

Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков

Э. А. Терехин

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

Представлены результаты исследования спектрально-отражательных признаков оставленных аграрных угодий, типичных для лесостепной зоны Центрального Черноземья. Установлены отражательные характеристики, наиболее тесно коррелирующие со степенью покрытия залежей древесными сообществами, формирующимися на них. Большинство изученных коэффициентов спектральной яркости находится в обратной зависимости от величины покрытия залежей лесной растительностью. Значения вегетационного индекса NDVI находятся в прямой зависимости от этого показателя. Описаны зависимости спектрально-отражательных свойств от доли древесных насаждений, присутствующих на оставленных аграрных угодьях. Они изучены для залежей с различными типами насаждений, формирующихся на них: лиственных, хвойных, смешанных. Подготовлена серия карт-схем, характеризующая пространственное распределение величины покрытия залежей древесными сообществами и их спектрально-отражательных признаков. Установлено, что на территории лесостепи Центрального Черноземья пространственное распределение коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона и вегетационного индекса NDVI отражает ключевые территориальные особенности в степени покрытия оставленных аграрных угодий древесной растительностью. С использованием коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона и значений NDVI изучены пространственные особенности в покрытии залежей древесными сообществами. По этому критерию в пределах лесостепи Центрального Черноземья установлены выраженные внутризональные различия.

Ключевые слова: залежи, растительный покров, лесостепь, Центральное Черноземье, пространственный анализ, спутниковые данные, Landsat

Одобрена к печати: 09.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156

Введение

Оценка тенденций в развитии растительного покрова относится к одной из ключевых задач в ландшафтных исследованиях. Её решение актуально для регионов интенсивного аграрного использования, так как объективные данные о трендах развития растительности выступают необходимым условием для грамотного планирования стратегий использования природной среды. В районах, где значительные территории заняты пахотными угодьями, одним из элементов ландшафта, на основе которого могут быть изучены современные процессы развития растительного покрова, становятся залежные земли. На залежах или оставленных аграрных угодьях после прекращения аграрной деятельности начинаются процессы восстановления почвенно-растительного покрова (Голеусов, Лисецкий, 2009; Новикова, 2009), особенности протекания которых могут выступать индикатором современных ландшафтных условий и их динамики. Кроме того, задача оценки изменения растительного покрова на залежах имеет и прикладное значение для принятия решений по дальнейшему использованию земель, выведенных из сельскохозяйственного оборота (Парахневич, Кирик, 2017; Шинкаренко, 2019; Шпедт, Чупрова, 2009).

Центральное Черноземье (ЦЧР) — регион активного аграрного использования, где пашня занимает свыше половины всех угодий. Его территория характеризуется преимущественно

условиями лесостепи (Физико-географическое..., 1961). Для крайнего юга типичны степные условия. В 1990-е – начале 2000-х гг. часть обрабатываемых земель была выведена из сельскохозяйственного оборота. С учётом распространения залежей во всех областях ЦЧР, включая Орловскую обл., оценка изменений их растительного покрова за прошедшие десятилетия предоставляет уникальную возможность для анализа современных тенденций развития растительности региона и её территориальных особенностей.

Вследствие того, что изменения растительности залежей могут отражаться на их спектральном отклике, исследование данной проблемы становится всё более актуальным с учётом постоянного роста возможностей спутникового мониторинга (Лежнин, 2015; Dara et al., 2018). Аэрокосмическая информация при изучении залежных земель может быть использована для их распознавания в структуре угодий (Воробьева, Тимбай, 2009; Prishchepov et al., 2012; Yin et al., 2018) либо для оценки состояния их почв и растительности (Балдина, Трошко, 2016; Терехин, Постернак, 2019; Шевырногов и др., 2018). Последнее направление наименее изучено и одновременно достаточно перспективно.

По результатам исследований, проведённых ранее на юге Среднерусской возвышенности (Терехин, 2017; Терехин, Чендев, 2018), установлено, что одной из основных тенденций в динамике растительного покрова травянистых пространств региона стало формирование на них древесных сообществ. Учитывая достаточно значительные субмеридиональные и субширотные размеры Центрального Черноземья, соответствующая тенденция на залежах может иметь пространственные аспекты, объективная оценка которых практически невозможна без использования спутниковой информации.

Цель работы заключалась в изучении спектрально-отражательных характеристик оставленных аграрных угодий лесостепи и выявлении на их основе пространственных особенностей в состоянии растительного покрова залежей региона. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- анализ информативности конкретных спектральных признаков для оценки проективного покрытия крон древесных сообществ, формирующихся на залежах;
- оценка связи между проективным покрытием крон древесной растительности, присутствующей на оставленных аграрных угодьях, и спектральными характеристиками.
- пространственный анализ спектрально-отражательных признаков залежей в пределах лесостепи Центрального Черноземья.

Материалы и методика исследования

Исследование было выполнено на территории Центрального Черноземья, включая Орловскую обл. (рис. 1, см. с. 144). Анализируемая территория простиралась с севера на юг более чем на 471 км и с запада на восток на 615 км, полностью охватывая зону лесостепи с севера на юг от северо-западной границы Орловской до юга Воронежской области. Таким образом, была учтена возможность оценки региональных пространственных особенностей, обусловленных различиями в сукцессионных процессах на залежах и соответствующих им спектральных признаках.

Решение задач, поставленных в исследовании, предусматривало необходимость сбора обширного фактического материала о состоянии растительного покрова залежей, степени их покрытия древесными сообществами, соответствующих им значений отражательных признаков. Для этого на основе космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м/пиксель), полученных из архивов открытого доступа, преимущественно из сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth), а также с использованием ранее собранных материалов полевых обследований, было выявлено и изучено свыше 800 оставленных аграрных угодий, расположенных на территории шести областей: Белгородской, Воронежской, Липецкой, Тамбовской, Курской и Орловской. Оставленные аграрные угодья вследствие сочетания ряда признаков (сохранение исходных контуров угодий, отсутствие распашки, формирование новых растительных сообществ) достаточно уверенно могут быть дешифрированы на основе

детальных спутниковых данных (Курбанов и др., 2010; Терехин, Постернак, 2019). Наличие возможностей анализа разновременных снимков за несколько лет повышает достоверность анализа.

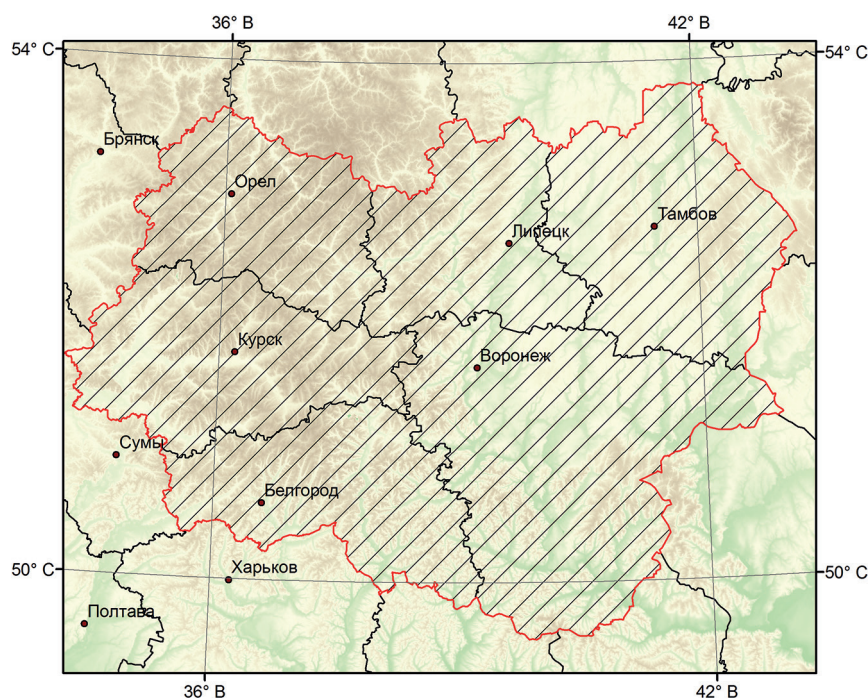


Рис. 1. Территория, на которой было проведено исследование растительного покрова оставленных аграрных угодий и их спектрально-отражательных признаков

Учитывая, что в регионе присутствуют залежи с различными типами лесных насаждений (лиственные, смешанные, хвойные), а также залежи без древесной растительности, объекты для исследования отбирали таким образом, чтобы в выборке присутствовали все типы оставленных аграрных угодий. В общей сложности было проанализировано 803 объекта (табл. 1), расположенных во всех областях Центрального Черноземья.

Таблица 1. Характеристики проанализированных залежных земель с различными типами лесных насаждений, формирующихся на них

Типы залежей	Количество	Доля, %	Площадь средняя, га	Площадь суммарная, га
С лиственными породами	446	55,5	53,2	23 718,8
Со смешанными лесными насаждениями	172	21,4	63,5	10 929,4
С хвойными породами	121	15,1	37,7	4 567,1
Травянистые без древесных пород	64	8,0	47,0	3 009,3
Всего	803	100,0	52,6	42 224,7

Объекты отбирались на основе ряда критериев: каждое угодье должно было быть залежью в 2018 г. и использоваться под пашню в начале 2000-х гг.; в анализируемый период времени на залежах должны были отсутствовать признаки природных или антропогенных нарушений растительного покрова, включая распашку, и признаки искусственного облесения. Отбор угодий был осуществлён с использованием возможностей анализа разновременных снимков в Google Earth.

Кроме того, уголья стремились отбирать таким образом, чтобы они были репрезентативно представлены в каждой области Центрального Черноземья, что было необходимо для дальнейшего территориального анализа особенностей их растительного покрова и отражательных характеристик. Состояние объектов в 2018 г. фиксировалось на основе снимков сверхвысокого пространственного разрешения. Состояние в начале 2000-х гг. определялось на основе аналогичных спутниковых данных или же, в случае их отсутствия, — на основе серии снимков Landsat TM, ETM+ начала 2000-х гг., полученных в вегетационный период. Состояние залежи фиксировалось по отсутствию признаков распашки в течение всего вегетационного сезона.

Для всех объектов с использованием геоинформационной среды ArcGIS была подготовлена векторная основа, позволившая в дальнейшем выполнить анализ их спектрально-отражательных свойств. Для каждого изученного объекта на основе спутниковых данных был определён набор параметров растительного покрова: величина проективного покрытия кроны древесных сообществ в 2018 г., а также во все годы, на которые были доступны детальные разновременные снимки из Google Earth; тип древесных насаждений, формирующийся на залежи (лиственный, хвойный, смешанный). Исследование было осуществлено в два основных этапа.

Первый этап включал оценку информативности различных спектральных признаков для анализа степени покрытия залежей кронами древесных сообществ, количественный анализ связи между этим показателем и их спектрально-отражательными свойствами. Для изучения были использованы коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) всех шести основных диапазонов спектра Landsat OLI (*англ.* Operational Land Imager) и значения индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), измеренные на основе данных Landsat-8 за 2018 г.

Учитывая, что коэффициенты спектральной яркости лиственных и хвойных пород могут различаться по абсолютным значениям, для изучения залежей с разными типами формирующихся лесных насаждений были сформированы подвыборки, позволившие оценить отражательные свойства оставленных аграрных угодий с лиственными, хвойными и смешанными лесными сообществами.

Для анализа спектрально-отражательных признаков были использованы спутниковые данные Landsat OLI с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Для оценки влияния степени покрытия залежей древесными сообществами на их отражательные свойства была использована спутниковая сцена с параметрами Path 177, Row 024 в системе WRS-2 и, соответственно, залежи, охватываемые ею. Данная сцена покрывает репрезентативное число залежей со всеми типами лесных насаждений. Снимки Landsat были отобраны в связи с оптимальным сочетанием пространственного разрешения, количеством спектральных каналов и покрытием территории исследования. Landsat OLI относится к сенсорам высокого радиометрического разрешения. Вследствие этого спектральные показатели, рассчитанные на основе полученных с него данных, должны характеризоваться достаточно высокой чувствительностью к изменениям растительного покрова. Соответственно, они должны позволять объективно описывать их влияние на отражательные признаки.

Оценка информативности конкретных спектральных показателей для анализа величины покрытия залежей древесными сообществами проведена на основе коэффициентов корреляции Пирсона (параметрический критерий) и Спирмена (непараметрический критерий). Совместный анализ этих показателей был выполнен для повышения объективности полученных результатов. В связи с тем, что на залежах лесостепи формируются различные типы лесных насаждений, исследование спектральных характеристик было выполнено для каждого из них: лиственного, хвойного, смешанного.

Второй этап исследования состоял в пространственном анализе спектрально-отражательных признаков залежных земель на территории региона и установлении на их основе внутризональных особенностей растительного покрова оставленных аграрных угодий. Для проведения исследований было сформировано полное покрытие территории лесостепи Центрального Черноземья безоблачными снимками Landsat 2018 г. (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>) (*табл. 2*). В целях минимизации фенологических различий все

космические снимки были подобраны на максимально близкие сроки. В 2018 г. наименее облачным для лесостепи Центрального Черноземья был август.

Таблица 2. Снимки Landsat-8 OLI, используемые для пространственного анализа спектрально-отражательных свойств залежных земель лесостепи

Path/Row	Дата получения	Path/Row	Дата получения
177/025	24.08.2018	174/024	19.08.2018
175/025	26.08.2018	179/023	06.08.2018
179/024	06.08.2018	177/023	24.08.2018
178/024	31.08.2018	176/023	01.08.2018
177/024	24.08.2018	175/023	26.08.2018

Статистически значимое влияние доли древесных сообществ, формирующихся на залежах, на их спектрально-отражательные свойства позволило провести пространственное моделирование особенностей данного показателя на основе отражательных признаков. Для этой цели была подготовлена серия геоинформационных карт-схем, полученных с использованием методов пространственной статистики и характеризующих растительный покров залежей в 2018 г.:

- карта-схема степени покрытия оставленных аграрных угодий древесными сообществами, формирующимися на них;
- карта-схема коэффициентов спектральной яркости SWIR1-диапазона (*англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный; 1,56–1,66 мкм);
- карта-схема вегетационного индекса NDVI.

Все перечисленные карты-схемы вычислены на основе данных с залежей с формирующимися лиственными сообществами. Это было сделано в связи с тем, что хвойные породы имеют более низкие коэффициенты спектральной яркости и значения NDVI, чем лиственные, и их совместный анализ мог быть привести к получению недостоверных результатов. Кроме того, залежи с лиственными насаждениями выступают единственным типом оставленных аграрных угодий, распространённым во всех частях региона. Данный тип залежей доминирует в лесостепи Центрального Черноземья.

Все спектральные характеристики были вычислены на основе атмосферно и радиометрически откорректированных космических снимков Landsat OLI. Коррекция снимков выполнялась по стандартной методике (Landsat-8..., 2019). В результате исходные спутниковые данные были пересчитаны в радиометрически откорректированные коэффициенты спектральной яркости. Это позволило провести пространственно-временной анализ спектрально-отражательных свойств. Значения параметров для конкретных оставленных аграрных угодий вычислили методом зональной статистики в программе ERDAS IMAGINE, т.е. для каждой залежи вычисляли значение коэффициентов отражения, усреднённое в пределах их контуров. Геоинформационное пространственное картографирование характеристик растительного покрова залежей и их спектральных признаков было выполнено с использованием пространственно-статистических методов в программе ArcGIS.

Результаты и их обсуждение

Спектральные характеристики залежей с лиственными насаждениями

Оставленные аграрные угодья с формирующимися лесными насаждениями лиственного породного состава — наиболее распространённый тип залежей в лесостепной зоне. Проведённая оценка их спектральных признаков показала (*табл. 3*), что наиболее тесной корреляци-

ей с проективным покрытием крон характеризуются коэффициенты спектральной яркости SWIR1-диапазона (1,56–1,66 мкм).

Таблица 3. Характеристики тесноты связи между проективным покрытием крон древесных сообществ, формирующихся на залежах, и спектральными признаками. Залежи с лиственными насаждениями

Коэффициент корреляции	Коэффициенты спектральной яркости						NDVI
	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2	
Пирсона	-0,74	-0,80	-0,77	0,16	-0,85	-0,80	0,56
Спирмена	-0,56	-0,44	-0,70	0,47	-0,68	-0,80	0,74

Все коэффициенты корреляции статистически значимы на уровне 0,05 за исключением коэффициентов Пирсона для КСЯ NIR-диапазона (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный). Для значений NDVI непараметрический коэффициент корреляции Спирмена показал более высокие значения, чем коэффициент корреляции Пирсона, что выступает признаком выраженной нелинейности связи между проективным покрытием крон и значениями вегетационного индекса. Графический анализ (*рис. 2*) подтвердил данное предположение. На его основе установлено, что зависимость между проективным покрытием крон древесных сообществ, формирующихся на залежах, и вегетационным индексом NDVI может быть описана логарифмической кривой.

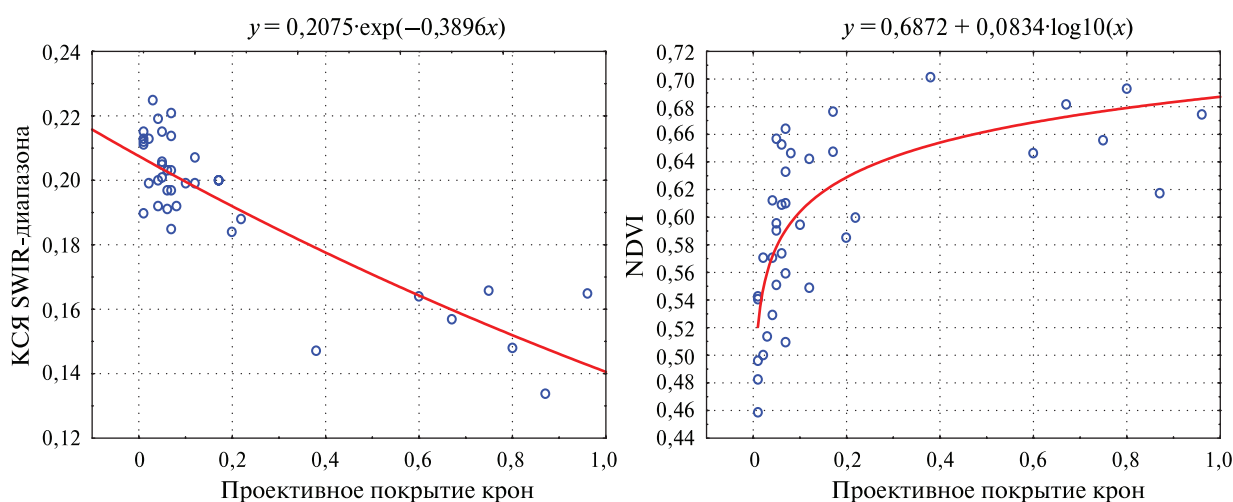


Рис. 2. Зависимости между проективным покрытием крон древесной растительности, формирующейся на залежах, и спектральными показателями. Залежи с лиственными породами

Исходя из анализа всех исследуемых спектральных признаков, можно отметить, что все они, за исключением КСЯ NIR-диапазона, характеризуются достаточно высокой корреляцией со степенью покрытия залежей кронами древесных сообществ. Другой важный момент — все показатели, кроме NDVI и КСЯ NIR-диапазона, характеризуются обратной зависимостью с величиной покрытия залежей кронами деревьев.

Регрессионный анализ спектральных показателей, характеризующихся наиболее тесной связью с проективным покрытием крон лесных насаждений, формирующихся на залежах, позволил установить форму математических зависимостей, наиболее полно описывающих соответствующую связь (*табл. 4*).

Из данных в *табл. 4* видно, что степенная зависимость достаточно эффективно описывает связь между коэффициентами спектральной яркости SWIR-диапазона (1,56–1,66 мкм) и величиной покрытия залежей кронами древесных сообществ.

Таблица 4. Виды зависимостей, наиболее полно описывающих связь между проективным покрытием кроны и отражательными свойствами для залежей с лиственным породами

Спектральный показатель	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2
КСЯ SWIR1-диапазона	$y = 0,2075 e^{-0,39x}$	0,74
NDVI	$y = 0,0362 \ln(x) + 0,6872$	0,57

Спектральные характеристики залежей с распространяющимися на них хвойными породами

Данный тип залежей, в отличие от предыдущего, имеет в регионе локальное распространение и приурочен к ареалам концентрации хвойных лесов. Основная порода в таких лесах — сосна, отличающаяся неприхотливостью. Она достаточно быстро начинает распространяться на оставленных пахотных угодьях после прекращения аграрной деятельности.

Принципиальное отличие отражательных характеристик данного типа залежей от предыдущего заключается в том, что все исследуемые спектральные показатели, за исключением КСЯ NIR-диапазона, продемонстрировали более высокую корреляцию, чем аналогичные коэффициенты для залежей с лиственными породами (табл. 5).

Таблица 5. Характеристики тесноты связи между проективным покрытием кроны древесных сообществ, формирующихся на залежах, и спектральными признаками. Залежи с хвойными насаждениями

Коэффициент корреляции	Коэффициенты спектральной яркости						NDVI
	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2	
Пирсона	-0,83	-0,90	-0,93	0,25	-0,94	-0,94	0,84
Спирмена	-0,88	-0,95	-0,97	0,21	-0,95	-0,96	0,91

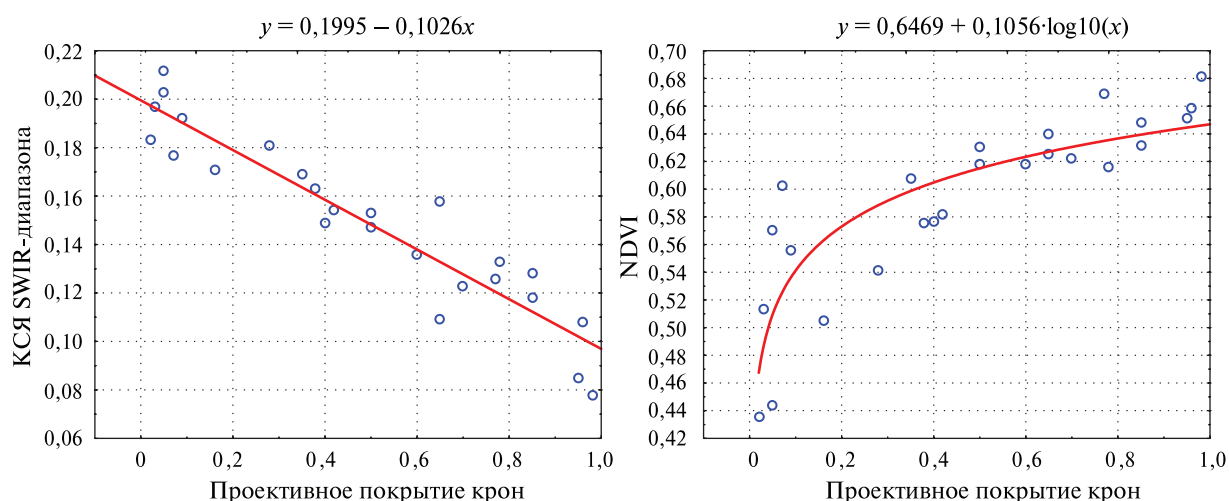


Рис. 3. Зависимости между проективным покрытием кроны древесной растительности, формирующейся на залежах, и спектральными показателями. Залежи с хвойными породами

Соответствующая особенность может быть объяснена следующим обстоятельством: коэффициенты спектральной яркости хвойных пород в большей степени контрастируют с аналогичными характеристиками травянистых пространств и вследствие этого они более выражено показывают динамику при изменении суммарной фитомассы залежей, обусловленной ростом и формированием на них древесных сообществ. Изменение коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона происходит по линейной зависимости по мере роста доли

древесной растительности на залежах, NDVI — по логарифмической или степенной кривой (рис. 3, см. с. 148).

При этом значения концентрируются вблизи регрессионной линии, что указывает на возможность её использования для решения обратной задачи — прогнозирования проективного покрытия крон древесных сообществ на основе спектрально-отражательных характеристик.

Регрессионные зависимости для залежей с хвойными породами характеризуются более высокими коэффициентами детерминации по сравнению с залежами с лиственными породами для всех ключевых спектральных показателей (табл. 6). Уровень значимости уравнений, представленных в таблице, меньше 0,05.

Таблица 6. Виды зависимостей, наиболее полно описывающих связь между проективным покрытием крон и отражательными свойствами для залежей с хвойными породами

Спектральный показатель	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2
КСЯ SWIR1-диапазона	$y = -0,1026x + 0,1995$	0,88
КСЯ SWIR2-диапазона	$y = -0,0699x + 0,1131$	0,88
NDVI	$y = 0,0459 \ln(x) + 0,6469$	0,72

Спектральные характеристики залежей со смешанными лесными насаждениями

Территориально этот тип залежей приурочен к ареалам хвойных лесов, а также к ареалам распространения лесов смешанного породного состава (северо-запад и северо-восток лесостепи Центрального Черноземья).

Отличительная особенность спектрально-отражательных характеристик данного типа залежей — более низкие (по сравнению с предыдущими типами) коэффициенты корреляции с проективным покрытием крон древесных сообществ, формирующихся на них. Среди спектральных показателей наиболее тесно коррелируют с проективным покрытием крон, как и в предыдущих случаях, коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона, а также RED (красного) диапазона, диапазона SWIR2 и NDVI (табл. 7)

Таблица 7. Характеристики тесноты связи между проективным покрытием крон древесных сообществ, формирующихся на залежах, и спектральными признаками. Залежи со смешанными лесными насаждениями

Коэффициент корреляции	Коэффициенты спектральной яркости						NDVI
	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	SWIR2	
Пирсона	-0,64	-0,71	-0,71	0,40	-0,71	-0,67	0,62
Спирмена	-0,62	-0,65	-0,73	0,53	-0,69	-0,76	0,72

Зависимость между спектральными признаками и проективным покрытием крон имеет вид, аналогичный предыдущим типам залежей (рис. 4, см. с. 150).

При этом уравнения зависимости характеризуются заметно меньшими коэффициентами детерминации (табл. 8). Уровень значимости уравнений, представленных в таблице, меньше 0,05.

Таким образом, оценивая все типы оставленных аграрных угодий, стоит отметить высокую эффективность коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазонов (1,56–1,66; 2,10–2,30 мкм, или 6-й и 7-й каналы сенсора Landsat OLI) для количественного анализа проективного покрытия крон древесных насаждений, формирующихся на залежах. Корреляция

вегетационного индекса NDVI с величиной проективного покрытия кронами несколько меньшая, но она также высока.

Таблица 8. Виды зависимостей, наиболее полно описывающих связь между проективным покрытием крон и отражательными свойствами для залежей со смешанными насаждениями

Спектральный показатель	Уравнение	Коэффициент детерминации R^2
КСЯ SWIR1-диапазона	$y = 0,1577x^{-0,073}$	0,55
КСЯ SWIR2-диапазона	$y = 0,0779x^{-0,116}$	0,54
NDVI	$y = 0,0331 \ln(x) + 0,624$	0,42

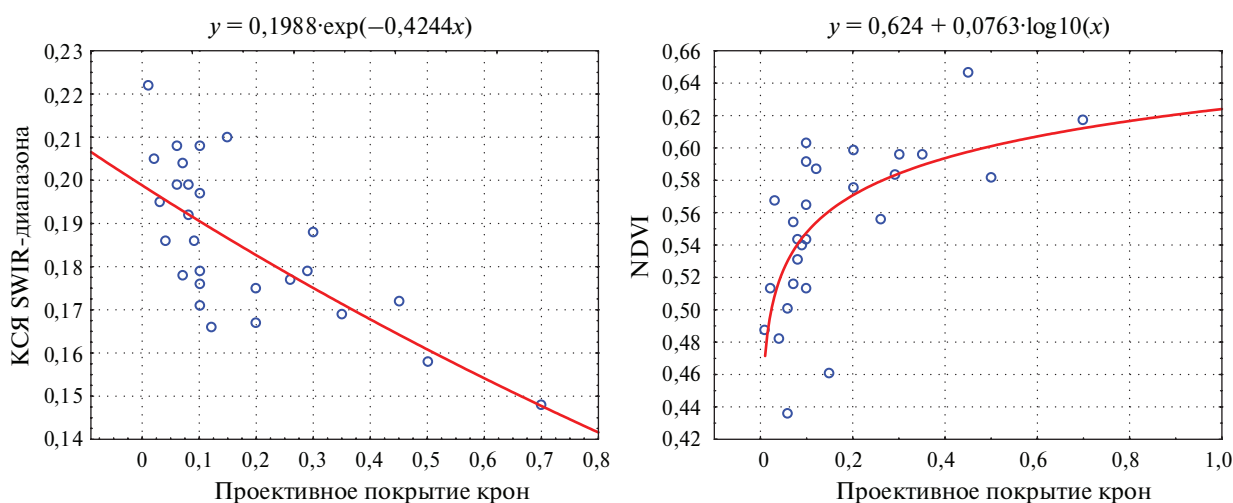


Рис. 4. Зависимости между проективным покрытием крон древесной растительности, формирующейся на залежах, и спектральными показателями. Залежи со смешанными лесными насаждениями

Высокая, статистически значимая теснота связи проективного покрытия залежей кронами деревьев и коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона выступила основой для пространственного анализа особенностей растительного покрова оставленных аграрных угодий лесостепи. Он был проведён для залежей с формирующимися лиственными древесными сообществами, характеризующихся наибольшим территориальным распространением в регионе.

Таблица 9. Характеристики методов интерполяции для пространственного анализа особенностей растительного покрова залежей и их отражательных признаков

Метод	Среднеквадратичная ошибка (RMSE)		
	Проективное покрытие крон	КСЯ SWIR-диапазона	NDVI
Обратно взвешенные расстояния	0,234	0,019	0,060
Радиальные базисные функции	0,229	0,018	0,060
Кригинг ординарный	0,230	0,019	0,061
Кригинг простой	0,239		0,066
Кригинг универсальный	0,235		0,064

Предварительно была выполнена оценка эффективности различных моделей пространственной интерполяции: метода обратно взвешенных расстояний (англ. Inverse Distance Weighting — IDW), радиальных базисных функций (англ. Radial Basis Functions — RBF), про-

стого, ординарного и универсального кригинга (*англ.* Simple Kriging — SK, Ordinary Kriging — OK, Universal Kriging — UK). Она была осуществлена на основе анализа величины среднеквадратичной ошибки (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE). На основе полученных результатов установлено (*табл. 9*), что наименьшей величиной средней квадратичной ошибки и, соответственно, наибольшей эффективностью для анализа всех исследуемых показателей характеризуется метод радиальных базисных функций. Вследствие этого он был использован для построения всех карт-схем. Радиальные базисные функции относятся к детерминированным, достаточно точным методам интерполяции.

Пространственный анализ карт-схем современной величины покрытия залежей кронами древесных сообществ (2018) и коэффициентов спектральной яркости SWIR1-диапазона показал (*рис. 5, 6*, см. с. 152), что пространственное распределение КСЯ отражает ключевые закономерности в территориальном изменении степени покрытия залежей древесной растительностью.

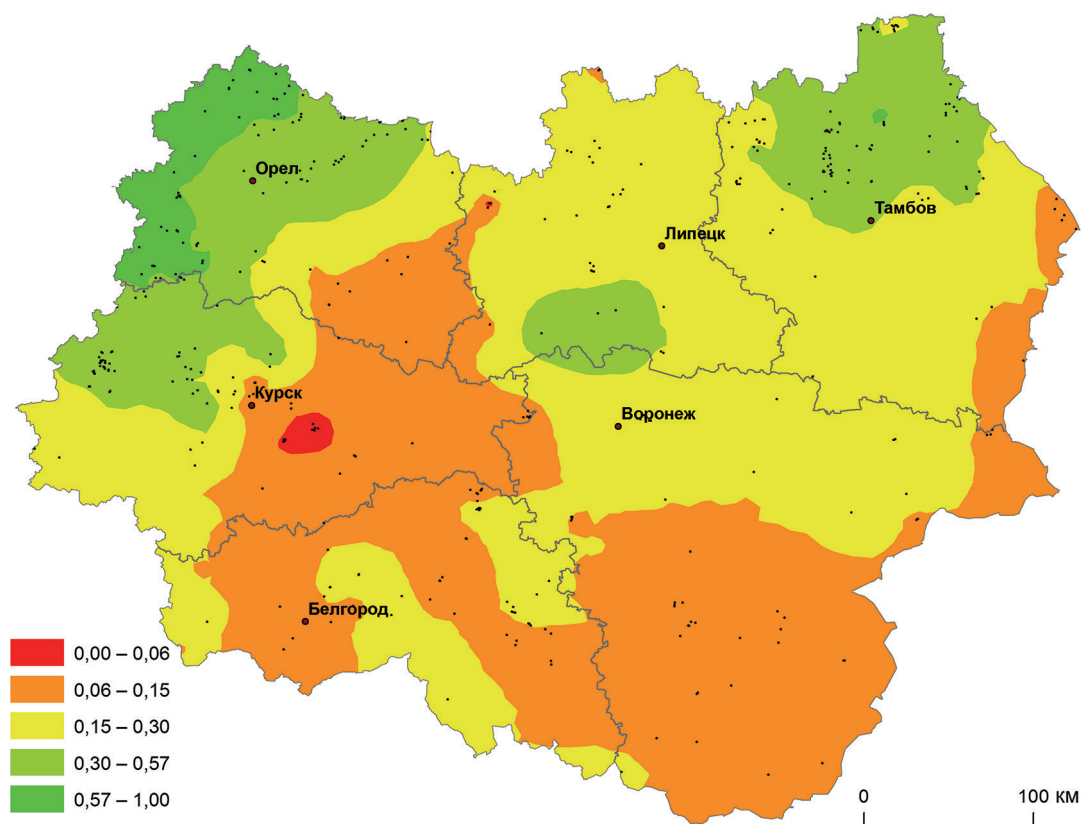


Рис. 5. Пространственное распределение в пределах ЦЧР величины покрытия древесной растительностью залежей с формирующимися лиственными лесными насаждениями (2018)

Пространственный анализ в пределах Центрального Черноземья значений вегетационного индекса NDVI залежей, измеренных на основе данных Landsat OLI августа 2018 г., также показал, что их территориальное распределение (*рис. 7*, см. с. 152) отражает основные особенности пространственных изменений в степени покрытия залежей кронами древесных сообществ, формирующихся на них.

Особенностью данного спектрального признака, в отличие от коэффициентов спектральной яркости, стало обстоятельство, что он находится в прямой, а не обратной зависимости от величины проективного покрытия крон древесных сообществ.

Карты-схемы проективного покрытия залежей кронами и соответствующих им спектрально-отражательных характеристик позволили установить некоторые территориальные особенности этих параметров.

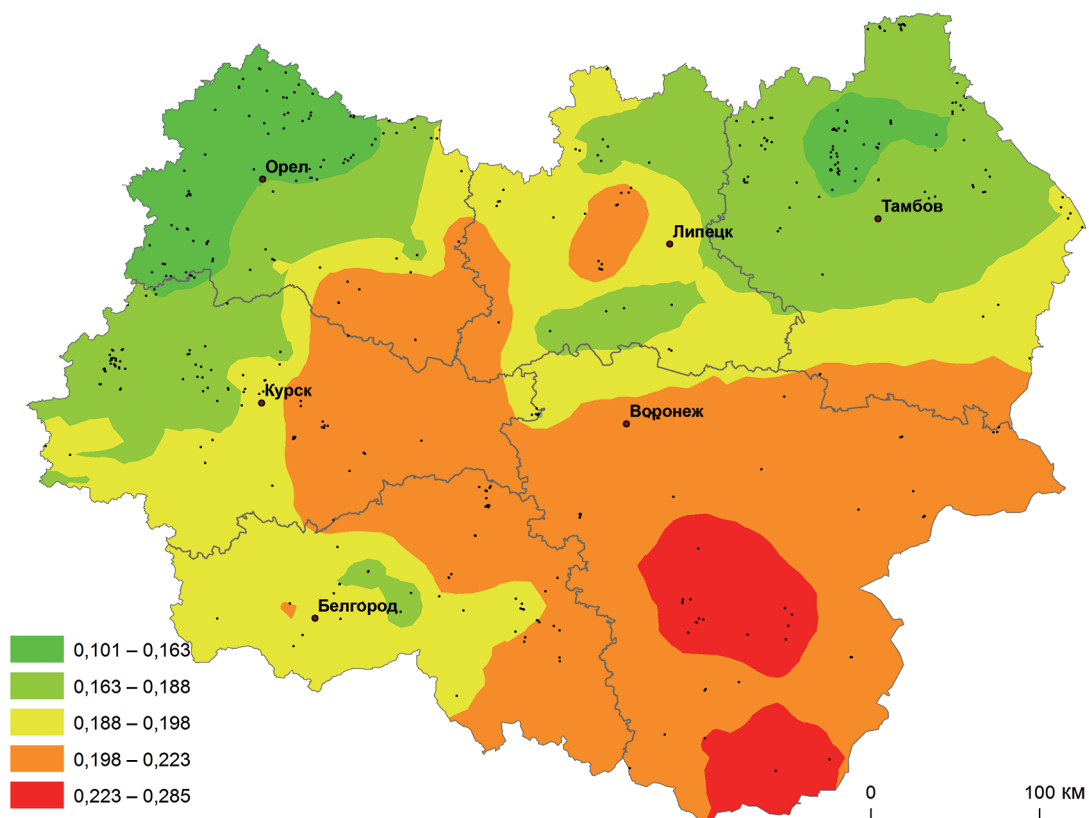


Рис. 6. Пространственное распределение в пределах ЦФР коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона залежных земель с формирующимися лиственными лесными насаждениями (2018)

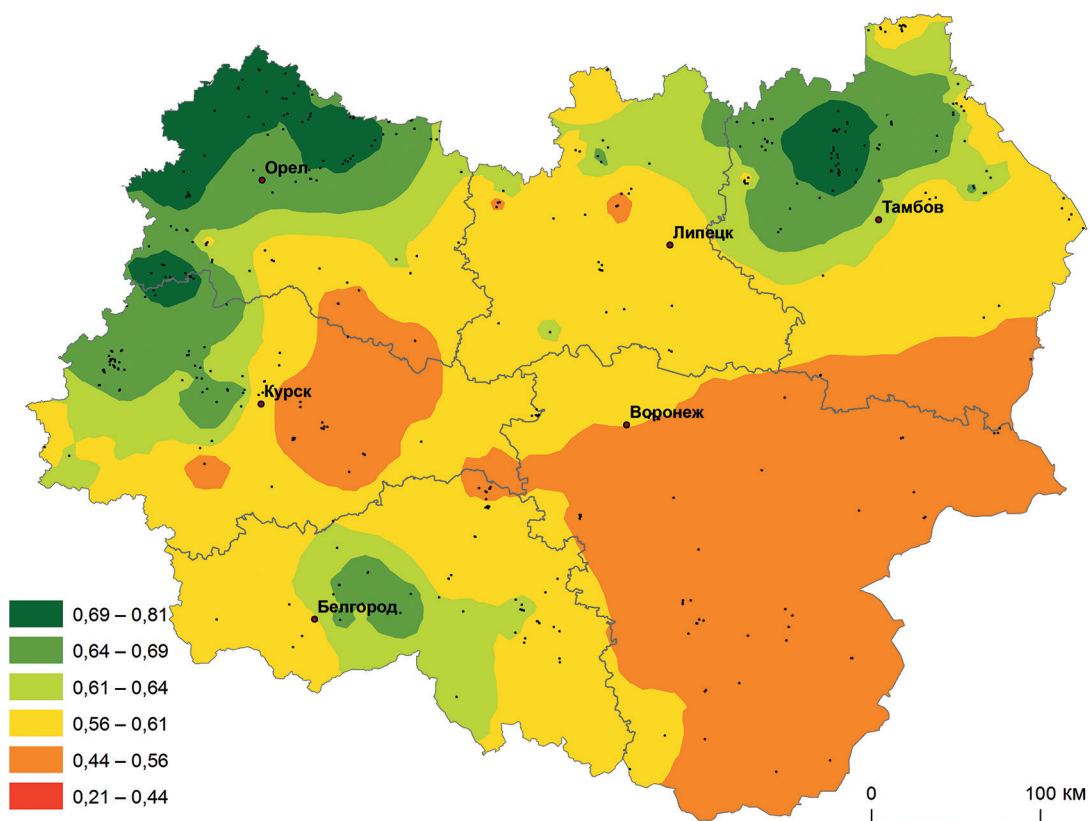


Рис. 7. Пространственное распределение в пределах ЦФР значений NDVI залежных земель с формирующимися лиственными лесными насаждениями (2018)

Во-первых, можно выделить два основных направления пространственного изменения всех трёх показателей (покрытия залежей древесными сообществами, SWIR-коэффициентов отражения, NDVI). Первое направление — изменение с северо-запада на юго-восток и юг. Второе направление — изменение с северо-востока на юго-запад и юг. Наиболее контрастны между собой крайние части региона: северо-запад, северо-восток и юг. Учитывая, что крайний северо-запад региона и крайний северо-восток находятся в подзоне северной лесостепи, а крайний юг — в подзоне южной лесостепи и степной зоне (Физико-географическое..., 1961), можно сделать вывод, что степень покрытия залежей древесными сообществами, КСЯ SWIR-диапазона и NDVI могут выступать индикаторами внутризональных различий в пределах одной природной зоны.

Во-вторых, полученные результаты показывают различия не только в пределах всей лесостепи ЦЧР, но и в границах отдельных областей региона. Области региона на основе подготовленных карт-схем можно разделить на несколько категорий, различающихся по степени внутривнутрирегиональных различий. Первая группа — последовательная территориальная смена большинства градаций всех трёх показателей: Орловская, Курская, Тамбовская области. Вторая группа — сложная картина переходов между отдельными градациями: Липецкая и Белгородская области. Третья группа — минимальные внутривнутрирегиональные различия в степени покрытия залежей древесными сообществами и их спектрально-отражательных признаках: Воронежская обл.

Таким образом, полученные результаты могут выступать основанием для использования изученных параметров при дальнейшем анализе внутризональных различий в пределах лесостепной зоны.

Выводы

Изучена информативность группы спектрально-отражательных признаков для оценки величины покрытия древесными сообществами оставленных аграрных угодий лесостепи Центрального Черноземья. Коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазонов, измеренные по данным Landsat OLI, характеризуются высокой теснотой связи со степенью покрытия залежей древесными сообществами. Для залежей с различными типами формирующихся лесных насаждений (лиственные, хвойные, смешанные) определены зависимости, наиболее полно описывающие связь между долей древесной растительности на них и спектральными признаками. Коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона (1,56–1,66 мкм) и значения вегетационного индекса NDVI отражают основные закономерности в территориальном распределении величины покрытия залежей древесной растительностью. В связи с этим они могут быть использованы для выявления и картографирования внутризональных различий в пределах лесостепной зоны.

Литература

1. Балдина Е. А., Трошко К. А. Картографирование современного состояния и многолетних изменений в использовании сельскохозяйственных земель в дельте Волги // Геодезия и картография. 2016. № 11. С. 39–46.
2. Воробьева Н. С., Тимбай Е. И. Разработка геоинформационной системы учета и контроля земель сельхозназначения // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33. № 3. С. 340–344.
3. Голусов П. В., Лисецкий Ф. Н. Воспроизводство почв в антропогенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 210 с.
4. Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А. Использование космических снимков ALOS для выявления площадей бывших сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесом // Геоматика. 2010. № 4. С. 68–72.
5. Лежнин С. А. Оценка формирующихся лесных экосистем на залежах Республики Марий Эл методом дистанционного зондирования // Актуальные направления науч. исслед. XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 4-2(15-2). С. 203–206.

6. Новикова Л.А. Восстановление растительности на залежах «Кунчеровской лесостепи» // Вестн. Оренбургского гос. ун-та. 2009. № 6(112). С. 281–285.
7. Паракневич Т.М., Кирик А.И. Структура и динамика растительного покрова на разновозрастных залежах // Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та. 2017. № 4(67). С. 43–50.
8. Терехин Э.А. Сукцессии на залежных землях юго-запада Среднерусской возвышенности и их изучение с применением спутниковых данных // Географ. вестн. 2017. № 2(41). С. 118–126.
9. Терехин Э.А., Постернак Т.С. Процессы лесовозобновления на залежных землях юга Западной Сибири и их анализ с применением данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 161–172.
10. Терехин Э.А., Чендев Ю.Г. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов одновременных космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 114–126.
11. Физико-географическое районирование центральных черноземных областей / под ред. Милюкова Ф.Н. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1961. 263 с.
12. Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Кононова Н.А. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
13. Шинкаренко С.С. Пожарный режим ландшафтов северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 121–133.
14. Шпедт А.А., Чупрова В.В. Рекомендации по освоению залежных земель в Красноярском крае // Вестн. Красноярского гос. аграрного ун-та. 2009. № 4(31). С. 130–134.
15. Dara A., Baumann M., Kuemmerle T., Pflugmacher D., Rabe A., Griffiths P., Hölzel N., Kamp J., Freitag M., Hostert P. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 213. P. 49–60.
16. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0. USGS. Department of the Interior. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019. 114 p. URL: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook/>.
17. Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Dubinin M., Alcantara C. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 126. P. 195–209.
18. Yin H., Prishchepov A.V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V.C. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 210. P. 12–24.

Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region

E. A. Terekhin

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

The results of the study of abandoned agricultural lands spectral response in the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region are presented. The spectral-reflective parameters most strongly correlated with the values of the coverage of the abandoned agricultural lands by forest communities have been established. Most of the spectral reflectance are inversely related to the values of coverage of abandoned agricultural land by forest stands. The NDVI vegetation index values are in direct dependence of this criterion. Dependences of spectral-reflectance on the proportion of forest stands present on abandoned agricultural lands are described. They were studied for lands with different types of arboreal communities forming on them: deciduous, coniferous, mixed. Schematic maps of spatial distribution of the share of forest stands on the abandoned agricultural lands and their spectral reflectance parameters were prepared. The spatial distribution of the SWIR range reflectances and NDVI vegetation index values characterize the key territorial features in the share of forest stands present on

abandoned agricultural lands. Using SWIR-range reflectances and NDVI values, the features in the spatial distribution of the share of forest communities present on the abandoned agricultural lands were studied. This determines intrazonal differences within the forest-steppe of the Central Chernozem Region.

Keywords: abandoned agricultural lands, vegetation, forest-steppe, Central Chernozem Region, spatial analysis, satellite data, Landsat

Accepted: 09.09.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156

References

1. Baldina E. A., Troshko K. A., Kartografirovaniye sovremennogo sostoyaniya i mnogoletnikh izmenenii v ispol'zovanii sel'skokhozyaistvennykh zemel' v del'te Volgi (The creation of a map of the Volga delta agricultural lands current state and long-term changes), *Geodeziya i kartografiya*, 2016, No. 11, pp. 39–46.
2. Vorob'eva N. S., Timbai E. I., Razrabotka geoinformatsionnoi sistemy ucheta i kontrolya zemel' sel'khoz-naznacheniya (Geoinformation system of agricultural lands inventory and control development), *Komp'yuternaya optika*, 2009, Vol. 33, No. 3, pp. 340–344.
3. Goleusov P. V., Lisetskii F. N., *Vosproizvodstvo pochv v antropogennykh landshaftakh lesostepi* (Soil reproduction in anthropogenic landscapes of forest-steppe), Moscow: GEOS, 2009, 210 p.
4. Kurbanov E. A., Vorob'ev O. N., Gubaev A. V., Lezhnin S. A., Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov ALOS dlya vyyavleniya ploshchadei byvshikh sel'skokhozyaistvennykh ugodii, zarastayushchikh lesom (Use of ALOS satellite images to reveal former farmland areas being forested), *Geomatika*, 2010, No. 4, pp. 68–72.
5. Lezhnin S. A., Otsenka formiruyushchikhsya lesnykh ekosistem na zalezkhakh respubliky Marii El metodom distantsionnogo zondirovaniya (Assessment forming forest ecosystems on the deposits of the republic of Mari El with using remote sensing techniques), *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*, 2015, Vol. 3, No. 4-2(15-2), pp. 203–206.
6. Novikova L. A., Vosstanovlenie rastitel'nosti na zalezkhakh "Kuncherovskoi lesostepi" (Restoration of vegetation on the fallow of the "Kuncherovskaya forest-steppe"), *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2009, No. 6(112), pp. 281–285.
7. Parakhnevich T. M., Kirik A. I., Struktura i dinamika rastitel'nogo pokrova na raznovozrastnykh zalezkhakh (The structure and dynamics of vegetation on the different age abandoned fields), *Vestnik agrarnoi nauki*, 2017, No. 4(67), pp. 43–50.
8. Terekhin E. A., Suktsessii na zalezhnykh zemlyakh yugo-zapada Srednerusskoi vozvysheynosti i ikh izucheniye s primeneniem sputnikovykh dannykh (Successions on abandoned agricultural lands in the south-west of the Central Russia Upland and their investigation using remote sensing data), *Geograficheskii vestnik*, 2017, No. 2(41), pp. 118–126.
9. Terekhin E. A., Posternak T. S., Protsessy lesovozobnovleniya na zalezhnykh zemlyakh yuga Zapadnoi Sibiri i ikh analiz s primeneniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Reforestation on abandoned arable lands in the south of Western Siberia and its analysis using remote sensing data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 161–172.
10. Terekhin E. A., Chendev Yu. G., Otsenka izmeneniya lesistosti v sovremennyi period na yuge Srednerusskoi vozvysheynosti s ispol'zovaniyem 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, Vol. 15, No. 3, pp. 114–126.
11. *Fiziko-geograficheskoe raionirovaniye tsentral'nykh chernozemnykh oblastei* (Physico-geographical zoning of the central chernozem regions), Milkov F. N. (ed.), Voronezh: Izd. Voronezhskogo universiteta, 1961, 263 p.
12. Shevyrnogov A. P., Botvich I. Yu., Pisman T. I., Kononova N. A., Sezonnaya dinamika rastitel'nosti zalezhnykh zemel' Krasnoyarskoi lesostepi po nazemnym i sputnikovym dannym (Seasonal Dynamics of Fallow Land Vegetation in Krasnoyarsk Forest Steppe According to Ground and Satellite Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 6, pp. 39–51.
13. Shinkarenko S. S., Pozharnyi rezhim landshaftov severnogo Prikaspiya po dannym ochagov aktivnogo goreniiya (Fire regime of North Caspian landscapes according to the data of active burning centers), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 121–133.
14. Shpedt A. A., Chuprova V. V., Rekomendatsii po osvoeniyu zalezhnykh zemel' v Krasnoyarskom krae (Recommendations for the long-fallow lands reclamation in Krasnoyarsk region), *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2009, No. 4(31), pp. 130–134.

15. Dara A., Baumann M., Kuemmerle T., Pflugmacher D., Rabe A., Griffiths P., Hölzel N., Kamp J., Freitag M., Hostert P., Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 213, pp. 49–60.
16. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook, Version 5.0*, USGS, Department of the Interior, Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019, 114 p., available at: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook/>.
17. Prishchepov A. V., Radeloff V. C., Dubinin M., Alcantara C., The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 126, pp. 195–209.
18. Yin H., Prishchepov A. V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V. C., Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 210, pp. 12–24.