

## Влияние лесистости залежных земель лесостепи на спектрально-отражательные характеристики по данным Sentinel-2

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*

Влияние характеристик залежных земель на спектральный отклик выступает основой для разработки методов их исследования по данным дистанционного зондирования Земли. В работе проанализированы зависимости между лесистостью залежей, типичных для Среднерусской лесостепи, и спектрально-отражательными характеристиками в каналах Sentinel-2. Для залежей с древесной растительностью из лиственных пород наиболее выражена обратная связь между лесистостью и отражательной способностью выявлена в красном и SWIR-каналах. В каналах крайнего красного и NIR-диапазонов зависимость между лесистостью и отражательной способностью прямая, но менее выраженная. Для залежей с хвойными или смешанными лесными насаждениями наиболее тесная, статистически значимая связь лесистости и спектрального отклика установлена в каналах красного и SWIR-диапазонов. Зависимость между лесистостью и спектральным откликом залежных земель в наиболее информативных каналах Sentinel-2 криволинейна и описывается логит-функцией. Пространственный анализ лесистости залежных земель Среднерусской лесостепи и их спектрально-отражательных характеристик в красном и SWIR-диапазонах показал, что значения отражательной способности в этих каналах сенсора могут быть использованы для территориальных оценок лесистости оставленных аграрных земель, типичных для региона.

**Ключевые слова:** залежные земли, лесистость, Среднерусская лесостепь, дистанционное зондирование, Sentinel-2

Одобрена к печати: 16.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235

### Введение

Оценка состояния залежных земель, т. е. участков пашни, выведенных из аграрного использования, выступает необходимым элементом в мониторинге природной среды для многих регионов (Вараксин и др., 2012; Савин, Шишконокова, 2021; Lasanta et al., 2015), что обуславливает необходимость разработки эффективных методов их изучения (Вильданов и др., 2019; Terres et al., 2015). Залежные земли, или оставленные аграрные угодья, представляют собой элементы ландшафта, на которых протекают процессы восстановления растительного и почвенного покровов (Курганова и др., 2021; Русанов, 2012). В условиях лесной и лесостепной природных зон такие процессы часто связаны с формированием древесной растительности (Байшева, Широких, 2017; Курбанов и др., 2010; Пономарева и др., 2018; Терехин, 2019). Лесовозобновление приводит к смене облика залежных земель, а в районах их значительного распространения — и к изменению внешнего облика ландшафтов. Особенности спектрального отклика залежей выступают основой для разработки и совершенствования подходов к их индикации и оценке состояния на основе данных дистанционного зондирования Земли (Alcantara et al., 2012; Grădinaru et al., 2019; Yoon, Kim, 2020). Количественная оценка связи между характеристиками залежных земель и их спектральными отражательными свойствами открывает возможность на новом методологическом уровне подойти к оценке состояния постагрогенных ландшафтов и моделированию сукцессионных процессов, происходящих в них.

Формирование ассоциаций древесной растительности на залежных землях оказывает влияние на их спектрально-отражательные характеристики (Терехин, 2021), возможности

которых для изучения оставленных аграрных земель во многом определяются типом используемых спутниковых данных. Существенный интерес в этом плане представляет анализ современной спутниковой информации, примером которой выступают данные со спутников Sentinel-2 MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument) (Hemmerling et al., 2021; Korhonen et al., 2017; Zhang et al., 2022). Они характеризуются значительным числом спектральных диапазонов, высоким пространственным и радиометрическим разрешением, а также регулярностью получения, что позволяет формировать на их основе безоблачные покрытия на обширные территории. Перечисленные свойства снимков Sentinel-2 могут быть использованы для оценки характеристик постагрогенных ландшафтов при условии установленного влияния особенностей их растительного покрова, включая лесистость, на спектральный отклик в каналах сенсора.

Оставленные аграрные земли получили определённое распространение и на территории лесостепи в пределах Центрального Черноземья. Регион характеризуется достаточно высокой степенью распашки и распространением агроландшафтов (Трофимов и др., 2017). Залежные земли представлены одиночными угодьями или группами, характерными для некоторых частей региона. Природные условия изменяются в его пределах от северной лесостепи до степной зоны. Оценка состояния залежей, включая особенности лесовозобновления, может быть использована при изучении тенденций естественных изменений растительного покрова. Кроме того, с учётом возможного вовлечения некоторых оставленных аграрных угодий обратно в сельскохозяйственный оборот (Иванов и др., 2020), она необходима для получения актуальных представлений о состоянии их растительного покрова.

Цель работы состояла в анализе зависимостей между лесистостью залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, и особенностями их спектрального отклика в каналах Sentinel-2. Задачи исследования включали: 1) изучение связи между лесистостью залежей с разными типами лесных насаждений и отражательными характеристиками; 2) пространственный анализ спектрально-отражательных свойств залежей как индикатора их лесистости на территории региона.

## Материалы и методика исследования

Для оценки влияния лесистости залежей на спектрально-отражательные свойства по данным Sentinel-2 на территории Центрального Черноземья и Орловской обл. было осуществлено выявление залежных земель с различной величиной лесистости и разными типами лесных насаждений по состоянию на конец второго десятилетия XXI в. (2019–2020). Учитывая, что спектрально-отражательные свойства залежей с древесной растительностью из лиственных и хвойных пород различаются, аналитическую выборку формировали таким образом, чтобы она включала участки оставленных аграрных земель с разными типами формирующихся лесных насаждений: лиственными, хвойными и смешанными. Оценка влияния лесистости на спектрально-отражательные характеристики была выполнена отдельно для каждого из них.

Подбор объектов для исследования осуществлялся методом анализа космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м) 2019–2020 гг., полученных из интернет-сервисов открытого доступа, преимущественно Google Планета Земля (*англ.* Google Earth). Для залежей с лиственными, хвойными и смешанными лесными насаждениями подбиралось репрезентативное число объектов с разной величиной проективного покрытия древесной растительностью или лесистости (от 0 до 1). Она определялась для каждого угодья на основе снимков сверхвысокого пространственного разрешения. Залежные земли стремились отбирать таким образом, чтобы они были представлены во всех областях Центрально-Чернозёмного р-на и Орловской обл.

На территории региона наиболее широко представлены залежные земли с древесной растительностью из лиственных пород. В значительной меньшей степени представлены залежи с хвойными и смешанными лесными насаждениями. Аналитическая выборка, используемая для анализа связи лесистости залежей и их спектрально-отражательных характеристик, включала все типы угодий (*табл. 1*).

Таблица 1. Характеристики выявленных и изученных участков залежных земель на территории Среднерусской лесостепи

Тип лесных насаждений	Число изученных залежей	Площадь общая, га	Площадь средняя, га
Лиственные	71	2805,4	39,5
Хвойные	30	1049,5	35,0
Смешанные	41	1865,8	45,5
Всего	142	5720,7	40,3

Они располагались в пределах тайлов (фрагмент изображений) Sentinel-2 с номерами T37UCV, T37UCT, T37UDS, T37UFS. Для пространственного анализа лесистости и спектрально-отражательных характеристик залежей на территории региона использовалась более широкая выборка. Она включала залежи с древесной растительностью из лиственных пород, представленные на всей территории Центрального Черноземья. Выборка содержала 304 объекта суммарной площадью 14411,5 га. Для каждого угодья методом ручной оцифровки был подготовлен векторный контур, к которому была присоединена информация о фактических параметрах растительного покрова залежей и их спектрально-отражательных признаках.

Оценка отражательных характеристик залежных земель выполнена на основе снимков Sentinel-2 (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>), полученных в летний период 2019 г. Пространственный анализ спектрально-отражательных характеристик оставленных аграрных земель осуществлён на основе сформированного набора снимков, охватывающих территорию Центрального Черноземья, включая Орловскую обл. (табл. 2). Период августа был выбран в связи с тем, что этот месяц в регионе является одним из наиболее безоблачных в году.

Таблица 2. Характеристики снимков Sentinel-2, использованных для оценки состояния залежных земель Среднерусской лесостепи

Тайл	Дата получения	Тайл	Дата получения	Тайл	Дата получения
T37UCV	20.08.2019	T37UET	12.08.2019	T37UGU	24.08.2019
T37UCT	20.08.2019	T36UXB	25.08.2019	T37UGT	29.08.2019
T37UDS	07.08.2019	T37UCS	25.08.2019	T37UFT	12.08.2019
T37UFS	30.08.2019	T37UDU	15.08.2019	T37UES	20.08.2019
T36UXC	28.08.2019	T37UDR	01.09.2019	T36UYD	15.08.2019
T36UXD	28.08.2019	T37UFV	12.08.2019	T36UXE	22.08.2019
T37UER	22.08.2019	T37UFU	14.08.2019	T37UDT	15.08.2019

Снимки Sentinel-2 прошли атмосферную коррекцию, в процессе которой они были пересчитаны из уровня L1C в уровень L2A — значения отражательной способности на нижней границе атмосферы (англ. Bottom Of Atmosphere — BOA). Пересчёт осуществлён с помощью программы SNAP (англ. Sentinel Application Platform) в модуле Sen2Cor. Для корректного сравнения спектральной отражательной способности в разных диапазонах все каналы были приведены к одному пространственному разрешению — 20 м. Спектрально-отражательные характеристики залежных земель изучены в 9 диапазонах сенсора: Blue (синий, канал 2), Green (зелёный, канал 3), Red (красный, канал 4), Red Edge (крайний красный, каналы 5–7), NIR (англ. near infrared, ближний инфракрасный, канал 8A) и SWIR (англ. short wave infrared, коротковолновый инфракрасный, каналы 11–12). Значения отражательной способности для конкретных залежных земель были вычислены методом зональной статистики, т. е. вычисляли средние значения в пределах контура угодья, наложенного на космический снимок. Кроме средних значений также рассчитывались значения стандартных отклонений, которые были

использованы для дополнительного анализа пространственных закономерностей в лесистости залежей на территории региона.

На этапе статистического анализа для спектрально-отражательных характеристик каждого из перечисленных диапазонов были изучены особенности связи между лесистостью залежей и отражательной способностью. Для отражательных характеристик наиболее информативных диапазонов, т.е. находящихся в наибольшей зависимости от лесистости залежей, был выполнен пространственный анализ значений в пределах Центрального Черноземья по состоянию на анализируемые сроки. Пространственная интерполяция осуществлена в программе ArcGIS с использованием радиальных базисных функций. Этот метод применён в связи с наименьшей ошибкой интерполирования (Терехин, 2020).

## Результаты и их обсуждение

Участки залежных земель, типичных для Среднерусской лесостепи, характеризуются достаточно выраженными признаками на снимках Sentinel-2 в сравнении с остальными типами угодий (рис. 1) при визуальном анализе изображений.

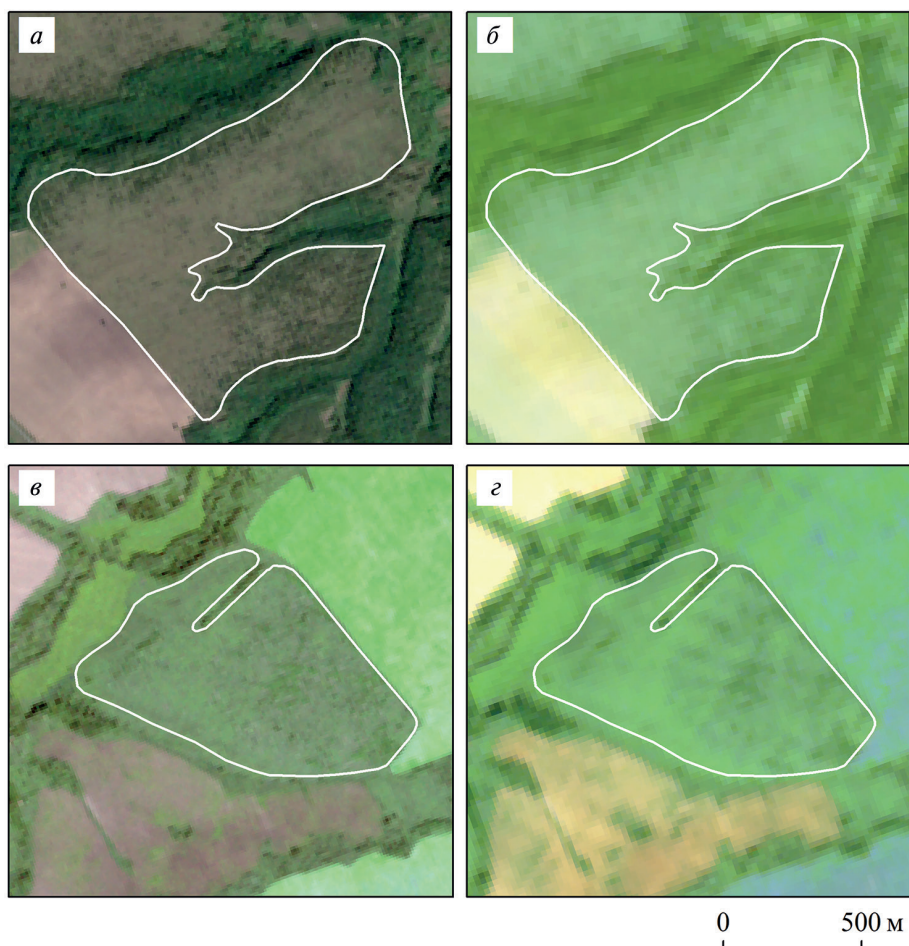


Рис. 1. Участки залежных земель Среднерусской лесостепи на снимках Sentinel-2. Синтез каналов 4-3-2 (Red-Green-Blue) (слева) и 12-11-4 (SWIR2-SWIR1-Red) (справа); а, б — Курская обл.; в, г — Орловская обл.

Процессы лесовозобновления, даже при относительно небольшой величине лесистости, просматриваются достаточно чётко, что выступает предварительным признаком её существенного влияния на спектральный отклик залежей.



Для залежных земель с лиственными лесными насаждениями в большинстве каналов видимого диапазона (B2–B5) и каналах SWIR-диапазона (B11, B12) наблюдается обратная зависимость между величиной лесистости и спектральной отражательной способностью (коэффициентами спектральной яркости — КСЯ). В каналах наиболее длинноволновой части видимого диапазона спектра (B6, B7) и ближней инфракрасной области (B8A) связь между лесистостью залежей и спектрально-отражательными характеристиками прямая. В каналах 4, 8A, 11, 12 зависимость спектрально-отражательных характеристик и лесистости залежей достаточно выраженная и при этом криволинейная (рис. 2).

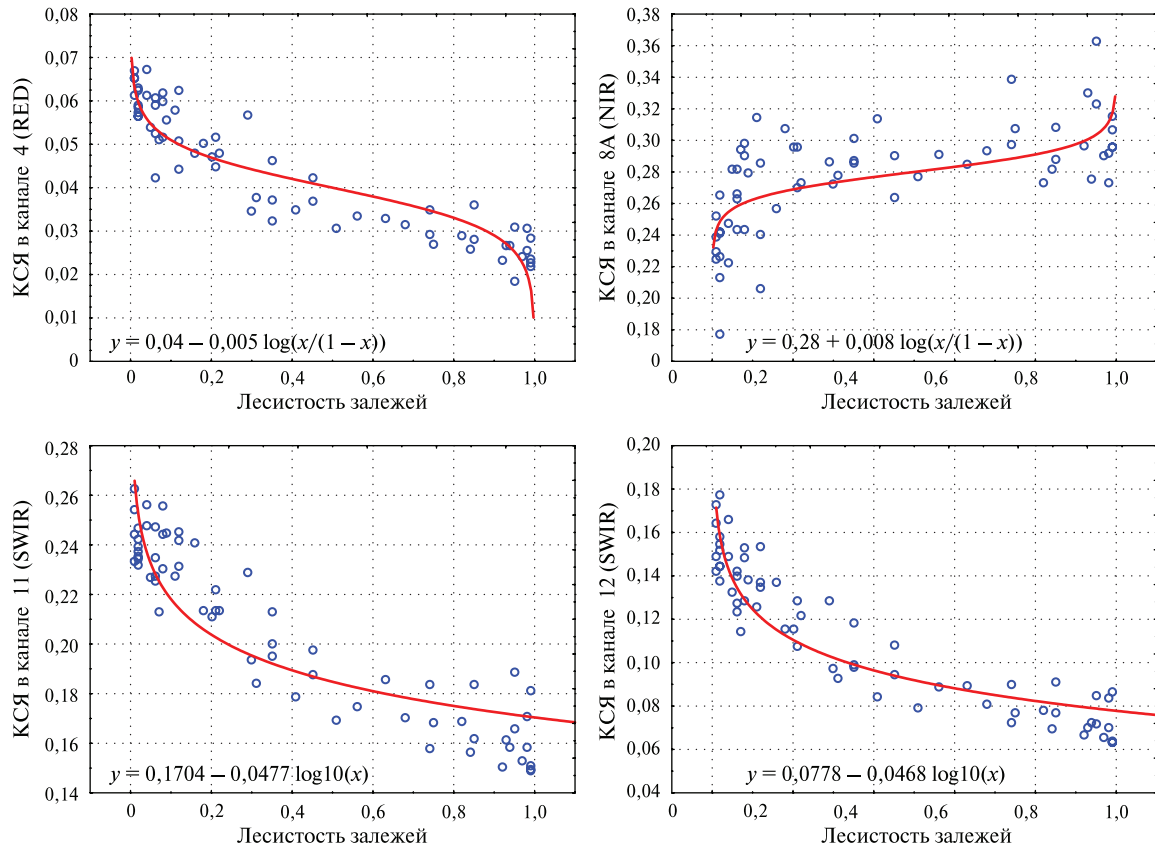


Рис. 2. Графики зависимости между лесистостью залежей и спектрально-отражательными характеристиками в каналах Sentinel-2 (залежи с лиственными породами)

Зависимость между лесистостью и отражательными характеристиками в красном, NIR- и SWIR-диапазонах наиболее полно описывается логит-функцией или логарифмической зависимостью (табл. 3) на уровне значимости 0,05. Наиболее достоверная аппроксимация связи логит-кривой характерна для спектрально-отражательных характеристик в красном канале (B4) и каналах SWIR-диапазона (B11, B12).

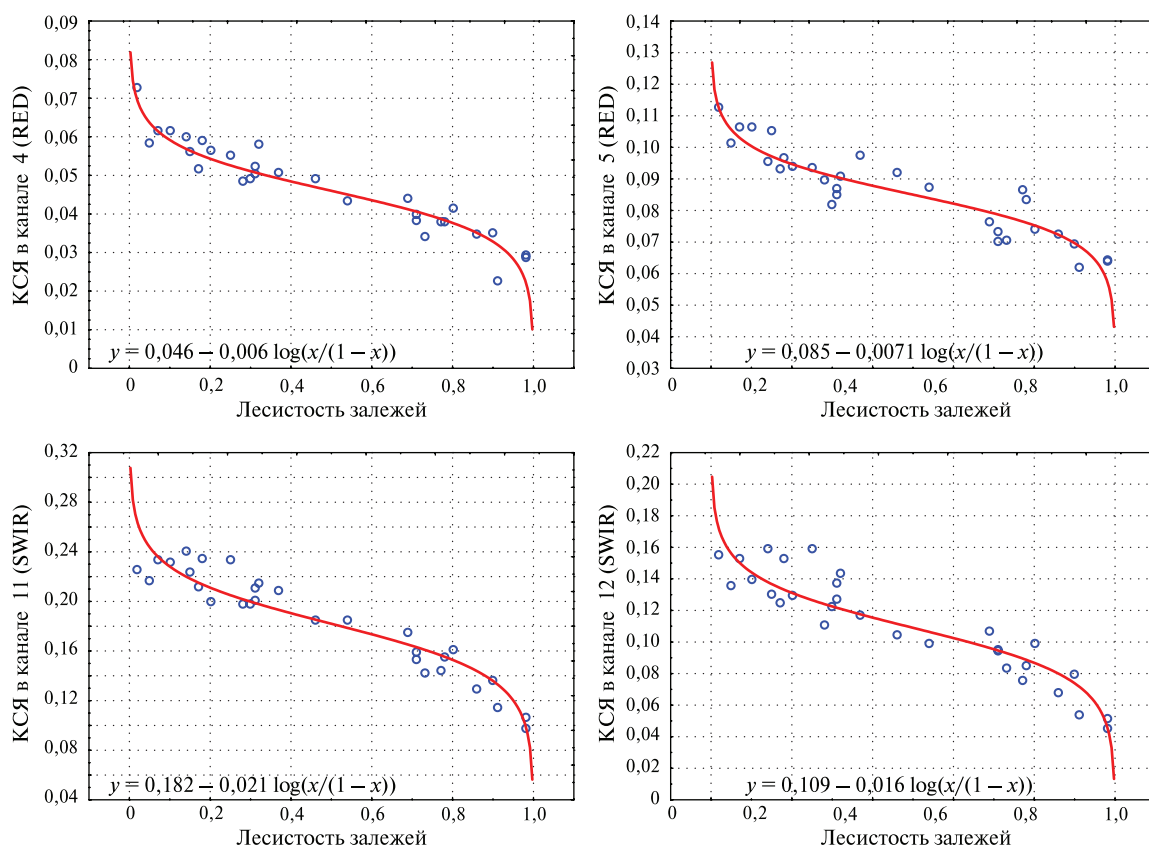
Таблица 3. Зависимости, наиболее достоверно аппроксимирующие связь между лесистостью и спектральной отражательной способностью в диапазонах Sentinel-2 для залежей с лиственными породами

Спектральный диапазон Sentinel-2	Уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$
B4 (красный)	$y = 0,040 - 0,005 \log(x/(1-x))$	0,84
B7 (Red Edge)	$y = 0,26 + 0,008 \log(x/(1-x))$	0,43
B8A (NIR)	$y = 0,28 + 0,008 \log(x/(1-x))$	0,44
B11 (SWIR)	$y = 0,20 - 0,012 \log(x/(1-x))$	0,82
B12 (SWIR)	$y = 0,10 - 0,011 \log(x/(1-x))$	0,83

В каналах синей, зелёной и части красной области спектра (B2, B3, B5) повышение лесистости залежей сопровождается снижением их отражательной способности, но эффективность аппроксимации ниже, чем в SWIR-диапазонах. Коэффициенты детерминации уравнений для каналов синего, зелёного и крайнего красного диапазонов составили соответственно 0,66; 0,72 и 0,70 на уровне значимости 0,05.

Сопоставляя полученные данные с результатами примерно аналогичных оценок (Терехин, 2020), проведённых по данным Landsat-8 OLI (*англ.* Operational Land Imager), следует отметить более высокую эффективность аппроксимации связи между лесистостью и КСЯ по данным Sentinel-2. Например, для SWIR-диапазона (11-й канал Sentinel-2) коэффициент детерминации при нелинейной аппроксимации составил 0,82, а близкий показатель по данным Landsat-8 OLI (6-й канал) — 0,74 на аналогичном уровне значимости. Несколько более высокая эффективность аппроксимации уравнений, полученных по Sentinel-2, может быть объяснена их более высоким пространственным разрешением, составляющим 20 м для SWIR-диапазонов в сравнении с разрешением 30 м у данных Landsat OLI.

Для залежных земель с хвойной древесной растительностью, так же как и для залежей с лиственными древесными породами, обратная связь с лесистостью выявлена в каналах B2–B5, B11, B12. Прямая связь с ней характерна для каналов B6, B7, B8A. Ключевым отличием залежей с хвойными породами от залежей с лиственными породами является более точная аппроксимация связи лесистости и спектрально-отражательных характеристик логит-кривой и меньший разброс значений вокруг регрессионной кривой в каналах B4, B5, B11, B12 (*рис. 3*).



*Рис. 3.* Графики зависимости между лесистостью залежных земель и спектрально-отражательными характеристиками в каналах Sentinel-2 (залежи с хвойными породами)

В каналах сенсора B6, B7, B8A в сравнении с залежами с лиственными породами, наоборот, разброс значений вокруг линии регрессии связи значительно больше. Для залежей с древесной растительностью из хвойных пород (*табл. 4*) логит-модель ещё более достоверно опи-

сывает связь между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками, чем для залежей с лиственными породами.

Таблица 4. Зависимости, наиболее достоверно аппроксимирующие связь между лесистостью и спектральной отражательной способностью в диапазонах Sentinel-2 для залежей с хвойными породами

Спектральный диапазон Sentinel-2	Уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$
B4 (красный)	$y = 0,046 - 0,006 \log(x/(1-x))$	0,90
B5 (Red Edge)	$y = 0,085 - 0,007 \log(x/(1-x))$	0,85
B11 (SWIR)	$y = 0,182 - 0,021 \log(x/(1-x))$	0,88
B12 (SWIR)	$y = 0,109 - 0,016 \log(x/(1-x))$	0,85

Для залежей с хвойными породами эффективность аппроксимации связи между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками, измеренными по данным Sentinel-2, оказалась примерно аналогичной по Landsat-8 в близких спектральных диапазонах (Терехин, 2020).

Для залежей со смешанными лесными насаждениями характерна обратная связь с лесистостью в каналах красной (B4, B5) и SWIR-областей (B11, B12). В этих диапазонах связь между ней и спектральной отражательной способностью, так же как и для залежей с лиственными и хвойными породами, достаточно полно аппроксимируется логит-моделью (рис. 4, табл. 5).

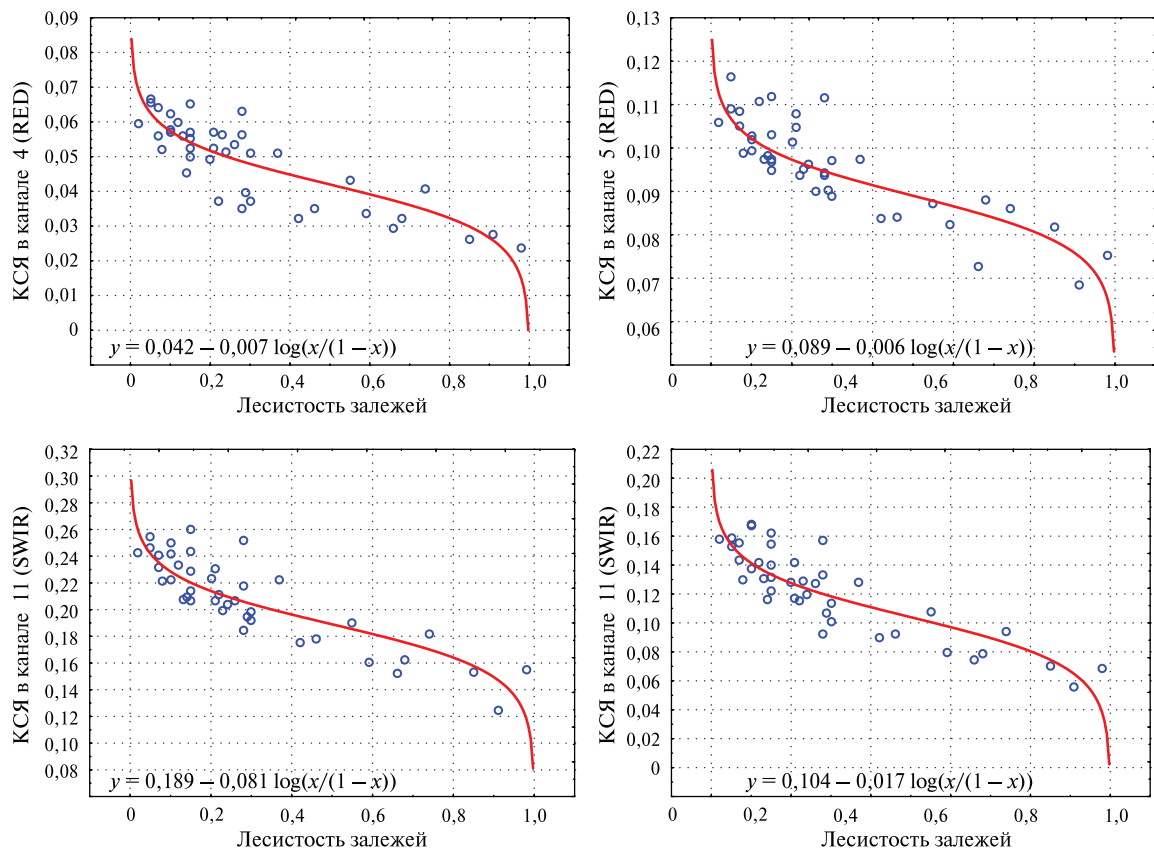


Рис. 4. Графики зависимости между лесистостью залежей и спектрально-отражательными характеристиками в каналах Sentinel-2 (залежи со смешанными лесными насаждениями)

Таблица 5. Зависимости, наиболее достоверно аппроксимирующие связь между лесистостью и спектральной отражательной способностью в диапазонах Sentinel-2 для залежей со смешанными лесными насаждениями

Спектральный диапазон Sentinel-2	Уравнение	Коэффициент детерминации $R^2$
B4 (красный)	$y = 0,042 - 0,007\log(x/(1 - x))$	0,68
B5 (Red Edge)	$y = 0,089 - 0,006\log(x/(1 - x))$	0,69
B11 (SWIR)	$y = 0,189 - 0,018\log(x/(1 - x))$	0,71
B12 (SWIR)	$y = 0,104 - 0,017\log(x/(1 - x))$	0,72

В каналах крайней красной и ближней инфракрасной областей (B6, B7, B8A) связь с лесистостью прямая, но теснота связи значительно меньше и разброс значений вокруг регрессионной кривой значительно выше, чем в каналах B4, B5, B11, B12.

Эффективность аппроксимации связи между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками для залежей со смешанными лесными насаждениями несколько ниже, чем для залежей с лесными насаждениями из хвойных пород (сосной). Обусловлено это, по всей видимости, одновременным влиянием на их спектральный отклик лиственных и хвойных деревьев, присутствующих на таких типах оставленных аграрных земель. Стоит отметить, что аналогичные особенности залежей со смешанными лесными насаждениями, в сравнении с другими типами оставленных аграрных угодий, выявлены по данным Landsat-8, но с меньшей эффективностью аппроксимации (Терехин, 2020).

Таким образом, в каналах красного и SWIR-диапазонов спектра Sentinel-2 (канал 4 и каналы 11, 12 соответственно) для залежных земель со всеми типами лесных насаждений установлена высокая эффективность аппроксимации связи между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками, которая проведена с помощью логит-функции. Установленные закономерности выступают основанием для применения отражательной способности в обозначенных диапазонах для пространственного и временного моделирования лесистости оставленных аграрных земель, типичных для Среднерусской лесостепи.

Пространственный анализ лесистости залежей лесостепи (2019) и спектрально-отражательных характеристик, измеренных в 11-м (SWIR) канале Sentinel-2, выявил общие территориальные закономерности в обоих показателях (рис. 5).

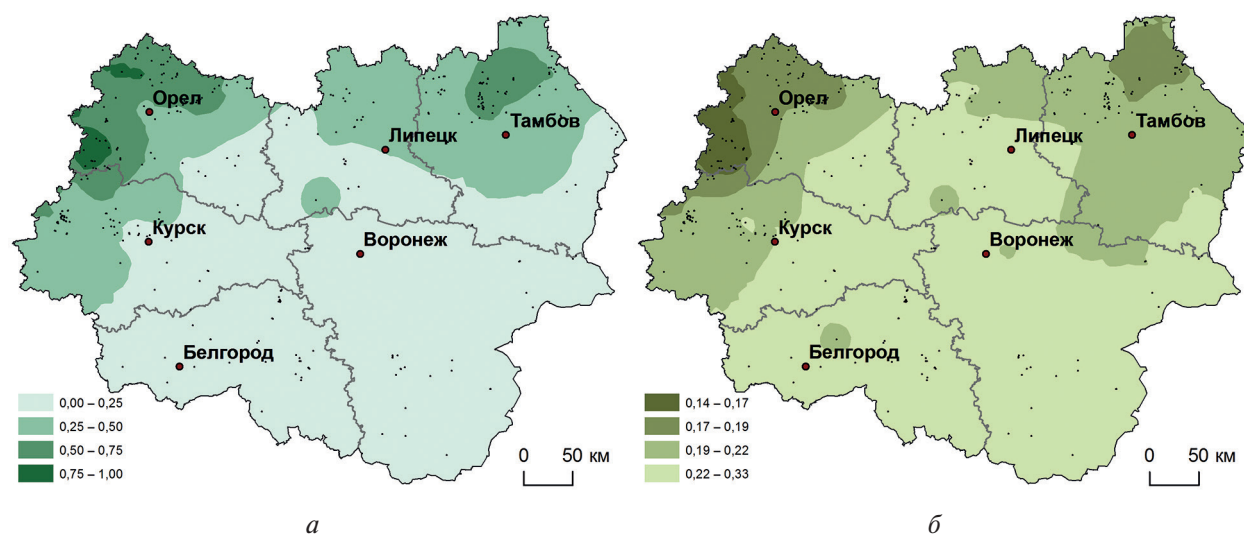


Рис. 5. Территориальное изменение лесистости залежей (а) и спектрально-отражательных характеристик 11-го (SWIR) канала Sentinel-2 (б) в пределах Центрально-Чернозёмного р-на и Орловской обл. (2019)



Оценка проведена для залежных земель с древесной растительностью из лиственных пород, исключая залежи со смешанными и хвойными лесными насаждениями, т. е. она выполнена для наиболее широко предоставленной группы залежей региона. Для оставленных аграрных земель с хвойными и смешанными лесными насаждениями подобный анализ был невозможен вследствие их не повсеместного распространения.

Лесистость залежных земель в конце второго десятилетия XXI в. (2019) в пределах региона изменяется от минимальных значений до практически максимально возможных величин. В 11-м (SWIR1) канале Sentinel-2 наблюдается аналогичная территориальная закономерность и достаточно высокое варьирование значений в пределах региона исследования.

Пространственное распределение спектрально-отражательных характеристик 4-го (RED-диапазон) и 12-го (SWIR2-диапазон) каналов Sentinel-2 также выявили территориальные закономерности, во многом аналогичные изменению лесистости залежей (рис. 6).

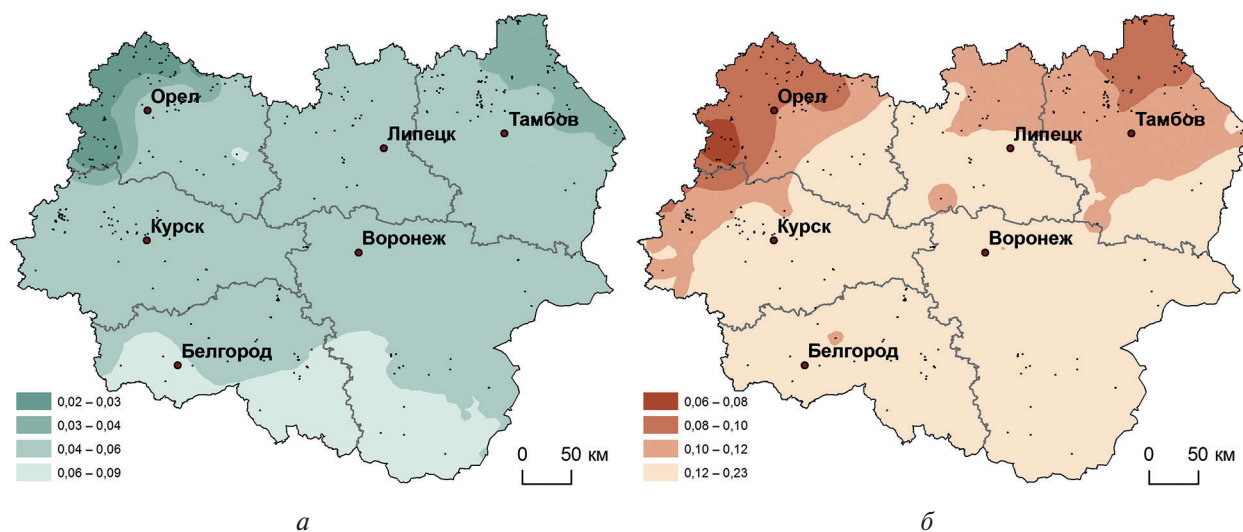


Рис. 6. Территориальное изменение спектрально-отражательных характеристик 4-го канала (RED-диапазон) (а) и 12-го канала (SWIR-диапазон) (б) Sentinel-2 для залежных земель в пределах Центрально-Чернозёмного р-на и Орловской обл. (2019)

Вместе с этим отражательные характеристики SWIR-диапазонов (каналы 11, 12) характеризовались пространственным распределением, более близким к фактическому распределению лесистости залежей.

Результаты пространственного анализа спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона, полученные по данным Sentinel-2, показали закономерности, аналогичные выявленным по данным Landsat OLI, но несколько более ранних анализируемых лет (Терехин, 2020). Общая тенденция изменения их значений в регионе заключается в снижении от северо-запада и северо-востока в южном направлении.

Величина стандартного отклонения, рассчитанная для коэффициентов отражения залежей в RED- и SWIR-диапазонах, в пределах региона показала наименьшие значения на крайнем юго-востоке и крайнем северо-западе (рис. 7), т. е. на территориях, для которых типичны либо очень низкие, либо очень высокие значения лесистости. В условиях северо-запада Орловской обл. большинство залежей, вследствие высоких значений лесистости, похожи на лесные массивы. На юге Воронежской обл. залежи, наоборот, часто представляют собой преимущественно травянистые участки с минимальным присутствием деревьев и кустарников. Стандартное отклонение спектрально-отражательных характеристик залежей в обозначенных каналах Sentinel-2 выступило, таким образом, индикатором однородности их растительного покрова по величине покрытия древесной растительностью и её территориального изменения в пределах региона.

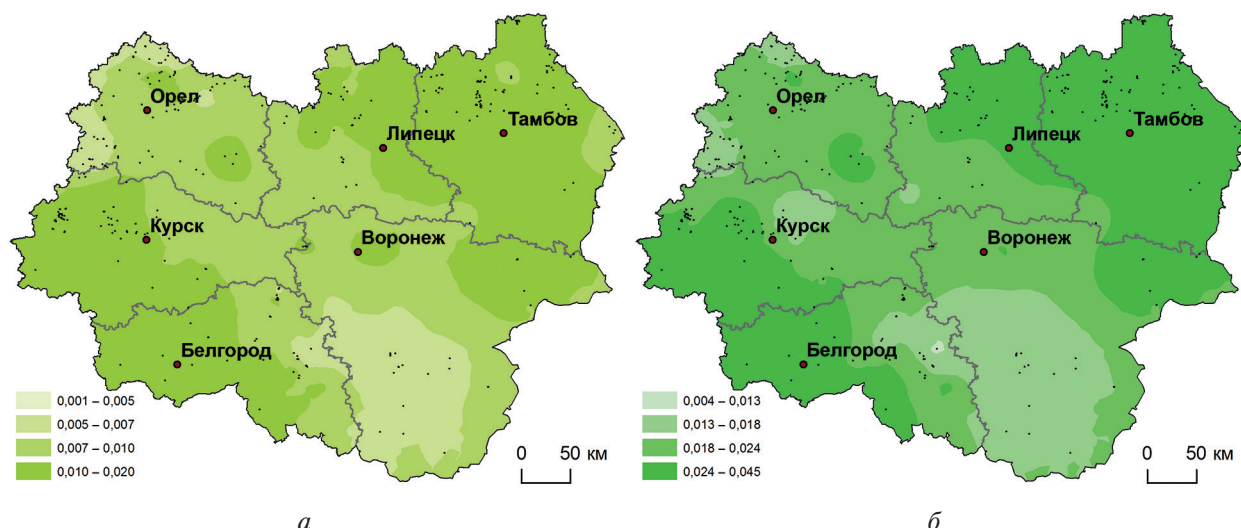


Рис. 7. Территориальное изменение стандартного отклонения спектрально-отражательных характеристик 4-го канала (RED-диапазон) (а) и 11-го канала (SWIR-диапазон) (б) Sentinel-2 для залежных земель в пределах Центрально-Черноземного р-на и Орловской обл. (2019)

Согласно полученным результатам, спектральная отражательная способность залежей в SWIR-диапазоне Sentinel-2 может быть использована для оценки пространственных особенностей лесистости оставленных аграрных угодий, типичных для Среднерусской лесостепи. С учётом возможности накопления разновременных данных со спутников Sentinel-2A/B установленные закономерности в перспективе могут быть использованы и для пространственно-временного анализа лесистости залежных земель.

## Выводы

Лесистость залежных земель, типичных для лесостепи, оказывает влияние на спектрально-отражательные характеристики в большинстве каналов Sentinel-2 MSI. Для залежей с древесной растительностью из лиственных пород выраженная, статистически значимая обратная связь между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками проявляется в каналах красного и SWIR-диапазонов спектра. Она описывается логит-моделью. В диапазонах крайнего красного и ближнего инфракрасного участков спектра связь между этими параметрами прямая, криволинейная (логит-модель), но менее выраженная. Для участков залежей с хвойными лесными насаждениями наиболее выраженная, статистически значимая связь между лесистостью и спектрально-отражательными характеристиками прослеживается в диапазонах красного участка спектра (каналы 4, 5) и SWIR-диапазона (каналы 11, 12). Она криволинейна и описывается логит-функцией, но с более высокими коэффициентами детерминации, чем для залежей с древесной растительностью из лиственных пород. Для оставленных аграрных земель со смешанными лесными насаждениями наиболее выраженная связь спектрально-отражательных характеристик с лесистостью, так же как и для залежей с хвойными насаждениями, установлена в каналах красного и SWIR-диапазонов спектра, но с менее высокими коэффициентами детерминации.

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

## Литература

1. Баишева Э. З., Широких П. С. К биофлоре зарастающих лесом сельхозугодий республики Башкортостан // Изв. Уфимского науч. центра РАН. 2017. № 3-1 С. 17–21.

2. *Вараксин Г. С., Вайс А. А., Байкалов Е. М.* Заращение древесной растительностью земель сельскохозяйственного назначения // Вестн. Красноярского гос. аграр. ун-та. 2012. № 5. С. 201–205.
3. *Вильданов И. Р., Япаров И. М., Гумеров А. П., Хизбуллина Р. З.* Космические снимки в изучении современного состояния заброшенных сельскохозяйственных угодий на южном Предуралье // Вестн. Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Сер.: Науки о Земле. 2019. № 2(14). С. 50–60. DOI: 10.25587/SVFU.2019.14.35446.
4. *Иванов А. И., Иванова Ж. А., Соколов И. В.* Вторичное освоение неиспользуемых угодий // Российская с.-х. наука. 2020. № 2. С. 48–52. DOI: 10.31857/S2500-2627-2020-2-48-52.
5. *Курбанов Э. А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С. А., Незамаев С. А., Александрова Т. Л.* Оценка зарастания земель запаса республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам // Вестн. Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2010. № 2. С. 14–20.
6. *Курганова И. Н., Телеснина В. М., Лопес де Гереню В. О., Личко В. И., Караванова Е. И.* Динамика пулов углерода и биологической активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2021. № 3. С. 287–303. DOI: 10.31857/S0032180X21030102.
7. *Пономарева Т. В., Пономарёв Е. И., Шишкин А. С., Швецов Е. Г.* Мониторинг трансформации старопашотных почв лесостепной зоны при лесовосстановлении // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 154–161. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-2(154-161).
8. *Русанов А. М.* Естественное восстановление агроландшафтов степной и лесостепной зон Оренбургской области // Степной бюл. 2012. № 36. С. 8–12.
9. *Савин И. Ю., Шишконова Е. А.* Пространственные особенности экспансии инвазивных видов золотарника в центральных областях европейской части России // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2021. Т. 85. № 3. С. 446–457. DOI: 10.31857/S2587556621030134.
10. *Терехин Э. А.* Сукцессионные процессы на залежах юга Среднерусской возвышенности по данным спутниковых съёмок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 180–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193.
11. *Терехин Э. А.* Пространственный анализ особенностей формирования древесной растительности на залежах лесостепи Центрального Черноземья с использованием их спектральных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 142–156. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
12. *Терехин Э. А.* Индикация многолетних изменений в растительном покрове залежных земель лесостепи на основе рядов вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-СО-797.
13. *Трофимов И. А., Трофимова Л. С., Яковлева Е. П.* Сохранение и оптимизация агроландшафтов Центрального Черноземья // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2017. № 1. С. 103–109. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109.
14. *Alcantara C., Kuemmerle T., Prishchepov A. V., Radeloff V. C.* Mapping abandoned agriculture with multi-temporal MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 124. P. 334–347. DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.019.
15. *Grădinaru S. R., Kienast F., Psomas A.* Using multi-seasonal Landsat imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl // From urban sprawl to compact green cities indicators for multi-scale and multi-dimensional analysis. 2019. V. 96. P. 79–86. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.022.
16. *Hemmerling J., Pflugmacher D., Hostert P.* Mapping temperate forest tree species using dense Sentinel-2 time series // Remote Sensing of Environment. 2021. V. 267. Art. No. 112743. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112743.
17. *Korhonen L., Hadi, Packalen P., Rautiainen M.* Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 195. P. 259–274. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.021.
18. *Lasanta T., Nadal-Romero E., Arnáez J.* Managing abandoned farmland to control the impact of re-vegetation on the environment. The state of the art in Europe // Environmental Science and Policy. 2015. V. 52. P. 99–109. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.05.012.
19. *Terres J.-M., Scacchiafichi L. N., Wania A., Ambar M., Anguiano E., Buckwell A., Coppola A., Gocht A., Källström H. N., Pointereau P., Strijker D., Visek L., Vranken L., Zobena A.* Farmland abandonment in Europe: Identification of drivers and indicators, and development of a composite indicator of risk // Land Use Policy. 2015. V. 49. P. 20–34. DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.06.009.
20. *Yoon H., Kim S.* Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. V. 166. P. 201–212. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.021.
21. *Zhang Z., Dong X., Tian J., Tian Q., Xi Y., He D.* Stand density estimation based on fractional vegetation coverage from Sentinel-2 satellite imagery // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022. V. 108. Art. No. 102760. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102760.

## Effect of abandoned agricultural lands forest cover on Sentinel-2 spectral response in forest-steppe natural zone

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University, Belgorod 308015, Russia

E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

The influence of the abandoned lands parameters on their spectral response is the basis for the development of methods for their study using remote sensing data. The article analyzes the relationships between the forest cover of abandoned agricultural lands, typical for the Central Russian forest-steppe, and Sentinel-2 spectral response. For abandoned lands with deciduous species, the strongest relationship between forest cover and spectral response is found in the red edge and SWIR bands. The relationship between forest cover and spectral response in the red edge and NIR ranges is direct, but less pronounced. For abandoned lands with coniferous or mixed forests, a pronounced relationship between forest cover and spectral response is in red and SWIR bands. The relationship between the forest cover and the spectral response of marked lands in the most informative ranges of MSI sensor is curvilinear and described by the logit-function. Spatial analysis of forest cover and spectral response of abandoned lands in the red and SWIR ranges showed that the reflectance values in these bands can be used for spatial estimates of abandoned lands forest cover in the region.

**Keywords:** abandoned agricultural lands, forest cover, Central Russian forest-steppe, remote sensing, Sentinel-2

Accepted: 16.08.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-223-235

### References

1. Baisheva E. Z., Shirokikh P. S., On the bryophyte flora of abandoned agricultural lands overgrown with forest in the republic of Bashkortostan, *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, No. 3-1, pp. 17–21 (in Russian).
2. Varaksin G. S., Vais A. A., Baikalov E. M., Agricultural land colonization by tree vegetation, *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No. 5, pp. 201–205 (in Russian).
3. Vildanov I. R., Yaparov I. M., Gumerov A. P., Khizbullina R. Z., Space images in study of the current status of abandoned agricultural land in the southern Urals, *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova. Ser.: Nauki o Zemle*, 2019, No. 2(14), pp. 50–60 (in Russian), DOI: 10.25587/SVFU.2019.14.35446.
4. Ivanov A. I., Ivanova Zh. A., Sokolov I. V., Secondary Development of Unused Land, *Russian Agricultural Sciences*, 2020, Vol. 46, No. 3, pp. 274–278, DOI: 10.3103/S1068367420030076.
5. Kurbanov E. A., Vorobyev O. N., Gubayev A. V., Leznin S. A., Nezamayev S. A., Alexandrova T. L., Estimation of reforestation of Mari El republic abandoned agricultural lands by satellite images, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2010, No. 2, pp. 14–20 (in Russian).
6. Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Lichko V. I., Telesnina V. M., Karavanova E. I., The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, pp. 337–51, DOI: 10.1134/S1064229321030108.
7. Ponomareva T. V., Ponomarev E. I., Shishikin A. S., Shvetsov E. G., Monitoring of transformation of postagrogenic soils in forest-steppe zone during the process of reforestation, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2018, No. 2, pp. 154–161 (in Russian), DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2018-2(154-161).
8. Rusanov A. M., Natural restoration of agricultural landscapes of the steppe and forest-steppe zones of the Orenburg region, *Stepnoi byulleten'*, 2012, No. 36, pp. 8–12 (in Russian).
9. Savin I. Yu., Shishkonakova E. A., Spatial features of goldenrods (invasive solidago species) expansion in central regions of European part of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2021, Vol. 85, No. 3, pp. 446–457 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556621030134.
10. Terekhin E. A., Satellite-based estimation of successional processes on abandoned farmland of south Central Russian upland, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 180–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-180-193.



11. Terekhin E.A., Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 142–156 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-142-156.
12. Terekhin E.A., Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series, *Komp'yuternaya optika*, 2021, Vol. 45, No. 2, pp. 245–252 (in Russian), DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
13. Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P., Preservation and optimization of agrolandscapes of the Central Chernozem zone, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2017, No. 1, pp. 103–109 (in Russian), DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109.
14. Alcantara 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, pp. 334–347, DOI: 10.1016/j.rse.2012.05.019.
15. Grădinaru S.R., Kienast F., Psomas A., Using multi-seasonal Landsat imagery for rapid identification of abandoned land in areas affected by urban sprawl, *From urban sprawl to compact green cities indicators for multi-scale and multi-dimensional analysis*, 2019, Vol. 96, pp. 79–86, DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.022.
16. Hemmerling J., Pflugmacher D., Hostert P., Mapping temperate forest tree species using dense Sentinel-2 time series, *Remote Sensing of Environment*, 2021, Vol. 267, Art. No. 112743, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112743.
17. Korhonen L., Hadi, Packalen P., Rautiainen M., Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index, *Remote Sensing of Environmen*, 2017, Vol. 195, pp. 259–274, DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.021.
18. Lasanta T., Nadal-Romero E., Arnáez J., Managing abandoned farmland to control the impact of re-vegetation on the environment. The state of the art in Europe, *Environmental Science and Policy*, 2015, Vol. 52, pp. 99–109, DOI: 10.1016/j.envsci.2015.05.012.
19. Terres J.-M., Scacchiafichi L.N., Wania A., Ambar M., Anguiano E., Buckwell A., Coppola A., Gocht A., Källström H.N., Pointereau P., Strijker D., Visek L., Vranken L., Zobena A., Farmland abandonment in Europe: Identification of drivers and indicators, and development of a composite indicator of risk, *Land Use Policy*, 2015, Vol. 49, pp. 20–34, DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.06.009.
20. Yoon H., Kim S., Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, Vol. 166, pp. 201–212, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.021.
21. Zhang Z., Dong X., Tian J., Tian Q., Xi Y., He D., Stand density estimation based on fractional vegetation coverage from Sentinel-2 satellite imagery, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, Vol. 108, Art. No. 102760, DOI: 10.1016/j.jag.2022.102760.