Оценка нарушенности лесов лесостепной зоны в начале XXI в. по спутниковым данным

Э. А. Терехин

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

В статье представлены результаты оценки изменений в лесах лесостепной зоны Центрального Черноземья, произошедших с начала XXI в. и связанных с нарушенностью лесного полога. Для выявления участков нарушенных лесов использован специально разработанный и верифицированный автоматизированный алгоритм. С использованием разновременных спутниковых данных Landsat и Sentinel выполнено геоинформационное картографирование нарушенности в лесах и осуществлён её пространственный анализ. Оценка нарушенности проведена для лесов в целом и отдельно для лиственных, хвойных и смешанных лесных насаждений. На основе данных с более 3000 лесных массивов установлено, что площадь лесных экосистем с нарушениями верхних ярусов в анализируемый период была значительно меньше общей площади лесов. В западной части региона доля нарушенных лесных массивов существенно меньше, чем в восточной части. Доля нарушенных участков в лиственных лесах невелика. Для нарушенных массивов лиственных лесов в отличие от хвойных лесов характерна небольшая средняя площадь лесного участка. Наиболее крупные по площади ареалы нарушенных лесных экосистем представлены в лесах хвойного и смешанного породного состава.

Ключевые слова: лес, лесостепь, нарушенные экосистемы, спутниковые данные, многолетние изменения, Центральное Черноземье, Landsat

Одобрена к печати: 24.03.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146

Введение

Нарушенность древостоя лесных экосистем вследствие сплошных лесосечных рубок, болезней деревьев, воздействия пожаров или иных факторов является одним из важнейших индикаторов состояния лесов. Её пространственно-временная оценка необходима для получения объективных представлений об изменениях, протекающих в лесах, и динамике их состоянии.

На территории лесостепи Центрального Черноземья лесные земли претерпели существенные трансформации вследствие аграрного освоения региона (Чендев, 2008). К середине XX в. значительная часть лесов исчезла, и в начале XXI в. лесистость составляла порядка 8,7 % (Бугаев и др., 2006). Существующие лесные экосистемы обеспечивают экологические и воодохранные функции, вследствие чего анализ изменений в лесах, связанных с нарушенностью, является актуальной задачей (Терехин, 2017).

Основу покрытых лесом земель составляют широколиственные леса с доминированием в верхних ярусах дуба и ясеня (Бугаев и др., 2013; Кожаринов, Борисов, 2012). Кроме них по левобережьям наиболее крупных рек получили распространение хвойные леса, а в ряде мест и смешанные лесные массивы.

Материалы спутниковой съёмки являются одними из наиболее объективных источников информации об изменениях в лесах, связанных с нарушенностью древостоя, вследствие того что космические снимки одновременно покрывают значительные территории, а нарушения в лесах приводят к изменениям в их спектральном отклике (Ершов и др., 2015; Исаев, Коровин, 2003; Vogelmann et al., 2012). Сплошные лесосечные рубки, участки, пройденные верховыми лесными пожарами, и участки усыхания древостоя достаточно уверенно дешифрируются на многозональных космических снимках среднего и высокого разрешения визуальным способом, что во многих случаях позволяет с высокой точностью картографировать

и анализировать изменения в лесах, связанные с их нарушенностью (Сухих, 2005). Однако такой способ очень трудоёмок, особенно когда предстоит анализ изменений на значительных территориях, а участки нарушенности по размеру составляют несколько пикселей снимка.

В связи с этим остаются актуальными разработка и совершенствование методов автоматизированного выявления изменений в лесных экосистемах на основе дистанционных данных (Ховратович и др., 2019; Potapov et al., 2015; Senf et al., 2017). По их развитию к настоящему времени достигнут ряд успехов (Барталев и др., 2016; Hislop et al., 2019; Thomas et al., 2011).

Разновременные спутниковые данные являются эффективным и достаточно достоверным источником информации, позволяющим проводить периодический и регулярный мониторинг состояния лесов (Воробьев, Курбанов, 2017; Кашницкий и др., 2019; Письман и др., 2018). К настоящему времени с использованием методов автоматизированного анализа созданы глобальные карты изменений в лесах (Hansen et al., 2013; Kim et al., 2014).

Однако способы глобального картографирования не всегда эффективны в случаях изучения состояния лесных массивов и изменений в них на региональном уровне, например на уровне отдельных областей, что обусловлено различиями в породном составе, особенностями фенофаз и другими факторами. В связи с этим актуальность приобретает разработка регионально адаптированных подходов к выявлению многолетних изменений в лесах, учитывающая типичные для них спектральные характеристики. При этом вследствие сложности спектрального отклика нарушенных лесных экосистем их автоматизированное картографирование требует совместного использования методов многомерного анализа, учитывающих отражательную способность в различных диапазонах спектра, а также способов геоинформационного картографирования и анализа.

В рамках ранее проведённых исследований (Терехин, 2018, 2019), предшествующих настоящей работе, изучены спектрально-отражательные свойства нарушенных лесных экосистем лесостепи, а также их возможности для автоматизированного картографирования лесных массивов с нарушениями верхних ярусов.

Цель работы состояла в исследовании нарушенности древостоя и верхних ярусов лесных экосистем лесостепной зоны Центрального Черноземья, обусловленной влиянием сплошных лесосечных рубок, болезней деревьев, пожаров или иных факторов в период 2000–2018 гг.

Задачами исследования являлись: сравнение коэффициентов спектральной яркости лесов по данным с различных сенсоров, выявление и геоинформационный анализ участков нарушенности древостоя в лесах в исследуемый период, территориальный анализ нарушенности лесов.

Материалы и методика исследования

Исследование изменений, связанных с нарушенностью лесов, было выполнено на территории Центрального Черноземья, включая Орловскую обл. (*рис. 1*, см. с. 136). Объектом исследования выступали лесные массивы, расположенные на территории Белгородской, Воронежской, Курской, Орловской, Липецкой и Тамбовской областей.

Территория исследования общей площадью 192 522 км^2 простиралась от лесной зоны на северо-западе Орловской обл. (на границе с Брянской обл.) до зоны степи на юго-востоке Белгородской и юге Воронежской обл.

Первый этап исследования состоял в формировании выборки лесных массивов, отражающей особенности лесопокрытых земель региона. Её подготовку проводили следующим образом. Для обеспечения репрезентативности осуществляемых оценок вся территория исследования была разбита на сеть квадратных ячеек размером 30×30 км. Ячейки соответствующего размера использовались для того, чтобы анализируемые лесные массивы были представлены во всех частях территории исследования. Подбор лесных массивов производили на основе многозональных снимков высокого пространственного разрешения со спутников серии Sentinel-2 (пространственное разрешение 10 м/пиксель) таким образом, чтобы они были представлены в каждой ячейке полученной сети.

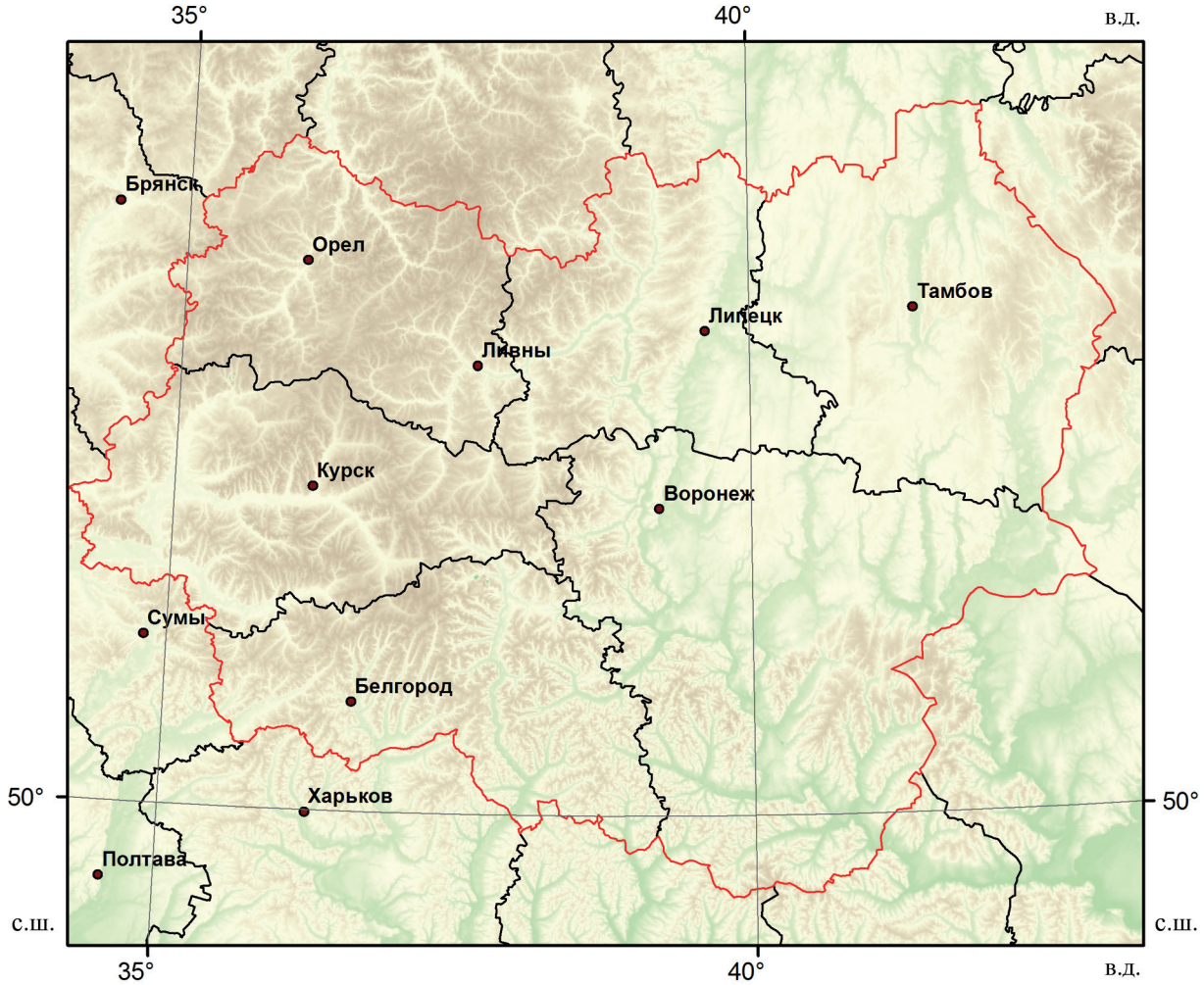

Рис. 1. Местоположение территории исследования

В пределах каждой ячейки 30×30 км отбирали лесные массивы площадью более 1 га. Соответствующий размер подобран эмпирически на основе пространственного разрешения спутниковых данных Landsat TM, ETM+, OLI (30 м/пиксель), на основе которых в дальнейшем рассчитывали коэффициенты спектральной яркости лесных экосистем. При подборе лесных массивов стремились, чтобы они были максимально репрезентативно представлены в каждой из ячеек. Для этого картографировали не менее 40–50 % от общей лесной площади в их пределах. При этом фактически этот показатель оказывался значительно выше. В некоторых ячейках, расположенных на территориях Воронежской и Тамбовской обл., леса были представлены крайне незначительно. Вследствие этого на них производили сплошное картографирование всех лесных массивов площадью более 1 га.

Применение описанного подхода позволило впоследствии объективно проанализировать пространственные особенности изменений, обусловленных появлением участков нарушенности, с начала XXI в. Всего было отобрано более 3000 лесных массивов, включая основные леса региона. В сформированной выборке были представлены доминирующие в регионе широколиственные леса, а также менее распространённые хвойные леса и лесные насаждения смешанного породного состава.

На следующем этапе с использованием специально подготовленной векторной основы была выполнена оценка площади лесных земель. Для этого использовалась созданная векторная основа, предназначенная для ретроспективного анализа лесных земель. Она включала контуры нескольких тысяч лесных массивов и была подготовлена на основе снимков Landsat TM середины 1980-х гг. Контуры большинства лесных массивов, не претерпевших

изменение внешних границ, были уточнены по снимкам Sentinel-2, полученных в 2018 г. Используемая векторная основа позволяла производить оценку многолетних изменений в лесах в границах одних и тех контуров на разные временные срезы. Суммарная площадь исследованных лесов составила 1140,7 тыс. га при средней площади 376,9 га. Леса были репрезентативно представлены в каждой из шести областей исследуемой территории (*табл. 1*).

Таблица 1. Характеристики лесных массивов, использованных для анализа изменений в лесах лесостепи, обусловленных нарушенностью древостоя в период 2000–2018 гг.

Регион	Исследованная площадь лесов, тыс. га	Общая площадь лесов по официальным данным, тыс. га	Доля изученных лесов от общей лесной площади, %
Белгородская обл.	147,4	239,9	61,4
Воронежская обл.	270,4	458,9	58,9
Курская обл.	110,8	249,9	44,3
Липецкая обл.	152,5	211,2	72,2
Орловская обл.	125,4	200,3	62,6
Тамбовская обл.	334,3	371,3	90,0
Всего	**1140,7**	**1731,5**	**65,9**

Площадь изученных лесных массивов составила более 65 % от общей площади лесов (оценена на основе данных официальной статистики Федерального агентства лесного хозяйства) на территории исследования.

Третий этап состоял в геоинформационном автоматизированном картографировании участков нарушенных лесных экосистем. Оно было выполнено на основе подхода, специально разработанного для детектирования участков нарушенных лесов лесостепи Центрального Черноземья (Терехин, 2019). Он основан на применении величин изменения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в трёх диапазонах электромагнитного излучения: NIR (0,75–0,90 мкм), SWIR1 (1,55–1,75 мкм) и SWIR2 (2,09–2,35 мкм).

Эти диапазоны соответствуют каналам 4, 5, 7 сенсоров Landsat TM/ETM+ или каналам 5, 6, 7 сенсора Landsat OLI. Они были использованы в связи с их эффективностью для распознавания участков лесов с нарушениями верхних ярусов. Снимки Landsat TM, ETM+, OLI содержат по шесть основных каналов, полученных в различных зонах спектра. Каналы сенсоров TM, ETM+, OLI по охвату длин волн немного различаются между собой. Однако, как выявили исследования (Li et al., 2014), спектральные показатели, рассчитанные по ним, характеризуются очень тесной корреляцией, в связи с чем разновременные данные с них можно сопоставлять на количественном уровне.

В целях получения более полной информации об отражательных характеристиках лесов региона, измеренных по разным сенсорам, было выполнено сравнение их коэффициентов отражения, вычисленных на основе данных Landsat ETM+ и Landsat OLI в близкие даты вегетационного периода. Для анализа был использован снимок Landsat-7 ETM+, полученный 16 августа 2018 г., и снимок Landsat-8 OLI, полученный 24 августа 2018 г. Это ближайшие даты, на которые удалось подобрать безоблачные снимки с разных сенсоров. Оба снимка соответствовали ячейке в системе WRS-2 (Worldwide Reference System) с параметрами Path 177, Row 25.

Для сравнения коэффициентов отражения была сформирована дополнительная выборка, включающая 91 лесной участок с нарушениями древостоя, появившимися в период 2000–2018 гг., и 500 лесных участков без признаков воздействия нарушающих факторов в аналогичный период. Снимки Landsat-7 с 2003 г. имеют значительные участки с отсутствием спектральной информации, но все анализируемые лесные массивы были расположены вне таких фрагментов снимка. С учётом пространственного разрешения сенсоров для анализа отбирались участки леса площадью не менее 1 га. Статистическое сравнение коэффициентов спектральной яркости проводили в каналах, которые в дальнейшем применялись для автоматизированного картографирования нарушенных лесов: SWIR1, SWIR2 и NIR.

Подход, применяемый для автоматизированного выявления участков нарушенных лесов, использует функции классификации, каждая из которых представляет линейное уравнение (1), (2) с тремя независимыми переменными. Этими переменными выступают величины разности коэффициентов отражения между конечной и начальной анализируемой датой (2018 и 2000 гг.) в трёх диапазонах спектра (SWIR1, SWIR2, NIR). Каждая из этих функций позволяет вычислять для конкретного пикселя классификационный вес, на основе которого он относится к категории нарушенных лесов или лесов без признаков нарушений древостоя:

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

$$\text{Ненарушенные леса} = -63{,}1x_1 + 98{,}3x_2 + 227{,}1x_3 - 4{,}1, \quad (2)$$

где x_1, x_2, x_3 — величины изменения коэффициента отражения (коэффициента спектральной яркости) в диапазонах SWIR1, NIR и SWIR2 между 2000 и 2018 г.

Конкретный пиксель в результате классификации будет относиться к той категории (нарушенные или ненарушенные), для которой он оказался больше. Точность распознавания участков нарушенных лесов на основе приведённых функций классификации составляет 90 %.

Для реализации используемого подхода на территорию исследования была выполнена подборка и предварительная обработка разновременных снимков с сенсоров Landsat (источник данных: https://earthexplorer.usgs.gov/), включающая изображения 1999–2001 и 2018 гг. (*табл. 2*).

Таблица 2. Разновременные снимки Landsat, использованные для выявления лесных экосистем лесостепной зоны с нарушениями древостоя, появившимися в период 2000–2018 гг.

Path/Row	Сенсор	Дата получения	Path/Row	Сенсор	Дата получения
178025	Landsat TM	26.06.2000	175024	Landsat ETM+	18.07.2001
	Landsat OLI	27.05.2018		Landsat OLI	23.06.2018
177025	Landsat TM	22.08.2000	174024	Landsat TM	12.08.2001
	Landsat OLI	24.08.2018		Landsat OLI	19.08.2018
176025	Landsat TM	12.06.2000	178023	Landsat ETM+	04.09.1999
	Landsat OLI	29.05.2018		Landsat OLI	30.07.2018
175025	Landsat ETM+	08.08.2000	177023	Landsat TM	22.08.2000
	Landsat OLI	26.08.2018		Landsat OLI	24.08.2018
178024	Landsat ETM+	04.09.1999	176023	Landsat TM	12.06.2000
	Landsat OLI	31.08.2018		Landsat OLI	01.08.2018
177024	Landsat ETM+	22.08.2000	175023	Landsat ETM+	18.07.2001
	Landsat OLI	24.08.2018		Landsat OLI	26.08.2018
176024	Landsat TM	12.06.2000	174023	Landsat ETM+	11.07.2001
	Landsat OLI	29.05.2018		Landsat OLI	19.08.2018

Снимки отбирались таким образом, чтобы сроки их получения приходились на период лета – начала осени, на снимках отсутствовала облачность либо её процент был минимален. Все используемые снимки Landsat прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию, заключающуюся в пересчёте исходных значений яркости в значения коэффициентов отражения, что было необходимым условием для сравнения спектрально-отражательных свойств лесных экосистем в разные годы.

Параметры 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. Из-за наличия облачности для некоторых ячеек спутниковых сцен Landsat не удалось подобрать пар снимков, полученных в близкие сроки вегетационного сезона. Тем не менее экспериментальное сравнение участков нарушенных лесов, выявленных на основе предложенной методики, с их фактическим местоположением показало, что этот

фактор практически не отразился на результатах их автоматизированного распознавания. Объясняется это тем, что величина изменения коэффициентов отражения в анализируемых спектральных зонах, обусловленная произошедшими нарушениями, по абсолютному значению существенно больше, чем спектральные различия одних и тех же лесных массивов в близкие месяцы вегетационного периода.

На основе каждой пары разновременных снимков, приведённых в *табл. 2*, для каждого из трёх анализируемых спектральных диапазонов были вычислены разности коэффициентов отражения между 2018 и 2000 г. Они были использованы на входе алгоритма, который был написан в геоинформационной системе ArcGIS на основе предложенных функций (1), (2) и применён непосредственно для автоматизированного выявления участков нарушенных лесных массивов. На выходе алгоритма — картограммы участков лесов, древостой которых был нарушен в период 2000–2018 гг. С использованием данного алгоритма были рассчитаны картограммы участков нарушенных лесов для каждой спутниковой сцены Landsat, после чего на их основе была создана ГИС-картограмма участков с нарушениями древостоя на территории лесостепи Центрального Черноземья. После этого картограмма прошла дополнительную верификацию методом последовательного сопоставления её фрагментов, соответствующих отдельным спутниковым сценам Landsat, с разновременными спутниковыми снимками. Верификация состояла в выявлении и редактировании пикселей, ошибочно отнесённых в процессе автоматизированного распознавания к участкам нарушенных лесов или наоборот. Такие ошибки могли быть обусловлены тенями от небольших фрагментов облачности или от лесных участков, расположенных на склонах.

Четвёртый этап экспериментального исследования состоял в изучении пространственных особенностей размещения участков нарушенных лесных экосистем на территории лесостепи Центрального Черноземья. В рамках этой части исследования анализ нарушенности проводили для лесных массивов в целом и для различных типов лесных насаждений (широколиственные, хвойные, смешанные).

Тип лесного насаждения определялся на основе визуального анализа снимков Landsat, позволяющих достаточно достоверно его определять в комбинациях каналов, использующих инфракрасные и красный диапазоны. Тип лесного насаждения был определён для каждого анализируемого лесного массива и выявлялся в процессе его векторизации.

Анализ особенностей размещения участков нарушенных лесов проводили по следующим параметрам:

- доля нарушенных лесов от общей площади лесных массивов в областях Центрального Черноземья;
- распределение доли нарушенных лесов по различным типам лесных насаждений (лиственные, хвойные, смешанные);
- территориальное распределение доли нарушенных лесов от общей площади лесных массивов, вычисленной в каждой квадратной ячейке 10×10 км сети, на которую была разбита территория исследования. Размер ячейки для анализа был подобран эмпирически таким образом, чтобы наглядно отобразить территориальное распределение доли нарушенных лесов в регионе.

Результаты и их обсуждение

Оценка тесноты связи коэффициентов спектральной яркости лесных массивов, измеренных по данным Landsat-7 ETM+ и Landsat-8 OLI, показала их очень высокую статистически значимую корреляцию во всех анализируемых каналах (*табл. 3*) даже с учётом того, что интервал между датами получения снимков составил 8 дней. Средние значения коэффициентов отражения также очень близки, а в канале SWIR1 (1,55–1,75 мкм), который вносит наибольший вклад в разделение нарушенных и ненарушенных лесов (Терехин, 2019), средние величины коэффициентов спектральной яркости нарушенных лесов, вычисленные на основе сенсоров ETM+ и OLI, оказались аналогичны.

Таблица 3. Характеристики коэффициентов спектральной яркости лесных массивов, измеренных на основе данных Landsat-7 ETM+ 16.08.2018 и Landsat-8 OLI 24.08.2018 (уровень значимости — 0,05)

Спектральный диапазон	Коэффициент корреляции КСЯ ETM+ и OLI	Среднее значение КСЯ			
		Нарушенные леса		Ненарушенные леса	
		ETM+	OLI	ETM+	OLI
SWIR1 (1,55–1,75 мкм)	0,98	0,17	0,17	0,15	0,14
NIR (0,75–0,90 мкм)	0,98	0,33	0,35	0,31	0,32
SWIR2 (2,09–2,35 мкм)	0,94	0,06	0,07	0,05	0,05

Также необходимо отметить, что существующие различия между средними значениями КСЯ нарушенных лесов, измеренные по разным сенсорам, меньше разности коэффициентов отражения нарушенных и ненарушенных лесов. То есть величина изменений коэффициентов отражения, обусловленная нарушением древостоя, выше их различий, обусловленных измерениями по сенсорам Landsat ETM+ и Landsat OLI.

Результаты автоматизированного картографирования нарушенных лесов показали, что предложенный подход подтвердил высокую эффективность для выявления участков нарушенных лесов, особенно ареалов сложной формы (*рис. 2*), картографирование которых было бы очень затруднительно даже визуальным способом.

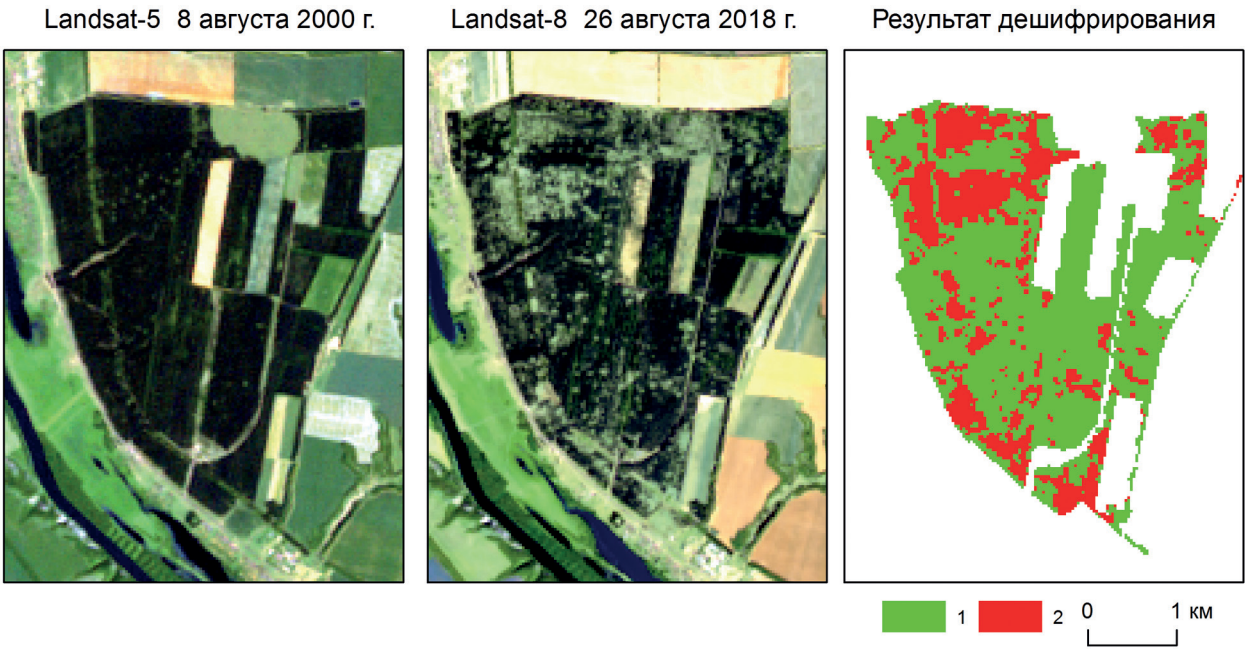

Рис. 2. Пример применения предложенного алгоритма для автоматизированного выявления участков лесов с нарушениями древостоя, появившихся в период 2000–2018 гг. 1 — леса без признаков нарушений; 2 — нарушенные леса

Подготовленная картограмма лесных экосистем, верхние ярусы которых были нарушены в период 2000–2018 гг. (*рис. 3*, см. с. 141), позволила оценить особенности распространения нарушенных лесов в пределах лесостепи Центрального Черноземья в начале XXI в.

Детальность полученной картограммы для контуров лесов аналогична детальности снимков Sentinel-2 (10 м/пиксель), для выявленных в их пределах участков нарушенных лесов она соответствует детальности снимков Landsat TM, OLI (30 м/пиксель). На основе подготовленной картограммы удалось получить ряд сведений о региональных особенностях распространения участков нарушенных лесов, появившихся в период 2000–2018 гг.

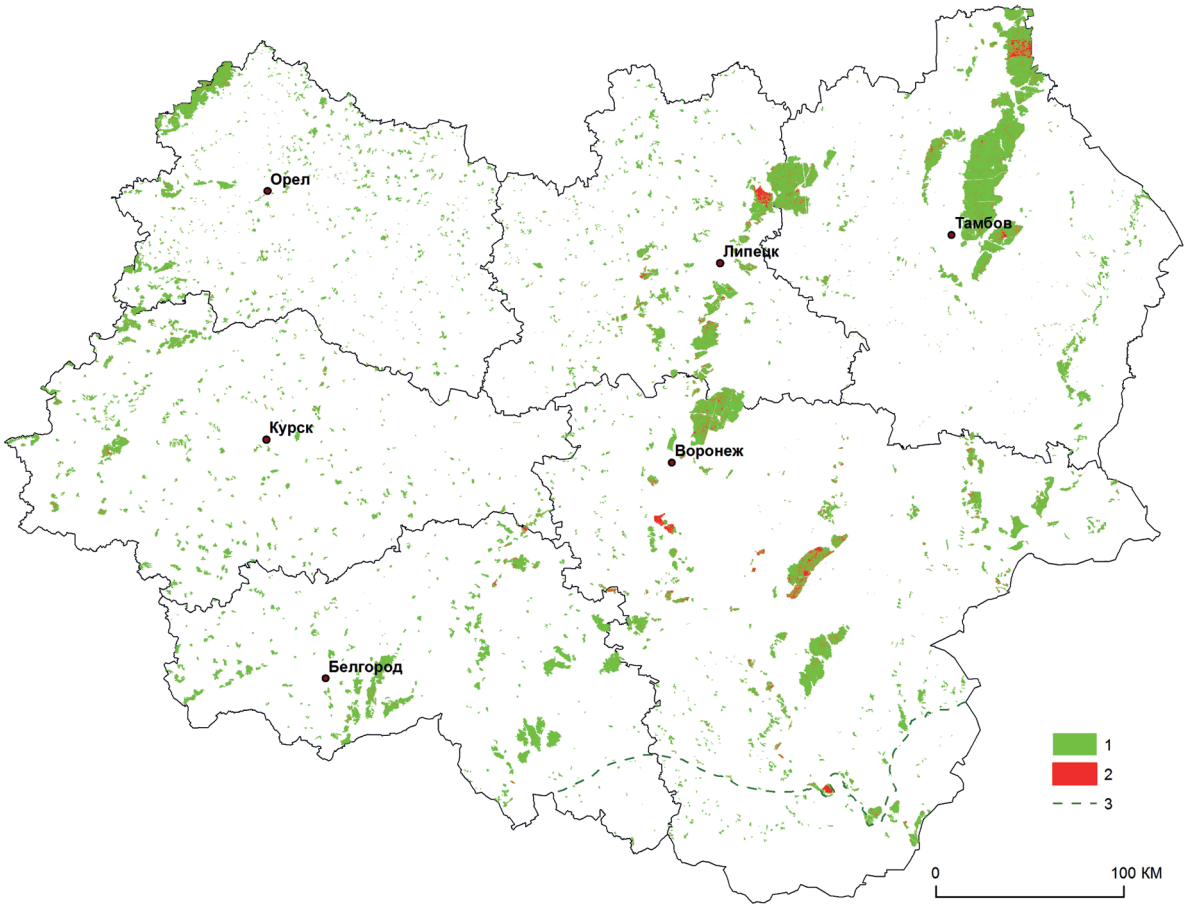

Рис. 3. Картограмма лесов лесостепной зоны Центрального Черноземья, древостой которых был нарушен в период 2000–2018 гг. 1 — леса без признаков нарушений; 2 — лесные экосистемы с нарушениями древостоя; 3 — граница лесостепи и степи

Во-первых, установлено, что региональной особенностью, характеризующей нарушенность лесов региона в период 2000–2018 гг., является относительно невысокая доля нарушенных лесных экосистем по сравнению с общей площадью лесов. В среднем она составила 6,0 % от общей площади проанализированных покрытых лесом земель (*табл. 4*). Из областей Центрального Черноземья наиболее высокие доли нарушенных лесов характерны для Воронежской и Липецкой обл. Минимальная доля нарушенных лесов — в Белгородской обл. Во многом это обусловлено тем, что с 1991 г. почти все её леса отнесены к защитным и в них не ведётся промышленных лесозаготовок.

Таблица 4. Доля нарушенных лесов, появившихся в 2000–2018 гг., от общей площади земель, покрытых лесом, на территории лесостепи Центрального Черноземья

Регион	Доля лесов с нарушениями верхних ярусов, %			
	Всего	Лиственные	Смешанные	Хвойные
Белгородская обл.	2,1	0,9	6,5	18,4
Воронежская обл.	9,7	2,3	15,6	25,0
Курская обл.	3,4	3,2	4,5	6,2
Липецкая обл.	8,8	4,4	12,9	9,7
Орловская обл.	2,2	1,7	3,4	1,9
Тамбовская обл.	5,6	3,6	6,4	3,2
Всего	**6,0**	**2,6**	**8,6**	**18,4**

Во-вторых, доля нарушенных участков существенно отличается в лесах различного породного состава. В большинстве областей и в целом по региону доля нарушенных лесов наиболее высока в хвойных лесных массивах (18,4 %). Минимальна она в лиственных лесах (2,6 %). Необходимо отметить, что и в смешанных лесах региона (преимущественно Тамбовская, Липецкая обл.) наибольшая доля нарушенных лесов приурочена к ареалам хвойных лесных экосистем. Таким образом, основная доля нарушенных лесных участков сосредоточена в хвойных лесах, состоящих из сосновых насаждений. Обусловлено это тем, что они в большей степени, чем лиственные массивы, подвержены влиянию нарушающих факторов, например воздействию болезней деревьев и пожаров.

Для пространственного анализа нарушенности лесов на территории исследования была подготовлена картограмма (*рис. 4*), характеризующая долю нарушенных участков от общей площади лесных экосистем в квадратных ячейках 10×10 км.

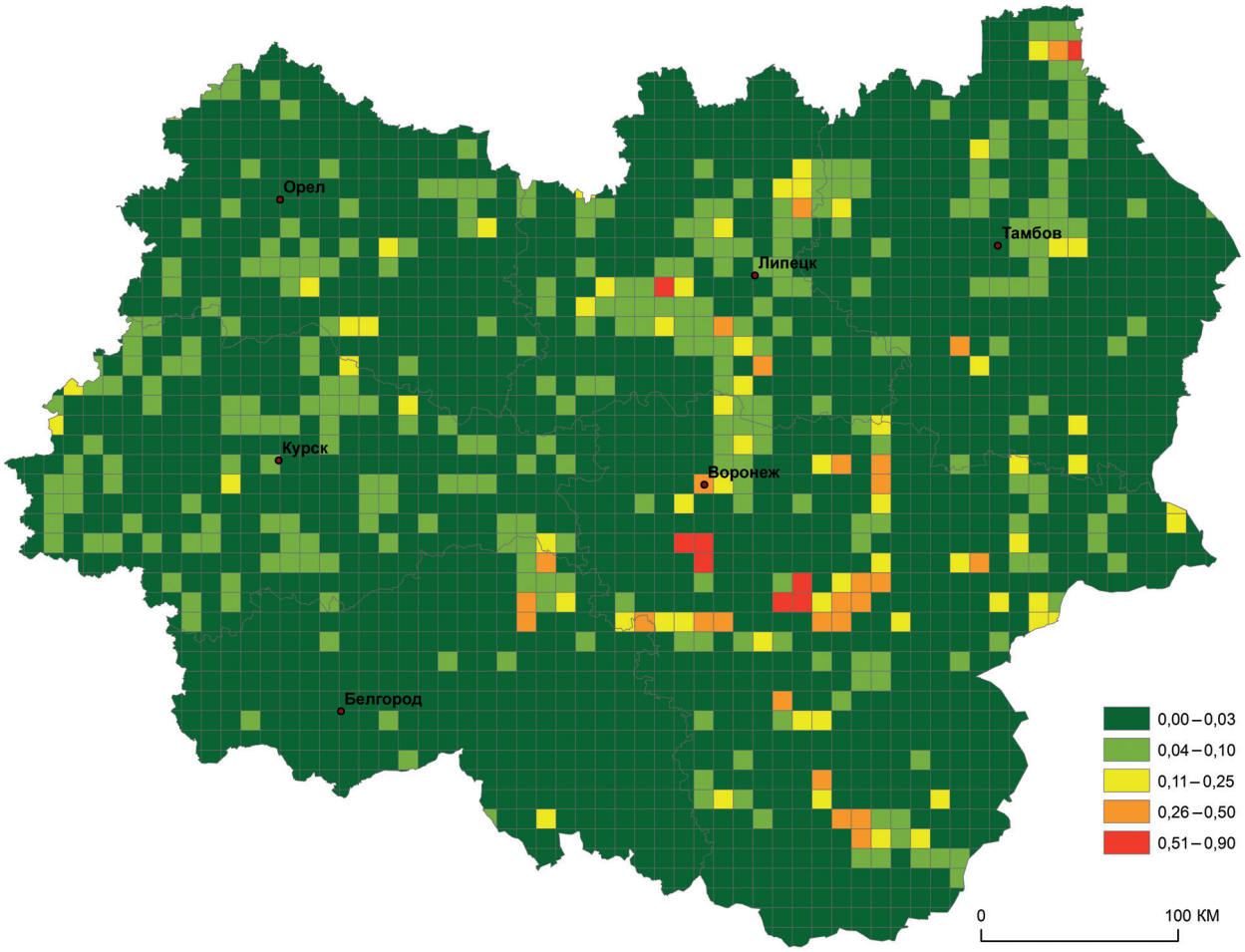

Рис. 4. Пространственное распределение на территории лесостепи Центрального Черноземья ячеек 10×10 км с разной долей нарушенных лесов от общей площади лесных массивов в период 2000–2018 гг.

Для градаций доли нарушенности (от 0 до 100 %) использована нарастающая шкала, диапазоны ячеек которой растут по зависимости, близкой к степенной. С использованием полученной картограммы установлено, что на основной части лесостепи Центрального Черноземья доминируют территории, в которых доля нарушенных лесов не превышает 10 %. Наиболее высока доля ячеек с минимальной нарушенностью лесов на юго-западе региона (Белгородская обл.).

На территории Орловской и Курской обл. отсутствуют ячейки, в которых доля нарушенных лесов превышает 25 %. В Воронежской и Липецкой обл. представлены ячейки, в которых

доля нарушенных лесов находится в диапазоне от 10 до 50 %, и имеются ячейки с долей нарушенных лесов более 50 %.

Таким образом, из картограммы (см. *рис. 4*) видно, что доля нарушенных лесов в восточной части региона заметно больше, чем в западной. Обусловлено это тем, что именно здесь в большей степени распространены хвойные леса, в которых доля нарушенных лесов выше, чем в лиственных массивах. Соотношение количества ячеек 10×10 км с разной долей нарушенных лесов (*табл. 5*) тем не менее наглядно показывает, что с увеличением доли нарушенных лесных массивов снижается и число соответствующих ячеек.

Таблица 5. Число и площадь ячеек размером 10×10 км на территории лесостепи Центрального Черноземья с разной долей нарушенных лесных экосистем в период 2000–2018 гг.

Доля нарушенности	Число ячеек	Доля от общей площади, %	Площадь, га
0–3	1850	79,5	153 015,8
4–10	334	15,6	30 037,6
11–25	73	3,1	6 000,3
26–50	30	1,4	2 700,0
51–100	8	0,4	768,6

Из *табл. 5* видно, что на основной части исследуемой территории доминируют пространства с долей нарушенных участков, не превышающей 3–10 %, и в период 2000–2018 гг. на подавляющей части лесостепи Центрального Черноземья площадь участков лесов, на которых произошло нарушение верхних ярусов, была значительно ниже остальной лесной площади.

Выводы

С использованием результатов автоматизированного картографирования проведён анализ нарушенности древостоя лесных экосистем на территории Центрального Черноземья в период 2000–2018 гг. Для картографирования участков нарушенных лесов использован алгоритм их автоматизированного детектирования. Выполнена оценка доли нарушенных лесов в регионе в начале XXI в. в целом и в разных типах лесных насаждений: лиственных, хвойных, смешанных. В среднем доля нарушенных лесов составила 6,0 % от общей площади покрытых лесом земель. В лиственных лесах доля нарушенных лесных участков в анализируемый период была значительно меньше, чем в хвойных. Наиболее крупные ареалы нарушенных лесов расположены также в лесах хвойного породного состава. В Белгородской и Курской обл. доля нарушенных лесов минимальна, наибольшая она — в Воронежской обл. На основе пространственного анализа нарушенных лесных экосистем установлено, что в регионе преобладают территории с их долей от 0 до 10 % от общей площади покрытых лесом земель.

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

Литература

1. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
2. *Бугаев В. А.*, *Ревин А. И.*, *Мусиевский А. Л.* Динамика лесного фонда Центрального Черноземья // Лесное хоз-во. 2006. № 3. С. 41–42.
3. *Бугаев В. А.*, *Мусиевский А. Л.*, *Царалунга В. В.* Дубравы лесостепи. Воронеж. Воронежская гос. лесотехн. акад., 2013. 247 с.

4. *Воробьев О. Н.*, *Курбанов Э. А.* Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 84–97.
5. *Ершов Д. В.*, *Исаев А. С.*, *Лукина Н. В.*, *Гаврилюк Е. А.*, *Королева Н. В.* Оценка биоразнообразия Центрального федерального округа по спутниковой карте наземных экосистем // Лесоведение. 2015. № 6. С. 403–416.
6. *Исаев А. С.*, *Коровин Г. Н.* Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // Лесоведение. 2003. № 2. С. 3–9.
7. *Кашницкий А. В.*, *Ховратович Т. С.*, *Балашов И. В.* Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 103–111.
8. *Кожаринов А. В.*, *Борисов П. В.* Распространение дубовых лесов на территории восточной Европы за последние 13 тысяч лет // Лесоведение. 2012. № 5. С. 22–28.
9. *Письман Т. И.*, *Ботвич И. Ю.*, *Шевырногов А. П.* Оценка состояния лесной растительности Красноярского края (заповедник «Столбы») по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 130–140.
10. *Сухих В. И.* Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 382 с.
11. *Терехин Э. А.* Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 112–124.
12. *Терехин Э. А.* Анализ спектрально-отражательных свойств нарушенных лесных экосистем лесостепной зоны на основе разновременных спутниковых данных // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. Йошкар-Ола, 2018. С. 39–47.
13. *Терехин Э. А.* Распознавание нарушенных лесных экосистем лесостепи на основе спектрально-отражательных характеристик // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 3. С. 412–418.
14. *Ховратович Т. С.*, *Барталев С. А.*, *Кашницкий А. Б.* Метод детектирования изменений лесов на основе подпиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110.
15. *Чендев Ю. Г.* Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М.: ГЕОС, 2008. 212 с.
16. *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. V. 342. No. 6160. P. 850–853.
17. *Hislop S.*, *Jones S.*, *Soto-Berelov M.*, *Skidmore A.*, *Haywood A.*, *Nguyen T. H.* A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 188–197.
18. *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. V. 155. P. 178–193.
19. *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. V. 6. Iss. 1. P. 310–329.
20. *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. V. 159. P. 28–43.
21. *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 J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. V. 130. P. 453–463.
22. *Thomas N. E.*, *Huang C.*, *Goward S. N.*, *Powell S.*, *Rishmawi K.*, *Schleeweis K.*, *Hinds A.* Validation of North American Forest Disturbance dynamics derived from Landsat time series stacks // Remote Sensing of Environment. 2011. V. 115. P. 19–32.
23. *Vogelmann J. E.*, *Xian G.*, *Homer C.*, *Tolk B.* Monitoring gradual ecosystem change using Landsat time series analyses: Case studies in selected forest and rangeland ecosystems // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 122. P. 92–105.

Estimation of forest disturbance in the forest-steppe zone at the beginning of the XXI century using satellite data

E. A. Terekhin

Belgorod State University, Belgorod 308015, Russia
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

The paper presents the results of forest stand disturbance estimation in the forest-steppe zone in the Central Chernozem Region of Russia during the period 2000–2018. GIS-mapping and spatial analysis of disturbed forest areas have been performed in automated mode using multi-temporal Landsat data. Evaluation of forest disturbance was carried out both for deciduous, coniferous and mixed forests. Using data from more than 3000 forest areas it was found that the area of disturbed forests is significantly less than the total forest area. The share of disturbed forests in the western part of the region is much smaller than in its eastern part. The share of disturbed areas in deciduous forests is small. The largest share of disturbed forest ecosystems is in coniferous forest. The largest share of disturbed forest ecosystems amounting to 18.4 % is characteristic of coniferous forests. The deciduous forests are characterized by a small average area of disturbed forest plot unlike coniferous forest. The largest area of disturbed forest ecosystems is attributed to coniferous and mixed forests.

Keywords: forest, forest-steppe, disturbed ecosystems, remote sensing data, long-term changes, Central Chernozem Region of Russia, Landsat

Accepted: 24.03.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
2. Bugaev V. A., Revin A. I., Musievskii A. L., Dinamika lesnogo fonda Tsentral'nogo Chernozem'ya (Dynamics of the forest fund of the Central Chernozem Region), *Lesnoe khozyaistvo*, 2006, No. 3, pp. 41–42.
3. Bugaev V. A., Musievskii A. L., Tsaralunga V. V., *Dubravy lesostepi* (Oakforests of the steppe zone), Voronezh: Voronezhskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya, 2013, 247 p.
4. Vorobiev O. N., Kurbanov E. A., Distantsionnyi monitoring vosstanovitel'noi dinamiki rastitel'nosti na garyakh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya (Remote monitoring of vegetation regeneration dynamics on burnt areas of Mari Zavolzhje forests), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 84–97.
5. Ershov D. V., Isaev A. S., Lukina N. V., Gavrilyuk E. A., Koroleva N. V., Otsenka bioraznoobraziya Tsentral'nogo federal'nogo okruga po sputnikovoi karte nazemnykh ekosistem (Biodiversity estimate for the Central Federal District from satellite map of terrestrial ecosystems), *Lesovedenie*, 2015, No. 6, pp. 403–416.
6. Isaev A. S., Korovin G. N., Krupnomasshtabnye izmeneniya v boreal'nykh lesakh Evrazii i metody ikh otsenki s ispol'zovaniem kosmicheskoi informatsii (Large-Scale Changes in Eurasian Boreal Forests and Methods of Their Assessment Using Space Information), *Lesovedenie*, 2003, No. 2, pp. 3–9.
7. Kashnitskii A. V., Khovratovich T. S., Balashov I. V., Organizatsiya obrabotki dannykh DZZ pri reshenii zadachi detektirovaniya izmenenii lesnogo pokrova na bol'shikh territoriyakh (The organization of remote sensing data processing for solving the problems of deforestation detection in large areas), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 103–111.
8. Kozharinov A. V., Borisov P. V., Rasprostranenie dubovykh lesov na territorii vostochnoi Evropy za poslednie 13 tysyach let (Distribution of oak forests in Eastern Europe over the Latest thirteen thousand years), *Lesovedenie*, 2012, No. 5, pp. 22–28.
9. Pisman T. I., Botvich I. Yu., Shevyrnogov A. P., Otsenka sostoyaniya lesnoi rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraya (zapovednik "Stolby") po sputnikovym dannym (Assessment of the state of forest vegetation in Krasnoyarsk Territory (Stolby Nature Reserve) according to satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 5, pp. 130–140.
10. Sukhikh V. I., *Aerokosmicheskie metody v lesnom khozyaistve i landshaftnom stroitel'stve* (Aerospace methods in forestry and landscape construction), Yoshkar-Ola: MarGTU, 2005, 382 p.

11. 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*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 112–124.
12. Terekhin E. A., Analiz spektral'no-otrazhatel'nykh svoistv narushennykh lesnykh ekosistem lesostepnoi zony na osnove raznovremennykh sputnikovykh dannykh (Analysis the spectral response of disturbed forest ecosystems in forest-steppe zone using multitemporal remote sensing data), In: *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring*, Yoshkar-Ola, 2018, pp. 39–47.
13. 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), *Computer Optics*, 2019, Vol. 43, No. 3, pp. 412–418.
14. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. B., Metod detektirovaniya izmenenii lesov na osnove podpiksel'noi otsenki proektivnogo pokrytiya drevesnogo pologa po raznovremennym sputnikovym izobrazheniyam (Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 102–110.
15. Chendev Yu. G., *Evolyutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvyshennosti v golotsene* (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Moscow: GEOS, 2008, 212 p.
16. 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. 342, No. 6160, pp. 850–853.
17. Hislop S., Jones S., Soto-Berelov M., Skidmore A., Haywood A., Nguyen T. H., A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 221, pp. 188–197.
18. 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.
19. 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, Vol. 6, Issue 1, pp. 310–329.
20. 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.
21. 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 J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, Vol. 130, pp. 453–463.
22. Thomas N. E., Huang C., Goward S. N., Powell S., Rishmawi K., Schleeweis K., Hinds A., Validation of North American Forest Disturbance dynamics derived from Landsat time series stacks, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, pp. 19–32.
23. Vogelmann J. E., Xian G., Homer C., Tolk B., Monitoring gradual ecosystem change using Landsat time series analyses: Case studies in selected forest and rangeland ecosystems, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 122, pp. 92–105.