

Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.П. Филиппова. 2025. № 1(78). С. 78–85.

Buryat Agrarian Journal. 2025; 1(78):78–85.

Научная статья

УДК 630:528.88(470.57)

doi: 10.34655/bgsha.2025.78.1.010

Использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и ГИС-технологий при мониторинге насаждений с преобладанием липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в Башкирском Предуралье

С.В. Диарова, Р.Р. Хисамов, М.В. Мартынова, Цзэн Юйтун, Р.И. Абдульманов

Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

Автор, ответственный за переписку: Хисамов Р.Р., hisrail@mail.ru

Аннотация. Оценка лесных ресурсов с помощью дистанционного зондирования началась в первой половине двадцатого века с составления карт лесов местного масштаба на основе аэрофотоснимков. Особенно повысилась эффективность применения технологий дистанционного зондирования с запуском в 1972 г. спутникового сканера для мониторинга ресурсов Земли (ERTS – LANDSAT, 16 каналов). В последние годы во всем мире существенно вырос интерес к технологиям дистанционного зондирования в связи с развитием систем искусственного интеллекта и совершенствованием оптических систем сканирования, которые позволяют получать изображения поверхности земли с высоким разрешением и в разных частях оптического спектра, в том числе и в инфракрасной области. Это позволило существенно повысить точность измерений и сократить время обработки данных. Комплексное применение технологий дистанционного зондирования и искусственного интеллекта позволили дистанционному зондированию стать важнейшим инструментом в картографировании, мониторинге и управлении лесными ресурсами. В работе изучено состояние насаждений с преобладанием липы мелколистной в Башкирском Предуралье с использованием технологий геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования по разновременным спутниковым снимкам Pleiades-1A (2011), Landsat-5 (1997) и Landsat-8 (2023). Комплексный анализ трёх снимков, охватывающих исследуемую территорию, позволил оценить текущее состояние растительного покрова и выявить динамику NDVI в пределах выделенных категорий земель. Установлено, что за рассматриваемый период произошли существенные изменения площади территорий всех классов, характеризующихся значениями от 0 до 1. Полученные результаты подтверждены результатами натурных исследований изучаемых территорий.

Ключевые слова. Липа, дистанционное зондирование (ДЗ), космический снимок, географическая информационная система (ГИС), вегетационный индекс (NDVI), фитомасса.

Original article

The use of remote sensing methods and GIS-technologies in monitoring of plantations with a predominance of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in the Bashkir Urals

Svetlana V. Diarova, Rail R. Khisamov, Maria V. Martynova, Zeng Yutong, Rustem I. Abdulmanov

Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

Corresponding author, P.P. Хисамов, hisrail@mail.ru

Abstract. The assessment of forest resources using remote sensing began in the first half of the twentieth century with the compilation of local forest maps based on aerial photographs. The effectiveness of remote sensing technologies increased especially with the launch in 1972 of the satellite scanner to monitor Earth resources (ERTS – LANDSAT, 16 channels). In recent years, the interest to remote sensing technologies has grown significantly worldwide due to the development of artificial intelligence systems and the improvement of optical scanning systems that allow obtaining high-resolution images of the Earth's surface in different parts of the optical spectrum, including in the infrared region, which has significantly improved measurement accuracy and reduced time for data processing. The integrated application of remote sensing and artificial intelligence technologies has allowed remote sensing to become an essential tool in mapping, monitoring and managing forest resources. The paper deals with the examination of the state of stands with a predominance of small-leaved linden in the Bashkir Urals using geoinformation system technologies and remote sensing methods based on satellite images of different time belonging Pleiades-1A (2011), Landsat-5 (1997) and Landsat-8 (2023). A comprehensive analysis of three images covering the study area made it possible to assess the current state of the vegetation cover and identify the dynamics of NDVI within the marked land categories. It was found that during the period under study, there were significant changes of the area of lands of all classes, characterizing by values from 0 to 1. The results obtained are confirmed by the results of field studies of the examined territories.

Keywords: linden tree, remote sensing (RS), satellite image, geographical information system (GIS), vegetation index (NDVI), phytomass.

Введение. Используя значения отражения излучения разных длин волн, можно проводить мониторинговые исследования растительных сообществ с целью определения их состояния. Космические снимки позволяют в полном объеме проводить такие работы.

В современных условиях для решения как практических, так и научных задач активно применяются геопространственные технологии, такие как ГИС (геоинформационные системы) и спутниковые, пилотируемые и беспилотные воздушные суда, включающие также различные интеллектуальные системы, которые поддерживают анализ, оценку, необходимые для эффективного управления лесными ресурсами. Этот опыт освещен в публикациях на примере изучения тропических лесов [1, 2, 3]. В работах по результатам исследований по уточнению границ и пло-

щади лесопокрытых земель на территории европейских стран [4, 5]. Схожие данные опубликованы по исследованиям, проведенным в Канаде [6] и в восточных странах [7] и т.д.

Для оценки состояния растительности применяют материалы дистанционного зондирования Земли. Используя нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), можно определить параметры растительности в исследуемом пикселе снимка. Данный показатель широко применяется в исследованиях, где требуются такие параметры, как классификации почвенно-растительного покрова [8] и мониторинг техногенного воздействия на окружающую среду [9]. В работе [10] исследователями предложен перечень методов аналитического анализа, устанавливающих сезонные и межгодовые отклонения растительности, таких как

фенологические изменения и др. В Таиланде индекс NDVI был изучен для проведения мониторинга и предупреждения лесных пожаров в районах проведения работ по агролесомелиорации.

Установлено, что вегетационные индексы реагируют на ухудшение состояния растительности, которые могут быть вызваны вследствие антропогенного или природного характера. Это могут быть результаты чрезмерной рекреационной деятельности, извлечения из недр большого объема полезных ископаемых, увеличения площади территорий населенных пунктов, процессов водной и ветровой эрозии, пагубного воздействия лесных пожаров, вызванных причинами природного и антропогенного характера и др. [11]. Проведение мониторинговых исследований с целью оценки состояния биоресурсов, подвергающихся негативному воздействию, невозможно осуществить без использования дистанционных изображений исследуемых природных объектов. Полученные со спутниковых систем в результате дистанционного зондирования Земли космические снимки обеспечивают заинтересованных лиц материалами, характеризующимися высоким пространственным и временным разрешением. Таким образом, мониторинговые исследования с использованием вегетационных индексов позволяют прогнозировать возникновение экологических рисков.

Цель, объект и методика исследования. Целью исследования является изучение состояния насаждений с преобладанием липы мелколистной в Башкирском Предуралье с использованием технологий геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования по разновременным спутниковым снимкам Pleiades-1A (2011), Landsat-5 (1997) и Landsat-8 (2023).

Объектом исследований были выбраны лесные насаждения с примесью липы мелколистной в Иглинском лесничестве Республики Башкортостан. Был использован космический снимок со спутника Pleiades-1A высокого разрешения (ID снимка: DS_PHR1A_201306250736306_SE1_PX_E057N54_0220_02977, дата

съемки 25.06.2011 г., угол отклонения от надира 22.1 градуса, облачность по сцене 4 %, площадь покрытия 25 кв. км, разрешение 0,5 м. Также были использованы спутниковые данные Landsat-5 (1997) и Landsat-8 (2023) с более низким разрешением, которые находятся в свободном доступе и предоставлены Геологической службой США.

Снимки обрабатывались с использованием программного продукта ArcGis 10.5. Были рассчитаны площади для каждого класса NDVI попиксельно.

Вегетационный индекс NDVI вычислен по формуле $(NIR-RED)/(NIR+RED)$, где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра (0,7–1,0 мкм); RED – отражение в красной области спектра (0,6–0,7 мкм). В соответствии с представленной формулой показатель густоты растительности (NDVI) для конкретной точки изображения определяется как отношение разницы интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазонах к их сумме. Расчёт NDVI основан на двух наиболее устойчивых участках спектральной кривой отражения сосудистых растений, не зависящих от других факторов. Высокий уровень фотосинтетической активности (как правило, связанной с густой растительностью) приводит к уменьшению отражения в красной области спектра и увеличению в инфракрасной. Использование нормированной разности между минимумом и максимумом отражений повышает точность измерения и минимизирует влияние таких факторов, как различия в освещенности снимка, облачность, дымка, поглощение радиации атмосферой и прочих. Значения индекса варьируются от -1 до 1. При оценке растительности значения NDVI обычно находятся в диапазоне от 0,2 до 0,8.

Результаты и обсуждение. Анализ космических снимков, охватывающих территорию Улу-Телякского и Иглинского участков лесничеств, позволил оценить современное состояние и выявить тенденции изменения вегетационного индекса NDVI за период в 26 лет. Индекс NDVI, благодаря своей простоте расчета, широкому динамическому диапазону, высокой

чувствительности к типам растительного покрова и умеренной восприимчивости к изменению почвенного или атмосферного фона, является ценным инструментом для мониторинга растительности. Однако следует учитывать его ограниченную эффективность в отношении территорий

с разреженной растительностью.

Исследуемая лесная территория характеризуется числовыми значениями NDVI в пределах -0,14 - 0,91, сгруппированными в 11 классов по применяемой в соответствии с методикой дискретной шкалой (таблица 1).

Таблица 1 – Группировка значений NDVI

Показатель индекса вегетации		Класс
минимальный	максимальный	
-0,14	0,00	1
0,00	0,10	2
0,10	0,20	3
0,20	0,30	4
0,30	0,40	5
0,40	0,50	6
0,50	0,60	7
0,60	0,70	8
0,70	0,80	9
0,80	0,90	10
0,90	1,00	11

С использованием калькулятора растра проведено картирование изображений вегетационного индекса NDVI и получены карты идентификации заданных ти-

пов подстилающей поверхности. Инструмент Переклассификация использован для нахождения площадей в каждом классе значения NDVI (таблица 2).

Таблица 2 – Идентификация типов подстилающей поверхности объекта по фиксированным значениям NDVI и оценка состояния растительности

Тип подстилающей поверхности	Отражение в спектральной области		Значение NDVI
	красной	инфракрасной	
Растительность. Оценка растительности (древостоя, подрост, подлеска) по жизненному состоянию: - очень хорошее - хорошее - удовлетворительное - очень плохое, угнетенное	0,10	0,50	0,71-1,00 0,66-0,70 0,61-0,65 0,51-0,60
Растительность разрежена	0,10	0,30	0,31-0,50
Открытая почва без леса	0,25	0,30	0-0,3
Облака	0,25	0,25	0
Снег/лед	0,38	0,35	-0,05
Водные объекты	0,02	0,01	-0,25
Искусственное покрытие (асфальт/другое)	0,30	0,10	-0,50

Исследования демонстрируют, что использование снимков со спутников Landsat различных поколений (5 или 8) не оказывает существенного влияния на результаты расчёта или классификации NDVI.

Для оценки эволюции NDVI были поставлены спутниковые снимки, полученные в 1997, 2011 и 2023 годах. Комплексный анализ трёх снимков, охватывающих исследуемую территорию, позволил

оценить текущее состояние растительного покрова и выявить динамику NDVI в пределах выделенных категорий земель. Установлено, что за рассматриваемый

период произошли существенные изменения площади территорий всех классов, характеризующихся значениями от 0 до 1 (рисунок 1, таблицы 3-4).



Рисунок 1. Коэффициенты NDVI в различные временные периоды по классам (от 1 до 8)

Таблица 3 – Характеристики индекса вегетации NDVI по классам

Значение NDVI	1997		2011		2023	
	Кол. пикселей*, шт.	Площадь, га	Кол. пикселей*, шт.	Площадь, га	Кол. пикселей*, шт.	Площадь, га
0-0,1	3	0,27	0	0,00	0	0,00
0,1-0,2	20	1,80	0	0,00	4	0,36
0,2-0,3	55	4,95	6	0,54	28	2,52
0,3-0,4	153	13,77	26	2,34	253	22,77
0,4-0,5	484	43,56	133	11,97	13980	1258,2
0,5-0,6	848	76,32	570	51,3	7762	698,58
0,6-0,7	8843	795,87	19725	1775,25	0	0,00
0,7-0,8	11621	1045,89	1567	141,03	0	0,00
Итого	22027	1982,43	22027	1982,43	22027	1982,43

Таблица 4 – Площадь типов подстилающей поверхности по результатам дешифрирования космоснимков

Класс	Площадь, га			Изменения 2011 к 1997 г.	Изменения 2023 к 2011 г.	Изменения 2023 к 1997 г.
	1997	2011	2023	га	га	га
1	0,3	0,0	0,0	-0,3	0,0	-0,3
2	1,8	0,0	0,4	-1,8	0,4	-1,4
3	5,0	0,5	2,5	-4,4	2,0	-2,4
4	13,8	2,3	22,8	-11,4	20,4	9,0
5	43,6	12,0	1258,2	-31,6	1246,2	1214,6
6	76,3	51,3	698,6	-25,0	647,3	622,3
7	795,9	1775,3	0,0	979,4	-1775,3	-795,9
8	1045,9	14,8	9,9	-1031,1	-4,9	-1036,0

По данным оценки динамики индексов с 1997 по 2023 г. можно сделать вывод, что большая часть исследуемого участка относится к 5, 6, 7 и 8 классам, то есть насаждения липы имеют высокие показатели индекса NDVI. Высокие значения индекса характеризуют большую фитомассу насаждений, что свидетельствует о благоприятных условиях роста и продуктивности деревьев на изучаемой территории. Можно с большой долей вероятности утверждать, что данный показатель способствует увеличению нектаропродуктивности липовых древостоев.

По территории 1-8 классов (значение вегетационного индекса 0-0,8) наблюдается существенное снижение площади. Общий рост фотосинтетической активности исследуемого лесного массива отражает большие переходы площади с 8 класса на более высокие 9-11 класс. Этот

факт можно связать с увеличением лесоводственной полноты (степени сомкнутости крон), с увеличением возраста насаждений, что благоприятно сказывается на нектаропродуктивных показателях.

Заключение. Расчет NDVI на основе снимков различного пространственного разрешения представляет собой эффективный инструмент для комплексного анализа лесных массивов.

Помимо выделения участков, не покрытых лесом и нелесных земель, NDVI позволяет четко идентифицировать зоны высокопродуктивных липовых насаждений, которые заметно отличаются от других участков (более темные области на индексированном изображении). Светлые пятна свидетельствуют о мозаичной структуре зарастающих вырубков, гарей и тому подобных территорий. Прямая корреляция NDVI с продуктивностью лесных на-

саждений открывает широкие возможности для его применения в лесохозяйственной практике, включая прогнозирование нектаропродуктивности. Обширный охват снимков позволяет проводить сравнительную оценку участков и более детально планировать лесохозяйственные мероприятия. В данном случае расчет NDVI позволил выделить липовые леса с оптимальной полнотой, возрастной структурой и санитарным состоянием (темный

оттенек).

Таким образом, расчет NDVI может найти широкое применение в картографировании, таксации и анализе лесных массивов, в том числе с преобладанием липы мелколистной. Представленные в исследовании изображения демонстрируют перспективность использования NDVI для мониторинга состояния лесов и выявления нелесных территорий.

Список источников

1. Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым снимкам / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев [и др.] // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2010. № 2 (9). С. 14–20. EDN: MVNQBB
2. Воробьев О.Н., Курбанов Э.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. EDN: WMIXJZ. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134
3. Пономарев Е.И., Швецов Е.Г. Сопоставление оценок отпада древостоев Сибири после воздействия пожаров по дистанционным данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 213–223. EDN: FKYED. doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-213-223
4. Abbas S., Irteza S.M., Shahzad N. Approaches of Satellite Remote Sensing for the Assessment of Above-Ground Biomass across Tropical Forests: Pan-tropical to National Scales // Remote Sens. 2020. № 12 (20). 3351. doi: /10.3390/rs12203351
5. Ahrends A., Bulling M.T., Platts P.J. et al. Detecting and predicting forest degradation: A comparison of ground surveys and remote sensing in Tanzanian forests // Plants, People, Planet. 2021;3(3):268-81. doi:10.1002/ppp3.10189.
6. Valderrama-Landeros L., Flores-Verdugo F., Rodríguez-Sobreyra R., Kovacs M., Flores-de-Santiago F. (2021). 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. J Environ Manage. 2021; Feb 1;279:111617. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111617. E pub 2020 Nov 10.
7. Fischer R., Knapp N., Bohn F., Huth A. (2019) Remote Sensing Measurements of Forest Structure Types for Ecosystem Service Mapping. In: Schröter M., Bonn A., Klotz S., Seppelt R., Baessler C. (eds) Atlas of Ecosystem Services. Springer, Cham. doi: /10.1007/978-3-319-96229-0_11
8. Hycza T., Kamińska A., Stereńczak K. 2021 The Use of Remote Sensing Data to Estimate Land Area with Forest Vegetation Cover in the Context of Selected Forest Definitions Forests 2021, 12(11), 1489; doi: /10.3390/f12111489
9. Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms. Sci Rep. 2020. 10. 9952. doi:10.1038/s41598-020-67024-3
10. Townshend J.R.G., Justice C.O., Skole D., et al. 1994. The 1 km resolution global data set: needs of the International Geosphere Biosphere Programme // International Journal of Remote Sensing, 15, 3417–3441. doi: /10.1080/01431169408954338
11. Sellers P.J., Tucker C.J., Collatz G.J., Los S.O., Justice C.O., Dazlich, D.A. 1994. A global 1 by 1 NDVI data set for climate studies: Part 2. The generation of global fields of terrestrial biophysical 236 parameters from the NDVI // International Journal of Remote Sensing, 15, 3519–3545. doi: /10.1080/01431169408954343

References

1. Kurbanov E.A., Vorobyev O.N., Gubayev A.V. [et al.] Estimation of reforestation of Mari El Republic abandoned agricultural lands by satellite images. *Bulletin of the Mari State Technical University. Series: Forest. Ecology. Nature management.* 2010;2(9):14–20 (In Russ.).
2. Vorobev O.N., Kurbanov E.A., Polevshikova Yu.A., Lezhnin S.A. 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,No4:124–134 (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
3. Ponomarev E.I., Shvetsov E.G. Comparison of estimates of post-fire forest mortality in Siberia based on

remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*. 2024;Vol.21,No6:213-223 (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-213-223.

4. Abbas S., Irteza S.M., Shahzad N. Approaches of Satellite Remote Sensing for the Assessment of Above-Ground Biomass across Tropical Forests: Pan-tropical to National Scales. *Remote Sens.* 2020;12(20):3351. doi: /10.3390/rs12203351.

5. Ahrends A., Bulling M.T., Platts P.J. et al. Detecting and predicting forest degradation: A comparison of ground surveys and remote sensing in Tanzanian forests. *Plants, People, Planet.* 2021;3(3):268-81. doi:10.1002/ppp3.10189.

6. Valderrama-Landeros L., Flores-Verdugo F., Rodríguez-Sobreyra R., Kovacs 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. *J Environ Manage.* 2021;279:111617. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111617. E pub 2020 Nov 10.

7. Fischer R., Knapp N., Bohn F., Huth A. Remote Sensing Measurements of Forest Structure Types for Ecosystem Service Mapping. Schruter M., Bonn A., Klotz S., Seppelt R., Baessler C. (eds) *Atlas of Ecosystem Services*. Springer, Cham. doi: /10.1007/978-3-319-96229-0_11

8. Hycza T., Kamińska A., Stereńczak K. 2021 The Use of Remote Sensing Data to Estimate Land Area with Forest Vegetation Cover in the Context of Selected Forest Definitions Forests. 2021;12(11),1489. doi: /10.3390/f12111489

9. Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms. *Sci Rep.* 2020; 10:9952. doi:10.1038/s41598-020-67024-3

10. Townshend J.R.G., Justice C.O., Skole D. et al. The 1 km resolution global data set: needs of the International Geosphere Biosphere Programme. *International Journal of Remote Sensing.* 1994;15:3417-3441. doi: /10.1080/01431169408954338.

11. Sellers P.J., Tucker C.J., Collatz G.J., Los S.O., Justice C.O., Dazlich, D.A. 1994. A global 1 by 1 NDVI data set for climate studies: Part 2. The generation of global fields of terrestrial biophysical 236 parameters from the NDVI. *International Journal of Remote Sensing,* 1994;15:3519–3545. doi: /10.1080/01431169408954343.

Информация об авторах

Светлана Венеровна Диарова – старший преподаватель, кафедра землеустройства, 999di@mail.ru;

Раиль Рауфович Хисамов – доктор биологических наук, профессор, кафедра лесоводства и ландшафтного дизайна, hisrail@mail.ru;

Мария Викторовна Мартынова – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра лесоводства и ландшафтного дизайна, maarusssia@mail.ru;

Цзэн Юйтун – аспирант, кафедра лесоводства и ландшафтного дизайна, zhaoyuanze@mail.ru;

Рустам Ильгизарович Абдульманов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра землеустройства, rustam.abdulmanov@mail.ru.

Information about the authors

Svetlana V. Diarova – Senior lecturer, Chair of Land Management, 999di@mail.ru;

Rail R. Khisamov – Doctor of Science (Biology), Professor, Chair of Forestry and Landscape Design, hisrail@mail.ru;

Maria V. Martynova – Doctor of Science (Agriculture), Associate Professor, Chair of Forestry and Landscape Design, maarusssia@mail.ru;

Tseng Yutong – Postgraduate student, Chair of Forestry and Landscape Design, zhaoyuanze@mail.ru;

Rustam I. Abdulmanov – Candidate of Science (Agriculture), Associate Professor, Chair of Land Management, rustam.abdulmanov@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 31.10. 2024; одобрена после рецензирования 14.01.2024; принята к публикации 11.02.2025.

The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 14.01.2024; accepted for publication 11.02.2025.