

Современные тенденции изменения лесного покрова Среднерусской лесостепи

Э.А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет
Белгород, 308015, Россия
E-mail: terekhin@bsuedu.ru*

Пространственно-временные изменения лесного покрова, обусловленные ростом лесистости, выступают одним из ключевых факторов, определяющих особенности ландшафтов и протекающие в них процессы. Изложены результаты анализа многолетних изменений в лесном покрове Среднерусской лесостепи в период середины 1980-х гг. — первой половины третьего десятилетия XXI в. На сети из 25 тестовых участков, расположенных в пределах региона, изучены показатели изменения лесистости, площадные и пространственные характеристики лесопокрытых земель. К ним относятся общая лесопокрытая площадь, средняя площадь лесного массива, протяжённость границы леса и плотность лесных массивов. За почти сорокалетний период рост лесистости ландшафтов в среднем по региону составил более 36 %, сопровождаясь увеличением на 16,7 % средней площади лесных массивов и более чем на 40 % протяжённости границ лесопокрытых земель. При среднем росте числа лесных массивов по региону почти на 17 % на некоторых тестовых участках происходило снижение их количества вследствие объединения лесов в процессе их разрастания и продвижения границ. На большинстве тестовых участков в середине 1980-х гг. лесистость не превышала 10 %, но в исследуемый период заметно выросла их доля с лесистостью от 10 до 30 %. Рост лесистости обусловил снижение вариабельности спектрально-отражательных свойств территорий, на которых сформировались леса. Снижение коэффициента вариации отражательных характеристик выявлено в видимой, ближней и коротковолновой инфракрасной частях спектра.

Ключевые слова: лесопокрытые земли, лесистость, спектрально-отражательные характеристики, многолетние изменения, Landsat

Одобрена к печати: 27.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-207-221

Введение

Лесной покров выступает важнейшим элементом ландшафтов, динамика которого определяет многочисленные процессы, происходящие в них, связанные в том числе с гидрологией, микроклиматом, углеродным циклом. Анализ лесистости как ландшафтной характеристики приобретает особое значение в условиях высокой аграрной освоенности (Землянухин, Романцов, 2017; Лисецкий, 2000), когда лесопокрытая площадь относительно небольшая, а леса выступают одними из немногих типичных элементов естественных ландшафтов.

Для Среднерусской лесостепи, включающей Центральное Черноземье, оценка лесистости выступает одной из ключевых задач ландшафтных исследований в контексте водоохраных, защитных и других экологических функций лесов (Крупко, Михно, 2019; Кузьменко и др., 2013). Регион расположен в условиях умеренного климата и характеризуется высокой долей сельскохозяйственных земель, в особенности пахотных угодий, занимающих свыше 60 % территории (Косолапов и др., 2015). С конца XVII в. по середину XX в. в регионе происходил процесс снижения лесистости, обусловленный во многом аграрным освоением территории. Согласно оценкам (Цветков, 1957), в начале XX в. в Курской губернии лесистость составляла порядка 6,2 %, в Воронежской — 7,4 %. В середине XX в. средняя лесистость Центрально-Чернозёмного района находилась на уровне 7,9 % (Молчанов, 1966). Современный лесной покров представлен преимущественно небольшими, достаточно многочисленными лесными массивами, но в ряде районов Воронежской, Липецкой и других областей имеются относительно крупные леса. Многие из них, такие как Шипов лес, Усманский

лесной массив и др., в конце XVII – начале XVIII в. были изъяты из общего пользования и на длительное время превращены в корабельные леса (Бугаев, Мусиевский, 2000; Камышев, Хмелев, 1976). С последней четверти XX в. в регионе отмечаются процессы роста лесистости (Терехин, 2021), связанные в значительной степени с формированием лесных массивов в овражно-балочной сети. Одновременно, особенно в условиях подзон северной и типичной лесостепи, происходит процесс естественного облесения постагрогенных земель (Терехин, 2022). Вместе с тем актуальной становится оценка лесистости не только отдельных морфологических единиц ландшафтов, но и территории в целом. Актуальность приобретает анализ параметров лесопокрываемых земель, связанных с ростом лесистости. К ним относятся средняя площадь лесных массивов, их плотность, протяжённость границы леса и изменения перечисленных показателей.

Учитывая, что динамика лесистости имеет выраженный пространственно-временной аспект, объективным источником информации о ней выступают разновременные спутниковые снимки. Обусловлено это тем, что они позволяют единовременно фиксировать состояние обширных участков земной поверхности. К настоящему времени данные дистанционного зондирования Земли являются неотъемлемой составляющей мониторинга лесопокрываемой площади на региональном, континентальном и глобальном уровнях (Барталев и др., 2015; Kim et al., 2014; Pflugmacher et al., 2019). С точки зрения анализа динамики лесного покрова в средних масштабах на основе однотипных спутниковых данных наиболее высокая глубина ретроспективной оценки может быть обеспечена применением снимков серии Landsat TM (*англ.* Thematic Mapper) и более поздних поколений Landsat OLI (*англ.* Operational Land Imager) (Воробьев и др., 2016; Egorov et al., 2023; Zhao et al., 2018), охватывая время начиная с первой половины 1980-х гг. На их основе к настоящему времени предложены подходы к картографированию лесопокрываемых земель (Gudex-Cross et al., 2017; Senf et al., 2020) и мониторингу нарушенности лесного покрова (Hislop et al., 2019; Lu et al., 2022; Schroeder et al., 2017). На уровне детальности снимков Landsat автоматизированные методы показывают достаточно высокую точность (Ховратович и др., 2019; Ershov et al., 2022), особенно при проведении исследований в лесной зоне. В то же время с учётом размера пикселей Landsat в условиях невысокой лесистости и преобладания небольших лесных массивов (менее 100 га), как, например, в Среднерусской лесостепи, использование методов автоматизированного анализа для достоверной оценки лесистости и её изменений становится затруднительным. Во многом это связано с наличием большого количества пограничных пикселей, содержащих спектральные смеси из отражательных характеристик лесов и близлежащих угодий. Вариантом решения этой проблемы остаётся визуальное дешифрирование либо использование предварительно созданных масок лесопокрываемых земель.

Одновременно возникает необходимость получения объективных данных о связи спектрально-отражательных свойств ландшафтов с процессами формирования лесопокрываемой площади. Изменение лесистости может оказывать влияние на абсолютные величины спектрально-отражательных характеристик (Терехин, 2021) или производные показатели, например вегетационные индексы. С другой стороны, рост или снижение лесистости может находиться в связи не только с самими значениями, но и с вариацией отражательных характеристик, и соответствующий вопрос во многом остаётся открытым.

Цель исследования заключалась в оценке изменений лесистости и показателей лесопокрываемых земель, типичных для ландшафтов Среднерусской лесостепи, в период середины предпоследнего десятилетия XX в. – первой половины третьего десятилетия XXI в. Задачи исследования включали анализ комплекса показателей лесопокрываемых земель и их спектрально-отражательных характеристик, обусловленных ростом лесистости. К ним относились общая лесопокрываемая площадь, величина лесистости, средняя площадь лесного массива, протяжённость границ покрытых лесом земель, плотность лесных массивов. Анализ последних трёх показателей актуален для пространственной оценки лесов в условиях их высокой фрагментированности, которая характерна для региона исследования. Показатели средней площади лесных массивов и их плотности в регионе во многом определяют функции лесов как элементов экологического каркаса территории, составляющих ландшафта, играющих

ключевую роль в сохранении биоразнообразия. Оцениваемые спектрально-отражательные характеристики включали коэффициенты спектральной яркости в видимом, ближнем (*англ.* Near InfraRed — NIR) и коротковолновом инфракрасном (ИК) (*англ.* Short Wave InfraRed — SWIR) диапазонах. Одновременно была изучена вариация их значений.

Материалы и методика исследования

Объектами исследования выступали леса, расположенные на территории шести областей Российской Федерации: Белгородской, Курской, Орловской, Липецкой, Воронежской и Тамбовской. Соответствующий территориальный охват позволил объективно оценить рост лесистости в условиях лесостепной зоны, от её границы на северо-западе с лесной зоной до границы на юге с зоной степи.

Для выполнения исследования на территории региона развёрнута сеть (*рис. 1*) из тестовых участков размером 10×10 км, размещение которых стремились осуществлять на основе группы критериев таким образом, чтобы максимально репрезентативно оценить рост лесистости в условиях Среднерусской лесостепи:

1. Участки должны располагаться на территориях, наиболее типично представляющих природные ландшафты региона, находясь вне крупных населённых пунктов или инфраструктурных объектов.
2. Участки должны максимально возможно представлять лесопокрываемые земли, находящиеся в автоморфных условиях, т. е. вне территорий повышенного увлажнения.
3. Тестовые участки не должны располагаться на местах, включающих водохранилища, крупные пруды или их значительные части.
4. В пределах региона участки должны размещаться максимально равномерно, для пространственной репрезентативности, но с учётом предыдущих условий.

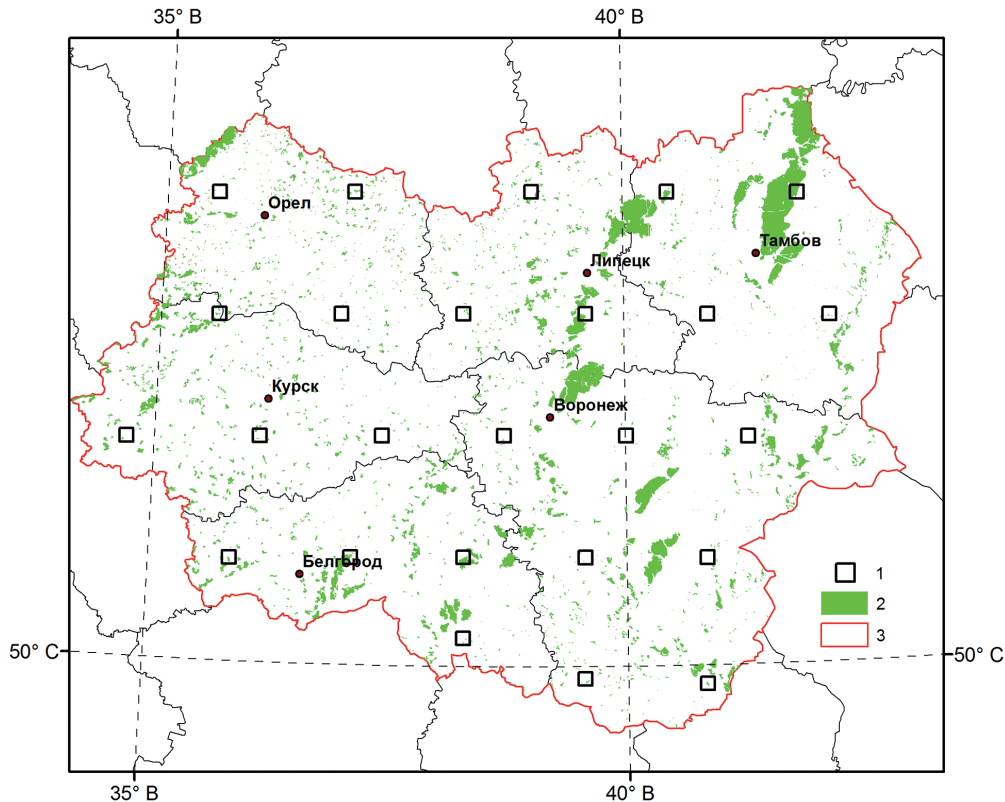


Рис. 1. Местоположение территории исследования и тестовых участков для анализа параметров лесопокрываемых земель: 1 — тестовые участки; 2 — лесопокрываемые земли, характеризующие основные лесные массивы в конце второго десятилетия XXI в. (Терехин, 2020); 3 — территория исследования

В общей сложности показатели лесопокрытой площади исследованы на 25 тестовых участках суммарной площадью 250 000 га.

Размещение тестовых участков осуществлено на основе предварительно сформированного покрытия региона снимками серии Landsat TM и Landsat OLI, полученными в период второй половины 1980-х гг. и в 2024 г. (табл. 1). Эти же снимки использовались для дешифрирования и картографирования лесопокрытой площади. Подбор изображений осуществлён таким образом, чтобы сроки их получения (в течение года) были максимально возможно близкими друг к другу. При этом основным условием выступало отсутствие облачного покрова. На некоторые тестовые участки для дополнительных оценок подобраны также снимки начала 2000-х гг.

Таблица 1. Спутниковые данные Landsat TM/OLI, используемые для анализа лесопокрытых земель и их характеристик

Path/Row	Прибор	Дата получения	Path/Row	Прибор	Дата получения
178/023	TM	07.08.1986	177/024	TM	29.08.1985
	OLI	16.09.2024		OLI	16.08.2024
176/023	TM	22.08.1988	175/024	TM	23.08.1988
	OLI	25.08.2024		OLI	26.08.2024
175/023	TM	22.07.1988	177/025	TM	29.08.1985
	OLI	26.08.2024		OLI	07.07.2024
178/024	TM	07.08.1986	175/025	TM	23.08.1988
	OLI	14.07.2024		OLI	18.08.2024
177/023	TM	29.08.1985	176/025	TM	28.08.1987
	OLI	16.08.2024		OLI	08.07.2024

Анализ лесопокрытой площади на оба временных среза проведён методом дешифрирования контуров покрытых лесом земель в пределах каждого тестового участка с созданием векторного слоя границ лесных массивов. Соответствующие слои позволили получить необходимый набор количественных показателей о параметрах лесопокрытых земель. Подготовленные векторные данные дали возможность на следующем этапе исследовать связь характеристик лесопокрытой площади с параметрами отражательных свойств в различных диапазонах спектра. В системе WRS-2 (*англ.* Worldwide Reference System-2) снимки охватывали 10 ячеек, определяемых номером колонки (*англ.* Path) и ряда (*англ.* Row).

Для каждого лесного массива в таблицу атрибутов внесены сведения о тестовом участке и области Российской Федерации, в пределах которых он расположен. На основе подготовленных векторных слоёв оценены площадь, число, протяжённость границ и другие характеристики лесопокрытых земель. Лесистость рассчитана как отношение лесопокрытой площади (в га) на каждом тестовом участке к его общей площади. Протяжённость границы лесопокрытых земель измерена в километрах. Плотность лесных массивов вычислена как отношение их числа к площади тестового участка. Анализ полученного набора показателей выполнен на трёх уровнях: в целом по региону, на уровне отдельных областей и на уровне отдельных тестовых участков. Изменения лесистости, произошедшие на отдельных тестовых участках в исследуемый период, были проанализированы на территории региона.

Результаты оценки лесистости, полученные на основе данных Landsat OLI 2024 г., были сопоставлены с информацией о лесопокрытой площади, рассчитанной на основе глобальных информационных продуктов ESA WorldCover 2021 (*англ.* European Space Agency) (источник данных: <https://worldcover2021.esa.int>). Они представляют растровые изображения, содержащие сведения о структуре земель, вычисленные автоматизированным способом по снимкам Sentinel-2 (пространственное разрешение — 10 м) по состоянию на начало третьего десятилетия XXI в. Для анализа были использованы семь тайлов или фрагментов этих данных

с номерами N48E033, N48E036, N48E039, N51E033, N51E036, N51E039, N51E042. Из каждого тайла методом выборки были извлечены данные о лесопокрытой площади. Полученные растры были спроецированы, и из них сформирована мозаика. На её основе методом зональной статистики получены сведения о лесопокрытой площади в пределах каждого из 25 тестовых участков. В результате подготовлена таблица с количеством пикселей лесопокрытой площади в пределах каждого из них. По этим данным вычислена площадь лесов, а затем лесистость. Соответствующие сведения были непосредственно сопоставлены с её оценками на основе данных Landsat OLI.

Заключительный этап исследования состоял в анализе влияния изменения лесистости территорий на параметры их спектрально-отражательных характеристик. Учитывая, что увеличение лесопокрытой площади наблюдалось на всех тестовых участках, сравнение спектрально-отражательных свойств осуществлено в границах лесных массивов по состоянию на 2024 г. Такой приём позволил сравнить отражательные свойства территории на стадии формирования лесных массивов и по достижении полного покрытия лесом. Вследствие того, что диапазоны каналов Landsat TM и Landsat OLI имеют определённые различия, а также различается радиометрическое разрешение данных с этих приборов, полноценное сравнение средних величин спектрально-отражательных характеристик, полученных ими, затруднительно. С другой стороны, учитывая связь лесистости и спектрально-отражательных свойств, установленную на примере овражно-балочных систем региона (Терехин, 2024), существенное изменение лесопокрытой площади должно неизбежно привести и к изменениям в отражательной способности территории. В то же время определённый интерес представляет оценка влияния роста лесистости не только на абсолютные значения спектрально-отражательных характеристик, но и на их относительные статистические показатели. В этой связи предложено использовать коэффициент вариации, характеризующий процентное изменение вариативности отражательных свойств. Рабочая гипотеза, таким образом, заключалась в том, что коэффициент вариации территорий, на которых сформировались леса, находится в определённой зависимости от лесистости. Оценка коэффициента вариации в оба временных среза выполнена для ключевых каналов приборов TM и OLI: синего, зелёного, красного, ближнего и двух коротковолновых ИК.

Для объективного сравнения статистических показателей спектрально-отражательных характеристик, измеренных в разные временные срезы, исследование проведено на основе данных с одного и того же тестового участка (в Липецкой области), находящегося в пределах одной спутниковой сцены (колонка 177, ряд 23 в системе WRS-2). При этом использованы снимки максимально близких сроков получения: 29.08.1985 и 16.08.2024. Изображения прошли радиометрическую калибровку и были пересчитаны в безразмерные коэффициенты спектральной яркости, принимающие значения от 0 до 1. Для анализа отобраны лесные массивы только из лиственных пород деревьев, исключая хвойные, чтобы избежать ошибок, обусловленных различиями их коэффициентов спектральной яркости. Расчёт спектрально-отражательных свойств в каждом из шести изученных диапазонов выполнен методом зональной статистики. Проведена оценка среднего значения и стандартного отклонения спектрально-отражательных характеристик в 1985 и 2024 гг. в границах лесов 2024 г. и на их основе рассчитаны значения коэффициентов вариации. После этого вычислены средние значения этих коэффициентов в каждом канале на оба временных среза. Полученные данные сопоставлены с величиной роста лесистости между обеими датами, т.е. от начального уровня до достижения полной лесопокрытой площади в 2024 г. Для оценки зависимости между лесистостью и коэффициентом вариации спектрально-отражательных характеристик для каждого лесного массива в границах 2024 г. оценена лесистость по состоянию на 1985 г. Эти сведения вместе с соответствующими им коэффициентами вариации отражательных свойств в 1985 г. сформировали необходимую выборку для регрессионного анализа.

Результаты и их обсуждение

В Среднерусской лесостепи в период со второй половины 1980-х гг. до середины третьего десятилетия XXI в. отмечалась тенденция роста общей лесопокрытой площади, лесистости, средней площади лесных массивов, их числа, суммарной протяжённости границы леса (табл. 2). Одновременно выросла и плотность лесных массивов.

Таблица 2. Изменение параметров лесопокрытых земель в 1985–2024 гг., оценённое на основе данных с тестовых участков Среднерусской лесостепи

Параметр лесопокрытых земель	1985	2024	Изменение, %
Площадь, га	35597,1	48469,9	+36,2
Лесистость, %	14,2	19,4	+36,2
Число лесных массивов, единиц	1367	1596	+16,8
Средняя площадь лесного массива, га	26,0	30,4	+16,7
Протяжённость границы леса, км	3809,6	5462,2	+43,4
Плотность лесных массивов, ед./км ²	0,55	0,64	+16,8

За период почти сорока лет рост лесистости в среднем по региону составил более 36 % от уровня середины второй половины 1980-х гг. За это же время существенно выросли средняя площадь лесного массива (на 16,7 %) и протяжённость границы леса. Происходящие изменения наблюдались в разных частях Среднерусской лесостепи (примеры на рис. 2).

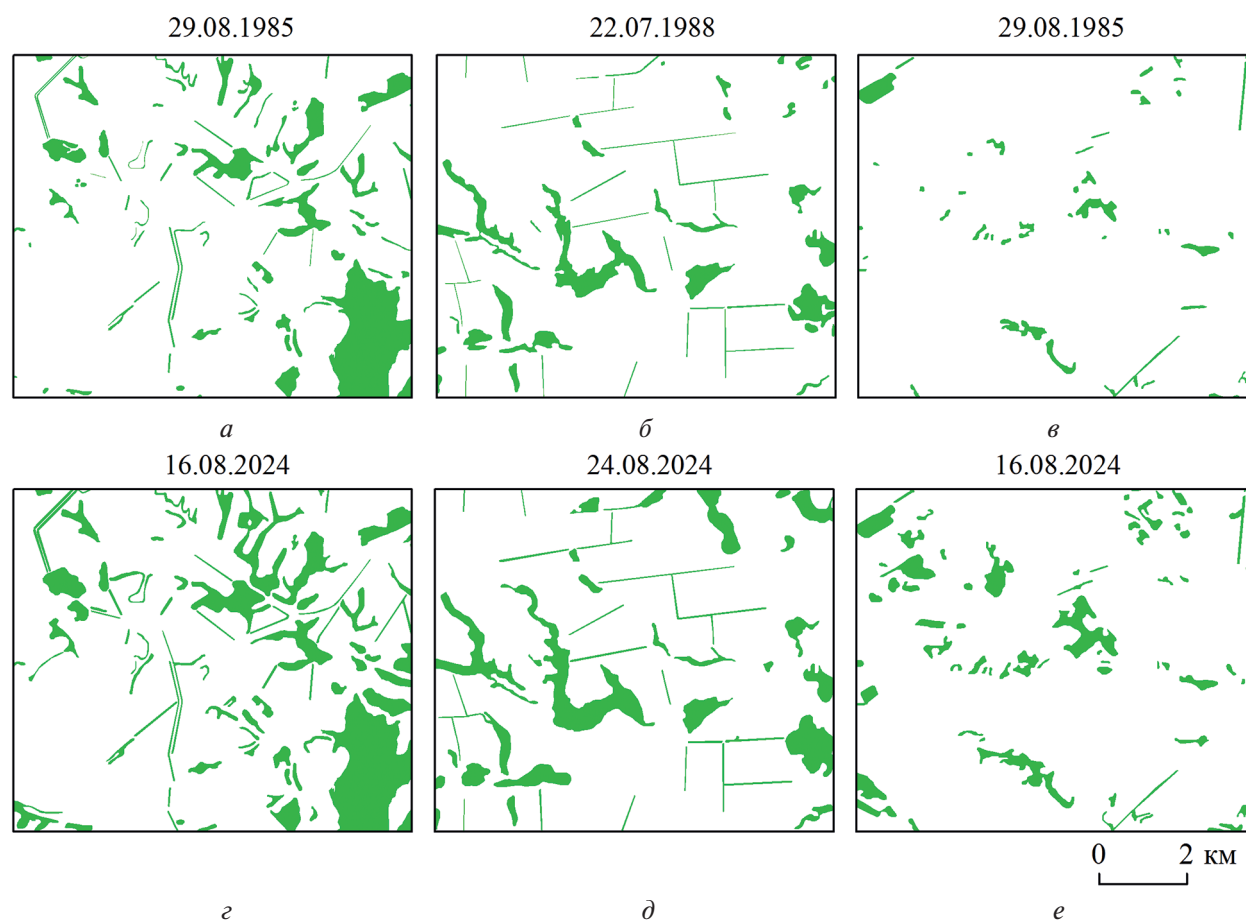


Рис. 2. Примеры изменения лесопокрытой площади в Среднерусской лесостепи со второй половины 1980-х гг. по 2024 г.: а, а — Липецкая область; б, б — Тамбовская область; в, в — Орловская область

Процесс увеличения лесопокрытой площади охватил, таким образом, весь регион, несмотря на определённые физико-географические различия в его пределах. Достаточно высокая плотность лесных массивов в оба временных среза обусловлена распространением в регионе небольших, но относительно многочисленных лесов.

В исследуемый период в регионе параллельно наблюдались процессы появления новых лесов и объединения небольших лесных массивов в более крупные вследствие продвижения границы леса. Рост или снижение их числа на конкретных тестовых участках был обусловлен во многом начальной конфигурацией лесопокрытых земель. Расширение лесопокрытой площади происходило, как правило, за счёт зарастания лесной растительностью овражно-балочных систем, сухих склонов речных долин и в некоторых частях региона — вследствие формирования лесов на оставленных аграрных землях.

Оценка параметров лесопокрытых земель на уровне областей Центрального Черноземья показала рост лесистости в каждой из них (табл. 3). Её наибольший абсолютный рост зафиксирован для тестовых участков, расположенных в Тамбовской области, а наибольший относительный (83 %) — в Орловской.

Таблица 3. Изменение лесопокрытой площади, лесистости и средней площади лесных массивов на основе данных с тестовых участков в Среднерусской лесостепи

Область РФ	Лесопокрытая площадь, га		Лесистость		Средняя площадь лесного массива, га	
	1985 г.	2024 г.	1985 г.	2024 г.	1985 г.	2024 г.
Белгородская	9922,4	11 699,8	0,25	0,29	34,8	31,0
Воронежская	4546,2	6 885,8	0,06	0,10	11,2	14,4
Курская	4845,6	6 522,8	0,13	0,18	28,5	41,8
Липецкая	4799,3	6 382,9	0,16	0,21	25,4	30,7
Орловская	2799,7	5 112,5	0,09	0,16	14,7	22,1
Тамбовская	8683,9	11 866,1	0,22	0,30	68,4	82,4

Наиболее высокие абсолютные показатели лесопокрытой площади на тестовых участках в Белгородской области связаны с тем, что в ней по сравнению с некоторыми другими областями (Курской, Орловской) чаще встречаются более крупные лесные массивы, представляющие нагорные дубравы.

Таблица 4. Изменение параметров лесопокрытых земель, обусловленное процессами естественного роста лесистости, на основе данных с тестовых участков

Область РФ	Число лесных массивов		Протяжённость границы леса, км		Плотность лесных массивов, ед./км ²	
	1985 г.	2024 г.	1985 г.	2024 г.	1985 г.	2024 г.
Белгородская	285	378	671,9	1003,2	0,71	0,94
Воронежская	405	479	1235,9	1760,0	0,58	0,68
Курская	170	156	544,4	811,3	0,46	0,42
Липецкая	189	208	543,6	706,7	0,63	0,69
Орловская	191	231	361,6	574,1	0,58	0,70
Тамбовская	127	144	452,1	606,8	0,32	0,36

Увеличение средней площади лесных массивов при её оценке на уровне отдельных областей наблюдалось в большинстве из них. В настоящее время, как и 40 лет назад, наибольшая средняя площадь лесного массива характерна для Тамбовской области, наименьшая — для

Воронежской. Несмотря на то, что эти результаты приведены на уровне областей РФ, они достаточно хорошо отражают региональные географические различия. Например, наименьшие значения лесистости в оба временных среза характерны для Воронежской области, значительная часть которой расположена в подзоне южной лесостепи и близким к ней условиям степной зоны (Физико-географическое..., 1961). Наиболее высокие абсолютные показатели прироста лесистости характерны для Тамбовской области, значительная часть которой находится в подзоне северной лесостепи.

Число лесных массивов, при общей тенденции к росту, на уровне областей показало внутрирегиональные различия (табл. 4). В пяти из шести субъектов наблюдалось увеличение этого показателя и в одном (Курская область) — уменьшение.

Протяжённость границы леса, так же как и лесистость, во всех областях показала выраженный рост. В каждой из них он составил не менее 30 % от уровня середины 1980-х гг. Процесс расширения границы леса широко представлен в овражно-балочной сети. При наиболее благоприятных условиях, например, на северо-западе Орловской и северо-востоке Тамбовской области, лес достаточно быстро распространяется и на постагrogenных землях, формируя за период порядка двух десятилетий сомкнутые насаждения (Терехин, 2022).

Анализ параметров лесопокрываемых земель на уровне тестовых участков выявил, что в изученный период лесистость и протяжённость внешней границы леса выросли на всех из них. Средняя площадь лесного массива характеризовалась ростом на 20 тестовых участках и на 5 участках уменьшилась. Обусловлено это тем, что одновременно с расширением границ и площадей существующих лесов на некоторых участках за почти 40-летний период произошло формирование новых, небольших лесопокрываемых земель. Число лесных массивов также увеличилось на 20 участках и на 5 сократилось. Сопоставление распределения тестовых участков по величине лесистости в середине 1980-х гг. и в 2024 г. отражает сокращение их числа в самой низкой градации (0–10 %) за счёт перехода существенной части в градацию лесистости 10–20 % (рис. 3). При этом участки с лесистостью до 20 % преобладали в регионе в оба временных среза. В середине 1980-х гг. суммарно к этой градации относилось 19 тестовых участков. В 2024 г. она включала 18 участков из 25, характеризую наиболее типичные значения лесистости для региона. Рост числа участков наблюдался и в соседней градации — с лесистостью 20–30 %. Таким образом, гистограмма лесистости тестовых участков одновременно характеризовалась сдвигом вправо при существенном сокращении самой многочисленной градации.

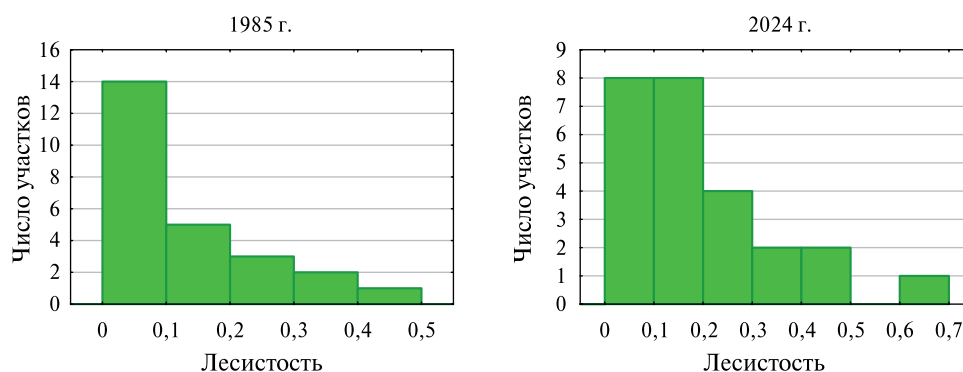


Рис. 3. Распределение тестовых участков Среднерусской лесостепи по лесистости в середине 1980-х гг. и в 2024 г.

Вместе с тем сопоставляя полученные данные с результатами исследований, проведённых отдельно для овражно-балочных систем (Терехин, 2024) и постагrogenных земель (Терехин, 2022), достаточно хорошо видно, что лесистость региона в целом заметно ниже современной лесистости перечисленных элементов ландшафтов, которая находится в интервале от 30 до 40 %.

Диаграммы изменения лесистости на тестовых участках (рис. 4) отражают её пространственную вариацию в Среднерусской лесостепи в оба временных среза. На тестовых участках с очень высокой начальной лесистостью её прирост, как правило, заметно меньше, чем на территориях, где начальная лесистость была относительно небольшой. Высокая пространственная вариация лесистости во многом выступает следствием значительной аграрной освоенности территории — в регионе представлены участки как с небольшой лесопокрытой площадью, так и с присутствием достаточно крупных лесных массивов. Наиболее высокие значения прироста лесистости (более 100 % от уровня середины 1980-х гг.) зафиксированы на участках, расположенных в Орловской и Тамбовской областях. Отмечая в целом высокий рост лесистости на большинстве тестовых участков, но одновременно учитывая особенности региона, необходимо отметить и объективные ограничения её роста. Они связаны с преобладанием во всех областях Центрального Черноземья пахотных земель, которые доминируют в ландшафте, т. е. площадь территорий, на которые могут в дальнейшем продвигаться леса, существенно ограничена.

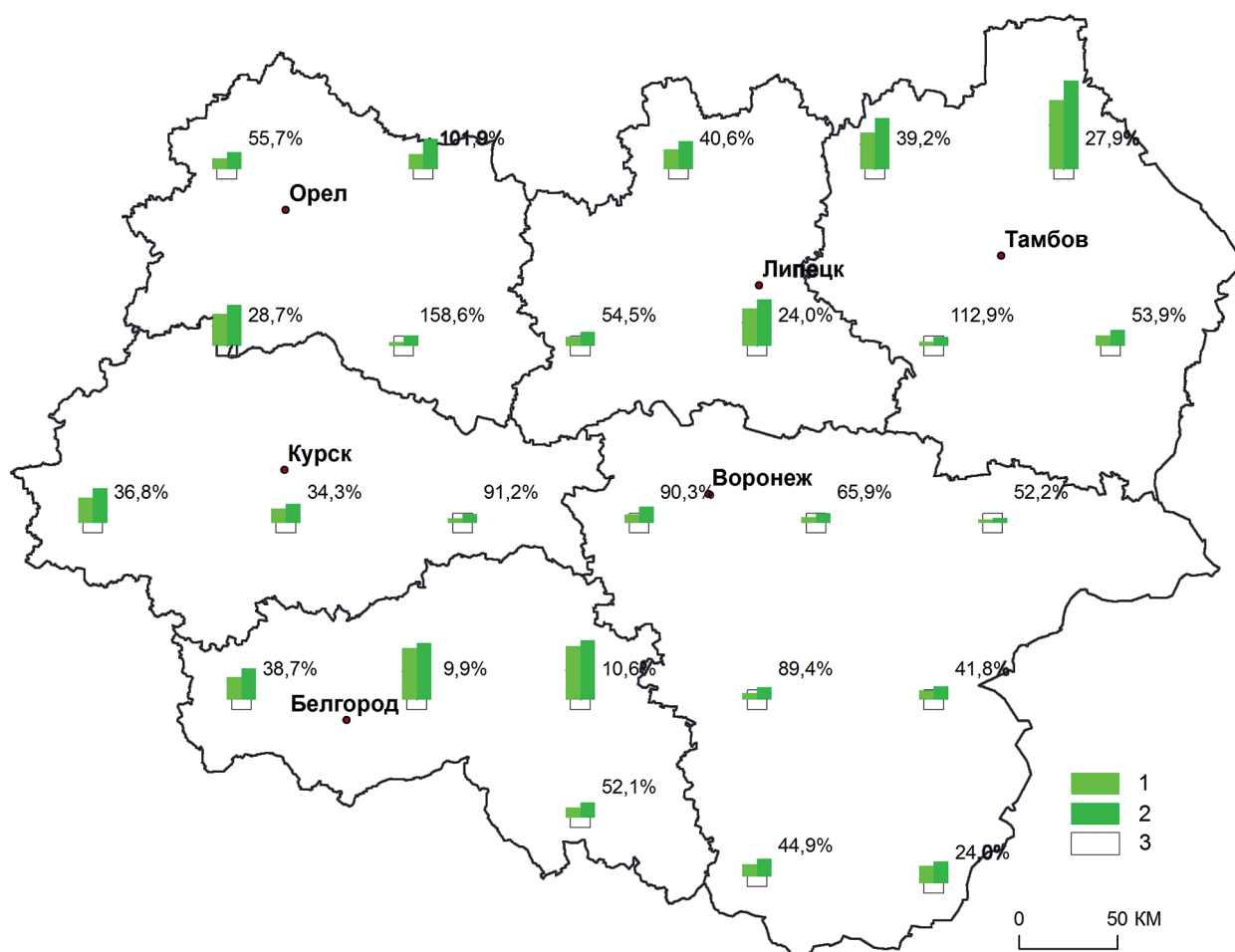


Рис. 4. Картодиаграмма лесистости ландшафтов Среднерусской лесостепи в середине 1980-х гг. (1) и в 2024 г. (2) на тестовых участках (3) и значения прироста лесистости между анализируемыми датами

При сохранении тенденции увеличения лесистости перспективными территориями для дальнейшего расширения лесопокрытых земель остаются преимущественно овражно-балочная сеть, оставленные аграрные земли и в определённой степени участки пойм и речных долин.

Сопоставление данных о лесистости, полученных на основе снимков Landsat OLI 2024 г., с данными ESA WorldCover 2021 показало очень высокую корреляцию между ними при очень

близком расположении значений к регрессионной прямой (рис. 5а), что указывает на сопоставимую точность результатов. Средняя лесистость тестовых участков в 2024 г. составила 19,4 % по данным Landsat и 21,9 % по данным WorldCover 2021. В то же время на подавляющем большинстве тестовых участков лесистость по данным ESA WorldCover 2021 оказалась выше, чем по Landsat OLI. Обусловлено это может быть рядом причин. Данные ESA WorldCover 2021 получены на основе снимков Sentinel-2, имеющих более высокое пространственное разрешение, чем у данных Landsat, и этот фактор мог обеспечивать более высокую точность. Меньший размер пикселя Sentinel-2 при сопоставимом радиометрическом разрешении даже с применением автоматизированных подходов должен обуславливать более точную оценку лесопокрытой площади. При этом лесистость, полученная на основе обоих типов спутниковых данных, показала во многом общие закономерности изменения между тестовыми участками (см. рис. 5б).

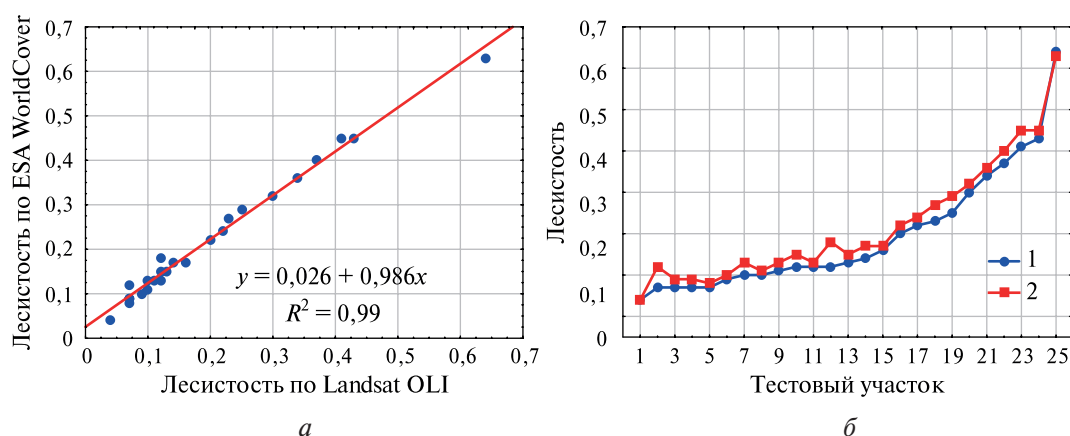


Рис. 5. Зависимость между лесистостью тестовых участков по данным Landsat OLI и ESA WorldCover 2021 (а) и лесистость тестовых участков (б). 1 — по Landsat OLI, 2 — на основе информационных продуктов ESA WorldCover 2021

С другой стороны, определённую роль в более высокой площади лесов по данным ESA WorldCover 2021 мог сыграть фактор различий в датах получения снимков Sentinel-2 (2021), используемых для их создания, и снимков Landsat OLI (2024), применяемых в исследовании. В 2024 г. некоторые угодья, особенно в подзоне северной лесостепи, которые были залежами в 2021 г. и в значительной степени покрыты древесной растительностью, к 2024 г. были возвращены в оборот. Соответственно, с учётом этого фактора суммарная площадь лесов в 2024 г. на некоторых участках фактически могла быть несколько ниже аналогичной площади в 2021 г.

Оценка изменений спектрально-отражательных свойств территорий, на которых наблюдалось формирование лесных массивов, показала, что рост лесистости, произошедший на них с 59 до 100 % к 2024 г. (в границах лесов в 2024 г.), обусловил снижение абсолютных значений коэффициентов спектральной яркости во всех диапазонах видимого и коротковолнового ИК-спектра (табл. 5). Это следует из существенной величины изменений, даже с учётом различий в спектральных диапазонах приборов ТМ и OLI, использованных для анализа коэффициентов спектральной яркости в 1985 и 2024 гг. Снижение вариации объясняется тем, что вследствие полного покрытия лесом территория должна становиться более однородной по спектрально-отражательным характеристикам (измеряемым в коэффициентах спектральной яркости).

Полученные данные согласуются с ранее установленными закономерностями влияния лесистости на отражательные характеристики (Терехин, 2022). Согласно им повышение лесистости приводит к снижению абсолютных значений коэффициентов спектральной яркости во всех каналах, кроме ближнего ИК. В этом канале, чувствительном к объёму надземной

фитомассы, растущей одновременно с ростом лесистости, наблюдается обратная связь. Более интересными представляются данные об изменении коэффициентов вариации. Согласно им повышение лесистости до полного формирования лесных массивов привело к существенному снижению вариабельности отражательных свойств во всех диапазонах спектра.

Таблица 5. Изменение спектрально-отражательных характеристик территорий, на которых произошло формирование лесных массивов к 2024 г. (полное покрытие лесом)

Спектральный диапазон	1985 г.		2024 г.	
	Среднее	V , %	Среднее	V , %
Синий	0,100	4,1	0,085	2,7
Зелёный	0,084	8,0	0,068	6,6
Красный	0,068	14,4	0,046	12,8
Ближний ИК	0,238	12,6	0,288	11,8
Коротковолновый ИК 1	0,159	17,5	0,140	14,9
Коротковолновый ИК 2	0,090	30,6	0,064	23,3

Примечание: V — коэффициент вариации.

Регрессионный анализ лесистости и коэффициентов вариации отражательных свойств показал, что при изменении лесистости с 0,7 до 1,0, действительно, наблюдается снижение вариабельности спектрально-отражательных характеристик (рис. 6).

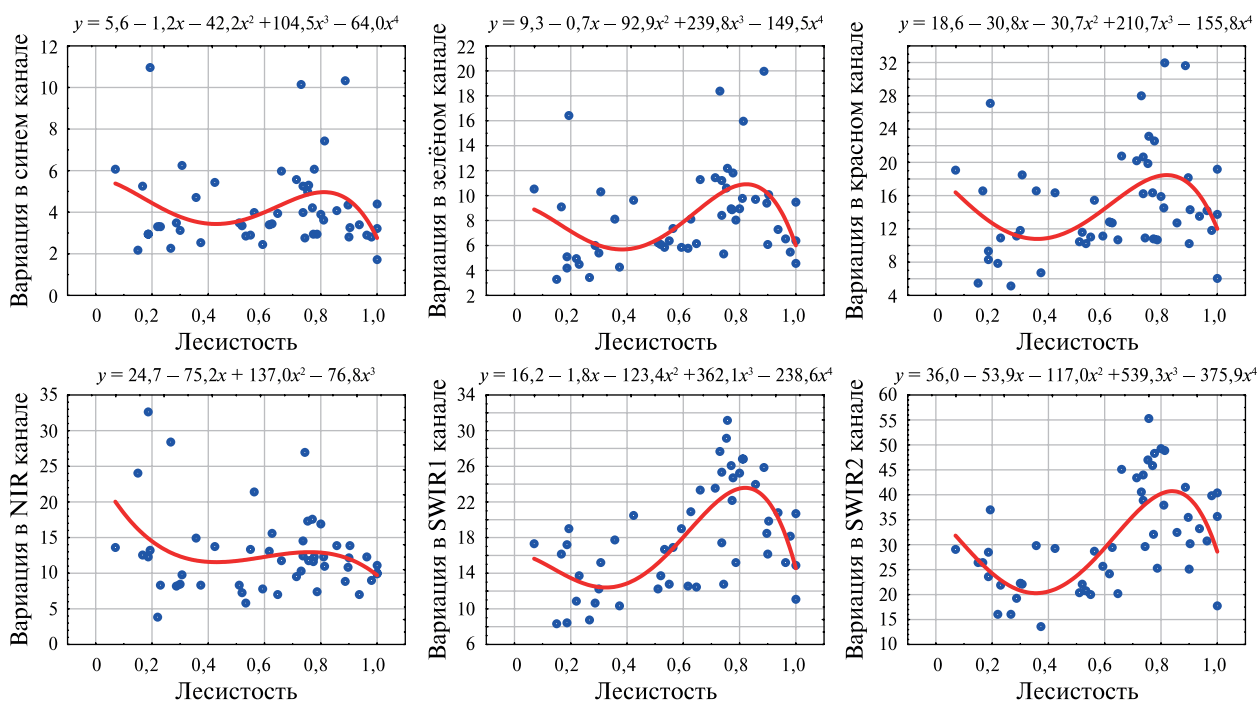


Рис. 6. Зависимость между лесистостью ландшафтов лесостепи и коэффициентом вариации (в %) спектрально-отражательных характеристик

При этом для всего интервала возможных значений лесистости от 0 до 1 наиболее выраженная зависимость просматривается в коротковолновой ИК-области — в каналах SWIR1, SWIR2. В остальных изученных диапазонах спектра зависимость лесистости и вариабельности спектрально-отражательных характеристик выражена менее сильно. Во всех диапазонах

спектра просматривается сначала некоторое, часто незначительное снижение коэффициента вариации при росте лесистости, а затем его увеличение до достижения максимальных значений, после которых вновь происходит снижение до полного облесения. В коротковолновых ИК-каналах максимальные значения вариабельности отражательных свойств достаточно выражено приурочены к величинам лесистости 0,7–0,8. После их достижения наблюдается резкое уменьшение.

С одной стороны, полученные результаты подтверждают предположение о наличии связи вариабельности спектрально-отражательных характеристик и лесистости ландшафтов региона. С другой стороны, наличие двух экстремумов в аппроксимирующей кривой будет осложнять использование выявленных зависимостей для оценки стадии зарастания территорий древесной растительностью с применением значений коэффициентов вариации отражательных свойств.

Выводы

На протяжении последних четырёх десятилетий в Среднерусской лесостепи отмечается тенденция роста лесистости. По данным с сети тестовых участков к середине третьего десятилетия XXI в. лесистость выросла более чем на 36 % от уровня середины 1980-х гг. Средняя лесистость региона по полученным данным изменилась с 14,2 до 19,4 %. Сопоставление её величины, измеренной в 2024 г. по данным Landsat OLI, и лесистости, оценённой на основе информационных продуктов ESA WorldCover 2021, создаваемых по снимкам Sentinel-2, показало, что их корреляция составляет 99 %. При этом лесистость по данным ESA WorldCover 2021 на подавляющем большинстве тестовых участков и средняя лесистость по региону оказались несколько выше лесистости по Landsat OLI. За период исследования установлено увеличение средней площади, числа и протяжённости границ лесных массивов. Рост лесистости выступает общей тенденцией для всех областей Центрального Черноземья. Многие участки изначально с лесистостью до 10 % перешли в категорию 10–20 %. При этом в первой половине третьего десятилетия XXI в., как и в середине 1980-х гг., в регионе доминировали участки с лесистостью не более 20 %. Установлено наличие зависимости между ростом лесистости и вариацией спектрально-отражательных характеристик ландшафтов региона. Наиболее заметно она проявляется в коротковолновой ИК-области спектра. Максимальные вариации приурочены к значениям лесистости 70–80 %, после достижения которых происходит резкое снижение вариабельности спектрально-отражательных характеристик.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

Литература

1. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Луян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
2. Бугаев В. А., Мусиевский А. Л. Шипов лес: история и современность // Лесное хоз-во. 2000. № 5. С. 21–22.
3. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Полевщикова Ю. А., Лежнин С. А. Оценка динамики и нарушения лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
4. Землянухин И. П., Романцов Р. Е. Опыт изучения влияния лесных насаждений на сток и эрозию почв в условиях Воронежской области // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). 2017. Т. 5. № 2. С. 43–49.

5. Камышев Н. С., Хмелев К. Ф. Растительный покров Воронежской области и его охрана. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1976. 181 с.
6. Косолапов В. М., Трофимов И. А., Трофимова Л. С., Яковлева Е. П. Агроландшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М.: Изд. дом «Наука», 2015. 198 с.
7. Крупко А. Э., Михно В. Б. Факторы, проблемы и основные направления устойчивого развития Центрально-Черноземного района // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2019. № 1. С. 55–73.
8. Кузьменко Я. В., Лисецкий Ф. Н., Кириленко Ж. А., Григорьева О. И. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2013. Т. 15. № 3–2. С. 652–657.
9. Лисецкий Ф. Н. Пространственно-временная организация агроландшафтов. Белгород: Изд-во БелГУ, 2000. 304 с.
10. Молчанов А. А. Оптимальная лесистость (на примере ЦЧР). М: Наука, 1966. 126 с.
11. Терехин Э. А. Оценка нарушенности лесов лесостепной зоны в начале XXI в. по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 2. С. 134–146. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146.
12. Терехин Э. А. Пространственно-временная оценка лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи с применением спектрально-отражательных признаков // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 84–96. DOI: 10.31857/S0205961421040060.
13. Терехин Э. А. Особенности лесовозобновления на залежных землях Среднерусской лесостепи // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 4. С. 594–604. DOI: 10.31857/S2587556622040112.
14. Терехин Э. А. Возможности оценки лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи по данным дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 107–120. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-107-120.
15. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1961. 263 с.
16. Ховратович Т. С., Барталев С. А., Кашицкий А. В. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
17. Цветков М. А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. М: Изд-во АН СССР, 1957. 213 с.
18. Egorov A., Roy D. P., Boschetti L. Generation and comprehensive validation of 30 m conterminous United States Landsat percent tree cover and forest cover loss annual products // Science of Remote Sensing. 2023. V. 7. Article 100084. DOI: 10.1016/j.srs.2023.100084.
19. Ershov D. V., Gavriljuk E. A., Koroleva N. V. et al. Natural afforestation on abandoned agricultural lands during post-soviet period: A comparative Landsat data analysis of bordering regions in Russia and Belarus // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 2. Article 322. DOI: 10.3390/rs14020322.
20. Gudex-Cross D., Pontius J., Adams A. Enhanced forest cover mapping using spectral unmixing and object-based classification of multi-temporal Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 196. P. 193–204. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.006.
21. Hislop S., Jones S., Soto-Berelov M. et al. A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 188–197. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.025.
22. Kim D.-H., Sexton J. O., Noojipady P. et al. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 155. P. 178–193. DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.017.
23. Lu J., Huang C., Tao X. et al. Annual forest disturbance intensity mapped using Landsat time series and field inventory data for the conterminous United States (1986–2015) // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 275. Article 113003. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113003.
24. Pflugmacher D., Rabe A., Peters M., Hostert P. Mapping pan-European land cover using Landsat spectral-temporal metrics and the European LUCAS survey // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 583–595. DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.001.
25. Schroeder T. A., Schleeweis K. G., Moisen G. G. et al. Testing a Landsat-based approach for mapping disturbance causality in U.S. forests // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 195. P. 230–243. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.033.
26. Senf C., Laštovička J., Okujeni A. et al. A generalized regression-based unmixing model for mapping forest cover fractions throughout three decades of Landsat data // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 240. Article 111691. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111691.
27. Zhao F., Huang C., Goward S. N. et al. Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP) // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 209. P. 312–326. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.035.

Recent trends in forest cover changes in the Central Russian forest-steppe

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsuedu.ru

The spatiotemporal forest cover change is one of key factors determining the characteristics and processes in landscapes. The article analyzes long-term changes in the forest cover of the Central Russian forest-steppe from the mid-1980s to the first half of the third decade of the 21st century. The indicators of forest cover change, area and spatial characteristics of forested lands were studied on a network of 25 sites located within the region. The indicators included total forest area, average forest area, forest boundary length and forest density. Over a period of almost forty years, the average growth in forest cover in the region was 36 %, accompanied by an increase of 16.7 % in the average forest area and 40 % in the length of forested land boundaries. With an average increase in the number of forest areas in the region of almost 17 %, in some sites there was a decrease in their number due to the unification of forest areas in the process of their expansion and the advancement of boundaries. In most sites in the mid-1980s, the forest cover of the landscapes did not exceed 10 %, but during the study period, the share of those with forest cover from 10 to 30 % increased significantly. The increase in forest cover has led to a decrease in the variability of the spectral reflectance of the territories where forests have formed. A decrease in the coefficient of variation of reflectance was found in the visible, near and short-wave infrared ranges.

Keywords: forest area, forest cover, spectral reflectance, long-term changes, Landsat

Accepted: 27.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-207-221

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 203–221 (in Russian).
2. Bugaev V. A., Musievskii A. L., Shipov Les: history and modernity, *Lesnoe khozyaistvo*, 2000, No. 5, pp. 21–22 (in Russian).
3. Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Polevshikova Yu. A., Lezhnin S. A., Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 4, pp. 124–134 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
4. Zemlyanukhin I. P., Romantsov R. E., Experience of studying of influence of forest plantings on the drain and erosion of soils in the conditions of the Voronezh region, *Modeli i tekhnologii prirodoobustroistva (regional'nyi aspekt)*, 2017, V. 5, No. 2, pp. 43–49 (in Russian).
5. Kamyshev N. S., Khmelev K. F., *Rastitel'nyi pokrov Voronezhskoi oblasti i ego okhrana* (Vegetation cover of the Voronezh region and its protection), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1976, 181 p. (in Russian).
6. Kosolapov V. M., Trofimov I. A., Trofimova L. S., Yakovleva E. P., *Agrolandshafty Tsentral'nogo Chernozem'ya. Raionirovanie i upravlenie* (Agrolandscapes of central Chernozem region. Zoning and management), Moscow: Publishing House "Nauka", 2015, 198 p. (in Russian).
7. Krupko A. E., Mikhno V. B., The factors, problems and main directions of sustainable development of the Central Black Soil region, *Proc. Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 2019, No. 1, pp. 55–73 (in Russian).
8. Kuzmenko Ya. V., Lisetskii F. N., Kirilenko Zh. A., Grigoryeva O. I., Providing the optimum water protection forests amount at basin organization of nature management, *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, V. 15, No. 3–2, pp. 652–657 (in Russian).
9. Lisetskii F. N., *Prostranstvenno-vremennaya organizatsiya agrolandshaftov* (Spatio-temporal agrolandscape organization), Belgorod: Izd. BelGU, 2000, 304 p. (in Russian).
10. Molchanov A. A., *Optimal'naya lesistost' (na primere Tsentral'no-Chernozemnogo raiona)* (Optimal forest cover (using the Central Chernozem region as an example)), Moscow: Nauka, 1966, 126 p. (in Russian).

11. Terekhin E. A., Estimation of forest disturbance in the forest-steppe zone at the beginning of the XXI century using satellite data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 2, pp. 134–146 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146.
12. Terekhin E. A., Spatiotemporal spectral-response assessment of the forest cover of small dry valleys in the Central Russian forest–steppe, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, V. 57, No. 12, pp. 1566–1575, DOI: 10.1134/S0001433821120215.
13. Terekhin E. A., Reforestation on abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 4, pp. 594–604 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622040112.
14. Terekhin E. A., Possibilities for assessing the forest cover of small dry valleys in the Central Russian forest-steppe using remote sensing data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 107–120 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-107-120.
15. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie central'nykh chernozemnykh oblastei* (Physical and geographical zoning of the Central Chernozem regions), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1961, 263 p. (in Russian).
16. Khovratovich T. S., Bartalev S. A., Kashnitskii A. V., Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 4, pp. 102–110 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110.
17. Tsvetkov M. A., *Izmenenie lesistosti Evropeiskoi Rossii s kontsa XVII stoletiya po 1914 god* (Changes in forest cover in European Russia from the end of the 17th century to 1914), Moscow: Izd. AN SSSR, 1957, 213 p.
18. Egorov A., Roy D. P., Boschetti L., Generation and comprehensive validation of 30 m conterminous United States Landsat percent tree cover and forest cover loss annual products, *Science of Remote Sensing*, 2023, V. 7, Article 100084, DOI: 10.1016/j.srs.2023.100084.
19. Ershov D. V., Gavrilyuk E. A., Koroleva N. V. et al., Natural afforestation on abandoned agricultural lands during post-soviet period: A comparative Landsat data analysis of bordering regions in Russia and Belarus, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 2, Article 322, DOI: 10.3390/rs14020322.
20. Gudex-Cross D., Pontius J., Adams A., Enhanced forest cover mapping using spectral unmixing and object-based classification of multi-temporal Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 196, pp. 193–204, DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.006.
21. Hislop S., Jones S., Soto-Berelov M. et al., A fusion approach to forest disturbance mapping using time series ensemble techniques, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 221, pp. 188–197, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.025.
22. Kim D.-H., Sexton J. O., Noojipady P. et al., Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000, *Remote Sensing of Environment*, 2014, V. 155, pp. 178–193, DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.017.
23. Lu J., Huang C., Tao X. et al., Annual forest disturbance intensity mapped using Landsat time series and field inventory data for the conterminous United States (1986–2015), *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 275, Article 113003, DOI: 10.1016/j.rse.2022.113003.
24. Pflugmacher D., Rabe A., Peters M., Hostert P., Mapping pan-European land cover using Landsat spectral-temporal metrics and the European LUCAS survey, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 221, pp. 583–595, DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.001.
25. Schroeder T. A., Schleeweis K. G., Moisen G. G. et al., Testing a Landsat-based approach for mapping disturbance causality in U.S. forests, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 195, pp. 230–243, DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.033.
26. Senf C., Laštovička J., Okujeni A. et al., A generalized regression-based unmixing model for mapping forest cover fractions throughout three decades of Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 240, Article 111691, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111691.
27. Zhao F., Huang C., Goward S. N. et al., Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP), *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 209, pp. 312–326, DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.035.