

Распознавание нарушенных лесных экосистем лесостепи на основе спектрально-отражательных характеристик

Э.А. Терехин¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга
объектов и природных ресурсов,
308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, 85

Аннотация

В статье представлены результаты оценки возможностей дискриминантного анализа для распознавания нарушенных лесных экосистем лесостепной зоны на основе спектрально-отражательных свойств. Предложен новый способ автоматизированного выявления участков нарушенных лесов среди покрытых лесом земель, основанный на дискриминантном анализе величины изменения коэффициентов спектральной яркости в различных зонах спектра. На основе данных с 1836 лесных участков, типичных для лесостепной зоны, вычислены и верифицированы математические зависимости, позволяющие в автоматизированном режиме относить конкретный лесной участок к категории нарушенных лесов или лесов без признаков нарушений. Точность распознавания нарушенных лесных участков составила около 90%. Установлено, что величина изменения коэффициентов спектральной яркости в средней инфракрасной зоне вносит наибольший вклад в распознавание нарушенных лесных массивов среди величин изменения коэффициентов отражения в каналах сенсоров серии Landsat.

Ключевые слова: нарушенные лесные экосистемы, пошаговый дискриминантный анализ, дистанционное зондирование, Landsat, коэффициенты спектральной яркости.

Цитирование: Терехин, Э.А. Распознавание нарушенных лесных экосистем лесостепи на основе спектрально-отражательных характеристик / Э.А. Терехин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43. № 3. – С. 412–418. – DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-3-412-418.

Введение

Выявление нарушенных лесных экосистем является одной из ключевых задач мониторинга лесов. Нарушенность лесных массивов может быть обусловлена влиянием сплошных лесосечных рубок, пожаров или иных факторов.

Изменения в растительном покрове, происходящие вследствие воздействия нарушающих факторов, могут приводить к смене спектрально-отражательных свойств территорий, на которых располагаются лесные экосистемы [1, 2]. В связи с этим анализ изменений отражательных признаков, измеренных по спутниковым данным, представляет интерес с точки зрения детектирования ареалов нарушенности лесных массивов [3].

Как показали исследования [4–7], анализ разновременных спутниковых изображений может быть достаточно успешно применен для выявления изменений в лесах, включая выявление нарушенных лесных участков. Основное ограничение использования спутниковых данных при этом связано с возможностью выявлять только нарушения, затрагивающие верхние ярусы. Обусловлено это тем, что нарушения нижних ярусов, а также лесной подстилки не проявляются на большинстве типов данных дистанционного зондирования, за исключением лидарных. Тем не менее выявление нарушений в верхних ярусах и древостое является одной из первоочередных задач мониторинга лесных земель [8].

К настоящему времени по проблеме выявления нарушений в лесах предложена серия подходов, основанных на количественном анализе спектральных характеристик [9–11]. Тем не менее остаются откры-

тыми ряд вопросов, в первую очередь, связанных с решением проблемы вариабельности отражательных свойств лесных массивов, а также разработки методов, учитывающих региональные особенности лесов [12–13].

В связи с тем, что при проведении сплошных рубок или влиянии верховых пожаров происходят изменения не в одной, а в нескольких различных зонах спектра, изучение возможностей многомерного анализа должно выступать одним из перспективных направлений автоматизированного выявления нарушений в лесах [14].

На территории лесостепной зоны Центрального Черноземья доминируют широколиственные леса, основу породного состава которых составляет дуб и ясень. Леса региона, несмотря на то, что не являются преобладающим по площади типом угодий, играют ключевую экологическую роль, выполняя водоохраные, защитные и другие функции.

В отличие лесов таежной зоны, где проводятся промышленные лесозаготовки, для лесов лесостепи характерны нарушения преимущественно менее крупного масштаба. Сплошные рубки, выступающие одним из основных нарушающих факторов, характеризуются меньшими размерами, чем в таежной зоне, что обуславливает необходимость применения снимков относительно высокого пространственного разрешения для их выявления, а также усложняет разработку способов их обнаружения.

Дискриминантный анализ является одним из методов многомерного статистического анализа, сущность которого заключается в поиске переменных, эффективно разделяющих исследуемые классы объ-

ектов, и расчете классификационных функций, вычисляющих классификационный вес объекта, на основе которого он относится к определенной категории. Применительно к проблеме выявления нарушенных лесов независимыми переменными в функциях классификации могут выступать значения отражательных характеристик, измеренных в различных диапазонах спектра или величины их изменения.

Цель настоящего исследования заключалась в оценке возможностей автоматизированного распознавания нарушенных лесных экосистем лесостепной зоны с применением дискриминантного анализа на основе величины изменения коэффициентов спектральной яркости, измеренных в различных диапазонах электромагнитного излучения.

1. Материалы и методы

Объектом исследования выступали экосистемы широколиственных лесов, расположенные на территории Белгородской, Воронежской и Курской областей. Все исследуемые леса располагались в природно-климатических условиях лесостепной зоны.

В настоящей работе под нарушенными лесными массивами мы понимали леса, верхние ярусы которых были нарушены в период 2000–2018 гг. вследствие сплошных рубок, пожаров, усыханий или иных факторов.

Основная рабочая гипотеза состояла в том, что спектрально-отражательные признаки нарушенных лесов, измеренные в различных зонах спектра, могут быть использованы для их автоматизированного выявления среди лесных массивов. Нами было высказано предположение, что для выявления ареалов нарушенных лесов региона могут быть эффективно применены величины разности коэффициентов спектральной яркости, рассчитанные на основе снимков за начальную и конечную анализируемую даты.

Экспериментальная часть исследования включала следующие ключевые этапы:

- подборка разновременных спутниковых данных, полученных в 2000 г. и 2018 г.;
- радиометрическая калибровка и геометрическая коррекция снимков;
- формирование выборки лесных массивов, нарушенных с начала XXI в. по настоящее время, и лесов без признаков нарушений верхних ярусов за аналогичный промежуток времени;
- создание на основе спутниковых снимков векторного слоя (подробное картографирование) всех отобранных лесных ареалов с разделением лесов на категории: нарушенных в период 2000–2018 гг. и лесов без признаков нарушений;
- вычисление на основе снимков, прошедших радиометрическую калибровку, растров разности коэффициентов спектральной яркости (reflectance);
- расчет значений отражательных характеристик для каждого исследуемого лесного ареала;
- статистический анализ значимости различий величины изменения КСЯ (коэффициентов спектраль-

ной яркости, коэффициентов отражения) для нарушенных и ненарушенных лесных массивов;

- исследование полученной аналитической выборки методом дискриминантного анализа, выявление и анализ спектральных характеристик, вносящих наибольший вклад в разделение нарушенных и ненарушенных лесных ареалов;
- вычисление функций классификации, позволяющих в автоматизированном режиме относить конкретный лесной ареал к категории нарушенных и ненарушенных лесов и оценка их эффективности.

Для изучения возможностей распознавания нарушенных лесных массивов нами были использованы разновременные снимки с сенсоров серии Landsat (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>), имеющие пространственное разрешение 30 м/пиксель и позволяющие выявлять изменения спектральных признаков на площади от 0,4 га.

Данные Landsat были выбраны для исследования в связи с тем, что к настоящему времени архивы этих снимков являются одними из наиболее продолжительных по времени и одновременно характеризуются достаточно высоким пространственным разрешением. Для решения задач анализа многолетних изменений в лесах (несколько десятилетий) разновременные снимки Landsat во многом являются безальтернативным вариантом [15]. Предварительный анализ нарушенных лесных ареалов показал, что они достаточно эффективно выявляются по разновременным изображениям Landsat при визуальном дешифрировании.

Все спутниковые данные были отобраны на основе ряда критериев:

- изображения должны покрывать основную часть наиболее типичных лесных массивов региона, т.е. значительные по площади участки Белгородской, Курской и Воронежской областей, на которых присутствуют как нарушенные, так и ненарушенные лесные массивы;
- снимки должны быть получены в летний период;
- снимки должны быть сделаны в одну и ту же фазу фенологического развития;
- снимки должны характеризоваться отсутствием облачности либо иметь минимальный ее процент.

Исходя из перечисленных критериев, были подобраны снимки августа 2000 г. и 2018 г. (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики спутниковых данных, используемых в исследовании

Path/Row	Сенсор	Дата получения
177025	Landsat TM	22.08.2000
	Landsat OLI	24.08.2018
177024	Landsat ETM+	22.08.2000
	Landsat OLI	24.08.2018
175025	Landsat TM	08.08.2000
	Landsat OLI	26.08.2018

Path (колонка) и Row (ряд) характеризуют расположение снимка в системе WRS-2, используемой для определения местоположения спутниковых сцен Landsat-5,7,8 на земной поверхности.

Для корректного сопоставления состояния лесных массивов в 2000 и 2018 гг. для изображений была выполнена проверка точности наложения, и в отдельных случаях осуществлена геометрическая коррекция.

Все снимки прошли радиометрическую калибровку, в результате которой они были пересчитаны из исходных значений яркости (DN) в значения коэффициентов отражения (или коэффициентов спектральной яркости, reflectance), представляющих безразмерные величины. Выполнение данного этапа было одним из ключевых условий сравнения разновременных значений спектральных характеристик.

Снимки Landsat TM, ETM+, OLI содержат по 6 основных каналов, полученных в различных зонах спектра. Каналы сенсоров TM, ETM+, OLI по охвату длин волн немного отличаются между собой. Однако, как показали исследования [16], спектральные показатели, рассчитанные по этим сенсорам, характеризуются очень тесной корреляцией, в связи с чем разновременные данные с них можно сопоставлять на количественном уровне.

На основе спутниковых данных Landsat 2018 г., а также с привлечением снимков более высокого пространственного разрешения Sentinel-2 (10 м/пиксель) на территории Белгородской, Воронежской и Курской областей в программе ArcGIS было проведено геоинформационное картографирование лесных массивов. Для анализа подбирались наиболее типичные для региона лесные экосистемы, содержащие ареалы лесов, нарушенных в период 2000–2018 гг., и ареалы лесов без признаков нарушений.

В результате был получен векторный слой, охватывающий лесные массивы в разных областях лесостепной зоны Центрального Черноземья. В общей сложности для анализа было отобрано 1944 лесных участка общей площадью 23767,3 га (табл. 2).

Табл. 2. Статистические характеристики проанализированных лесных участков

Область	Средняя площадь, га	Число участков	Общая площадь, га
Белгородская	15,0	672	10106,7
Воронежская	11,9	926	11063,9
Курская	7,5	346	2591,7
Всего	12,2	1944	23762,3

Из 1944 проанализированных лесных участков 723 массива были ареалами лесов, нарушенных в период 2000–2018 гг., и 1221 ареал характеризовался отсутствием признаков нарушения верхних ярусов за аналогичный период. Формирование такой значительной по объему выборки, характеризующей как нарушенные, так и ненарушенные леса, позволило репрезентативно оценить их спектрально-отражательные характеристики.

Исследуемыми спектральными показателями в настоящем исследовании выступала величина изменения коэффициентов отражения лесных массивов в шести диапазонах спектра за период 2000–2018 гг.

Поэтому на следующем этапе были рассчитаны растры разности значений коэффициентов отраже-

ния 2000 и 2018 годов. Они были вычислены для синей, зеленой, красной, ближней инфракрасной и двух средних инфракрасных спектральных зон (1,55–1,75 мкм и 2,09–2,35 мкм). Величины изменений коэффициентов спектральной яркости впоследствии были использованы как переменные для количественного сравнения нарушенных и ненарушенных лесных массивов.

Далее в программе ERDAS Imagine методом зональной статистики на основе подготовленного векторного слоя лесов были рассчитаны величины изменения коэффициентов отражения для каждого лесного ареала с 2000 г. по 2018 г. Эти значения соответственно были вычислены для каждой анализируемой спектральной зоны.

Исходя из того, что космические снимки Landsat имеют пространственное разрешение 30 м/пиксель (что накладывает определенные ограничения для анализа небольших объектов), для статистического анализа спектрально-отражательных характеристик нами были отобраны ареалы лесов площадью более 0,4 га. В итоге общее число проанализированных лесных ареалов составило 1836.

Таким образом, была сформирована выборка, позволяющая сравнить величины изменения КСЯ для нарушенных и ненарушенных лесных массивов, а также исследовать возможность их распознавания методом дискриминантного анализа.

Следующий этап состоял в статистическом анализе данных, который был выполнен в пакете STATISTICA. Статистическая оценка включала вычисление и анализ основных статистических параметров для спектрально-отражательных характеристик лесов, нарушенных в период 2000–2018 гг., и лесов без признаков нарушений, анализ значимости различий КСЯ нарушенных и ненарушенных лесных экосистем на основе Т-критерия Стьюдента. Ключевой этап статистической оценки состоял в выполнении пошагового дискриминантного анализа [17] полученной выборки значений, т.е. в исследовании возможностей автоматизированного распознавания нарушенных лесных экосистем среди лесных массивов на основе их спектрально-отражательных характеристик.

Для его выполнения вся выборка была разделена на две части: обучающую и тестовую. Первая часть использовалась непосредственно для расчета функций классификации, вычисляющих классификационные веса для нарушенных и ненарушенных лесных ареалов. Независимыми переменными в этих функциях выступали величины разности зональных коэффициентов отражения в 2000–2018 гг. Тестовая выборка применялась для оценки эффективности рассчитанных функций и анализе точности распознавания нарушенных лесных ареалов. Эффективность распознавания оценивали на основе матрицы классификации, характеризующей точность дешифрирования (в процентах) нарушенных лесных массивов.

Оценка эффективности конкретных спектральных диапазонов проводилась путем анализа их величин

для нарушенных лесных экосистем и последовательного включения в модель в зависимости от вклада в разделение нарушенных и ненарушенных лесных ареалов.

2. Результаты

По результатам статистического анализа установлено, что средние значения величины изменения (Δ) коэффициентов отражения в период 2000–2018 гг. для лесов, нарушенных за это время, и лесов без признаков нарушений во всех анализируемых зонах спектра (Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2) статистически значимо различны (табл. 3). Т-критерий Стьюдента оказался выше критического значения 1,967 на уровне значимости меньше 0,05 при числе степеней свободы 1834.

С другой стороны, из табл. 3 видно, что в синем (Blue), зеленом (Green) и красном (Red) диапазонах величина изменения коэффициента отражения по абсолютной величине для ненарушенных лесов оказалась заметно выше, чем для нарушенных лесных массивов, из чего можно заключить, что эти диапазоны не информативны для выявления нарушенных лесных ареалов.

В связи с этим синий, зеленый и красный каналы были исключены из дальнейшего анализа.

Табл. 3. Средние значения величины изменения КСЯ и величина Т-критерия Стьюдента для анализируемых категорий лесных массивов

Спектральный показатель	Нарушенные леса	Леса без нарушений	t-знач.
Δ Blue	-0,009	-0,015	19,9
Δ Green	0,001	-0,010	36,5
Δ Red	-0,001	-0,014	31,9
Δ NIR	0,073	0,064	6,2
Δ SWIR1	0,063	0,011	65,2
Δ SWIR2	0,039	0,005	50,2

Величина Т-критерия для средней инфракрасной области SWIR2 (1,55–1,75) наглядно отображена на графике (рис. 1).

Величина изменения КСЯ в диапазоне 1,55-1,75 мкм в 2000-2018 гг.

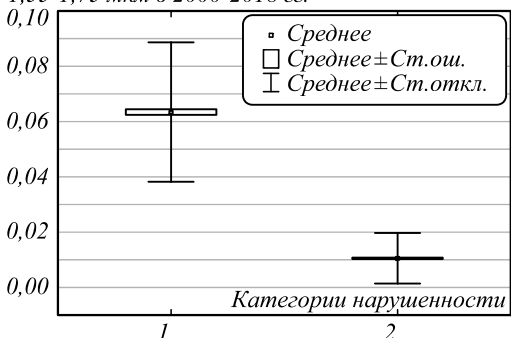


Рис. 1. Статистические параметры величины изменения SWIR-коэффициентов отражения в 2000–2018 гг. для нарушенных (1) и ненарушенных лесов (2)

В случае отсутствия нарушений верхних ярусов коэффициенты отражения лесных массивов старше 60–80 лет (составляющих основу аналитической выборки) практически не изменяются. За период 2000–

2018 г. при отсутствии сплошных рубок возраст лесов увеличился на 18 лет, что могло бы повлиять на их отражательные свойства. Однако, как установлено ранее [11], для лесных массивов этих возрастных групп при увеличении возраста не происходит значительных изменений коэффициентов отражения.

Дополнительное сравнение средних значений величины изменения КСЯ в период 2000–2018 гг. для нарушенных и ненарушенных лесных массивов по критерию Манна–Уитни полностью подтвердило результаты, полученные в результате оценки Т-критерия Стьюдента.

Таким образом, на данном этапе статистического анализа установлено, что средние значения величины изменения коэффициентов отражения в каналах Landsat SWIR1 и SWIR2 с 2000 по 2018 гг. очень существенно различаются для нарушенных и ненарушенных лесных экосистем. Для NIR-канала это различие также статистически значимо, но выражено слабее.

Оценка возможности разделения нарушенных и ненарушенных лесных массивов на основе величины изменения их спектральных характеристик, проведенная методом пошагового дискриминантного анализа, позволила:

- оценить вклад зональных коэффициентов отражения в разделимость нарушенных и ненарушенных лесных экосистем;
- рассчитать функции классификации, позволяющие на основе классификационного веса относить тот или иной лесной ареал к категории нарушенных или ненарушенных лесов;
- оценить методом кросс-проверки на тестовой выборке точность распознавания нарушенных лесных ареалов.

Функции классификации представляют собой линейные уравнения, рассчитывающие классификационный вес. На его основе конкретный лесной ареал относится к категории нарушенных или ненарушенных лесов. Конкретный лесной ареал будет классифицироваться в ту категорию, для которой рассчитанный классификационный вес оказался выше.

По результатам пошагового дискриминантного анализа (табл. 4) переменные были последовательно включены в модель на основе их вклада в разделение нарушенных и ненарушенных лесных ареалов.

Табл. 4. Результаты пошагового дискриминантного анализа величины изменения зональных коэффициентов отражения

Переменная	Шаг	F-вкл.	p-уров.	Число перем.
Δ SWIR1 (x_1)	1	2395,8	0,00	1
Δ NIR (x_2)	2	157,8	0,00	2
Δ SWIR2 (x_3)	3	9,1	0,00	3

Степень вклада конкретной переменной в разделение классов (в нашем случае – нарушенных и ненарушенных лесных ареалов) определяется по величине критерия F-включения. Чем она выше, тем больше вклад переменной в разделение совокупностей.

Наибольшая эффективность (по величине критерия «F-включение») установлена для величины изменения КСЯ в диапазоне SWIR1 (1,55–1,75 мкм). Эта переменная в первую очередь была включена в модель. Степень вклада остальных переменных (Δ NIR и Δ SWIR2) значительно ниже.

Тем не менее, все три переменные были использованы для расчета функций классификации, коэффициенты которых представлены в табл. 5.

Табл. 5. Коэффициенты линейных функций, рассчитывающих классификационные веса для лесов, нарушенных в период 2000–2018 гг., и лесов без признаков нарушений

Спектральный показатель	Нарушенные леса	Ненарушенные леса
Δ SWIR1 (x_1)	240,9	-63,1
Δ NIR (x_2)	140,1	98,3
Δ SWIR2 (x_3)	131,6	227,1
Константа	-16,2	-4,1

Таким образом, функции расчета классификационных весов для разных категорий лесных экосистем выглядели следующим образом:

$$\text{Нарушенные} = 240,9x_1 + 140,1x_2 + 131,6x_3 - 16,2.$$

$$\text{Ненарушенные} = -63,1x_1 + 98,3x_2 + 227,1x_3 - 4,1.$$

Точность распознавания нарушенных лесных экосистем на основе вычисленных функций составила 88,9% на обучающей выборке и 89,6% на тестовой выборке (табл. 6).

По результатам проверки работоспособности вычисленных функций на тестовой выборке из 280 ареалов нарушенных лесов 251 ареал был распознан правильно и 29 ареалов были ошибочно отнесены к категории ненарушенных лесов. При этом из 556 ареалов ненарушенных лесов только 3 ареала были ошибочно отнесены к категории нарушенных лесных экосистем. Таким образом, точность распознавания нарушенных лесных экосистем на основе вычисленных функций классификации составила около 90%.

Табл. 6. Точность распознавания нарушенных и ненарушенных лесных экосистем

Леса	Точность распознавания, %	
	Обучающая выборка	Тестовая выборка
Нарушенные	88,9	89,6
Ненарушенные	99,4	99,5
Всего	95,6	96,2

На наш взгляд, основная проблема распознавания нарушенных лесов связана с высоким стандартным отклонением величины их спектральных характеристик. Оно обусловлено тем, что в эту категорию попадают ареалы лесов, на которых вырубки производились недавно, и ареалы, на которых присутствуют вырубки 18-летней давности. Но одновременный поиск таких ареалов необходим с позиций лесного хозяйства и лесоведения, т.к. эти леса попадают в одну категорию: вырубок и молодняков возрастом до 20 лет.

Расчитанные функции классификации можно применять для автоматизированного выявления ареалов нарушенных лесных экосистем лиственного породного состава, типичных для лесостепи.

Выводы

1. Предложен способ автоматизированного выявления нарушенных лиственных лесных экосистем, типичных для зоны лесостепи. Способ включает геоинформационную и статистическую обработку данных. В основе способа – использование функций классификации, рассчитанных с помощью дискриминантного анализа и позволяющих распознавать лесов нарушенных лесов.

2. В качестве независимых переменных для функций классификации предложено использовать величину изменения коэффициентов отражения в трех зонах спектра: ближней инфракрасной и двух средних инфракрасных. Они соответствуют 4, 5, 7 каналам сенсоров Landsat TM, ETM+ и 5, 6, 7 каналам сенсора Landsat OLI.

3. Точность распознавания нарушенных лесных экосистем на тестовой выборке составила около 90%. Более высокой точности выявления достичь не удалось вследствие наличия очень небольших по площади участков нарушенных лесов.

4. Из исследованных диапазонов спектра наибольший вклад в автоматизированное разделение нарушенных и ненарушенных лесных экосистем вносит величина изменения коэффициентов отражения в диапазоне SWIR1 (1,55–1,75 мкм).

5. Предложенный способ может быть использован для создания карт нарушенных лесных экосистем, типичных для лесостепной зоны. К таким лесам относятся лиственные лесные массивы, в верхних ярусах которых доминирует дуб и ясень.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-00049).

Литература

1. **Барталев, С.А.** Методы использования временных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения для оценки масштабов и динамики вырубок таёжных лесов / С.А. Барталев, Т.С. Курятникова, Х.Ю. Стибиг // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2005. – Т. 2, № 2. – С. 217-227.
2. **Kennedy, R.E.** Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms / R.E. Kennedy, Z. Yang, W.B. Cohen // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Vol. 114, Issue 12. – P. 2897-2910. – DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
3. **Hermosilla, T.** Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics / T. Hermosilla, M.A. Wulder, J.C. White, N.C. Coops, G.W. Hobart // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 170. – P. 121-132. – DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.004.
4. **Елсаков, В.В.** Спектрально-зональные спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов Приполярного Урала / В.В. Елсаков, И.О. Марущак // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 281-286.

5. **Жирин, В.М.** Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение. – 2014. – № 5. – С. 3-12.
6. **Senf, C.** Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe / C. Senf, D. Pflugmacher, P. Hostert, R. Seidl // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing – 2017. – Vol. 130. – P. 453-463. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.004.
7. **Терехин, Э.А.** Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2017. – Т. 14, № 4 – С. 112-124. – DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-112-124.
8. **Исаев, А.С.** Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин // Лесоведение. – 2003. – № 2. – С. 3-9.
9. **Hussain, M.** Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches / M. Hussain, D. Chen, A. Cheng, H. Wei, D. Stanley // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing – 2013. – Vol. 80. – P. 91-106. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006.
10. **Zhu, Z.** Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications / Z. Zhu // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing – 2017. – Vol. 130. – P. 370-384. – DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013.
11. **Терехин, Э.А.** Геоинформационный анализ нарушенности лесных экосистем с применением разновременных спутниковых данных / Э.А. Терехин // Геоинформатика. – 2017. – № 3. – С. 56-65.
12. **Cohen, W.B.** How similar are forest disturbance maps derived from different Landsat time series algorithms? / W.B. Cohen, S.P. Healey, Z. Yang, S.V. Stehman, C.K. Brewer, E.B. Brooks, N. Gorelick, C. Huang, M.J. Hughes, R.E. Kennedy, T.R. Loveland, G.G. Moisen, T.A. Schroeder, J.E. Vogelmann, C.E. Woodcock, L. Yang, Z. Zhu // Forests. – 2017. – Vol. 8, Issue 4. – 98. – DOI: 10.3390/f8040098.
13. **Hislop, S.** A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques / S. Hislop, S. Jones, M. Soto-Berelov, A. Skidmore, A. Haywood, T.H. Nguyen // Remote Sensing of Environment. – 2019. – Vol. 221. – P. 188-197. – DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.025.
14. **Haywood, A.** Mapping disturbance dynamics in wet sclerophyll forests using time series Landsat / A. Haywood, J. Verbesselt, P.J. Baker // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. – 2016. – Vol. 41. – P. 633-641.
15. **Wulder, M.A.** The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction / M.A. Wulder, J.C. White, T.R. Loveland, C.E. Woodcock, A.S. Belward, W.B. Cohen, E.A. Fosnight, J. Shaw, J.G. Masek, D.P. Roy // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 185. – P. 271-283. – DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.032.
16. **Li, P.** Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat-8 operational land imager (OLI) sensors / P. Li, L. Jiang, Z. Feng // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6, Issue 1. – P. 310-329. – DOI: 10.3390/rs6010310.
17. **Халафян, А.А.** СТАТИСТИКА 6. Статистический анализ данных / А.А. Халафян. – Москва: Бином-Пресс, 2007. – 512 с.

Сведения об авторе

Терехин Эдгар Аркадьевич. Кандидат географических наук (2011 г.), старший научный сотрудник Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга Белгородского государственного национального исследовательского университета. Область научных интересов: анализ данных дистанционного зондирования, геоинформационные технологии, исследование растительного покрова спутниковыми методами.

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru.

ГРНТИ: 89.57.35

Поступила в редакцию 22 января 2019 г. Окончательный вариант – 19 марта 2019 г.

Detection of disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using reflectance values

E.A. Terekhin¹

¹ *Belgorod State University, Belgorod, Russia*

Abstract

This paper presents results of the assessment of discriminant analysis potentialities for detecting disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using their reflectance spectrum properties. A new method is proposed for the automated detection of disturbed forest stands among forest-covered lands, based on the discriminant analysis of the magnitude of changes in the reflectance in various spectral ranges. Using experimental data from 1836 forest areas typical of the forest-steppe zone of the Central Chernozem region, we propose equations that allow a specific forest area to be classified as disturbed or undisturbed forests in an automated mode. The accuracy of disturbed forest detection is about 90%. It is found that variations in the short-wave infrared reflectance are most informative for disturbed forest land detection when compared with the reflectance variations detected by the Landsat sensors in the other spectral ranges.

Keywords: disturbed forest ecosystems, stepwise discriminant analysis, remote sensing, Landsat, reflectance spectrum properties.

Citation: Terekhin EA. Detection of disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using reflectance values. *Computer Optics* 2019; 43(3): 412-418. DOI: 10.18287/0134-2452-2019-43-3-412-418.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 18-77-00049.

References

- [1] Bartalev SA, Kuryatnikova TS, Stibig H. Methods for the analysis of time-series of high-resolution satellite images for the assessment of logging in the taiga [In Russian] *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* 2005; 2(2): 217-227.
- [2] Kennedy R, Yang Z, Cohen W. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment* 2010; 114(12): 2897-2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.
- [3] Hermosilla T, Wulder MA, White JC, Coops NC, Hobart GW. Regional detection, characterization, and attribution of annual forest change from 1984 to 2012 using Landsat-derived time-series metrics. *Remote Sensing of Environment* 2015; 170: 121-132. DOI: 10.1016/j.rse.2015.09.004.
- [4] Elsakov VV, Marushak IO. Spectrazonal satellite images in estimation of climatic trends of forest vegetation on west slopes of Subpolar polar Ural [In Russian] *Computer Optics*. 2011; 35(2): 281-286.
- [5] Zhirin VM, Knyazeva SP, Eydlina SV. Dynamics of spectral brightness for species/age structure of groups of the forest types on Landsat satellite images [In Russian] *Lesovedeniye*. 2014; 5: 3-12.
- [6] Senf C, Pflugmacher D, Hostert P, Seidl R. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2017; 130: 453-463. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.004.
- [7] Terekhin EA. Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian Upland using remote sensing data. *Sovremennye Problemy Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 2017; 14(4): 112-124. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-112-124.
- [8] Isaev AS, Korovin GN. Large-Scale Changes in Eurasian Boreal Forests and Methods of Their Assessment Using Space Information [In Russian]. *Lesovedeniye*. 2003; 2: 3-9.
- [9] Hussain M, Chen D, Cheng A, Wei H, Stanley D. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2013; 80: 91-106. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006.
- [10] Zhu Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2017; 130: 370-384. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013.
- [11] Terekhin EA. GIS-modeling of forest ecosystems disturbance using multiyear remote sensing data [In Russian]. *Geoinformatika* 2017; 3: 56-62.
- [12] Cohen WB, Healey SP, Yang Z, Stehman SV, Brewer CK, Brooks EB, Gorelick N, Huang C, Hughes MJ, Kennedy RE, Loveland TR, Moisen GG, Schroeder TA, Vogelmann JE, Woodcock CE, Yang L, Zhu Z. How similar are forest disturbance maps derived from different Landsat time series algorithms? *Forests* 2017; 8(4): 98. DOI: 10.3390/f8040098.
- [13] Hislop S, Jones S, Soto-Berelov M, Skidmore A, Haywood A, Nguyen TH. A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques. *Remote Sensing of Environment* 2019; 221: 188-197. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.025.
- [14] Haywood A, Verbesselt J, Baker PJ. Mapping disturbance dynamics in wet sclerophyll forests using time series Landsat. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* 2016; 41: 633-641.
- [15] Wulder MA, White JC, Loveland TR, Woodcock CE, Belward AS, Cohen WB, Fosnight EA, Shaw J, Masek JG, Roy DP. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment* 2016; 185: 271-283. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.032.
- [16] Li P, Jiang L, Feng Z. Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat-8 operational land imager (OLI) sensors. *Remote Sensing* 2014; 6(1): 310-329. DOI: 10.3390/rs6010310.
- [17] Khalafyan AA. STATISTICA 6. Statistical analysis [In Russian]. Moscow: "Binom-Press" Publisher; 2007.

Author's information

Edgar Arkadievich Terekhin. PhD in Geography. A senior research worker of Centre for Aerospace and Ground Monitoring of Objects and Natural Resources of Belgorod State University. Research interests are satellite image processing, thematic processing of remote sensing data, GIS-technology, study of vegetation cover base on satellite images. E-mail: terekhin@bsu.edu.ru.

Received January 22, 2019. The final version – March 19, 2019.