

Оценка зависимостей между проективным покрытием древесной растительности овражно-балочных систем и вегетационными индексами на юге Среднерусской возвышенности

Э. А. Терехин

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

Выявление зависимостей между процессами распространения древесной растительности в ландшафтах и показателями, измеряемыми по данным дистанционного зондирования Земли, выступает необходимым условием развития подходов к пространственно-временной оценке лесопокрываемых земель. В статье изложены результаты анализа зависимостей между величиной проективного покрытия древесной растительности овражно-балочных систем и 18 спектральными вегетационными индексами, определёнными по спутниковым данным Sentinel-2. Объектами исследования выступали участки овражно-балочной сети, типичной для юга Среднерусской возвышенности. Вегетационные индексы показали различную силу связи со степенью покрытия овражно-балочных систем древесной растительностью. Наиболее сильная связь выявлена для нормализованных вегетационных индексов, использующих вместе со значениями ближнего инфракрасного канала спектрально-отражательные характеристики зелёного или коротковолнового инфракрасного диапазонов. Для большинства индексов характерно наличие статистически значимых различий между разными градациями проективного покрытия, за исключением самой высокой градации, включающей объекты с его величиной более 0,8. Связь подавляющего большинства индексов с проективным покрытием положительна и может считаться устойчивой. Зависимость изученных вегетационных индексов от степени покрытия древесной растительностью аппроксимируется логарифмической функцией с наиболее высокой объяснительной способностью для индексов NDI (*англ.* Normalized Difference Index) и GNDVI (*англ.* Green Normalized Difference Vegetation Index).

Ключевые слова: лесопокрываемые земли, вегетационные индексы, лесостепь, данные дистанционного зондирования, Sentinel-2

Одобрена к печати: 26.05.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-227-241

Введение

Дистанционные оценки особенностей формирования древесной растительности в ландшафтах разных природных зон выступают важнейшим направлением в системе мониторинга состояния земной поверхности на основе спутниковых данных. Обусловлено это влиянием лесных экосистем на многие процессы, протекающие в природной среде. Объективные данные о параметрах лесного покрова актуальны не только для ландшафтов в целом, но и для их отдельных элементов, на которых процессы облесения получили развитие. Для оценок лесопокрываемой площади на глобальном, континентальном уровнях или уровне крупных регионов в настоящее время применяются различные способы классификации (Bartalev et al., 2014; Gudex-Cross et al., 2017), методы машинного обучения, включая методы опорных векторов (Radhakrishnan et al., 2020; Senf et al., 2020) и случайного леса (Тарасова и др., 2024; Vera et al., 2023), методы искусственных нейронных сетей (Liu et al., 2018). Вместе с непосредственной оценкой лесопокрываемой площади и тенденциями её изменения на крупных территориях, встаёт задача анализа процессов формирования древесной растительности в отдельных элементах ландшафтов и их влияния на характеристики, измеряемые по данным дистанционного зондирования Земли. К ним относятся коэффициенты спектральной яркости в разных диапазонах или производные на их основе величины — вегетационные индексы. Они

представляют алгебраические преобразования со спектрально-отражательными характеристиками различных зон спектра и направлены на усиление сигнала от исследуемого класса объектов, например растительности. Спектральные индексы могут быть использованы для исследования различных типов объектов земной поверхности. Среди показателей, предложенных для оценок характеристик растительности, необходимо выделить индексы, связанные с параметрами наземной зелёной фитомассы (Huete et al., 2002), покрытия зелёной растительности (Gitelson et al., 2002), индексом листовой поверхности (Шабанов и др., 2018; Naboudane et al., 2004), биофизическими (Gitelson et al., 1996; Vincini et al., 2008) и структурными характеристиками растительности (Shi, Xu, 2019). Спектральные вегетационные индексы по особенностям вычисления можно разделить на несколько категорий: простые алгебраические отношения яркостных характеристик в различных зонах спектра; нормализованные индексы; комплексные показатели, основанные на коэффициентах спектральной яркости из различных диапазонов. Несмотря на интенсивное развитие направления, связанного с исследованием индексов как показателей состояния растительного покрова, вопрос закономерностей их изменения вследствие лесистости территории, как и эффективности для её оценки, во многом остаётся открытым. Это обусловлено разнообразием ландшафтов Земли, особенностями формирующейся древесной растительности и постоянным совершенствованием характеристик спутниковых данных.

Процесс распространения древесной растительности в ландшафтах сопровождается одновременным изменением характеристик растительного покрова, в первую очередь проективного покрытия крон деревьев. В этой связи выявление показателей, информативных для изучения процессов формирования древесной растительности, требует рассмотрения комплекса индексов и изучения их связи с ним. Для отдельных элементов ландшафтов оценка может быть выполнена методом анализа силы связи со степенью проективного покрытия и выявления закономерностей вследствие его изменения. Исследование спектральных индексов при этом обуславливает необходимость формирования выборки объектов с его значениями, охватывающими весь возможный интервал (от 0 до 1), и измерения спектрально-отражательных характеристик в максимально идентичных условиях на основе одного и того же типа спутниковых данных. Развитие направления, анализирующего вегетационные индексы по данным дистанционного зондирования, непосредственно связано с совершенствованием характеристик многозональной спутниковой информации. В первую очередь к ним относятся показатели пространственного и радиометрического разрешения. Появление новых типов космических снимков открывает возможности более глубокого анализа закономерностей между характеристиками растительности и её показателями, измеряемыми по спутниковым данным. Примерами современных снимков выступают данные Sentinel-2 MSI (*англ.* Multispectral Instrument), для которых характерно сочетание высокого радиометрического и пространственного разрешения.

В условиях юга Среднерусской возвышенности типичным элементом естественных ландшафтов выступают овражно-балочные системы. Анализ процессов формирования в них древесной растительности играет ключевую роль в контексте регионального природопользования. Территория региона расположена в условиях умеренно-континентального климата в лесостепной природной зоне, преимущественно подзоне типичной лесостепи (Физико-географическое..., 1961). Лесной покров достаточно сильно фрагментирован (Украинский и др., 2017) и в нём преобладают многочисленные небольшие по площади лесные массивы (Терехин, 2025). В период начала XVIII – первой половины XX в. в регионе отмечалась тенденция к сокращению лесистости (Цветков, 1957; Чендев, 2008). При этом в последние десятилетия происходит процесс её роста. Исследование этого процесса становится важной задачей, решение которой необходимо для объективных представлений о состоянии ландшафтов. Для региона характерна разветвлённая сеть овражно-балочных систем (Кузьменко и др., 2013; Саблина, Нарожная, 2023). Её лесной покров варьирует от минимальных до практически максимально возможных величин (Терехин, 2021). Со второй половины XX в. в овражно-балочной сети региона получили значительное развитие процессы формирования древесной растительности (Chendev et al., 2016). Их результатом является продвижение границы леса

по склонам, появление новых лесных массивов и расширение площади существующих. В то же время в субмеридиональных границах лесостепи скорость увеличения лесного покрова разных элементов ландшафтов различается достаточно существенно (Терехин, 2021, 2022).

Цель исследования — оценка зависимостей спектральных индексов, вычисляемых на основе многозональных снимков Sentinel-2, от величины проективного покрытия древесной растительности (*англ.* tree cover) овражно-балочной сети как типичного элемента естественных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности. Задачи исследования включали анализ силы связи различных вегетационных индексов с величиной проективного покрытия, выявление и формализацию их зависимостей от неё.

Материалы и методика исследования

Территория исследования расположена на юге Среднерусской возвышенности (*рис. 1*) в лесостепной природной зоне и подзоне типичной лесостепи. Анализируемые овражно-балочные системы находились в пределах фрагмента (тайла) Sentinel-2 с номером T37UCS, используемого для расчёта спектральных индексов. Для анализа выбран снимок со спутника Sentinel-2A от 25.08.2019 с минимальным присутствием облачности. На основе снимка Sentinel-2 и снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м) конца второго десятилетия XXI в., полученных из интернет-сервисов открытого доступа, выполнено выявление овражно-балочных систем, которые отбирались на основе ряда критериев: 1) присутствие участков сплошной древесной растительности только из лиственных пород деревьев; 2) отсутствие признаков антропогенных нарушений растительного покрова; 3) местоположение в автоморфных условиях, т.е. расположение вне условий повышенного увлажнения; 4) отсутствие антропогенных объектов или объектов инфраструктуры.

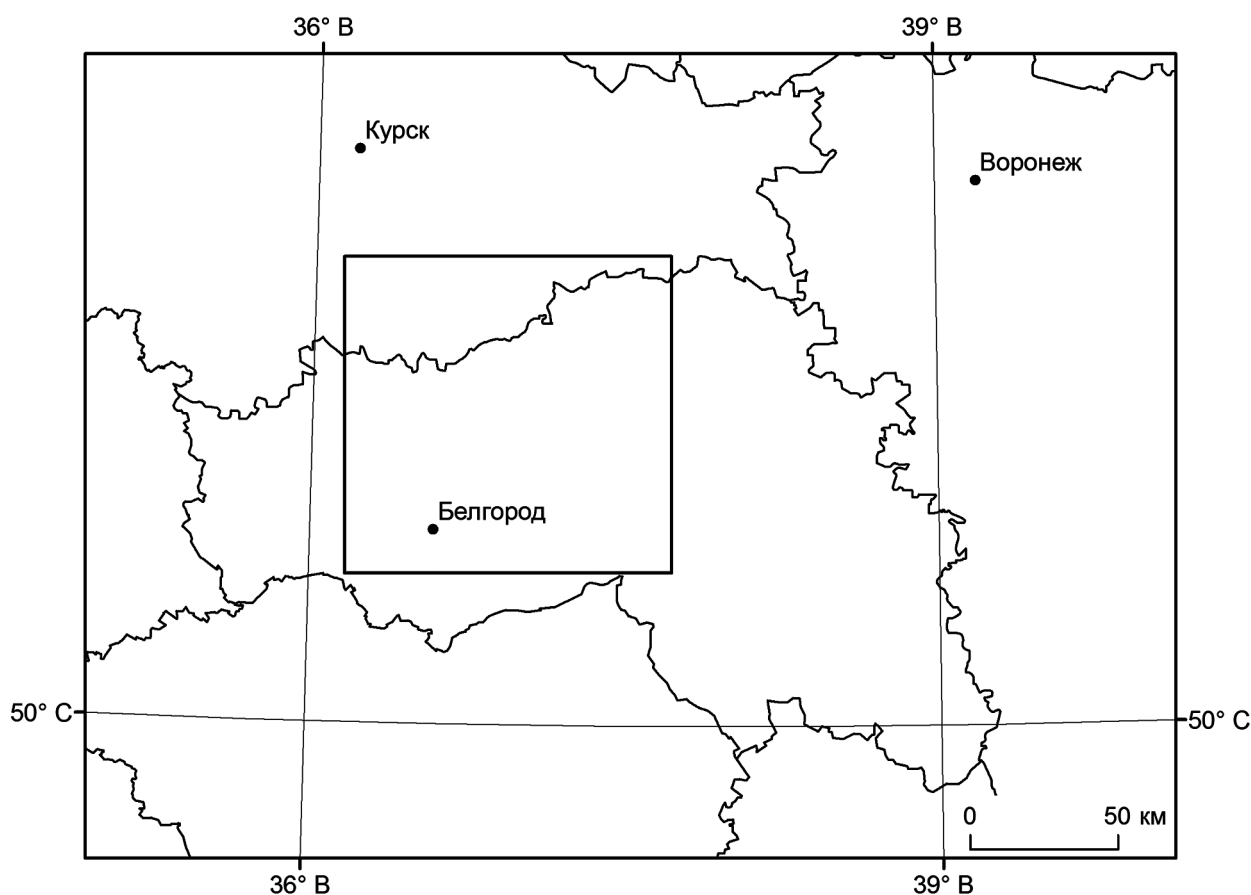


Рис. 1. Местоположение территории исследования

Выборку объектов формировали с учётом того, чтобы в ней были представлены участки овражно-балочных систем с разной величиной проективного покрытия древесной растительности, варьирующей от её минимальных значений до почти максимальных величин. Выполнение этого условия необходимо для получения объективных данных о зависимостях спектральных индексов от степени покрытия овражно-балочных систем древесной растительностью. В общей сложности было изучено 120 овражно-балочных систем общей площадью 3744,6 га.

Величина проективного покрытия древесной растительности оценена на основе снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м), полученных из интернет-сервисов открытого доступа на каждую овражно-балочную систему. Для этой цели на основе фрагментов снимков подготовлен векторный контур границ каждого объекта. После этого по этим же изображениям методом визуального дешифрирования получен векторный слой проекций крон деревьев для каждой овражно-балочной системы. Величина проективного покрытия древесной растительности (от 0 до 1) определена как отношение площадей этих векторных слоёв.

Таблица 1. Вегетационные индексы, для которых была изучена зависимость от величины проективного покрытия древесной растительности овражно-балочной сети

Индекс	Формула	Источник
RVI	Red/NIR	(Jordan, 1969); (Pearson, Miller, 1972)
DVI	NIR – Red	(Tucker, 1979)
WDVI	NIR – a Red, где $a = 1,1$	(Clevers, 1989)
NDVI	$(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red})$	(Rouse et al., 1973)
TNDVI	$\sqrt{\text{NDVI} + 0,5}$	(Rouse et al., 1973)
NGRDI	$(\text{Green} - \text{Red})/(\text{Green} + \text{Red})$	(Tucker, 1979)
SAVI	$((\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red} + L)) \cdot (1 + L)$	(Huete, 1988)
ARVI	$(\text{NIR} - \text{Red} - y(\text{Red} - \text{Blue})) / (\text{NIR} + \text{Red} - y(\text{Red} - \text{Blue}))$	(Kaufman, Tanre, 1992)
NDI	$(\text{NIR} - \text{SWIR})/(\text{NIR} + \text{SWIR})$	(McNairn, Protz, 1993)
NLI	$(\text{NIR}^2 - \text{Red})/(\text{NIR}^2 + \text{Red})$	(Goel, Qin, 1994)
RDVI	$(\text{NIR} - \text{Red})/\sqrt{\text{NIR} + \text{Red}}$	(Roujean, Breon, 1995)
GNDVI	$(\text{NIR} - \text{Green})/(\text{NIR} + \text{Green})$	(Gitelson et al., 1996)
VARI	$(\text{Green} - \text{Red})/(\text{Green} + \text{Red} - \text{Blue})$	(Gitelson et al., 2002)
MTVI	$1,2(1,2(\text{NIR} - \text{Green}) - 2,5(\text{Red} - \text{Green}))$	(Haboudane et al., 2004)
CVI	$(\text{NIR}/\text{Green}) \cdot (\text{Red}/\text{Green})$	(Vincini et al., 2008)
EVI	$2,5(\text{NIR} - \text{Red})/((\text{NIR} + 6\text{Red} - 7,5\text{Blue}) + 1)$	(Huete et al., 2002)
EVI2	$2,4(\text{NIR} - \text{Red})/(\text{NIR} + \text{Red} + 1)$	(Jiang et al., 2008)
GVI	$-0,3599\text{Blue} - 0,3533\text{Green} - 0,4734\text{Red} + 0,6633\text{NIR} + 0,0087\text{SWIR1} - 0,2856\text{SWIR2}$	(Crist, Ciccone, 1984); (Shi, Xu, 2019)

Примечание: Blue, Green, Red, NIR (*англ.* near infrared), SWIR1, 2 (*англ.* short wave infrared) — спектрально-отражательные характеристики в синем, зелёном, красном, ближнем инфракрасном диапазонах и двух коротковолновых инфракрасных диапазонах, L — поправочный коэффициент, y — коэффициент учёта влияния рассеяния света в атмосфере.

Среди разнообразия спектральных индексов, предложенных для оценки разных характеристик растительного покрова, были отобраны индексы, показавшие связь с его надземной фитомассой и особенностями структуры. Обусловлено это тем, что процесс распространения древесной растительности в овражно-балочной сети связан с обозначенными показателями. Подборка индексов (табл. 1) одновременно сформирована таким образом, чтобы учесть показатели, основанные на спектрально-отражательных характеристиках в различ-

ных участках оптического диапазона, и представлять разные виды преобразований. Она включала индексы RVI (*англ.* Ratio Vegetation Index), DVI (*англ.* Difference Vegetation Index), WDV (англ. Weighted Difference Vegetation Index), NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), TNDVI (*англ.* Transformed Normalized Difference Vegetation Index), NGRDI (*англ.* Normalized Green Red Difference Index), SAVI (*англ.* Soil-Adjusted Vegetation Index), ARVI (*англ.* Atmospherically Resistant Vegetation Index), NDI (*англ.* Normalized Difference Index), NLI (*англ.* Nonlinear Vegetation Index), RDVI (*англ.* Renormalized Difference Vegetation Index), GNDVI (*англ.* Green Normalized Difference Vegetation Index), VARI (*англ.* Visible Atmospherically Resistant Index), MTVI (*англ.* Modified Triangular Vegetation Index), CVI (*англ.* Chlorophyll Vegetation Index), EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index), EVI2 (*англ.* Enhanced Vegetation Index 2), GVI (*англ.* Green Vegetation Index).

В сформированной подборке присутствовали индексы, представляющие простое математическое отношение яркостных характеристик отдельных спектральных зон (индекс RVI), нормализованные вегетационные индексы и комплексные преобразования. Индекс GVI, определяющий компоненту «зелёности» (*англ.* Greenness) преобразований Tasseled Cap, в варианте 6 переменных разработан для снимков Landsat TM (*англ.* Thematic Mapper) (Crist, Ciccone, 1984). В исследовании применялся вариант этого преобразования, адаптированный для снимков Sentinel-2 MSI (Shi, Xu, 2019).

Исходный снимок Sentinel-2 уровня L1 прошёл атмосферную и радиометрическую коррекцию с использованием модуля Sen2Cor программы SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform) и был пересчитан в коэффициенты спектральной яркости на нижней границе атмосферы BOA (*англ.* Bottom-of-Atmosphere). На его основе рассчитаны растровые модели спектральных вегетационных индексов. Учитывая, что пространственное разрешение снимков Sentinel-2 в разных каналах, необходимых для вычисления индексов, различно (10 и 20 м), разрешение всех используемых каналов было приведено к 20 м. Для расчёта растровых моделей вегетационных индексов соответственно были использованы каналы синего, зелёного, красного, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов. Значения индексов для отдельных овражно-балочных систем вычислены методом зональной статистики с использованием векторного слоя их границ, подготовленного на предыдущем этапе. Статистический анализ включал оценку ключевых параметров исследуемых характеристик (среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации), графиков рассеяния величины покрытия древесной растительности и конкретных индексов, оценку силы связи между ними на основе коэффициента корреляции Спирмена, формализацию зависимостей на основе регрессионного анализа. Для каждой регрессионной модели оценена объясняющая способность на основе коэффициента детерминации (R^2), статистическая значимость коэффициентов перед переменными, нормальность распределения остатков. Для её оценки использованы анализ гистограмм и тест Лиллиефорса, основанный на критерии Колмогорова—Смирнова. Для каждого вегетационного индекса были изучены статистические различия между различными грациями проективного покрытия древесной растительности овражно-балочных систем: 0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8; 0,8–1,0 — и определены показатели с наибольшим числом таких различий на уровне значимости 0,05.

Результаты и их обсуждение

Величина проективного покрытия древесной растительности изученных овражно-балочных систем варьировала от менее 0,1 до более 0,95 при среднем значении немногим более 0,50. Коэффициент вариации составил 41,4 %. Его достаточно высокое значение является региональной особенностью, так как в Белгородской области распространены балки, существенно отличающиеся по присутствию лесного покрова. Особенности покрытия овражно-балочных систем древесной растительностью наглядно проявляются на гистограмме его значений (*рис. 2*). Наибольшую долю составляют балки, величина проективного покрытия которых варьирует от 0,4 до 0,6.

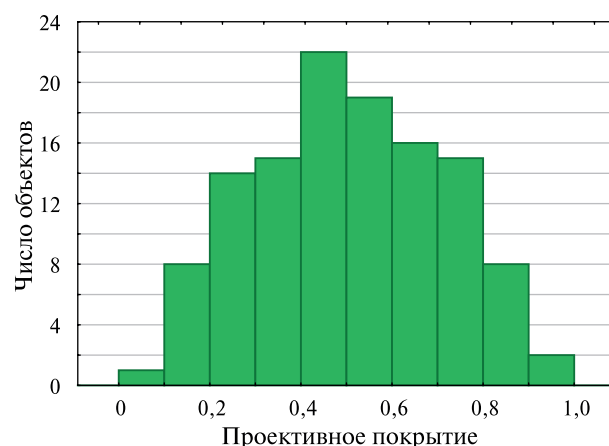


Рис. 2. Гистограмма проективного покрытия древесной растительности изученных овражно-балочных систем

Большинство изученных спектральных индексов достаточно сильно коррелирует с величиной проективного покрытия овражно-балочных систем древесной растительностью. При этом связь почти всех индексов положительна (табл. 2). Корреляция во всех случаях статистически значима на уровне существенно меньше 0,05.

Наиболее сильная корреляция выявлена для индексов NDI и GNDVI. Они относятся к нормализованным вегетационным индексам и по методике расчёта близки к индексу NDVI, но вместо спектрально-отражательных характеристик красного канала используют либо значения коротковолнового инфракрасного (SWIR), либо зелёного (Green) диапазона. Достаточно сильная отрицательная связь с величиной покрытия древесной растительности овражно-балочных систем типична для индекса RVI. Он представляет простое математическое отношение спектрально-отражательных характеристик красного и ближнего инфракрасного каналов. Наличие сильной связи между исследуемыми показателями может выступать следствием сильного влияния процесса роста лесного покрова в овражно-балочной сети на её спектрально-отражательные свойства, измеряемые по данным дистанционного зондирования.

Таблица 2. Показатели корреляции проективного покрытия древесной растительности овражно-балочных систем со значениями спектральных вегетационных индексов

Вегетационный индекс	Коэффициент корреляции Спирмена	Вегетационный индекс	Коэффициент корреляции Спирмена
RVI	-0,78	NLI	0,77
DVI	0,67	RDVI	0,72
WDVI	0,68	GNDVI	0,84
NDVI	0,80	VARI	0,75
TNDVI	0,79	MTVI	0,66
NGRDI	0,75	CVI	0,63
SAVI	0,80	EVI	0,77
ARVI	0,79	EVI2	0,80
NDI	0,86	GVI	0,79

Более подробные данные о зависимости спектральных индексов от величины покрытия овражно-балочных систем древесной растительностью отражают результаты регрессионного анализа. Изменение индекса RVI в зависимости от неё с достаточно высокой объяснитель-

ной способностью описывается убывающей логарифмической кривой (рис. 3). Коэффициент детерминации составил около 0,6, т.е. полученная модель объясняет достаточно высокую долю варьирования индекса вследствие изменения лесного покрова в овражно-балочных системах. Для других индексов, основанных на отражательных характеристиках красной и ближней инфракрасной области (DVI, WdVI, NDVI, TNDVI), проявляется выраженная прямая зависимость от величины покрытия древесной растительности. Она также аппроксимируется логарифмической функцией. Коэффициенты детерминации полученных моделей изменяются от 0,45 для индекса DVI до 0,61 для индекса NDVI, характеризую соответствующую объясняемую их долю варьирования полученными уравнениями. Анализ зависимостей индексов NDVI и TNDVI от величины покрытия овражно-балочных систем древесной растительностью не выявил существенных различий между ними. При этом зависимости индексов RVI, DVI, WdVI, NDVI, TNDVI и NGRDI от этой переменной статистически значимы на уровне 0,05.

Индексы SAVI и ARVI (рис. 4), несмотря на разный принимаемый ими диапазон значений и отличающиеся методики расчёта, показали примерно одинаковые зависимости от величины покрытия древесной растительности овражно-балочных систем с близкой объясняющей способностью. Для зависимости вегетационного индекса NDI от величины проективного покрытия древесной растительности характерна более высокая объясняющая способность. Индекс NDI, в отличие от большинства остальных показателей, использует коэффициенты спектральной яркости коротковолнового инфракрасного диапазона. Такой же коэффициент детерминации показала модель индекса GNDVI. Для моделей этих спектральных индексов характерны наивысшие коэффициенты детерминации среди моделей всех изученных показателей. Возрастающей логарифмической кривой аппроксимируется зависимость индексов NLI и RDVI от величины покрытия древесной растительности. Группа индексов от SAVI до GNDVI, так же как и предыдущая группа индексов, характеризуется статистически значимыми регрессионными моделями. Зависимости индексов SAVI, ARVI, NDI, NLI, RDVI, GNDVI статистически значимы на уровне 0,05.

Среди зависимостей VARI, MTVI, CVI, EVI, EVI2, GVI от величины проективного покрытия древесной растительности овражно-балочных систем наиболее высокие коэффициенты детерминации характерны для индексов EVI2 и GVI (рис. 5).

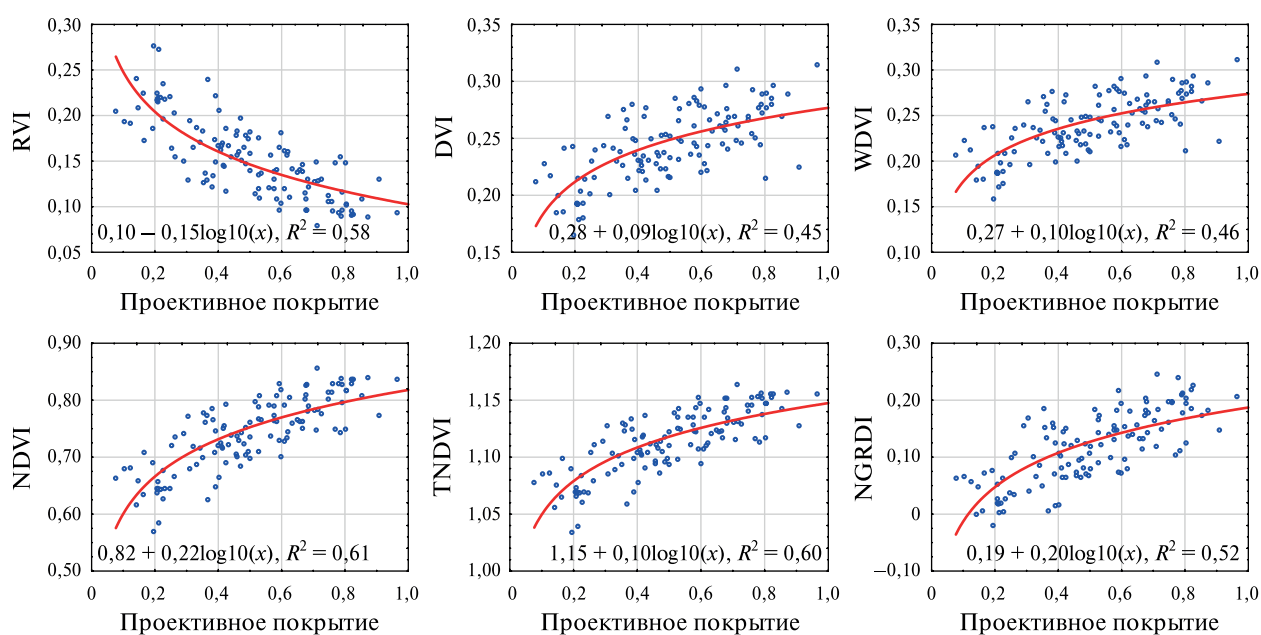


Рис. 3. Зависимости между вегетационными индексами RVI, DVI, WdVI, NDVI, TNDVI, NGRDI и проективным покрытием древесной растительности овражно-балочных систем

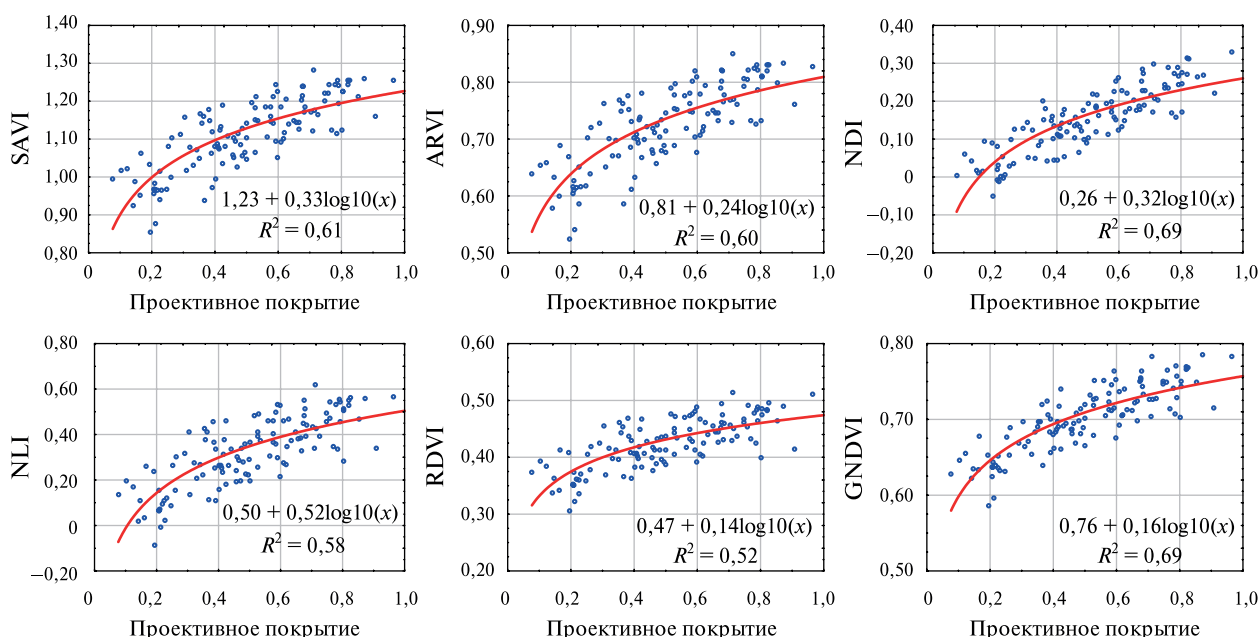


Рис. 4. Зависимости между вегетационными индексами SAVI, ARVI, NDI, NLI, RDVI, GNDVI и проективным покрытием древесной растительности овражно-балочных систем

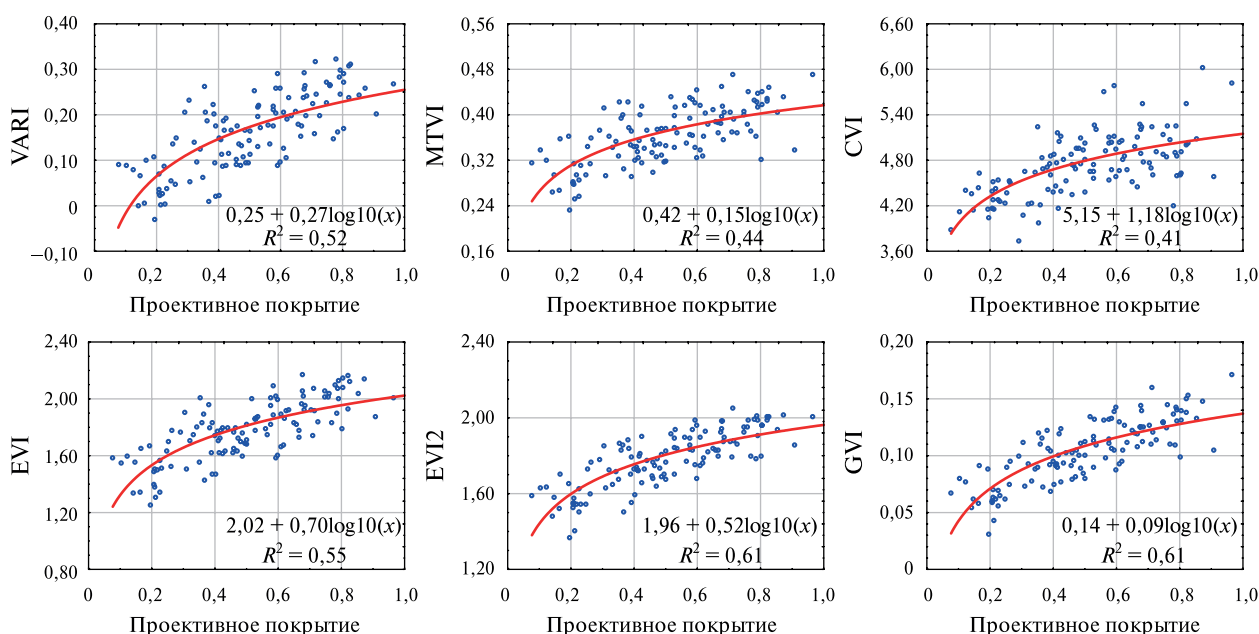


Рис. 5. Зависимости между вегетационными индексами VARI, MTVI, CVI, EVI, EVI2, GVI и проективным покрытием древесной растительности овражно-балочных систем

Из графика достаточно хорошо видно увеличение значений индексов, которое аппроксимируется логарифмической функцией с высокой объяснительной способностью. Для остальных индексов она несколько ниже. Индекс CVI показал положительную, но наименее выраженную зависимость от величины проективного покрытия среди индексов. Из графика также следует, что связь между индексом CVI и ней не стационарна, так как разброс значений вокруг линии регрессии неодинаков для разных значений независимой переменной.

Зависимости индексов EVI, EVI2 от степени покрытия древесной растительностью овражно-балочных систем во многом идентичны, но объясняющая способность аппроксими-

рующей кривой для EVI2 выше. Вегетационный индекс EVI2 в отличие от EVI не использует для расчёта спектрально-отражательные характеристики синего диапазона. Примерно аналогичным коэффициентом детерминации характеризуется регрессионная модель для индекса GVI, представляющего компоненту Greenness преобразований Tasseled Cap. Для него, также как и для двух предыдущих показателей, характерно увеличение по мере изменения независимой переменной по зависимости, близкой к логарифмической кривой.

Общей особенностью спектральных индексов, исходя из графиков их зависимостей, выступает наибольшая скорость роста значений на интервале величины покрытия древесной растительности от 0 до 0,6. После это скорость роста функции снижается. Соответственно, более высокая чувствительность индексов к изменению величины проективного покрытия наблюдается на этом интервале.

Анализ остатков регрессионных моделей показал, что большинство из них адекватно описывают связь между величиной покрытия древесной растительности и спектральными вегетационными индексами. Распределение остатков моделей не отличается от нормального распределения (табл. 3).

Таблица 3. Результаты оценки нормальности распределения остатков на основе критерия Лиллиефорса для регрессионных моделей, описывающих зависимости вегетационных индексов от величины проективного покрытия древесной растительности овражно-балочных систем

Спектральный индекс	Значение критерия	Уровень значимости	Спектральный индекс	Значение критерия	Уровень значимости
RVI	0,062	0,32	NLI	0,067	0,20
DVI	0,060	0,36	RDVI	0,053	0,57
WDVI	0,053	0,57	GNDVI	0,067	0,20
NDVI	0,067	0,21	VARI	0,060	0,36
TNDVI	0,066	0,22	MTVI	0,061	0,33
NGRDI	0,064	0,27	CVI	0,061	0,33
SAVI	0,067	0,21	EVI	0,049	0,68
ARVI	0,067	0,20	EVI2	0,067	0,21
NDI	0,051	0,61	GVI	0,060	0,37

На это указывает отсутствие статистически значимых значений критерия Лиллиефорса (модифицированного критерия Колмогорова – Смирнова). Во всех случаях уровень значимости значительно выше порогового значения 0,05. Для большинства индексов установлено наличие статистически значимых различий между градациями величины покрытия древесной растительности (0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8), за исключением самой высокой градации, включающей значения 0,8–1,0. При этом индексы NDI и GNDVI показали статистически значимые различия между всеми градациями. Более высокое число статистически значимых различий значений индексов между градациями проективного покрытия служит показателем и более высокой чувствительности конкретного спектрального вегетационного индекса к этой величине. Наличие таких различий выступает одним из оснований для рассмотрения того или иного индекса как индикатора развития процессов облесения естественных ландшафтов, в случае настоящего исследования — применительно к условиям Среднерусской возвышенности.

Высокая чувствительность большинства спектральных индексов к изменению лесного покрова овражно-балочной сети проявляется при сравнении их значений для овражно-балочных систем с разной величиной покрытия древесной растительности. Она находит отражение не только на изображениях сверхвысокого пространственного разрешения, но и на снимках Sentinel-2, синтезированных в каналах видимого спектра с разрешением 10 м (рис. 6).

В данном случае рост величины покрытия древесной растительности сопровождается увеличением значений индекса GVI, отражая прямую связь между этими переменными. Исключение составляет индекс RVI (простое отношение спектрально-отражательных характеристик красного и ближнего инфракрасного диапазонов), который находится в сильной, но обратной зависимости от лесного покрова овражно-балочных систем.

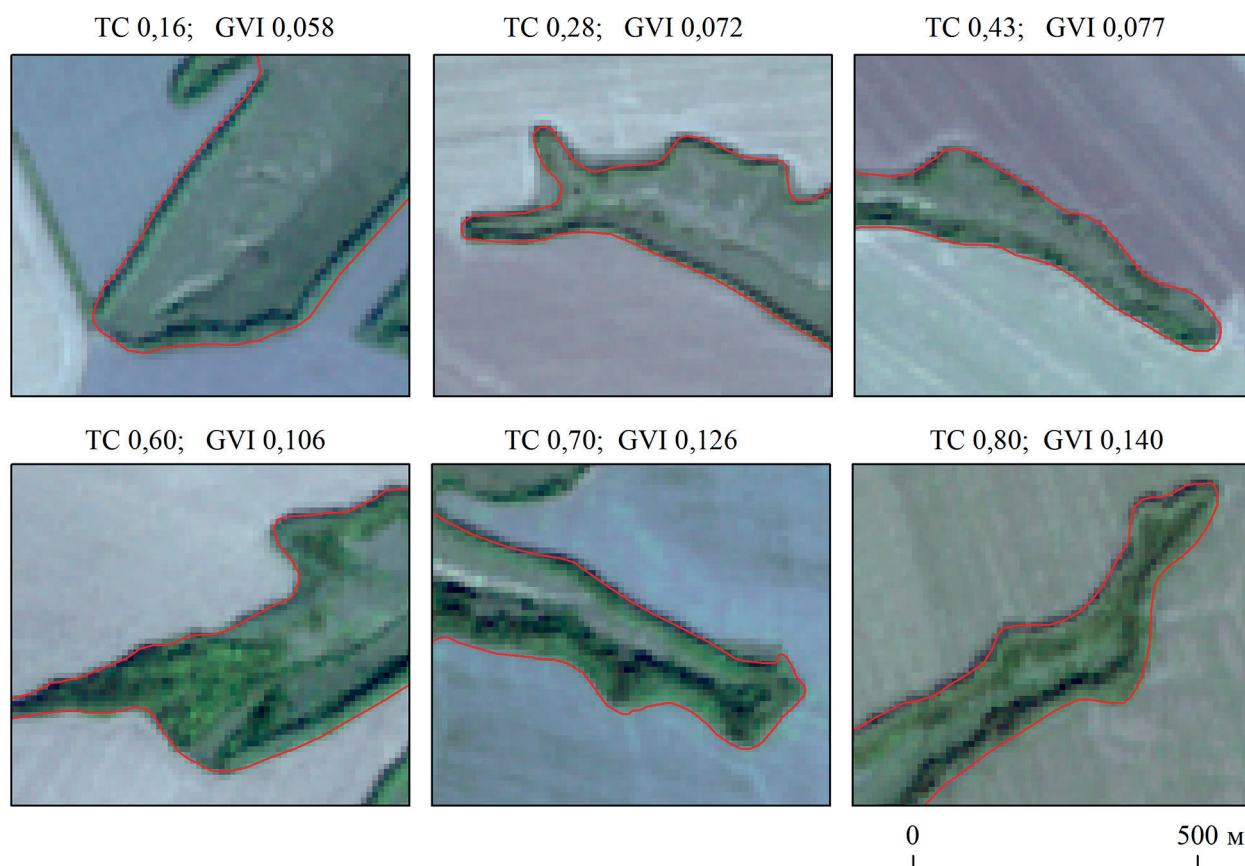


Рис. 6. Примеры овражно-балочных систем с разной величиной проективного покрытия древесной растительности (tree cover) на снимках Sentinel-2, синтезированных в естественных цветах, и соответствующие им значения вегетационного индекса GVI

Оценивая результаты анализа всех индексов, можно отметить ряд ключевых особенностей, характеризующих большинство изученных показателей по их зависимости от степени проективного покрытия древесной растительностью овражно-балочных систем. Первая особенность заключается в наличии положительной зависимости от неё, которая аппроксимируется логарифмической функцией. При этом скорость её изменения, в зависимости от величины лесного покрова, для разных индексов различается достаточно существенно. Вторая особенность связана с тем, что связь большинства индексов с проективным покрытием, за исключением индекса CVI, можно считать устойчивой, т.е. коэффициенты моделей остаются стабильными при изменении значений независимой переменной. Разброс значений вокруг регрессионной кривой и изменчивость остатков для большинства вегетационных индексов существенно не меняется при изменении проективного покрытия. Для всех моделей распределение остатков может считаться нормальным, что установлено на основе анализа статистических тестов и гистограмм.

Индексы, для которых характерна наиболее сильная связь с проективным покрытием древесной растительности овражно-балочных систем и модели которых показали самую высокую объяснительную способность, представляют перспективу для пространственно-вре-

менных оценок лесного покрова на уровне отдельных элементов ландшафтов. Среди изученных показателей к ним относятся, в первую очередь, индексы NDI и GNDVI.

Выводы

Для овражно-балочных систем юга Среднерусской возвышенности установлены закономерности связи величины их проективного покрытия древесной растительности со спектральными вегетационными индексами, отличающимися используемыми диапазонами и методами вычисления: RVI, DVI, WDV, NDVI, TNDVI, NGRDI, SAVI, ARVI, NDI, NLI, RDVI, GNDVI, VARI, MTVI, CVI, EVI, EVI2, GVI. Все вегетационные индексы характеризуются статистически значимой связью с величиной проективного покрытия. Для всех индексов, за исключением RVI, связь с ней положительна. Наиболее сильная связь характерна для нормализованных индексов, основанных на спектрально-отражательных характеристиках в ближнем инфракрасном и зелёном либо ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах. Зависимость вегетационных индексов от величины покрытия древесной растительности описывается статистически значимой логарифмической функцией, наиболее высокая объясняющая способность которой установлена для индексов NDI и GNDVI. Для этих же индексов выявлены статистически значимые различия между всеми градациями проективного покрытия с интервалом 0,2. Остальные индексы в большинстве показали статистически значимые различия между основным числом градаций, за исключением самой высокой градации, которая включает овражно-балочные системы с проективным покрытием выше 80 %.

Литература

1. Кузьменко Я. В., Лисецкий Ф. Н., Кириленко Ж. А., Григорьева О. И. Обеспечение оптимальной водоохранной лесистости при бассейновой организации природопользования // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2013. Т. 15. № 3–2. С. 652–657.
2. Саблина О. М., Нарожняя А. Г. Распространение оврагов на территории Белгородской области // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2023. № 3. С. 25–34. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/3/25-34.
3. Тарасова Л. В., Курбанов Э. А., Воробьёв О. Н. и др. Мониторинг лесного покрова водоохранных зон рек Марий Эл по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 177–195. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195.
4. 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.
5. 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.
6. Терехин Э. А. Современные тенденции изменения лесного покрова Среднерусской лесостепи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 5. С. 207–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-207-221.
7. Украинский П. А., Терехин Э. А., Павлюк Я. В. Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2017. № 1. С. 82–91.
8. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1961. 263 с.
9. Цветков М. А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия по 1914 год. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 213 с.
10. Чендев Ю. Г. Эволюция лесостепных почв Среднерусской возвышенности в голоцене. М.: ГЕОС, 2008. 212 с.
11. Шабанов Н. В., Барталев С. А., Ерошенко Ф. В., Плотников Д. Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 166–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
12. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. V. 5. No. 1. P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.

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 Yu. 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. V. 7. No. 11. Article 278. DOI: 10.3390/f7110278.
15. Clevers J. G. P. W. Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf Area Index by Correcting for Soil Moisture // *Remote Sensing of Environment*. 1989. V. 29. No. 1. P. 25–37. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90076-X.
16. Crist E. P., Cicone R. C. A physically-based transformation of Thematic Mapper data — The TM Tasseled Cap // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1984. V. GE-22, No. 3. P. 256–263, DOI: 10.1109/TGRS.1984.350619.
17. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS // *Remote Sensing of Environment*. 1996. V. 58. No. 3. P. 289–298. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
18. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Stark R., Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 80. No. 1. P. 76–87. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
19. Goel N. S., Qin W. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and Fpar: A computer simulation // *Remote Sensing Reviews*. 1994. V. 10. No. 4. P. 309–347. DOI: 10.1080/02757259409532252.
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. Haboudane D., Miller J. R., Pattey E. et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture // *Remote Sensing of Environment*. 2004. V. 90. No. 3. P. 337–352. DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.013.
22. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. 1988. V. 25. No. 3. P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
23. Huete A., Didan K., Miura T. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 83. No. 1–2. P. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
24. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. No. 10. P. 3833–3845. DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006.
25. Jordan C. F. Derivation of Leaf-area index from quality of light on the forest floor // *Ecology*. 1969. V. 50. No. 4. P. 663–666. DOI: 10.2307/1936256.
26. Kaufman Y. J., Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. No. 2. P. 261–270. DOI: 10.1109/36.134076.
27. Liu D., Yang L., Jia K. et al. Global fractional vegetation cover estimation algorithm for VIIRS reflectance data based on machine learning methods // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. No. 10. Article 1648. DOI: 10.3390/rs10101648.
28. McNairn H., Protz R. Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford County, Ontario, using Thematic Mapper // *Canadian J. Remote Sensing*. 1993. V. 19. No. 2. P. 152–159. DOI: 10.1080/07038992.1993.10874543.
29. Pearson R. L., Miller L. D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie // *Proc. 8th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment*. 1972. V. 2. P. 1357–1381.
30. Radhakrishnan S., Lakshminarayanan A. S., Chatterjee J. M., Hemanth D. J. Forest data visualization and land mapping using support vector machines and decision trees // *Earth Science Informatics*. 2020. V. 13. No. 4. P. 1119–1137. DOI: 10.1007/s12145-020-00492-3.
31. Roujean J.-L., Breon F.-M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements // *Remote Sensing of Environment*. 1995. V. 51. No. 3. P. 375–384. DOI: 10.1016/0034-4257(94)00114-3.
32. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/GSFCT Type II Report. Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center, April 1973. 93 p.
33. 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.

34. Shi T., Xu H. Derivation of Tasseled Cap transformation coefficients for Sentinel-2 MSI at-sensor reflectance data // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2019. V. 12. No. 10. P. 4038–4048. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2938388.
35. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. No. 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
36. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale // Precision Agriculture. 2008. V. 9. No. 5. P. 303–319. DOI: 10.1007/s11119-008-9075-z.

Relationships between tree cover of small dry valleys and vegetation indices in the south of Central Russian Upland

E. A. Terekhin

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

Assessing the relationships between natural afforestation in landscapes and indicators derived from Earth remote sensing data is a necessary condition for developing approaches to spatiotemporal assessment of forested lands. The article analyzes the relationships between tree cover of small dry valleys and 18 spectral vegetation indices measured using Sentinel-2 data. The study objects were areas of the small dry valleys network in the south of the Central Russian Upland. Spectral indices showed different correlation with the tree cover of the small dry valleys. Normalized indices that use green and shortwave infrared reflectance in addition to near-infrared reflectance values showed the strongest relationship with tree cover. The differences between tree cover gradations, with the exception of the gradation with values greater than 0.8, are statistically significant for most indices. The relationship between the overwhelming majority of vegetation indices and tree cover is positive and can be considered stable. The dependence of the studied indices on tree cover values is approximated by a logarithmic function, with the highest explanatory power for the NDI (Normalized Difference Index) and the GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index).

Keywords: forest area, vegetation indices, forest-steppe, remote sensing data, Sentinel-2

Accepted: 26.05.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-227-241

References

1. 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).
2. Sablina O.M., Narozhnyaya A.G., Spread of ravines in the Belgorod Region, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Geografiya. Geoekologiya*, 2023, No. 3. pp. 25–34 (in Russian), DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2023/3/25-34.
3. Tarasova L.V., Kurbanov E.A., Vorobiev O.N. et al., Monitoring forest cover in riparian zones along the rivers of Mari El Republic using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 2, pp. 177–195 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-177-195.
4. 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.
5. 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.
6. Terekhin E.A., Recent trends in forest cover changes in the Central Russian forest-steppe, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 5, pp. 207–221 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-207-221.

7. Ukrainskij P. A., Terekhin E. A., Pavlyuk Ya. V., Fragmentation of forests in the upper part of the Vorskla River basin since the end of the 18th century, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2017, No. 1, pp. 82–91 (in Russian).
8. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie central'nyh chernozemnyh oblastei* (Physical and geographical zoning of the Central Chernozem regions), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1961, 263 p. (in Russian).
9. 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. (in Russian).
10. Chendev Yu. G. *Evolutsiya lesostepnykh pochv Srednerusskoi vozvysheynosti v golotsene* (Evolution of forest-steppe soils of the Central Russian Upland in the Holocene), Moscow: GEOS, 2008, 212 p. (in Russian).
11. Shabanov N. V., Bartalev S. A., Eroshenko F. V., Plotnikov D. E., Development of capabilities for remote sensing estimate of Leaf Area Index from MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 166–178 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-166-178.
12. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Khvostikov S. A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, V. 5, No. 1, pp. 55–64, DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
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, pp. 4691–4709, DOI: 10.1016/j.asr.2023.01.027.
14. Chendev Yu. 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, V. 7, No. 11, Article 278, DOI: 10.3390/f7110278.
15. Clevers J. G. P. W., Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf Area Index by Correcting for Soil Moisture, *Remote Sensing of Environment*, 1989, V. 29, No. 1, pp. 25–37, DOI: 10.1016/0034-4257(89)90076-X.
16. Crist E. P., Cicone R. C., A physically based transformation of Thematic Mapper data — The TM Tasseled Cap, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1984, V. GE-22, No. 3, pp. 256–263, DOI: 10.1109/TGRS.1984.350619.
17. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N., Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, No. 3, pp. 289–298, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
18. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Stark R., Rundquist D., Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 80, No. 1, pp. 76–87, DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00289-9.
19. Goel N. S., Qin W., Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and Fpar: A computer simulation, *Remote Sensing Reviews*, 1994, V. 10, No. 4, pp. 309–347, DOI: 10.1080/02757259409532252.
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. Haboudane D., Miller J. R., Pattey E. et al., Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 2004, V. 90, No. 3, pp. 337–352, DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.013.
22. Huete A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 1988, V. 25, No. 3, pp. 295–309, DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
23. Huete A., Didan K., Miura T. et al., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 83, No. 1–2, pp. 195–213, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
24. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T., Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band, *Remote Sensing of Environment*, 2008, V. 112, No. 10, pp. 3833–3845, DOI: 10.1016/j.rse.2008.06.006.
25. Jordan C. F., Derivation of Leaf-area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 1969, V. 50, No. 4, pp. 663–666, DOI: 10.2307/1936256.
26. Kaufman Y. J., Tanre D., Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, V. 30, No. 2, pp. 261–270, DOI: 10.1109/36.134076.
27. Liu D., Yang L., Jia K. et al., Global fractional vegetation cover estimation algorithm for VIIRS reflectance data based on machine learning methods, *Remote Sensing*, 2018, V. 10, No. 10, Article 1648, DOI: 10.3390/rs10101648.
28. McNairn H., Protz R., Mapping corn residue cover on agricultural fields in Oxford County, Ontario, using Thematic Mapper, *Canadian J. Remote Sensing*, 1993, V. 19, No. 2, pp. 152–159, DOI: 10.1080/07038992.1993.10874543.

29. Pearson R. L., Miller L. D., Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, *Proc. 8th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment*, 1972, V. 2, pp. 1357–1381.
30. Radhakrishnan S., Lakshminarayanan A. S., Chatterjee J. M., Hemanth D. J., Forest data visualization and land mapping using support vector machines and decision trees, *Earth Science Informatics*, 2020, V. 13, No. 4, pp. 1119–1137, DOI: 10.1007/s12145-020-00492-3.
31. Roujean J.-L., Breon F.-M., Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements, *Remote Sensing of Environment*, 1995, V. 51, No. 3, pp. 375–384, DOI: 10.1016/0034-4257(94)00114-3.
32. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*, NASA/GSFCT Type II Report. Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center, April 1973, 93 p.
33. 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.
34. Shi T., Xu H., Derivation of Tasseled Cap transformation coefficients for Sentinel-2 MSI at-sensor reflectance data, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, V. 12, No. 10, pp. 4038–4048, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2938388.
35. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, V. 8, No. 2, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
36. Vincini M., Frazzi E., D'Alessio P., A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale, *Precision Agriculture*, 2008, V. 9, No. 5, pp. 303–319, DOI: 10.1007/s11119-008-9075-z.