

Анализ спектрально-отражательных свойств залежных земель Среднерусской лесостепи по данным Sentinel-2

Э.А. Терехин¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Федерально-региональный центр аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов, 308015, Россия, г. Белгород, ул. Победы, д. 85

Аннотация

В статье изложены результаты анализа спектральной отражательной способности залежных земель, типичных для лесостепи, на основе спутниковых данных Sentinel-2. Исследование проведено для участков постагрогенных ландшафтов, расположенных на территории Центрального Черноземья. Установлено, что тип древесной растительности, формирующейся на залежах (лиственная, смешанная, хвойная), оказывает статистически значимое влияние на отражательную способность в большинстве каналов Sentinel-2. Во многих из них наблюдаются значимые различия между залежами с лиственными и хвойными породами деревьев. Для угодий со смешанной древесной растительностью значимых отличий от остальных типов залежей не выявлено. Спектрально-отражательные характеристики залежей в большинстве каналов Sentinel-2 находятся в обратной зависимости от величины их лесистости. Для оставленных аграрных земель со всеми типами древесной растительности наиболее тесная корреляция лесистости и спектрально-отражательных характеристик выявлена в каналах красного и среднего инфракрасного диапазонов спектра. В этих же каналах наблюдаются статистически значимые различия между большинством градаций лесистости залежей. Установленные закономерности выступают основанием для использования красного (B4) и SWIR-каналов (B11, B12) для решения задач, связанных с оценкой лесистости залежных земель.

Ключевые слова: постагрогенные ландшафты, спектрально-отражательные характеристики, обработка изображений, лесостепь, Sentinel-2.

Цитирование: Терехин, Э.А. Анализ спектрально-отражательных свойств залежных земель Среднерусской лесостепи по данным Sentinel-2 / Э.А. Терехин // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 306-313. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1160.

Citation: Terekhin EA. Spectral reflectance analysis of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe using Sentinel-2 satellite data. Computer Optics 2023; 47(2): 306-313. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1160.

Введение

Залежные земли, т.е. участки пашни, выведенные из аграрного использования, получили определенное распространение в ряде регионов, в том числе и Среднерусской лесостепи на территории Центрального Черноземья. Прекращение обработки обуславливает развитие на них восстановительных сукцессий [1, 2], включая процессы зарастания древесно-кустарниковой растительностью [3, 4]. В этой связи исследование их состояния необходимо для получения представлений о региональных тенденциях изменений растительного покрова и для дальнейшего использования таких угодий [5].

На отражательные свойства залежей могут оказывать влияние их возраст [6, 7], т.е. стадия сукцессии, зональные особенности естественной растительности, которая формируется на оставленных землях после прекращения распашки. Спектрально-отражательные признаки залежных земель, включая некоторые вегетационные индексы, могут выступать независимыми переменными на входе моделей автоматизированного

распознавания типов землепользования [8, 9, 10] и оставленных аграрных угодий. Во многих случаях они применяются в способах, использующих методы машинного обучения, например SVM (support vector machine) или Random forest [11, 12], подходах, применяющих многомерный анализ [13].

Использование рядов спектрально-отражательных характеристик, в первую очередь, NDVI, создаваемых на основе снимков высокой периодичности (MODIS), выступает основой для изучения сезонной динамики растительного покрова залежных земель [6], т.к. дает возможность формирования серий из порядка полутора десятков и более измерений за период вегетации. Многолетние ряды вегетационного индекса в сравнении с одиночными изображениями позволяют учесть вариабельность спектрально-отражательных свойств залежей и обрабатываемых земель, что может быть использовано для автоматизированного картографирования оставленных аграрных угодий [9]. С другой стороны, возможности вегетационных индексов, рассчитанных по информационным продуктам, создаваемым на основе снимков MODIS,

ограничены их относительно невысоким пространственным разрешением.

Снимки более высокого пространственного разрешения, например, Landsat, наиболее широко применяющиеся для ретроспективных исследований землепользования [14], позволяют более объективно анализировать отражательную способность залежей, но вследствие относительно невысокой частоты получения не предоставляют возможности формирования длинных временных рядов за периоды вегетации.

Применение данных различного пространственного разрешения и периодичности получения позволяет компенсировать ограничения снимков с отдельных сенсоров [8]. Вместе с этим использование таких подходов часто требует предварительной оценки информационных возможностей анализируемых спутниковых изображений, в частности, изучения влияния различных факторов на отражательную способность угодий.

Анализ спутниковых данных с определенных спутниковых сенсоров выступает ключевой задачей при исследовании лесовозобновления на залежных землях, оценке формирования на них древесно-кустарниковой растительности [15]. В значительной степени это относится к новым типам спутниковых изображений, которые имеют значительные перспективы для исследования различных типов земельных угодий. Они обусловлены сочетанием высокого пространственного и радиометрического разрешения, значительного числа спектральных диапазонов [16, 17, 18].

Данные дистанционного зондирования, получаемые со спутников Sentinel-2 (MSI, MultiSpectral Instrument), являются одним из современных типов регулярно получаемой спутниковой информации, возможности которой могут быть использованы для оценки характеристик земельных угодий и залежных земель. Вместе с этим их применение для мониторинга земельных угодий обуславливает необходимость изучения возможностей при анализе конкретных видов земель и их характеристик [19, 20]. В случае залежных земель остаются актуальными вопросы информативности каналов Sentinel-2 для определения типов древесной растительности, формирующихся на оставленных аграрных угодьях, влияния их лесистости (величины проективного покрытия древесной растительностью) на спектрально-отражательные свойства.

Снимки содержат 12 каналов в различных диапазонах спектра с пространственным разрешением от 10 до 60 м, включающих видимую и инфракрасную область [21]. Одновременно они характеризуются достаточно высоким пространственным и радиометрическим разрешением, что позволяет на их основе анализировать спектрально-отражательные свойства отдельных угодий. Соответствующие возможности снимков представляют интерес для оценки влияния характеристик постагрогенных ландшафтов на отра-

жательные свойства и анализа их возможностей для изучения растительного покрова.

Цель исследования состояла в оценке информационных возможностей спутниковых данных Sentinel-2 для изучения характеристик залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, на территории Центрального Черноземья Орловской области.

Задачи исследования включали: 1) сравнение спектральной отражательной способности залежей и элементов естественных ландшафтов региона: лесов и овражно-балочных систем; 2) изучение отражательных характеристик залежей с различными типами древесной растительности (лиственной, хвойной, смешанной); 3) анализ влияния лесистости залежных земель на их спектральную отражательную способность в различных каналах Sentinel-2.

1. Материалы и методы

Исследование спектрально-отражательных характеристик естественных и постагрогенных ландшафтов проведено на основе выборки угодий, расположенных на территории Центрального Черноземья.

Для анализа отражательных характеристик отобрано 4 изображения (тайла) Sentinel-2 уровня обработки L1C, полученных в летний период 2019 г. (табл. 1).

Табл. 1. Характеристики изображений Sentinel-2, используемых для анализа спектральной отражательной способности залежных земель

Номер тайла	Дата получения	Спутник
T37UCV	20.08.2019	SENTINEL-2B
T37UCT	20.08.2019	SENTINEL-2B
T37UDS	07.08.2019	SENTINEL-2B
T37UFS	30.08.2019	SENTINEL-2A

Снимки для анализа подбирали таким образом, чтобы они охватывали репрезентативное число залежей с различными типами древесной растительности (лиственная, хвойная, смешанного состава). Для корректного анализа отражательных характеристик объектов, расположенных в разных частях региона, все снимки были выбраны на близкие сроки периода вегетации – август, который являлся наиболее безоблачным месяцем в году. Снимки прошли предварительную обработку в программе SNAP (модуль Sen2Cor), в результате которой они были пересчитаны из уровня L1C в уровень L2A. Изображения этого уровня обработки включают значения отражательной способности земной поверхности на нижней границе атмосферы (Bottom Of Atmosphere).

Объекты исследования подбирали на основе снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м/пиксель), полученных из интернет-сервисов открытого доступа, преимущественно Google Earth. Выявляемые участки залежных земель отбирали таким образом, чтобы они репрезентативно представляли угодья с

древесной растительностью из лиственных и хвойных пород, а также смешанного породного состава.

На каждую залежь должен был быть доступен снимок сверхвысокого пространственного разрешения 2019 г. На его основе определялась фактическая лесистость. Она в исследовании оценивалась как величина проективного покрытия древесной растительностью и измерялась от 0 до 1 или от 0 до 100%. Оценка лесистости осуществлялась в пределах предварительно оцифрованного контура каждого оставленного аграрного угодья.

В аналитическую выборку включали залежи с разной величиной лесистости по состоянию на анализируемую дату. Это условие выполнялось для участков постагрогенных ландшафтов с разными типами древесной растительности. Конец второго десятилетия XXI в. выбран для анализа в связи с тем, что на эти сроки выполнялся ряд условий, позволивших решить задачи исследования. На это время на анализируемую территорию были доступны снимки сверхвысокого пространственного разрешения, позволившие оценить фактическую лесистость залежей. Вместе с этим на нее на эти сроки было доступно покрытие снимков Sentinel-2 (пример на рис. 1), на основе которых оценивались спектрально-отражательные характеристики залежей и элементов естественных ландшафтов.

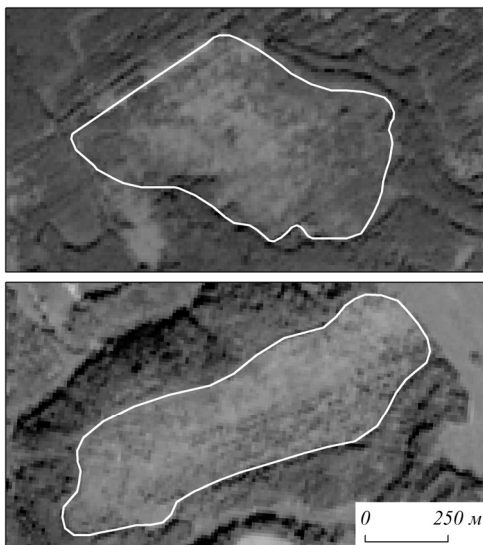


Рис. 1. Примеры залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, на снимках Sentinel-2

На первом этапе экспериментального исследования осуществлено количественное сравнение спектральной отражательной способности залежных земель и участков естественных ландшафтов. В Среднерусской лесостепи к ним относятся лесные массивы и участки овражно-балочной сети. Наиболее широко в Центральном Черноземье представлены широколиственные леса, но в некоторых частях распространены сосновые и смешанные лесные массивы, которые также были включены в анализ. В участках

овражно-балочной сети сконцентрирована основная часть естественных травянистых участков региона, но в них также представлены и лиственные леса. В конце второго десятилетия XXI в. средняя лесистость овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи составляла около 45%.

Таким образом, было проведено сравнение спектрально-отражательных характеристик залежей со следующими типами угодий: лиственные леса, хвойные леса, смешанные лесные массивы, овражно-балочные системы. При формировании аналитической выборки стремились подбирать сомкнутые средневозрастные лесные массивы. Отбор объектов осуществляли методом совместного анализа снимков Sentinel-2 и снимков сверхвысокого пространственного разрешения. В общей сложности для сравнения с залежами было отобрано 126 лиственных лесных массивов, 30 смешанных, 28 хвойных лесов и 28 участков овражно-балочных систем. Выборка залежных земель включала 142 объекта суммарной площадью 5720,7 га, которые были использованы в том числе на следующих этапах исследования для оценки спектральной отражательной способности залежей с разными типами древесной растительности. Выборка содержала 71 угодье с древесной растительностью из лиственных пород, 30 угодий с хвойными породами и 41 залежь со смешанными лесными насаждениями. Средняя лесистость изученных залежных земель составляла 36% и охватывала значения от минимальных до максимальных величин.

Для всех выявленных участков естественных и постагрогенных ландшафтов методом ручной оцифровки с использованием геоинформационных средств была подготовлена векторная основа, к которой была присоединена информация об их параметрах.

Оценка спектрально-отражательных характеристик естественных ландшафтов и залежных земель осуществлена в 9 каналах MSI: B2 (Blue), B3 (Green), B4 (Red), B5-7 (Vegetation Red Edge), B8A (NIR), B11-12 (SWIR). Все каналы были приведены к одному пространственному разрешению, 20 м, для корректного сравнения спектрально-отражательных характеристик рассчитанных по ним. Они измерялись в безразмерных коэффициентах спектральной яркости (КСЯ). Их расчет для конкретных объектов выполнен методом зональной статистики, т.е. значение отражательной способности вычисляли в пределах векторного контура, наложенного на космический снимок. Таким образом, для каждого угодья были известны сведения о его фактических параметрах и значениях отражательной способности в различных зонах спектра.

Этап статистической обработки включал: 1) количественное сравнение спектрально-отражательных характеристик залежей и элементов естественных ландшафтов; 2) изучение спектрально-отражательных свойств залежей с лиственной, хвойной и смешанной древесной растительностью; 3) анализ влияния леси-

стости залежных земель на их спектральную отражательную способность в различных каналах Sentinel-2.

2. Результаты

Участки оставленных аграрных земель по коэффициентам спектральной яркости (КСЯ) в каналах зеленого (B3), красного (B4), крайнего красного (B5) и SWIR2-диапазонов (B12) Sentinel-2 занимают преимущественно промежуточное положение между лесными массивами и участками овражно-балочных систем (пример – на рис. 2).

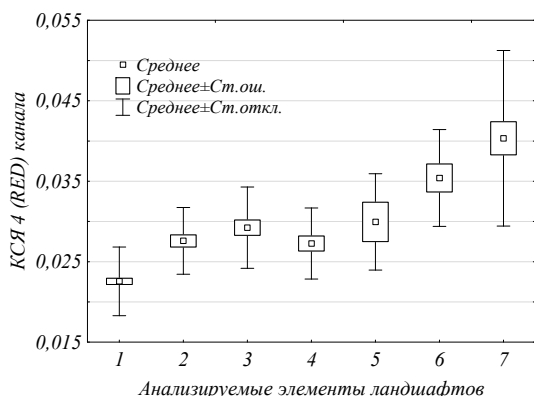


Рис. 2. Параметры отражательной способности в 4-м канале Sentinel-2: 1 – лиственный лес, 2 – смешанный лес, 3 – хвойный лес, 4 – залежи с лиственными породами, 5 – залежи со смешанной древесной растительностью, 6 – залежи с хвойными породами, 7 – участки овражно-балочной сети

В синем канале (B2) различия по отражательной способности между анализируемыми элементами ландшафтов незначительны. В каналах зеленого (B3) и красного (B4) диапазонов отражательная способность залежей, как правило, выше, чем у лесных массивов, но ниже, чем у овражно-балочных систем. В каналах крайнего красного (B5) и SWIR-диапазонов (B11, B12) наблюдается примерно аналогичная ситуация, но в ряду «лиственные – смешанные – хвойные» для лесов и для залежей в отличие от участков видимого диапазона происходит не увеличение, а снижение отражательной способности.

Для овражно-балочных систем во всех диапазонах спектра, кроме крайней красной и ближней инфракрасной области (каналы B6, B7, B8A), характерны более высокие коэффициенты спектральной яркости, чем для залежей всех типов и лесных массивов. Для корректного сопоставления спектрально-отражательных свойств лесов и залежей использованы оставленные аграрные угодья с лесистостью выше 60%. Соответствующий порог выбран для того, чтобы ключевое влияние на их отражательные свойства оказывала древесная, а не травянистая растительность, также присутствующая на них.

В диапазонах Sentinel-2 от крайнего красного (B5) до SWIR1-диапазона (B11) наблюдается повышение степени различий залежей от элементов естественных

ландшафтов по спектральной отражательной способности (табл. 2). Оно установлено по результатам дисперсионного анализа и его непараметрического аналога теста Краскела–Уоллиса. Уровень значимости для всех величин, представленных в табл. 2, многократно меньше 0,05.

Табл. 2. Параметры различий залежей и элементов естественных ландшафтов (лесов и овражно-балочных систем) по отражательной способности в диапазонах Sentinel-2

Канал	Критерий Фишера	Критерий Краскела–Уоллиса
B2	10,6	50,0
B3	16,9	60,5
B4	45,4	122,5
B5	39,4	96,6
B6	45,0	113,0
B7	53,1	126,7
B8A	62,2	127,9
B11	151,4	162,4
B12	130,5	125,7

Наибольшие и при этом статистически значимые отличия залежей от остальных элементов естественных ландшафтов лесостепи (лесов и овражно-балочных систем) по результатам попарного сравнения их отражательных характеристик, осуществленного методом наименьшей существенной разности, зафиксированы в 11-м (SWIR1) канале Sentinel-2. Наименьшие отличия спектральной отражательной способности залежей от изученных угодий выявлены во 2-м (синем) канале.

Тип древесной растительности (лиственная, хвойная, смешанная), присутствующей на участках залежных земель, оказывает статистически значимое влияние на их отражательные характеристики в каналах B2 (синий), B4 (красный), B6, B7 (крайние красные), B8A (NIR), B11 (SWIR1) (табл. 3).

Табл. 3. Параметры значимости различий залежей с лиственной, хвойной и смешанной древесной растительностью по спектральной отражательной способности в диапазонах Sentinel-2

Канал	Критерий Фишера		Критерий Краскела–Уоллиса	
	Значение	Уровень значимости	Значение	Уровень значимости
B2	3,32	0,05	4,0	0,13
B3	0,29	0,75	0,6	0,74
B4	7,31	0,00	9,5	0,00
B5	2,18	0,13	4,5	0,10
B6	15,57	0,00	15,3	0,00
B7	13,68	0,00	14,6	0,00
B8A	18,40	0,00	17,9	0,00
B11	10,83	0,00	12,3	0,00
B12	0,05	0,95	0,3	0,85

В каналах B3 (зеленый), B5 (крайний красный) и B12 (SWIR2) статистически значимых различий между залежами с различными типами древесной расти-

тельности по спектральной отражательной способности не выявлено.

В Среднерусской лесостепи вследствие разной скорости сукцессионных процессов [18] характерны залежи с различной современной величиной проективного покрытия древесной растительностью или лесистости, которая для одновозрастных 20-летних залежей варьируется от 10–20% на юге (Воронежская область) до 70–80% на северо-западе Орловской области.

Для объективной оценки влияния типа древесной растительности (лиственная, хвойная, смешанная) на отражательную способность, так же как и при сравнении залежей с элементами естественных ландшафтов, оценки выполнены для угодий с лесистостью, составляющей более 60%.

Различия в породном составе древесной растительности по-разному оказывают влияние на отражательную способность залежей в диапазонах Sentinel-2. Каналы MSI можно разделить на несколько категорий по этому критерию.

В каналах видимого диапазона (2, 4) отражательная способность залежных земель, отличающихся по типу древесной растительности, растет в ряду «лиственные – смешанные – хвойные» (пример – на рис. 3).

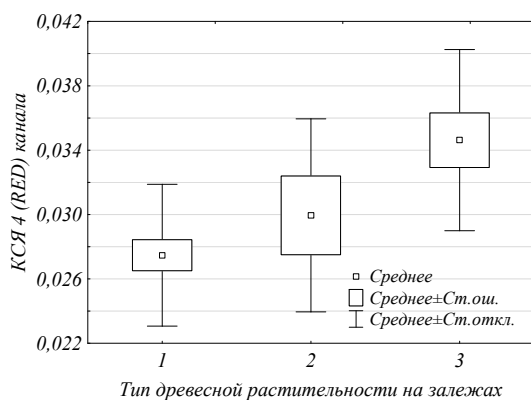


Рис. 3. Параметры отражательной способности в канале 4 для залежей с лиственной (1), смешанной (2) и хвойной (3) древесной растительностью

В каналах крайней красной и инфракрасной областей 6, 7, 8A, 11 в этом же ряду отражательная способность залежей снижается (пример – рис. 4). В обоих случаях участки постагрогенных ландшафтов со смешанной древесной растительностью занимают промежуточное положение между залежами, на которых формируется растительность лиственного или хвойного породного состава.

В остальных каналах Sentinel-2 закономерностей изменения спектральной отражательной способности залежей в ряду «лиственные – смешанные – хвойные» не выявлено.

Разнонаправленное изменение спектрально-отражательных характеристик залежных земель с лиственной и хвойной древесной растительностью в красном (B4) и ближнем инфракрасном (B8A) диапа-

зонах спектра выступает индикатором перспективного использования их математических преобразований (вегетационных индексов) для изучения возможностей автоматизированного разделения разных типов оставленных аграрных земель. Вместе с этим, учитывая разнообразие вегетационных индексов, оно требует отдельного исследования.

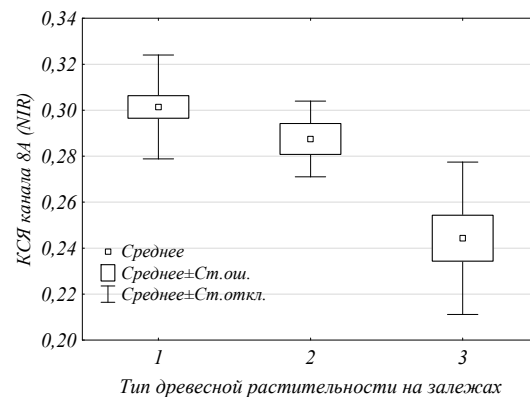


Рис. 4. Параметры отражательной способности в канале 8A для залежей с лиственной (1), смешанной (2) и хвойной (3) древесной растительностью

По результатам попарного сравнения различий отражательных характеристик залежей, проведенного методом наименьшей существенной разности (НСР), установлено, что статистически значимые различия между залежами с лиственной и хвойной древесной растительностью присутствуют в каналах 4 (Red), 6, 7 (Red edge), 8A (NIR), 11 (SWIR). Статистически значимые различия залежей с хвойной и смешанной древесной растительностью выявлены в каналах 6, 7 (Red edge), 8A (NIR) и 11 (SWIR). Статистически значимых различий между залежами с лиственной и смешанной древесной растительностью во всех изученных каналах Sentinel-2 не выявлено.

Таким образом, с одной стороны, залежи с лиственными и хвойными породами деревьев достаточно существенно отличаются друг от друга по спектрально-отражательным характеристикам во многих каналах Sentinel-2. При наличии на исследуемой территории только таких типов залежей установленные особенности можно было бы использовать для разработки методов их автоматизированного распознавания. С другой стороны, отсутствие статистически значимых различий залежей со смешанными древесными сообществами и залежей с лиственными породами деревьев будет осложнять разработку способов их автоматизированного разделения.

Спектрально-отражательные свойства оставленных аграрных земель в большинстве каналов Sentinel-2 характеризуется достаточно высокой, статистически значимой силой связи с их лесистостью.

Для залежей, на которых формируется древесная растительность из лиственных пород, наиболее тесная корреляция с лесистостью выявлена для отражательной способности в каналах B4 (Red), B11 и B12

(SWIR) (табл. 4). Все коэффициенты корреляции статистически значимы.

Табл. 4. Корреляция между лесистостью залежей и спектрально-отражательными характеристиками по Sentinel-2. Залежи с лиственными породами

Коэффициент корреляции	Каналы Sentinel-2			
	B2	B3	B4	B5
Пирсона	-0,82	-0,85	-0,92	-0,84
Спирмена	-0,85	-0,83	-0,93	-0,76
Коэффициент корреляции	Каналы Sentinel-2			
	B7	B8A	B11	B12
Пирсона	0,62	0,63	-0,93	-0,91
Спирмена	0,69	0,70	-0,90	-0,93

Спектрально-отражательные свойства залежных земель, на которых формируется древесная растительность из хвойных пород, характеризуются высокой корреляцией (табл. 5) с лесистостью в участках зеленого, красного и SWIR-диапазонов спектра (уровень значимости - 0,05).

Табл. 5. Корреляция между лесистостью залежей и спектрально-отражательными характеристиками по Sentinel-2. Залежи с хвойными породами

Коэффициент корреляции	Каналы Sentinel-2			
	B2	B3	B4	B5
Пирсона	-0,68	-0,81	-0,95	-0,92
Спирмена	-0,64	-0,79	-0,94	-0,91
Коэффициент корреляции	Каналы Sentinel-2			
	B7	B8A	B11	B12
Пирсона	0,38	0,30	-0,96	-0,93
Спирмена	0,32	0,27	-0,93	-0,91

В каналах B7 (Red edge) и B8A (NIR) корреляции спектральной отражательной способности с лесистостью статистически незначимы.

Для залежей с древесной растительностью смешанного породного состава (табл. 6), так же как и для залежей с лиственными породами, статистически значимые корреляции с лесистостью характерны во всех изученных каналах Sentinel-2. Наиболее тесная корреляция выявлена в инфракрасной области (SWIR).

Табл. 6. Корреляция между лесистостью залежей и спектрально-отражательными характеристиками. Залежи со смешанной древесной растительностью

Коэффициент корреляции	Каналы Sentinel-2			
	B2	B3	B4	B5
Пирсона	-0,71	-0,80	-0,83	-0,84
Спирмена	-0,72	-0,79	-0,80	-0,83
Коэффициент корреляции	Каналы Sentinel-2			
	B7	B8A	B11	B12
Пирсона	0,65	0,65	-0,86	-0,87
Спирмена	0,63	0,64	-0,83	-0,85

Общей особенностью всех типов залежных земель является положительная корреляция с лесистостью в каналах B7 (Red Edge) и B8A (NIR) и отрицательная корреляция с ней в каналах B2 (синий), B3 (зеленый), B4, B5 (красные), B11, B12 (SWIR).

Во всех случаях спектрально-отражательные характеристики залежных земель показали наиболее высокую корреляцию с лесистостью залежей в красном (B4) и SWIR (B11, B12) каналах Sentinel-2.

Лесистость залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи в конце второго десятилетия XXI в., варьируется от минимальных до максимальных величин, что также было отражено в анализируемой выборке (рис. 5).

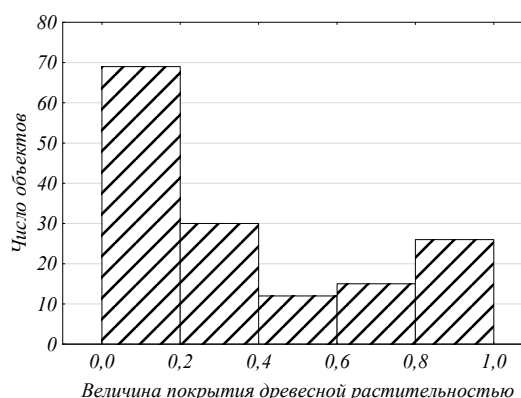


Рис. 5. Распределение изученных залежных земель по величине покрытия древесной растительностью

Оценка коэффициентов спектральной яркости залежных земель с древесной растительностью лиственного породного состава, выполненная для отдельных градаций лесистости (0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8; 0,8-1), показала, что в диапазонах B4, B11, B12 наблюдаются статистически значимые различия между большинством из них. Они наглядно проявляются при графическом анализе (рис. 6-7).

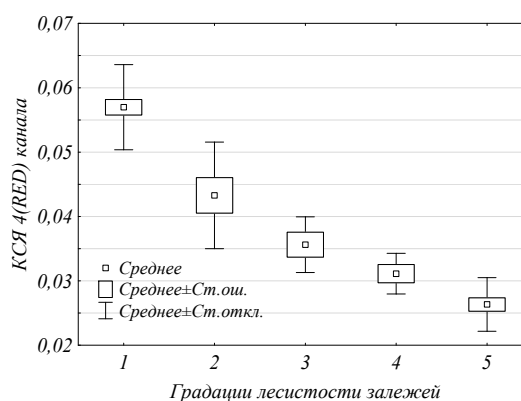


Рис. 6. Параметры отражательной способности в канале 4 (RED) для градаций лесистости залежей с лиственными породами деревьев. 1) 0-0,2; 2) 0,2-0,4; 3) 0,4-0,6; 4) 0,6-0,8; 5) 0,8-1,0

Установленные статистически значимые различия по отражательной способности между градациями

лесистости залежных земель могут быть использованы для индикации участков постагрогенных ландшафтов, находящихся на разных стадиях восстановительных сукцессий.

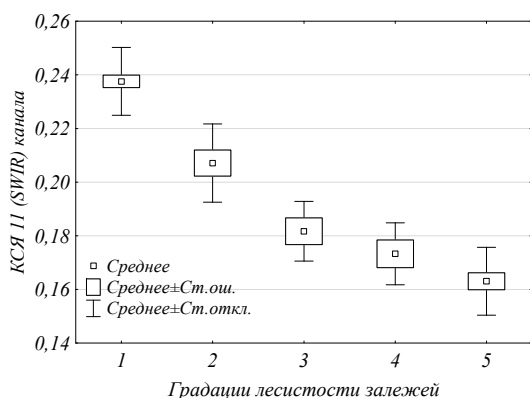


Рис. 7. Параметры отражательной способности в канале 11 (SWIR) для градаций лесистости залежей с лиственными породами деревьев. 1) 0–0,2; 2) 0,2–0,4; 3) 0,4–0,6; 4) 0,6–0,8; 5) 0,8–1,0

Из рис. 6 и 7 видно, что наиболее существенные различия наблюдаются между градациями лесистости 0–0,2 и 0,2–0,4, т.е. на первых этапах распространения древесной растительности на участках постагрогенных ландшафтов.

Статистически значимые отличия отсутствуют только между 4-й (0,6–0,8) и 5-й (0,8–1,0) градациями лесистости постагрогенных ландшафтов.

Первая градация лесистости залежей (0–0,2), соответствующая начальным стадиям их зарастания древесной растительностью, по спектрально-отражательным характеристикам статистически значимо отличается от всех остальных градаций во всех изученных диапазонах Sentinel-2.

Для участков постагрогенных ландшафтов с хвойными породами деревьев статистически значимые взаимные различия между большинством градаций лесистости установлены в каналах B4 (Red), B5 (Red edge), B11, B12 (SWIR). При этом в канале B11 (SWIR), так же как и для участков постагрогенных ландшафтов с древесной растительностью из лиственных пород, статистически значимые взаимные различия наблюдаются между всеми градациями лесистости залежных земель.

Для участков постагрогенных ландшафтов с древесной растительностью смешанного породного состава наиболее существенные различия между большинством градаций лесистости выявлены в канале B4 и в SWIR-каналах B11, B12.

Общей характеристикой залежных земель со всеми типами древесной растительности является наиболее значительное влияние лесистости на спектрально-отражательные свойства в каналах B4 B11 и B12 Sentinel-2. По мере увеличения лесистости залежей во всех этих диапазонах происходит последова-

тельное снижение отражательной способности угодий.

Высокие корреляции спектрально-отражательных характеристик обозначенных диапазонов с лесистостью постагрогенных ландшафтов и статистически значимые различия отражательной способности между ее отдельными градациями выступают основанием для применения каналов Sentinel-2 (B4) и SWIR (B11, B12) в решении задач, связанных с моделированием лесистости залежей.

Заключение

Залежные земли Среднерусской лесостепи с лесистостью выше 60% по отражательной способности, измеренной на основе данных Sentinel-2, в диапазонах зеленого, красного и SWIR-излучения, занимают промежуточное положение между элементами естественных ландшафтов региона: лесами и участками овражно-балочной сети. Наибольшие и при этом статистически значимые различия залежей от участков естественных ландшафтов выявлены в 11-м канале Sentinel-2.

Оценка информационных возможностей спутниковых данных Sentinel-2 для анализа характеристик залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, показала, что тип древесной растительности (лиственная, хвойная) и величина лесистости залежей оказывают статистически значимое влияние на отражательные свойства в спектральных диапазонах прибора MSI. В большинстве каналов выявлены статистически значимые различия по отражательной способности для участков постагрогенных ландшафтов с лиственными и хвойными породами. Залежи со смешанной древесной растительностью в большинстве случаев не отличаются по спектрально-отражательным характеристикам от остальных типов залежных земель.

Величина лесистости для залежей со всеми типами древесной растительности оказывает наиболее сильное влияние на отражательную способность в каналах красного участка спектра (канал 4) и каналах SWIR-диапазона (каналы 11, 12). Положительная связь между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками типична для каналов крайнего красного и ближнего инфракрасного участков спектра (7 и 8А). В остальных каналах наблюдается обратная связь лесистости постагрогенных ландшафтов и их спектральной отражательной способности.

Для отражательных характеристик красного (канал 4, RED) и среднего инфракрасного (канал 11, SWIR) каналов MSI характерны статистически значимые взаимные различия между большинством градаций лесистости залежных земель. Выявленные закономерности могут быть использованы для разработки подходов к количественной оценке характери-

стик постарогенных ландшафтов лесостепи на основе их спектрально-отражательных свойств.

Благодарности

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

References

- [1] Goleusov PV, Lisetskii FN. Soil reproduction in anthropogenic landscapes of forest-steppe [In Russian]. Moscow: GEOS Publisher; 2009.
- [2] Kurganova IN, Telesnina VM, Lopes de Gerenyu VO, Lichko VI, Karavanova EI. The dynamics of carbon pools and biological activity of retic albic podzols in southern taiga during the postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Sci* 2021; 54(3): 337-351. DOI: 10.1134/S1064229321030108.
- [3] Sorokina OA. Diagnostic parameters of soil formation in gray forest soils of abandoned fields overgrowing with pine forests in the middle reaches of the Angara River. *Eurasian Soil Sci* 2010; 43(8): 867-875. DOI: 10.1134/S1064229310080041.
- [4] Ershov DV, Gavriluyk EA, Koroleva NV, et al. Natural afforestation on abandoned agricultural lands during post-soviet period: A comparative landsat data analysis of bordering regions in Russia and Belarus. *Remote Sens* 2022; 14(2): 322. DOI: 10.3390/rs14020322.
- [5] Ivanov AI, Ivanova ZhA, Sokolov IV. Secondary development of unused land. *Russ Agric Sci* 2020; 46(3): 274-278. DOI: 10.3103/S1068367420030076.
- [6] Terekhin EA. Satellite-based estimation of successional processes on abandoned farmland of south Central Russian Upland [In Russian]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 2019; 16(6): 180-193. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193.
- [7] Sajb EA, Bezborodova AN, Solov'ev SV, Miller GF, Filimonova DA. Identification of different age fallows on erosion-hazardous territories of the south of Western Siberia using geo-information technologies [In Russian]. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa* 2020; 17(4): 129-136. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-129-136.
- [8] Kumar S, Arya S, Jain K. A SWIR-based vegetation index for change detection in land cover using multi-temporal Landsat satellite dataset. *Int J Inf Technol* 2022; 14(4): 2035-2048. DOI: 10.1007/s41870-021-00797-6.
- [9] Yin H, Brandão A, Buchner J, et al. Monitoring cropland abandonment with Landsat time series. *Remote Sens Environ* 2020; 246: 111873. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142651.
- [10] Zhu X, Xiao G, Zhang D, Guo L. Mapping abandoned farmland in China using time series MODIS NDVI. *Sci Total Environ* 2021; 10(755): 142651. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142651.
- [11] He S, Shao H, Xian W, Zhang S, Zhong J, Qi J. Extraction of abandoned land in hilly areas based on the spatio-temporal fusion of multi-source remote sensing images. *Remote Sens* 2021; 13(19): 3956. DOI: 10.3390/rs13193956.
- [12] Estel S, Kuemmerle T, Levers C, Baumann M, Hostert P. Mapping cropland-use intensity across Europe using MODIS NDVI time series. *Environ Res Lett* 2016; 11(2): 024015. DOI: 10.1088/1748-9326/11/2/024015.
- [13] Grădinaru SR, Kienast F, Psomas A. Using multi-seasonal Landsat imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl. *Ecol Indic* 2019; 96: 79-86. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.022.
- [14] Zhao L, Yang Q, Zhao Q, Wu J. Assessing the long-term evolution of abandoned salinized farmland via temporal remote sensing data. *Remote Sens* 2021; 13(20): 4057. DOI: 10.3390/rs13204057.
- [15] Denisova AYU, Egorova AA, Sergeev VV, Kavelenova LM. Requirements for multispectral remote sensing data used for the detection of arable land colonization by tree and shrubbery vegetation. *Computer Optics* 2019; 43(5): 846-856. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-846-856.
- [16] Koley S, Chockalingam J. Sentinel 1 and Sentinel 2 for cropland mapping with special emphasis on the usability of textural and vegetation indices. *Adv Space Res* 2022; 69(4): 1768-1785. DOI: 10.1016/j.asr.2021.10.020.
- [17] Goga T, Feranec J, Bucha T, Rusnák M, Sačkov I, Barka I, et al. A review of the application of remote sensing data for abandoned agricultural land identification with focus on Central and Eastern Europe. *Remote Sens* 2019; 11(23): 2759. DOI: 10.3390/rs11232759.
- [18] Terekhin EA. Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series. *Computer Optics* 2021; 45(2): 245-252. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
- [19] Shang R, Zhu Z, Zhang J, et al. Near-real-time monitoring of land disturbance with harmonized Landsats 7–8 and Sentinel-2 data. *Remote Sens Environ* 2022; 278: 113073. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113073.
- [20] Schwieder M, Wesemeyer M, Frantz D, et al. Mapping grassland mowing events across Germany based on combined Sentinel-2 and Landsat 8 time series. *Remote Sens Environ* 2022; 269: 112795. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112795.
- [21] Pahlevan N, Sarkar S, Franz BA, Balasubramanian SV, He J. Sentinel-2 multispectral instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. *Remote Sens Environ* 2017; 201: 47-56. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112795.

Сведения об авторе

Терехин Эдгар Аркадьевич. Кандидат географических наук (2011 г.), старший научный сотрудник федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов Белгородского государственного национального исследовательского университета. Область научных интересов: анализ данных дистанционного зондирования, геоинформационные технологии, исследование растительного покрова спутниковыми методами.

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru.

ГРНТИ: 89.57.35

Поступила в редакцию 21 мая 2022 г. Окончательный вариант – 9 декабря 2022 г.

Spectral reflectance analysis of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe using Sentinel-2 satellite data

E.A. Terekhin¹

¹ *Belgorod State University, 308015, Russia, Belgorod, Pobedy str., 85*

Abstract

The article considers the spectral response of post-agrogenic landscapes in the forest-steppe zone based on Sentinel-2 data. The study was carried out on the territory of the Central Chernozem region. The type of forest that forms on abandoned agricultural land has a statistically significant effect on the spectral response in most Sentinel-2 bands. The reflectance of abandoned lands with deciduous and coniferous species is statistically significantly different in most bands. The reflectance of abandoned lands with mixed forests does not differ statistically significantly from other types of post-agrogenic landscapes. The reflectance of abandoned lands is inversely related to their forest cover in most Sentinel-2 bands. The strongest correlation with forest cover is typical for red (Band 4) and SWIR (Band 11, 12) ranges for all post-agrogenic landscape types. In the same bands, there are statistically significant differences between most of forest cover gradations of post-agrogenic landscapes. The established patterns make it possible to use the reflectance in the red (Band 4) and SWIR MSI bands (11, 12) to assess the forest cover of post-agrogenic landscapes.

Keywords: post-agrogenic landscapes, spectral response, image processing, forest-steppe, Sentinel-2.

Citation: Terekhin EA. Spectral reflectance analysis of abandoned agricultural lands in the Central Russian forest-steppe using Sentinel-2 satellite data. *Computer Optics* 2023; 47(2): 306-313. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1160.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation under grant # 22-27-00291.

Author's information

Edgar Arkadievich Terekhin. PhD in Geography. Senior researcher, Belgorod State University, Centre for Aerospace and Ground Monitoring of Objects and Natural Resources. Research interests are satellite image processing, thematic processing of remote sensing data, GIS-technology, study of vegetation cover base on satellite images.

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru.

Received May 21, 2022. The final version – December 9, 2022.
