

УДК 528.88

DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-210-220

Многолетняя динамика спектрально-отражательных свойств участков лесовосстановления в лесах юга Среднерусской возвышенности

Терехин Э.А.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы 85
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа многолетней динамики спектрально-отражательных признаков на участках лесовозобновления бывших сплошнолесосечных рубок. Оценка спектрального отклика выполнена на основе разновременных данных Landsat 1985–2015 гг. в различных диапазонах спектра. Исследование проведено для широколиственных лесов, типичных для юга Среднерусской возвышенности. Выполнено сравнение спектрального отклика лесных участков, отличающихся доминирующей породой. Для лесных массивов с преобладанием в верхних ярусах дуба или ясеня не выявлено статистически значимых различий в инфракрасных коэффициентах спектральной яркости. В инфракрасных диапазонах спектра (SWIR1 и SWIR2) установлена тенденция к последовательному снижению отражательных признаков по мере формирования лесных сообществ на бывших вырубках. Формирование насаждений возрастом 23–25 лет приводит к снижению на 15 % отражательных характеристик в диапазоне 1,55–1,75 мкм и на 30 % – в диапазоне 2,09–2,35 мкм. Увеличение возраста лесных насаждений приводит к снижению коэффициентов вариации спектральных признаков.

Ключевые слова: лесные насаждения, лесовосстановление, Среднерусская возвышенность, лесостепь, спектрально-отражательные признаки, Landsat

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-20018

Для цитирования: Терехин Э.А. 2020. Многолетняя динамика спектрально-отражательных свойств участков лесовосстановления в лесах юга Среднерусской возвышенности. Региональные геосистемы, 44(2): 210–220. DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-210-220

Spectral response dynamics of the reforestation sites in forests of the south of Central Russian Upland

Edgar A. Terekhin

Belgorod National Research University,
85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

Abstract. The study of reforestation processes on clear cutting is one of the key tasks in monitoring forest lands. It is especially relevant for territories in which significant areas of forests have been covered by felling in the past or present. The results of spectral response dynamics analysis of the former clean felling due to reforestation are presented. Spectral response was estimated based on Landsat data from 1985–2015 in various spectral ranges. The study was conducted for broad-leaved forests typical of the south of the Central Russian Upland. The spectral response of forest areas that differ in the main forest-forming species is compared. For forests with a predominance of oak or ash in the upper tiers, no statistically significant differences were found in the infrared spectral ranges. In the infrared ranges (SWIR1 and SWIR2), a tendency toward a decrease in reflection due to the formation of forest stands was revealed. The formation of stands 23–25 years old leads to a 15 % decrease in reflectance in the range of 1,55–1,75 μm and by 30 % in the range of 2,09–2,35 μm . An increase in the age

of forest stands on clear-cutting leads to a decrease in the coefficients of variation of reflective features. The greatest decrease in reflectances is observed in the first 3–4 years after the start of the reforestation process.

Keywords: forest stands, reforestation, Central Russian Upland, forest-steppe, spectral response, Landsat

Acknowledgements: The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-35-20018

For citation: Terekhin E.A. 2020. Spectral response dynamics of the reforestation sites in forests of the south of Central Russian Upland. *Regional Geosystems*, 44(2): 210–220 (in Russian). DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-2-210-220

Введение

Исследование процессов восстановления лесных сообществ на местах сплошных лесосечных рубок является одной из ключевых задач в анализе состояния лесных земель. Оно особенно актуально для территорий, на которых в прошлом или настоящем рубками были охвачены значительные участки лесных массивов.

Разновременные спутниковые данные могут выступать одним из эффективных инструментов в мониторинге процессов лесовозобновления [Жири́н и др., 2004; Белова и др., 2015], так как они дают возможность построения непрерывных рядов спектрально-отражательных признаков, связанных с состоянием лесных экосистем. При этом возникает необходимость предварительного анализа спектрального отклика, который для разных типов лесных сообществ может иметь свои особенности, обусловленные породным составом, фенологией и другими причинами [Харин, Татешин, 2003; Eklundh et al., 2011].

К настоящему времени проведен ряд исследований, характеризующих возможности разновременной спутниковой съемки для анализа восстановления лесных экосистем, расположенных в различных природных зонах [Жири́н и др., 2011; Franks et al., 2013; Курбанов и др., 2013; Schmidt et al., 2015]. Наибольшее число исследований сосредоточены на лесах лесной зоны, охватывающей территории смешанных и хвойных лесных массивов [Schroeder et al., 2007; Кардаков и др., 2013], а также лесах тропических зон [DeVries et al., 2015]. Для территорий, где леса не являются доминирующим компонентом растительного покрова, например, лесостепи, подобных исследований проводится значительно меньше.

Леса юга Среднерусской возвышенности (территория Белгородской области) расположены в природной зоне лесостепи. В древостое доминируют дубовые лесные насаждения. Нагорные дубравы являются региональным типом лесных экосистем и составляют основную часть лесных массивов.

До начала 1990-х гг. в наиболее крупных лесных массивах региона проводились сплошные лесосечные рубки, на участках которых в настоящее время происходят процессы лесовосстановления. При этом в настоящее время, в соответствии с законодательством, рубки в промышленных масштабах в лесах области не проводятся. Многочисленные участки лесовосстановления обуславливают задачу оценки их состояния, которая в свою очередь делает актуальной изучение спектрально-отражательных свойств бывших сплошных рубок.

Цель исследования состоит в анализе многолетней динамики спектрально-отражательных признаков на участках лесовозобновления бывших сплошных лесосечных рубках. В рамках исследования изучены коэффициенты спектральной яркости насаждений с преобладанием в древостое дуба и ясеня, многолетняя динамика спектральных признаков, происходящая в первые десятилетия после начала процесса лесовозобновления.

Объекты и методы исследования

Для проведения экспериментального исследования было изучено около 400 лесных участков, расположенных в лесах юга Среднерусской возвышенности и включающих типичные для региона широколиственные лесные насаждения (табл. 1). Для каждого из них

была собрана полная лесотаксационная информация с данными, характеризующими лесные насаждения по состоянию на 2014 г.

На их основе была сформирована выборка, позволившая проанализировать многолетнюю динамику спектрально-отражательных свойств участков лесовозобновления, расположенных на местах бывших сплошных лесосечных рубок, проводившихся в середине 1980-х гг.

Таблица 1
Table 1

Характеристики проанализированных лесных участков
Parameters of the analyzed forest areas

Класс возраста	Средняя площадь, га	Число объектов	Общая площадь, га
1	2,8	37	105,2
2	4,7	135	635,5
3	9,5	51	485,1
4	10,9	56	609,5
5	21,6	69	1489,8
6	22,1	43	951,9
Всего	10,9	391	4276,9

Для анализируемых лесных выделов с использованием программы ArcGIS была подготовлена геоинформационная база данных, включающая их контуры в векторном формате и атрибутивную составляющую в виде таксационных и лесорастительных характеристик.

Учитывая, что в верхних ярусах лесных насаждений, типичных для региона, доминируют дуб и ясень (преимущественно, дуб), спектральные свойства были изучены для участков лесовозобновления с преобладанием каждой из этих пород. Для этой цели были сформированы подвыборки, включающие лесные выделы, на которых проводились сплошные рубки в 1984–1985 гг.

По состоянию на 2014 г. участки сплошных лесосечных рубок с преобладанием дуба характеризовались следующими параметрами: средний возраст 29–30 лет, средняя высота 9,5 м. Для насаждений с доминированием ясеня средний возраст в 2014 г. составлял 29–30 лет, средняя высота 9,2 м.

Анализ многолетних данных спектрально-отражательных признаков был выполнен на основе разновременных данных Landsat TM 1985–2010 гг. Снимки Landsat (источник данных <https://earthexplorer.usgs.gov/>) имеют пространственное разрешение 30 м/пиксель, 6 основных спектральных каналов и характеризуются оптимальным сочетанием параметров, что позволяет их использовать при анализе многолетних изменений в лесах [Healey et al., 2005; Baumann et al., 2014; Potapov et al., 2015].

В исследовании был охвачен максимально возможный промежуток времени, охватываемый съемкой с данного сенсора на территории исследования. Кроме данных Landsat TM, для дополнительного анализа были использованы также более поздние снимки с сенсоров Landsat ETM+ и Landsat OLI. При этом основной анализ многолетней динамики был выполнен на основе данных с Landsat TM. Соответствующее условие было выполнено в связи с тем, что для сравнения межгодовых изменений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) желательно использовать данные с одной и той же съемочной аппаратуры. Сенсоры Landsat TM, ETM+ и OLI имеют примерно одинаковые диапазоны каналов съемки, но по охвату длин волн они немного различны. Эти различия не являются проблемой для автоматизированного картографирования ряда характеристик покрытых лесом земель [Li et al., 2014; Mancino et al.,

2020], но учитывая, что на некоторых стадиях формирования лесных сообществ межгодовые изменения КСЯ могут быть очень незначительны, что повышало вероятность их выявления были использованы только однотипные данные Landsat TM.

Наиболее позднее безоблачное изображение Landsat TM августа месяца удалось подобрать на 2008 г. Поэтому для увеличения продолжительности анализируемого периода кроме снимков Landsat TM были задействованы снимки Landsat ETM+/OLI, спектральные яркости которых использовались для иллюстрации фактического состояния лесов, но при этом в основном исследовании они не применялись.

Сформированная подборка снимков включала изображения периода 1985–2015 гг. (табл. 2), но основной анализ был выполнен на основе снимков Landsat TM 1985–2008 гг. Для минимизации фенологических различий разновременные снимки подбирали на максимально близкие сроки. Максимальное число безоблачных снимков удалось подобрать на августовский период. На земной поверхности все изображения соответствовали ячейке Path (колонка) 177, Row (ряд) 25 в системе WRS-2, используемой для определения спутниковых сцен Landsat.

Все изображения прошли геометрическую проверку, а также атмосферную и радиометрическую коррекцию с переводом в безразмерные коэффициенты спектральной яркости, что было необходимым условием корректного сравнения межгодовых изменений спектрально-отражательных свойств.

Таблица 2
Table 2

Параметры снимков, используемых для изучения процессов лесовосстановления
Remote sensing data parameters used to study reforestation processes

Сенсор	Дата получения	Сенсор	Дата получения
Landsat TM	29.08.1985	Landsat TM	24.08.1997
Landsat TM	13.08.1988	Landsat TM	22.08.2000
Landsat TM	24.08.1989	Landsat TM	12.08.2008
Landsat TM	11.08.1990	Landsat ETM+	29.08.2011
Landsat TM	16.08.1992	Landsat ETM+	24.08.2015
Landsat TM	25.08.1995	Landsat ETM+	16.08.2018

Для анализа были использованы диапазоны из инфракрасной спектральной области: NIR (0,75–0,90 мкм), SWIR1 (1,55–1,75 мкм), SWIR2 (2,09–2,35 мкм). Выбор соответствующих каналов обусловлен тем, что инфракрасные коэффициенты спектральной яркости, в особенности в диапазоне 1,55–1,75 мкм, характеризуются высокой теснотой связи с возрастом и высотой лесных насаждений [Терехин, 2012], в связи с чем было высказано предположение об их высокой информативности для анализа процессов лесовозобновления.

Исследуемые спектральные диапазоны соответствуют каналам 4, 5, 7 сенсора Landsat TM. Значения спектральных признаков были вычислены для каждого лесного выдела методом зональной статистики в программе ERDAS IMAGINE, т.е. вычисляли среднее значение КСЯ, усредненное в пределах его контуров. Таким образом, была сформирована выборка, включающая данные о состоянии участков лесовозобновления и соответствующих им многолетних значениях спектрально-отражательных характеристик.

На заключительном этапе были изучены статистические параметры и выполнен статистический анализ многолетней динамики спектрально-отражательных свойств. На этом

этапе выполнили сравнение отражательных признаков насаждений с преобладанием в верхних ярусах дуба и ясеня, статистический анализ многолетних изменений коэффициентов спектральной яркости и тенденций их динамики, обусловленных процессами лесовозобновления на бывших вырубках.

Результаты и обсуждение

Формирование новых лесных насаждений на местах сплошных лесосечных рубок в первые десятилетия после начала лесовозобновления сопровождается последовательным снижением коэффициентов спектральной яркости диапазонов SWIR1 и SWIR2, охватывающих волны 1,55–1,75 мкм и 2,09–2,35 мкм. Данный процесс отчетливо просматривается на снимках Landsat в комбинации каналов 7 (SWIR2) – 5 (SWIR1) – 3 (RED) (рис. 1).

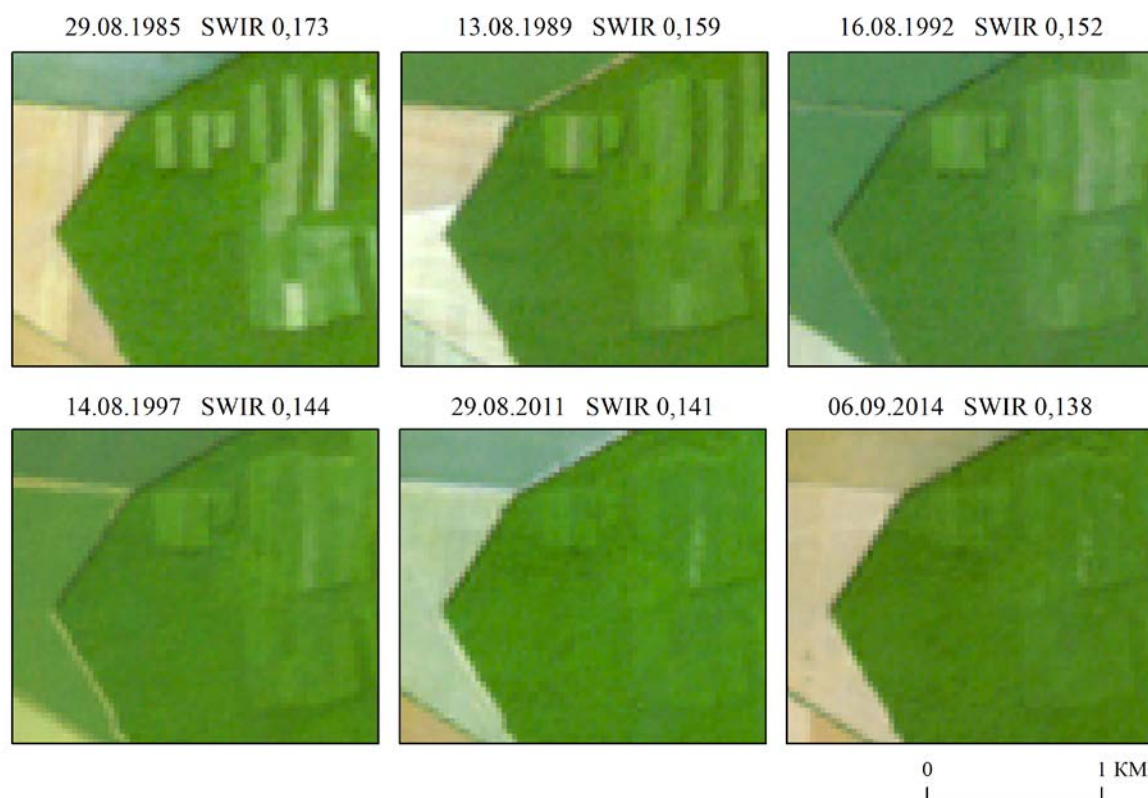


Рис. 1. Пример изменения состояния лесных насаждений и динамики коэффициентов спектральной яркости SWIR1-диапазона (1,55–1,75 мкм), измеренных на основе данных Landsat на участках бывших сплошных рубок

Fig. 1. An example of a change in the state of forest stands and the spectral response dynamics of the SWIR1 range (1.55–1.75 μm) measured on former clear-cuts using Landsat data

На рисунке 1 видно, что на 25-й год после начала восстановления насаждений на рубках на снимках они практически не отличаются от остальных территорий, покрытых лесными массивами.

На основе полученных данных установлено отсутствие статистически значимых различий между насаждениями с доминированием дуба или ясеня в древостое. Соответствующая особенность характерна для всех трех исследуемых диапазонов. Причиной этого могут быть фактическая близость значений спектральных признаков дубовых и ясеневых насаждений, измеренных по снимкам Landsat TM, но это может быть связано также с тем, что в регионе и аналитической выборке в подавляющем большинстве присутствовали смешанные насаждения. В них одновременно присутствовали и дуб, и ясень, но с определенным доминированием той или иной породы.

Проведенная количественная оценка позволила установить особенности динамики отражательных свойств, обусловленных восстановлением лесных насаждений, в каждом исследуемом канале. В NIR-диапазоне не выявлено четкой зависимости изменений отражательных признаков от времени, прошедшего с начала лесовозобновления на рубках (рис. 2). Но в целом наблюдается тенденция к увеличению значений КСЯ до формирования 13-летних насаждений (1997 г.).

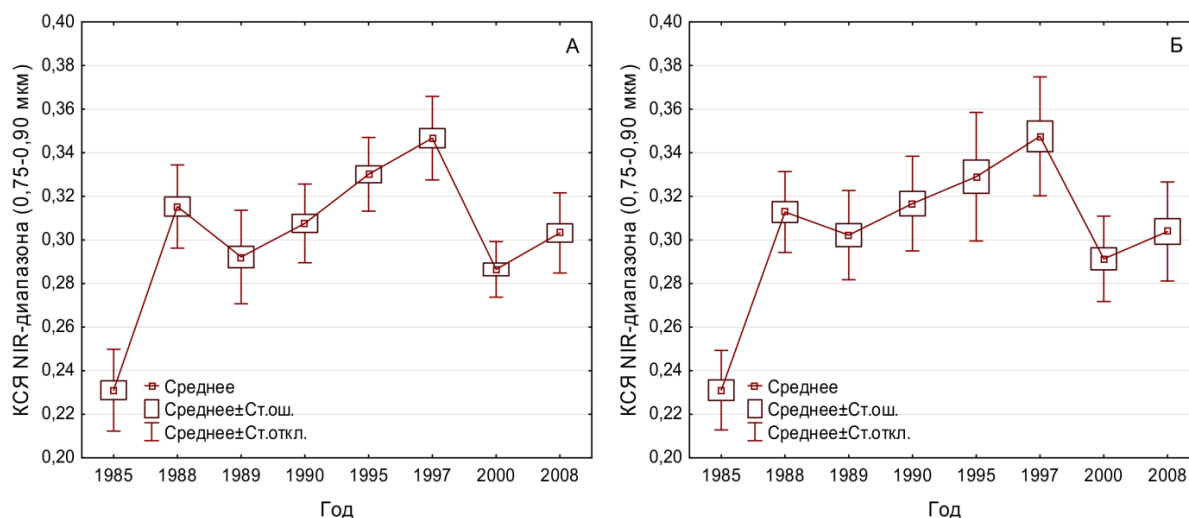


Рис. 2. Многолетняя динамика коэффициентов спектральной яркости NIR диапазона (0,75–0,90 мкм) на участках восстанавливающихся сплошных рубок 1984–1985 гг. для лесных насаждений с преобладанием дуба (А) и ясеня (Б)

Fig. 2. Long-term dynamics of the spectral response (0,75–0,90 μm) in the clear-cutting areas of 1984–1985 for forest stands with a predominance of oak (А) and ash (Б)

Для многолетней динамики SWIR1-диапазона характерна более четкая динамика. По мере формирования насаждений на сплошных вырубках происходит снижение коэффициентов спектральной яркости (рис. 3).

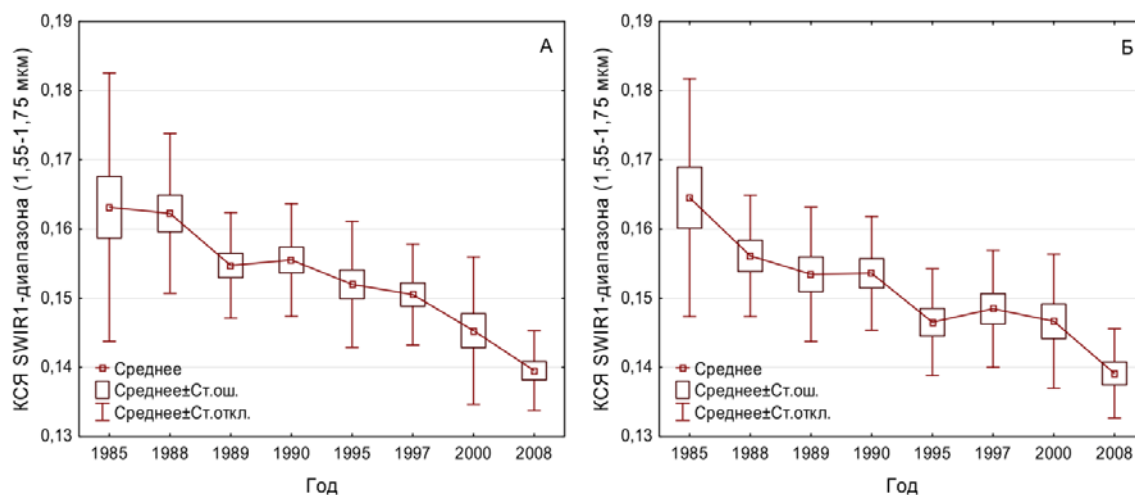


Рис. 3. Многолетняя динамика коэффициентов спектральной яркости SWIR1 диапазона (1,55–1,75 мкм) на участках восстанавливающихся сплошных рубок 1984–1985 гг. для лесных насаждений с преобладанием дуба (А) и ясеня (Б)

Fig. 3. Long-term dynamics of the spectral response (1,55–1,75 μm) in the clear-cutting areas of 1984–1985 for forest stands with a predominance of oak (А) and ash (Б)

Вместе с этим наблюдается и понижение его коэффициента вариации (табл. 3), диагностирующего повышение однородности древесного полога. Для насаждений с преобладанием дуба в исследуемый период зафиксировано снижение КСЯ на 14,1 % от начальной величины. Для насаждений с преобладанием ясеня это снижение составило 15,7 %. В среднем снижение значений КСЯ произошло на 15 % от начального уровня.

Следует отметить, что тенденция снижения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона установлена на протяжении всего анализируемого периода, поэтому понижение КСЯ, по всей видимости, будет происходить и в дальнейшем, достигая значений, соответствующих сомкнутому средневозрастным лесным насаждениям.

Таблица 3
Table 3

Многолетняя динамика коэффициентов спектральной яркости диапазона SWIR1
восстанавливаемых сплошных рубок 1984 г.
Long-term dynamics of SWIR1 reflectances of clear-cutting, carried out in 1984

Год	Преобладание дуба			Преобладание ясеня		
	Среднее	Ст. откл.	Коэф. вар., %	Среднее	Ст. откл.	Коэф. вар., %
1985	0,163	0,019	11,7	0,165	0,017	10,3
1988	0,162	0,012	7,4	0,156	0,009	5,8
1989	0,155	0,008	5,2	0,153	0,010	6,5
1990	0,156	0,008	5,1	0,154	0,008	5,2
1995	0,152	0,009	5,9	0,147	0,008	5,4
1997	0,151	0,007	4,6	0,148	0,008	5,4
2000	0,145	0,011	7,6	0,147	0,010	6,8
2008	0,140	0,006	4,3	0,139	0,006	4,3

Многолетняя динамика SWIR2 диапазона, так же, как и динамика SWIR1 диапазона, характеризуется снижением его значений по мере формирования насаждений на участках сплошных рубок (рис. 4).

Тем не менее, необходимо отметить и ряд существенных отличий от динамики SWIR1 диапазона. Во-первых, для них характерно более существенное снижение коэффициентов спектральной яркости в анализируемый период, составляющее в среднем 34 % от начального уровня. Во-вторых, для диапазона SWIR2 наблюдается не постепенное, а резкое снижение коэффициентов спектральной яркости в первые 3–4 года после проведения рубки и начала процесса лесовосстановления, что видно на рис. 4. В-третьих, его коэффициенты спектральной яркости всех исследуемых лет характеризуются более высокими коэффициентами вариации (табл. 4), чем КСЯ диапазона SWIR1.

В остальном же коэффициенты отражения диапазона 2,09–2,35 мкм показали такие же особенности динамики, как и коэффициенты отражения диапазона 1,55–1,75: последовательное снижение абсолютных величин и вариальности по мере формирования лесных насаждений на участках сплошных рубок.

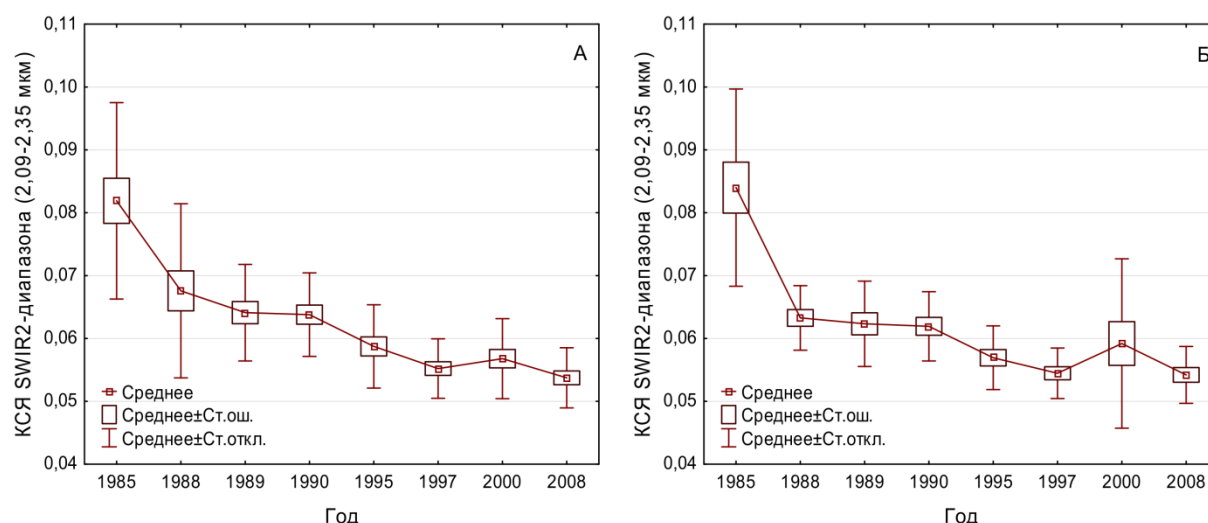


Рис. 4. Многолетняя динамика коэффициентов спектральной яркости SWIR2 диапазона (2,09–2,35 мкм) на участках восстанавливающихся сплошных рубок 1984–1985 гг. для лесных насаждений с преобладанием дуба (А) и ясеня (Б)

Fig. 4. Long-term dynamics of the spectral response (2,09–2,35 μm) in the clear-cutting areas of 1984–1985 for forest stands with a predominance of oak (А) and ash (Б)

Таблица 4
Table 4

Многолетняя динамика коэффициентов спектральной яркости диапазона SWIR2 восстанавливающихся сплошных рубок 1984 г.
Long-term dynamics of SWIR2 reflectances of clear-cutting, carried out in 1984.

Год	Преобладание дуба			Преобладание ясеня		
	Среднее	Ст. откл.	Коэф. вар., %	Среднее	Ст. откл.	Коэф. вар., %
1985	0,082	0,016	19,5	0,084	0,016	19,0
1988	0,068	0,014	20,6	0,063	0,005	7,9
1989	0,064	0,008	12,5	0,062	0,007	11,3
1990	0,064	0,007	10,9	0,062	0,006	9,7
1995	0,059	0,007	11,9	0,057	0,005	8,8
1997	0,055	0,005	9,1	0,054	0,004	7,4
2000	0,057	0,006	10,5	0,059	0,013	22,0
2008	0,054	0,005	9,3	0,054	0,005	9,3

Таким образом, коэффициенты спектральной яркости инфракрасных диапазонов 1,55–1,75 мкм и 2,09–2,45 мкм показали тенденцию к снижению по мере развития процессов лесовосстановления на участках бывших сплошных лесосечных рубок.

Заклучение

С использованием материалов разновременной спутниковой съемки Landsat установлены особенности спектрального отклика восстанавливающихся сплошных рубок, ти-

пичных для лесов юга Среднерусской возвышенности. В 5-м (SWIR1) и 7-м (SWIR2) каналах сенсора Landsat TM выявлена тенденция к последовательному снижению коэффициентов спектральной яркости вследствие формирования на вырубках лесных насаждений. К 23–25 годам после начала процесса лесовозобновления и формирования насаждений высотой от 8 до 9 м установлено 15 % снижение КСЯ в SWIR1 диапазоне и 30 % снижение в SWIR2. При этом в диапазоне 1,55–1,75 мкм наблюдается меньшая вариация спектральных признаков внутри исследуемых временных срезов. Наибольшее снижение коэффициентов отражения наблюдается в первые 3–4 года после начала процесса лесовозобновления.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки лесовосстановления на местах сплошных рубок, типичных для лесов лесостепи Среднерусской возвышенности.

Список литературы

1. Белова Е.И., Ершов Д.В. 2015. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat. Лесоведение, 5: 339–345.
2. Жирин В.М., Князева С.В., Эйшлина С.П. 2011. Дистанционное сопровождение лесообразовательного процесса в послерубочных таежных лесах Русской равнины. Лесоведение, 6: 29–38.
3. Жирин В.М., Сухих В.И., Шаталов А.В., Бутусов О.Б., Эйшлина С.П. 2004. Использование космических снимков для изучения динамики зарастания гарей. Исследование Земли из космоса, 5: 69–76.
4. Кардаков А.А., Кивисте А.К., Петерсон У.К. 2013. Формирование яркостных значений восстанавливающихся сплошных рубок на зимних изображениях среднего пространственного разрешения. Исследование Земли из космоса, 1: 48–59.
5. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А. 2013. Оценка лесных гарей Чувашии методами дистанционного зондирования. Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии, 54: 80–87.
6. Терехин Э.А. 2012. Анализ каналов спутниковых данных LANDSAT TM для оценки характеристик лесных насаждений Лесостепной провинции Среднерусской возвышенности. Исследование Земли из космоса, 2: 53–61.
7. Харин Н.Г., Татеиши Р. 2003. Применение снимков NOAA/AVHRR для изучения фенологии лесов России. Лесоведение, 2: 10–17.
8. 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, 143: 171–179.
9. 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, 169: 320–334.
10. Earthexplorer. 2019. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 03/06/2020).
11. Eklundh L., Jin H., Schubert P., Heliasz M., Guzinski R. 2011. An optical sensor network for vegetation phenology monitoring and satellite data calibration. Sensors, 11 (8): 7678–7709.
12. Franks S., Masek J.G., Turner M.G. 2013. Monitoring forest regrowth following large scale fire using satellite data - A case study of Yellowstone National Park, USA. European Journal of Remote Sensing, 46: 561–569.
13. 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, 97: 301–310.
14. Li P., Jiang L., Feng Z. 2014. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. Remote Sensing, 6 (1): 310–329.
15. Mancino G., Ferrara A., Padula A., Nolè A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. Remote Sensing, 12 (2): 291.

16. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. 2015. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 159: 28–43.

17. Schmidt M., Lucas R., Bunting P., Verbesselt J., Armston J. 2015. Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 158: 156–168.

18. 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*, 243: 259–273.

References

1. Belova E.I., Ershov D.V. 2015. Assessing reforestation on clear cuts based on Landsat time series. *Lesovedenie*, 5: 339–345 (in Russian)

2. Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P. 2011. Remote Maintenance of Forest-Forming Process in Taiga Forests After Their Cutting in the Russian Plain. *Lesovedenie*, 6: 29–38. (in Russian)

3. Zhirin V.M., Sukhikh V.I., Shatalov A.V., Butusov O.B., Eydlina S.P. 2004. Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov dlya izucheniya dinamiki zarastaniya garey [Application of Space Images for Analysis of Burnt Forest Areas Regeneration Dynamics]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 5: 69–76.

4. Kardakov A.A., Kiviste A.K., Peterson U.K. 2013. Radiance Changes of Regenerating Clear-Felled Areas Using Moderate Spatial Resolution Winter Images. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1: 48–59 (in Russian)

5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A. 2013. Assessment of burnt-out forest of Chuvashia by remote sensing method. *Vestnik Irkutskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 54: 80–87 (in Russian)

6. Terekhin E.A. 2012. The Analysis of Channels LANDSAT TM Data for the Forest Parameters Estimation of the Forest: Steppe Province of Central Russian Upland. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2: 53–61. (in Russian)

7. Kharin N.G., Tateishi R. 2003. Application of NOAA/AVHRR Images for Studies of Forest Phenology in Russia. *Lesovedenie*, 2: 10–17. (in Russian)

8. 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*, 143: 171–179.

9. 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*, 169: 320–334.

10. Earthexplorer. 2019. URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (accessed 03/06/2020).

11. Eklundh L., Jin H., Schubert P., Heliasz M., Guzinski R. 2011. An optical sensor network for vegetation phenology monitoring and satellite data calibration. *Sensors*, 11 (8): 7678–7709.

12. Franks S., Masek J.G., Turner M.G. 2013. Monitoring forest regrowth following large scale fire using satellite data - A case study of Yellowstone National Park, USA. *European Journal of Remote Sensing*, 46: 561–569.

13. 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*, 97: 301–310.

14. Li P., Jiang L., Feng Z. 2014. Cross-Comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) Sensors. *Remote Sensing*, 6 (1): 310–329.

15. Mancino G., Ferrara A., Padula A., Nolè A. 2020. Cross-Comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment. *Remote Sensing*, 12 (2): 291.

16. Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. 2015. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 159: 28–43.

17. Schmidt M., Lucas R., Bunting P., Verbesselt J., Armston J. 2015. Multi-resolution time series imagery for forest disturbance and regrowth monitoring in Queensland, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 158: 156–168.

18. 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*, 243: 259–273.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Терехин Эдгар Аркадьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела геоинформатики Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов, доцент кафедры природопользования и земельного кадастра Института наук о Земле Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Edgar A. Terekhin, PhD in Geography, Senior Researcher, Department of Geoinformatics, Federal Regional Center for Aerospace and Ground Monitoring of Objects and Natural Resources, Associate Professor, Department of Natural Resources and Land Cadastre, Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia