

Особенности спектрально-отражательных характеристик и возможности распознавания естественных ландшафтов лесостепи на основе спутниковых данных 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*

Количественный анализ спектрально-отражательных характеристик ландшафтов необходим для развития подходов к их распознаванию и анализу на основе данных дистанционного зондирования Земли. В статье проанализированы особенности отражательной способности элементов природных ландшафтов, типичных для лесостепной зоны и юга Среднерусской возвышенности, по данным Sentinel-2: овражно-балочных систем с разной величиной покрытия древесной растительностью, участков пойм, разновозрастных широколиственных лесов. Установлено, что каналы Sentinel-2 можно разделить на две группы по особенностям спектрально-отражательных характеристик наиболее типичных элементов ландшафтов региона. Безлесные участки, участки овражно-балочных систем с различной лесистостью, участки пойм и широколиственные леса различного возраста характеризуются наиболее высокими, статистически значимыми различиями в каналах синего, красного и коротковолнового инфракрасного диапазонов. С использованием пошагового дискриминантного анализа изучены возможности автоматизированного распознавания элементов ландшафтов на основе спектрально-отражательных характеристик каналов Sentinel-2. Установлено, что коэффициенты спектральной яркости коротковолновых инфракрасных диапазонов вносят наибольший вклад в разделение элементов ландшафтов региона. Рассчитаны и верифицированы функции классификации, позволяющие в автоматизированном режиме разделять элементы ландшафтов лесостепи с суммарной точностью до 85,6 %.

Ключевые слова: ландшафты лесостепи, Среднерусская возвышенность, спектрально-отражательные характеристики, дискриминантный анализ, Sentinel-2

Одобрена к печати: 13.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-195-207

Введение

Необходимым условием при разработке подходов к распознаванию, оценке состояния и изменений в ландшафтах на основе данных дистанционного зондирования Земли выступает количественный анализ их спектрально-отражательных свойств (Шинкаренко, Барталев, 2023; Fan et al., 2017; Meng et al., 2019). Одни из ключевых изменений связаны с динамикой лесистости территории и состоянием лесных экосистем. Обусловлено это тем, что тенденции динамики лесистости и надземной фитомассы могут оказывать влияние на микроклимат и гидрологические процессы (Липка и др., 2021; Ольчев и др., 2017; Bonan, 2008), биогеохимические циклы, включая потоки углерода (Lisetskii et al., 2023; Zhao et al., 2018) и его запасы (Рыжова и др., 2015; Uniyal et al., 2022).

Формирование древесной растительности на травянистых участках в условиях лесной и лесостепной природных зон в начале XXI в. относится к одним из наиболее значительных естественных изменений их ландшафтов (Королева и др., 2018; Терехин, Чендев, 2019; Ershov et al., 2022). Количественный анализ связи лесистости и спектрально-отражательных характеристик экосистем становится при этом основой для ретроспективных оценок облесённости территории (Терехин, 2021; Potapov et al., 2015; Zhang et al., 2014). Вместе с тем на нём базируется и территориальный анализ различий в лесопокрытой площади (Feng et al., 2016; Kim et al., 2014; White et al., 2017) в условиях, когда спутниковые данные выступают практически единственным источником информации, позволяющим её оценить.

Разнообразие природных экосистем и высокая вариабельность их спектрально-отражательных характеристик оставляют открытыми многие вопросы в исследовании влияния на отражательную способность элементов ландшафтов разных природных зон. Появление новых типов спутниковых данных, повышение их качества, связанное с радиометрическим и спектральным разрешением, позволяет на новом уровне подойти к получению информации об отражательных свойствах экосистем и их использованию для мониторинга и анализа многолетних изменений.

Данные дистанционного зондирования, получаемые со спутников Sentinel-2, в сравнении со снимками с сенсоров предыдущих поколений, характеризуются сочетанием одновременно достаточно большого числа каналов, высоким радиометрическим и пространственным разрешением. Анализ их возможностей для изучения наземных экосистем в настоящее время выступает одной из ключевых задач в области исследования земной поверхности по данным спутниковых наблюдений (Emmert et al., 2023; Mulverhill et al., 2023; Yang et al., 2023). Обусловлено это возможностью более объективной оценки отражательных характеристик ландшафтов с учётом накопления в перспективе многолетних рядов для спутниковых данных этого типа.

Ландшафты юга Среднерусской возвышенности располагаются в условиях умеренно-континентального климата с тенденцией к повышению характеристик теплообеспеченности (Буряк, Терехин, 2020). Элементы естественных ландшафтов в значительной степени представлены широколиственными лесами, овражно-балочными системами (ОБС), участками речных долин. Основу лесопокровных земель составляют широколиственные леса (Дегтярь и др., 2016). Наиболее распространённой лесообразующей породой является дуб. Значительная часть дубрав расположена на водоразделах и правых, возвышенных, берегах рек.

Овражно-балочные системы — неотъемлемый элемент ландшафтов региона (Lisetskii, Vuyak, 2023). В них сосредоточена основная часть природных травянистых участков. В овражно-балочной сети представлена преимущественно злаковая растительность, включая ковыль. На склонах балок также распространена кальцефильная растительность, в том числе иссоп меловой, левкой душистый, дубровник белойочный, астрагал. Для пойм рек характерна влаголюбивая растительность, представленная в значительной степени различными видами осок и тростником. Во многих овражно-балочных системах в последние десятилетия получили развитие процессы формирования древесной растительности (Терехин, Чендев, 2019).

Цель работы состояла в количественной оценке спектрально-отражательных характеристик наиболее типичных элементов природных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности по данным Sentinel-2 с последующим анализом возможностей их автоматизированного распознавания. Задачи исследования включали установление закономерностей изменения спектрально-отражательных свойств в ряду элементов ландшафтов региона, к которым относятся участки овражно-балочных систем с разной величиной покрытия древесной растительностью, участки пойм, разновозрастные широколиственные лесные массивы. В ходе исследования были выявлены диапазоны Sentinel-2, в которых наиболее существенны различия между элементами ландшафтов, и проведён дискриминантный анализ их спектрально-отражательных характеристик, направленный на оценку возможностей распознавания.

Материалы и методика исследования

Объекты исследования располагались на территории Белгородской и частично Курской областей (рис. 1, см. с. 197) и были подобраны таким образом, чтобы репрезентативно представлять особенности естественных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности. Для количественного сравнения их спектральной отражательной способности выборку стремились формировать таким образом, чтобы анализируемые объекты располагались в пределах соседних тайлов (фрагментов) снимков Sentinel-2 одного и того же времени получения.

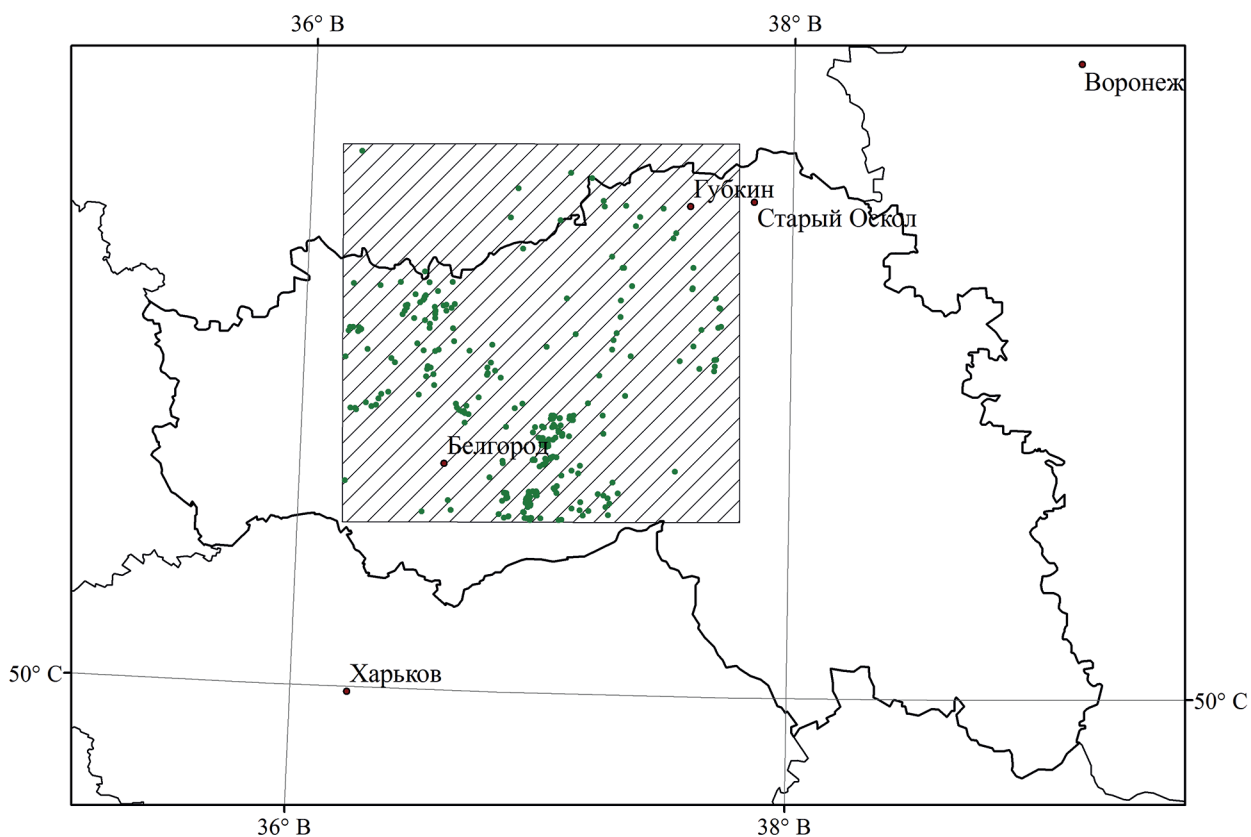


Рис. 1. Местоположение анализируемой территории и изученных элементов ландшафтов

Подбор участков овражно-балочной сети и пойменных участков осуществлялся методом совместного анализа данных Sentinel-2 с использованием каналов наиболее высокого пространственного разрешения — 10 м/пиксель. Овражно-балочные системы отбирали таким образом, чтобы они репрезентативно представляли участки без древесной растительности, участки с лесистостью до 40 % и участки с лесистостью более 40 %, т. е. характеризовали соответствующий элемент ландшафтов по наиболее значительным различиям в величине покрытия древесной растительностью. Соответствующий порог лесистости выбран исходя из того, что её величина для овражно-балочных систем с присутствием древесной растительности в конце второго десятилетия XXI в. варьировала от 20 до более 70 % при их средней лесистости в Среднерусской лесостепи 45 % (Терехин, 2021). Под лесистостью в исследовании подразумевается отношение площади покрытых лесом участков к общей площади овражно-балочных систем. Для каждой овражно-балочной системы подготовлено два векторных слоя, один из которых включал её контуры, а второй — участки, покрытые древесной растительностью по состоянию на 2015 г. Оценка площади облесённых участков осуществлялась с использованием снимков сверхвысокого пространственного разрешения (1 м), полученных из интернет-сервисов открытого доступа, преимущественно Google Планета Земля (англ. Google Earth). На основе сформированных векторных слоёв для каждого анализируемого участка овражно-балочных систем определена фактическая лесистость по состоянию на соответствующую дату.

Подбор лесных массивов осуществлялся с использованием материалов лесоустройства и снимков Sentinel-2, синтезированных в комбинациях каналов видимого диапазона и наиболее высокого пространственного разрешения. Участки исследования, лесотаксационные выделы, отбирали таким образом, чтобы они репрезентативно представляли различные классы широколиственных лесов (нагорных дубрав) до 100 лет, т. е. лесов, составляющих основу лесопокровных земель региона. Они включали леса пяти классов возраста: 0–20, 20–40, 40–60,

60–80, 80–100 лет. Для анализа подбирали выделы, в которых основной породой выступал дуб черешчатый. Для каждого выдела также была подготовлена векторная основа.

Сформированная выборка, представляющая, таким образом, ключевые элементы естественных ландшафтов, включала 472 объекта суммарной площадью 8486 га (табл. 1). Объекты исследования располагались на площади 12 614,5 км², что составляло более 46 % территории Белгородской обл. Представленность объектов исследования на участке соответствующего размера также обеспечивала репрезентативность полученных результатов для ландшафтов региона.

Таблица 1. Характеристики элементов ландшафтов юга Среднерусской возвышенности, для которых были изучены особенности спектрально-отражательных свойств

Элемент ландшафта	Число участков	Площадь, га	
		средняя	общая
Овражно-балочные системы без лесных массивов	16	33,7	538,4
» » » с лесистостью до 40 %	19	43,4	824,9
» » » » от 40 %	35	40,0	1398,7
Участки пойм речных долин	36	55,8	2008,4
Лиственные леса моложе 20 лет	50	2,6	130,2
» » 20–40 лет	92	4,6	422,0
» » 40–60 лет	34	8,0	271,6
» » 60–80 лет	73	10,1	734,1
» » 80–100 лет	117	18,4	2157,8
Всего	472	18,0	8486,0

Оценка спектрально-отражательных характеристик объектов осуществлена на основе снимков Sentinel-2, полученных 26 августа 2015 г. Они включали тайлы с номерами T37UCS и T37UDS. Подбор изображений осуществлялся таким образом, чтобы сроки их получения были максимально близкими к срокам проведения лесоустройства. Изображения прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию с использованием модуля Sen2Cor программы SNAP (англ. Sentinel Application Platform), в результате которой они были пересчитаны из уровня L1C в уровень L2A, содержащий значения спектральной отражательной способности на нижней границе атмосферы (англ. Bottom Of Atmosphere — BOA). Оценка коэффициентов спектральной яркости для элементов ландшафтов осуществлена в каналах видимого и инфракрасного спектра, включая диапазоны: синий (англ. blue) (канал 2), зелёный (англ. green) (канал 3), красный (англ. red) (канал 4), три крайних красных (англ. red edge) (каналы 5–7), ближний инфракрасный (англ. near infrared — NIR) (канал 8A) и два коротковолновых инфракрасных (англ. short wave infrared — SWIR) (каналы 11–12). Вычисление спектрально-отражательных характеристик для каждого элемента ландшафтов осуществлено методом зональной статистики, т. е. для них вычислены коэффициенты спектральной яркости в пределах их контуров.

Количественный (статистический) анализ спектрально-отражательных характеристик включал выявление закономерностей изменения коэффициентов спектральной яркости в ряду исследуемых элементов ландшафтов, оценку статистической значимости их различий, определение диапазонов с наибольшими различиями по отражательной способности. На следующем этапе с использованием пошагового дискриминантного анализа осуществлена оценка возможностей автоматизированного распознавания элементов ландшафтов на основе их спектрально-отражательных свойств.

Результаты и их обсуждение

Диапазоны снимков Sentinel-2, исходя из спектральной отражательной способности элементов ландшафтов, типичных для юга Среднерусской возвышенности, можно разделить на две группы. К первой группе относятся каналы, в которых наблюдается с незначительными отклонениями тенденция снижения коэффициентов спектральной яркости в следующем ряду: овражно-балочные системы без древесной растительности – овражно-балочные системы с лесистостью до 40 % – травянистые участки пойм – овражно-балочные системы с лесистостью более 40 % – широколиственные леса моложе 20 лет – широколиственные леса более старших классов возраста. Эта группа включает каналы синего, зелёного, красного, первого крайнего красного и коротковолнового инфракрасного диапазонов спектра: каналы 2–5, 11, 12 (рис. 2). В них прослеживается связь между снижением отражательной способности и увеличением наземной биомассы древесной растительности – от безлесных участков овражно-балочной сети, характеризующихся максимальной отражательной способностью, до лесов возрастом 80–100 лет, которые в изученном ряду лесных экосистем характеризуются наиболее высокой наземной фитомассой (Базилевич, 1993). Некоторое исключение составляют участки пойм, так как в этом случае в особенности отражения вносит вклад повышенное увлажнение территории.

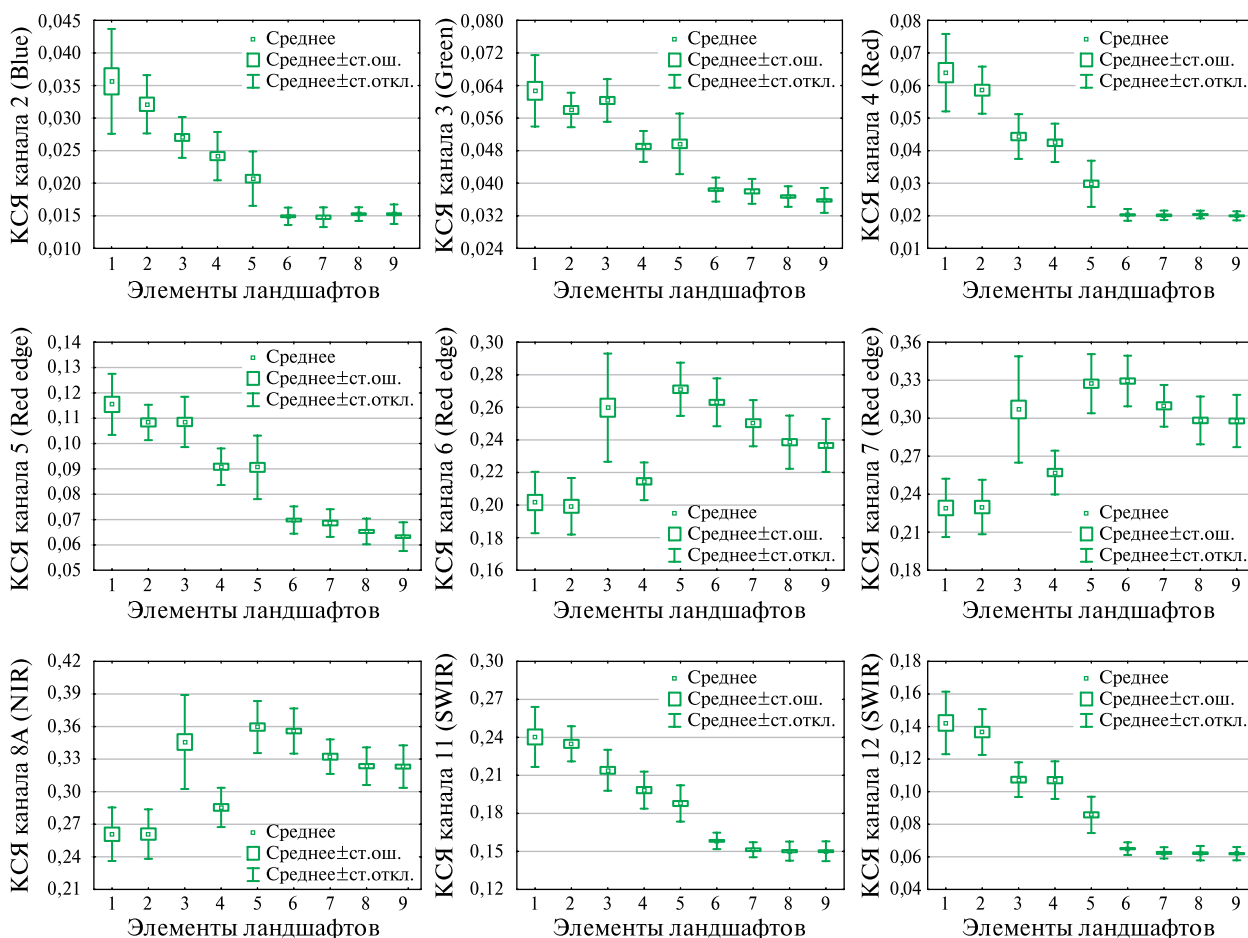


Рис. 2. Параметры коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в каналах Sentinel-2 (ось ординат), рассчитанные для элементов естественных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности: 1 – овражно-балочные системы (ОБС) без лесных участков; 2 – ОБС с лесистостью до 40 %; 3 – участки пойм; 4 – ОБС с лесистостью выше 40 %; 5 – леса моложе 20 лет; 6 – леса 20–40 лет; 7 – леса 40–60 лет; 8 – леса 60–80 лет; 9 – леса 80–100 лет

Ко второй группе относятся каналы, в которых отражательная способность сначала растёт в ряду: овражно-балочные системы без древесной растительности – овражно-балочные системы с лесистостью до 40 % – овражно-балочные системы с лесистостью более 40 % – участки пойм – широколиственные леса моложе 20 лет, после чего коэффициенты спектральной яркости повторяют тенденцию, характерную для первой группы каналов, – снижаются в направлении повышения возраста лесов. Это вторые два канала из крайней красной области (каналы 6, 7) и ближний инфракрасный канал – 8А (см. *рис. 2*). В данной группе диапазонов наибольшая отражательная способность характерна для лесов моложе 20 лет и лесов 20–40 лет, наименьшая – для безлесных участков овражно-балочных систем. В отличие от первой группы каналов Sentinel-2 выраженных закономерностей в изменении характеристик фитомассы элементов ландшафтов во второй группе не наблюдается. При этом с учётом времени получения спутниковых снимков (август) просматривается некоторая связь с их сезонной продуктивностью, которая наиболее высока для средневозрастных лесов и наиболее низкая для безлесных, травянистых участков. Для них в условиях региона часто типична растительность выходов мела, представленных на склонах овражно-балочных систем.

Из графиков на *рис. 2* видно, что наиболее значительные различия между элементами ландшафтов с самой высокой и самой низкой отражательной способностью в каналах видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов (безлесных участков овражно-балочных систем и лесов старше 80 лет) составляют от 2,3 до 3,3 раз. Размах варьирования по спектрально-отражательным характеристикам элементов ландшафтов в коротковолновом инфракрасном диапазоне значительно выше, чем на участке ближнего инфракрасного спектра. В этом канале, а также в крайних красных каналах, расположенных рядом с ним, различия между элементами ландшафтов по отражательной способности минимальны.

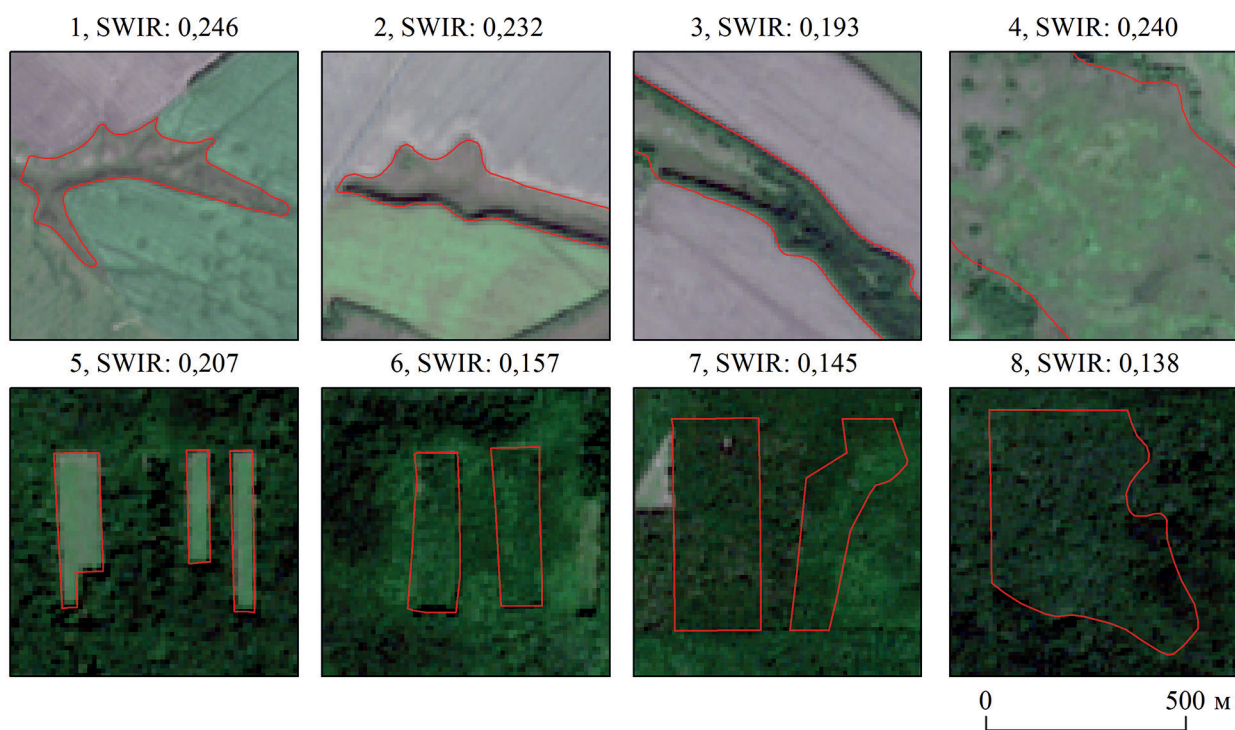


Рис. 3. Примеры элементов естественных ландшафтов юга Среднерусской возвышенности на снимках Sentinel-2 августа (вариант синтеза: red – green – blue) и их спектрально-отражательные характеристики в коротковолновом инфракрасном диапазоне: 1 – овражно-балочные системы (ОБС) без лесных участков; 2 – ОБС с лесистостью до 40 %; 3 – ОБС с лесистостью выше 40 %; 4 – участки пойм; 5 – леса до 20 лет; 6 – леса 20–40 лет; 7 – леса 40–60 лет; 8 – леса 80–100 лет

Изменение спектрально-отражательных характеристик SWIR-диапазона в ряду анализируемых элементов ландшафтов (рис. 3, см. с. 200) сопровождается достаточно заметными различиями между ними при визуальном анализе снимков в комбинациях каналов Sentinel-2 наиболее высокого пространственного разрешения (10 м).

По результатам дисперсионного анализа также установлено, что тип элементов ландшафтов оказывает наибольшее влияние на спектрально-отражательные характеристики в коротковолновых инфракрасных, красном и синем каналах Sentinel-2. Как показывают результаты попарного сравнения средних значений отражательной способности (по тесту Тьюки), вычисленных для элементов ландшафтов юга Среднерусской возвышенности, наибольшее число статистически значимых различий между ними зафиксировано в синем (канал 2), красном (канал 4) и коротковолновом инфракрасном (канал 11) диапазонах (табл. 2) на уровне 0,05.

Максимально возможное число взаимных статистически значимых различий между элементами ландшафтов по спектрально-отражательным характеристикам в случае настоящего исследования составляет 72. Их наличие между большинством элементов ландшафтов выступает основанием для перехода к следующему этапу — оценке возможностей автоматизированного разделения элементов ландшафтов лесостепи. Она осуществлена с использованием пошагового дискриминантного анализа, независимыми переменными в котором выступали коэффициенты спектральной яркости в каналах Sentinel-2, зависимой переменной — тип элемента ландшафтов.

Таблица 2. Число взаимных статистически значимых различий между элементами природных ландшафтов лесостепи по спектральной отражательной способности в каналах Sentinel-2

Канал (диапазон) Sentinel-2	Число статистически значимых различий между элементами ландшафтов
Синий	60
Зелёный	56
Красный	58
Крайний красный 1	56
» » 2	52
» » 3	56
Ближний инфракрасный	54
Коротковолновый инфракрасный 1	62
» » 2	56

Дискриминантный анализ — метод многомерного статистического анализа, позволяющий оценить возможности разделения исследуемых классов и подобрать переменные, которыми в нашем случае выступают зональные спектрально-отражательные характеристики, вносящие наибольший вклад в разделение классов объектов.

Из результатов дисперсионного и графического анализа величины различий отражательных характеристик элементов ландшафтов, полученных в рамках первого этапа исследования, следует, что широколиственные леса классов возраста старше 20 лет достаточно близки друг другу по отражательным свойствам в общем ряду элементов ландшафтов (см. рис. 2). По этой причине при проведении дискриминантного анализа они были объединены в один класс, охватывающий леса возрастом 20–100 лет. Для анализа оценки возможности распознавания отобраны диапазоны, в которых установлена наиболее высокая значимость различий элементов ландшафтов по их спектрально-отражательным свойствам. К ним относятся синий (канал 2), красный (канал 4) и коротковолновые инфракрасные каналы (каналы 11, 12) Sentinel-2. Часть каналов также исключена из анализа вследствие высокой взаимной корреляции их коэффициентов спектральной яркости. Учитывая, что результаты дискриминантного анализа требуют верификации, вся выборка была разбита на обучающую и тестовую. Каждая

из них включала по 236 наблюдений. На обучающей выборке осуществлялся пошаговый дискриминантный анализ и расчёт функций классификации. Проверка их работоспособности проводилась на тестовой выборке.

Согласно результатам пошагового дискриминантного анализа (табл. 3) в модель распознавания последовательно включены спектрально-отражательные характеристики коротковолновых инфракрасных (SWIR), красного и синего каналов. Все переменные статистически значимы на уровне 0,05.

Таблица 3. Результаты пошагового дискриминантного анализа при включении спектрально-отражательных характеристик в модель распознавания элементов ландшафтов юга Среднерусской возвышенности

Канал Sentinel-2	Шаг	F-значение
12-й, коротковолновый инфракрасный 2	1	508,1
11-й, » » 1	2	158,1
4-й, красный	3	94,0
2-й, синий	4	71,6

Эффективность спектрально-отражательных характеристик для разделения элементов естественных ландшафтов снижается, таким образом, по мере уменьшения длины волны, так как сначала в модель включены каналы из инфракрасной, а затем из видимой области спектра.

Функции классификации, коэффициенты которых рассчитаны в результате дискриминантного анализа (табл. 4), представляют собой линейные уравнения, в которых независимыми переменными (x_1, \dots, x_4) выступают спектрально-отражательные характеристики в коротковолновых инфракрасных, красном и синем каналах Sentinel-2.

Таблица 4. Коэффициенты линейных функций классификации для разделения элементов ландшафтов юга Среднерусской возвышенности

Коэффициенты спектральной яркости в каналах Sentinel-2	Овражно-балочные системы			Поймы	Леса	
	без леса	с лесистостью до 40 %	с лесистостью от 40 %		моложе 20 лет	старше 20 лет
Канал 12 (x_1)	-3259,2	-2632,5	-2825,4	-4312,8	-3849,3	-3676,7
» 11 (x_2)	3747,5	3509,9	3424,4	4194,7	4153,2	3712,5
» 4 (x_3)	3725,7	2966,6	1772,4	2174,6	-632,7	-839,2
» 2 (x_4)	-1064,7	-1294,1	-390,0	689,9	2943,7	2847,7
Константа	-325,2	-301,7	-223,8	-267,9	-253,1	-181,0

Функции позволяют вычислять для конкретных объектов классификационный вес каждого возможного элемента ландшафтов: овражно-балочных систем без древесной растительности, участков пойм, овражно-балочных систем с лесистостью ниже 40 %, овражно-балочных систем с лесистостью выше 40 %, широколиственных лесов моложе 20 лет и лесов старше 20 лет. Конкретный участок автоматизировано будет относиться к тому элементу ландшафта, для которого рассчитанный вес оказался наивысшим. Использование полученных функций обуславливает необходимость применения векторного слоя, включающего контуры анализируемых классов объектов с рассчитанными значениями спектрально-отражательных характеристик. Из анализа в таком случае изначально должны быть исключены типы объектов, представленные в регионе, но не участвующие в исследовании, такие как пахотные угодья и населённые пункты.

Средняя точность распознавания, достигнутая с помощью вычисленных функций, составила 91,9 % на обучающей и 85,6 % на тестовой выборке (табл. 5). Наибольшая точность распознавания получена для лесов старше 20 лет, наименьшая — для овражно-балочных систем с отсутствием участков сплошной древесной растительности.

Наиболее высокая точность распознавания лесов старше 20 лет, достигнутая по результатам дискриминантного анализа, обуславливается тем, что этот класс элементов ландшафтов наиболее сильно отличается от всех остальных элементов по спектрально-отражательным характеристикам во всех изученных каналах Sentinel-2. Самое значительное попадание в соседние классы при автоматизированном разделении характерно для овражно-балочных систем без древесной растительности и овражно-балочных систем с лесистостью до 0,4. Эти элементы ландшафтов по своей сущности очень близки друг другу, и наибольший вклад в их спектрально-отражательные характеристики вносят представленные в них травянистые участки.

Таблица 5. Точность распознавания элементов ландшафтов, типичных для юга Среднерусской возвышенности, с использованием рассчитанных функций классификации

Элемент ландшафта	Точность распознавания, %	
	Обучающая выборка	Тестовая выборка
Овражно-балочные системы без леса	50,0	37,5
» » » с лесистостью ниже 40 %	54,5	37,5
» » » » выше 40 %	87,5	94,7
Участки пойм	63,6	72,0
Леса моложе 20 лет	78,9	51,6
» старше 20 лет	100,0	99,3
Всего	91,9	85,6

Эффективная реализация предложенного подхода обуславливает необходимость применения векторного слоя анализируемых объектов. Использование попиксельной классификации для решения задач исследования в сравнении с используемым подходом будет осложняться тем, что некоторые элементы ландшафтов региона, например овражно-балочные системы с присутствием древесной растительности, одновременно содержат пиксели, относящиеся к разным уголкам, существенно различающимся по спектрально-отражательным характеристикам: безлесным участкам и лесопокрытым землям.

Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем при мониторинге изменений в естественных ландшафтах региона, связанных с динамикой лесистости овражно-балочных систем и возраста лесных экосистем. Переход элементов ландшафтов при отсутствии антропогенных нарушений в другие категории, например лесов — в более старшие возрастные группы, будет оказывать влияние на спектрально-отражательные свойства, которые могут быть использованы для количественного и территориального анализа элементов ландшафтов в каждой категории, изученной в рамках исследования. Основное ограничение рассчитанных функций классификации заключается в том, что они учитывают только спектрально-отражательные характеристики естественных ландшафтов, типичных для лесостепной зоны и юга Среднерусской возвышенности, в первую очередь широколиственных лесов, которые широко представлены в регионе и в значительно меньшей степени — в других природных зонах.

Выводы

На основе данных с более 450 анализируемых объектов изучены параметры спектральной отражательной способности для ключевых элементов естественных ландшафтов юга

Среднерусской возвышенности с использованием данных Sentinel-2: безлесных участков, овражно-балочных систем с разной лесистостью, участков пойм и разновозрастных широколиственных лесов. В диапазонах видимого и коротковолнового инфракрасного спектра установлена закономерность снижения отражательной способности в ряду элементов ландшафтов от безлесных участков до участков с лесистостью более 40 %, а затем в ряду лесных экосистем по мере увеличения их возраста. В диапазонах крайнего красного и ближнего инфракрасного спектра для безлесных участков и участков овражно-балочных систем с разной лесистостью наблюдается обратная закономерность до лесов моложе 20 лет. После повторяется тенденция к снижению отражательной способности по мере увеличения возраста лесных массивов. Наибольшее число статистически значимых различий между изученными элементами ландшафтов выявлено в диапазонах синего, красного (каналы 2, 4) и коротковолнового инфракрасного спектра (канал 11). С использованием пошагового дискриминантного анализа изучена возможность автоматизированного разделения элементов естественных ландшафтов региона. Рассчитаны функции классификации, показавшие на тестовой выборке суммарную точность распознавания 85,6 %.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00169, <https://rscf.ru/project/23-17-00169/>.

Литература

1. *Базилевич Н. И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
2. *Буряк Ж. А., Терехин Э. А.* Геоинформационное моделирование пространственно-временной изменчивости агроклиматических условий // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44. № 3. С. 333–342.
3. *Дегтярь А. В., Григорьева О. И., Татаринцев Р. Ю.* Экология Белогорья в цифрах. Белгород: Константа, 2016. 122 с.
4. *Королева Н. В., Тихонова Е. В., Ершов Д. В. и др.* Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83–96. DOI: 10.7868/S0024114818020018.
5. *Липка О. Н., Корзухин М. Д., Замолодчиков Д. Г. и др.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546. DOI: 10.31857/S0024114821050077.
6. *Ольчев А. В., Розинкина И. А., Кузьмина Е. В. и др.* Оценка влияния изменения лесистости центрального региона Восточно-Европейской равнины на летние погодные условия // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 4. С. 83–105. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-83-105.
7. *Рыжова И. М., Ерохова А. А., Подвезенная М. А.* Изменение запасов углерода в постагрогенных экосистемах в результате естественного восстановления лесов в Костромской области // Лесоведение. 2015. № 4. С. 307–317.
8. *Терехин Э. А.* Пространственно-временная оценка лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи с применением спектрально-отражательных признаков // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 84–96. DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-83-105.
9. *Терехин Э. А., Чендев Ю. Г.* Анализ пространственно-временных изменений лесистости на юге лесостепи Среднерусской возвышенности по спутниковым данным // Лесоведение. 2019. № 4. С. 257–265. DOI: 10.1134/S0024114819030094.
10. *Шинкаренко С. С., Барталев С. А.* Анализ влияния видового состава, проективного покрытия и фитомассы растительности аридных пастбищных ландшафтов на их спектрально-отражательные свойства по данным наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 176–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
11. *Bonan G. B.* Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests // Science. 2008. V. 320. No. 5882. P. 1444–1449. DOI: 10.1126/science.1155121.
12. *Emmert L., Negrón-Juárez R. I., Chambers J. Q. et al.* Sensitivity of optical satellites to estimate windthrow tree-mortality in a Central Amazon forest // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 16. Article 4027. DOI: 10.3390/rs15164027.
13. *Ershov D. V., Gavriljuk E. A., Koroleva N. V. 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 Sensing. 2022. V. 14. No. 2. Article 322. DOI: 10.3390/rs14020322.

14. *Fan C., Myint S. W., Rey S. J., Li W.* Time series evaluation of landscape dynamics using annual Landsat imagery and spatial statistical modeling: Evidence from the Phoenix metropolitan region // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2017. V. 58. P. 12–25. DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.009.
15. *Feng M., Sexton J. O., Huang C. et al.* Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 184. P. 73–85. DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.012.
16. *Kim D.-H., Sexton J. O., Noojipady P. et al.* Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 155. P. 178–193. DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.017.
17. *Lisetskii F. N., Buryak Z. A.* Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin // *Water*. 2023. V. 13 No. 15. Article 2443. DOI: 10.3390/w15132443
18. *Lisetskii F. N., Buryak Z. A., Marinina O. A. et al.* Features of soil organic carbon transformations in the southern area of the East European Plain // *Geosciences*. 2023. V. 13. No. 9. Article 278. DOI: 10.3390/geosciences13090278.
19. *Meng Y., Liu X., Wu L. et al.* Spatio-temporal variation indicators for landscape structure dynamics monitoring using dense normalized difference vegetation index time series // *Ecological Indicators*. 2019. V. 107. Article 105607. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105607.
20. *Mulverhill C., Coops N. C., Achim A.* Continuous monitoring and sub-annual change detection in high-latitude forests using harmonized Landsat Sentinel-2 data // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. V. 197. P. 309–319. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.02.002.
21. *Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A. et al.* Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 159. P. 28–43. DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
22. *Uniyal S., Purohit S., Chaurasia K. et al.* Quantification of carbon sequestration by urban forest using Landsat 8 OLI and machine learning algorithms in Jodhpur, India // *Urban Forestry and Urban Greening*. 2022. V. 67. Article 127445. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127445.
23. *White J. C., Wulder M. A., Hermosilla T. et al.* A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 194. P. 303–321. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.035.
24. *Yang X., Qiu S., Zhu Z. et al.* Mapping understory plant communities in deciduous forests from Sentinel-2 time series // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 293. Article 113601. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113601.
25. *Zhang J., Pham T.-T.-H., Kalacska M., Turner S.* Using Landsat Thematic Mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan, China: 1990–2010 // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 31. P. 25–36. DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.006.
26. *Zhao F., Huang C., Goward S. N. et al.* Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP) // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 209. P. 312–326. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.035.

Estimating the spectral reflectance and possibility of recognizing natural landscapes in forest-steppe zone using Sentinel-2 data

E. A. Terekhin

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

Quantitative analysis of natural landscape spectral reflectance is necessary for development of approaches to their recognition and assessment using remote sensing data. The article analyzes the reflectance of landscapes typical of forest-steppe natural zone and the south of the Central Russian Upland using Sentinel-2 data: small-dry-valleys with different forest cover, floodplain areas, and oak forests of different ages. Sentinel-2 bands can be divided into 2 groups according to reflectance of the most typical landscape components in the region. Treeless areas of landscapes, areas of small-dry-valleys with different forest cover, areas of floodplains and broad-leaved forests of various ages are characterized by the highest, statistically significant differences in the blue, red and short-wave infrared ranges. Possibilities of landscapes automated recognition were investigated using stepwise discriminant analysis

of Sentinel-2 spectral reflectance. It has been established that the spectral reflectance in short-wave infrared ranges makes the greatest contribution to the recognition of landscape components in the region. Classification functions have been calculated and verified, allowing automated recognition of forest-steppe landscape components with a total accuracy of up to 85.6 %.

Keywords: forest-steppe landscapes, Central Russian Upland, spectral reflectance, discriminant analysis, Sentinel-2

Accepted: 13.11.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-195-207

References

1. Bazilevich N. I., *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* (Biological productivity of ecosystems in Northern Eurasia), Moscow: Nauka, 1993, 293 p. (in Russian).
2. Buryak Zh. A., Terekhin E. A., Geoinformation modeling of spatio-temporal variability of agroclimatic conditions, *Regional'nye geosistemy*, 2020, Vol. 44, No. 3, pp. 333–342 (in Russian).
3. Degtyar' A. V., Grigor'eva O. I., Tatarintsev R. Yu., *Ekologiya Belgor'ya v tsifrah* (Ecology of Belgorie in figures), Belgorod: Konstanta, 2016, 122 p. (in Russian).
4. Koroleva N. V., Tikhonova E. V., Ershov D. V. et al., Twenty-five years of reforestation on nonforest lands in Smolenskoe Poozerye national park according to Landsat imagery assessment, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 719–728, DOI: 10.1134/S1995425518070077.
5. Lipka O. N., Korzukhin M. D., Zamolodchikov D. G. et al., A role of forests in natural systems adaptation to climate change, *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 531–546 (in Russian), DOI: 10.31857/S0024114821050077.
6. Ol'chev A. V., Rozinkina I. A., Kuz'mina E. V. et al., Assessing the influence of forest cover changes on summer weather conditions in the central part of the East-European plain, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2017, Vol. 4, pp. 83–105 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-83-105.
7. Ryzhova I. M., Erokhova A. A., Podvezennaya M. A., Alterations of the carbon storages in postagrogenic ecosystems due to natural reforestation in Kostroma oblast, *Lesovedenie*, 2015, No. 4, pp. 307–317 (in Russian).
8. Terekhin E. A., Spatio-temporal assessment of forest cover of small-dry-valleys in the Central Russian forest-steppe using spectral response, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 4, pp. 84–96 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2017-4-83-105.
9. Terekhin E. A., Chendev Yu. G., Satellite-Derived Spatiotemporal Variations of Forest Cover in Southern Forest–Steppe, Central Russian Upland, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, No. 7, pp. 780–786, DOI: 10.1134/S1995425519070102.
10. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Analysis of the influence of species composition, projective cover, and phytomass of arid landscape pasture vegetation on spectral reflectance properties based on ground measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 176–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
11. Bonan G. B., Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests, *Science*, 2008, Vol. 320, No. 5882, pp. 1444–1449, DOI: 10.1126/science.1155121.
12. Emmert L., Negrón-Juárez R. I., Chambers J. Q. et al., Sensitivity of optical satellites to estimate windthrow tree-mortality in a Central Amazon forest, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 16, Article 4027, DOI: 10.3390/rs15164027.
13. Ershov D. V., Gavrilyuk E. A., Koroleva N. V. 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 Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 2, Article 322, DOI: 10.3390/rs14020322.
14. Fan C., Myint S. W., Rey S. J., Li W., Time series evaluation of landscape dynamics using annual Landsat imagery and spatial statistical modeling: evidence from the Phoenix metropolitan region, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 58, pp. 12–25, DOI: 10.1016/j.jag.2017.01.009.
15. Feng M., Sexton J. O., Huang C. et al., Earth science data records of global forest cover and change: Assessment of accuracy in 1990, 2000, and 2005 epochs, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 184, pp. 73–85, DOI: 10.1016/j.rse.2016.06.012.
16. Kim D.-H., Sexton J. O., Noojipady P. et al., Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 155, pp. 178–193, DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.017.
17. Lisetskii F. N., Buryak Z. A., Runoff of water and its quality under the combined impact of agricultural activities and urban development in a small river basin, *Water*, 2023, Vol. 13, No. 15, Article 2443, DOI: 10.3390/w15132443.

18. Lisetskii F. N., Buryak Z. A., Marinina O. A. et al., Features of soil organic carbon transformations in the southern area of the East European Plain, *Geosciences*, 2023, Vol. 13, No. 9, Article 278, DOI: 10.3390/geosciences13090278.
19. Meng Y., Liu X., Wu L. et al., Spatio-temporal variation indicators for landscape structure dynamics monitoring using dense normalized difference vegetation index time series, *Ecological Indicators*, 2019, Vol. 107, Article 105607, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105607.
20. Mulverhill C., Coops N. C., Achim A., Continuous monitoring and sub-annual change detection in high-latitude forests using Harmonized Landsat Sentinel-2 data, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, Vol. 197, pp. 309–319, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.02.002.
21. Potapov P. V., Turubanova S. A., Tyukavina A. et al., Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28–43, DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.027.
22. Uniyal S., Purohit S., Chaurasia K. et al., Quantification of carbon sequestration by urban forest using Landsat 8 OLI and machine learning algorithms in Jodhpur, India, *Urban Forestry and Urban Greening*, 2022, Vol. 67, Article 127445, DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127445.
23. White J. C., Wulder M. A., Hermosilla T. et al., A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 194, pp. 303–321, DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.035.
24. Yang X., Qiu S., Zhu Z. et al., Mapping understory plant communities in deciduous forests from Sentinel-2 time series, *Remote Sensing of Environment*, 2023, Vol. 293, Article 113601, DOI: 10.1016/j.rse.2023.113601.
25. Zhang J., Pham T.-T.-H., Kalacska M., Turner S., Using Landsat Thematic Mapper records to map land cover change and the impacts of reforestation programmes in the borderlands of southeast Yunnan, China: 1990–2010, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, Vol. 31, pp. 25–36, DOI: 10.1016/j.jag.2014.01.006.
26. Zhao F., Huang C., Goward S. N. et al., Development of Landsat-based annual US forest disturbance history maps (1986–2010) in support of the North American Carbon Program (NACP), *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 209, pp. 312–326, DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.035.