

Возможности оценки лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи по данным дистанционного зондирования Земли

Э. А. Терехин

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

Анализ связи между лесистостью ландшафтов и их спектрально-отражательными характеристиками выступает необходимым условием её моделирования и пространственно-временной оценки на основе спутниковых данных. Исследовано влияние лесистости овражно-балочных систем, типичных для лесостепной зоны, на их спектрально-отражательные характеристики, измеренные в периоды первой и второй половины лета по данным Sentinel-2. Установлено, что для отражательных характеристик августа наблюдается более сильная связь с величиной лесистости, чем для характеристик июня. Для августовских значений коэффициентов спектральной яркости в видимом и коротковолновом инфракрасном диапазонах установлена высокая чувствительность к величине покрытия древесной растительности. В каналах Sentinel-2, охватывающих их, характерна обратная, статистически значимая связь с лесистостью овражно-балочных систем. Коэффициентам спектральной яркости, измеренным в период июня, свойственны близкие закономерности изменения в зависимости от лесистости, при этом связь с ней выражена слабее. В каналах ближнего инфракрасного диапазона и расположенных рядом с ним крайних красных каналах устойчивой связи между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками не выявлено. Значения коэффициентов спектральной яркости зелёного, красного и первого коротковолнового инфракрасного каналов Sentinel-2, измеренных для овражно-балочных систем в период августа, могут выступать показателями пространственных различий их лесистости.

Ключевые слова: ландшафты лесостепи, спектрально-отражательные характеристики, лесистость, Sentinel-2

Одобрена к печати: 17.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-107-120

Введение

Лесистость ландшафтов выступает одной из их ключевых характеристик. Она оказывает влияние на особенности надземной фитомассы и микроклимат (Gao, Liu, 2012; Lu, Wang, 2023), потоки вещества и энергии (Замолодчиков и др., 2014; Lisetskii et al., 2023). Изменение лесистости приводит к трансформациям гидрологического цикла вследствие воздействия на суммарное испарение, поверхностный и внутренний сток, водный баланс (Гидрологическая..., 1989; Крестовский, 1986; Онучин и др., 2008). Появление лесов, обусловленное восстановительной динамикой древесной растительности, оказывает значительное влияние на поглощение углерода (Рыжова и др., 2015; Yu et al., 2023). Вместе с тем лесистость является одним из индикаторов при оценке биоразнообразия территории (Груммо, 2021; Ершов и др., 2015; Левицкая, Черненко, 2012).

По причине значительного влияния на характеристики и особенности функционирования ландшафтов, оценка лесистости выступает достаточно актуальной задачей, перспективы решения которой во многом связаны с применением данных дистанционного зондирования Земли (Gudex-Cross et al., 2017; Pickell et al., 2016; Senf et al., 2020). Количественные методы анализа спектрально-отражательных характеристик составляют основу картографирования лесопокрываемых земель на разных территориальных уровнях (Шинкаренко, Барталев, 2023; Feng et al., 2016; Fortin et al., 2020).

Методы картографирования лесистости на основе визуального дешифрирования характеризуются высокой точностью, но при этом значительной трудоёмкостью. Появление

доступных снимков с одновременным сочетанием высокого пространственного и радиометрического разрешения, примером которых выступают данные Sentinel-2, предоставило возможность на новом уровне подойти к исследованию лесистости ландшафтов на основе количественного анализа их спектрально-отражательных свойств (Bera et al., 2023; Eskandari, Ali Mahmoudi Sarab, 2022; Kalinaki et al., 2023). При этом становится необходимым формализация и описание зависимостей между параметрами восстановительной динамики древесной растительности в ландшафтах и их отражательными характеристиками.

Среднерусская лесостепь на протяжении столетий с начала XVIII по начало XX в. характеризовалась тенденцией к снижению лесистости. Согласно исследованиям (Цветков, 1957) в Курской губернии в соответствующий период лесистость снизилась с 16,2 до 6,2 %. Но в конце XX – начале XXI в. на юге Среднерусской возвышенности отмечается тенденция к повышению лесистости, во многом обусловленная формированием древесной растительности в овражно-балочной сети (Chendev et al., 2016) и на постагrogenных землях (Терехин, 2021, 2022). В этой связи анализ лесистости овражно-балочных систем приобретает ключевую роль в изучении пространственно-временных особенностей восстановительной динамики древесной растительности в регионе.

Цель исследования состояла в анализе зависимостей между лесистостью овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи и их спектрально-отражательными характеристиками по данным Sentinel-2. Задачи исследования включали изучение связи между фактическими значениями лесистости и соответствующих им величинам спектрально-отражательных характеристик, пространственный анализ лесистости и отражательных свойств овражно-балочных систем.

Материалы и методика исследования

Оценка влияния лесистости овражно-балочных систем на их спектрально-отражательные характеристики по снимкам Sentinel-2 осуществлена на основе информации, полученной со 154 объектов, расположенных на территории Белгородской, Курской, Орловской, Липецкой, Тамбовской и Воронежской областей (рис. 1, см. с. 109). Объекты исследования подобраны методом анализа территории Среднерусской лесостепи по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения, полученным из веб-сервисов открытого доступа.

Выборка объектов формировалась таким способом, чтобы обеспечить количественную и территориальную репрезентативность значений лесистости овражно-балочной сети. Каждый объект должен был соответствовать ряду условий. Овражно-балочные системы должны были характеризоваться разной величиной лесистости от её минимальных величин до практически полного покрытия древесной растительностью. Объекты исследования должны были быть представлены во всех частях анализируемой территории. Для каждой овражно-балочной системы требовалось наличие космического снимка сверхвысокого (субметрового) пространственного разрешения конца второго десятилетия XXI в. для обеспечения возможности достоверной оценки лесистости. Все объекты должны располагаться вдали от участков повышенного увлажнения и не иметь постоянных водотоков. В овражно-балочных системах должны отсутствовать признаки антропогенных нарушений растительного покрова в период 2000–2020 гг., искусственных лесопосадок за это же время или какого-либо существенного воздействия. Для корректной оценки лесистости и её влияния на отражательные характеристики в исследование включались только овражно-балочные системы с древесной растительностью из лиственных пород. Участки, покрытые хвойными или смешанными насаждениями, в анализе не использовались. Учёт обозначенных критериев обеспечил возможность объективной оценки связи лесистости систем оврагов и балок и их спектрально-отражательных характеристик, а также территориальной оценки различий в лесистости.

Для каждой овражно-балочной системы методом картографирования по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения (1 м), полученным из интернет-сервисов открытого доступа, была оценена площадь, покрытая древесной растительностью. Под ней понимались

участки сомкнутой растительности, состоящей из лиственных пород. Они достаточно уверенно могут быть дешифрированы на снимках соответствующей детальности по набору признаков, к которым относятся особенности структуры и цвета. Древесная растительность в овражно-балочных системах, типичных для региона, в значительной степени распространяется вниз по склонам из лесных полос, созданных преимущественно во второй половине XX в., и окаймляющих многие балки. Участки таких лесных полос, заложенных до начала периода, с которого производился анализ, включались в исследование при оценке общей лесопокрытой площади в балках, учитывая, что они формировали сомкнутые насаждения с появившимися позднее участками древесной растительности.

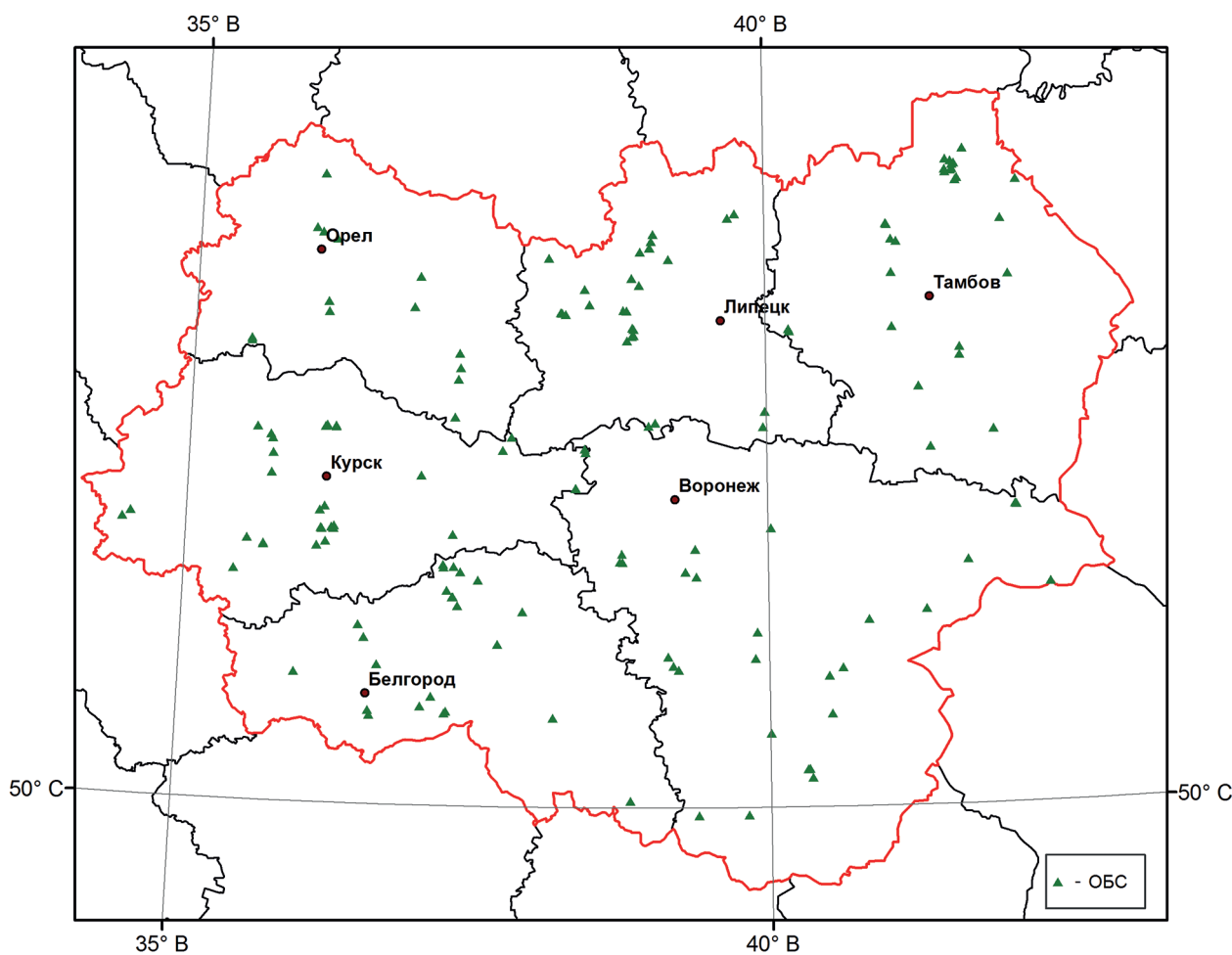


Рис. 1. Территория исследования и изученные овражно-балочные системы (ОБС)

Для анализируемых овражно-балочных систем был подготовлен векторный контур, позволивший оценить их площадь. С использованием векторных слоёв, характеризующих контуры систем оврагов и балок и лесопокрытой площади в их пределах, оценили величину лесистости по состоянию на конец второго десятилетия XXI в. Лесистость определялась как отношение лесопокрытой площади к общей площади овражно-балочной системы.

Оценка спектрально-отражательных свойств анализируемых объектов осуществлена по многозональным данным Sentinel-2 MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument), полученным на сроки, аналогичные срокам оценки фактической лесистости. Для этой цели на территорию исследования сформировали подборки снимков Sentinel-2 августа 2019 г. и июня 2020 г. (*табл. 1*). Подборки подготовлены таким образом, чтобы обеспечить возможность изучения зависимостей между лесистостью овражно-балочных систем и их спектрально-отражатель-

ными характеристиками, измеренными в разные сроки периода вегетационной активности. Использование разных, но при этом соседних лет для формирования подборок изображений обусловлено отсутствием необходимого числа безоблачных снимков различных месяцев одного и того же года для исследуемой территории. Отличия между датами получения снимков аналогичного сезона (июня или августа) были минимальны, а в ряде случаев отсутствовали, что было сделано для исключения возможного влияния фактора фенологических различий.

Таблица 1. Параметры снимков Sentinel-2, на основе которых выполнен анализ связи лесистости и спектрально-отражательных характеристик овражно-балочных систем

| Тайл | Дата получения | Тайл | Дата получения | Тайл | Дата получения |
|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|
| T36UXB | 25.08.2019 | T37UCV | 20.08.2019 | T37UET | 12.08.2019 |
| | 25.06.2020 | | 10.06.2020 | | 27.06.2020 |
| T37UER | 22.08.2019 | T37UDR | 01.09.2019 | T37UCS | 25.08.2019 |
| | 27.06.2020 | | 27.06.2020 | | 10.06.2020 |
| T36UXD | 28.08.2019 | T37UDT | 15.08.2019 | T37UFT | 12.08.2019 |
| | 10.06.2020 | | 10.06.2020 | | 27.06.2020 |
| T37UDS | 07.08.2019 | T37UFS | 30.08.2019 | T37UFU | 14.08.2019 |
| | 27.06.2020 | | 27.06.2020 | | 27.06.2020 |
| T37UCT | 20.08.2019 | T37UDU | 15.08.2019 | T37UGT | 29.08.2019 |
| | 10.06.2020 | | 10.06.2020 | | 11.06.2020 |

Все изображения были пересчитаны с использованием программного приложения SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform) в модуле Sen2cor из исходного уровня L1C в уровень L2A, содержащий коэффициенты спектральной яркости на нижней границе атмосферы (*англ.* Bottom Of Atmosphere, BOA). Для корректного сравнения спектрально-отражательных свойств в различных диапазонах пространственное разрешение всех каналов приведено к 20 м.

Анализ спектрально-отражательных характеристик выполнен в девяти участках спектра: синем (канал 2), зелёном (канал 3), красном (канал 4), крайнем красном (каналы 5–7), ближнем (канал 8A) и коротковолновом инфракрасном (каналы 11, 12). Спектрально-отражательные характеристики в каждом из них для отдельных овражно-балочных систем рассчитаны методом зональной статистики.

Этап статистического анализа включал исследование графиков рассеяния, построенных на основе значений лесистости и спектрально-отражательных характеристик, а также оценку силы связи между ними с использованием коэффициента корреляции Спирмена. На этом же этапе определялась форма зависимости между исследуемыми переменными, аппроксимация связи и оценка её эффективности.

Заключительный этап исследования включал пространственный анализ лесистости и спектрально-отражательных характеристик овражно-балочных систем, наиболее тесно коррелирующих с ней. На этом же этапе выполнено сравнение территориальных особенностей фактической лесистости и её значений, смоделированных на основе отражательных свойств овражно-балочной сети.

Картосхемы всех показателей построены с помощью интерполяции значений с использованием радиальных базисных функций. Соответствующий способ относится к детерминированным методам интерполяции. Его параметры (радиус поиска, размер ячейки растра, экстенд обработки) во всех случаях были аналогичны. Метод радиальных базисных функций выбран в связи с тем, что результаты, полученные на его основе, показали наименьшую среднеквадратическую ошибку в сравнении с другими способами: обратно взвешенного расстояния и метода локальных полиномов.

Результаты и их обсуждение

Для спектрально-отражательных характеристик июня сильная связь с лесистостью овражно-балочных систем наблюдается в зелёном (*англ.* Green) диапазоне, красном (*англ.* Red), расположенном рядом с ним крайнем красном (*англ.* Red Edge1), а также первом коротковолновом инфракрасном (*англ.* Short Wave Infrared — SWIR1) диапазонах (*табл.* 2). Для спектрально-отражательных характеристик овражно-балочных систем, измеренных в период августа, прослеживается примерно аналогичная закономерность, но сила связи существенно выше. Августовские значения отражательной способности всех диапазонов характеризуются статистически значимой связью с лесистостью на уровне 0,05. Для июньских значений она отсутствует в крайних красных и ближнем инфракрасном каналах.

Таблица 2. Характеристики силы связи между лесистостью овражно-балочных систем (ОБС) и их спектрально-отражательными характеристиками

| Период года | Коэффициенты корреляции Спирмена с лесистостью ОБС в каналах Sentinel-2 | | | | | | | | |
|-------------|---|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| | Blue | Green | Red | Red Edge1 | Red Edge2 | Red Edge3 | NIR | SWIR1 | SWIR2 |
| Июнь | -0,25 | -0,54 | -0,55 | -0,64 | -0,23 | -0,10 | -0,14 | -0,57 | -0,43 |
| Август | -0,72 | -0,76 | -0,74 | -0,75 | 0,23 | 0,40 | 0,39 | -0,68 | -0,62 |

Связь лесистости и спектрально-отражательных характеристик в ближнем инфракрасном (*англ.* Near-Infrared — NIR) диапазоне и расположенных рядом с ним крайних красных диапазонах (*англ.* Red Edge2, 3) не устойчива.

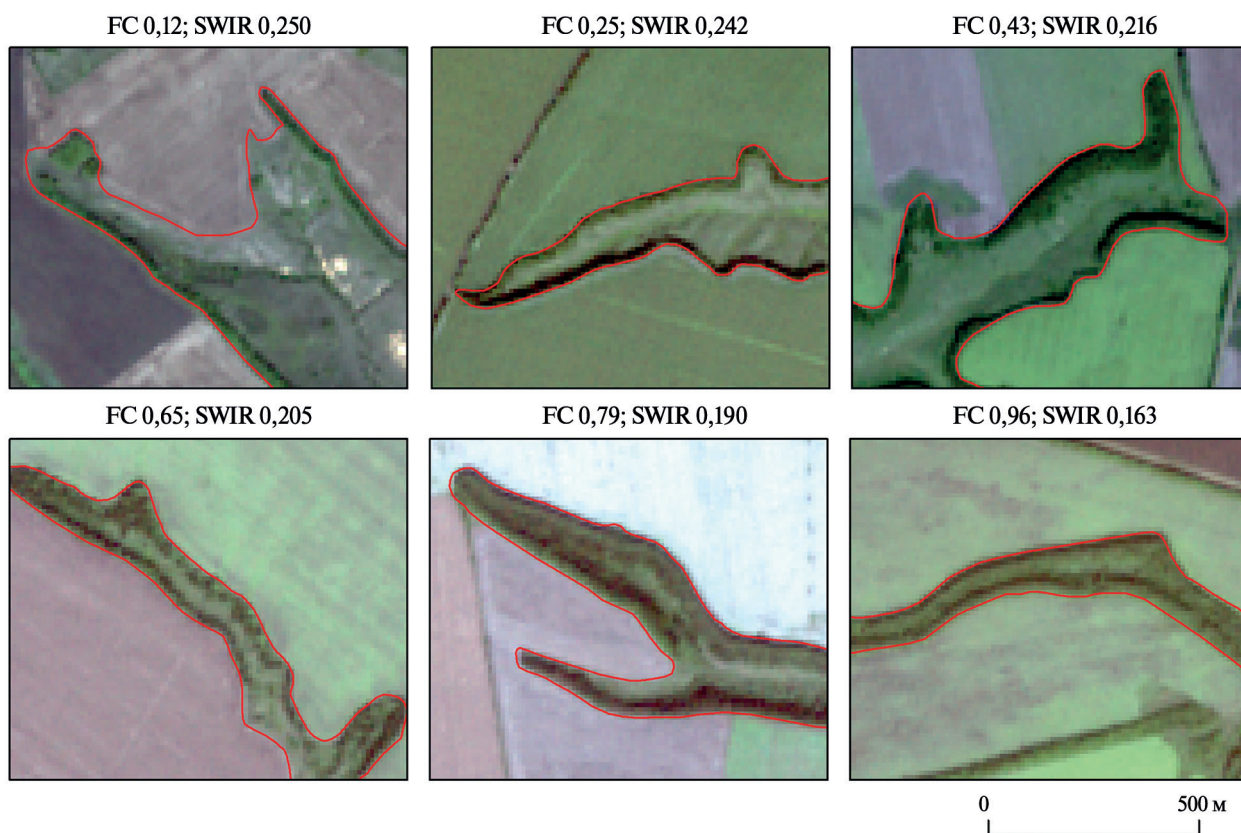


Рис. 2. Примеры участков овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи с различной величиной лесистости (*англ.* forest cover) на снимках Sentinel-2 августа (синтез каналов: Red – Green – Blue) и значениями спектральной отражательной способности в коротковолновом инфракрасном (SWIR1) диапазоне

Более высокая сила связи с лесистостью августовских значений спектрально-отражательных характеристик по сравнению с июньскими может быть обусловлена тем, что к концу лета, в сравнении с июнем, трава на безлесных участках овражно-балочных систем начинает подсыхать. Это приводит к увеличению их коэффициентов спектральной яркости и повышению их контрастности в сравнении с аналогичными характеристиками участков, покрытых древесной растительностью. Вследствие этого происходит рост чувствительности коэффициентов спектральной яркости к различиям в лесистости.

Высокая чувствительность спектрально-отражательных характеристик коротковолнового инфракрасного диапазона к изменению лесистости овражно-балочной сети достаточно хорошо просматривается при сравнении их участков с разной величиной лесистости на снимках Sentinel-2 с одновременным анализом отражательной способности (рис. 2, см. с. 111). Рост лесистости от менее 0,15 до более 0,95 обуславливает последовательное снижение спектрально-отражательных характеристик на величину порядка 35 %.

Для спектрально-отражательных характеристик овражно-балочных систем июня в каналах видимого, первого крайнего красного и коротковолнового инфракрасного диапазонов (каналы 2–5, 11–12) прослеживается отрицательная статистически значимая на уровне 0,05 зависимость от лесистости (рис. 3). В каналах ближней инфракрасной (канал 8А) и расположенной рядом с ней крайней красной области (каналы 6–7) она отсутствует. Связь спектрально-отражательных свойств овражно-балочных систем с лесистостью в видимом, коротковолновом инфракрасном и частично крайнем красном диапазонах описывается статистически значимой логарифмической кривой, либо близкой к ней логит-функцией. Объяснительная способность моделей, оцениваемая через величину коэффициента детерминации, наиболее высока в красном, расположенном рядом с ним крайнем красном и первом коротковолновом инфракрасном диапазонах.

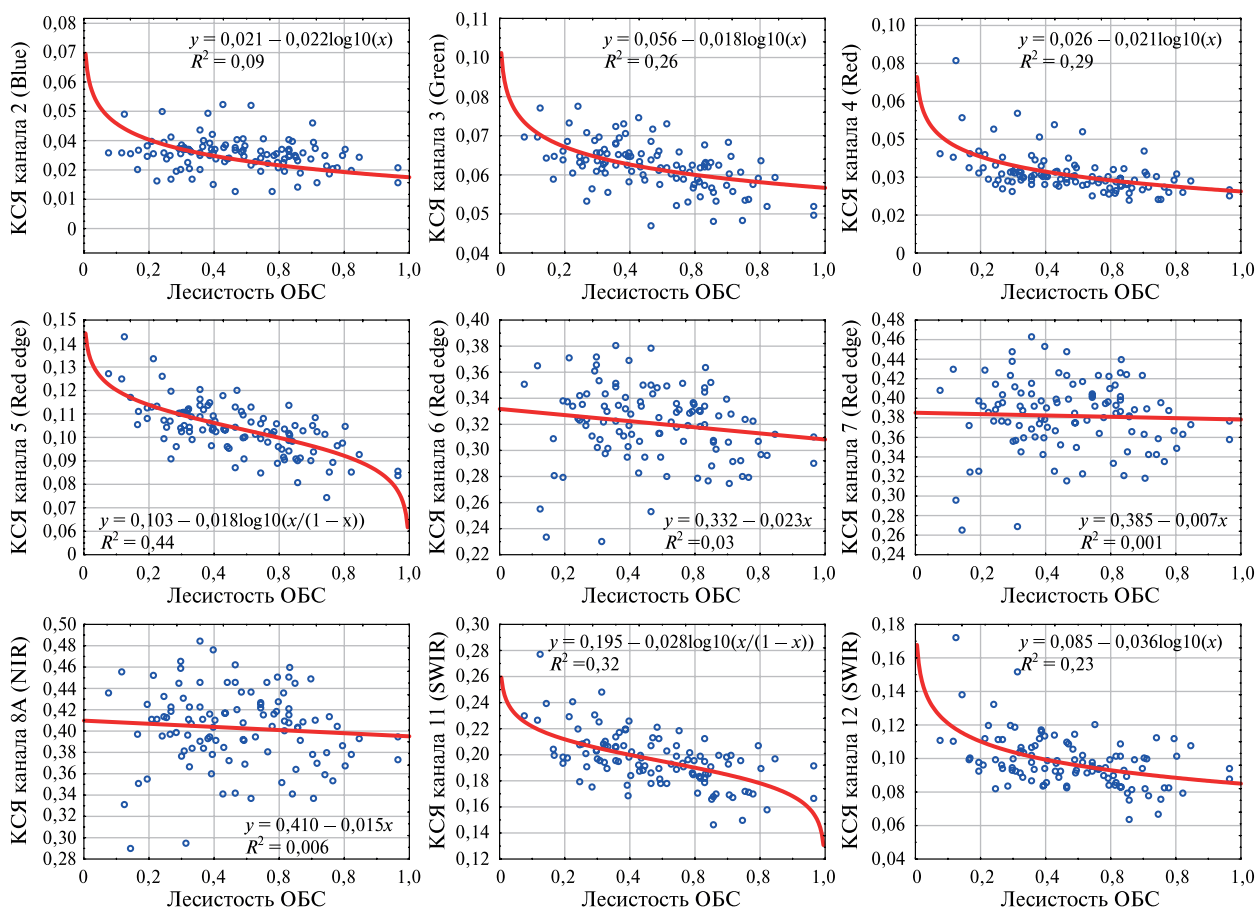


Рис. 3. Зависимости между лесистостью овражно-балочных систем (ОБС) и их коэффициентами спектральной яркости (КСЯ) июня в каналах Sentinel-2

Для спектрально-отражательных характеристик видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов, измеренных в период августа, зависимость от лесистости овражно-балочных систем также описывается статистически значимой убывающей логарифмической кривой, либо логит-функцией, исходя из диапазона, с достаточно высокими коэффициентами детерминации (рис. 4). Для спектрально-отражательных характеристик 5-го, 6-го и 8-го каналов Sentinel-2, соответствующих диапазонам крайнего красного и ближнего инфракрасного спектра, выраженных зависимостей спектрально-отражательных свойств от лесистости овражно-балочных систем не наблюдается при слабо просматривающейся тенденции к повышению коэффициентов спектральной яркости по мере роста лесистости. Таким образом, в каналах Sentinel-2, занимающих промежуточное положение между видимой и коротковолновой инфракрасной спектральной областью, чёткая зависимость от лесистости для коэффициентов спектральной яркости августа (так же, как и июня) отсутствует.

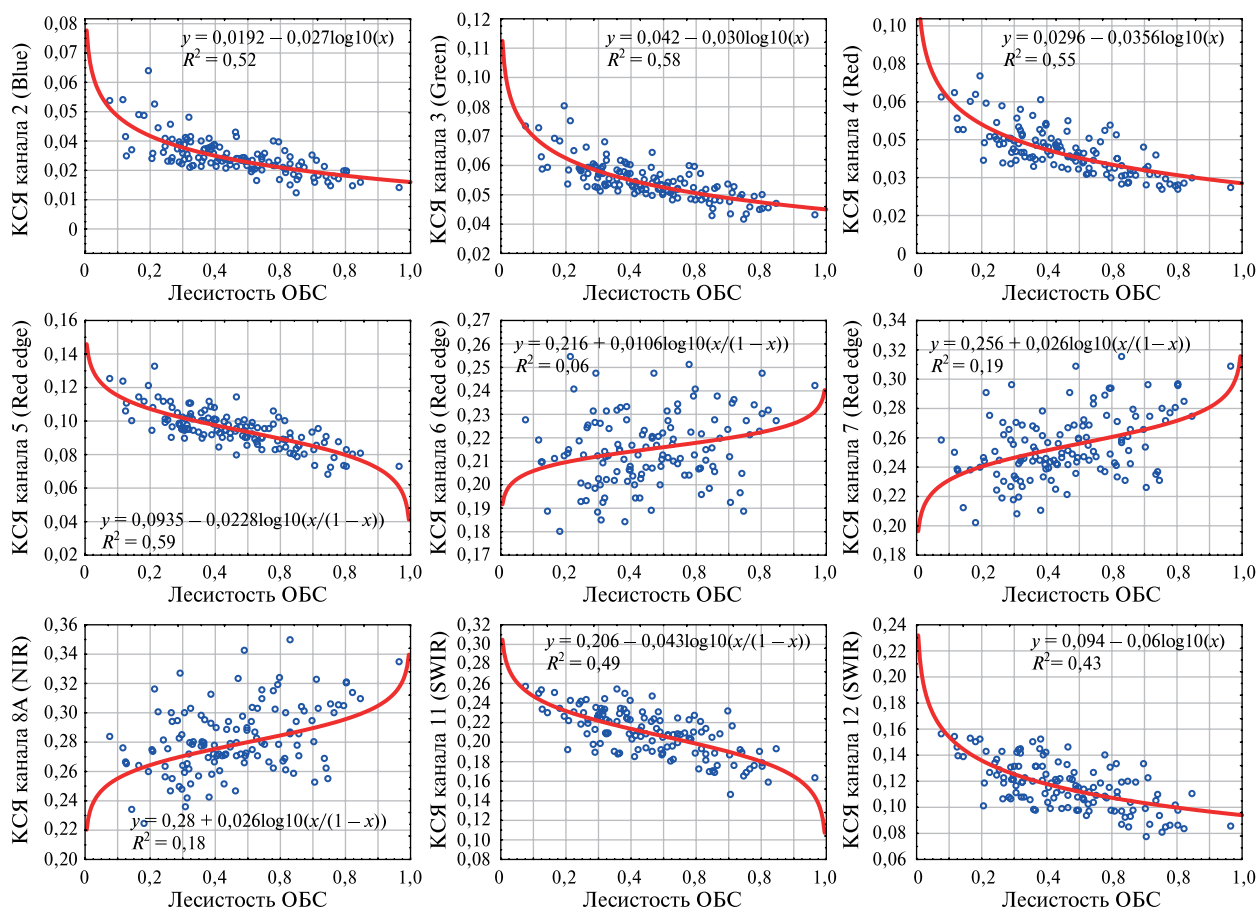


Рис. 4. Зависимости между лесистостью овражно-балочных систем (ОБС) и их коэффициентами спектральной яркости (КСЯ) августа в каналах Sentinel-2

Вместе с тем в каналах, спектрально-отражательные характеристики которых сильно коррелируют с лесистостью овражно-балочных систем, и для августовских, и для июньских значений проявляется общая закономерность изменения отражательных свойств по мере её роста. При этом объяснительная способность моделей, построенных на основе коэффициентов спектральной яркости августа, заметно выше, чем моделей на основе значений июня.

Логарифмическая модель достаточно хорошо объясняет ключевые особенности изменения спектрально-отражательных свойств овражно-балочных систем от их лесистости. Её рост на начальных стадиях сопровождается относительно высокой интенсивностью снижения коэффициентов спектральной яркости в диапазонах синего, зелёного, красного и коротковолнового инфракрасного спектра. В этот период наблюдаются достаточно выраженные

изменения в наземной биомассе объектов исследования, обусловленные появлением в них древесной растительности. После этого темпы снижения коэффициентов спектральной яркости замедляются.

Замедление интенсивности снижения спектрально-отражательных характеристик может объясняться тем, что различия между близлежащими стадиями сукцессий по фитомассе древесной растительности становятся меньше. Формирование сомкнутых лесных насаждений на участках овражно-балочных систем фактически переводит их в новую категорию — лесных экосистем. Спектральные диапазоны основных каналов Sentinel-2 таким образом можно разделить на две группы по зависимости от лесистости овражно-балочной сети и величины силы связи с ней. К первой группе относятся каналы видимого диапазона (каналы 2, 3, 4), первый канал из крайней красной области (канал 5) и каналы коротковолнового инфракрасного спектра (каналы 11, 12). Вторая группа включает каналы крайнего красного диапазона (6, 7) и ближний инфракрасный (8A) с отсутствием устойчивой связи с лесистостью.

Одним из критериев чувствительности спектрально-отражательных характеристик овражно-балочных систем к изменениям величины покрытия древесной растительности выступает наличие статистически значимых различий для её отдельных градаций (0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8; 0,8–1,0). Сравнение средних значений коэффициентов спектральной яркости августа, оценённых для отдельных градаций лесистости, показало, что в диапазонах видимого (Blue, Green, Red) и коротковолнового инфракрасного спектра (SWIR1, SWIR2) наблюдается отчётливая закономерность снижения спектрально-отражательных характеристик от низких к высоким градациям лесистости (табл. 3).

Таблица 3. Значения спектрально-отражательных характеристик в каналах Sentinel-2 для отдельных градаций лесистости овражно-балочных систем (ОБС)

| Градации лесистости ОБС | Blue | | Green | | Red | | Red Edge1 | |
|-------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|
| | Mean* | SD** | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD |
| 0,0–0,2 | 0,045 | 0,012 | 0,070 | 0,009 | 0,063 | 0,008 | 0,114 | 0,009 |
| 0,2–0,4 | 0,033 | 0,005 | 0,058 | 0,006 | 0,048 | 0,007 | 0,101 | 0,008 |
| 0,4–0,6 | 0,028 | 0,004 | 0,052 | 0,004 | 0,042 | 0,006 | 0,094 | 0,007 |
| 0,6–0,8 | 0,023 | 0,004 | 0,046 | 0,004 | 0,034 | 0,005 | 0,085 | 0,008 |
| 0,8–1,0 | 0,020 | 0,003 | 0,043 | 0,003 | 0,029 | 0,002 | 0,078 | 0,005 |
| Градации лесистости ОБС | Red Edge2 | | NIR | | SWIR1 | | SWIR2 | |
| | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD | Mean | SD |
| 0,0–0,2 | 0,207 | 0,016 | 0,259 | 0,020 | 0,242 | 0,012 | 0,149 | 0,007 |
| 0,2–0,4 | 0,213 | 0,016 | 0,276 | 0,021 | 0,223 | 0,017 | 0,125 | 0,014 |
| 0,4–0,6 | 0,217 | 0,015 | 0,285 | 0,021 | 0,207 | 0,015 | 0,114 | 0,012 |
| 0,6–0,8 | 0,216 | 0,016 | 0,287 | 0,023 | 0,188 | 0,020 | 0,102 | 0,016 |
| 0,8–1,0 | 0,236 | 0,009 | 0,320 | 0,009 | 0,174 | 0,014 | 0,093 | 0,011 |

* Mean — среднее значение, ** SD (англ. Standard Deviation) — стандартное отклонение.

В этих же диапазонах наблюдаются взаимные статистически значимые различия между всеми градациями лесистости за исключением самой высокой — от 0,8 до 1,0.

Закономерности связи лесистости овражно-балочных систем и их спектрально-отражательных характеристик могут быть использованы для её моделирования. Прогнозирование значений лесистости в таком случае может быть осуществлено на основе логистической модели — зависимости, обратной логит-кривой. Учитывая, что лесистость может варьировать от 0 до 1, функция принимает вид $y = 1/(1 + \exp(kx + b))$, где зависимой переменной (y) выступает лесистость овражно-балочных систем. Независимой переменной (x) в ней явля-

ются спектрально-отражательные характеристики августа в одном из диапазонов: зелёном (канал 3), красном (канал 4) или коротковолновом инфракрасном (канал 11). Параметры k и b — константы, определяемые эмпирически для спектрально-отражательных характеристик отдельных каналов Sentinel-2.

Пространственный анализ лесистости овражно-балочных систем на территории Среднерусской лесостепи и коэффициентов спектральной яркости видимого и коротковолнового инфракрасного каналов Sentinel-2 показал практически идентичные закономерности в их пространственном изменении (рис. 5) с тем отличием, что рост лесистости сопровождается снижением спектрально-отражательных характеристик.

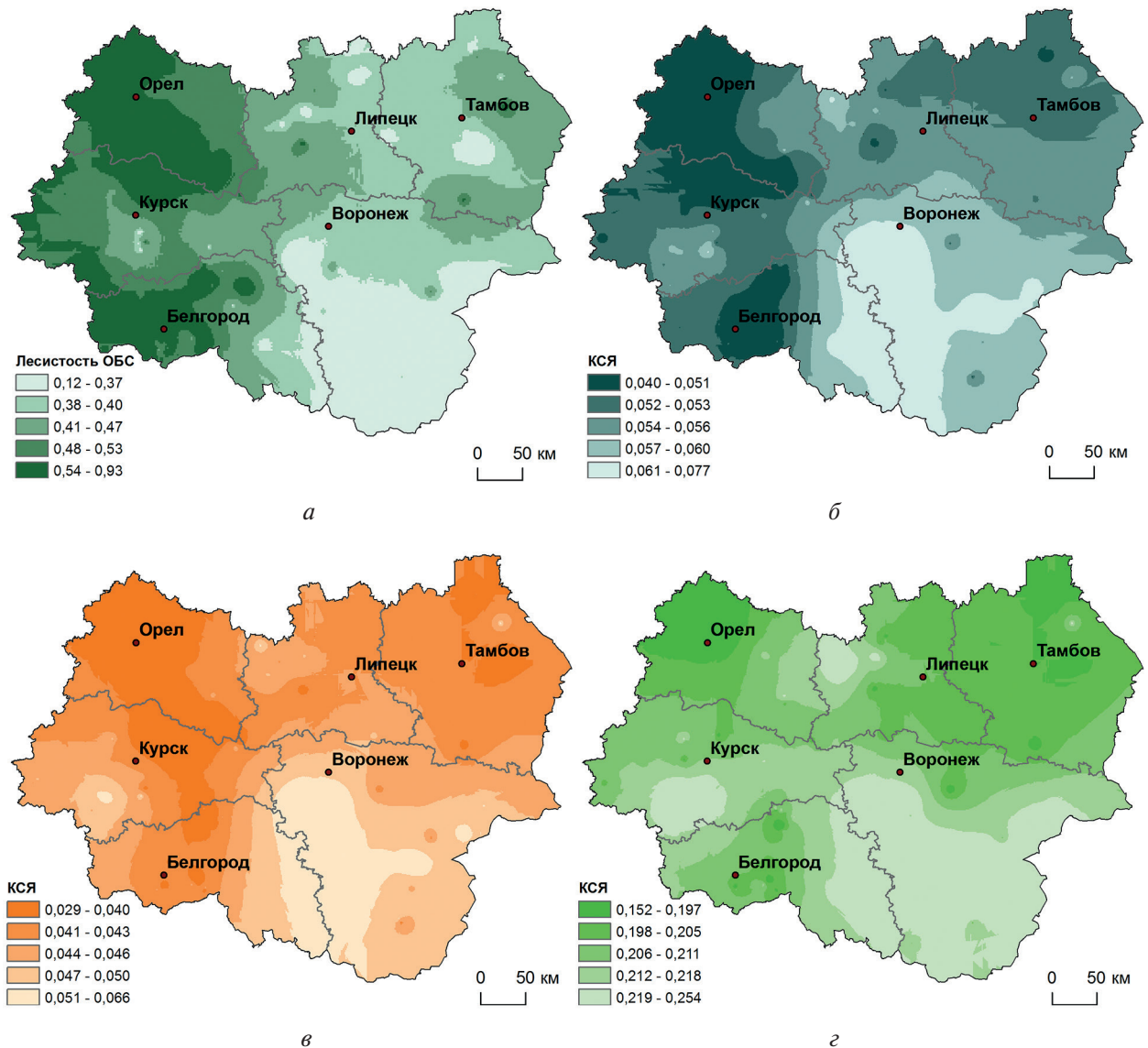


Рис. 5. Пространственное распределение лесистости овражно-балочных систем (а), их спектрально-отражательных характеристик в зелёном (б), красном (в) и коротковолновом инфракрасном (г) диапазонах на территории Среднерусской лесостепи в конце второго десятилетия XXI в.

В территориальном распределении лесистости овражно-балочной сети прослеживается ряд закономерностей, связанных с её существенными внутризональными различиями. Рассмотрение причин соответствующего изменения лесистости требует анализа в рамках отдельного исследования, так как оно может зависеть от множества факторов.

Пространственные особенности лесистости овражно-балочных систем, смоделированной на основе спектрально-отражательных характеристик зелёного, красного и коротковолнового инфракрасного диапазонов (рис. 6) с применением логистической кривой, также показали закономерности, очень близкие к её фактическому распределению в пределах региона.

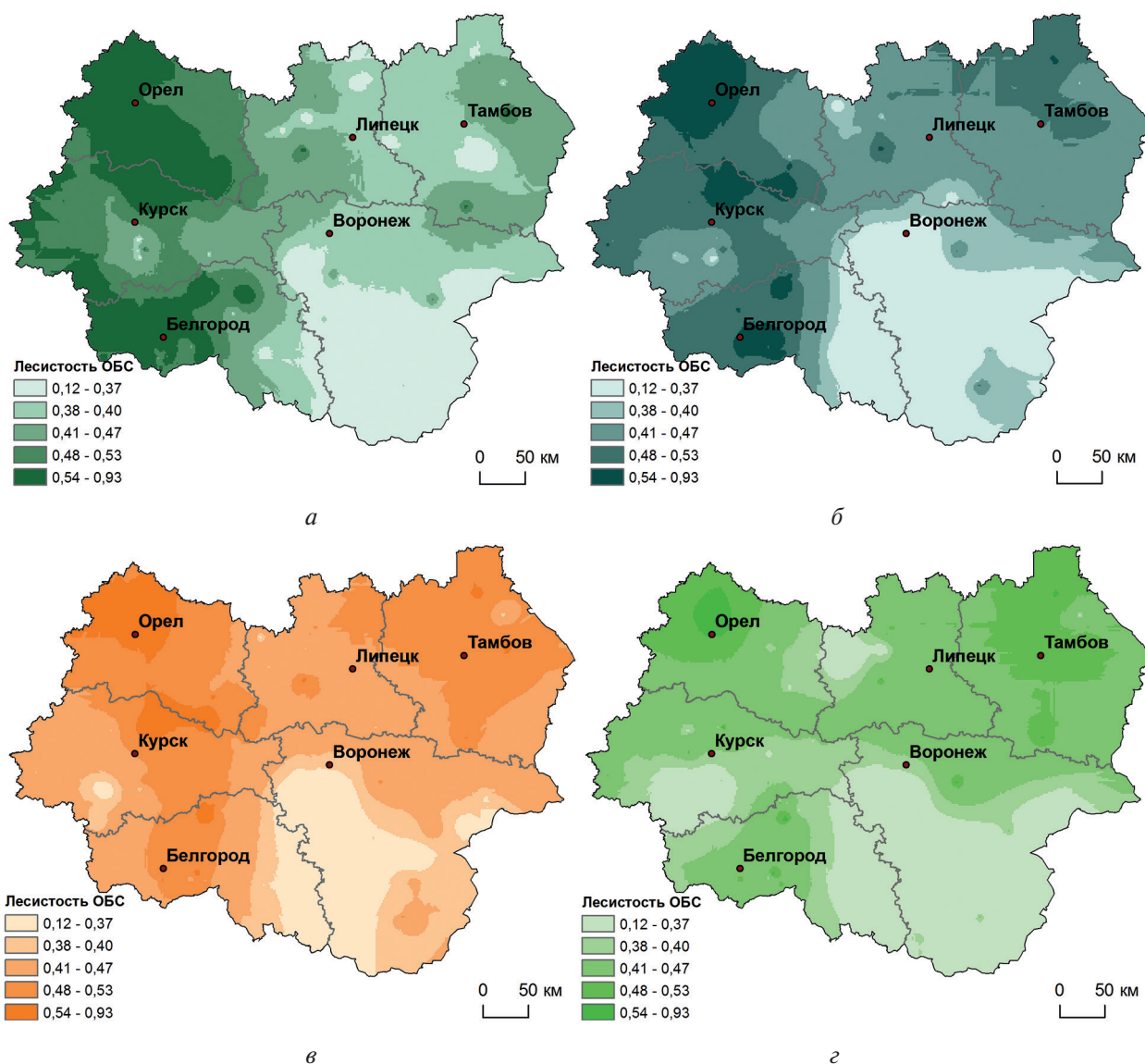


Рис. 6. Пространственное распределение фактической лесистости овражно-балочных систем (а) и лесистости, рассчитанной на основе спектрально-отражательных характеристик зелёного (б), красного (в) и коротковолнового инфракрасного (г) диапазонов на территории Среднерусской лесостепи в конце второго десятилетия XXI в.

Коэффициент корреляции между фактической лесистостью овражно-балочных систем и лесистостью, рассчитанной на основе спектрально-отражательных характеристик, составил: 0,77 для её значений, полученных на основе зелёного канала (канал 3) Sentinel-2, 0,75 — на основе красного (канал 4) и 0,70 — на основе первого коротковолнового инфракрасного (канал 11). Корреляции статистически значимы на уровне 0,05.

Из полученных результатов следует возможность оценки территориальных различий лесистости овражно-балочных систем на основе пространственного распределения их спектрально-отражательных характеристик. Высокая сила связи лесистости и коэффициентов спектральной яркости, измеренных по данным Sentinel-2, выступает основой для её модели-

рования с их использованием. Учитывая, что возможности измерения спектрально-отражательных свойств овражно-балочных систем значительно выше возможностей её фактических оценок, полученные результаты позволяют моделировать пространственно-временные параметры лесистости естественных ландшафтов региона, основываясь на коэффициентах спектральной яркости, извлекаемых из данных Sentinel-2.

Выводы

Процессы изменения лесистости, протекающие в овражно-балочных системах Среднерусской лесостепи, оказывают статистически значимое влияние на их отражательные свойства в ряде спектральных диапазонов Sentinel-2. Наиболее сильное влияние лесистость оказывает на коэффициенты спектральной яркости в каналах зелёного, красного и коротковолнового инфракрасного спектра. В период второй половины лета (август) связь лесистости с отражательной способностью проявляется более сильно, чем в период его первой половины (июнь). Устойчивая связь лесистости овражно-балочных систем с их спектрально-отражательными характеристиками в ближнем инфракрасном канале и расположенных рядом с ним крайних красных каналах Sentinel-2 отсутствует. Спектрально-отражательные характеристики зелёного, красного и первого коротковолнового инфракрасного каналов Sentinel-2, рассчитанные для овражно-балочных систем в период августа, могут выступать показателями пространственных различий их лесистости.

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

Литература

1. Гидрологическая роль лесных экосистем / Отв. ред. Снытко В.А. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 166 с.
2. Груммо Д.Г. Оценка биоразнообразия наземных экосистем на основе цифровой карты растительности // Ботаника. Исслед. 2021. № 50. С. 155–170.
3. Ершов Д.В., Исаев А.С., Лукина Н.В., Гаврилюк Е.А., Королева Н.В. Оценка биоразнообразия Центрального федерального округа по спутниковой карте // Лесоведение. 2015. № 6. С. 403–416.
4. Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Куриц В. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // Устойчивое лесопользование. 2014. № 2(39). С. 23–34.
5. Крестовский О.И. Влияние вырубок и восстановление лесов на водность рек. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 118 с.
6. Левицкая Н.Н., Черненко Т.В. Применение системы индикаторов для оценки состояния лесов Московской области // Лесоведение. 2012. № 6. С. 14–29.
7. Онучин А.А., Гапаров К.К., Михеева Н.А. Влияние лесистости и климатических факторов на годовой сток рек Прииссыккуля // Лесоведение. 2008. № 6. С. 45–52.
8. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317.
9. Терехин Э.А. Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика 2021. Т. 45. № 2. С. 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-797.
10. 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
11. Цветков М.А. Изменение лесистости европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. М: Изд-во АН СССР, 1957. 213 с.
12. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Возможности оценки сомкнутости защитных лесных насаждений на основе бисезонного индекса леса и материалов съёмки БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 189–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
13. Bera D., Das Chatterjee N., Bera S. et al. Comparative performance of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI data in canopy cover prediction using Random Forest model: Comparing model performance and

- tuning parameters // *Advances in Space Research*. 2023. V. 71. No. 11. P. 4691–4709. DOI: 10.1016/j.asr.2023.01.027.
14. *Chendev Y. G., Hubbart J. A., Terekhin E. A. et al.* Recent afforestation in the Iowa river and Vorkla river basins: A comparative trends analysis // *Forests*. 2016. V. 7. No. 11. Article 278. DOI: 10.3390/f7110278.
 15. *Eskandari S., Ali Mahmoudi Sarab S.* Mapping land cover and forest density in Zagros forests of Khuzestan province in Iran: A study based on Sentinel-2, Google Earth and field data // *Ecological Informatics*. 2022. V. 70. Article 101727. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101727.
 16. *Feng M., Sexton J. O., Huang C. et al.* Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 184. P. 73–85. DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.012.
 17. *Fortin J. A., Cardille J. A., Perez E.* Multi-sensor detection of forest-cover change across 45 years in Mato Grosso, Brazil // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 238. Article 111266. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111266.
 18. *Gao J., Liu Y.* De(re)forestation and climate warming in subarctic China // *Applied Geography*. 2012. V. 32. No. 2. P. 281–290. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.04.002.
 19. *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.
 20. *Kalinaki K., Malik O. A., Lai D. T. C. et al.* Spatial-temporal mapping of forest vegetation cover changes along highways in Brunei using deep learning techniques and Sentinel-2 images // *Ecological Informatics*. 2023. V. 77. Article 102193. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102193.
 21. *Lisetskii F. N., Buryak Z. A., Marinina O. A. et al.* Features of Soil Organic carbon transformations in the southern area of the East European plain // *Geosciences*. 2023. V. 13. No. 9. Article 278. DOI: 10.3390/geosciences13090278.
 22. *Lu C., Wang K.* Natural resource conservation outpaces and climate change: Roles of reforestation, mineral extraction, and natural resources depletion // *Resources Policy*. 2023. V. 86. Article 104159. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104159.
 23. *Pickell P. D., Hermosilla T., Frazier R. J. et al.* Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests // *Intern. J. Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 1. P. 138–149. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1126375.
 24. *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.
 25. *Yu L., Fan L., Ciais P. et al.* Carbon dynamics of Western North American boreal forests in response to stand-replacing disturbances // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. V. 122. Article 103410. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103410.

Possibilities for assessing the forest cover of small dry valleys in the Central Russian forest-steppe using remote sensing data

E. A. Terekhin

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

Analysis of relationships between landscapes forest cover and its spectral reflectance is necessary for its spatiotemporal assessment using remote sensing data. The influence of the forest cover of small dry valleys forest cover on their Sentinel-2-derived reflectance measured during the first and second half of summer was studied in the forest-steppe. Small dry valleys reflectance measured in August showed a stronger relationship with forest cover than June reflectance. High sensitivity to forest cover was found for August reflectance values measured in the visible and short wave infrared ranges. There is an inverse, statistically significant relationship with the forest cover of small dry valleys forest cover in the corresponding Sentinel-2 bands. Dry valleys reflectance in June shows a similar relationship with forest cover, but it is weaker than in August. A stable relationship was not found between forest cover and spectral reflectance in the near infrared and the red edge ranges located next to it. The spectral re-

flectance in green, red and first short wave infrared Sentinel-2 ranges, measured for dry valleys during August, can indicate spatial differences in their forest cover.

Keywords: forest-steppe landscapes, spectral reflectance, forest cover, Sentinel-2

Accepted: 17.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-107-120

References

1. *Gidrologicheskaya rol' lesnykh ekosistem* (Hydrological role of forest ecosystems), Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение, 1989, 166 p. (in Russian).
2. Grummo D. G., Assessment of the biodiversity state of terrestrial ecosystems based on digital vegetation map, *Botanika. Issledovaniya*, 2021, No. 50. pp. 155–170 (in Russian).
3. Ershov D. V., Isaev A. C., Lukina N. V. et al., Assessment of biodiversity in Central Federal District using satellite-based maps of terrestrial ecosystems, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 791–804, DOI: 10.1134/S1995425516070040.
4. Zamolodchikov D. G., Grabovskii V. I., Kurts V., Managing the carbon balance of Russian forests: past, present and future, *Ustoichivoe lesopol'zovanie*, 2014, No. 2(39), pp. 23–34 (in Russian).
5. Krestovskii O. I. *Vliyanie vyrubok i vosstanovlenie lesov na vodnost' rek* (The influence of deforestation and reforestation on the water content of rivers), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 118 p. (in Russian).
6. Levitskaya N. N., Chernen'kova T. V., The application of a series of indices for assessing the state of forests in Moscow region, *Lesovedenie*, 2012, No. 6, pp. 14–29 (in Russian).
7. Onuchin A. A., Gaparov K. K., Mikheeva N. A., The influence of forestation and climatic factors on annual runoff in Issyk-Kul lake basin, *Lesovedenie*, 2008, No. 6, pp. 45–52 (in Russian).
8. Ryzhova I. M., Erokhova A. A., Podvezennaya M. A., Alterations of the carbon storages in postagrogenic ecosystems due to natural reforestation in Kostroma oblast, *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 307–317 (in Russian).
9. Terekhin E. A., Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series, *Computer Optics*, 2021, Vol. 45, No. 2, pp. 245–252 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
10. Terekhin E. A., Reforestation on abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe, *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 4, pp. 594–604 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622040112.
11. 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.
12. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Possibilities of assessing forest belts canopy closure using Sentinel-2 based Bi-Seasonal Forest Index and UAV data, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, pp. 189–202 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-189-202.
13. Bera D., Das Chatterjee N., Bera S. et al., Comparative performance of Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI data in canopy cover prediction using Random Forest model: Comparing model performance and tuning parameters, *Advances in Space Research*, 2023, Vol. 71, No. 11, pp. 4691–4709, DOI: 10.1016/j.asr.2023.01.027.
14. Chendev Y. G., Hubbart J. A., Terekhin E. A. et al., Recent afforestation in the Iowa river and Vorskla river basins: A comparative trends analysis, *Forests*, 2016, Vol. 7, No. 11, Article 278, DOI: 10.3390/f7110278.
15. Eskandari S., Ali Mahmoudi Sarab S., Mapping land cover and forest density in Zagros forests of Khuzestan province in Iran: A study based on Sentinel-2, Google Earth and field data, *Ecological Informatics*, 2022, Vol. 70, Article 101727, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101727.
16. Feng M., Sexton J. O., Huang C. et al., 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, DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.012.
17. Fortin J. A., Cardille J. A., Perez E., Multi-sensor detection of forest-cover change across 45 years in Mato Grosso, Brazil, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 238, Article 111266, DOI: 10.1016/j.rse.2019.111266.
18. Gao J., Liu Y., De(re)forestation and climate warming in subarctic China, *Applied Geography*, 2012, Vol. 32, No. 2, pp. 281–290, DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.04.002.
19. 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, Vol. 196, pp. 193–204, DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.006.

20. Kalinaki K., Malik O.A., Lai D.T.C. et al., Spatial-temporal mapping of forest vegetation cover changes along highways in Brunei using deep learning techniques and Sentinel-2 images, *Ecological Informatics*, 2023, Vol. 77, Article 102193, DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102193.
21. Lisetskii F.N., Buryak Z.A., Marinina O.A. et al., Features of soil organic carbon transformations in the southern area of the East European plain, *Geosciences*, 2023, Vol. 13, No. 9, Article 278, DOI: 10.3390/geosciences13090278.
22. Lu C., Wang K., Natural resource conservation outpaces and climate change: Roles of reforestation, mineral extraction, and natural resources depletion, *Resources Policy*, 2023, Vol. 86, Article 104159, DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104159.
23. Pickell P.D., Hermosilla T., Frazier R.J. et al., Forest recovery trends derived from Landsat time series for North American boreal forests, *Intern. J. Remote Sensing*, 2016, Vol. 37, No. 1. P. 138–149, DOI: 10.1080/2150704X.2015.1126375.
24. 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, Vol. 240, Article 111691, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111691.
25. Yu L., Fan L., Ciais P. et al., Carbon dynamics of Western North American boreal forests in response to stand-replacing disturbances, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, Vol. 122, Article 103410, DOI: 10.1016/j.jag.2023.103410.