

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

### ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОЦЕНКА ЛЕСИСТОСТИ ОВАЖНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ СРЕДНЕРУССКОЙ ЛЕСОСТЕПИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕКТРАЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ

© 2021 г. Э. А. Терехин\*

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов,  
Белгород, Россия*

\*E-mail: [terekhin@bsu.edu.ru](mailto:terekhin@bsu.edu.ru)

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.

В статье представлены результаты оценки влияния лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи на их спектрально-отражательные характеристики. Исследование выполнено на территории лесостепной зоны Центрального Черноземья. Установлено, что коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона тесно коррелируют с долей древесной растительности, присутствующей в балках. Повышение лесистости сопровождается снижением коэффициентов спектральной яркости в SWIR-области. Для оценки лесистости на основе спектрально-отражательных признаков этого диапазона может быть использована логистическая зависимость. С использованием отражательных признаков, измеренных по спутниковым данным Landsat, выполнена оценка лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи в середине 1980-х, начале 2000-х и конце 2010-х гг. Установлена тенденция к повышению лесистости оврагов и балок в последние десятилетия на основной части региона. С середины 1980-х гг. по 2018 г. лесистость овражно-балочных систем выросла с 16 до 45%. В исследуемый период отмечено увеличение внутрорегиональных различий в лесистости балок. В настоящее время этот показатель более существенно варьирует в пределах региона, чем в середине 1980-х гг.

*Ключевые слова:* овражно-балочные системы, лесистость, Среднерусская лесостепь, данные дистанционного зондирования, спектрально-отражательные признаки, Landsat

DOI: 10.31857/S0205961421040060

#### ВВЕДЕНИЕ

Овражно-балочные системы – характерный компонент ландшафтов Среднерусской лесостепи в пределах Центрального Черноземья (Мильков и др., 1978; Нечетова, Нарожная, 2010). Системы оврагов и балок выступают одним из немногих элементов естественных ландшафтов, на основе которых возможно изучение региональных тенденций в развитии растительного покрова. Обусловлено это антропогенной преобразованностью основной части региона и интенсивным аграрным использованием его территории. Изменения растительного покрова овражно-балочных систем (ОБС), в первую очередь касающиеся величины их покрытия древесной растительностью, могут выступать индикатором современных тенденций развития естественной растительности.

Лесистость Центрального Черноземья (ЦЧР) в начале XX в. составляла около 8.7% (Бугаев и др., 2006). В последние десятилетия на юге Среднерусской возвышенности (территория Белгородской области) зафиксирован ее рост, происходя-

щий преимущественно за счет овражно-балочной сети (Терехин, Чендев, 2018). Овражно-балочные системы, в условиях высокой антропогенной нагрузки на большинство ландшафтов региона, выступают одним из их немногих элементов, на которых возможно естественное увеличение лесистости (Chendev et al., 2016). Ее показатели могут обуславливать микроклиматические (Ольчев и др., 2017; Bonan, 2008; Gao, 2012) и гидрологические условия (Онучин и др., 2017), изменять ландшафтный облик. Вследствие этого определяется актуальность исследования современной и ретроспективной оценки лесистости овражно-балочных систем лесостепной зоны Центрального Черноземья. Изучение современных тенденций в развитии растительного покрова овражно-балочных систем актуально также в связи с происходящими климатическими изменениями в регионе (Лебедева, Крымская, 2008; Новикова и др., 2017), которые могут выступать одной из причин динамики естественной растительности.

Современная и архивная спутниковая информация выступает одним из наиболее эффективных источников для пространственно-временного анализа покрытых лесом земель (Письман и др., 2018; Козодеров и др., 2018; Кашницкий и др., 2019; Терехин, 2020). Применение спутниковых данных позволяет проводить ретроспективные оценки лесного покрова (Kim et al., 2014; Беляева, Попов, 2016) и может быть использовано для оценки особенностей формирования лесной растительности (Жиринов и др., 2004; Архипова, 2017; Данилова и др., 2017).

Динамика лесистости может приводить к изменениям спектрально-отражательных признаков территории (Марчуков, 2010; Potapov et al., 2011; Терехин, Чендев, 2018). Их количественный анализ может быть, в свою очередь, использован для исследования растительного покрова систем оврагов и балок, пространственно-временного анализа доли древесной растительности, присутствующей в них.

Для оценки изменений в лесопокрытых землях наиболее часто применяются подходы, основанные на алгоритмах машинного обучения, классификации спектральных признаков (Huang et al., 2002; Zhang et al., 2014; Potapov et al., 2015; Ховратович и др., 2019). Их использование позволяет картографировать изменения в лесах на разных территориальных уровнях. В то же время исследование особенностей формирования лесных сообществ на безлесных пространствах, как сукцессионного процесса, требует оценки влияния изменений в растительности на их спектрально-отражательные признаки. Обусловлено это тем, что процессы лесообразования могут по-разному оказывать влияние на отражательные характеристики в разных участках спектра.

Проблема анализа изменений спектрально-отражательных характеристик овражно-балочных систем, обусловленных формированием в них ассоциаций древесной растительности, в настоящее время во многом остается открытой. Овражно-балочные системы, как типичный элемент ландшафтов, не имеют повсеместного распространения. Наиболее широко они представлены в некоторых регионах, к которым относится и Среднерусская лесостепь (Дроздов, 1991). Исследование спектрального отклика овражно-балочных систем в связи с этим приобретает актуальность, т.к. может позволить на новом уровне подойти к изучению изменений их растительного покрова.

Цель исследования состояла в количественном анализе спектрального отклика овражно-балочных систем, влияния на него доли древесной растительности, присутствующей в балках, и изучении региональных тенденций в динамике лесис-

тости ОБС Центрального Черноземья в последние десятилетия.

Достижение поставленной цели предусматривало решение следующих задач:

- оценка информативности спектрально-отражательных признаков для анализа лесистости овражно-балочных систем;
- количественная оценка связи между лесистостью ОБС и спектральными характеристиками, наиболее тесно коррелирующими с ней;
- пространственно-временной анализ лесистости овражно-балочных систем на территории лесостепи Центрального Черноземья в конце XX–начале XXI вв. на основе спектрально-отражательных признаков.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования выступали овражно-балочные системы, расположенные в пределах шести областей: Белгородской, Воронежской, Курской, Орловской, Липецкой и Тамбовской области. Овражно-балочные системы подбирали для исследования на основе ряда критериев: 1) наличие на территории ОБС современных (2018 г.) и архивных (2000–2018 гг.) спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения; 2) отсутствие следов искусственных лесопосадок в последние десятилетия; 3) аналогичные для всех объектов условия увлажнения – в пределах балок не должно было быть заболоченных участков.

Выборку формировали таким способом, чтобы исследуемые овражно-балочные системы располагались во всех областях ЦЧР и были представлены в разных его частях, что было необходимо для обеспечения возможности объективного пространственного анализа их лесистости. Стремилось отбирать объекты с ее разной величиной. Отсутствие в балках признаков искусственных лесопосадок в исследуемый период определяли на основе анализа разновременных спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения (1 м/пиксель) 2000–2018 гг., полученных из web-сервисов открытого доступа, преимущественно Google Earth. Эти же снимки были использованы для анализа фактической лесистости балок. Соответствующая детальность изображений обеспечивала возможность достоверного анализа современной доли древесной растительности, присутствующей в них. В общей сложности было отобрано 162 овражно-балочные системы суммарной площадью 3879.6 га (табл. 1).

На основе спутниковых изображений в геоинформационной среде методом ручной оцифровки для каждой овражно-балочной системы было подготовлено два векторных контура: слой границ ОБС и контур участков покрытых древесной растительностью в 2018 г. С использованием этих

данных была вычислена площадь и современная величина покрытия балок лесными насаждениями.

Анализ спектрально-отражательных свойств овражно-балочных систем был выполнен в два этапа. Первый этап включал оценку влияния на них величины лесистости и выявление спектральных признаков, информативных для ее анализа. Второй этап состоял в изучении зависимости между лесистостью ОБС и спектральными характеристиками.

Оценка влияния лесистости овражно-балочных систем на их спектрально-отражательные характеристики в различных диапазонах спектра осуществлена на основе данных Landsat OLI. Для этой цели была использована спутниковая сцена Landsat-8 OLI от 24.08.2018 с параметрами Path (Колонка) 177, Row (Ряд) 024 в системе WRS-2 (Worldwide Reference System-2) и овражно-балочные системы, охватываемые ею. Параметры Path (Колонка) и Row (Ряд) идентифицируют местоположение снимков Landsat в системе WRS-2, используемой для определения их расположения на земной поверхности. Спутниковую сцену отбирали с учетом того, чтобы она охватывала несколько десятков объектов исследования, т.е. таким образом, чтобы на основе полученных данных можно было выяснить особенности связи между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками. Период августа был выбран в связи с тем, что он выступал наименее облачным месяцем в году и на него на территорию региона проще подобрать безоблачное покрытие снимков, которое может быть применено для территориальных оценок отражательных характеристик ОБС.

Снимки Landsat OLI прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию и были пересчитаны в безразмерные коэффициенты спектральной яркости. Исследование спектрально-отражательных признаков овражно-балочных систем было осуществлено на основе анализа их отражательной способности в основных диапазонах спектра, охватывающих видимую и инфракрасную область.

Отражательные характеристики ОБС могут быть исследованы также на основе спектральных вегетационных индексов, т.е. математических преобразований исходных яркостей снимков. Однако вследствие разнообразия вегетационных индексов, их анализ, а также анализ комбинаций спектральных признаков различных диапазонов для оценки лесистости ОБС требует отдельного исследования. Вместе с этим необходимо отметить, что интерпретация вегетационных индексов для оценки состояния растительности в сравнении с коэффициентами спектральной яркости не всегда возможна, а применение требует учета большего числа условий.

**Таблица 1.** Характеристики овражно-балочных систем, используемых для анализа процессов изменения лесистости и спектрально-отражательных признаков

Регион	Число объектов	Площадь, га
Белгородская область	31	933.9
Воронежская область	28	876.2
Курская область	34	741.0
Липецкая область	28	389.7
Орловская область	14	405.7
Тамбовская область	27	533.1
Всего	162	3879.6

На основе данных Landsat OLI были вычислены коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) овражно-балочных систем в 6 диапазонах: синем (Blue), зеленом (Green), красном (Red), ближнем инфракрасном (NIR), а также инфракрасных SWIR1 и SWIR2. Оценка информативности спектральных показателей для анализа лесистости ОБС проводили на основе коэффициентов корреляции Пирсона (параметрический критерий) и Спирмена (непараметрический критерий). Совместный анализ этих критериев был проведен для повышения объективности полученных результатов. В рамках исследования была выполнена оценка средних значений спектральных показателей для различных градаций лесистости и изучена значимость различий между ними.

Оценка зависимости между лесистостью овражно-балочных систем и спектрально-отражательными характеристиками, проведенная на втором этапе исследования, была осуществлена на основе данных Landsat TM/OLI.

Так как спектральные диапазоны сенсоров Landsat TM/ETM+ и Landsat OLI немного различаются, то было вычислено два вида моделей, описывающих связь между лесистостью и коэффициентами спектральной яркости. В первой из них использовались спектральные признаки, извлеченные из данных Landsat TM/ETM+, во второй – из данных Landsat OLI. Анализ спектральных признаков овражно-балочных систем на основе различных, хотя и близких по характеристикам сенсоров был выполнен для повышения эффективности моделирования лесистости в разные временные срезы, проводимой на заключительном этапе исследования.

Анализ зависимости между лесистостью ОБС и спектральными характеристиками Landsat OLI был проведен на основе того же спутникового изображения (Landsat-8 от 24.08.2018), на основе которого ранее была изучена теснота связи коэффициентов спектральной яркости с лесистостью ОБС. Аналогичное исследование для спектраль-

**Таблица 2.** Спутниковые данные Landsat, используемые для оценки спектрально-отражательных признаков овражно-балочных систем и их лесистости

Path/Row	Сенсор	Дата получения	Path/Row	Сенсор	Дата получения
177/025	TM	29.08.1985	174/024	TM	26.07.1986
	TM	22.08.2000		ETM+	12.08.2001
	OLI	24.08.2018		OLI	19.08.2018
175/025	TM	23.08.1988	179/023	TM	30.08.1986
	TM	08.08.2000		TM	22.07.2001
	OLI	26.08.2018		OLI	06.08.2018
179/024	TM	30.08.1986	177/023	TM	29.08.1985
	TM	03.09.1999		TM	22.08.2000
	OLI	06.08.2018		OLI	24.08.2018
178/024	TM	07.08.1986	176/023	TM	22.08.1988
	ETM+	04.09.1999		TM	06.09.1999
	OLI	31.08.2018		OLI	01.08.2018
177/024	TM	29.08.1985	175/023	TM	22.07.1988
	TM	22.08.2000		ETM+	18.07.2001
	OLI	24.08.2018		OLI	26.08.2018

ных характеристик, измеренных по Landsat TM, было осуществлено на основе данных Landsat начала 2000-х гг. Для этой цели была сформирована группа балок, на которые удалось подобрать снимки сверхвысокого пространственного разрешения на эти сроки и провести оценку фактической лесистости. После этого на основе данных Landsat TM августа 2000 г. была выполнена оценка связи между лесистостью ОБС и коэффициентами спектральной яркости.

На заключительном этапе с использованием спектрально-отражательных признаков, наиболее информативных для оценки лесистости ОБС, был осуществлен пространственный анализ лесистости в середине 1980-х гг., начале 2000-х гг. и 2018 г. Для решения этой задачи на каждый перечисленный временной срез было сформировано покрытие территории Центрального Черноземья снимками со спутников серии Landsat (табл. 2).

Для минимизации фенологических различий все космические снимки старались подбирать на одни и те же сроки периода вегетации – преимущественно август, который был наименее облачным. Во все временные срезы только на этот месяц удалось сформировать подборку относительно безоблачных снимков. Все изображения прошли атмосферную и радиометрическую корректировку с переводом в безразмерные коэффициенты спектральной яркости. Значения спектральных характеристик для конкретных балок были вычислены методом зональной статистики, т.е. для каждой овражно-балочной системы вычисляли

значение спектральных признаков, усредненное в пределах их контуров.

С использованием установленных зависимостей между лесистостью овражно-балочных систем и КСЯ SWIR-диапазона была оценена доля древесной растительности в каждой исследуемой балке на каждый из трех временных срезов: середину 1980-х гг., начало 2000-х гг. и 2018 г. После этого с применением методов пространственной интерполяции (радиальные базисные функции) были подготовлены картосхемы пространственного распределения лесистости овражно-балочных систем в пределах Центрального Черноземья на все исследуемые промежутки времени. На основе рассчитанных картосхем были выявлены и изучены пространственно-временные особенности лесистости балок региона в конце XX–начале XXI вв. Анализ производили методом оценки пространственного изменения территорий, соответствующих одним и тем же градациям лесистости ОБС в начале и конце анализируемого периода.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенных оценок установлено, что наиболее тесно коррелируют с величиной лесистости овражно-балочных систем коэффициенты спектральной яркости SWIR1-диапазона (1.56–1.66 мкм) Landsat-8 OLI (табл. 3). При этом большинство изученных спектральных признаков находятся в обратной зависимости от величины покрытия овражно-балочных систем древесными со-

**Таблица 3.** Характеристики тесноты связи между лесистостью овражно-балочных систем и их спектрально-отражательными признаками (по Landsat-8 OLI)

Коэффициент корреляции	Коэффициенты спектральной яркости					
	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2
Пирсона	-0.61	-0.46	-0.41	0.02	-0.79	-0.40
Спирмена	-0.52	-0.41	-0.41	0.25	-0.74	-0.48

**Таблица 4.** Характеристики коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1.56–1.66 мкм (по Landsat-8 OLI) для различных градаций лесистости овражно-балочных систем

Лесистость, %	Число объектов	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
0–20	10	0.224	0.013	0.205	0.248
20–40	55	0.200	0.017	0.170	0.239
40–60	52	0.186	0.014	0.159	0.214
60–80	30	0.174	0.018	0.140	0.215
80–100	6	0.166	0.021	0.136	0.188

обществами. Статистически значимы на уровне 0.05 все корреляции за исключением коэффициентов спектральной яркости NIR-диапазона.

В связи с наиболее высокой корреляцией с лесистостью ОБС спектральные признаки SWIR1-диапазона (1.56–1.66 мкм) были использованы для более подробного анализа отражательных свойств овражно-балочных систем и их пространственно-временной оценки, а также моделирования лесистости на их основе.

Статистический анализ средних значений коэффициентов спектральной яркости в диапазоне 1.56–1.66 мкм для различных градаций лесистости (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100%) показал, что величины КСЯ существенно снижаются при переходе от одной градации к другой в направлении увеличения лесистости (табл. 4). По значениям стандартных отклонений динамики не выявлено.

Сравнение эффективности различных моделей, описывающих связь между лесистостью овражно-балочных систем и их коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона по Landsat-8 OLI, показало, что наиболее высокими коэффициентами детерминации ( $R^2$ ) характеризуется логит-функ-

ция (табл. 5, рис. 1), что указывает на то, что КСЯ изменяются с разной интенсивностью по мере увеличения лесистости. Уровень значимости всех уравнений, представленных в табл. 5, меньше 0.05.

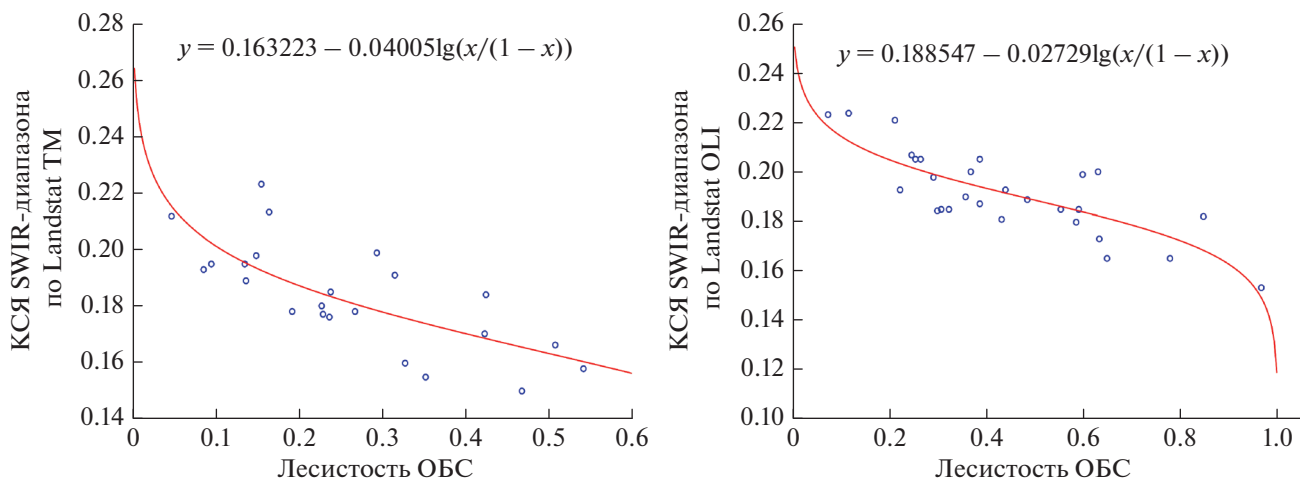
Аналогичные зависимости, полученные по данным Landsat TM, характеризовались несколько меньшими коэффициентами детерминации. Для логарифмической модели он был равен 0.52, для степенной – 0.53, для логит-функции составил 0.55 на уровне значимости 0.05.

Более низкие коэффициенты детерминации для уравнений, полученных по Landsat TM 2000 г., обусловлены в значительной степени отсутствием в аналитической выборке на эти сроки балок со значениями лесистости выше 60%. Связано это с тем, что в начале 2000-х гг. лесистость овражно-балочных систем была значительно ниже современной, и вследствие этого не удалось подобрать балки с ее соответствующей величиной. Кроме того, меньшие величины коэффициентов детерминации могут быть обусловлены и более низким радиометрическим разрешением Landsat TM в сравнении с Landsat OLI.

Из формы зависимости КСЯ от лесистости овражно-балочных систем следует, что для ре-

**Таблица 5.** Характеристики зависимостей, описывающих связь между величиной лесистости овражно-балочных систем и КСЯ SWIR-диапазона (по Landsat-8 OLI)

Вид зависимости	Уравнение	$R^2$
Линейная	$y = -0.0613x + 0.2184$	0.62
Логарифмическая	$y = -0.024 \ln(x) + 0.1688$	0.64
Степенная	$y = 0.1695x^{-0.123}$	0.63
Логит-функция	$y = 0.1885 - 0.0273 \lg(x/(1-x))$	0.65



**Рис. 1.** Графики, характеризующие зависимость между лесистостью овражно-балочных систем (ОБС) и коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона.

шения обратной задачи – оценки лесистости на основе коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона – может быть использована убывающая логистическая (сигмоидная) кривая, асимптотами которой будут значения 0 и 1 (минимальная и максимальная возможная величина лесистости).

На основе фактических данных о лесистости овражно-балочных систем и их коэффициентах спектральной яркости SWIR-диапазона расчетная зависимость, используемая для оценок лесистости по данным Landsat OLI, имела следующий вид:

$$y = 1 - \frac{1}{1 + e^{(-44.715x + 8.275)}}, \quad (1)$$

где:  $y$  – значения лесистости,  $x$  – значения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (6-й канал сенсора Landsat OLI). Коэффициент детерминации уравнения ( $R^2$ ) составил 0.61 на уровне значимости 0.05.

На основе данных Landsat TM/ETM+ аналогичная зависимость имела вид:

$$y = 1 - \frac{1}{1 + e^{(-31.342x + 4.639)}}, \quad (2)$$

где:  $y$  – значения лесистости,  $x$  – значения коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (5-й канал сенсора Landsat TM/ETM+). Ее коэффициент детерминации ( $R^2$ ) составил 0.60 на уровне значимости 0.05. В обоих уравнениях (1), (2) применяются значения коэффициентов яркости SWIR-диапазона, измеренные в период августа, что необходимо учитывать при их использовании.

Применение предложенных зависимостей для непосредственной оценки лесистости на основе

спектральных признаков будет давать определенные погрешности, обусловленные вариабельностью спектрально-отражательных признаков овражно-балочных систем. В то же время их верификация (проведенная на основе данных 2018 г. с балок, расположенных вне спутниковой сцены Path 177, Row 24) показала, что коэффициент корреляции фактических и расчетных значений лесистости составил около 0.80.

Сравнение фактической лесистости овражно-балочных систем в 2018 г., оцененной на основе спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения, и лесистости, измеренной на основе коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона, показало (табл. 6), что фактические и расчетные значения практически совпадают в целом по региону и в большинстве областей Центрального Черноземья.

В Белгородской, Липецкой и Орловской области расчетные значения лесистости овражно-балочных систем практически не отличаются от фактических. В Воронежской, Курской и Тамбовской областях отклонения более значительны. Они могут быть обусловлены использованием (вследствие отсутствия данных на другие даты) для значительных участков их территорий снимков Landsat OLI начала августа, а не его второй половины, применявшихся для расчета уравнения и для оценки лесистости на основной части территории исследования.

Наличие статистически значимой зависимости между лесистостью овражно-балочных систем и коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона выступило основанием для ее пространственно-временного анализа в пределах лесостепи Центрального Черноземья с использо-

**Таблица 6.** Сравнение фактической лесистости овражно-балочных систем и рассчитанной на основе КСЯ SWIR-диапазона в областях Центрального Черноземья

Регион	Лесистость овражно-балочных систем в 2018 г.			
	фактическая		расчетная	
	среднее значение	стандартное отклонение	среднее значение	стандартное отклонение
Белгородская область	0.55	0.20	0.54	0.15
Воронежская область	0.28	0.14	0.21	0.12
Курская область	0.49	0.17	0.41	0.15
Липецкая область	0.42	0.13	0.40	0.15
Орловская область	0.59	0.13	0.61	0.15
Тамбовская область	0.39	0.16	0.52	0.17
В среднем по ЦЧР	0.45	0.18	0.44	0.18

ванием этих спектральных признаков в период 1985–2018 гг.

Территориальный анализ современной (2018 г.) лесистости, рассчитанный на основе коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона (рис. 2), позволил установить ее особенности. Картограмма подготовлена методом пространственной интерполяции (радиальные базисные функции, RBF) с использованием возможностей геоинформационных систем.

Ключевые территориальные закономерности изменения лесистости, просматривающиеся на подготовленной картограмме, можно сформулировать следующим образом:

1) достаточно высокие различия в современной лесистости овражно-балочных систем в пределах региона;

2) наличие пространственных трендов в изменении лесистости на территории Центрального Черноземья. В его пределах снижение лесистости ОБС наблюдается в двух основных направлениях: с северо-запада на юго-восток и с северо-востока на юго-запад. Одновременно на юге региона наблюдаются существенные различия между западной и восточной частями.

Значительные современные территориальные различия в лесистости овражно-балочных систем являются следствием неодинаковых природно-климатических условий, способствующих более или менее интенсивному росту древесной растительности в балках и оврагах. Они изменяются от условий лесной зоны и подзоны северной лесостепи на северо-западе и северо-востоке до условий степи на юго-востоке (Физико-географическое районирование, 1961).

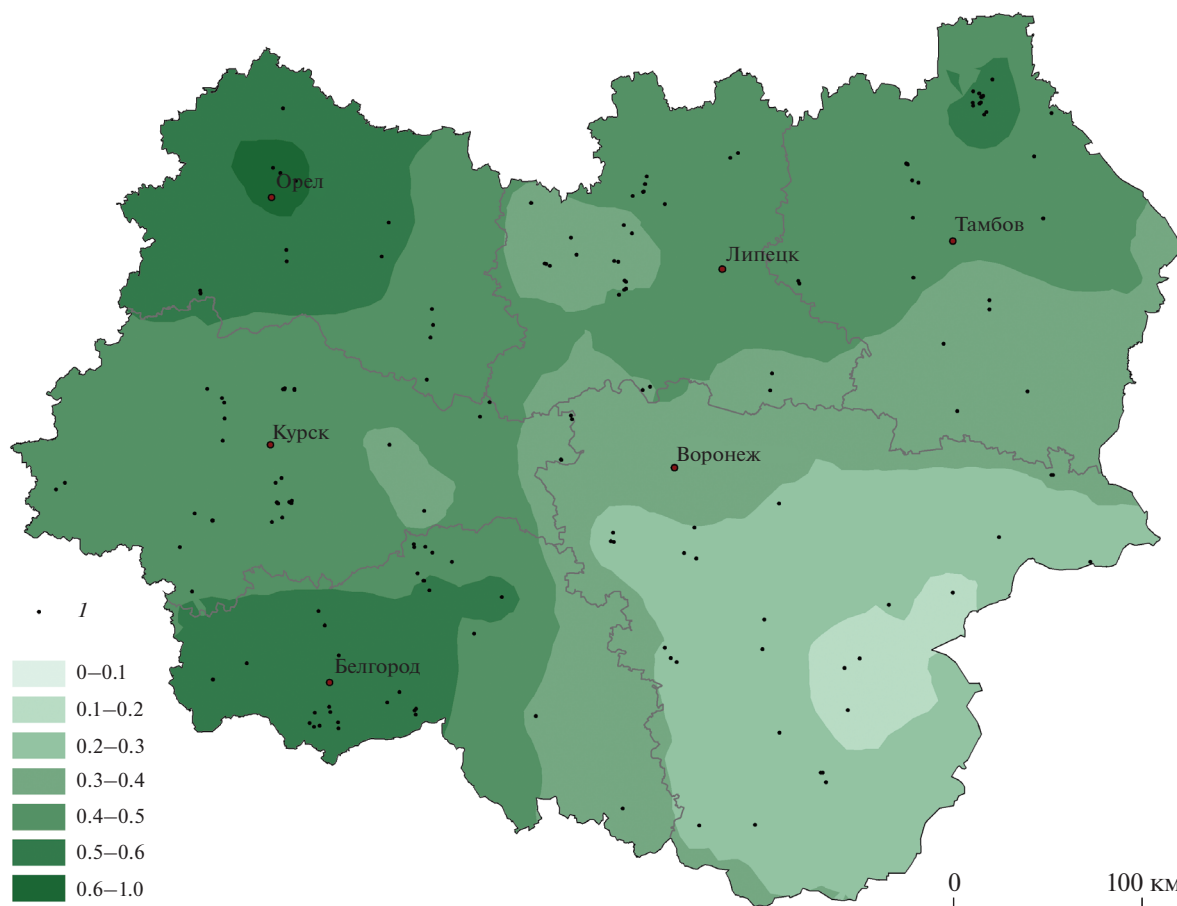
Вследствие достаточно высокой корреляции ( $R = -0.79$ ) между лесистостью овражно-балочных систем и КСЯ SWIR-диапазона оценка территориальных изменений в лесистости может

быть выполнена и непосредственно на основе пространственного анализа этих спектральных признаков. Территориальная оценка коэффициентов спектральной яркости овражно-балочных систем, измеренных в 2018 г., показала, что особенности их изменения (рис. 3) во многом аналогичны пространственным особенностям лесистости ОБС в этом же году (рис. 2), с тем отличием, что рост лесистости сопровождается снижением коэффициентов спектральной яркости.

Например, четко прослеживаются различия в лесистости ОБС между юго-западом и юго-востоком региона, которые были идентифицированы на основе данных о лесистости овражно-балочных систем и, одновременно, на основе коэффициентов спектральной яркости. Таким образом, непосредственный анализ пространственно-временных особенностей спектральных признаков SWIR-диапазона может быть использован для получения представления о территориальном изменении лесистости овражно-балочных систем.

По результатам моделирования лесистости ОБС на основе коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона на территории Центрального Черноземья установлено, что за последние десятилетия, с середины 1980-х гг. по 2018 г. в пределах лесостепной зоны Центрального Черноземья отмечен существенный, практически трехкратный рост лесистости овражно-балочных систем (табл. 7).

Вместе с этим наблюдается повышение ее максимальных, минимальных значений и стандартного отклонения, что указывает на то, что современный облик ландшафтов овражно-балочных систем в настоящее время более разнообразен по величине лесистости, чем 30–35 лет назад. Изменение всех показателей лесистости ОБС происходило последовательно. В период 1985–2000 гг. лесистость ОБС выросла с 16 до 26%, т.е. 1.6 раза. В период 2000–2018 гг. она увеличилась с 26 до 45%,



**Рис. 2.** Пространственное изменение лесистости овражно-балочных систем на территории Центрального Черноземья (2018 г.), смоделированное на основе спектральных признаков SWIR-диапазона по Landsat-8 OLI. 1 – изученные ОБС.

т.е. в 1.7 раза. В целом за 33 года лесистость овражно-балочных систем, согласно полученным данным, выросла в 2.8 раза. Повышение различий в лесистости может выступать следствием повышения контрастности природно-климатических условий, которые, в свою очередь, подвержены вариациям.

Полученные результаты подтверждаются визуальным анализом лесистости овражно-балочных систем в середине 1980-х гг. и в 2018 г. (рис. 4)

на спутниковых данных. В силу не очень высокого пространственного разрешения снимков Landsat (30 м/пиксель) по ним не представляется возможным количественно оценить лесистость таким способом, как это было сделано по снимкам сверхвысокого пространственного разрешения 2018 г. Тем не менее, тенденция увеличения лесистости на них проявляется достаточно наглядно при сравнении одних и тех же участков балок. Из рис. 4 видно, что в исследуемый период про-

**Таблица 7.** Параметры изменения лесистости овражно-балочных систем лесостепи Центрального Черноземья в конце XX–начале XXI вв.

Год	Лесистость овражно-балочных систем			
	среднее	минимум	максимум	станд. откл.
1985	0.16	0.03	0.43	0.08
2000	0.26	0.04	0.49	0.09
2018	0.45	0.04	0.90	0.20



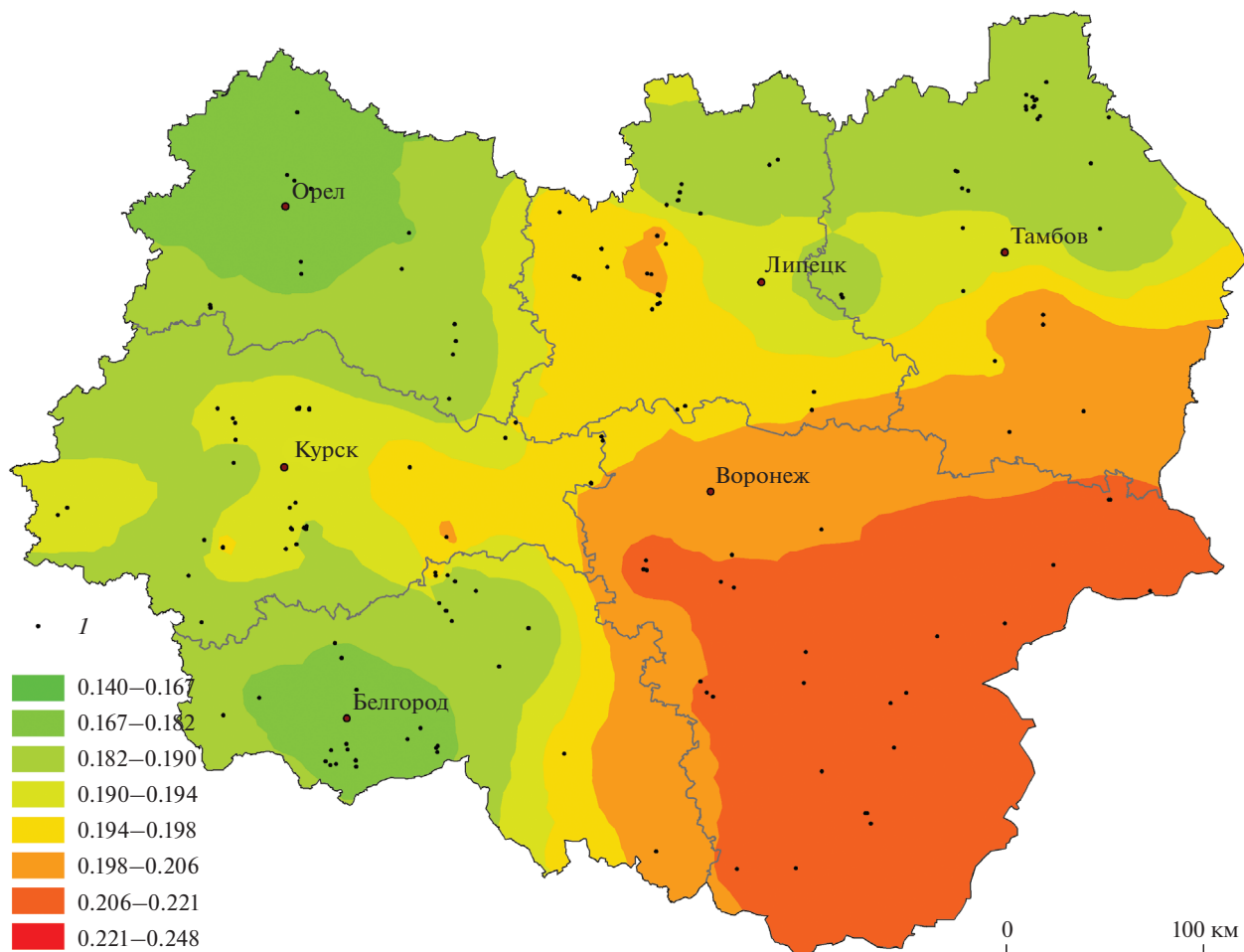


Рис. 3. Пространственное распределение в пределах ЦЧР коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона овражно-балочных систем в 2018 г. 1 – изученные овражно-балочные системы.

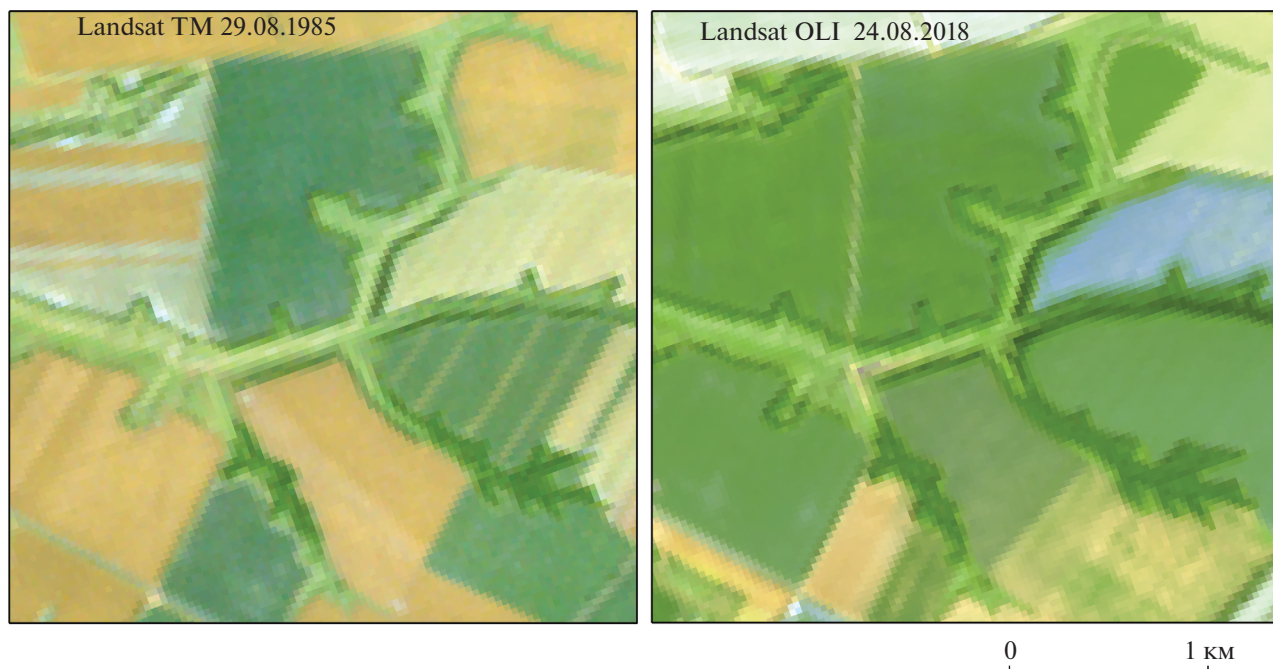
цессы увеличения лесистости в овражно-балочной сети происходили за счет повышения площади лесных насаждений, расположенных как в верховьях балок, так и на их склонах и центральных частях.

Таким образом, на рубеже XX–XXI вв. как минимум, последние 4 десятилетия, на территории лесостепи Центрального Черноземья непрерывно продолжается процесс естественного роста лесистости овражно-балочных систем, следствием которого является смена их ландшафтного облика, обусловленная трансформацией травянистых пространств в лесные экосистемы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение лесистости овражно-балочных систем оказывает влияние на их спектрально-отражательные признаки. На основе анализа лесистости балок, типичных для территории Среднерусской лесостепи, установлено, что из диапазонов

видимого и инфракрасного излучения спектральные признаки SWIR-диапазона (1.56–1.66 мкм) являются наиболее информативными для анализа доли древесной растительности, присутствующей в овражно-балочных системах. Повышение лесистости сопровождается снижением коэффициентов спектральной яркости в SWIR-области. Для задач оценки лесистости на основе спектральных признаков SWIR-диапазона может быть применена логистическая кривая. С использованием спектрально-отражательных признаков, измеренных по данным с сенсоров серии Landsat, выполнена пространственно-временная оценка лесистости овражно-балочных систем лесостепи Центрального Черноземья в период 1985–2018 гг. Установлен рост лесистости овражно-балочных систем. В исследуемый период она увеличилась с 16 до 45%. В настоящее время в пределах региона наблюдаются достаточно существенные различия лесистости балочных систем, которых еще не наблюдалось в середине



**Рис. 4.** Пример изменения лесистости овражно-балочных систем в 1985–2018 гг. на территории Среднерусской лесостепи. Белгородская область.

1980-х гг. Они могут выступать следствием повышения контрастности природно-климатических условий в пределах региона.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Архипова М.В.* Восстановление лесов на нарушенных землях в национальном парке “Угра” // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2017. № 1. С. 92–99.
- Беляева Н.Г., Попов С.Ю.* Изменение лесистости бывшего Верейского уезда Московской области за последние 200 лет // Лесоведение. 2016. № 1. С. 44–54.
- Бугаев В.А., Ревин А.И., Мусиевский А.Л.* Динамика лесного фонда Центрального Черноземья // Лесное хозяйство. 2006. № 3. С. 41–42.
- Данилова И.В., Корец М.А., Рыжкова В.А.* Картографирование возрастных стадий лесной растительности на основе анализа разносезонных спутниковых изображений landsat // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 4. С. 12–24.
- Дроздов К.А.* Элементарные ландшафты среднерусской лесостепи. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 176 с.
- Жирин В.М., Сухих В.И., Шаталов А.В., Бутусов О.Б., Эйдлина С.П.* Использование космических снимков для изучения динамики зарастания гарей // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 5. С. 69–76.
- Кашицкий А.В., Ховратович Т.С., Балашов И.В.* Организация обработки данных ДЗЗ при решении задачи детектирования изменений лесного покрова на больших территориях // Современ. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 103–111.
- Козодеров В.В., Донской С.А., Мельник П.Г., Дмитриев Е.В.* Приложения данных дистанционного зондирования высокого пространственного и спектрального разрешения для оценки породного состава лесов и параметров их биологической продуктивности // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 77–85.
- Лебедева М.Г., Крымская О.В.* Проявление современных климатических изменений в Белгородской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: естественные науки. 2008. Т. 3. № 6. С. 188–196.
- Марчуков В.С.* Автоматизированные методы оценки динамики пространственного распределения растительного покрова и грунтов по данным дистанционного мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 63–74.
- Милюков Ф.Н., Ахтырцева Н.И., Дроздов К.А., Хмелев К.Ф., Дуреченский В.Н., Дроздов К.А., Михно В.Б., Ахтырцев Б.П., Скуфьин К.В., Григорьевская А.Я., Федотов В.И.* Известняковый север Среднерусской возвышенности. Воронеж, 1978. 176 с.
- Нечетова Ю.В., Нарожная А.Г.* Изучение овражно-балочной сети Белгородской области с применением ГИС-технологий // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2010. № 11(71). С. 96–100.
- Новикова Е.П., Григорьев Г.Н., Вагурин И.Ю., Чумейкина А.С.* Вариации гидротермического режима в Черноземье за последние 30 лет на фоне глобального изменения климата // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2017. Т. 39. № 11(260). С. 105–113.
- Ольчев А.В., Розинкина И.А., Кузьмина Е.В., Никитин М.А., Ривин Г.С.* Оценка влияния изменения лесистости

- центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2017. Т. 4. С. 83–105.
- Онуцин А.А., Гапаров К.К., Михеева Н. А. Влияние лесистости и климатических факторов на годовой сток рек Прииссыккуля // *Лесоведение*. 2008. № 6. С. 45–52.
- Письман Т.И., Ботвич И.Ю., Шевырногов А.П. Оценка состояния лесной растительности Красноярского края (заповедник “Столбы”) по спутниковым данным // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 5. С. 130–140.
- Терехин Э.А., Чендев Ю.Г. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съемок // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 3. С. 114–126.
- Терехин Э.А. Оценка нарушенности лесов лесостепной зоны в начале XXI века по спутниковым данным // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 2. С. 134–146.
- Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского университета, 1961. 263 с.
- 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 // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 4. С. 2019. 102–110. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110>
- Bonan G.B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests // *Science*. 2008. V. 320. № 5882. P. 1444. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Chendev Yu.G., Hubbard J.A., Terekhin E.A., Lupo A.R., Sauer T.J., Burras C.L. Recent Afforestation in the Iowa River and Vorskla River Basins: A Comparative Trends Analysis // *Forests*. 2016. V. 7. № 11. <https://doi.org/10.3390/f7110278>
- Gao J., Liu Y. De(re)forestation and climate warming in sub-arctic China // *Applied Geography*. 2012. V. 32. P. 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.04.002>
- Huang C., Davis L.S., Townshend J.R.G. An assessment of support vector machines for land cover classification // *International J. Remote Sensing*. 2002. V. 23. № 4. P. 725–749. <https://doi.org/10.1080/01431160110040323>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.017>
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C. Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. № 2. P. 548–561. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.10.001>
- Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.027>
- Zhang J., Pham T.-T.-H., Kalacska M., Turner S. Using Landsat Thematic Mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan, China: 1990–2010 // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 31. P. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.006>

## Spatio-Temporal Assessment of Forest Cover of Small-Dry-Valleys in the Central Russian Forest-Steppe Using Spectral Response

E. A. Terekhin

*Belgorod State University, Belgorod, Russia*

This paper explores relationships between forest cover of small-dry-valleys and spectral response through analysis of object study in the forest-steppe natural zone of Central Chernozem Region of Russia. SWIR reflectance of small-dry-valleys most closely correlated with forest cover percent. An increase in forest cover leads to a decrease the reflectance in the SWIR range. Logistic dependence can be used to estimate forest cover based on the spectral response of this range. The assessment of the forest cover of small-dry-valleys in the Central Russian forest-steppe was carried out using spectral response measured from Landsat data in the mid-1980s, early 2000s, and late 2010s. A tendency has been established to increase the forest cover percent of small-dry-valleys in the main part of the region in recent decades. Since the mid-1980s to 2018 forest cover increased from 16 to 45%. During the study period, an increase in intraregional differences in the forest cover of ravines was noted. Currently, this indicator varies more significantly within the region than in the mid-1980s.

**Keywords:** small-dry-valleys, forest cover, Central Russian forest-steppe, remote sensing data, spectral response, Landsat

## REFERENCES

- Arkhipova M.V.* Vosstanovlenie lesov na narushennykh zemlyakh v natsional'nom parke "Ugra" [Reafforestation of disturbed lands in the Ugra national park] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. 2017. № 1. P. 92–99 (In Russian).
- Belyaeva N.G., Popov S.Yu.* Izmenenie lesistosti byvshego Vereyskogo uyezda Moskovskoy oblasti za poslednie 200 let [200 years long record of forest cover changes in Vereya uyezd, Moscow oblast] // Lesovedenie. 2016. № 1. P. 44–54 (In Russian).
- Bugaev V.A., Revin A.I., Musievskiy A.L.* Dinamika lesnogo fonda Tsentral'nogo Chernozem'ya [Dynamics of the forest fund of the Central Chernozem Region] // Lesnoe khozyaystvo. 2006. № 3. P. 41–42 (In Russian).
- Danilova I.V., Korets M.A., Ryzhkova V.A.* Kartografirovaniye vozrastnykh stadiy lesnoy rastitel'nosti na osnove analiza raznosezonnykh sputnikovyykh izobrazheniy landsat [Regenerating vegetation age stages mapping based on multi-seasonal landsat satellite imagery] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2017. № 4. P. 12–24 (In Russian).
- Drozhdov K.A.* Elementarnye landshafty srednerusskoy leso-stepi [Elementary landscapes of the Central Russian forest-steppe]. Voronezh: Izd-vo VGU, 1991. 176 p. (In Russian).
- Zhirin V.M., Sukhikh V.I., Shatalov A.V., Butusov O.B., Eydlina S.P.* Ispol'zovaniye kosmicheskikh snimkov dlya izucheniya dinamiki zarastaniya garey [Application of space images for analysis of burnt forest areas regeneration dynamics] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2004. № 5. P. 69–76 (In Russian).
- Kashnitskiy A.V., Khovratovich T.S., Balashov I.V.* Organizatsiya obrabotki dannykh DZZ pri reshenii zadachi detektirovaniya izmeneniy lesnogo pokrova na bol'shikh territoriyakh [The organization of remote sensing data processing for solving the problems of deforestation detection in large areas] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. № 6. P. 103–111 (In Russian).
- Kozoderov V.V., Donskoy S.A., Mel'nik P.G., Dmitriev E.V.* Prilozheniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya vysokogo prostranstvennogo i spektral'nogo razresheniya dlya otsenki porodnogo sostava lesov i parametrov ikh biologicheskoy produktivnosti [Applications of remote sensing data of high spatial and spectral resolution to estimate species composition of forests and their parameters of biological productivity] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2018. № 6. P. 77–85 (In Russian).
- Lebedeva M.G., Krymskaya O.V.* Proyavlenie sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy v Belgorodskoy oblasti [The manifestation of modern climate change in the Belgorod Region] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye nauki. 2008. V. 3. № 6. P. 188–196 (In Russian).
- Marchukov V.S.* Avtomatizirovannyye metody otsenki dinamiki prostranstvennogo raspredeleniya rastitel'nogo pokrova i gruntov po dannykh distantsionnogo monitoringa [The Automated Methods for Dynamics Estimation of Spatial Distribution of Vegetative Cover and Soils Using the Satellite Monitoring Data] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2010. № 2. P. 63–74 (In Russian).
- Mil'kov F.N., Akhtyrtseva N.I., Drozdov K.A., Khmelev K.F., Dvurechenskiy V.N., Drozdov K.A., Mikhno V.B., Akhtyrtsev B.P., Skuf'in K.V., Grigor'evskaya A.Ya., Fedotov V.I.* Izvestnyakovyy sever Srednerusskoy vozvysheynosti [Limestone north of the Central Russian Upland]. Voronezh, 1978. 176 p. (In Russian).
- Nechetova Yu.V., Narozhnyaya A.G.* Izuchenie ovrazhno-balochnoy seti Belgorodskoy oblasti s primeneniem GIS-tekhnologiy [Study of gullies and ravines network within Belgorod Region using GIS technology] // Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel'. 2010. № 11(71). P. 96–100. (In Russian).
- Novikova E.P., Grigor'ev G.N., Vagurin I.Yu., Chumeykina A.S.* Variatsii gidrotermicheskogo rezhima v Chernozem'e za poslednie 30 let na fone global'nogo izmeneniya klimata [Variations of the hydrothermal regime in the Black Earth region over the last 30 years against the backdrop of global climate change] // Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2017. V. 39. № 11(260). P. 105–113 (In Russian).
- Ol'chev A.V., Rozinkina I.A., Kuz'mina E.V., Nikitin M.A., Rivin G.S.* Otsenka vliyaniya izmeneniya lesistosti tsentral'nogo regiona Vostochno-Evropeyskoy ravniny na letnie pogodnye usloviya [Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European plain] // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2017. V. 4. P. 83–105 (In Russian).
- Onuchin A.A., Gaparov K.K., Mikheeva N.A.* Vliyanie lesistosti i klimaticheskikh faktorov na godovoy stok rek Priisyykul'ya [The Influence of Forestation and Climatic Factors on Annual Runoff in Issyk-Kul Lake Basin] // Lesovedenie. 2008. № 6. P. 45–52 (In Russian).
- Pis'man T.I., Botvich I.Yu., Shevyrnogov A.P.* Otsenka sostoyaniya lesnoy rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraya (zapovednik "Stolby") po sputnikovym dannykh [Assessment of the state of forest vegetation in Krasnoyarsk Territory (Stolby Nature Reserve) according to satellite data] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. № 5. P. 130–140 (In Russian).
- Terekhin E.A., Chendev Yu.G.* Otsenka izmeneniya lesistosti v sovremennyy period na yuge Srednerusskoy vozvysheynosti s ispol'zovaniem materialov raznovremennykh kosmicheskikh s'emok [Estimation of forest cover changes during modern period in the south of the Central Russian Upland using multiyear remote sensing data] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. V. 15. № 3. P. 114–126 (In Russian).
- Terekhin E.A.* Otsenka narushennosti lesov lesostepnoy zony v nachale XXI veka po sputnikovym dannykh [Estimation of forest disturbance in the forest-steppe zone at the beginning of the XXI century using satellite data] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 2. P. 134–146 (In Russian).
- Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Kashnitskiy A.V.* Metod detektirovaniya izmeneniy lesov na osnove podpiksel'noy 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] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2019. V. 16. № 4. P. 102–110 (In Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110
- Bonan G.B.* Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests // Science. 2008. V. 320. № 5882. P. 1444. DOI: 10.1126/science.1155121

- Chendev Yu.G., Hubbart J.A., Terekhin E.A., Lupo A.R., Sauer T.J., Burras C.L.* Recent Afforestation in the Iowa River and Vorskla River Basins: A Comparative Trends Analysis // *Forests*. 2016. V. 7. № 11. DOI: 10.3390/f7110278
- Gao J., Liu Y.* De(re)forestation and climate warming in subarctic China // *Applied Geography*. 2012. V. 32. P. 281–290. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.04.002
- Huang C., Davis L.S., Townshend J.R.G.* An assessment of support vector machines for land cover classification // *International J. Remote Sensing*. 2002. V. 23. № 4. P. 725–749. DOI: 10.1080/01431160110040323
- 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. DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.017
- Potapov P., Turubanova S., Hansen M.C.* Regional-scale boreal forest cover and change mapping using Landsat data composites for European Russia // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. № 2. P. 548–561. DOI: 10.1016/j.rse.2010.10.001
- Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCartyb J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C.* 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. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027
- Zhang J., Pham T.-T.-H., Kalacska M., Turner S.* Using Landsat Thematic Mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan, China: 1990–2010 // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 31. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.006