

НАРУШЕННОСТЬ ХВОЙНЫХ ЛЕСОВ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ В НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Э. А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Нарушенность верхних ярусов лесных массивов, обусловленная влиянием пожаров, сплошных лесосечных рубок или насекомых-вредителей, является одним из ключевых факторов, определяющих состояние лесных экосистем. В статье изложены результаты анализа нарушения хвойных лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья, обусловленной воздействием негативных факторов в период 2000-2018 гг. С использованием автоматизированного подхода на основе разновременной многозональной спутниковой съемки Landsat выполнено геоинформационное картографирование участков нарушенных хвойных лесных экосистем, появившихся в соответствующий период. В 2000-2018 гг. доля нарушенных лесов составила 18,4 % от общей площади хвойных лесных массивов. Наиболее высоких значений этот показатель достигает на юге лесостепной зоны – в Воронежской и Белгородской области. Доля хвойных лесов и смешанных лесов с присутствием хвойных пород в общей площади нарушенных лесных экосистем составляет 76 %. Лесные массивы с долей нарушенных участков более 25 % в хвойных лесах составляют более четверти от общей площади. Леса, нарушенность верхних ярусов которых составляет не более 10 %, занимают 60 % всех хвойных лесов. С использованием спутниковых данных Landsat-8 изучена спектрально-отражательная способность хвойных лесных экосистем с разной долей нарушенных лесных участков. В спектральных диапазонах 1,56-1,66 мкм, 2,1-2,3 мкм установлена тенденция к последовательному увеличению коэффициентов спектральной яркости вследствие увеличения доли нарушенных участков в лесных массивах. Воздействие болезней деревьев и лесные пожары в исследуемый период являлись основными причинами высокой нарушенности древостоя хвойных лесов.

Ключевые слова: лесные экосистемы, лесостепь, нарушенность лесов, геоинформационное картографирование, спутниковые данные, Landsat.

DISTURBANCE OF CONIFEROUS FOREST IN THE FOREST-STEPPE ZONE OF RUSSIA AT THE BEGINNING OF THE XXI CENTURY

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University

The overstorey of forest cover may be disturbed by fires, clear felling or pests being the key factors determining the condition of forest ecosystems. This paper presents the results of disturbance analysis in coniferous forests of the forest-steppe zone of the Central Chernozemye Region of Russia over the period from 2000 to 2018. Geo-information mapping of disturbed coniferous areas was carried out using Landsat multi-temporal multispectral satellite images. In 2000-2018 the share of disturbed forests was 18.4 % of the total area of coniferous forests. This indicator is the highest in the south of the forest-steppe zone - in the Voronezh and Belgorod regions. The share of coniferous forests in the total area of disturbed forest ecosystems is 76 %. Forests with a share of disturbed areas exceeding 25 % make up more than a quarter of the total area of coniferous forests. Forests with up to 10 % disturbed overstorey occupy 60 % of all coniferous forests. The spectral reflectivity of disturbed coniferous forest was studied using Landsat-8 data. In the spectral bandwidth between 1.56-1.66 μm and 2.1-2.3 μm there is a trend toward a gradual increase in reflectance as a result of the growing areas of disturbed forest. The main causes of disturbance revealed in coniferous forest are the impact of wood diseases and forest fires.

Key words: *forest ecosystems, forest-steppe, forest disturbance, GIS-mapping, satellite data, Landsat.*

Введение. Оценка нарушенности верхних ярусов лесных экосистем, обусловленной влиянием пожаров, сплошных лесосечных рубок или насекомых-вредителей является ключевой задачей при анализе лесных экосистем. Значительные возможности при ее анализе представляют разновременные многозональные данные дистанционного зондирования (Барталев и др., 2016). Несмотря на то, что по спутниковым материалам во многих случаях возможен анализ нарушений, затрагивающих только верхние ярусы, использование космических снимков, полученных в разные годы, часто выступает единственным способом решения задач ретроспективной оценки нарушенности лесов (Курбанов и др., 2013; Kim et al., 2014; White et al., 2017).

В связи с этим развитие методов автоматизированного картографирования участков нарушенных лесных массивов в настоящее время является одним из ключевых направлений обработки данных дистанционного зондирования Земли и лесного мониторинга (Healey et al., 2005; Курбанов и др., 2015; Воробьев и др., 2016). Картограммы участков нарушенных лесных экосистем дают возможность выполнять пространственно-временной анализ нарушенности (Potarov et al., 2015), в связи с чем их подготовка необходима для получения объективных представлений о динамике лесных экосистем.

К настоящему времени применение разновременных спутниковых снимков позволило создать глобальные карты изменений в лесах (Потапов и др., 2008; Hansen et al., 2013; Feng, 2016). При этом картографирование нарушенности лесов на региональном уровне остается весьма актуальной задачей, оно необходимо для изучения тенденций развития растительного покрова.

Леса лесостепной зоны Центрального Черноземья были существенно трансформированы вследствие аграрного освоения территории (Чендев, 2008). С конца XVI в. по 2008 г. лесистость региона снизилась в 3,6 раза (Бугаев и др., 2013). Современные леса играют крайне важную роль в сохранении биоразнообразия и выполняют водоохранные и экологические функции. В лесах доминируют широколиственные породы. Массивы хвойных лесов, основу которых составляют сосновые насаждения, представлены в меньшей степени и распространены преимущественно по левобережьям наиболее крупных рек региона. Тем не менее, с учетом их размещения вблизи речных систем и большей подверженностью влиянию негативных факторов, мониторинг их состояния крайне необходим. Кроме хвойных насаждений в северо-восточной части региона (Липецкая, Тамбовская области), а также в его северо-западной части распространены смешанные лесные насаждения со значительной долей хвойных лесов.

Как показали результаты ранее выполненных исследований (Терехин, 2017), на юге Среднерусской возвышенности площади хвойных лесных экосистем изменяются более динамично, чем лиственных. В связи с этим картографирование и оценка нарушенности древостоя хвойных лесов в начале XXI века является актуальной задачей.

Цель исследования состояла в оценке нарушенности хвойных лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья в период 2000-2018 гг. **Задачами** исследования являлись:

1. Оценка доли лесов с нарушенными верхними ярусами от общей площади хвойных лесных массивов.
2. Анализ доли хвойных лесных насаждений от общей площади нарушенных лесов.
3. Оценка площади хвойных лесных массивов с разной долей нарушенных лесных участков (0-3 %, 4-10 %, 11-25 %, 26-50 %, 51-100 %).

4. Количественный анализ спектрально-отражательных характеристик хвойных лесных экосистем с разной долей нарушенных лесных ареалов.

Материалы, объект и методы исследования. Объектами исследования выступали хвойные лесные массивы Центрального Черноземья, а также смешанные леса с наличием хвойных пород. Исследуемые леса были представлены на всей территории региона, а также в Орловской области. Территория исследования охватывала лесостепную зону от ее границы с лесной зоной на северо-западе Орловской до границы с зоной степи на юго-востоке Белгородской и юге Воронежской областей (рис. 1).

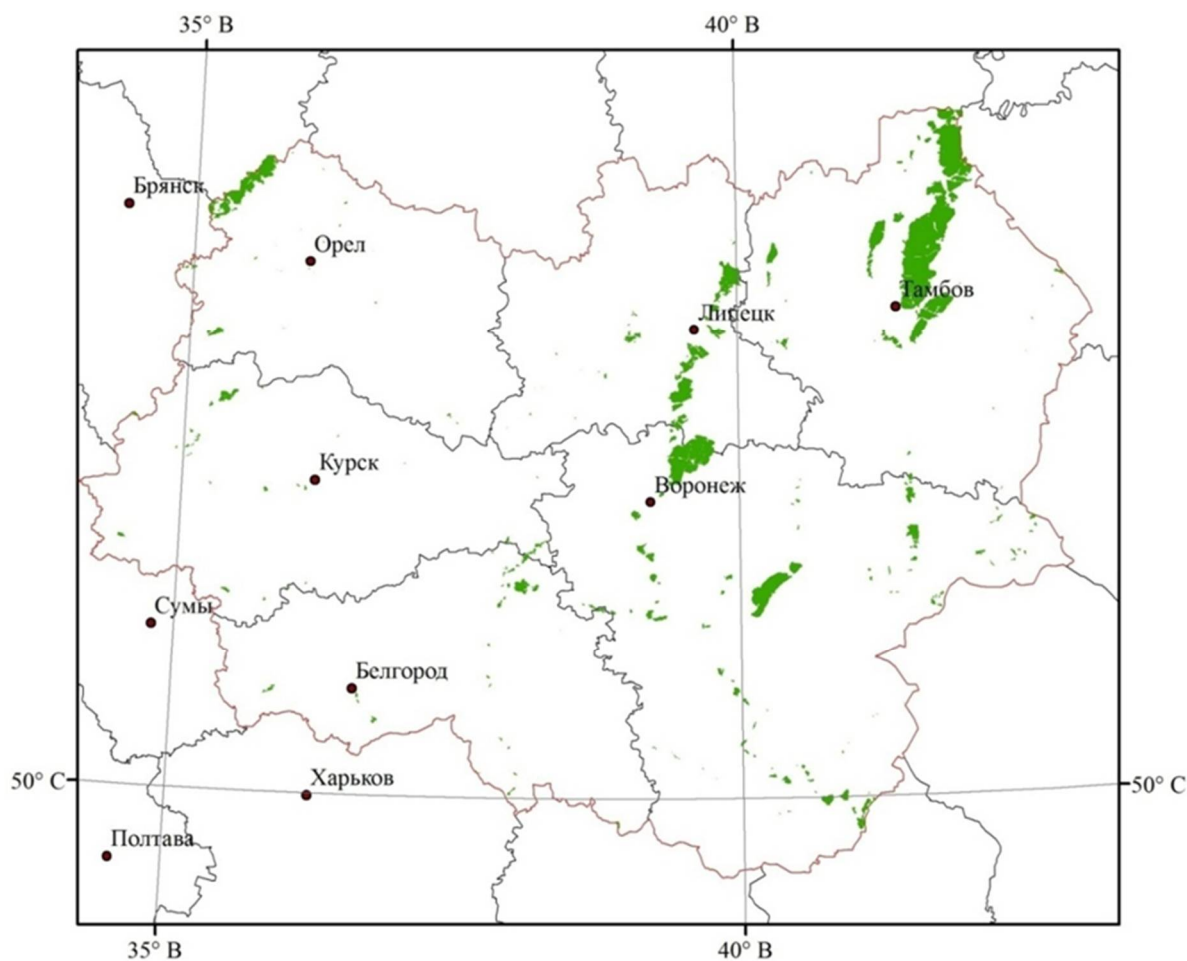


Рис. 1. Местоположение исследуемых лесных массивов

Для исследования было отобрано 435 лесных массивов (табл. 1), включая крупнейшие хвойные леса региона. С целью обеспечения репрезентативности лесные массивы для исследования отбирались таким образом, чтобы быть представлены в большинстве ячеек 30×30 км сети, на которую была разбита вся территория исследования. Соответствующий размер ячейки был подобран эмпирически. В связи с тем, что хвойные леса, в отличие от широколиственных, распространены в регионе в меньшей степени, они были представлены во многих, но не во всех таких ячейках. Обусловлено это тем, что сосновые леса распространены в лесостепи локально и приурочены в основном к левобережьям наиболее крупных рек.

**Характеристики проанализированных хвойных и смешанных
с преобладанием хвойных лесных массивов**

Регион	Общая площадь, га	Число лесных массивов	Средняя площадь, га
Белгородская область	15701,2	53	296,2
Воронежская область	115984,6	171	678,3
Курская область	13270,4	36	368,6
Липецкая область	82072,9	60	1367,9
Орловская область	42056,3	40	1051,4
Тамбовская область	252519,0	75	3366,9
Всего	521604,4	435	1199,1

На следующем этапе было выполнено картографирование отобранных лесных массивов, которое осуществлялось методом ручной оцифровки их контуров в геоинформационной среде на основе снимков Sentinel-2 MSI вегетационного периода 2018 г. с пространственным разрешением 10 м/пиксель. Таким способом был подготовлен векторный слой всех анализируемых лесных экосистем, который в дальнейшем использовали для анализа их спектрально-отражательных характеристик и оценке нарушенности.

Основной экспериментальный этап состоял в геоинформационном, автоматизированном картографировании нарушенных участков исследуемых лесов на основе их спектрально-отражательных характеристик. Для этого был использован ранее предложенный подход (Терехин, 2019), суть которого заключается в использовании функций классификации, рассчитанных методом дискриминантного анализа. Функции (уравнения) используют в качестве независимых переменных величину изменения коэффициентов отражения (коэффициентов спектральной яркости, КСЯ) в трех спектральных зонах (1,55-1,75 мкм), SWIR (2,09-2,35 мкм) и NIR (0,75-0,90 мкм). Величина изменения рассчитывается между конечной и начальной анализируемыми датами. В нашем случае это 2018 г. и 2000 г. Для каждого пикселя на основе предложенных уравнений рассчитывается 2 значения классификационного веса. Пиксель классифицируется в ту категорию (нарушенные/ненарушенные), для которой значение классификационного веса оказалось больше. Точность выявления нарушенных лесных экосистем на основе данного способа составляет 90 %.

Для реализации соответствующего подхода на территорию исследования была выполнена подборка снимков Landsat TM/ETM+ 2000 г. и Landsat OLI 2018 г. с пространственным разрешением 30 м/пиксель (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Пары разновременных снимков были отобраны таким образом, чтобы покрывать всю территорию региона, и охватывали 17 спутниковых сцен (path/row). Разновременные изображения стремились подбирать так, чтобы они были получены в максимально близкие даты вегетационного периода. Все снимки прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию с переводом в безразмерные коэффициенты отражения. После этого на основе пар разновременных снимков были вычислены величины разности коэффициентов отражения в трех спектральных зонах: ближней инфракрасной (NIR) и двух средних инфракрасных (SWIR1 и SWIR2), соответствующих каналам 4, 5, 7 сенсора Landsat TM/ETM+ или каналам 5, 6, 7 сенсора Landsat OLI. Полученные растры разности КСЯ для каждой спутниковой сцены Landsat были использованы в функциях классификации как независимые переменные. В результате получено 17 растров, характеризующих местоположение нарушенных лесов и лесов без признаков нарушений верхних ярусов. На их основе в программе ArcGIS была получена единая картограмма, характеризующая распространение нарушенных лесов на территории лесостепи Центрального Черноземья. С ее использованием вычислили долю лесов, нарушенных в период 2000-2018 гг. для каждого исследуемого лесного массива, площадь лесов с нарушениями верхних яру-

сов в областях региона, долю лесных массивов с разной степенью нарушенности: 0-3 %, 4-10 %, 11-25 %, 26-50 %, 51-100 %.

Для градаций степени нарушенности (от 0 до 100 %) использована нарастающая шкала, диапазоны ячеек которой растут по зависимости, близкой к степенной. Соответствующая градация была подобрана эмпирически в соответствии с правилом (Арманд, 1975), по которому шкала градаций должна делиться на отрезки равной информативности и сгущение баллов должно производиться в той части шкалы, где она дает наибольшую информацию.

Следующий этап состоял в анализе коэффициентов спектральной яркости для каждой градации нарушенных лесных экосистем (0-100 %) на конечную анализируемую дату (2018 г.). Для решения этой задачи использован спутниковый снимок Landsat OLI от 23.06.2018 (path 175, row 24), в пределах которого были представлены все градации или классы нарушенности хвойных лесов. Для каждого лесного массива, находящегося в пределах спутниковой сцены, методом зональной статистики вычислили коэффициенты спектральной яркости в 6-ти спектральных зонах, соответствующих каналам 2-7 сенсора OLI. После этого полученные данные прошли статистический анализ.

Результаты. Применение предложенного подхода позволило достаточно точно выполнить картографирование участков нарушенных хвойных лесных экосистем на уровне детальности снимков Landsat (пример на рис. 2).

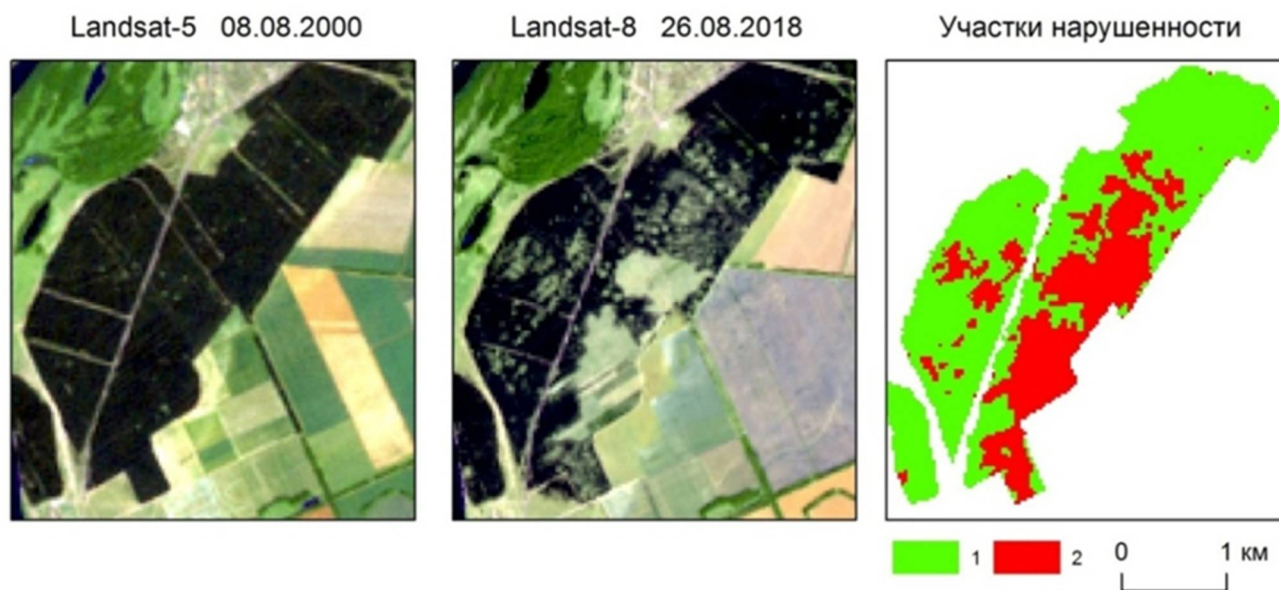


Рис. 2. Пример автоматизированного выявления участков хвойных лесных массивов, нарушенных в период 2000-2018 гг. (Воронежская область): 1 – леса без нарушений верхних ярусов, 2 – нарушенные леса

Для повышения достоверности полученная картограмма прошла визуальную проверку и корректировку методом ее последовательного сопоставления с разновременными снимками Landsat 2000 г. и 2018 г. на каждую спутниковую сцену (path/row).

Количественные данные (табл. 2), полученные на ее основе, показали, что в среднем по региону доля лесов с нарушениями верхних ярусов, появившимися в период 2000-2018 гг., составила 18,4 % в хвойных лесах и 8,6 % в смешанных лесных насаждениях. Наибольшая доля нарушенных хвойных лесов выявлена в Воронежской и Белгородской областях, т.е. на юге лесостепной зоны.

Таблица 2

Характеристики хвойных и смешанных с преобладанием хвойных лесов с нарушениями верхних ярусов, появившимися в 2000-2018 гг. на территории лесостепи Центрального Черноземья

Регион	Доля нарушенных лесов от общей лесной площади соответствующего породного состава, %		Доля от общей площади нарушенных лесов	
	Хвойные	Смешанные	Хвойные	Смешанные
Белгородская область	18,4	6,5	0,50	0,14
Воронежская область	25,0	15,6	0,47	0,40
Курская область	6,2	4,5	0,09	0,09
Липецкая область	9,7	12,9	0,05	0,66
Орловская область	1,9	3,4	0,05	0,45
Тамбовская область	3,2	6,4	0,01	0,82
Всего	18,4	8,6	0,22	0,54

Таким образом, доля нарушенных хвойных лесов оказалась достаточно высокой. Она обусловлена постепенным выпадением древостоя сосновых лесов во многих лесных массивах вследствие влияния болезней деревьев (рис. 2). В связи с этим происходит значительное изреживание верхних ярусов лесных насаждений. Другой причиной высокой нарушенности лесов являются лесные пожары 2010 года, от которых пострадали значительные участки хвойных лесных насаждений.

Из данных таблицы 2 видно, что хвойные и смешанные леса вносят основной вклад в общую площадь нарушенных лесов, составляя в ней суммарно 76 % (22 и 54 %). Такие результаты были получены с привлечением подготовленной нами картограммы всех нарушенных лесов региона в соответствующий период, характеризующей не только хвойные и смешанные, но и доминирующие в регионе широколиственные леса.

Характеризуя вклад хвойных лесов в общую площадь нарушенных лесных земель, необходимо отметить, что во всех областях, кроме Курской, хвойные леса и смешанные леса с преобладанием хвойных пород составили основную часть нарушенных лесных экосистем (см. табл. 2). Следует указать при этом, что на территории Курской области хвойные (сосновые) лесные насаждения распространены в наименьшей степени в сравнении с остальными исследуемыми регионами.

Высокая нарушенность хвойных лесов обусловлена их меньшей устойчивостью, по сравнению с лиственными лесами, к влиянию негативных факторов: в первую очередь, пожаров и болезней деревьев. Искусственное происхождение многих хвойных лесов, созданных на рубеже 1940-х – 1950-х гг. также может выступать причиной их более высокой подверженности негативным воздействиям.

Анализ хвойных лесов по доли нарушенных участков, присутствующих в них, показал (табл. 3), что лесные массивы с нарушенностью 0-10 % составляют суммарно 60 % от общей площади хвойных лесов. Леса с нарушенностью, не превышающей 25 %, составляют 74 % всех хвойных насаждений.

Таблица 3

Характеристики нарушенности хвойных лесных экосистем на территории лесостепи Центрального Черноземья в период 2000-2018 гг.

Доля нарушенных участков, %	Число лесных массивов	Доля от общей площади	Площадь, га
0-3	124	0,27	22819,9
4-10	84	0,33	28069,9
11-25	46	0,14	11730,7
26-50	30	0,15	12571,5
51-100	17	0,11	8826,3

Тем не менее, существенная площадь лесов с долей нарушенных участков более 25 % указывает на высокую нарушенность хвойных лесов в целом.

Оценка коэффициентов спектральной яркости хвойных насаждений с различной долей нарушенных лесных массивов, проведенная в шести диапазонах спектра на основе спутниковых данных 2018 года, показала (табл. 4), что в большинстве каналов Landsat-8 OLI наблюдается тенденция к увеличению отражательной способности по мере увеличения степени нарушенности лесных массивов.

Таблица 4

Коэффициенты спектральной яркости хвойных лесов с разной долей нарушенных лесных участков

Доля нарушенных участков, %	Зональные коэффициенты спектральной яркости					
	0,45-0,51 мкм	0,52-0,60 мкм	0,64-0,68 мкм	0,84-0,88 мкм	1,56-1,66 мкм	2,1-2,3 мкм
0-3	0,082	0,065	0,043	0,264	0,116	0,053
4-10	0,085	0,068	0,048	0,246	0,121	0,058
11-25	0,085	0,069	0,050	0,233	0,124	0,062
26-50	0,079	0,065	0,048	0,232	0,128	0,064
51-100	0,095	0,083	0,069	0,262	0,181	0,103

Наиболее четко эта тенденция выражена в средней инфракрасной области, соответствующей каналам 6, 7 сенсора Landsat OLI (1,56-1,66 мкм, 2,1-2,3 мкм), что подтверждает их наибольшую чувствительность к возникновению участков нарушенных лесных экосистем. В то же время проведенный анализ показал, что только участки с нарушенностью 51-100 % характеризуются статистически значимыми отличиями коэффициентов отражения от остальных категорий нарушенности лесных экосистем.

Выводы. На основе материалов разновременной многозональной спутниковой съемки 2000-2018 гг. с использованием автоматизированного подхода выполнено геоинформационное картографирование участков хвойных лесных экосистем с нарушениями верхних ярусов, появившихся в соответствующий период. Исследование проведено для территории лесостепной зоны Центрального Черноземья. На основе полученных данных установлено, что нарушенность древостоя хвойных лесов в соответствующий временной интервал составила 18,4 %. Нарушенность смешанных лесных насаждений с присутствием хвойных пород – 8,6 %. Суммарный вклад хвойных и смешанных с преобладанием хвойных насаждений в общую площадь нарушенных лесов составил 76 %. Основные причины нарушенности верхних ярусов хвойных лесных экосистем в регионе – воздействие болезней и лесные пожары. Лесные массивы с долей нарушенных участков более 25 % в хвойных лесах составляют более четверти от общей площади. В спектральных диапазонах 1,56-1,66 мкм, 2,1-2,3 мкм установлена тенденция к последовательному увеличению коэффициентов спектральной яркости по мере увеличения в лесных массивах доли нарушенных лесных участков.

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

Библиографический список

1. Арманд Д.Л. Географическая среда и рациональное использование природных ресурсов / Д. Л. Арманд. – Москва: Наука, 1983. – 236 с.
2. Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С. А. Барталев, В. А. Егоров, В. О. Жарко, Е. А. Лупян, Д. Е. Плотников, С. А. Хвостиков, Н. В. Шабанов. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
3. Бугаев, В.А. Дубравы лесостепи / В. А. Бугаев, А. Л. Мусиевский, В. Царалунга. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2013. – 247 с.

4. Воробьев, О.Н. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О. Н. Воробьев, Э. А. Курбанов, Ю. А. Полевщикова, С. А. Лежнин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 124-134.
5. Курбанов, Э.А. Оценка лесных гарей Чувашии методами дистанционного зондирования / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 54. – С. 80-87.
6. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – 131 с.
7. Потапов, П.В. Выявление и мониторинг дистанционными методами малонарушенных лесных территорий мира / П. В. Потапов, И. В. Журавлева, А. Е. Маниша, С. А. Турубанова, А. Ю. Ярошенко // Лесоведение. – 2008. – № 2. – С. 58-37.
8. 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.
9. 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.
10. Чендев, Ю.Г. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене / Ю.Г. Чендев. – Москва: ГЕОС, 2008. – 212 с.
11. Feng, M. Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs / M. Feng, J. O. Sexton, C. Huang, A. Anand, S. Channan, X.-P. Song, D.-X. Song, D.-H. Kim, P. Noojipady, J. R. Townshend // Remote Sensing of Environment – 2016. – Vol. 184 – P. 73-85.
12. Hansen, M.C. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, J. R. G. Townshend // Science. – 2013. – Vol. 342, № 6160. – P. 850-853.
13. Healey, S. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection / S. Healey, W. Cohen, Y. Zhiqiang, O. Krankina // Remote Sensing of Environment. – 2005. – Vol. 97, № 3. – P. 301-310.
14. Kim, D.-H. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 / D.-H. Kim, J. O. Sexton, P. Noojipady, C. Huang, A. Anand, S. Channan, M. Feng, J. R. Townshend // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 155. – P. 178-193.
15. Potapov, P.V. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive / P. V. Potapov, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, A. M. Krylov, J. L. McCarty, V. C. Radeloff, M. C. Hansen // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 159. – P. 28-43.
16. White, J.C. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series / J. C. White, M. A. Wulder, T. Hermosilla, N. C. Coops, G. W. Hobart // Remote Sensing of Environment. – 2017. – Vol. 194. – P. 303-321.

References

1. Armand D.L. Geograficheskaya sreda i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov [Geographical environment and rational use of natural resources], Moscow, 1983, 236 p.
2. Bartalev S.A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyay E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii [Land cover mapping over Russia using Earth observation data], Moscow, 2016, 208 p.
3. Bugaev V.A., Musievskii A. L., Tsaralunga V. Dubravy lesostepi [Oak forests of the forest-steppe zone], Voronezh, 2013, 247 p.
4. Vorob'ev O.N., Kurbanov E. A., Polevshchikova Yu. A., Lezhnin S. A. Otsenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v srednem povolzh'e po snimkam landsat [Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 124-134.
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O. N., Lezhnin S. A. Otsenka lesnykh garei Chuvashii metodami distantsionnogo zondirovaniya [Assessment of burnt-out forest of Chuvashia by remote sensing method], *Vestnik Irkutskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaystvennoi akademii* [Bulletin of the Irkutsk State Agricultural Academy], 2013, No. 54, pp.80–87.
6. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Lezhnin S.A., Gubaev A.V., Polevshchikova Yu.A. Tematicheskoe kartirovaniye rastitel'nogo pokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti [Thematic mapping of vegetation by satellite imagery: validation and accuracy assessment]: monografiya, Yoshkar-Ola, 2015, 131 p.
7. Potapov P.V., Zhuravleva I. V., Manisha A. E., Turubanova S. A., Yaroshenko A. Yu., Vyyavlenie i monitoring distantsionnymi metodami malonarushennykh lesnykh territorii mira [Identification and monitoring of world intact landscapes using remote sensing methods], *Lesovedenie* [Forest science], 2008, N. 2, pp. 58-37.
8. Terekhin E.A. Raspoznavanie narushennykh lesnykh ekosistem lesostepi na osnove spektral'no-otrazhatel'nykh kharakteristik [Detection of disturbed forest ecosystems in the forest-steppe zone using reflectance values], *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2019, Vol. 43, N. 3, pp.412-418.
9. Terekhin E.A. Otsenka narushennosti lesnykh ekosistem yugo-zapada Srednerusskoi vozvyshennosti s primeneniem materialov kosmicheskikh s"emok [Estimation of forest ecosystems disturbance in the southwest of Central Russian

- Upland using remote sensing data], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, Vol. 14, N. 4, pp.112-124.
10. Chendev Yu.G. Evolyutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvyshennosti v golotsene [Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene], Moscow, 2008, 212 p.
 11. Feng M., Sexton J. O., Huang C., Anand A., Channan S., Song X.-P., Song D.-X., Kim D.-H., Noojipady P., Townshend J. R. Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs, *Remote Sensing of Environment*, 2016. Vol. 184, pp. 73-85.
 12. Hansen M.C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J. , Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 34, N. 6160, pp. 850-853.
 13. Healey S., Cohen W., Zhiqiang Y., Krankina O. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 97, No. 3, pp. 301-310.
 14. Kim D.-H., Sexton J. O., Noojipady P., Huang C., Anand A., Channan S., Feng M., Townshend J. R. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 155, pp. 178-193.
 15. Potapov P.V., Turubanova S. A., Tyukavina A., Krylov A. M., McCarty J. L., Radeloff V. C., Hansen M. C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28-43.
 16. White J.C., Wulder M. A., Hermosilla T., Coops N. C., Hobart G. W. A nationwide annual characterization of 25years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194, pp. 303-321.