

Особенности спектрального отклика залежных земель в различных природно-климатических условиях европейской территории России

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*

В статье изложены результаты количественной оценки спектрально-отражательных признаков залежных земель, расположенных в различных природно-климатических условиях европейской территории России: лесной зоне, лесостепной и степной. Установлено, что современная величина покрытия древесной растительностью и коэффициенты спектральной яркости SWIR-диапазона залежей значимо различны для каждой из них. Выявлена тенденция последовательного субмеридионального изменения величины покрытия залежей древесной растительностью и коэффициентов спектральной яркости инфракрасной области от условий лесной зоны до степной. Коэффициенты спектральной яркости этого диапазона, измеренные для залежных земель на основе данных Landsat OLI, могут выступать индикаторами различий в состоянии растительности на зональном и внутризональном уровне. По спектрально-отражательным признакам SWIR-диапазона залежных земель выявляются различия не только между природными зонами, но и единицами более низкого территориального ранга — физико-географическими подзонами. Снижение величины покрытия залежей древесной растительностью сопровождается увеличением коэффициентов спектральной яркости. На основе пространственного анализа спектрально-отражательных признаков оставленных аграрных угодий установлено, что территориальное изменение коэффициента спектральной яркости в инфракрасной области (1,56–1,66 мкм) отражает смену природных условий от лесной зоны до зоны степи.

Ключевые слова: залежные земли, растительный покров, европейская территория России, спектрально-отражательные признаки, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 09.04.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-169-181

Введение

Количественная оценка спектрально-отражательных признаков растительного покрова выступает одним из перспективных направлений моделирования его состояния и динамики. Обусловлено это интенсивным развитием технологий дистанционного зондирования Земли, совершенствованием методов анализа спутниковых данных (Барталев и др., 2015; Joshi et al., 2016). Растительный покров как важный элемент ландшафта — один из ключевых индикаторов природно-климатических условий.

В регионах активного аграрного использования, где основная часть природных экосистем существенно преобразована в результате антропогенной деятельности, оценка современных территориальных особенностей и тенденций развития растительного покрова становится необходимой задачей. Обусловлено это тем, что от её решения зависит объективность планирования стратегии использования природной среды и сохранения её естественного потенциала. Оставленные аграрные угодья, или залежные земли, в таких регионах выступают одним из компонентов природной среды, на основе которого данная задача может быть решена. Связано это с тем, что развитие растительного покрова на залежах происходит с минимальным антропогенным воздействием и протекающие в них сукцессионные процессы обусловлены определённым сочетанием факторов природной среды (Голеусов, Лисецкий, 2009; Жукова, Андрианова, 2013).

Оценка современных особенностей растительного покрова залежных земель и тенденций его развития актуальна и для европейской территории России (ЕТР), в пределах которой сосредоточена значительная часть аграрных угодий страны. Многие из них были выведены из сельскохозяйственного оборота в 1990-х – начале 2000-х гг. (Китов, Цапков, 2015; Люри и др., 2010). Исследование спектрально-отражательных признаков залежей может позволить на новом методическом уровне подойти к оценке тенденций развития растительного покрова и выявлению межзональных и внутризональных географических различий, которым свойственны изменения вследствие цикличности глобальных климатических процессов (Будыко, 1977; Рулев, Юферов, 2015). С использованием отражательных свойств залежей может быть решён ряд задач, касающихся их выявления (Плотников и др., 2018; Терехин, 2017; Prishchepov et al., 2012) и картографирования (Löw et al., 2018; Yin et al., 2018). В то же время вследствие неполной изученности спектрального отклика залежных земель его интерпретация во многом остаётся открытой.

Ранее на примере анализа растительного покрова залежей лесостепной зоны установлено (Терехин, 2020), что их спектральные признаки могут выступать индикаторами сукцессионных процессов, протекающих на них и связанных с формированием древесных сообществ на месте травянистых пространств. Вместе с этим становится перспективным использование предложенного подхода к изучению различий в растительном покрове залежей, расположенных в разных природных зонах. Рабочая гипотеза исследования состояла, таким образом, в следующем: спектрально-отражательные признаки оставленных аграрных угодий могут выступать индикаторами различий природно-климатических условий на зональном и внутризональном уровнях. То есть они могут характеризовать различия между природными зонами и в их пределах.

Цель исследования состояла в анализе современного состояния растительного покрова залежных земель и их спектрального отклика в природно-климатических условиях, изменяющихся от лесной зоны к зоне степи.

Поставленная цель предполагала решение следующих задач:

1. Количественная оценка спектрально-отражательных признаков для залежных земель различных природных зон и территориальных единиц меньшего ранга: географических подзон и провинций.
2. Пространственный анализ доли древесной растительности, присутствующей на залежах, и их отражательных свойств в пределах европейской территории России в физико-географических условиях, изменяющихся от лесной зоны на севере до зоны степи на юге.

Материалы и методика исследования

Экспериментальное исследование проведено на основе сформированной выборки залежных земель, расположенных в пределах европейской территории России. Она включала группы угодий, выявленные и изученные на ключевых участках, которые были размещены в различных природно-климатических условиях: в зоне лесостепи и на прилегающих территориях лесной и степной природных зон. Участки исследования размещали в пределах ЕТР таким образом, чтобы охватить вариацию условий не только на уровне природных зон, но и их составляющих более низкого территориального уровня: подзон и физико-географических провинций. Размещение участков осуществлялось с учётом того, чтобы на основе данных, собранных с залежей, можно было выполнить пространственную интерполяцию параметров растительного покрова или его спектральных признаков. Каждый исследовательский участок территориально охватывался спутниковой сценой с сенсора Landsat-8 OLI (рис. 1, см. с. 171), на основе данных с которого оценивали спектрально-отражательные признаки угодий в пределах исследуемой территории.

Выявление залежных земель осуществляли методом обследования территории по разновременным спутниковым данным сверхвысокого пространственного разрешения (1 м/пиксель)

2000–2018 гг., полученным из архивов открытого доступа, преимущественно с сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth). Снимки соответствующей детальности позволяют достоверно выявлять залежи среди других угодий по прямым дешифровочным признакам: отсутствию следов распашки и аграрной обработки, особенностям структуры и текстуры их изображения.

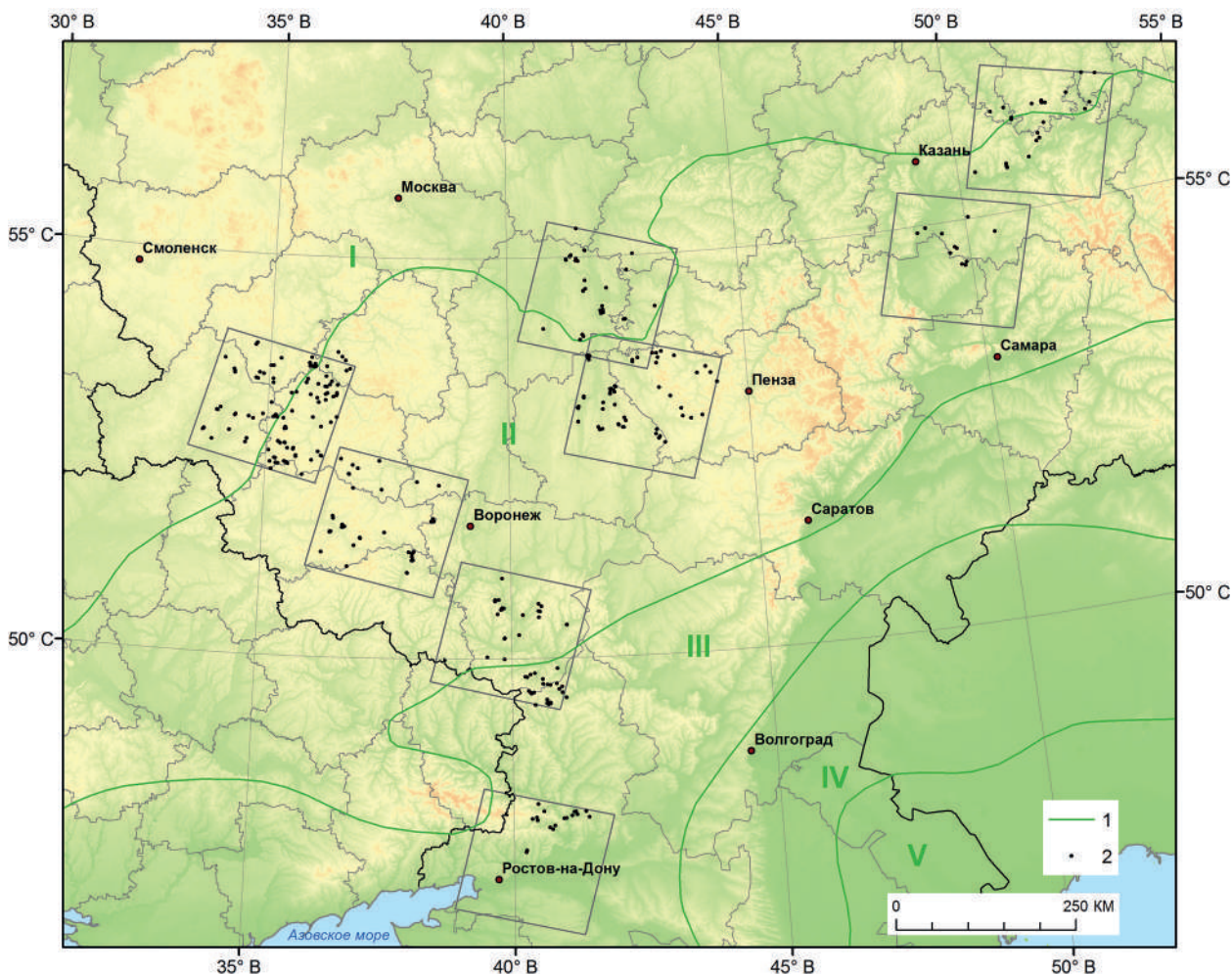


Рис. 1. Местоположение изученных залежных земель и спутниковых снимков Landsat-8 OLI в пределах ЕТР. 1 — границы природных зон; 2 — изученные залежи. I — лесная зона; II — лесостепь; III — зона степей; IV — зона полупустынь; V — зона пустынь

Залежные земли отбирали в аналитическую выборку на основе ряда критериев:

1. Угодье должно было быть пашней в начале 2000-х гг. и с середины 2000-х гг. по 2018 г. непрерывно находиться в состоянии залежи.
2. В исследуемый период на залежи должны отсутствовать признаки нарушений растительного покрова вследствие антропогенной деятельности.
3. Площадь залежи должна составлять не менее 20 га, что необходимо для повышения объективности анализа её спектрально-отражательных признаков на основе снимков различного пространственного разрешения.
4. Залежи должны находиться в аналогичных геоморфологических условиях и условиях увлажнения, т.е. в выборку не включались бывшие аграрные угодья, расположенные в поймах рек и на низменных участках вблизи водоёмов.

В общей сложности было отобрано 270 оставленных аграрных угодий суммарной площадью 17 529,9 га при средней площади 63,7 га. Выявленные залежи были представлены

в различных субъектах Российской Федерации: Брянской, Орловской, Калужской, Тульской, Курской, Липецкой, Белгородской, Тамбовской, Рязанской, Пензенской, Ростовской областях и Республике Татарстан.

Вследствие неодинаковой распространённости залежей на исследуемой территории число выявленных и включённых в выборку залежных земель в пределах каждого участка могло существенно различаться.

На залежах исследуемой территории формируются разные типы лесных насаждений (лиственные, хвойные, смешанные). При этом наибольшая и повсеместная распространённость характерна для залежей с лиственными породами. В связи с этим данный тип оставленных аграрных угодий был выбран для оценки спектральных характеристик залежей в разных природно-климатических условиях и их территориального анализа. Обусловлено это тем, что хвойные породы имеют несколько меньшие коэффициенты спектральной яркости (КСЯ), чем лиственные и их совместный анализ в одной выборке мог бы привести к получению некорректных результатов.

На особенности растительного покрова залежных земель может оказывать влияние фактор не только межзональных, но и внутризональных различий вследствие вариации природно-климатических условий в пределах природных зон. Эти различия могут проявляться в соотношении факторов тепла и влаги, которое положено в разделение природных зон на подзоны (Прокаев, 1983), либо в морфоструктурных признаках и провинциальных особенностях климата, которые лежат в основе выделения физико-географических провинций (Мильков, 1977). С учётом этих факторов выборку залежей формировали таким образом, чтобы в ней были представлены угодья разных таксономических единиц физико-географического районирования. После создания выборки для всех залежей с использованием геоинформационных средств методом ручной оцифровки по спутниковым данным была подготовлена их векторная основа, включающая контуры угодий.

Для каждой залежи фиксировался набор параметров: состояние в начале 2000-х гг. и 2018 г., доминирующий тип растительности, наличие или отсутствие древесной растительности, величина покрытия древесной растительностью в 2018 г. (от 0 до 1), тип формирующихся лесных насаждений. Вся информация заносилась в геоинформационную базу данных. Большинство перечисленных параметров определялось на основе спутниковых данных метрового и субметрового пространственного разрешения. Для определения типа лесных насаждений (лиственные, хвойные, смешанные) были использованы снимки Landsat-8. Тип лесных насаждений определялся на их основе методом визуального анализа залежей в комбинации каналов SWIR2 – SWIR1 – RED (SWIR – *англ.* short wave infrared, коротковолновый инфракрасный; RED – красный), позволяющей достоверно разделять хвойные и лиственные насаждения.

На следующем этапе для всех объектов был выполнен расчёт безразмерных коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне (1,56–1,66 мкм) на основе снимков Landsat-8 OLI (источник: <https://earthexplorer.usgs.gov/>), полученных в вегетационный период 2018 г. (табл. 1). Все снимки прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию (Landsat 8..., 2019). Параметры Path (колонка) и Row (ряд) характеризуют местоположение снимков в системе WRS-2 (Worldwide Reference System), используемой для идентификации изображений Landsat на земной поверхности.

Таблица 1. Снимки Landsat-8 OLI, используемые для пространственного анализа спектрально-отражательных признаков залежных земель

Path/Row	Дата получения	Path/Row	Дата получения
174/023	19.08.2018	170/022	08.09.2018
175/025	26.08.2018	179/023	06.08.2018
177/024	24.08.2018	175/022	26.08.2018
169/021	31.07.2018	174/027	19.08.2018

Спектральные признаки SWIR-диапазона были выбраны для анализа в связи с тем, что среди основных диапазонов, охватываемых каналами сенсоров Landsat, они характеризуются наибольшей чувствительностью к изменениям растительного покрова залежей, обусловленным протеканием на них сукцессионных процессов в виде формирования ассоциаций древесной растительности (Терехин, 2020). Вычисление спектральных признаков выполнено методом зональной статистики в геоинформационной среде.

На следующем этапе был осуществлён статистический анализ величины покрытия залежных земель древесной растительностью, их спектральных признаков для различных природных зон, подзон и физико-географических провинций. Он состоял в сравнении статистических параметров для изученных характеристик залежных земель (величина покрытия древесной растительностью и коэффициенты спектральной яркости в SWIR-диапазоне) на разных территориальных уровнях: природной зоны, подзоны и провинции. Подзона и провинция имеют следующий после природной зоны иерархический уровень, но характеризуют внутризональные различия по разным критериям.

Заключительный этап состоял в геоинформационном картографировании и оценке территориальных изменений в особенностях растительного покрова залежных земель и их спектрально-отражательных признаках в пределах изученной части ЕТР. Территориальная оценка исследуемых характеристик была осуществлена методом пространственной интерполяции с использованием гестатистических методов. На основе подготовленных картосхем были изучены территориальные тренды в исследуемых показателях оставленных аграрных угодий, выполнено их сравнение с территориальным изменением природно-климатических условий.

Результаты и их обсуждение

Анализ оставленных аграрных угодий, расположенных в разных природных зонах, показал, что величина покрытия залежей древесной растительностью и коэффициенты спектральной яркости в SWIR-диапазоне значимо различны для залежей, расположенных в условиях лесной, лесостепной и степной зон (табл. 2). Различия наблюдаются не только в средних величинах, но и в стандартных отклонениях, т.е. вариациях в пределах каждой ландшафтной зоны. Величины обоих показателей меняются достаточно существенно.

Таблица 2. Характеристики залежных земель различных природных зон ЕТР

Природная зона	Величина покрытия древесной растительностью		КСЯ SWIR-диапазона (1,56–1,66 мкм)	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Лесная	0,54	0,29	0,16	0,024
Лесостепная	0,34	0,32	0,18	0,035
Степная	0,07	0,10	0,23	0,025

При переходе от лесной к степной природной зоне происходит последовательное снижение доли древесной растительности, присутствующей на залежах, и увеличение коэффициентов спектральной яркости (рис. 2, см. с. 174). Из графика видно, что эти показатели меняются разнонаправленно.

Значения стандартного отклонения, т.е. вариации доли древесной растительности и коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне, наиболее высокие в зоне лесостепи, что предварительно является критерием наибольших внутризональных различий в её пределах. Различия между всеми зонами для обоих показателей статистически значимы, что указывает на влияние фактора природной зоны на особенности формирования растительного покрова оставленных аграрных угодий. То есть оба показателя могут выступать индикаторами зональных различий среди изученных ландшафтных (физико-географических) зон.

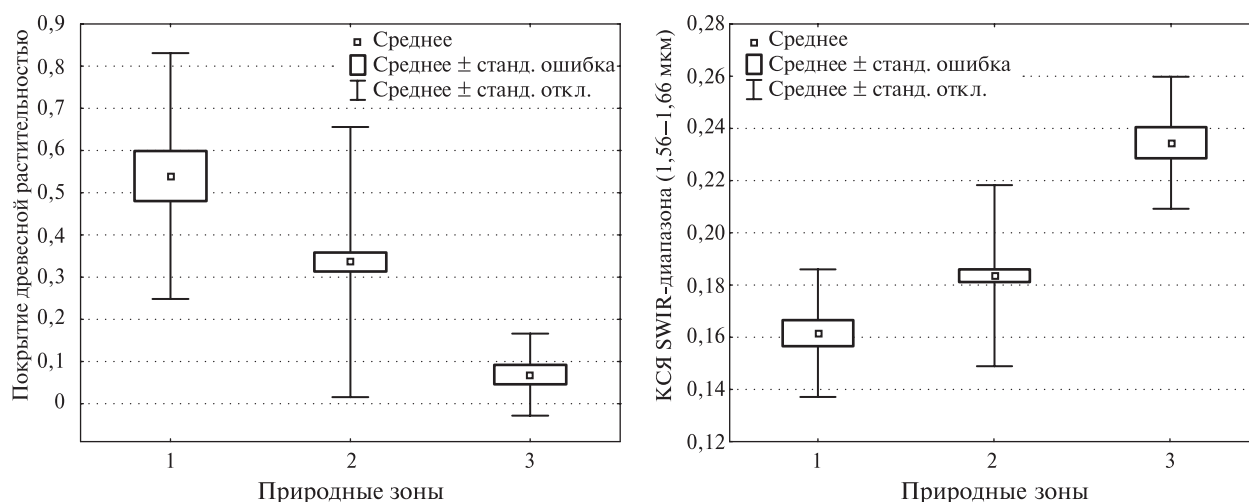


Рис. 2. Параметры величины покрытия древесной растительностью и коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона для залежей различных природных зон. 1 — лесная зона; 2 — лесостепная зона; 3 — степная зона

Оценка спектральных признаков залежных земель для подзон, последовательно сменяющих друг друга, показала (табл. 3), что между подзоной широколиственно-сосновых лесов (лесная зона) и подзоной северной лесостепи не наблюдается статистически значимых отличий в доле древесной растительности и коэффициентах спектральной яркости SWIR-диапазона. Средние значения доли древесной растительности для залежей изученной части лесной зоны и северной лесостепи практически не различаются, а их КСЯ равны (см. табл. 3). Вместе с этим выявлены существенные внутризональные различия в пределах лесостепи: между подзоной северной и типичной/южной лесостепи.

Таблица 3. Характеристики залежных земель различных подзон зон ЕТР

Физико-географическая подзона	Величина покрытия древесной растительностью		КСЯ SWIR-диапазона (1,56–1,66 мкм)	
	Среднее	Стандартное отклонение	Среднее	Стандартное отклонение
Подзона широколиственно-сосновых лесов	0,54	0,29	0,16	0,02
Подзона северной лесостепи	0,55	0,30	0,16	0,02
Подзона типичной и южной лесостепи	0,16	0,22	0,20	0,03
Подзона разнотравно-дерновинно-злаковых степей	0,07	0,10	0,23	0,02

Из графической интерпретации полученных данных видно (рис. 3, см. с. 175), что подзоны лесостепи по изученным характеристикам растительного покрова приближаются к прилегающим территориям лесной и степной природных зон.

Например, подзона северной лесостепи по характеристикам растительного покрова залежей и их отражательным признакам практически не отличается от лесной зоны. Подзона типичной/южной лесостепи по характеристикам растительности и спектральным признакам, наоборот, ближе к прилегающей территории степной зоны, чем к подзоне северной лесостепи.

Оценка различий в характеристиках залежных земель на уровне физико-географических провинций показала, что в наибольшей степени (рис. 4, см. с. 175) и при этом статистически значимо по доле древесной растительности и коэффициентам спектральной яркости SWIR-диапазона от остальных провинций отличаются Среднерусская провинция лесной зоны и Нижнедонская провинция степной зоны. То есть зафиксированы различия в провинциях,

расположенных в не граничащих между собой природных зонах, что фактически является различием на уровне самих природных зон.

В пределах лесостепной зоны значимые различия по величине покрытия залежей древесной растительностью зафиксированы только между провинцией Среднерусской возвышенности и провинцией Приволжской возвышенности. Таким образом, существенных различий между физико-географическими провинциями одних и тех же природных зон на основе характеристик растительного покрова залежей и его спектрально-отражательных признаков не выявлено.

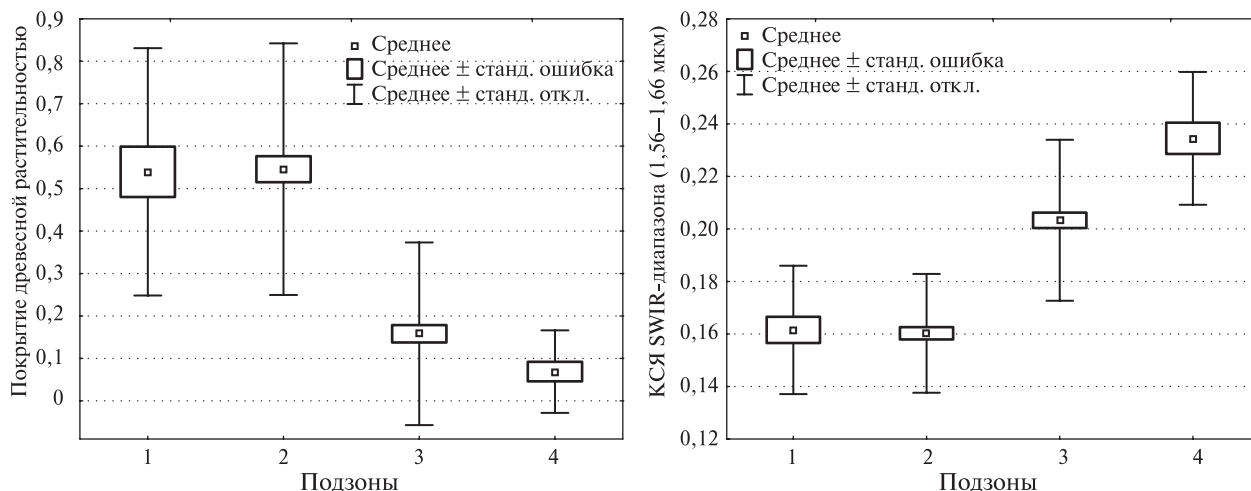


Рис. 3. Параметры величины покрытия древесной растительностью и коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона для залежей различных физико-географических подзон: 1 — широколиственно-сосновых лесов; 2 — северной лесостепи; 3 — типичной и южной лесостепи; 4 — разнотравно-дерновинно-злаковых степей

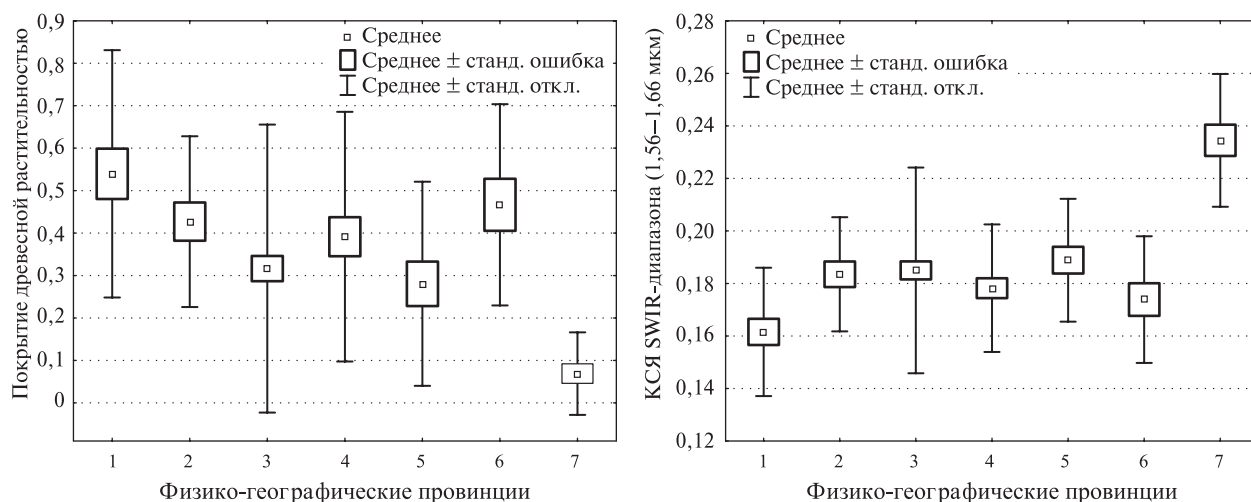


Рис. 4. Параметры величины покрытия древесной растительностью и коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона для залежей различных физико-географических провинций. Лесная зона: 1 — Среднерусская провинция, 2 — Мещерская провинция. Лесостепная зона: 3 — провинция Среднерусской возвышенности, 4 — провинция Окско-Донской равнины, 5 — провинция Приволжской возвышенности, 6 — Заволжская провинция. Степная зона: 7 — Нижнедонская провинция

Для получения более полного представления об изменении спектрально-отражательных признаков оставленных аграрных угодий в зависимости от смены природно-климатических условий был осуществлён пространственный анализ изменения в пределах исследуемой

территории двух показателей: величины покрытия залежей древесными сообществами и коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне (1,56–1,66 мкм). Картографирование выполнено методом пространственной интерполяции с применением радиальной базисной функции. Данный вид интерполяции выбран в связи с его наименьшей средней квадратичной ошибкой (табл. 4) и, соответственно, наибольшей точностью оценки для территориального анализа параметров оставленных аграрных угодий.

Таблица 4. Характеристики методов интерполяции для пространственного анализа особенностей растительного покрова залежей и их отражательных признаков

Метод	Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	
	Проективное покрытие крон	КСЯ SWIR-диапазона
Обратно взвешенные расстояния	0,220	0,0212
Радиальные базисные функции	0,213	0,0200
Кригинг ординарный	0,214	0,0209
» простой	0,227	0,0206
» универсальный	0,214	0,0209

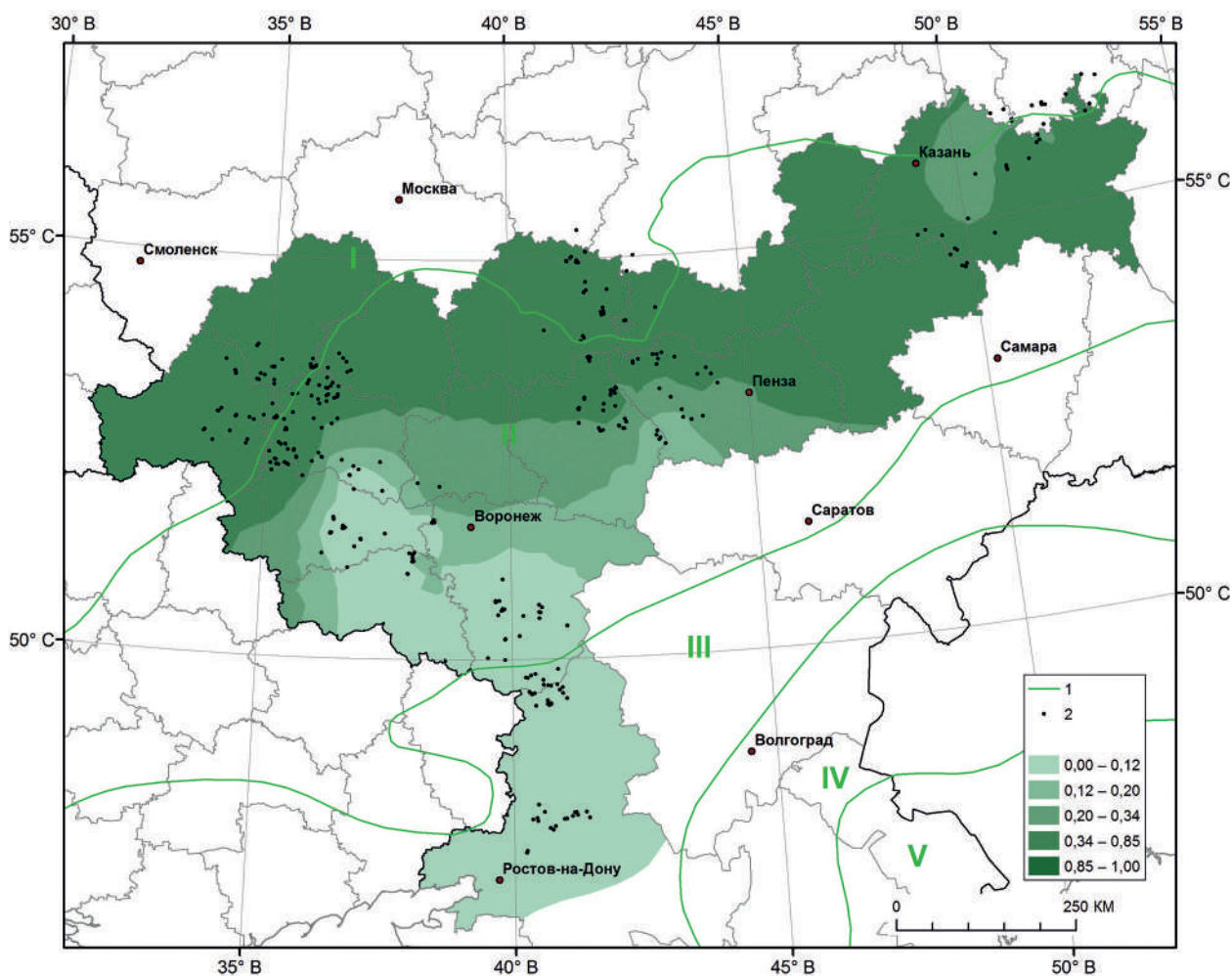


Рис. 5. Территориальное изменение величины покрытия залежей древесной растительностью в природной зоне лесостепи и прилегающих районах лесной и степной зон ЕТР. 1 — границы природных зон; 2 — изученные залежи. I — лесная зона; II — лесостепь; III — зона степей; IV — зона полупустынь; V — зона пустынь

Сравнение территориального изменения величины покрытия залежей древесной растительностью и их коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона продемонстрировало (рис. 5–6, см. с. 176), что оба значения изученных показателей изменяются аналогично смене природно-климатических условий от лесной до степной зоны. Соответствующая особенность подтверждается сопоставлением пространственного изменения параметров оставленных аграрных угодий с расположением природных зон и подзон (Мильков, 1977; Прокаев, 1983) в пределах изученной части ЕТР.

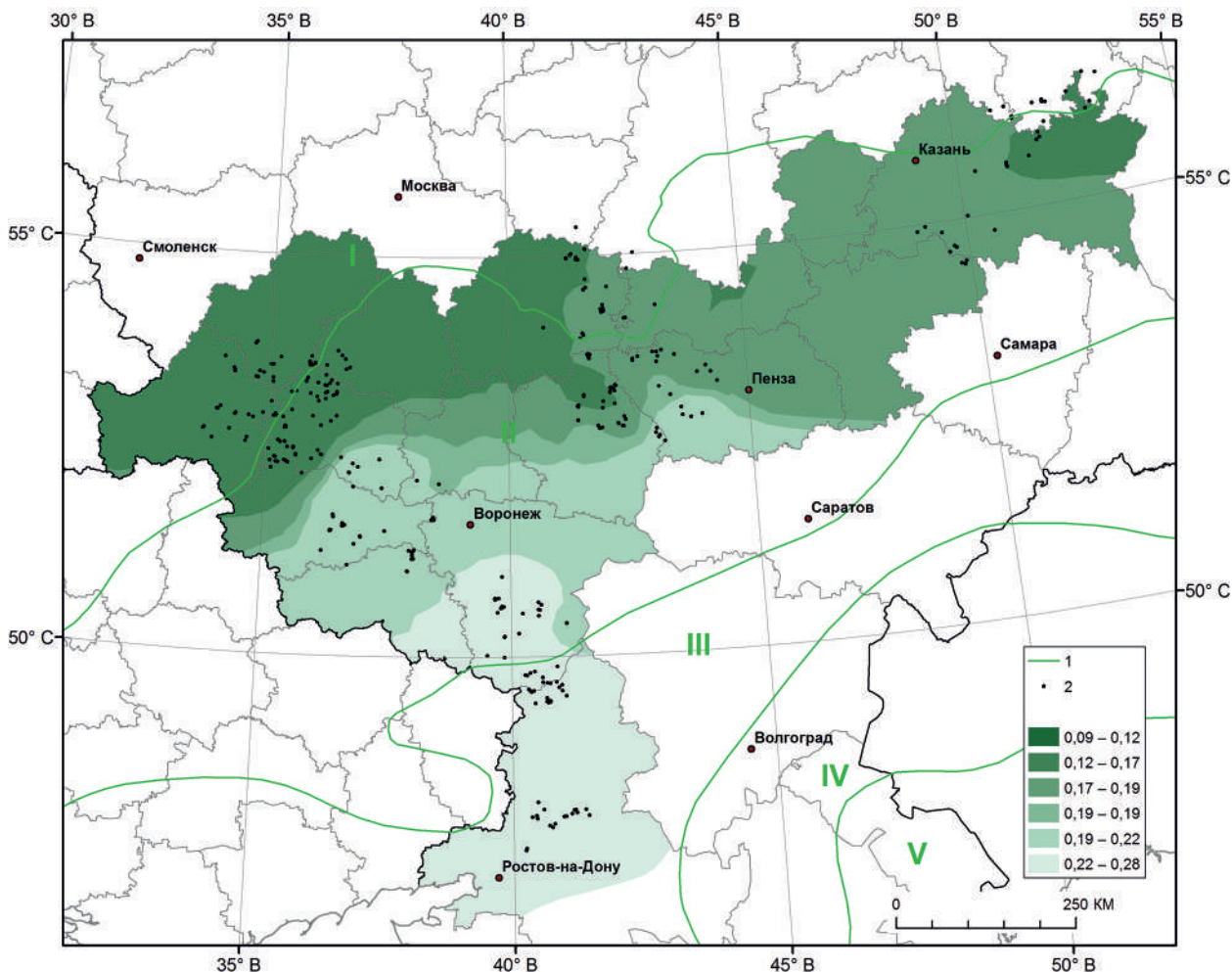


Рис. 6. Территориальное изменение КСЯ SWIR-диапазона залежей в природной зоне лесостепи и прилегающих районах лесной и степной зон ЕТР. 1 — границы природных зон; 2 — изученные залежи. I — лесная зона; II — лесостепь; III — зона степей; IV — зона полупустынь; V — зона пустынь

Величина покрытия древесной растительностью снижается от подзон лесной зоны к подзонам степи. Величина коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона, наоборот, растёт в этом направлении.

Из полученных картосхем чётко видно, что в пределах изученной территории лесостепной зоны вариации обоих показателей очень значительны: доля древесной растительности на залежах меняется от очень больших величин (около 0,85) до минимальных (менее 0,12).

Но наиболее существенно в нашем случае установленное территориальное изменение спектральных признаков (см. рис. 6), так как вследствие выявленных закономерностей подтверждается возможность их применения для индикации различий не только между природными зонами, но и в пределах их границ. С учётом регулярности получения спутниковых данных Landsat-8 OLI возможности измерения КСЯ SWIR-диапазона достаточно широки,

а соответственно, и перспективы их использования не только для оценки пространственных, но и пространственно-временных изменений переходных участков между природными зонами.

Обе картосхемы построены на основе данных с залежей, на которых формируются древесные сообщества лиственного породного состава, наиболее широко и репрезентативно представленные на всей территории исследования, либо залежи с практически полным отсутствием древесной растительности, распространённые в степи.

В отличие от лесостепной зоны изученные пространства лесной и степной природных зон характеризуются большей однородностью растительного покрова залежей по величине покрытия их древесной растительностью и коэффициентов спектральной яркости SWIR-диапазона, что подтверждается и количественным анализом этих величин (см. табл. 2).

Пространственные тренды, связанные с изменением доли древесной растительности, присутствующей на залежах, и их коэффициентов спектральной яркости в SWIR-диапазоне, наглядно проявляются при трёхмерной визуализации данных (рис. 7), из которой видно, что оба показателя в пределах исследуемой территории изменяются в направлении смены природных условий от лесной к степной зоне. Основания точек на графиках — местоположения изученных оставленных аграрных угодий в пределах европейской территории России.

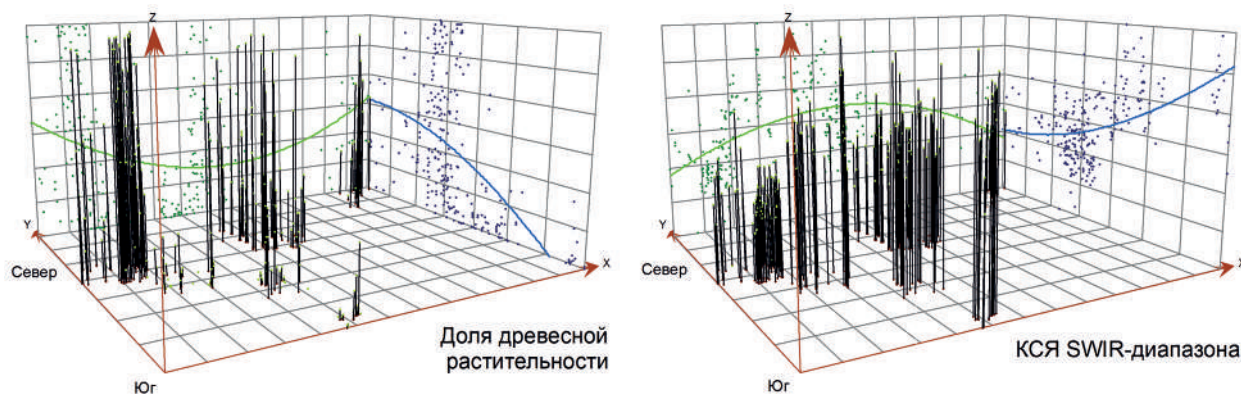


Рис. 7. Пространственные тренды в изменении величины покрытия залежей древесной растительностью и их КСЯ SWIR-диапазона в пределах изученной части ЕТР

Учитывая, что все изученные залежные земли имели примерно одинаковый возраст, на основе полученных картосхем можно сделать вывод не только о современном состоянии растительного покрова оставленных аграрных угодий, но и интенсивности сукцессионных процессов, происходящих на них и связанных с формированием ассоциаций древесной растительности.

В пределах изученной территории данный процесс наиболее интенсивно должен протекать в подзоне широколиственно-сосновых лесов лесной зоны, граничащей с подзоной северной лесостепи. Это территория Брянской, Калужской и частично Орловской областей. Наименьшая интенсивность данного процесса должна быть характерна для степной зоны.

Полученные результаты показали, что спектрально-отражательные признаки оставленных аграрных угодий в инфракрасной области (SWIR-диапазон) могут быть использованы в качестве независимой переменной для оценки зональных и внутризональных географических особенностей растительного покрова в условиях лесной, лесостепной и степной природных зон. Учитывая расширяющиеся возможности количественного анализа спектрально-отражательных признаков по данным дистанционного зондирования, результаты исследования могут быть применены для развития подходов к изучению зональных и внутризональных географических различий с использованием спектрального отклика растительного покрова.

Выводы

Исследована величина покрытия древесными сообществами и значения спектрально-отражательных признаков в SWIR-диапазоне для оставленных аграрных угодий, расположенных в различных природно-климатических условиях: лесной, лесостепной и степной природных зонах. Установлено, что оба исследуемых параметра залежей статистически значимо различаются не только между отдельными природными зонами, но и в их пределах. Изменения коэффициентов спектральной яркости происходят последовательно при переходе от одной физико-географической подзоне к другой. Выявленные изменения характеризуются территориальными трендами, заключающимися в преимущественно субмеридиональном изменении обоих показателей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-67-46017.

Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А.* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 203–221.
2. *Будыко М.И.* Глобальная экология. М.: Мысль, 1977. 327 с.
3. *Голушов П.В., Лисецкий Ф.Н.* Воспроизводство почв в антропогенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 210 с.
4. *Жукова Е.Ю., Андрианова Е.А.* Характеристика растительности залежных земель окрестностей г. Черногорска республики Хакасия // Вестн. Хакасского гос. ун-та им. Н.Ф. Катанова. 2013. № 3. С. 9–13.
5. *Китов М.В., Цапков А.Н.* Изменения площадей залежных земель на Европейской территории России за период 1990–2013 гг. // Науч. ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2015. № 15(212). С. 163–171.
6. *Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваяева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г.* Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 416 с.
7. *Мильков Ф.Н.* Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 149 с.
8. *Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 112–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127.
9. *Прокаев В.И.* Физико-географическое районирование. М.: Просвещение, 1983. 176 с.
10. *Рулев А.С., Юферов В.Г.* Аналитическое определение границ переходных природных зон (экотон) // Вестн. Волгоградского гос. ун-та. Сер. 11. «Естественные науки». 2015. № 1(11). С. 72–77.
11. *Терехин Э.А.* Распознавание залежных земель на основе сезонных значений вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 719–725.
12. *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.
13. *Joshi N., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Jepsen M.R., Baumann M., Hostert P., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E.T.A., Ryan C.M., Reiche J., Waske B.* A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring // Remote Sensing. 2016. V. 8(1). Art. No. 70.
14. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0.* USGS. Department of the Interior. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019. 114 p. URL: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
15. *Löw F., Prishchepov A.V., Waldner F., Dubovyk O., Akramkhanov A., Biradar C., Lamers J.* Mapping Cropland Abandonment in the Aral Sea Basin with MODIS Time Series // Remote Sensing. 2018. V. 10(2). Art. No. 159.

16. Prishchepov A. V., Radeloff V. C., Dubinin M., Alcantara C. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 126. P. 195–209.
17. Yin H., Prishchepov A. V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V. C. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 210. P. 12–24.

Spectral response of abandoned arable lands in various climate and environmental conditions of European Russia

E. A. Terekhin

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

The article presents the results of a quantitative assessment of spectral reflectance features of abandoned arable lands located in various natural and climatic conditions of the European territory of Russia: forest, forest-steppe and steppe zones. It was found that the current forest-cover value and SWIR reflectance of abandoned arable lands significantly differ in each of these zones. A trend has been revealed towards a gradual sub-meridional change in the forest-cover value and SWIR reflectance of abandoned arable lands from the forest zone to the steppe zone. The SWIR reflectance measured for abandoned arable lands based on Landsat OLI data can be an indicator of differences in the forest cover state at the zone and intra-zone levels. The spectral reflectance features of the abandoned arable lands in the SWIR range reveal the differences not only between the natural zones but also between the physical geographic subzones that are units of a lower territorial rank. The decrease in the forest-cover value of abandoned arable lands is accompanied by an increase in their reflectance. Based on the spatial analysis of the spectral reflectance features of abandoned arable lands, it was found that the territorial change of SWIR reflectance (1.56–1.66 μm) shows a change in the natural conditions from the forest zone to the steppe zone.

Keywords: abandoned arable lands, vegetation cover, European Russia, spectral response, remote sensing

Accepted: 09.04.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-169-181

References

1. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Current state and development prospects of satellite mapping methods of Russia's vegetation cover, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 203–221 (in Russian).
2. Budyko M. I., *Global'naya ekologiya* (Global ecology), Moscow: Mysl', 1977, 327 p. (in Russian).
3. Goleusov P. V., Lisetskii F. N., *Vosproizvodstvo pochv v antropogennykh landshaftakh lesostepi* (Soil reproduction in anthropogenic landscapes of forest-steppe), Moscow: GEOS, 2009, 210 p. (in Russian).
4. Zhukova E. Yu., Andrianova E. A., Vegetation Characteristics of the City of Chernogorsk Environs Fallow Lands in the Republic of Khakasia, *Vestnik Khakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. F. Katanova*, 2013, No. 3, pp. 9–13 (in Russian).
5. Kitov M. V., Tsapkov A. N., Assessment of the area of fallow land in the Belgorod region and other regions of European Russia for the period 1990–2013 years, *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser.: Estestvennye nauki*, 2015, No. 15(212), pp. 163–171 (in Russian).
6. Lyuri D. I., Goryachkin S. V., Karavaeva N. A., Denisenko E. A., Nefedova T. G., *Dynamics of agricultural lands of Russia in XX century and postagrogenic restoration of vegetation and soils*, Moscow: GEOS, 2010, 416 p. (in Russian).

7. Milkov F. N., *Prirodnye zony SSSR* (Natural zones of the USSR), Moscow: Mysl', 1977, 149 p. (in Russian).
8. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Bartalev S. A., Loupian E. A., Automated annual cropland mapping from reconstructed time series of Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 112–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-112-127.
9. Prokaev V. I., *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie* (Physico-geographical zoning), Moscow: Prosveshchenie, 1983, 176 p. (in Russian).
10. Rulev A. S., Yuferev V. G., Analytical determination of the boundaries of transition natural zones (ecotones), *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. 11: Estestvennye nauki*, 2015, No. 1(11), pp. 72–77 (in Russian).
11. Terekhin E. A., Recognition of abandoned agricultural lands using seasonal NDVI values, *Komp'yuternaya optika*, 2017, Vol. 41, No. 5, pp. 719–725 (in Russian).
12. Terekhin E. A., Spatial analysis of tree vegetation of abandoned arable lands using their spectral response in forest-steppe zone of Central Chernozem Region, *Sovremennye 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.
13. Joshi N., Ehammer A., Fensholt R., Grogan K., Jepsen M. R., Baumann M., Hostert P., Kuemmerle T., Meyfroidt P., Mitchard E. T. A., Ryan C. M., Reiche J., Waske B., A review of the application of optical and radar remote sensing data fusion to land use mapping and monitoring, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(1), Art. No. 70.
14. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Version 5.0*. USGS. Department of the Interior. Sioux Falls, South Dakota: EROS, 2019, 114 p., available at: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.
15. Löw F., Prishchepov A. V., Waldner F., Dubovyk O., Akramkhanov A., Biradar C., Lamers J., Mapping Cropland Abandonment in the Aral Sea Basin with MODIS Time Series, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10(2), Art. No. 159.
16. Prishchepov A. V., Radeloff V. C., Dubinin M., Alcantara C., The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 126, pp. 195–209.
17. Yin H., Prishchepov A. V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V. C., Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 210, pp. 12–24.