

СПЕКТРАЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ЗАЛЕЖЕЙ В ИНДИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ИХ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА И ПРОЦЕССОВ ЛЕСОВОЗОБНОВЛЕНИЯ

Э.А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Развитие подходов к индикации состояния растительного покрова залежных земель на основе их спектрального отклика необходимо для совершенствования методов мониторинга ландшафтов. Представлены результаты анализа состояния растительного покрова залежных земель, расположенных в областях Центрального Черноземья и Орловской области на основе спектрально-отражательных характеристик по данным Sentinel-2. Установлено, что залежные земли с различным состоянием растительного покрова по критерию соотношения участков древесной и травянистой растительности статистически значимо различаются по спектральной отражательной способности в инфракрасных, 11 и 12 каналах Sentinel-2. В этих диапазонах выявлены статистически значимые различия для всех изученных типов залежных земель, отличающихся по соотношению на них древесной и травянистой растительности. Индикаторами преобладания залежей с более высокой или низкой лесистостью могут выступать средние значения спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазонов, форма их гистограммы и преобладающие в ней значения. Преобладание в гистограмме более высоких значений отражательной способности характеризует доминирование залежей с низкой величиной покрытия древесной растительностью. Для оценки соотношения залежных земель с различной величиной лесистости могут быть использованы границы первого и третьего квартиля отражательной способности. Они выступают индикаторами преобладания оставленных аграрных земель с высокой или низкой лесистостью. Медианное значение спектральной отражательной способности 11 и 12 каналов может быть использовано для сопоставительного анализа доли залежей с разной величиной покрытия древесной растительностью в пределах отдельных областей. Спектрально-отражательные характеристики SWIR-диапазонов, оцененные для одновозрастных залежей, могут выступать индикаторами скорости годового прироста их лесистости.

Ключевые слова: залежные земли, растительный покров, лесистость, спектральная отражательная способность, Центральное Черноземье, Sentinel-2.

SPECTRAL RESPONSE OF ABANDONED AGRICULTURAL LANDS IN THE ASSESSMENT OF THEIR VEGETATION COVER AND REFORESTATION

E.A. Terekhin

Belgorod State National Research University

The development of approaches to assessing the state of abandoned agricultural land vegetation cover using their spectral response is important to improve the methods for monitoring landscape state. The article analyzes the vegetation cover of abandoned agricultural lands, typical of the Central Chernozem region and Oryol Oblast, using the Sentinel-2 spectral response. Abandoned agricultural lands with different proportions of forest and herbaceous vegetation plots are statistically significantly different in reflectance in 11–12 bands of Sentinel-2. Statistically significant differences are established in these spectral ranges for all the studied types of abandoned lands, which differ in the proportion of forest and herbaceous vegetation. The indicators of the predominance of abandoned agricultural lands with higher or lower forest cover can be the average values of the SWIR-reflectance, the shape of their histogram and the values prevailing in it. The predominance

of higher reflectance values in the histogram shows the dominance of abandoned lands with low forest cover. The boundaries of the first and third reflectance quartiles can be used to estimate the ratio of abandoned agricultural lands with different amounts of forest cover. They show the predominance of abandoned lands with high or low forest cover within individual regions. The median value of reflectance in 11 and 12 bands can be used for a comparative analysis of abandoned lands with different forest cover within certain areas. The SWIR range reflectances, estimated for abandoned agricultural lands of the same age, can serve as indicators of the annual increase rate in their forest cover.

Key words: *abandoned agricultural lands, vegetation cover, forest cover, spectral response, Central Chernozem region, Sentinel-2.*

Введение

Сукцессии, протекающие на оставленных аграрных землях, позволяют на их основе анализировать особенности восстановления природной растительности после прекращения или значительного снижения антропогенной нагрузки. На примере залежей могут быть проанализированы тенденции естественной динамики растительного покрова, особенно в регионах, где преобладают агроландшафты и доля природных ландшафтов незначительна.

Сукцессионные процессы на залежах могут обуславливать изменения в лесистости территории (Карпин и др., 2017; Королева и др., 2018; Ershov et al., 2022), наземной фитомассе, углеродном цикле (Романовская и др., 2012; Карелин и др., 2017; Bell et al., 2021). Оценка состояния оставленных аграрных земель и выявление тенденций в динамике их площадей актуальна для многих регионов России (Курбанов и др., 2010; Абрамова, 2013; Голубева и др., 2015; Лежнин, 2020; Бурлуцкий и др., 2021).

Формирование новых типов растительности на залежных землях приводит к изменениям их спектрально-отражательных свойств (Estel et al., 2015; Wei et al., 2021), которые могут быть использованы для разработки подходов к распознаванию участков бывшей пашни (Alcantara et al., 2012; Yin et al., 2020; He et al., 2022). Другой ключевой задачей выступает оценка состояния залежных земель на основе их спектрального отклика. Восстановительные сукцессии, происходящие на оставленных аграрных землях, приводят к изменениям в их растительном покрове (Кудрявцев, 2007). В связи с этим становится актуальным исследование изменений спектрального отклика залежных земель вследствие формирования на них новых типов растительного покрова (Терехин, 2022). Данные о спектральной отражательной способности связаны и с типом используемых спутниковых снимков, отличающихся спектральными диапазонами, пространственным и радиометрическим разрешением. Анализ возможностей современной спутниковой информации, примером которой выступают многозональные снимки Sentinel-2 (Morell-Monzó et al., 2022; Qiu et al., 2022), становится необходимой задачей для развития подходов к распознаванию и оценке состояния оставленных аграрных угодий.

Цель исследования состояла в изучении спектрально-отражательных свойств залежных земель как индикатора состояния растительного покрова. Задачи исследования включали анализ спектрального отклика залежей с различным состоянием растительного покрова, оценку спектрально-отражательных свойств залежей в областях Центрального Черноземья, включая Орловскую область, как показателя их лесистости и скорости ее годового прироста.

Материалы, объект и методы исследования

Объектом исследования выступали залежные земли, расположенные в Белгородской, Курской, Орловской, Липецкой, Тамбовской и Воронежской областях. Территория исследования площадью свыше 195000 км² располагалась в условиях умеренно континентального климата, преимущественно в природной зоне лесостепи и полностью охватывала ее от северной границы на северо-западе Орловской области до южной границы в Воронежской области. Южная часть исследуемой территории располагалась в зоне степи. В сравнении с лесной зоной, залежи в регионе представлены в меньшей степени, но в достаточном количестве, позволяющем получить представление об их региональных особенностях для отдельных областей. Для анализа был использован наиболее широко распространенный тип залежей в регионе – с древесной растительностью из лиственных пород. В рамках исследования выявлено и изучено свыше 520 оставленных аграрных земель (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики анализируемых залежных земель

Область	Число объектов	Площадь средняя, км ²	Площадь общая, км ²
Белгородская	92	18,3	1683,2
Орловская	174	48,0	8348,0
Воронежская	49	37,1	1816,3
Курская	82	52,4	4298,5
Тамбовская	105	80,4	8441,6
Липецкая	21	44,5	933,8
Всего	523	48,8	25521,5

Выявление залежей осуществлялось на основе совместного анализа космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения, полученных из интернет-сервисов открытого доступа, снимков Sentinel-2 и разновременных снимков Landsat TM/OLI 2000-2020 гг. Выборка залежей, используемая для оценки состояния их растительного покрова, включала все выявленные угодья. Подвыборка залежей, используемая для анализа среднегодового прироста лесистости, включала угодья, выведенные из использования в начале 2000-х гг. и непрерывно оставшиеся в залежном состоянии до конца второго десятилетия XXI в.

Для каждой залежи была подготовлена векторная основа и определен набор параметров: состояние их растительного покрова по соотношению древесной и травянистой растительности, лесистость в конце второго десятилетия XXI века. По состоянию растительного покрова залежи разделялись на следующие категории: 1 – полное покрытие древесной растительностью, 2 – доминирование древесной растительности, 3 – доминирование травянистой растительности, 4 – травянистая растительность. Для одновозрастных залежей, используемых для анализа среднегодового прироста лесистости, также были определены значения этого параметра в период 2000-2019 гг.

Спектральный отклик залежных земель изучен на основе тайлов или фрагментов изображений Sentinel-2, полученных в аналогичные сроки вегетационного периода (преимущественно август) 2019 г. и охватывающих территорию исследования. Для всех залежей были рассчитаны спектрально-отражательные свойства в каналах 11-12 (SWIR) Sentinel-2. Согласно ранее выполненным исследованиям (Терехин, 2022), наиболее информативными из каналов Sentinel-2 для анализа лесистости залежей являются

спектрально-отражательные характеристики SWIR-диапазонов, т.е. 11-12 каналов. Зависимость между лесистостью и спектрально-отражательными свойствами в них описывается логарифмической функцией, либо более точно – логит-моделью с высокими коэффициентами детерминации. Поэтому соответствующие спектральные показатели были использованы в настоящем исследовании. Все снимки прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию в программе SNAP (Sentinel Application Platform), в результате которой они были пересчитаны из уровня L1C в уровень L2A, включающий значения спектральной отражательной способности на нижней границе атмосферы. Значения отражательной способности для залежей рассчитывались методом зональной статистики в пределах их контуров.

Математико-статистический этап исследования состоял в количественном анализе статистических параметров залежей с разным типом растительного покрова и оценку значимости их различий. На этом этапе была осуществлена оценка спектрально-отражательных характеристик залежных земель для исследуемых областей, изучены гистограммы их распределения и сопоставлены с фактическим распределением разных типов залежей по соотношению древесной и травянистой растительности в областях региона. На заключительном этапе значения среднегодового прироста лесистости для одновозрастных залежей были сопоставлены со значениями их спектрального отклика в конце второго десятилетия XXI в.

Результаты исследования

Спектрально-отражательные свойства залежей с различным состоянием растительного покрова характеризуются статистически значимыми различиями в SWIR-диапазоне. Коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) этой области спектра последовательно растут от полного покрытия залежных земель древесной растительностью до полного отсутствия на них древесных пород (табл. 2).

Таблица 2

Параметры спектральной отражательной способности в SWIR-диапазоне для залежей Среднерусской лесостепи с различным состоянием растительного покрова (2019)

Состояние растительного покрова	Среднее	Стандартное отклонение	Коэф. вариации, %	Квартиль 25%	Медиана	Квартиль 75%
Полное покрытие древесной растительностью	0,16	0,02	15,5	0,15	0,16	0,17
Доминирование древесной растительности	0,18	0,03	14,6	0,16	0,18	0,19
Доминирование травянистой растительности	0,22	0,03	15,0	0,20	0,22	0,24
Травянистые залежи без древесной растительности	0,24	0,02	9,7	0,23	0,24	0,26

Повышение спектрально-отражательных характеристик по мере снижения на залежах доли древесной растительности проявляется в обоих SWIR-диапазонах Sentinel-2, соответствующих 11 и 12 каналам (рис. 1). Наличие статистически значимых различий в спектральном отклике SWIR-диапазонов для залежей с разным состоянием растительного покрова выступает теоретическим основанием для использования параметров спектральной

отражательной способности при индикации доминирования древесной или травянистой растительности на оставленных аграрных землях.

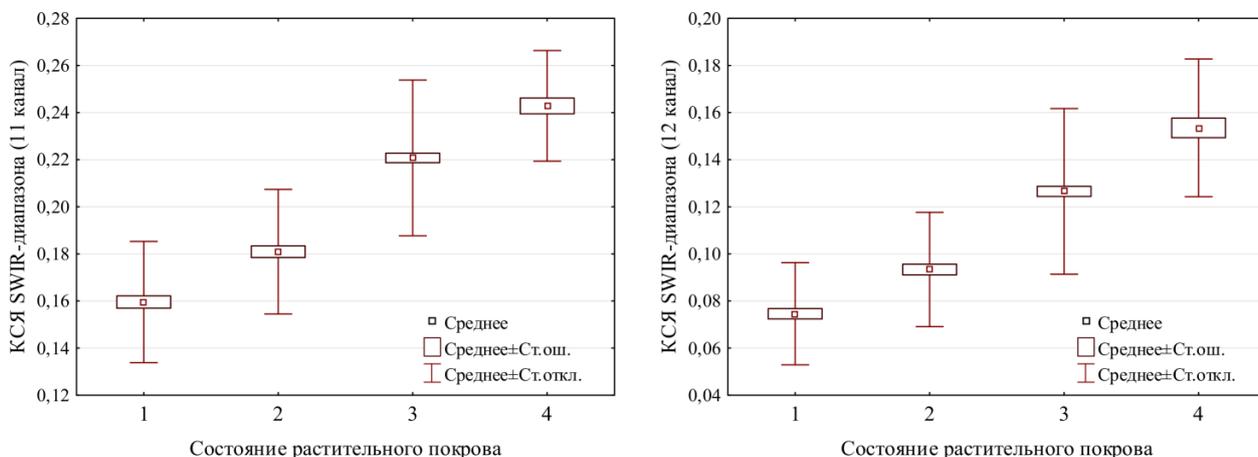


Рис. 1. Параметры спектральной отражательной способности в SWIR-диапазонах Sentinel-2 для залежей Центрального Черноземья с различным состоянием растительного покрова: 1 – полное покрытие древесной растительностью, 2 – доминирование древесной растительности, 3 – доминирование травянистой растительности, 4 – травянистая растительность

Индикаторами состояния растительного покрова залежных земель по критерию соотношения на них участков древесной и травянистой растительности может выступать среднее или медианное значение коэффициентов спектральной яркости и особенности гистограммы SWIR-диапазона. Этот вывод следует из сопоставления сведений о фактическом состоянии растительного покрова залежей в исследуемых областях (Терехин, 2022) с параметрами спектральной отражательной способности (рис. 2).

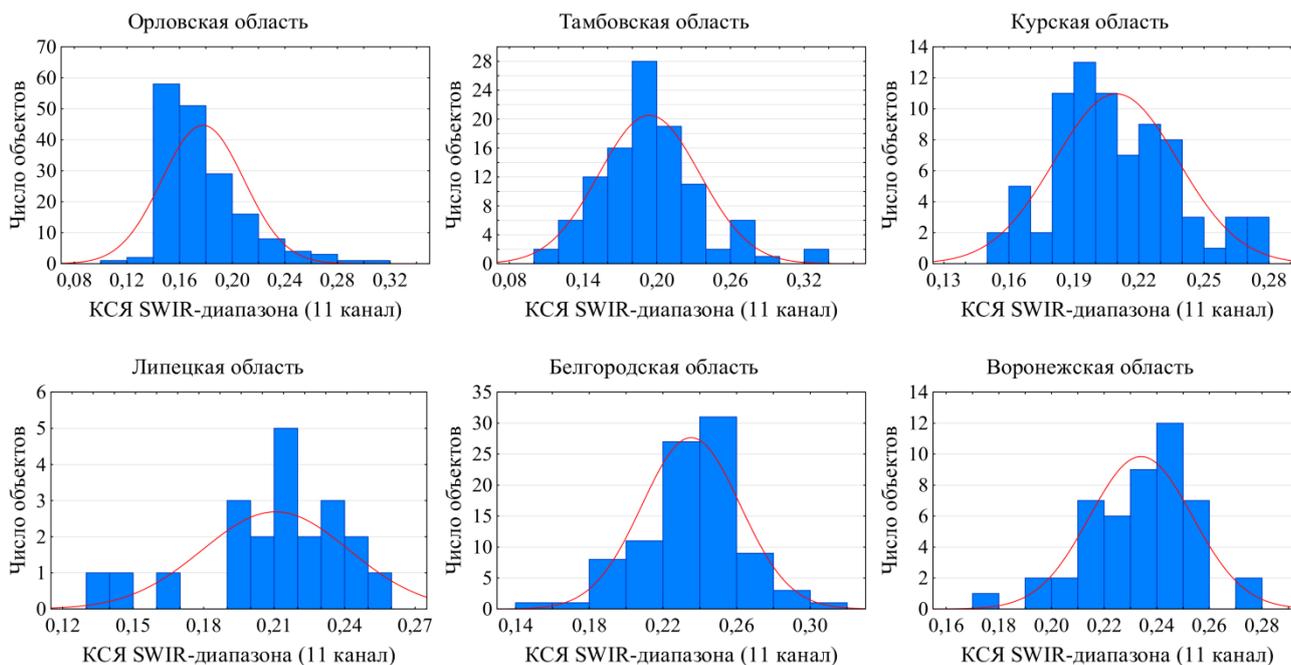


Рис. 2. Гистограммы спектральной отражательной способности SWIR-диапазона Sentinel-2 для оставленных аграрных земель

Результаты анализа показывают, что для залежей Орловской области характерны наименьшие значения спектральной отражательной способности и одновременно их гистограмма смещена в сторону более низких величин, выступающих индикаторами преобладания залежей с высокой лесистостью. Для большинства остальных изученных областей (Курской, Белгородской, Липецкой и Воронежской) характерно преобладание залежных земель с доминированием травянистых участков при наличии древесной растительности. Некоторое промежуточное положение занимает Тамбовская область, где в численном отношении преобладают залежи с доминированием травянистых участков, но высока доля оставленных аграрных земель с преобладанием участков древесной растительности. Сопоставляя гистограммы спектральной отражательной способности SWIR-диапазона всех изученных областей (рис. 2), в Липецкой, Белгородской и Воронежской областях видим их смещение в сторону более высоких величин, являющихся индикаторами преобладания залежей с доминированием травянистых участков. Закономерность снижения абсолютных значений спектральной отражательной способности SWIR-диапазона заметна и при сопоставлении ее средних величин для областей изученного региона (табл. 3). Наименьшие значения КСЯ характерны для залежей Орловской области, наибольшие – для Воронежской области.

Таблица 3

Характеристики спектральной отражательной способности в SWIR-диапазоне для областей Центрального Черноземья

Область	Среднее	Стандартное отклонение	Коэф. вариации, %	Квартиль 25%	Медиана	Квартиль 75%
Белгородская	0,23	0,03	11,3	0,22	0,24	0,25
Воронежская	0,23	0,02	8,3	0,22	0,24	0,24
Курская	0,22	0,04	18,1	0,19	0,21	0,23
Липецкая	0,21	0,03	14,8	0,20	0,21	0,23
Орловская	0,18	0,03	17,5	0,16	0,17	0,19
Тамбовская	0,19	0,04	21,1	0,17	0,19	0,21

Достаточно интересную информацию о состоянии растительного покрова залежных земель отдельной области можно получить на основе анализе верхних границ первого и третьего квартилей для спектральной отражательной способности. Диапазон значений, находящийся в этих границах, также выступает индикатором преобладающего типа залежных земель.

Высокая корреляция лесистости залежей со спектральной отражательной способностью в SWIR-диапазоне, а также установленная закономерность их связи, аппроксимируемой логарифмической или логит-кривой (Терехин, 2022), позволяют на основе параметров спектрального отклика делать вывод и о преобладающей величине покрытия древесной растительностью для залежных земель.

Индикаторами преобладающих значений лесистости залежей могут выступать медианное значение и интервал значений спектральной отражательной способности SWIR-диапазона между верхней границей первого квартиля и нижней границей четвертого квартиля. Соответствующий вывод следует из сопоставления фактических параметров лесистости

оставленных аграрных земель и параметров спектрально-отражательной способности SWIR-диапазона (рис. 3).

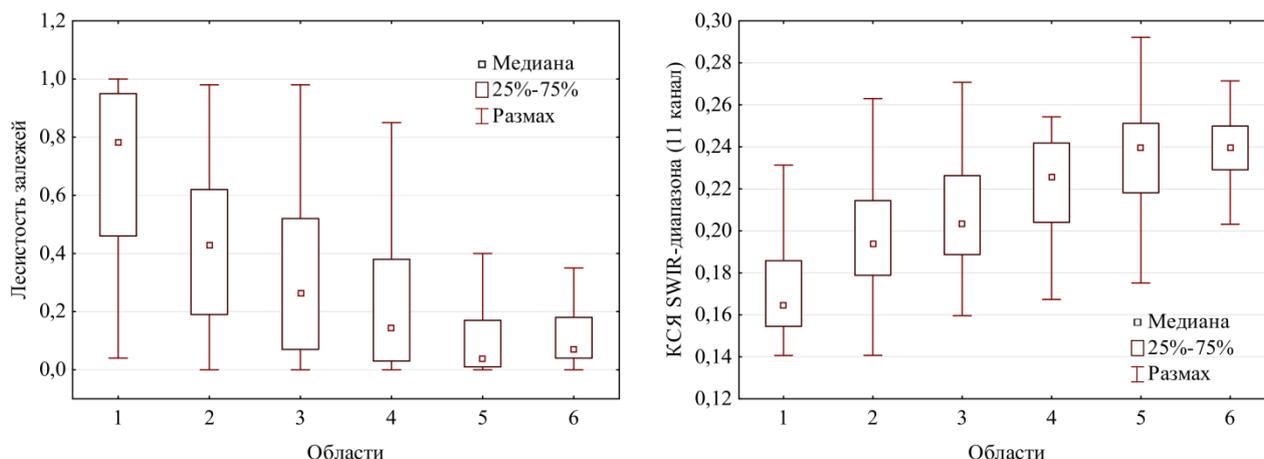


Рис. 3. Параметры лесистости и спектральной отражательной способности залежей: 1– Орловская область, 2 – Тамбовская область, 3 – Курская область, 4 – Липецкая область, 5 – Белгородская область, 6 – Воронежская область

Сопоставляя параметры лесистости и коэффициентов спектральной яркости на рисунке 3, видим изменение медианных значений спектрально-отражательных характеристик в обратной зависимости от медианной лесистости залежных земель изученных областей.

Спектрально-отражательные характеристики оставленных аграрных угодий могут выступать и индикаторами скорости среднегодового прироста их лесистости. Вследствие того, что накопление данных со спутников Sentinel-2 ведется с 2015 г., на текущее время не представляется возможности анализа на их основе длинных многолетних рядов спектрально-отражательных характеристик. Тем не менее, сведения о соотношении среднегодового прироста лесистости залежей в отдельных областях региона могут быть получены на основе анализа выборки, включающей залежи одного возраста, т.е. время восстановительных сукцессий на них было аналогично. Значения спектральной отражательной способности SWIR-диапазона таких залежей будут выступать индикаторами, но в обратной зависимости, скорости лесообразовательного процесса.

Сопоставление фактического среднегодового прироста лесистости одновозрастных залежей с древесной растительностью из лиственных пород в 2000-2019 гг. и значений отражательной способности в 2019 г. (рис. 4), подтвердило такую возможность. Из графика видно, что более высокая скорость лесообразовательного процесса приводит к более низким значениям спектрального отклика в SWIR-диапазоне. Вместе с этим величина среднегодового прироста лесистости залежей находится в выраженной обратной зависимости от коэффициентов спектральной яркости 11-го канала Sentinel-2. Необходимо отметить, что использование такого подхода обуславливает учет множества условий: залежи должны состоять из древесной растительности близкого породного состава (например, только из лиственных пород, исключая хвойные), оставленные аграрные земли должны быть одного возраста. Спектрально-отражательные характеристики анализируемых угодий должны быть измерены на основе снимков одного года и аналогичных сроков периода вегетации. Накопление многолетних архивов снимков Sentinel-2 в перспективе должно сделать

возможным использование методов анализа многолетних рядов для оценки спектрального отклика залежей как индикатора изменений их растительного покрова.

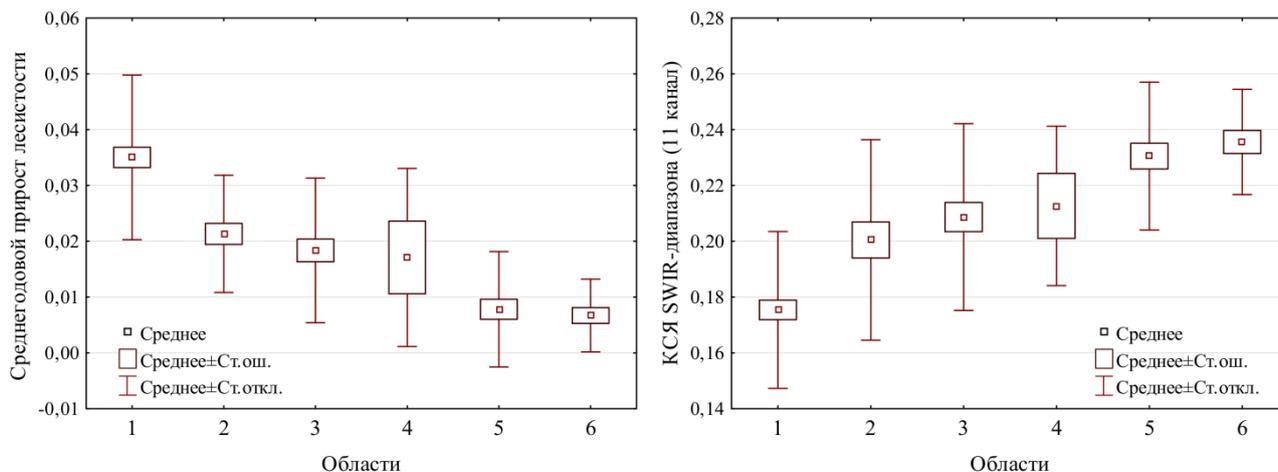


Рис. 4. Параметры среднегодового прироста лесистости в 2000-2019 гг. и спектральная отражательная способность одновозрастных залежей в 2019 г.: 1 – Орловская область, 2 – Тамбовская область, 3 – Курская область, 4 – Липецкая область, 5 – Белгородская область, 6 – Воронежская область

Таким образом, параметры коэффициентов спектральной яркости одновозрастных залежей могут быть использованы для сопоставительного анализа скорости лесовозобновления на них в разных регионах при условии изучения залежей с одним типом древесной растительности. В нашем случае анализировались залежи с древесной растительностью из лиственных пород, исключая уголья с формирующимися хвойными и смешанными лесными насаждениями.

Выводы

Спектрально-отражательные характеристики залежных земель SWIR-диапазона, измеренные по данным Sentinel-2, могут выступать индикатором доминирующего типа растительного покрова по критерию соотношения древесной и травянистой растительности. Вместе с тем статистические параметры отражательной способности этой области спектра могут быть использованы для сопоставительного анализа лесистости в разных областях. При условии анализа спектрального отклика одновозрастных залежных земель, т.е. с примерно равным временем восстановительных сукцессий, коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона могут применяться и для оценки сопоставительного анализа среднегодовых приростов их лесистости. На примере залежных земель, расположенных в областях Центрального Черноземья, включая Орловскую область, показаны возможности использования спектрального отклика залежей, рассчитанного на основе данных Sentinel-2, для анализа характеристик их растительного покрова.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00291.

Библиографический список

1. Абрамова Л.А. Восстановление биоразнообразия степей Окско-Донского плоскомерья // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 2. С. 552-555.

2. Бурлуцкий В.А., Мазуров В.Н., Семешкина П.С., Косолапов В.П. Продукционный потенциал и освоение растительных сообществ залежных земель Мешовского ополья в Калужской области // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 1. С. 45-52. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/45-52>.
3. Голубева Л.В., Наквасина Е.Н. Заращение древесной растительностью постагрогенных земель на карбонатных отложениях в Архангельской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. № 210. С. 25-36.
4. Карелин Д.В., Горячкин С.В., Кудиков А.В., Лопес де Гереню В.О., Лунин В.Н., Долгих А.В., Люри Д.И. Изменение запасов углерода и эмиссии CO₂ в ходе постагрогенной сукцессии растительности на серых почвах в европейской части России // Почвоведение. 2017. № 5. С. 580-594. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050070>.
5. Карпин В.А., Петров Н.В., Туюнен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 120-129. <https://doi.org/10.15372/SJFS20170610>.
6. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83-96. <https://doi.org/10.7868/S0024114818020018>.
7. 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.
8. Кудрявцев А.Ю. Восстановительная динамика растительности лесостепного комплекса Среднего Поволжья // Экология. 2007. № 5. С. 323-330. <https://doi.org/10.1134/S1067413607050013>.
9. Лежнин С.А. Оценка зарастания залежей Яранского района Кировской области по спутниковым данным // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2020. № 6. С. 160-171. <https://doi.org/10.25686/7238.2020.6.58836>.
10. Романовская А.А., Коротков В.Н., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С. Динамика элементов баланса углерода на неиспользуемых пахотных угодьях Валдайской возвышенности // Экология. 2012. № 5. С. 347-352. <https://doi.org/10.1134/S106741361204011X>.
11. Терехин Э.А. Влияние лесистости залежных земель лесостепи на спектрально-отражательные характеристики по данным Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 4. С. 223-235. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235>.
12. Alcántara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 124. P. 334-347. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.019>.
13. Bell S.M., Terrer C., Barriocanal C., Jackson R.B., Rosell-Melé A. Soil organic carbon accumulation rates on Mediterranean abandoned agricultural lands // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 759. 143535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143535>.
14. Ershov D.V., Gavriilyuk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., Shopina O.V., Titovets A.V., Tikhonov G.N. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 2. <https://doi.org/10.3390/rs14020322>.
15. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 163. P. 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>.
16. He S., Shao H., Xian W., Yin Z., You M., Zhong J., Qi J. Monitoring Cropland Abandonment in Hilly Areas with Sentinel-1 and Sentinel-2 Timeseries // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 15. <https://doi.org/10.3390/rs14153806>.
17. Morell-Monzó S., Estornell J., Sebastián-Frasquet M.-T. Comparison of Sentinel-2 and High-Resolution Imagery for Mapping Land Abandonment in Fragmented Areas // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, № 12. <https://doi.org/10.3390/rs12122062>.
18. Qiu B., Lin D., Chen C., Yang P., Tang Z., Jin Z., Ye Z., Zhu X., Duan M., Huang H., Zhao Z., Xu W., Chen Z. From cropland to cropped field: A robust algorithm for national-scale mapping by fusing time series of Sentinel-1 and Sentinel-2 // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. Vol. 113. 103006. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103006>.
19. Wei Z., Gu X., Sun Q., Hu X., Gao Y. Analysis of the Spatial and Temporal Pattern of Changes in Abandoned Farmland Based on Long Time Series of Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, № 13. <https://doi.org/10.3390/rs13132549>.
20. Yin H., Brandão A., Buchner J., Helmers D., Iuliano B.G., Kimambo N.E., Lewińska K.E., Razenkova E., Rizayeva A., Rogova N., Spawn S.A., Xie Y., Radeloff V.C. Monitoring cropland abandonment with Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2020. Vol. 246. 111873. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111873>.

References

1. Abramova L.A. Vosstanovlenie bioraznoobraziya stepej Oksko-Donskogo ploskomes'tja (Restore of steppes biodiversity of Oka-Don lowland). *Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Estestvennye i tehniczeskie nauki*, 2013. Vol. 18. No. 2. P. 552-555.
2. Burluckij V.A., Mazurov V.N., Semeshkina P.S., Kosolapov V.P. Produkcijnyj potencial i osvoenie rastitel'nyh soobshhestv zaleznyh zemel' Meshhovskogo opol'ja v Kaluzhskoj oblasti (Production capabilities and exploitation of fallow lands plant communities of Meshchovsky opolye in the Kaluga region). *Vestnik rossijskoj sel'skohozjajstvennoj nauki*, 2021. No. 1. P. 45-52. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2021/1/45-52>.
3. Golubeva L.V., Nakvasina E.N. Zarastanie drevesnoj rastitel'nost'ju postagrogennyh zemel' na karbonatnyh otlozhenijah v Arhangel'skoj oblasti (Abandoned agricultural land overgrown woody vegetation on carbonate deposits in Arkhangelsk region). *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotehniczeskoj akademii*, 2015. No. 210. P. 25-36.
4. Karelin D.V., Gorjachkin S.V., Kudikov A.V., Lopes de Gerenju V.O., Lunin V.N., Dolgih A.V., Ljuri D.I. Izmenenie zapasov ugljeroda i jemissii CO₂ v hode postagrogennoj sukcesii rastitel'nosti na seryh pochvah v evropejskoj chasti Rossii (Changes in carbon pool and CO₂ emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (luvic phaeozems) in European Russia). *Pochvovedenie*, 2017. No. 5. P. 580-594. <https://doi.org/10.7868/80032180X17050070>.
5. Karpin V.A., Petrov N.V., Tujunen A.V. Vosstanovlenie lesnyh fitocenozov posle razlichnyh vidov sel'skohozjajstvennogo ispol'zovaniya zemel' v uslovijah srednetaeznoj podzony (Regeneration of forest phytocoenoses after various agricultural land use practices in the conditions of Middle Taiga subzone). *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2017. No. 6. P. 120-129. <https://doi.org/10.15372/SJFS20170610>.
6. Koroleva N.V., Tihonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavriljuk E.A., Pugachevskij A.V. Ocenka masshtabov zarastaniya nelesnyh zemel' v nacional'nom parke «Smolenskoe Poozer'e» za 25 let po sputnikovym dannym Landsat (Twenty-five years of reforestation on nonforest lands in Smolenskoe Poozerye national park according to Landsat imagery assessment). *Lesovedenie*. 2018. No. 2. P. 83-96. <https://doi.org/10.7868/S0024114818020018>.
7. Kurbanov Je.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A. Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov ALOS dlja vyjavleniya ploshhadej byvshih sel'skohozjajstvennyh ugodij, zarastajushhij lesom (Use of ALOS satellite images to reveal former farmland areas being forested). *Geomatika*, 2010. No. 4. P. 68-72.
8. Kudrjavcev A.Ju. Vosstanovitel'naja dinamika rastitel'nosti lesostepnogo kompleksa Srednego Povolzh'ja (Vegetation restoration dynamics in the forest-steppe system of the Middle Volga region). *Russian Journal of Ecology*, 2007. No. 5. P. 323-330. <https://doi.org/10.1134/S1067413607050013>.
9. Lezhnin S.A. Ocenka zarastaniya zalezhej Jaranskogo rajona Kirovskoj oblasti po sputnikovym dannym (The use of satellite data in the assessment of reforestation on the abandoned agricultural lands in Yaransk district of the Kirov region) *Lesnye jekosistemy v uslovijah izmenenija klimata: biologicheskaja produktivnost' i distancijnyj monitoring*. 2020. No. 6. P. 160-171. <https://doi.org/10.25686/7238.2020.6.58836>.
10. Romanovskaja A.A., Korotkov V.N., Karaban' R.T., Smirnov N.S. Dinamika jelementov balansa ugljeroda na neispol'zuemyh pahotnyh ugod'jah Valdajskoj vozvys'hennosti (Dynamics of carbon balance components in fallow arable lands on the Valdai upland). *Russian Journal of Ecology*, 2012. No. 5. P. 347-352. <https://doi.org/10.1134/S106741361204011X>.
11. Terehin E. A. Vlijanie lesistosti zaleznyh zemel' lesostepi na spektral'no-otrazhatel'nye harakteristiki po dannym Sentinel-2 (Effect of abandoned agricultural lands forest cover on Sentinel-2 spectral response in forest-steppe natural zone). *Sovremennye problemy distancijnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. Vol. 19, No 4. P. 223-235. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235>.
12. Alcántara C., Kuemmerle T., Prishchepov A.V., Radeloff V.C. Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 124. P. 334-347. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.019>.
13. Bell S.M., Terrer C., Barriocanal C., Jackson R.B., Rosell-Melé A. Soil organic carbon accumulation rates on Mediterranean abandoned agricultural lands. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 759. 143535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143535>.
14. Ershov D.V., Gavriljuk E.A., Koroleva N.V., Belova E.I., Tikhonova E.V., Shopina O.V., Titovets A.V., Tikhonov G.N. Natural Afforestation on Abandoned Agricultural Lands during Post-Soviet Period: A Comparative Landsat Data Analysis of Bordering Regions in Russia and Belarus. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 2. <https://doi.org/10.3390/rs14020322>.
15. Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Levers C., Prishchepov A., Hostert P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 163. P. 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.028>.
16. He S., Shao H., Xian W., Yin Z., You M., Zhong J., Qi J. Monitoring Cropland Abandonment in Hilly Areas with Sentinel-1 and Sentinel-2 Timeseries. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, No. 15. <https://doi.org/10.3390/rs14153806>.
17. Morell-Monzó S., Estornell J., Sebastián-Frasquet M.-T. Comparison of Sentinel-2 and High-Resolution Imagery for Mapping Land Abandonment in Fragmented Areas. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12122062>.

18. Qiu B., Lin D., Chen C., Yang P., Tang Z., Jin Z., Ye Z., Zhu X., Duan M., Huang H., Zhao Z., Xu W., Chen Z. From cropland to cropped field: A robust algorithm for national-scale mapping by fusing time series of Sentinel-1 and Sentinel-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 113. P.103006. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103006>.
19. Wei Z., Gu X., Sun Q., Hu X., Gao Y. Analysis of the Spatial and Temporal Pattern of Changes in Abandoned Farmland Based on Long Time Series of Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 13. <https://doi.org/10.3390/rs13132549>.
20. Yin H., Brandão A., Buchner J., Helmers D., Iuliano B.G., Kimambo N.E., Lewińska K.E., Razenkova E., Rizayeva A., Rogova N., Spawn S.A., Xie Y., Radeloff V.C. Monitoring cropland abandonment with Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 246. 111873. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111873>.