

ВЛИЯНИЕ ТИПОВ НАРУШЕННОСТИ НА СПЕКТРАЛЬНО-ОТРАЖАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕСОВ ПО ДАННЫМ SENTINEL-2

Э. А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

В статье представлены результаты анализа спектрально-отражательных характеристик для наиболее распространенных типов нарушений в хвойных лесах юга Среднерусской возвышенности на основе спутниковых данных Sentinel-2. Изучены возможности применения отражательной способности для распознавания участков с различными типами нарушенности древостоя и участков без его нарушений. Установлено, что различия в типах нарушений хвойных лесов оказывают наибольшее влияние на спектрально-отражательные характеристики в коротковолновых инфракрасных диапазонах и наименьшее влияние на характеристики ближнего инфракрасного диапазона и крайнего красного участка спектра, наиболее близкого к нему. Снижение влияния нарушающих факторов в ряду изученных типов нарушений от участков воздействия пожаров до ненарушенных лесов обуславливает уменьшение отражательной способности в диапазонах видимого и коротковолнового инфракрасного спектра. По результатам пошагового дискриминантного анализа установлено, что наибольший вклад в разделение типов нарушений вносят спектрально-отражательные характеристики коротковолновых инфракрасных каналов Sentinel-2. Далее следуют коэффициенты спектральной яркости видимого диапазона. Вклад спектрально-отражательных характеристик в разделение типов нарушений снижается по мере уменьшения длины волны. Суммарная точность распознавания типов нарушенности в хвойных лесах на тестовой выборке составила 63,5 %. Наиболее высока точность распознавания участков, пройденных пожарами, и участков, нарушенных болезнями деревьев. Для участков, нарушенных энтомофитофагами или болезнями и энтомофитофагами одновременно, эффективность распознавания очень низкая. Участки, нарушенные энтомофитофагами, при распознавании вследствие наименее значительных изменений в древостое наиболее часто попадают в класс участков лесов без нарушений.

Ключевые слова: лесные экосистемы, нарушенность, спектрально-отражательные характеристики, Среднерусская возвышенность, данные дистанционного зондирования, Sentinel-2

INFLUENCE OF DISTURBANCE TYPES IN FORESTS ON THE SENTINEL-2 SPECTRAL REFLECTANCE

E. A. Terekhin

Belgorod State National Research University

The article analyzes the Sentinel-2-derived reflectance of disturbance types in forest coniferous of the Central Russian Upland. The possibilities of using reflectance to recognize areas with different types of forest stand disturbance were studied. Differences in the forest disturbance types have the greatest impact on reflectance in the short-wave infrared ranges. Differences in forest disturbance type have the least impact on reflectance in the near-infrared and red edge ranges adjacent to it. Reducing the impact of disturbance factors in the series of disturbance types studied, from areas disturbed by fires to undisturbed forests, causes a

decrease in visible and short-wave reflectance. Based on the results of a stepwise discriminant analysis, it was found that the greatest contribution to the separation of forest disturbance types is made by reflectance of short-wave infrared bands of Sentinel-2. The next most effective ones are reflectance in the visible range. The contribution of reflectance to the separation of forest disturbance types decreases as the wavelength decreases. The total accuracy of recognizing types of disturbances in coniferous forests on the test sample was 63.5%. The highest accuracy in recognizing areas affected by fires and areas damaged by tree diseases. Forest areas disturbed by insect pests or diseases and pests are simultaneously characterized by low recognition accuracy. Forest areas disturbed by insect pests, when recognized due to the least significant changes in the forest stand, most often fall into the class of undisturbed forests.

Key words: forest ecosystems, disturbance, spectral reflectance, Central Russian Upland, remote sensing data, Sentinel-2

Введение

Появление участков нарушенности в лесах приводит к значительным изменениям их структуры, биоразнообразия (Ершов и др., 2015; Georgiev et al., 2021), влияет на процессы обмена веществом и энергией (Band, 1993; Lu et al., 2015; Seidl et al., 2017), включая потоки углерода (Бобкова, Лиханова, 2012; Чураков и др., 2013; Yu et al., 2023). В связи с этим анализ нарушенности выступает важнейшей задачей в системе мониторинга лесных экосистем на разных территориальных уровнях.

Нарушения древостоев приводят к изменению их спектрально-отражательных свойств, анализ которых может быть использован для пространственно-временной оценки нарушенности и ее картографирования (Schroeder et al., 2017; Воробьев и др., 2016; Терехин, 2020). В случае ретроспективных оценок данные дистанционного зондирования, как правило, выступают одним из наиболее объективных источников информации о нарушенности лесов (Барталев и др., 2015; Huang et al., 2010; Senf et al., 2017). Другой важнейшей задачей при ее изучении является определение причин, обусловивших ухудшение состояния или гибель древостоя. Типизация нарушений в лесах требует анализа их спектрально-отражательных свойств, объективность которого во многом определяется совокупностью характеристик используемых спутниковых данных. Оценка возможностей конкретных типов снимков в связи с этим становится ключевым звеном в совершенствовании подходов к картографированию и анализу типов нарушений в лесах.

Спутниковые данные Sentinel-2, накопление данных с которых ведется с 2015 г., отличаются сочетанием высокого радиометрического и пространственного разрешения в диапазонах, характеризующих различные участки видимого и инфракрасного спектра. По этой причине на их основе становится перспективным исследование на новом уровне ряда характеристик лесных экосистем, включая анализ биометрических параметров (Astola et al., 2019; Wittke et al., 2019) породного состава (Курбанов и др., 2018; Hemmerling et al., 2021), сомкнутости (Zhang et al., 2022; Eskandari, 2022). Одновременно интерес представляет исследование их возможностей для оценки типов нарушений в лесах, обусловленных влиянием негативных факторов: пожаров, болезней деревьев, энтомовредителей.

Хвойные леса на территории юга Среднерусской возвышенности занимают меньшие площади, чем широколиственные лесные массивы. При этом для хвойных лесов, в сравнении с лиственными, характерна меньшая устойчивость к воздействию негативных факторов, что

обуславливает и более значительные площади участков, нарушенных в них (Терехин, 2020). Высокая степень подверженности хвойных лесов нарушающим факторам обуславливает актуальность исследования типов нарушений и их влияния на спектральную отражательную способность. Решение соответствующей задачи необходимо для развития подходов к индикации и типизации нарушений в лесах.

Цель исследования состояла в оценке спектрально-отражательных характеристик и анализе возможности автоматизированного распознавания различных типов нарушений, характерных для хвойных лесов юга Среднерусской возвышенности по данным Sentinel-2.

Область исследования

Исследования проведено в пределах юга Среднерусской возвышенности на территории Белгородской области. Объектом исследования выступали хвойные леса, типичные для региона.

Материалы и методика исследования

Объекты для исследования подбирались таким образом, чтобы представлять участки с различными типами нарушений в хвойных лесах юга Среднерусской возвышенности. К ним относятся участки, нарушенные пожарами, болезнями деревьев, энтомовредителями. Кроме того, в аналитическую выборку включали участки лесов без нарушений древостоя (табл. 1).

Таблица 1. Параметры изученных участков с различными типами нарушений в лесах

Тип нарушения	Число участков	Площадь общая, га
Воздействие пожаров	30	158,0
Болезни	70	283,0
Энтомовредители и болезни	27	161,2
Энтомовредители	32	101,0
Ненарушенные леса	50	315,0
Всего	209	1018,2

Подбор лесных участков осуществлялся на основе совместного анализа данных лесоустройства и спутниковых данных Sentinel-2, полученных в сроки, наиболее близкие ко времени проведения лесоустроительных работ. Для анализа отбирали участки хвойных лесов примерно аналогичного возраста таким образом, чтобы он составлял от 55 до 70 лет. В этот интервал попадает основная часть хвойных лесов, типичных для региона. Для каждого лесного участка были определены сведения о типах нарушений, их площади. Учитывая, что воздействие пожара происходит относительно короткий интервал времени в сравнении с остальными типами нарушений, участки пирогенных нарушений отбирались таким образом, чтобы год, в который происходило воздействие пожаров, был аналогичен.

Оценка спектрально-отражательных характеристик лесных участков проведена на основе снимков Sentinel-2 августа 2015 года, прошедших этап атмосферной и радиометрической коррекции, которая была осуществлена в программе SNAP, в модуле Sen2Cor. В результате

изображения были пересчитаны из начального уровня L1C в уровень L2A, включающий значения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на нижней границе атмосферы – ВОА (Bottom Of Atmosphere). Пространственное разрешение изображений приведено к 20 м. На их основе методом зональной статистики были вычислены спектрально-отражательные характеристики в девяти спектральных диапазонах, соответствующих основным каналам Sentinel-2: синему, зеленому, красному, трем крайним красным, ближнему инфракрасному и двум коротковолновым инфракрасным. Основной этап экспериментального исследования заключался в оценке влияния типа нарушенности лесных экосистем на их спектрально-отражательные свойства, измеренные в каждом канале Sentinel-2, и оценке возможностей автоматизированного разделения типов нарушений в хвойных лесах на основе зональных коэффициентов спектральной яркости. Она выполнена с помощью использования метода пошагового дискриминантного анализа.

Результаты исследования

Различия между типами нарушений в хвойных лесах юга Среднерусской возвышенности проявляются при визуальном анализе снимков Sentinel-2 в вариантах синтеза каналов наиболее высокого пространственного разрешения (рис. 1), т.е. в первую очередь каналов видимой области спектра. Они заключаются в различной степени повреждения древостоя вследствие воздействия определенного фактора.

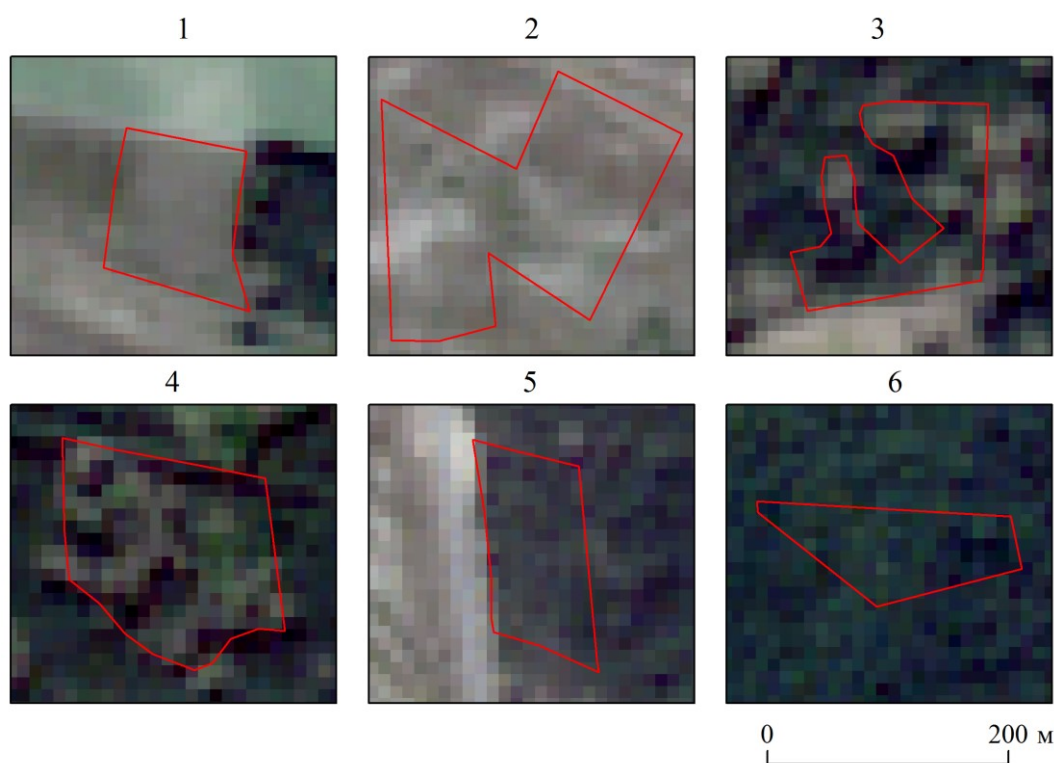


Рис. 1. Примеры различных типов нарушений в хвойных лесах юга Среднерусской возвышенности на снимках Sentinel-2. 1,2 – участки, нарушенные пожарами, 3 – участки воздействия болезней деревьев, 4 – участки воздействия энтомофитов и болезней деревьев, 5 – участки воздействия энтомофитов, 6 – участки без нарушений древостоя. Синтез каналов: RED-GREEN-BLUE

Для участков пирогенных нарушений часто проводится сведение сгоревших древостоев. Нарушения вследствие пожаров, таким образом, приводят к кардинальным изменениям

спектрально-отражательных свойств. Воздействие болезней деревьев, например, корневой губки может приводить к значительным изреживаниям древостоев вследствие гибели части деревьев. Влияние энтомовредителей при визуальном анализе проявляется менее заметно, и участки, нарушенные ими, относительно слабо отличаются от ненарушенных лесов.

Для спектрально-отражательных характеристик большинства диапазонов Sentinel-2 характерна тенденция снижения средних значений коэффициентов спектральной яркости в следующем ряду: «воздействие пожаров – нарушения болезнями деревьев – нарушения энтомовредителями с незначительным влиянием болезней деревьев – нарушения энтомовредителями – участки без нарушения древостоя» (табл. 2). В обозначенном ряду в большинстве случаев наблюдается снижение степени повреждения древостоя вследствие воздействия негативных факторов. Для спектрально-отражательных характеристик 2-го и 3-го крайних красных диапазонов, соответствующих 6-му и 7-му каналам Sentinel-2, и для характеристик ближнего инфракрасного диапазона такой закономерности не выявлено.

Таблица 2. Характеристики спектрально-отражательных свойств различных типов нарушений в хвойных лесах по данным Sentinel-2

Диапазоны Sentinel-2	Тип нарушения									
	Пирогенные		Болезни деревьев		Энтомовредители и болезни		Энтомовредители		Без нарушений	
	M	Sd	M	Sd	M	Sd	M	Sd	M	Sd
Blue	0,043	0,006	0,024	0,004	0,022	0,002	0,021	0,002	0,021	0,002
Green	0,063	0,007	0,040	0,005	0,037	0,003	0,035	0,003	0,034	0,002
Red	0,070	0,010	0,033	0,008	0,030	0,004	0,027	0,004	0,024	0,002
Red Edge1	0,105	0,009	0,066	0,009	0,061	0,007	0,056	0,006	0,052	0,003
Red Edge2	0,165	0,009	0,158	0,017	0,154	0,013	0,147	0,011	0,150	0,008
Red Edge3	0,186	0,010	0,188	0,023	0,184	0,016	0,174	0,015	0,180	0,010
NIR	0,210	0,011	0,209	0,025	0,204	0,019	0,191	0,017	0,196	0,011
SWIR1	0,237	0,011	0,136	0,022	0,122	0,020	0,105	0,013	0,089	0,006
SWIR2	0,170	0,017	0,073	0,015	0,064	0,012	0,056	0,009	0,043	0,004

M – среднее значение, Sd – стандартное отклонение

Особенностью стандартных отклонений спектрально-отражательных характеристик в каналах Sentinel-2 являются наименьшие значения для лесов без нарушений древостоя. Таким образом, стандартные отклонения достаточно хорошо характеризуют более высокую однородность лесного полога ненарушенных лесов в сравнении с участками различных типов нарушений в лесах.

Закономерность снижения средних значений спектрально-отражательных характеристик каналов видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов в ряду участков, отличающихся фактором нарушений и одновременно их масштабом, достаточно наглядно проявляется при графическом анализе (рис. 2). Участки пирогенных нарушений, на которых вследствие воздействия пожара происходят наиболее существенные изменения в коэффициентах спектральной яркости, выраженно отличаются не только от участков без нарушений древостоя, но и всех остальных типов нарушений в хвойных лесах.

Общая закономерность изменения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов в ряду участков хвойных лесов с различными типами нарушений показывает достаточно высокую чувствительность спектрально-

отражательных характеристик к нарушениям, происходящим в лесах. Вместе с этим отличия спектрально-отражательных характеристик участков с различными типами нарушений друг от друга и от ненарушенных лесов выступают основанием для оценки возможностей их автоматизированного разделения между собой по отражательным признакам.

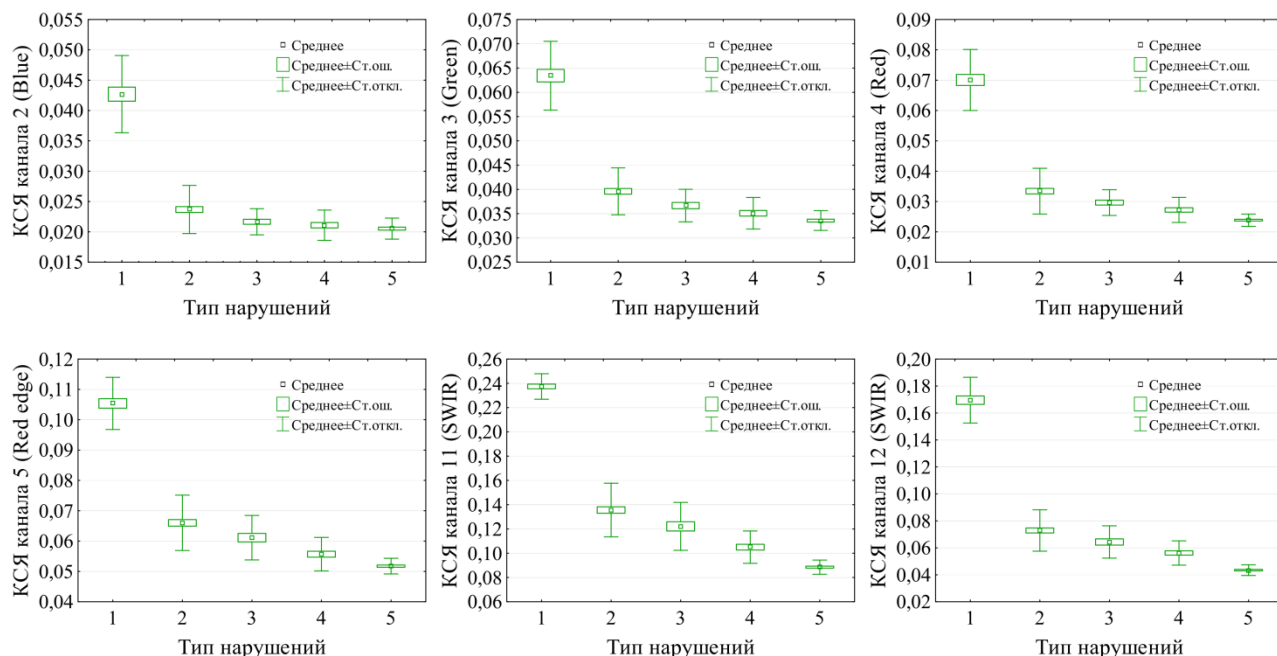


Рис. 2. Параметры спектральной отражательной способности в диапазонах Sentinel-2 для различных типов нарушений в хвойных лесах, типичных для юга Среднерусской возвышенности:
1 – пирогенные нарушения, 2 – нарушения болезнями деревьев, 3 – нарушения энтомофитами с влиянием болезней деревьев, 4 – участки воздействия энтомофитов, 5 – участки без нарушений

Оценка различий между типами нарушений в лесах по спектральной отражательной способности, проведенная на основе теста Тьюки, показала, что статистически значимые различия между всеми типами нарушений характерны для коэффициентов спектральной яркости 1-го коротковолнового инфракрасного диапазона. Он соответствует 11-му каналу Sentinel-2 (табл. 3). В остальных каналах аналогичного, максимально возможного, числа различий между типами нарушений в лесах не выявлено. Вместе с этим достаточно большое число статистически значимых различий между типами нарушений в хвойных лесах установлено во 2-м коротковолновом инфракрасном диапазоне (12-й канал) и диапазонах видимого излучения. Минимальное число статистически значимых различий между типами нарушений в хвойных лесах зафиксировано в ближнем инфракрасном (8А канал) диапазоне и расположенных рядом с ним крайних красных диапазонах – каналах 6 и 7.

Фактор типа нарушений, таким образом, наиболее сильно влияет на спектрально-отражательные характеристики коротковолновых инфракрасных диапазонов Sentinel-2 и наименьшее влияние оказывает на коэффициенты спектральной яркости диапазонов ближнего инфракрасного спектра и близкого к нему крайнего красного диапазона.

Таблица 3. Число взаимных статистически значимых различий между типами нарушений в хвойных лесах по спектральной отражательной способности в каналах Sentinel-2

Канал (диапазон) Sentinel-2	Число статистически значимых различий между типами нарушений	Доля от максимально возможного числа различий, %
Синий	12	60
Зеленый	12	60
Красный	14	70
Крайний красный 1-й	16	80
Крайний красный 2-й	10	50
Крайний красный 3-й	2	10
Ближний инфракрасный	8	40
Коротковолновый инфракрасный 1-й	20	100
Коротковолновый инфракрасный 2-й	16	80

Оценка возможностей автоматизированного разделения участков с различными типами нарушений в лесах, проведенная с использованием пошагового дискриминантного анализа, показала, что наибольший вклад в разделение типов нарушений вносят спектрально-отражательные характеристики 1-го коротковолнового инфракрасного диапазона Sentinel (табл. 4). Далее следуют коэффициенты спектральной яркости красного и зеленого диапазонов спектра. Все переменные статистически значимы. На этом этапе часть переменных, т.е. спектрально-отражательных характеристик была исключена из исследования вследствие высокой корреляции с другими переменными (мультиколлинеарности) или низкого вклада в разделение типов нарушений.

Таблица 4. Результаты пошагового дискриминантного анализа при включении спектрально-отражательных характеристик в модель распознавания типов нарушений в хвойных лесах

Переменная (канал Sentinel-2)	Шаг	F-значение
11-й, коротковолновый инфракрасный 1	1	155,8
4-й, красный	2	54,3
3-й, зеленый	3	35,4

Результатом дискриминантного анализа являются функции классификации, представляющие собой линейные уравнения, независимыми переменными в которых выступают спектрально-отражательные характеристики в отобранных диапазонах спектра (табл. 5). Для каждого типа нарушений рассчитана своя функция классификации, позволяющая рассчитать классификационный вес, определяющий возможность отнесения конкретного участка леса к определенному типу нарушений. Для конкретных участков рассчитываются классификационные веса по всем возможным типам нарушений и ненарушенным лесам. Участок будет классифицироваться в ту категорию, для которой классификационный вес оказался наиболее высоким.

Таблица 5. Коэффициенты линейных функций классификации для разделения типов нарушений в хвойных лесах

Спектрально-отражательные характеристики в каналах Sentinel-2	Болезни деревьев	Пирогенный фактор	Энтомо-вредители и болезни	Энтомо-вредители	Ненарушенные леса
B11 (x_1)	-86,5	163,1	-123,8	-190,0	-319,6
B4 (x_2)	-6452,9	-4428,0	-6241,4	-6290,5	-6936,3
B3 (x_3)	11087,1	8787,8	10800,5	11040,4	12206,3
Константа	-108,8	-142,9	-100,3	-100,3	-110,1

Суммарная точность распознавания типов нарушений на основе предложенных функций составила 68,6 % на обучающей и 63,5 % на тестовой выборке (табл. 6). Наиболее достоверно распознаются пирогенные нарушения и участки, нарушенные болезнями деревьев.

Таблица 6. Точность распознавания типов нарушений в хвойных лесах юга Среднерусской возвышенности с использованием рассчитанных функций классификации

Причина нарушений	Точность распознавания, %	
	Обучающая выборка	Тестовая выборка
Болезни деревьев	76,5	69,4
Пирогенный фактор	100,0	100,0
Энтомовредители и болезни	21,1	12,5
Энтомовредители	16,7	5,0
Ненарушенные леса	100,0	95,7
Всего	68,6	63,5

Нарушения вследствие влияния энтомовредителей либо одновременного влияния энтомовредителей и болезней распознаются относительно слабо из-за близких спектрально-отражательных характеристик. Эффективность распознавания связана со степенью нарушения древостоя вследствие влияния определенного фактора. В случае настоящего исследования пирогенный фактор и фактор болезней деревьев оказывают наиболее существенное влияние на состояние древостоев и на их спектрально-отражательные характеристики.

Выводы

Участки различных типов нарушений, характерных для хвойных лесов юга Среднерусской возвышенности, оказывают различное влияние на спектрально-отражательные характеристики в диапазонах снимков Sentinel-2. В каналах видимого и коротковолнового инфракрасного спектра общая закономерность связана со снижением отражательной способности по мере уменьшения величины негативного воздействия. Участки пирогенных нарушений, участки, нарушенные вследствие воздействия болезней деревьев, энтомовредителей, и ненарушенные лесные участки наиболее сильно и статистически значимо различаются по коэффициентам спектральной яркости в коротковолновой инфракрасной

области. Наименьшие различия между ними характерны в ближнем инфракрасном и расположенным рядом с ним крайним красном диапазоне. По спектрально-отражательным характеристикам наиболее достоверно распознаются среди остальных участки нарушений вследствие пожаров и в несколько меньшей степени – болезней деревьев.

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

Библиографический список

1. Барталев С.А., Стыщенко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
2. Бобкова К.С., Лиханова Н.В. Вынос углерода и элементов минерального питания при сплошнолесосечных рубках ельников средней тайги // Лесоведение. 2012. № 6. С.44–54.
3. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Полевщикова Ю.А., Лежнин С.А. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С.124–134. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134>.
4. Ершов Д.В., Исаев А.С., Лукина Н.В., Гаврилюк Е.А., Королева Н.В. Оценка биоразнообразия Центрального федерального округа по спутниковой карте // Лесоведение. 2015. № 6. С. 403–416.
5. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Меньшиков С.А., Смирнова Л.Н. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 5. С.154–166. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166>.
6. Терехин Э.А. Оценка нарушенности лесов лесостепной зоны в начале XXI века по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 2. С. 134–146. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146>.
7. Чураков Б.П., Парамонова Т.А., Митрофанова Н.А., Туманов В.А. Депонирование углерода сосновыми древостоями в связи с поражением их сосновой губкой // Лесоведение. 2013. № 2. С.9–14.
8. Astola H., Häme T., Sirro L., Molinier M., Kilpi J. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 223. P. 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>.
9. Band L.E. Effect of land surface representation on forest water and carbon budgets // Journal of Hydrology. 1993. Vol. 150, № 2. P.749–772. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90134-U](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90134-U).
10. Eskandari S., Ali Mahmoudi Sarab S. Mapping land cover and forest density in Zagros forests of Khuzestan province in Iran: A study based on Sentinel-2, Google Earth and field data // Ecological Informatics. 2022. Vol .70. 101727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101727>.
11. Georgiev K.B., Beudert B., Bäessler C., Feldhaar H., Heibl C., Karasch P., Müller J., Perlík M., Weiss I., Thorn S. Forest disturbance and salvage logging have neutral long-term effects on drinking water quality but alter biodiversity // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 495. 119354. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119354>.
12. Hemmerling J., Pflugmacher D., Hostert P. Mapping temperate forest tree species using dense Sentinel-2 time series // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 267. 112743. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112743>.
13. Huang C., Goward S.N., Masek J.G., Thomas N., Zhu Z., Vogelmann J.E. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.017>.
14. Lu J., Huang C., Tao X., Gong W., Schleeweis K. Annual forest disturbance intensity mapped using Landsat time series and field inventory data for the conterminous United States (1986–2015) // Remote Sensing of Environment. 2022. Vol. 275. 113003. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113003>.

15. Schroeder T.A., Schleeweis K.G., Moisen G.G., Toney C., Cohen W.B., Freeman E.A., Yang Z., Huang C. Testing a Landsat-based approach for mapping disturbance causality in U.S. forests // *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 195. P. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.033>.
16. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change // *Nature Climate Change*. 2017. Vol. 7, № 6. P. 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.
17. Senf C., Pflugmacher D., Hostert P., Seidl R. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 130. P. 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.004>.
18. Wittke S., Yu X., Karjalainen M., Hyypä J., Puttonen E. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 76. P. 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>.
19. Yu L., Fan L., Ciais P., Sitch S., Fensholt R., Xiao X., Yuan W., Chen J., Zhang Y., Wu X., Qin Y., Ma M., Chang Z., Wang M., Yan K., Song L., Wigneron J.-P. Carbon dynamics of Western North American boreal forests in response to stand-replacing disturbances // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. Vol. 122. 103410. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103410>.
20. 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 // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 108. 102760. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102760>.

References

1. Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Lupyan E.A. Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality). *Lesovedenie*, 2015. No. 2. P. 83–94.
2. Bobkova K.S., Likhanova N.V. Removal of carbon and mineral nutrients upon clear felling of spruce forests in the middle taiga, *Lesovedenie*, 2012. No. 6. Pp. 44–54.
3. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Otsenka dinamiki i narushennosti lesnogo pokrova v srednem povolzh'e po snimkam Landsat (Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016. Vol. 13, No. 4. Pp.124–134. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134>.
4. Ershov D.V., Isaev A.C., Lukina N.V., Gavriluk E.A., Koroleva N.V. Assessment of biodiversity in Central federal district using satellite-based maps of terrestrial ecosystems. *Lesovedenie*, 2015. No. 6. Pp. 403–416.
5. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Men'shikov S.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 (Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018. Vol. 15, No. 5. Pp.154–166. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166>.
6. Terekhin E.A. Otsenka narushennosti lesov lesostepnoi zony v nachale XXI veka po sputnikovym dannym (Estimation of forest disturbance in the forest-steppe zone at the beginning of the XXI century using satellite data). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020. Vol. 17, No. 2. Pp. 134–146. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-2-134-146>.
7. Churakov B.P., Paramonova T.A., Mitrofanova N.A., Tumanov V.A. Deponirovanie ugleroda sosnovymi drevostoyami v svyazi s porazheniem ikh sosnovoi gubkoi (Deposition of carbon by pine stands related to their infestation with red rot). *Lesovedenie*, 2013. No. 2. Pp. 9–14.
8. Astola H., Häme T., Sirro L., Molinier M., Kilpi J. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. *Remote Sensing of Environment*, 2019. Vol. 223. Pp. 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>.

9. Band L.E. Effect of land surface representation on forest water and carbon budgets. *Journal of Hydrology*, 1993. Vol. 150, No. 2. Pp.749–772. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90134-U](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90134-U).
10. Eskandari S., Ali Mahmoudi Sarab S. Mapping land cover and forest density in Zagros forests of Khuzestan province in Iran: A study based on Sentinel-2, Google Earth and field data. *Ecological Informatics*, 2022. Vol. 70, 101727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101727>.
11. Georgiev K.B., Beudert B., Bässler C., Feldhaar H., Heibl C., Karasch P., Müller J., Perlík M., Weiss I., Thorn S. Forest disturbance and salvage logging have neutral long-term effects on drinking water quality but alter biodiversity. *Forest Ecology and Management*, 2021. Vol. 495, 119354. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119354>.
12. Hemmerling J., Pflugmacher D., Hostert P. Mapping temperate forest tree species using dense Sentinel-2 time series. *Remote Sensing of Environment*, 2021. Vol. 267, 112743. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112743>.
13. Huang C., Goward S.N., Masek J.G., Thomas N., Zhu Z., Vogelmann J.E. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense Landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, 2010. Vol. 114. Pp. 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.017>.
14. Lu J., Huang C., Tao X., Gong W., Schleeweis K. Annual forest disturbance intensity mapped using Landsat time series and field inventory data for the conterminous United States (1986–2015). *Remote Sensing of Environment*, 2022. Vol. 275, 113003. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113003>.
15. Schroeder T.A., Schleeweis K.G., Moisen G.G., Toney C., Cohen W.B., Freeman E.A., Yang Z., Huang C. Testing a Landsat-based approach for mapping disturbance causality in U.S. forests. *Remote Sensing of Environment*, 2017. Vol. 195. Pp. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.033>.
16. Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M.J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T.A., Reyer C.P.O. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 2017. Vol. 7, No. 6. Pp. 395–402. <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.
17. Senf C., Pflugmacher D., Hostert P., Seidl R. Using Landsat time series for characterizing forest disturbance dynamics in the coupled human and natural systems of Central Europe. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017. Vol. 130. Pp. 453–463. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.004>.
18. Wittke S., Yu X., Karjalainen M., Hyypä J., Puttonen E. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019. Vol. 76. Pp. 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>.
19. Yu L., Fan L., Ciais P., Sitch S., Fensholt R., Xiao X., Yuan W., Chen J., Zhang Y., Wu X., Qin Y., Ma M., Chang Z., Wang M., Yan K., Song L., Wigneron J.-P. Carbon dynamics of Western North American boreal forests in response to stand-replacing disturbances. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023. Vol. 122, 103410. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103410>.
20. 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. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022. Vol. 108, 102760. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102760>.