

Научная статья

УДК 630:528.88(470.57)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-51-62

Оценка трансформации лесов Южного Урала по разновременным космическим снимкам

Р.Р. Султанова, д-р с.-х. наук, проф.; *ResearcherID:* [G-1513-2018](https://orcid.org/0000-0002-0415-7342),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-7342>

Р.Р. Байтурина[✉], канд. биол. наук, доц.; *ResearcherID:* [G-4845-2018](https://orcid.org/0000-0002-8156-2165),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-2165>

С.В. Диарова, ассистент; *ORCID:* <https://orcid.org/0009-0005-5403-1683>

Башкирский государственный аграрный университет, ул. 50-летия Октября, д. 34,
г. Уфа, Россия, 450001; vestnik-bsau@mail.ru, aspirant_bsau@mail.ru[✉], 999di@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.23 / Одобрена после рецензирования 26.06.23 / Принята к печати 28.06.23

Аннотация. Исследована трансформация лесов Южного Урала за 25-летний период с применением геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования. Определен нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), который отражает влияние таких факторов, как содержание хлорофилла, площадь поверхности листьев, плотность и структура растительности. Индекс вычислен на основе дешифрования разновременных космических снимков (1995, 2013 и 2020 гг.) со спутников Pleiades-1A, Landsat-5 и -8 с использованием программного пакета ArcGIS для создания карты растительности, отражающей значения NDVI, и ретроспективного анализа ее состояния. Найденные значения имеют тесную корреляционную связь с показателями жизненного состояния, полученными натурным методом (коэффициент корреляции – 0,69). Расчет индекса NDVI, генерирование карт диапазона фиксированных значений NDVI и комбинация каналов «искусственные цвета» по годам позволили выделить лесные участки с оптимальными полнотой, возрастным и санитарным состоянием (темный окрас) и участки, нуждающиеся в лесовосстановлении. Сравнение распределения территории по классам NDVI за 1995–2020 гг. говорит о существенном изменении площади отдельных классов, которые сгруппированы в 11 классов и представлены значениями от –0,14 до +0,91. К 2020 г. превосходящая часть исследуемого участка стала относиться к более высоким классам NDVI – 9 и 10 и составила 98 %, что свидетельствует о возрастной однородности насаждений и повышении продуктивности лесов с 1995 г. Насаждения, имеющие большие индексы NDVI, характеризуются увеличенным по сравнению с другими древостоями накоплением древесной биомассы. Территории классов 1–9 (NDVI 0–0,8) демонстрируют значительное сокращение площади и схожую динамику, а территории классов 10–11 (NDVI 0,8–1,0) – ощутимую положительную динамику. Результаты исследования подтверждают правильность выбора индекса NDVI из известных индексов растительности для оценки трансформации типов подстилающей поверхности изучаемого участка за 25 лет. Таким образом, этот индекс является объективным индикатором состояния лесных экосистем. Методы дешифрирования пространственных изображений могут быть использованы для определения площади лесопокрытых земель и значительно повысить эффективность управления лесными ресурсами.

Ключевые слова: состояние леса, изменение состояния леса, дистанционное зондирование, географическая информационная система, вегетационный индекс, тип подстиляющей поверхности, картирование, Южный Урал

Для цитирования: Султанова Р.Р., Байтурина Р.Р., Диарова С.В. Оценка трансформации лесов Южного Урала по разновременным космическим снимкам // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 51–62. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-51-62>

Original article

Assessment of the Transformation of Forests in the Southern Urals Based on Multi-Temporal Satellite Images

Rida R. Sultanova, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [G-1513-2018](https://orcid.org/0000-0002-0415-7342),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0415-7342>

Regina R. Baiturina[✉], Candidate of Biology, Assoc. Prof.; ResearcherID: [G-4845-2018](https://orcid.org/0000-0002-8156-2165),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-2165>

Svetlana V. Diarova, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5403-1683>

Bashkir State Agrarian University, ul. 50-letiya Oktyabrya, 34, Ufa, 450001, Russian Federation; vestnik-bsau@mail.ru, aspirant_bsau@mail.ru[✉], 999di@mail.ru

Received on April 5, 2023 / Approved after reviewing on June 26, 2023 / Accepted on June 28, 2023

Abstract. The transformation of forests in the Southern Urals over a 25-year period has been studied using geoinformation systems and remote sensing methods. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) has been determined, which reflects the influence of such factors as chlorophyll content, leaf surface area, vegetation density and structure. The index has been calculated based on the interpretation of multi-temporal satellite images (1995, 2013 and 2020) from the Pleiades-1A, Landsat-5 and -8 satellites using the ArcGIS software package to create a vegetation map reflecting NDVI values and a retrospective analysis of the condition of forest vegetation. The values found have a close correlation with the vitality indicators obtained by the field method (the correlation coefficient is 0.69). The calculation of the NDVI index, the generation of maps of the range of fixed NDVI values and the combination of “artificial colours” channels by year has made it possible to identify forest areas with optimal density, age and sanitary condition (dark colour) and areas in need of reforestation. A comparison of the distribution of territory by NDVI classes for 1995–2020 indicates a significant change in the area of individual classes, which are grouped into 11 classes and are represented by values from –0.14 to +0.91. By 2020, the superior part of the study area has begun to belong to higher NDVI classes – 9 and 10, and has amounted to 98 %, which indicates the age uniformity of plantations and an increase in forest productivity since 1995. Plantations with higher NDVI indices are characterized by an increased accumulation of woody biomass compared to other forest stands. The territories of classes 1–9 (NDVI 0–0.8) demonstrate a significant reduction in area and similar dynamics, while the territories of grades 10–11 (NDVI 0.8–1.0) demonstrate noticeable positive dynamics. The results of the study confirm the correctness of choosing the NDVI index from the known vegetation indices for assessing the transformation of the underlying surface types of the study area over 25 years. Thus, this index is an objective indicator of the assessment of the condition of forest ecosystems. Spatial image interpretation methods can be used to determine the area of forested lands and significantly improve the efficiency of forest resource management.

Keywords: forest condition, forest condition change, remote sensing, geographic information system, vegetation index, underlying surface type, mapping, the Southern Urals

For citation: Sultanova R.R., Baiturina R.R., Diarova S.V. Assessment of the Transformation of Forests in the Southern Urals Based on Multi-Temporal Satellite Images. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 51–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-51-62>

Введение

По мнению М. Ciesielski et al. [7], леса важны не только как источник древесного сырья, они выполняют многочисленные экологические функции, воздействуют на качество жизни человека, в т. ч. через накопление углерода в наземной древесной биомассе, выброс которого в атмосферу ведет к негативным последствиям изменения климата. В связи с чем совершенствование инструментов мониторинга лесов, применение передовых технологий решают одновременно задачи как лесохозяйственного управления, так и повышения устойчивости этих природных систем. Таким образом, эффективность лесной политики и устранение последствий нерегулируемого использования лесов во многом обеспечиваются объективной методологией мониторинга экосистем.

Для получения наиболее точных показателей состояния лесов на больших площадях требуются трудоемкие наземные лесотаксационные исследования. Учитывая скорость изменения лесных экосистем и время, необходимое для их наземного мониторинга, целесообразно использовать дистанционное зондирование (ДЗ), которое, по мнению J. Féret et al. [8], V. Pechanec et al. [18], имеет важные преимущества – скорость, многократная повторяемость, ширина охвата, неразрушение леса. Т. Loboda et al. [15], Э.А. Курбанов и др. [1], А.С. Черепанов и Е.Г. Дружинина Е.Г. [3] отмечают, что применение ДЗ в исследовании лесов становится все значимее при наличии большого объема данных и необходимости их пространственного отображения для решения различных теоретических и практических проблем, в т. ч. при мониторинге растительного покрова, оценке влияния климата на леса и процессов деградации и опустынивания территорий, пожарной опасности лесных земель; многофакторная, комплексная оценка ранжированных во времени и пространстве показателей трансформирования экологии природных ландшафтов реализуется с использованием достижений общей картографии, геоинформационных технологий, дистанционного зондирования, математико-тематического моделирования.

Основные технические свойства космических спутников, работающих с использованием волн электромагнитного излучения различной длины, дают снимки для ДЗ Земли, проведения непрерывного мониторинга природных систем и получения актуальных показателей их состояния с высокой пространственной и временной детализацией [2]. Возможности геоинформационных систем (ГИС) в лесоводстве подробно отражены в работах российских и зарубежных ученых. Во многих странах мира широко используются разновременные снимки со спутников для отслеживания изменений в окружающей среде, вызванных изменением климата и деятельностью человека. Этот метод нашел применение, в частности, в исследованиях J. Hepinstall-Cymerman et al. [10] и Н.-Н. Nguyen et al. [17]. Анализ данных спутниковой съемки позволил Н.Л. Wiggins et al. [24] выявлять изменения больших площадей, осуществить их оценку и валидацию. Определить в перспективе возникновение многих экологических рисков возможно на основе составления карт с вегетационными индексами. N. Yasmin и соавт. [26] доказал, что индексы вегетации способны отражать ухудшение состояния лесной растительности, вызванное разнообраз-

ными факторами [22], в числе которых рекреация, разрастание городской инфраструктуры, эрозия почв, энтомо- и фитовредители и т. д. P.T. Wolter et al. [25] дали определение вегетационному индексу NDVI, назвав его «зеленым» индексом для оценки фотосинтетически активной массы лесной растительности. При этом авторы подчеркнули важность этого индекса как переменной, обеспечивающей относительную простоту расчета регрессии частичных наименьших квадратов (PLSR – Partial Least Squares Regression), когда за основу берется числовая оценка типа подстилающей поверхности. A.A. Wani et al. [23] отмечают, что применение индекса NDVI имеет потенциал для понимания изменчивости леса посредством установления взаимосвязей между его биофизическими параметрами [19], включая высоту, густоту кроны, сомкнутость деревьев и санитарное состояние. Доступность данных спутников Landsat с достаточным спектральным разрешением делают их привлекательными для картирования характеристик лесов в местном, региональном или даже глобальном масштабах. Поэтому представляется логичным, что использование спектральных данных позволит оптимизировать мониторинг состояния лесов по сравнению с объемными наземными исследованиями.

Цель работы – оценка изменения состояния лесов Южного Урала на основе применения методов геоинформационных систем и дистанционного зондирования.

Задачи:

- 1) дешифрирование разновременных снимков с космических спутников Pleiades и Landsat разного поколения;
- 2) картирование растительного покрова лесных насаждений с использованием индекса NDVI;
- 3) выявление трансформации состояния лесного объекта за 25-летний период.

Объекты и методы исследования

В работе применялись лесоводственно-таксационные методы и ГИС-технологии. Пробные площади заложены в соответствии с ОСТ 56-69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки». Объект исследования – чистые и смешанные по составу насаждения из лиственных (*Tilia cordata* Mill., *Betula pendula* Roth., *Acer platanoides* L., *Populus tremula* L., *Ulmus glabra* Huds., *Salix caprea* L., *Quercus robur* L., *P. balsamifera* L.) и хвойных пород (*Picea abies* L., *Pinus sylvestris* L.), отнесенных к Лесостепной лесорастительной зоне Лесостепному району Европейской части Российской Федерации. Протяженность территории с севера на юг – 98 км, с востока на запад – 95 км (рис. 1).

Местность равнинная, преобладает рельеф с пологими склонами крутизной до 10°. Магнитное склонение – 12,7°. Высота над уровнем моря – от 109 до 230 м. Тип почв – серые лесные. Кустарнички, ягодники, лишайники, мхи отсутствуют, что является характерным для Лесостепной лесорастительной зоны. Тип леса – снытьевый и злаково-осоковый (табл. 1).

Мониторинг состояния насаждений и выявление ретроспективных изменений выполнены с использованием технологий ГИС и методов ДЗ для получения разновременных спутниковых снимков Pleiades-1A (2013), Landsat-5 (1995) и Landsat-8 (2020). Площадь одного пикселя, м²: Landsat-5 (1995 г.) – 900; Pleiades-1A (2013 г.) – 0,25; Landsat-8 (2020 г.) – 100.

Нами использован космический снимок высокого разрешения со спутника Pleiades-1A: ID снимка – DS_PHR1A_201306250736306_SE1_PX_

E057N54_0220_02977, дата съемки – 25.06.2013 г., угол отклонения от надира – 22,1°, облачность по сцене – 4 %, площадь покрытия – 25 км², разрешение – 0,5 м (рис. 2).

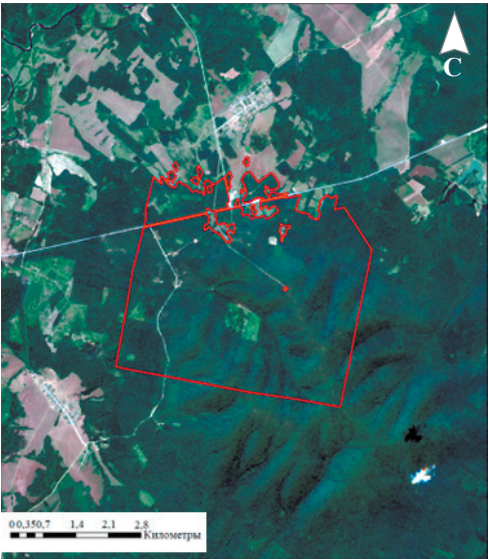


Рис. 1. Космический снимок Улу-Телякского участкового лесничества Иглинского лесничества Республики Башкортостан

Fig. 1. The satellite image of the Ulu-Telyak District Forestry of the Iglinsky Forestry of the Republic of Bashkortostan



Рис. 2. Космический снимок исследованного насаждения со спутника Pleiades-1A, 2013 г.

Fig. 2. The satellite image of the studied plantation from the Pleiades-1A satellite, 2013

Таблица 1

Лесоводственно-таксационные показатели для площади 81 га квартала 311 Улу-Телякского участкового лесничества Иглинского лесничества, 2020 г.
The silvicultural and inventory indicators for an area of 81 ha of quarter 311 of the Ulu-Telyak District Forestry of the Iglinsky Forestry, 2020

Выдел	Пло- щадь, га	Состав	Возраст, лет	Бони- тет	Тип леса	Полнота	Запас на 1 га, м³	Общий запас, м³
1	1,6	10Лп _н +В+Д _н	85	3	СН	0,6	260	420
2	1,8	6Лп _н 3В1Д _н +Ив	90	3	СН	0,5	180	320
3	4,4	6Лп _н 2Д _н 2Б	75	3	СН	0,5	190	840
4	2,3	8Ив2Б	20	4	КТ	0,9	70	160
5	2,1	6Лп _н 1Б1В2Д _н	70	3	СН	0,5	180	380
6	1,2	6Лп _н 1Б1В2Д _н	70	3	СН	0,5	180	220
7	0,7	Линия электропередач	—	—	—	—	—	—
8	5,5	7Лп _н 2Б1Д _н	80	3	СН	0,5	220	1210
9	2,3	4Кл2В2Лп2Ив	20	3	СН	0,8	60	140
10	0,7	Линия электропередач	—	—	—	—	—	—
11	2,0	5Лп _н 3Д _н 1ОС1Б	85	3	ЗЛОС	0,5	220	440

Окончание табл. 1

Выдел	Площадь, га	Состав	Возраст, лет	Бонитет	Тип леса	Полнота	Запас на 1 га, м³	Общий запас, м³
12	1,5	9Б1Ив	65	2	СН	0,7	190	290
13	1,4	6Ос2В2Лп	5	2	СН	0,6	10	10
14	0,8	9Б1Ив	65	2	СН	0,7	190	150
15	8,8	7Б2Ос1Д _н +Лп+В	65	2	СН	0,6	160	1410
16	0,4	Прогалина	—	—	—	—	—	—
17	2,5	5Лп _н 3Б1В1Д _н	70	3	СН	0,4	150	380
18	0,2	Сенокос	—	—	—	—	—	—
19	0,5	Линия электропередач	—	—	—	—	—	—
20	2,0	8Б2В	65	2	СН	0,6	140	280
21	2,2	6Лп _н 2Кл1Д _н 1В	80	3	СН	0,6	210	460
22	0,2	Линия электропередач	—	—	—	—	—	—
23	2,3	7Лп _н 3Д _н +В+Б	80	3	СН	0,4	150	350
24	3,4	10Ос	20	3	СН	0,9	80	270
25	0,9	Линия связи	—	—	—	—	—	—
26	2,3	7Ос2Кл1Б	18	3	СН	0,9	50	120
27	1,8	7Лп _н 2Д _н 1Б	90	3	СН	0,6	230	410
28	3,7	6Лп _н 4Д _н	80	3	СН	0,3	110	410
29	0,9	Линия связи	—	—	—	—	—	—
30	5,0	7Лп _н 3Д _н	80	3	СН	0,4	150	750
31	0,9	5Б3Е2Т	25	2	СН	0,5	40	40
32	2,5	7Ос3Б	25	2	СН	0,7	90	230
33	3,0	6Б4Ос	25	2	ЗЛОС	0,7	80	240
34	4,0	Л/к 5С3Ос2Б	23	2	ЗЛОС	0,5	70	280
35	2,1	Л/к 7Е2Т1Б	17	1	ЗЛОС	0,9	70	150
36	1,8	Л/к 5Е3Б1Д1В	26	3	ЗЛОС	0,4	40	70
37	1,0	6Б4Е	17	3	ЗЛОС	0,4	20	20
38	0,2	Автодорога грунтовая	—	—	—	—	—	—
39	0,1	Просека квартальная	—	—	—	—	—	—

Примечание: СН – снытьевый; КТ – крапивно-таволговый; ЗЛОС – злаково-осоковый.

Применены также спутниковые данные 1995 и 2020 г. в качестве исходных материалов с более низким разрешением, которые в свободном доступе представлены Геологической службой США. Изображения обрабатывались с помощью программного продукта ArcGis 10.5. Попиксельно рассчитаны площади для каждого класса NDVI, с использованием калькулятора раstra проведено картирование изображений индекса NDVI и получены карты типов раститель-

ного покрова (табл. 2). Для распределения каждого класса NDVI по площади объекта исследования использован инструмент «Переклассификация».

Таблица 2

**Типы растительного покрова объекта исследования по величине NDVI
и оценка состояния растительности***
**The vegetation cover types of the study object by NDVI value
and vegetation condition assessment**

Тип подстилающей поверхности	Отражение в спектральной области		Значение NDVI
	красной	инфракрасной	
Растительность (древостой, подрост, подлесок) в состоянии: очень хорошем	0,10	0,50	0,71–1,00
хорошем	0,10	0,50	0,66–0,70
удовлетворительном	0,10	0,50	0,61–0,65
очень плохом, угнетенном	0,10	0,50	0,51–0,60
Разреженная растительность	0,10	0,30	0,31–0,50
Непокрытая лесом территория	0,25	0,30	0–0,30
Облачность	0,25	0,25	0
Снежный покров или наледь	0,38	0,35	–0,05
Водная поверхность	0,02	0,01	–0,25
Покрытие (асфальт/другое)	0,30	0,10	–0,50

*С использованием данных сайта <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>.

NDVI проще рассчитать, т. к. он находится в широком изменяющемся промежутке значений, имеет самую высокую чувствительность к типу почвенного покрова и менее восприимчив к почвенному и атмосферному фоне, исключением является бедная (разреженная) растительность. NDVI рассчитывается как $(NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR, RED – отражение в ближней инфракрасной (0,71–1,00 мкм) и красной (0,60–0,70 мкм) областях спектра соответственно. Согласно этой формуле, плотность растительности (NDVI) в конкретной точке изображения равна разнице интенсивности отраженного света в красном и инфракрасном диапазонах, деленной на сумму этих интенсивностей. Вычисление NDVI основано на 2 наиболее стабильных (независимых от других факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. Фотосинтетически активная деятельность сопровождается низким отражением в красном спектре и высоким – в инфракрасном. Определение различий между самыми низкими и наиболее высокими показателями отражательной способности увеличивает точность замеров, уменьшая воздействие отдельных факторов, например, связанных с неодинаковой освещенностью изображения, туманностью, облачностью, атмосферным поглощением излучения и др. При характеристике растительности индекс NDVI обычно имеет значения от 0,2 до 0,8, тогда как в целом находится в числовом интервале от –1 до 1.

Результаты исследования и их обсуждение

Сравнение 3 космических снимков разных временных периодов за 1995, 2013, 2020 гг., покрывающих исследуемую территорию, позволило провести анализ современного состояния растительности и выявить ретроспективную

динамику NDVI. Распределение площади объекта по классам NDVI за 1995–2020 гг. говорит о существенном изменении размеров территорий отдельных классов, которые сгруппированы в 11 классов и представлены значениями от $-0,14$ до $+0,91$ (табл. 3). К 2020 г. большая часть изучаемого участка стала относиться к более высоким классам NDVI – 9 и 10 – и составила 98 %, что свидетельствует о возрастной однородности насаждений и повышении продуктивности лесов с 1995 г. Насаждения, имеющие более высокие NDVI, характеризуются накоплением превосходящего объема древесной биомассы. Территории классов 1–9 (NDVI 0–0,8) демонстрируют значительное сокращение площади и схожую динамику, а территории классов 10–11 (NDVI 0,81–1,0) – ощутимые положительные сдвиги.

Таблица 3

**Динамика площади типов лесного покрова для изучаемой территории
за 25 лет на основе дешифрования космоснимков**
**The dynamics of the area of forest cover types for the study area over 25 years
based on the interpretation of satellite images**

NDVI		Площадь по годам, га			Изменения за годы					
класс	диапазон	1995	2013	2020	1995–2013		2013–2020		1995–2020	
					га	%	га	%	га	%
1	$-0,14$	0,09	0,01	0,01	$-0,08$	$-99,97$	0	100	$-0,08$	$-88,89$
2	$0-0,10$	0,63	0,02	0,02	$-0,61$	$-96,39$	0	0	$-0,61$	$-96,83$
3	$0,11-0,20$	2,52	0,11	0,22	$-2,41$	$-95,59$	0,11	97,75	$-2,30$	$-91,27$
4	$0,21-0,30$	6,66	1,11	0,48	$-5,55$	$-83,30$	$-0,63$	$-56,84$	$-6,18$	$-92,79$
5	$0,31-0,40$	8,73	2,38	0,70	$-6,35$	$-72,76$	$-1,68$	$-70,56$	$-8,03$	$-91,98$
6	$0,41-0,50$	17,01	4,14	2,43	$-12,87$	$-75,65$	$-1,71$	$-41,34$	$-14,58$	$-85,71$
7	$0,51-0,60$	57,51	7,18	6,00	$-50,33$	$-87,52$	$-1,18$	$-16,42$	$-51,51$	$-89,57$
8	$0,61-0,70$	964,20	14,79	9,93	$-949,47$	$-98,47$	$-4,86$	$-32,87$	$-954,33$	$-98,97$
9	$0,71-0,80$	925,02	125,62	111,05	$-799,40$	$-86,42$	$-14,57$	$-11,60$	$-813,97$	$-87,99$
10	$0,81-0,90$	0	1813,96	1851,92	1813,96	100	37,96	2,09	1851,92	100
11	$0,91$	0	13,38	0	13,38	100	$-13,38$	-100	0	100
Итого		1982,43	1982,70	1982,76						

Существенное изменение площади всех классов NDVI и переход лесных территорий с 8-го на более высокие классы (9 и 10) свидетельствует об увеличении фотосинтетической активности лесных насаждений объекта, что обусловлено ростом кроны деревьев, накоплением древесной биомассы с возрастом и является положительным фактором для данных лесов, находящихся в зоне пчеловодческих пасек и относящихся к нектарным липнякам (липа мелколистная нектарная). Общеизвестно, что нектаропродуктивность липняков напрямую связана с фотосинтетической активностью деревьев. Однако доминирование насаждений 9-го и 10-го классов NDVI, к которым в большей степени относятся древостои спелых и перестойных групп возраста, говорит о необходимости проведения заготовительных рубок и последующих лесовосстановительных мероприятий на значительной площади.

Проведено картирование типов покрова лесного участка (рис. 3, а). Снимки также были обработаны с использованием комбинации каналов «искусственные цвета» (рис. 3, б). Расчет NDVI на основе снимков как низкого, так и

высокого разрешения позволяет эффективно проводить комплексный анализ лесных территорий. Помимо выделяющихся непокрытых лесом и нелесных земель, четко определяются участки высокопродуктивных липовых древостоев, резко отличающиеся на индексированном изображении более темным окрасом. По светлому окрасу участков (желтый цвет) можно проследить мозаику зарастающих вырубок, гарей и др. По сравнению со снимком 2013 г. к 2020 г. появились участки с разреженной древесной растительностью (снижение полноты) и участки с открытым типом подстилающей поверхности (линии электропередач, линии связи), что подтверждается сопоставлением данных картирования с лесоводственно-таксационными показателями исследованных выделов.

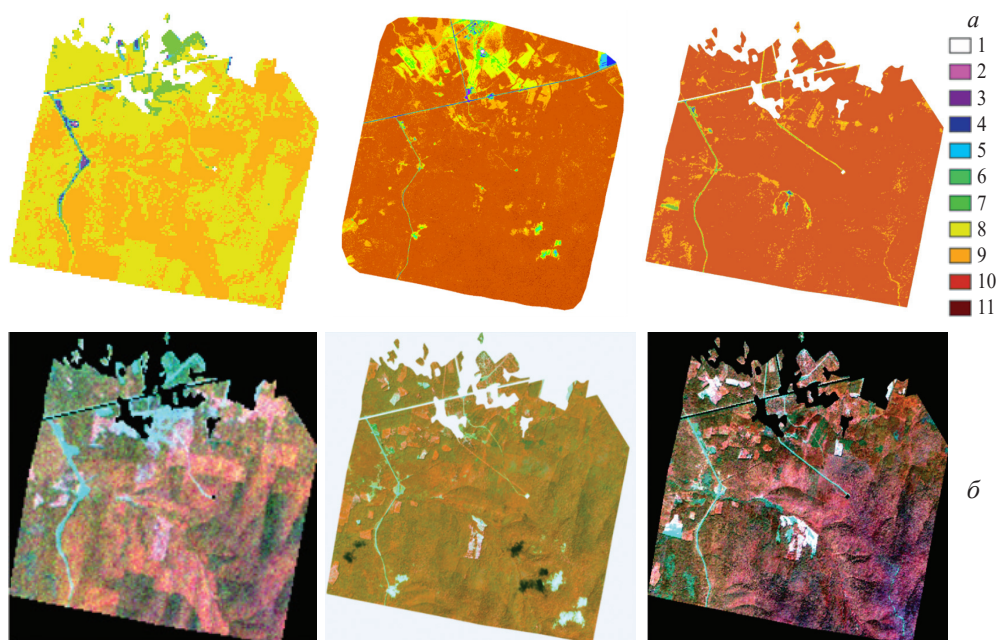


Рис. 3. Динамика индекса NDVI на лесных землях (а) и комбинация каналов «искусственные цвета» (б) по годам (слева – снимки 1995 г., полученные со спутника Landsat-5; в центре – 2013 г., Pleiades-1A; справа – 2020 г., Landsat-8)

Fig. 3. The dynamics of the NDVI index on forest lands (a) and the combination of “artificial colours” channels (b) by year (on the left – images from 1995 taken from the Landsat-5 satellite; in the centre – 2013, Pleiades-1A; on the right – 2020, Landsat-8)

Аналогичные результаты других исследований подчеркивают потенциал зарегистрированных исторических данных спутниковых снимков Landsat, которые предоставляют экстраординарную возможность для наблюдения за трансформацией лесов [5], при этом, по сведениям Li et al. [13], на достоверность расчета индекса NDVI и его классификации используемые поколения спутников – Landsat-5 или -8 – не влияют.

Анализ космических снимков и обширного архива позволяет непрерывно отслеживать изменения в лесном покрове. Наша работа демонстрирует большой потенциал применения серий снимков Landsat разного времени для оценки состояния лесных массивов Южно-Уральского региона, в т. ч. с преобладанием нектарных липняков, являющихся основной медоносной базой пчеловодства. Методы ДЗ, ГИС-технологии в последние годы активно

внедряются в исследования различных по породному составу, возрасту, продуктивности, климатическим условиям экосистем, не исключением являются тропические биоценозы [4, 5, 21], восточно-европейские леса [6, 8, 9, 12]. Данные методы апробированы для идентификации лесных территорий [11], в т. ч. в Канаде [23], странах Востока [13, 14, 16] и т. д. С начала 90-х гг. прошлого столетия индекс NDVI широко применяется при мониторинге состояния растительности (включая лесную [20]), выявлении биологических, физических параметров фитоценозов [18] и оценке антропогенного воздействия на природные объекты [21].

М. Hill et al. [11] подчеркнули, что количество аналитических методов с использованием показателей интервальных значений NDVI очень велико, они могут быть полезны в большом спектре исследований, включая оценку вегетационных тенденций в развитии растений, например, при изучении их фенологии.

Заключение

На основе дешифрования разновременных космических снимков (1995, 2013 и 2020 гг.) со спутников Pleiades-1A, Landsat-5 и -8, генерирования карт растительности с отражением интервальных значений NDVI выполнен мониторинг лесной растительности за 25 лет. Выделены лесные участки с оптимальной нектаропродуктивностью (темный окрас) и разреженные участки, нуждающиеся в лесовосстановлении. Результаты исследования подтверждают правильность выбора нормализованного относительного индекса растительности NDVI для оценки трансформации типов подстилающей поверхности объекта за 25 лет. Этот индекс является объективным индикатором процессов, происходящих в лесных экосистемах. Применение дешифрирования космических снимков при анализе лесных участков значительно улучшает эффективность управления лесными ресурсами. На основе спутниковых снимков Landsat, полученных в разные периоды времени, можно идентифицировать лесные площади и выявить основные тенденции изменения их состояния. Методика дистанционного зондирования земли позволяет осуществлять непрерывный мониторинг различных характеристик больших лесных экосистем, что способствует отслеживанию актуальных изменений на обширных территориях и принятию мер по улучшению их комплексной продуктивности и устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Курбанов Э.А., Лежнин С.А., Воробьев О.Н., Меньшиков С.А., Дергунов Д.М., Ван И., Тарасова Л.В., Смирнова Л.Н. Аналитический обзор публикаций в области применения ДЗЗ и ГИС для оценки динамики растительного покрова // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. Йошкар-Ола, 2020. С. 91–111.

Kurbanov E.A., Lezhnin S.A., Vorobev O.N., Menshikov S.A., Dergunov D.M., Wang Y., Tarasova L.V., Smirnova L.N. Applications of Remote Sensing and GIS for Estimation of Land Use / Cover Change: A Review. *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyj monitoring* = Forest Ecosystems in the Conditions of Climate Change: Biological Productivity, Monitoring and Technologies for Adaptation. Yoshkar-Ola, 2020, pp. 91–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/7232.2020.6.58830>

2. Пиньковский М.Д., Ивонин В.М., Самсонов С.Д., Ширяева Н.В., Егошин А.В. Научное обоснование ГИС «Сочинский национальный парк»: моногр. Сочи: Типография ИП Кривлякин С.П., 2011. 233 с.

Pin'kovskij M.D., Ivonin V.M., Samsonov S.D., Shiryayeva N.V., Egoshin A.V. Scientific Substantiation of the «Sochi National Park» GIS: Monograph. Sochi, Sole Proprietor Krivlyakin S.P. Printing House, 2011. 233 p. (In Russ.).

3. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.

Cherepanov A., Druzhinina E. Spectral Characteristics of Vegetation and Vegetation Indexes. *Geomatika* = Geomatics, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.).

4. Abbas S., Wong M.S., Wu J., Shahzad N., Irteza S.M. Approaches of Satellite Remote Sensing for the Assessment of Above-Ground Biomass across Tropical Forests: Pan-Tropical to National Scales. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 20, art. no. 3351.

<https://doi.org/10.3390/rs12203351>

5. Ahrends A., Bulling M.T., Platts P.J., Swetnam R., Ryan C., Doggart N., Hollingsworth P.M., Marchant R., Balmford A., Harris D.J., Gross-Camp N., Sumbi P., Munishi P., Madoffe S., Mhoro B., Leonard C., Bracebridge C., Doody K., Wilkins V., Owen N., Marshall A.R., Schaafsma M., Pflieger K., Jones T., Robinson J., Topp-Jørgensen E., Brink H., Burgess N.D. Detecting and Predicting Forest Degradation: A Comparison of Ground Surveys and Remote Sensing in Tanzanian Forests. *Plants, People, Planet*, 2021, vol. 3, iss. 3, pp. 268–281. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10189>

6. Arekhi M., Yilmaz O.Y., Yilmaz H., Akyüz Y.F. Can Tree Species Diversity Be Assessed with Landsat Data in a Temperate Forest? Environmental Monitoring and Assessment, 2017, vol. 189, art. no. 586. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6295-6>

7. Ciesielski M., Sterenczak K. Volunteered Geographic Information data as a source of information on the use of forests in the Warsaw agglomeration // *Sylwan*, 2020, vol. 164, pp. 695–704.

8. Féret J.-B., de Boissieu F. BiodivMapR: An R package for α - and β -Diversity Mapping Using Remotely Sensed Images. *Methods in Ecology and Evolution*, 2020, vol. 11, iss. 11, pp. 64–70. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13310>

9. Fischer R., Knapp N., Bohn F., Huth A. Remote Sensing Measurements of Forest Structure Types for Ecosystem Service Mapping. *Atlas of Ecosystem Services*. Springer, Cham, 2019, pp. 63–67. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96229-0_11

10. Hepinstall-Cymerman J., Coe S., Alberti M. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling. *Remote Sensing*, 2009, vol. 1, no. 4, pp. 1353–1379. <https://doi.org/10.3390/rs1041353>

11. Hill M.J., Donald G.E. Estimating Spatio-Temporal Patterns of Agricultural Productivity in Fragmented Landscapes using AVHRR NDVI Time Series. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 84, iss. 3, pp. 367–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00128-1)

12. Hycza T., Kamińska A., Stereńczak K. The Use of Remote Sensing Data to Estimate Land Area with Forest Vegetation Cover in the Context of Selected Forest Definitions. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 11, art. no. 1489. <https://doi.org/10.3390/f12111489>

13. Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest Aboveground Biomass Estimation Using Landsat 8 and Sentinel-1A Data with Machine Learning Algorithms. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. no. 9952. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67024-3>

14. Li Z., Chen H., White J.C., Wuder M.A., Hermosilla T. Discriminating Treed and Non-Treed Wetlands in Boreal Ecosystems Using Time Series Sentinel-1 Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, vol. 85, art. no. 102007. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102007>

15. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Hall J. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of

European Russia. *Land–Cover and Land–Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Springer, Cham., 2017, pp. 173–192.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-42638-9_8

16. Mao F., Du H., Li X., Ge H., Cui L., Zhou G. Spatiotemporal Dynamics of Bamboo Forest Net Primary Productivity with Climate Variations in Southeast China. *Ecological Indicators*, 2020, vol. 116, art. no. 106505. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106505>

17. Nguyen H.-H., McAlpine C., Pullar D., Johansen K., Duke N.C. The Relationship of Spatial–Temporal Changes in Fringe Mangrove Extent and Adjacent Land-Use: Case Study of Kien Giang Coast, Vietnam. *Ocean & Coastal Management*, 2013, vol. 76, pp. 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.01.003>

18. Pechanec V., Štěrbová L., Purkyt J., Prokopová M., Včeláková R., Cudlin O., Vyvlečka P., Cienciala E., Cudlin P. Selected Aspects of Carbon Stock Assessment in Aboveground Biomass, 2022, vol. 11, no. 1, art. no. 66. <https://doi.org/10.3390/land11010066>

19. Sellers P.J., Tucker C.J., Collatz G.J., Los S.O., Justice C.O., Dazlich D.A., Randall D.A. A Global 1° by 1° NDVI Data Set for Climate Studies. Part 2: The Generation of Global Fields of Terrestrial Biophysical Parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, iss. 17, pp. 3519–3545.

<https://doi.org/10.1080/01431169408954343>

20. Townshend J.R.G., Justice C.O., Skole D., Malingreau J.-P., Cihlar J., Teillet P., Sadowski F., Ruttensberg S. The 1 km Resolution Global Data Set: Needs of the International Geosphere Biosphere Programme. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, vol. 15, iss. 17, pp. 3417–3441. <https://doi.org/10.1080/01431169408954338>

21. Valderrama-Landeros L., Flores-Verdugo F., Rodríguez-Sobreyra R., Kovacs J.M., Flores-de-Santiago F. Extrapolating Canopy Phenology Information Using Sentinel-2 Data and the Google Earth Engine Platform to Identify the Optimal Dates for Remotely Sensed Image Acquisition of Semiarid Mangroves. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 279, art. no. 111617. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111617>

22. Wang Q., Watanabe M., Hayashi S., Murakami S. Using NOAA AVHRR Data to Assess Flood Damage in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, vol. 82, pp. 119–148. <https://doi.org/10.1023/A:1021898531229>

23. Wani A.A., Bhat A.F., Gatoo A.A., Zahoor S., Mehraj B., Najam N., Wani Q.S., Islam M.A., Murtaza S., Dervash M.A., Joshi P.K. Assessing Relationship of Forest Biophysical Factors with NDVI for Carbon Management in Key Coniferous Strata of Temperate Himalayas. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2021, vol. 26, art. no. 1. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09937-6>

24. Wiggins H.L., Nelson C.R., Larson A.J., Safford H.D. Using LiDAR to Develop High-Resolution Reference Models of Forest Structure and Spatial Pattern. *Forest Ecology and Management*, 2019, vol. 434, pp. 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.012>

25. Wolter P.T., Townsend P.A., Sturtevant B.R. Estimation of Forest Structural Parameters Using 5 and 10 Meter SPOT-5 Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113, iss. 9, pp. 2019–2036. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.009>

26. Yasmin N., Khokhar M.F., Tanveer S., Saqib Z., Khan W.R. Dynamical Assessment of Vegetation Trends over Margalla Hills National Park by Using MODIS Vegetation Indices. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 2016, vol. 53(4), pp. 777–786.

<https://doi.org/10.21162/PAKJAS/16.3759>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article