (2005). Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 2, No. 2, pp. 217–227.

Bartalev, Lupyan, 2013 – Bartalev S.A., Lupyan E.A. (2013). R&D on methods for satellite monitoring of vegetation by the Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 10, No. 1, pp. 197–214.

Vasilevich et al., 2014 – Vasilevich M.I., Elsakov V.V., Shchanov V.M. (2014). The use of satellite research methods in monitoring the state of forest communities in the area of industrial emissions, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 11, No. 1, pp. 30–42.

Vorob'ev et al. 2016 – Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. (2016). Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by

Landsat images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 13, No. 4, pp. 124–134.

[Gornyi et al. 2013](#) – Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Khramtsov V.N. (2013). Verification of large scale maps of thermodynamic index ecosystem health disturbance, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212.

[Elsakov, 2012](#) – Elsakov V.V. (2012). The remote sensing data in ecological monitoring of carbohydrates deposits, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 9, No. 5, pp. 133–139.

[Zhirin et al. 2013](#) – Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. The Eco-dynamical Study of Forest-forming Process with Space Imagery, *Lesovedenie*, No. 5, pp. 76–85.

[Zinchenkou et al., 2013](#) – Zinchenkou, V.E., Lokhmanova, O.I., Kalinichenko, V.P., Glukhov, A.I., Povkh, V.I., Shljakhova, L.A. (2013). Space monitoring of agricultural lands in southern Russia, *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, Vol. 49, No. 9, pp. 1036–1046. doi: [10.1134/S0001433813090168](https://doi.org/10.1134/S0001433813090168)

[Kondrat'ev, Fedchenko, 1982](#) – Kondrat'ev K.Ya., Fedchenko P.P. (1982). Spectral reflectivity and vegetation recognition. L.: Gidrometeoizdat, 216 p.

[Krinov, 1947](#) – Krinov E.L. (1947). Spectral reflectivity of natural formations M.: Izd-vo AN USSR, 273 p.

[Kuz'menko et al. 2013](#). – Kuz'menko YA.V., Lisetskiy F.N., Kirilenko ZH.A., Grigor'yeva O.I. (2013). Providing the optimum water protection forests amount at basin organization of nature management, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, Vol. 15, No. 3-2, pp. 652–657.

[Lisetskiy, 2008](#) – Lisetskiy F.N. (2008). Soil-formation Potential of Forest Stands under Sands Afforestation in Forest-steppe and Steppe Environment, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, No. 4, pp. 13–20.

[Terekhin, 2012](#) – Terekhin E.A. (2012). Analysis of satellite data channels landsat TM for the estimation of forest stand parameters of the Forest-steppe province of the Central Russian Upland, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, No. 2, pp. 53–61.

[Baumann et al., 2014](#) – Baumann M., Ozdogan M., Wolter P.T., Krylov A., Vladimirova N., Radeloff V.C. (2014). Landsat remote sensing of forest windfall disturbance, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 143, pp. 171–179.

[Boyd, Danson, 2005](#) – Boyd D.S., Danson F.M. (2005). Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development, *Progress in Physical Geography*, Vol. 29, No. 1, pp. 1–26.

[Chander et al., 2007](#) – Chander G., Markham B., Barsi J. (2007). Revised landsat-5 thematic mapper radiometric calibration, *Geoscience and remote sensing letters* // Vol. 4, No. 3, pp. 490–494.

[Chander et al., 2009](#) – Chander G., Markham B., Helder D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, No. 5, pp. 893–903.

[Chen et al., 2016](#) – Chen D., Loboda T.V., Krylov A., Potapov P.V. (2016). Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 187, pp. 320–331.

[Crist, Cicone, 1984](#) – Crist E.P., Cicone R.C. (1984). A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data – The TM Tasseled Cap, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 22, No. 3, pp. 256–263.

[DeVries et al., 2015](#) – DeVries, B., Decuyper, M., Verbesselt, J., Zeileis, A., Herold, M., Joseph S. (2015). Tracking disturbance-regrowth dynamics in tropical forests using structural change detection and Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 169, pp. 320–334.

[Fassnacht et al., 2016](#) – Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K., Modzelewska A., Lefsky M., Waser L.T., Straub C., Ghosh A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 186, pp. 64–87.

[Franklin et al., 2002](#) – Franklin S. E., Lavigne M.B., Wulder M.A., McCaffrey T.M. (2002). Large-area forest structure change detection: An example, *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 28, No. 4, pp. 588–592.

Franklin et al., 2005 – Franklin S.E., Jagielko C.B., Lavigne M.B. (2005). Sensitivity of the Landsat enhanced wetness difference index (EWDI) to temporal resolution, *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 32, No. 2, pp.149–152.

Frantz et al., 2016 – Frantz D., Röder A., Udelhoven T., Schmidt M. (2016). Forest Disturbance Mapping Using Dense Synthetic Landsat/MODIS Time-Series and Permutation-Based Disturbance Index Detection, *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 4, pp. 277–299.

Gerylo et al., 2002 – Gerylo G.R., Hall R.J., Franklin S.E., Smith L. (2002). Empirical relations between Landsat TM spectral response and forest stands near Fort Simpson, Northwest Territories, Canada, *Can. J. Rem. Sens*, Vol. 28, No.1. pp. 68–79.

Giri, Muhlhausen, 2005 – Giri C., Muhlhausen J. (2008). Mangrove Forest Distributions and Dynamics in Madagascar (1975–2005), *Sensors*, No. 8, pp. 2104–2117.

Hall et al., 2006 – Hall, R.J., Skakun, R.S., Arsenault, E.J., Case, B.S. (2006). Modeling forest structure attributes using Landsat ETM+ data: application to mapping of aboveground biomass and stand volume, *Forest Ecology and Management*, Vol. 225, No. 1-3, pp. 378–390.

Healey et al., 2005 – Healey S., Cohen W. B., Zhiqiang Y., Krankin O.N. (2005). Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 97, No. 3, pp. 301–310.

Jing et al., 2009 – Jing X., Wang J., Huang W., Liu L.Y., Wang J. (2009). D. Study on forest vegetation classification based on multi-temporal remote sensing images, *Computer and Computing Technologies in Agriculture*, 2009, Vol. 1, pp.115–123.

King et al., 2005 – King D. J., Olthof I., Pellikka K. E., Seed E. D., Butson C. (2005). Modelling and Mapping Damage to Forests from an Ice Storm Using Remote Sensing and Environmental Data, *Natural Hazards*, Vol. 35, No. 3, pp. 321–342.

Leon et al., 2012 – Leon J.R.R. van Leeuwen W.J.D., Casady G.M. (2012). Using MODIS-NDVI for the Modeling of Post-Wildfire Vegetation Response as a Function of Environmental Conditions and Pre-Fire Restoration Treatments. *Remote sensing*, Vol. 4, pp. 598–621.

Lisetskii et al., 2016 – Lisetskii F. N., Tokhtar V. K., Ostapko V. M., Prykhodko S. A. Petrunova T. V. (2016). Regularities and Features of Differentiation and Anthropogenic Transformation of Steppe Vegetation, *Terrestrial Biomes: Geographic Distribution, Biodiversity and Environmental Threats*. Editors: Marlon Nguyen. USA, Nova Science Publishers, Inc., Chapter 4. pp. 103–126.

Lu et al., 2004 – Lu D., Mausel P., Batistella M., Moran E. (2004). Multitemporal spectral mixture analysis for Amazonian land-cover change detection, *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, pp. 87–100.

Lu et al., 2004 – Lu D., Mausel P., Brondzio E., Moran E. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM Spectral responses in the Brazilian Amazon Basin, *Forest Ecology and Management*, Vol. 198, No. 1–3, pp. 149–167.

Lutz et al., 2008 – Lutz D.A., Washington-Allen R. A., Shugart H.H. (2008). Remote sensing of boreal forest biophysical and inventory parameters: a review, *Canadian Journal Remote Sensing*, Vol. 34, No. 2, pp. 286–313.

Michishita et al., 2012 – Michishita R., Xu B., Gong P. (2012). Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 33, No. 11, pp. 3373–3402.

Phua, Saito, 2003 – Phua M., Saito H. (2003). Estimation of biomass of a mountainous tropical forest using Landsat TM data, *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 29, No. 4. pp. 429–440.

Pu et al., 2003 – Pu R., Xu B., Gong P. (2003). Oakwood crown closure estimation by unmixing Landsat TM data, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 24, No. 22. pp. 4433–4445.

Samimi, Kraus, 2004 – Samimi C., Kraus T. (2004). Biomass estimation using Landsat-TM and ETM+. Towards a regional model for Southern Africa, *GeoJournal*, Vol. 59, No. 3. pp. 177–187.

Schroeder et al., 2007 – Schroeder T.A., Cohen W.B., Yang Z. (2007). Patterns of forest regrowth following clearcutting in western Oregon as determined from a Landsat time-series, *Forest Ecology and Management*, No. 243, pp. 259–273.

Song et al., 2007 – Song C., Schroeder T.A., Cohen W.B. (2007). Predicting temperate conifer forest successional stage distributions with multitemporal Landsat Thematic Mapper imagery, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 106. pp. 228–237.

Trigg et al., 2006 – Trigg S.N., Curran L. M., McDonald A. K. (2006). Utility of Landsat 7 satellite data for continued monitoring of forest cover change in protected areas in Southeast Asia, *Singapore Journal of Tropical Geography*, 2006, Vol. 27, No. 1, pp.49–66.

Vogelmann et al., 2009 – Vogelmann J.E., Tolk B., Zhu Z. (2009). Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, pp. 1739–1748.

Wilson, Sader, 2002 – Wilson E.H., Sader S.A. (2002). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 80, pp. 385–396.

УДК 528.88

Влияние нарушенности лесных экосистем на динамику их спектрально-яркостных характеристик

Эдгар Аркадьевич Терехин ^{a, *}

^a Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация

Аннотация. Нарушенность лесных экосистем является одним из ключевых критериев, характеризующих текущее состояние лесных массивов. В статье изложены результаты анализа спектрально-отражательных свойств лесных экосистем с разной степенью нарушенности верхнего яруса, полученные на основе исследования лесов лесостепной зоны, расположенных на территории Белгородской области. На основе данных Landsat TM оценена динамика спектрально-отражательных характеристик лесных насаждений путем анализа коэффициентов спектральной яркости в средней инфракрасной зоне (1,55-1,75 мкм) и яркостной компоненты (Brightness) спектральных преобразований Tasseled Cap. Спектральный отклик изучен для 6 категорий нарушенности лесных экосистем. Увеличение значений обоих спектральных показателей связано с ухудшением состояния древостоя, уменьшение обусловлено повышением сомкнутости, либо появлением новых участков леса. Ухудшение состояния проявляется в усыхании древостоя, его изреживании, либо полном исчезновении вследствие воздействия природных или антропогенных факторов. Установлено, что наибольшие временные изменения в спектральных показателях характерны для разрушенных и культурных лесных насаждений. Увеличение степени нарушенности лесных экосистем сопровождается ростом разности значений обоих спектральных показателей за конечную и начальную оцениваемую дату. По степени нарастания отличия спектрального отклика от других категорий лесные экосистемы располагаются в следующий ряд: культурные, разрушенные, сильнонарушенные, среденарушенные, слабонарушенные.

Ключевые слова: лесные массивы, нарушенность экосистем, дистанционное зондирование, Landsat, геоинформационные технологии, юго-запад Среднерусской возвышенности.

* Корреспондирующий автор

Адреса электронной почты: terekhin@bsu.edu.ru (Э.А. Терехин)