

УДК 528.71:332.3-047.36(470.345)  
DOI 10.17513/use.38332

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЗОНАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ МОНИТОРИНГА ЗЕМЕЛЬ ЛЕСНОГО ФОНДА

**Инюткина Е.С., Зарубин О.А., Ларина А.В.,  
Мучкаева Н.С., Козлова Е.А., Лямзина И.С.**

*ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
имени Н.П. Огарёва», Саранск, e-mail: des.katy@yandex.ru, oleg-zarubin@list.ru,  
larina2705@yandex.ru, tosyanya2013@mail.ru, kozlovaea.10@yandex.ru, lyamzinainna20@gmail.com*

Цель проведенного исследования заключается в апробации методик дешифрирования многозональных космических снимков для целей мониторинга земель лесного фонда и разработки соответствующих картографических материалов на основе применения геоинформационных технологий. Объектом исследования выступила территория Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия. В качестве источника данных дистанционного зондирования Земли использованы разновременные спутниковые снимки проекта Landsat. Работы выполнены в программных комплексах QGIS и MapInfo Professional. Для целей определения динамики растительного покрова были вычислены нормализованный разностный вегетационный индекс, нормализованный разностный водный индекс и хлорофилльный индекс. На основе полученных значений проведен анализ состояния лесных насаждений в разрезе участков лесничеств и участков леса, имеющих различное целевое назначение. В результате проведенного исследования спроектирована серия электронных карт и связанных с ними баз данных, характеризующих качественное состояние лесных земель, а также изменение лесистости в границах Темниковского территориального лесничества в период с 2014 по 2023 г. Результаты могут быть использованы для целей принятия управленческих решений и проведения мониторинговых мероприятий в территориальном планировании и лесоустройстве.

**Ключевые слова:** космические снимки, вегетационные индексы, дешифрирование, мониторинг, лесной фонд

## APPLICATION OF MULTI-ZONE SPACE IMAGES FOR MONITORING FOREST LANDS

**Inyutkina E.S., Zarubin O.A., Larina A.V.,  
Muchkaeva N.S., Kozlova E.A., Lyamzina I.S.**

*National Research Mordovia State University, Saransk,  
e-mail: des.katy@yandex.ru, oleg-zarubin@list.ru, larina2705@yandex.ru,  
tosyanya2013@mail.ru, kozlovaea.10@yandex.ru, lyamzinainna20@gmail.com*

The purpose of the research is to test the methods of decoding multi-zone space images for the purposes of monitoring forest fund lands and developing relevant cartographic materials based on the use of geoinformation technologies. The object of the research was the territory of the Temnikovsky territorial forestry of the Republic of Mordovia. Multi-temporal Landsat satellite images were used as a source of Earth remote sensing data. The research were carried out in the QGIS and MapInfo Professional software packages. The normalized difference vegetation index, normalized difference water index and chlorophyll index were calculated to determine the dynamics of vegetation cover. The analysis of the state of forest plantations was carried out on the basis of the obtained values in the context of district forestries and forest areas with different intended purposes. A series of electronic maps and related databases have been designed. They characterize the qualitative state of forest lands, as well as changes in forest cover within the boundaries of the Temnikovsky territorial forestry in the period from 2014 to 2023. The results can be used for the purposes of making management decisions and conducting monitoring activities, territorial planning and forest management.

**Keywords:** space images, vegetation indices, interpretation, monitoring, forest lands

### Введение

Согласно федеральному законодательству [1] основной целью системы государственного экологического мониторинга является обеспечение охраны окружающей среды. В зависимости от объектов и задач мониторинга в Единой системе государственного экологического мониторинга выделено 16 подсистем, одна из которых связана с государственным мониторингом земель. Согласно положениям земельного законодательства [2], данный вид монито-

ринга служит для осуществления рационального использования и охраны земельных ресурсов.

В настоящем исследовании затронуты вопросы применения методов обработки данных дистанционного зондирования Земли (многозональных космических снимков) для мониторинга земель лесного фонда, к которому в силу положений лесного законодательства [3] относятся как лесные, так и не-лесные земли. Некоторые профильные задачи по мониторингу лесных земель решаются

в рамках государственного мониторинга воспроизводства лесов и государственного лесопатологического мониторинга, являющихся подсистемами государственного экологического мониторинга, а также при проведении мониторинга пожарной опасности в лесах и лесных пожаров.

Вне зависимости от подсистемы государственного экологического мониторинга одним из ключевых источников информации выступают данные дистанционного зондирования Земли, которые позволяют оперативно проектировать и обновлять картографические материалы при помощи использования геоинформационных систем и программных продуктов по дешифрированию снимков.

**Цель исследования** – апробация методик дешифрирования многозональных космических снимков для целей мониторинга земель лесного фонда и разработки соответствующих картографических материалов на основе применения геоинформационных технологий.

#### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступила территория Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия, находящегося на северо-западе региона в Темниковском, Теньгушевском и Zubovo-Полянском районах. Лесничество граничит на севере с Нижегородской областью, на северо-востоке с Мордовским государственным заповедником им. П.Г. Смиловича, на западе с Рязанской областью, на востоке – с Краснослободским и на юге – с Виндрейским территориальными лесничествами. В составе территориального лесничества в соответствии с лесохозяйственным регламентом [4] выделены Барашевское (13163 га), Кечмировское (19360 га), Темниковское (15761 га), Теньгушевское (11777 га), Харинское (15483 га) участковые лесничества.

Базовые картографические слои (границы субъекта, муниципальных районов, кадастровых районов, населенных пунктов, территориального и участковых лесничеств, железные и автомобильные дороги, гидрография) были спроектированы в геоинформационной системе MapInfo Professional с помощью оцифровки картографических материалов лесохозяйственного регламента лесничества [4] и схемы территориального планирования Республики Мордовия [5].

В работе использованы многозональные космические снимки Landsat-8, 9, полученные с геопортала Геологической службы США (USGS): 2014 г. – от 6 июля; 2018 г. – от 6 июля; 2023 г. – от 27 апреля, 8 июля и 4 октября. Дешифрирование многозональных космических снимков проводилось в программном комплексе QGIS. На первом этапе изображения были радиометрически откалиброваны в соответствии с методикой поставщика данных ДЗЗ [6]. Для этого попиксельно для каждого снимка «сырое» безразмерное нормализованное значение DN (Digital Number) пересчитано в параметр отражательной способности (Reflectance)

В результате проведенного исследования были рассчитаны и проанализированы пространственно-временные изменения числовых расчетных показателей вегетационных индексов – параметров, определяемых в результате операций с спектральными каналами. Для целей анализа динамики растительного покрова были вычислены нормализованный разностный индекс растительности (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), нормализованный разностный водный индекс (Normalized Difference Water Index, NDWI) и хлорофилльный индекс (Green Chlorophyll Index, Clgreen) (табл. 1). Указанные индексы успешно используются исследователями в работах последних лет для мониторинга состояния лесной растительности.

Таблица 1

Формулы для расчета вегетационных индексов

Вегетационный индекс	Формула	Переменные
NDVI	$(NIR - Red) / (NIR + Red)$	NIR – значение спектрального отражения в ближнем инфракрасном канале SWIR – значение спектрального отражения в среднем инфракрасном канале Red – значение спектрального отражения в красном канале Green – значение спектрального отражения в зеленом канале
NDWI	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	
Clgreen	$(NIR / Green) - 1$	

NDVI – один из самых часто используемых вегетационных индексов в современных работах по мониторингу лесных насаждений и оценке фитомассы [7–9]. Впервые его применение было описано в 1973 г. в работе J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell и D.W. Deering. Для растительного покрова значения данного индекса имеют положительные значения. Показатели данного индекса варьируются от  $-1$  до  $+1$  в зависимости от состава представленной растительности, состояния растительного покрова и других факторов. Чем оно выше, тем больше фитомассы регистрируется в одном пикселе космического снимка. Для лесной растительности в середине вегетационного периода показатель, как правило, выше  $0,7$ .

NDWI, предложенный В. Гоа в 1996 г., используется с целью мониторинга изменений содержания воды в растениях и поверхностных водах [10, 11]. Амплитуда показаний данного индекса от  $-1$  до  $+1$ . С помощью него оценивается влажность в растительности. Залесные территории имеют значение около  $0,4$ .

Индекс  $SI_{green}$ , активно используемый в сельскохозяйственных исследованиях с начала 2000-х гг., в современных работах также применяется и для мониторинга состояния лесного покрова [12, 13]. Высокие

значения индекса связаны с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений. Значения выше  $1$  свидетельствуют о здоровой растительности с большим содержанием хлорофилла в листовых пластинах.

### Результаты исследования и их обсуждение

На основе полученных картографических материалов (рис. 1–3) и статистических сведений (табл. 2) сделаны выводы об изменении показателей растительного покрова Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия.

Оценка общего количества фитомассы по NDVI показывает, что территория Темниковского территориального лесничества соответствует классу «густой растительности» общепринятой шкалы данного индекса. При этом значения с 2014 по 2023 г. имеют тренд на увеличение (с  $0,72332$  до  $0,74273$ ). Данная тенденция характерна для всех участковых лесничеств, при этом для Харинского участкового лесничества значение NDVI изменилось с класса «разреженная растительность» ( $0,69637$ ) на класс «густая растительность» ( $0,72985$ ). В 2023 г. во всех пяти участковых лесничествах наблюдаются значения выше  $0,7$ .

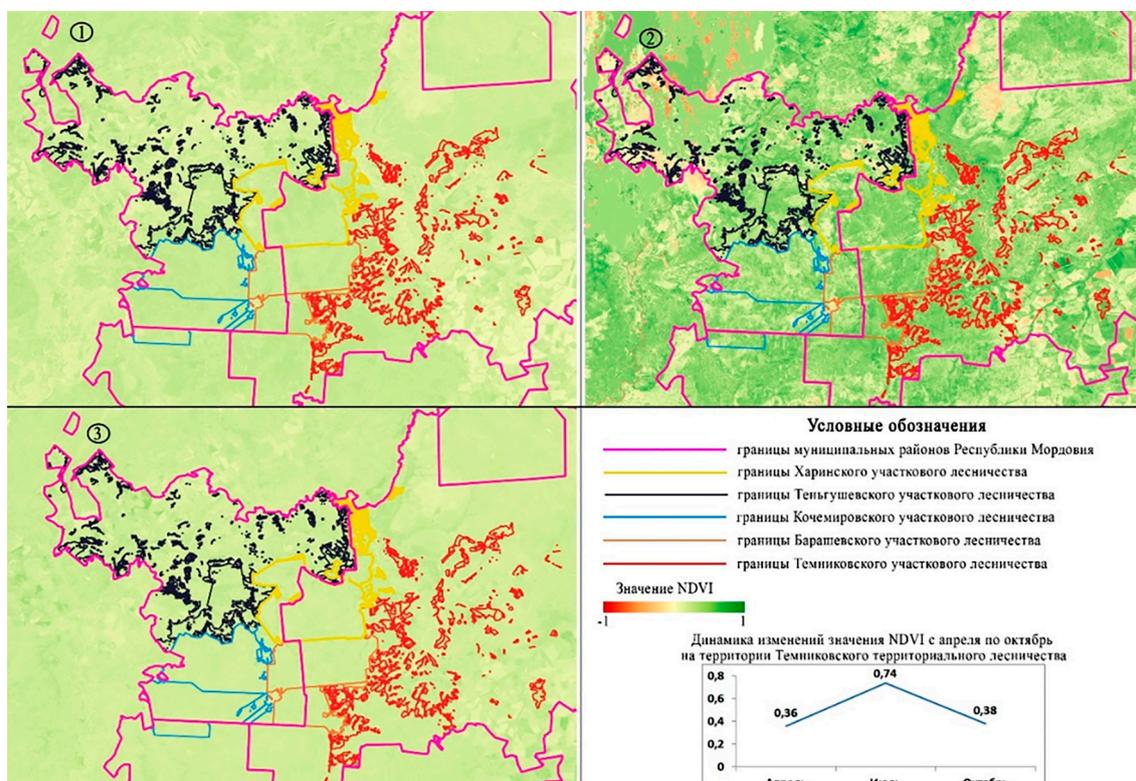


Рис. 1. Динамика значений вегетационного индекса NDVI на территории Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия в 2023 г.: № 1 – 27 апреля, № 2 – 8 июля и № 3 – 4 октября

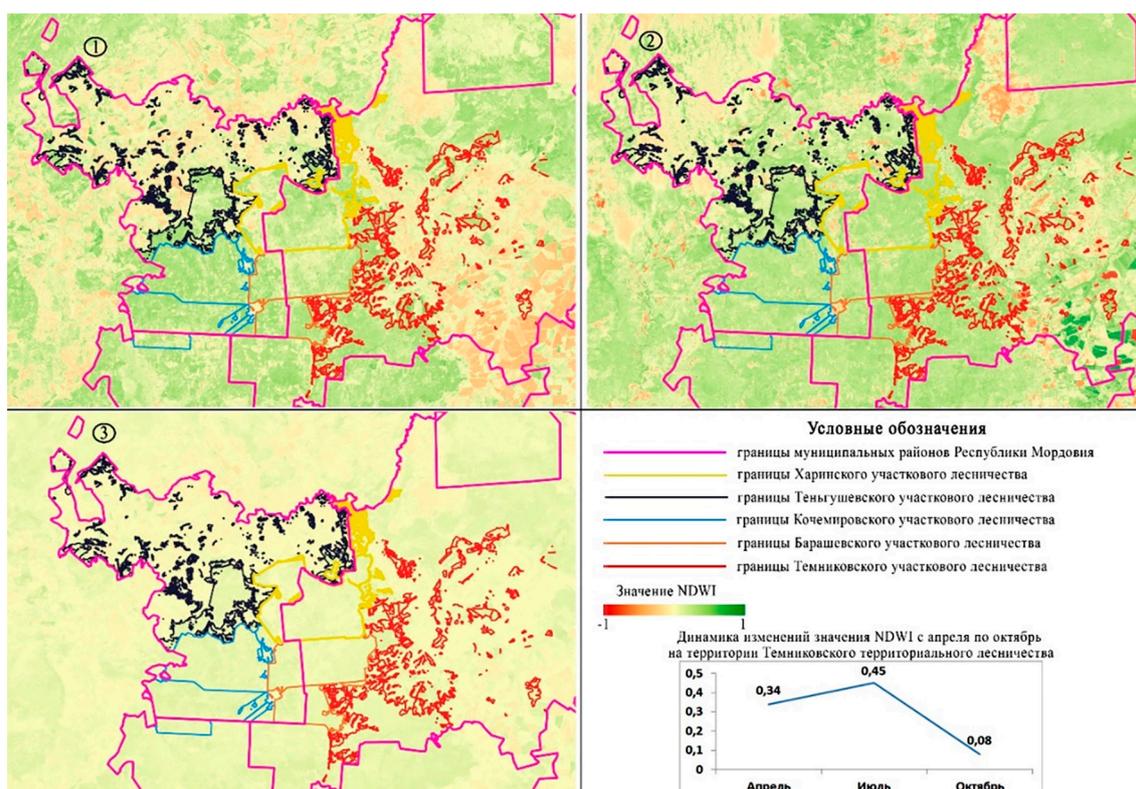


Рис. 2. Динамика значений вегетационного индекса NDWI на территории Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия в 2023 г.: № 1 – 27 апреля, № 2 – 8 июля и № 3 – 4 октября

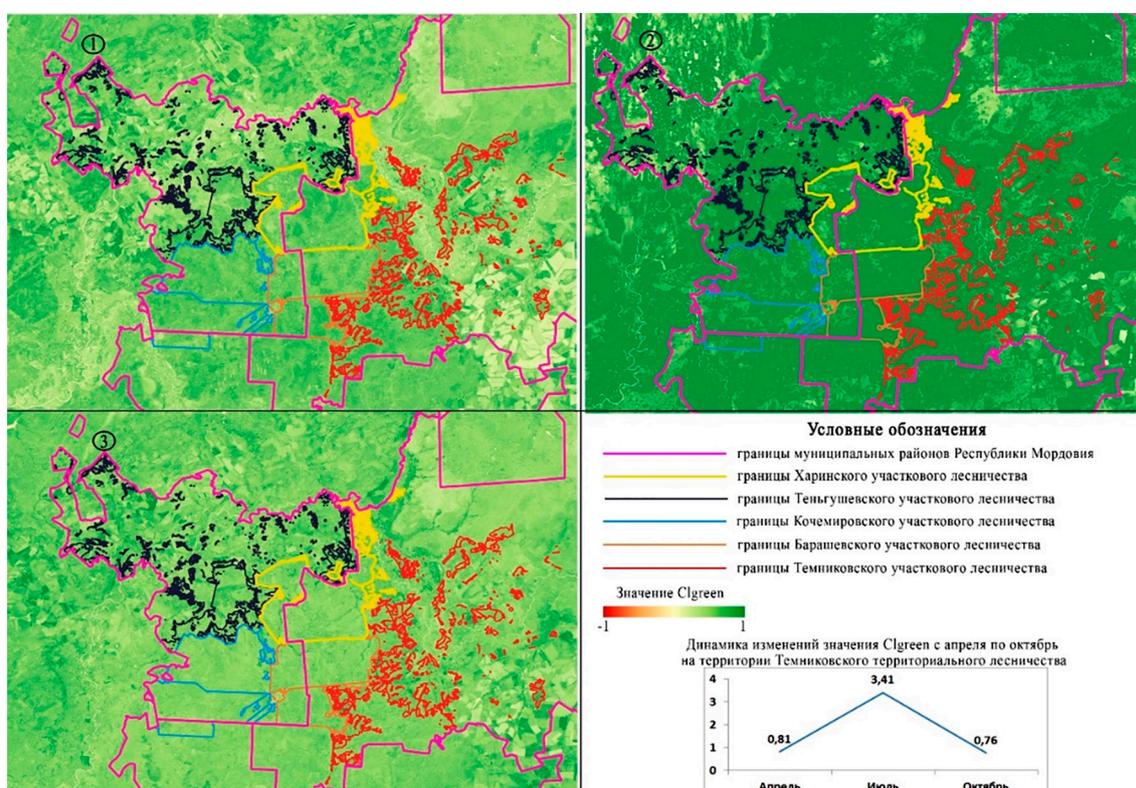


Рис. 3. Динамика значений вегетационного индекса Clgreen на территории Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия в 2023 г.: № 1 – 27 апреля, № 2 – 8 июля и № 3 – 4 октября

Таблица 2

Результаты расчета вегетационных индексов на территории Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия в 2014–2023 гг.

	NDVI			NDWI			C <sub>l</sub> green		
	06.07. 2014 г.	06.07. 2018 г.	08.07. 2023 г.	06.07. 2014 г.	06.07. 2018 г.	08.07. 2023 г.	06.07. 2014 г.	06.07. 2018 г.	08.07. 2023 г.
Территориальное лесничество	0,72332	0,74004	0,74273	0,45563	0,45317	0,4503	3,40933	3,64539	3,40933
Участковые лесничества									
Барашевское	0,74066	0,76489	0,76153	0,45642	0,45432	0,45269	3,63577	3,98541	3,63577
Кочемировское	0,72535	0,72549	0,74503	0,45215	0,4515	0,45215	3,35746	3,47216	3,35746
Темниковское	0,72727	0,74995	0,75089	0,45098	0,45329	0,45098	3,526	3,79055	3,52600
Теньгушевское	0,73129	0,74293	0,74626	0,4597	0,45508	0,45197	3,47542	3,60161	3,47542
Харинское	0,69637	0,72489	0,72985	0,45141	0,45483	0,45141	3,11561	3,45980	3,11561
Целевое назначение и категории защитных лесов									
Леса, расположенные в защитных полосах лесов	0,70384	0,72186	0,7341	0,4522	0,45168	0,4522	3,19715	3,41789	3,39725
Запретные полосы лесов, расположенные вдоль водных объектов	0,73363	0,75329	0,75706	0,45946	0,45497	0,45946	3,66835	3,84497	3,75406
Леса, расположенные в лесопарковых зонах	0,68204	0,7157	0,71713	0,4502	0,45441	0,45022	2,93606	3,24830	3,12461
Противоэрозионные леса	0,70246	0,71156	0,74393	0,45129	0,4557	0,45129	3,35788	3,43475	3,61548
Эксплуатационные леса	0,72461	0,74086	0,74638	0,45211	0,45354	0,45211	3,40354	3,64874	3,52477

Оценка общего количества фитомассы по NDVI показывает, что территория Темниковского территориального лесничества соответствует классу «густой растительности» общепринятой шкалы данного индекса. При этом значения с 2014 по 2023 г. имеют тренд на увеличение (с 0,72332 до 0,74273). Данная тенденция характерна для всех участковых лесничеств, при этом для Харинского участкового лесничества значение NDVI изменилось с класса «разреженная растительность» (0,69637) на класс «густая растительность» (0,72985). В 2023 г. во всех пяти участковых лесничествах наблюдаются значения выше 0,7.

Аналогичная ситуация регистрируется при анализе территории в разрезе целевого назначения. Как для категорий защитных лесов, так и для эксплуатационных лесов показатель NDVI демонстрирует рост. Наибольшие значения в 2023 г. характерны для эксплуатационных лесов (0,74638) и запретных полос лесов, расположенных вдоль водных объектов (0,75706).

NDWI ежегодно имеет высокие показатели на территории всего территориального

лесничества (более 0,45). Анализ значений по участковым лесничествам показывает, что за все периоды наблюдений сохраняются стабильные значения, соответствующие уровню «зеленая растительность, насыщенная водой» общепринятой шкалы данного индекса.

В формуле NDWI используется канал SWIR, который реагирует не только на изменения содержания воды в листовых пластинках, но и на условия увлажнения в верхнем слое почвы. Закономерно, что для запретных полос, расположенных вдоль водных объектов, данный показатель несколько выше, чем для остальных категорий. Повышенные значения NDWI в апреле по отношению к октябрю обусловлены распусканием листьев, накоплением в них влаги, а также сохраняющейся влажностью почвы после весеннего снеготаяния.

Вегетационный индекс C<sub>l</sub>green показывает оценку фотосинтетической активности растительного покрова. Чем она выше, тем больше в листьях растений содержится хлорофилла.

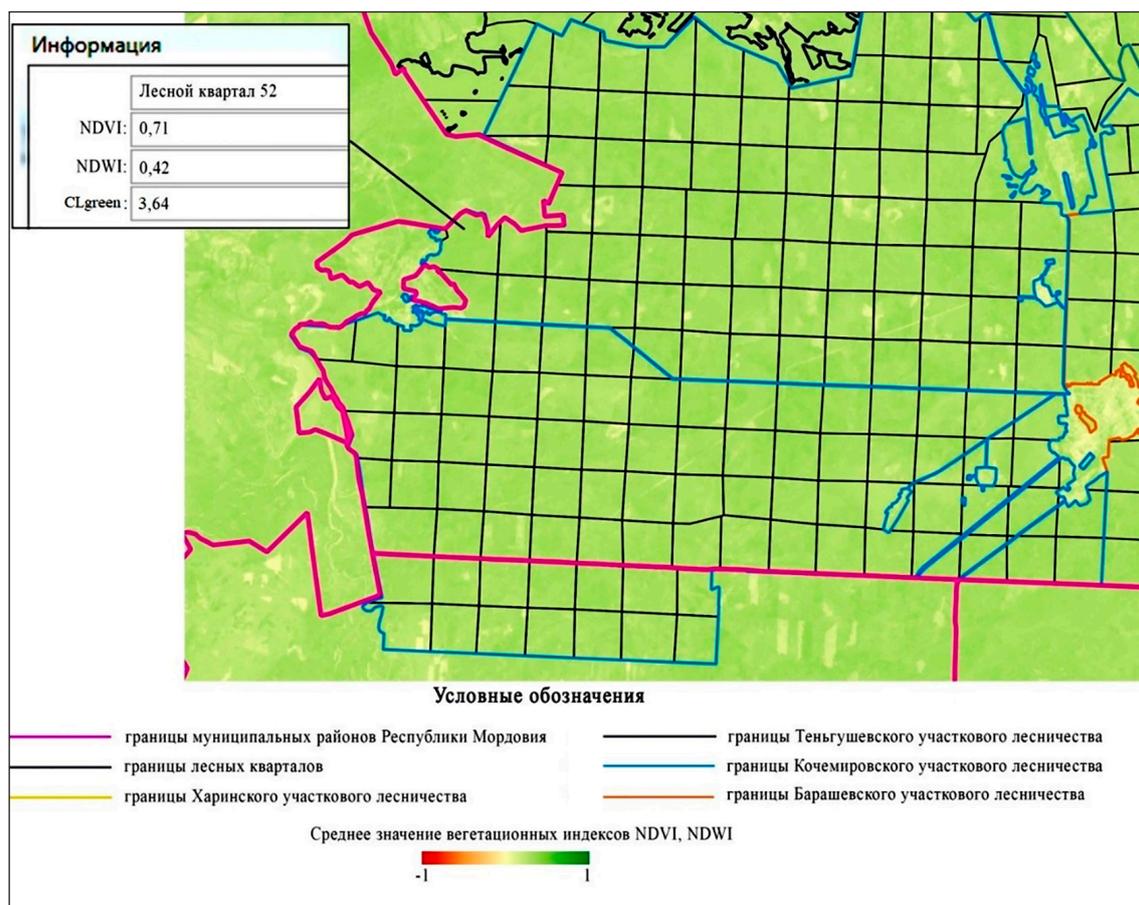


Рис. 4. Средние значения вегетационных индексов по лесным кварталам

В целом для территории Темниковского территориального лесничества индекс Clgreen выше 3,41, что свидетельствует о высокой фотосинтетической активности лесных земель. При этом в сравнении 2018 и 2023 гг. показатель несколько снизился (с 3,64539 до 3,40933). Значения по участковым лесничествам в 2018 г.: Барашевское – 3,99, Кочемировское – 3,47, Темниковское – 3,79, Теньгушевское – 3,60, Харинское – 3,46. Результаты анализа лесной растительности по целевому назначению и категориям защитных лесов показали, что наименьшее значение вегетационный индекс принимает в категории лесов, расположенных в лесопарковых зонах, а наибольшее регистрируется для запретных полос лесов, расположенных вдоль водных объектов.

Для более эффективной интерпретации пространственной мониторинговой информации о параметрах залесенных территорий и принятия управленческих решений создан полигональный слой с лесными

кварталами, в котором каждой единице присвоено усредненное значение вегетационных индексов (рис. 4).

Результаты расчета вегетационных индексов и автоматизированной контролируемой кластеризации космических снимков методом максимального подобия позволили провести анализ динамики лесопокрытой территории в границах Темниковского территориального лесничества за последние 10 лет в период 2014–2023 гг. Были определены территории, расчищенные от леса в 2014–2023 гг.; территории, залесенные в 2014–2023 гг., и территории без изменений лесного покрова (рис. 5).

По данным геоинформационного мониторинга площадь территорий, расчищенных от леса в 2014–2023 гг., составила 2561,80 га. Площадь территорий, залесенных в 2014–2023 гг., – 2027,10 га. Площадь лесопокрытых территорий в 2014–2023 гг. уменьшилась на 534,70 га. Наибольшие изменения зарегистрированы для Барашевского и Харинского лесничеств.

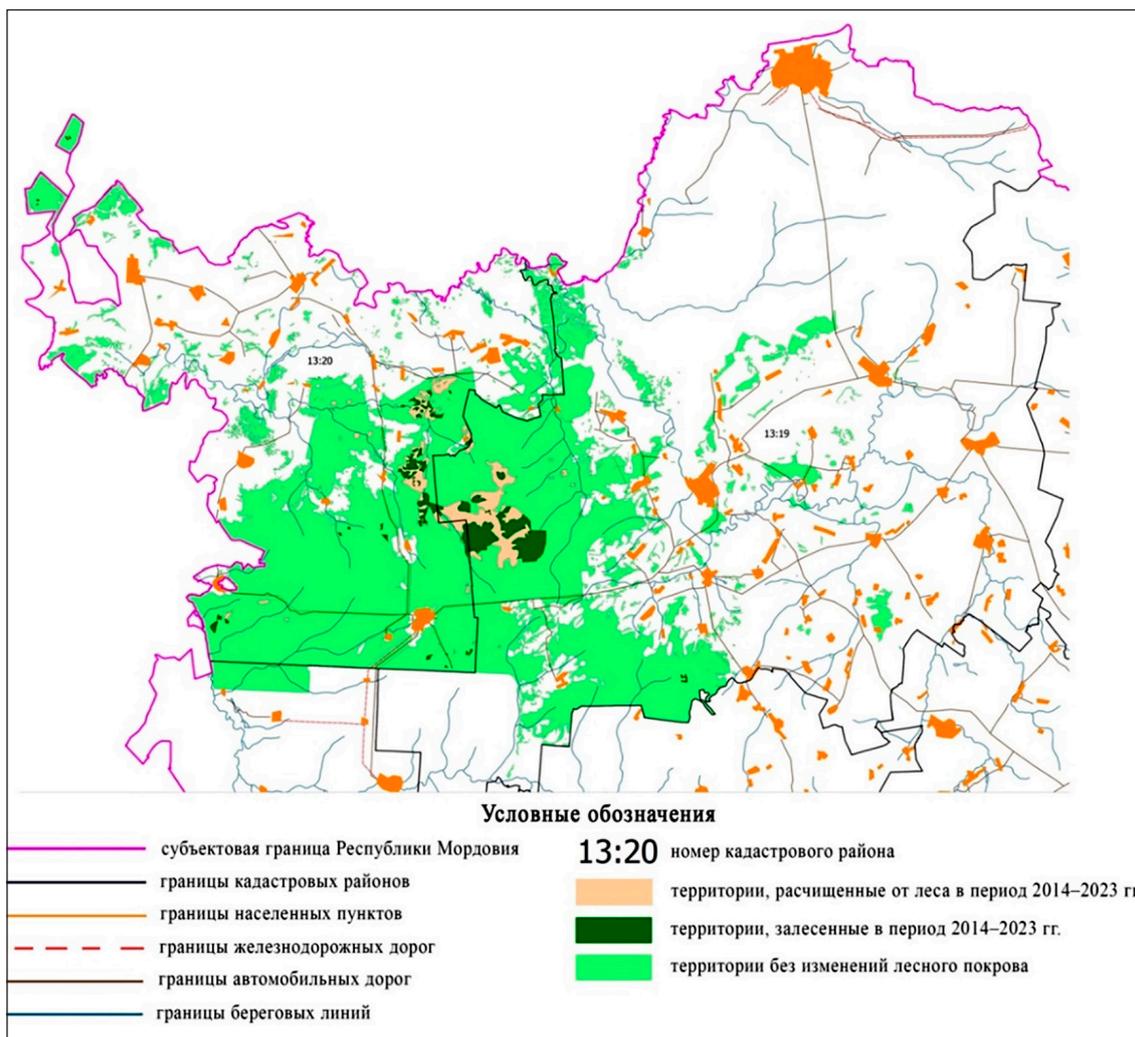


Рис. 5. Изменение лесистости на территории Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия в 2014–2023 гг.

### Заключение

В результате проведенного исследования выявлены важнейшие качественные и количественные особенности лесных земель в составе Темниковского территориального лесничества. Спроектированы электронные слои и базы данных, отражающие пространственные характеристики лесопокрытых территорий. Результаты могут быть использованы как для мониторинга земель лесного фонда в рамках государственного мониторинга земель, так и при реализации программ других видов государственного экологического мониторинга, например государственного мониторинга воспроизводства лесов.

### Список литературы

1. Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изм. и доп., вступ. в силу

с 01.09.2024) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_34823/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/) (дата обращения: 07.09.2024).

2. Земельный кодекс Российской Федерации от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (дата обращения: 07.09.2024).

3. Лесной кодекс Российской Федерации от 04 декабря 2006 г. № 200-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024) [Электронный ресурс]. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_64299/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/) (дата обращения: 07.09.2024).

4. Лесохозяйственный регламент Темниковского территориального лесничества Республики Мордовия / Министерство лесного, охотничьего хозяйства и природопользования Республики Мордовия. Саранск, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <https://e-mordovia.ru/gosudarstvennaya-vlast-rm/ministerstva-i-vedomstva/ministerstvo-prm/informatsiya-dlya-grazhdan/lesokhozyaystvennyy-reglament-temnikovskogo-territorialnogo-lesnichestva/> (дата обращения: 07.09.2024).

5. Постановление Правительства Республики Мордовия от 29 января 2024 г. № 74 «О внесении изменений в Схему территориального планирования Республики Мордовия». [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/408451539/> (дата обращения: 07.09.2024).

6. Zanter K. Landsat 8 (L8): data users handbook. Sioux Falls, South Dakota: Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2019. 106 с.
7. Оплетаев А.С., Жигулин Е.В., Косов В.А. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях // Леса России и хозяйство в них. 2019. № 3 (70). С. 15–23.
8. Barka I., Bucha T., Molnar T., Móricz N., Somogyi Z., Koreň M. Suitability of MODIS-based NDVI index for forest monitoring and its seasonal applications in Central Europe // Central European Forestry Journal. 2019. Vol. 66. P. 206–217. DOI: 10.2478/forj-2019-0020.
9. Ямашкин А.А., Ямашкин С.А., Шабайкина В.А., Зарубин О.А., Кирюшин А.В. Геоинформационное моделирование метагеосистем города для принятия управленческих решений в сфере экологии // Успехи современного естествознания. 2023. № 8. С. 76–85. DOI: 10.17513/use.38091.
10. Васильченко А.А., Выприцкий А.А. Картографирование лесных насаждений Волгоградской области по данным ДЗЗ с использованием индексов BSFI и NDWI // Геодезия и картография. 2023. Т. 84, № 10. С. 39–49.
11. Hussein S.Ja., Naji R.H. Modelling the Behaviour of Vegetation Indicators (NDVI – NDWI – IPVI) in Busaiya District Using GIS-RS // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1225, Is. 1. P. 012–013. DOI: 10.1088/1755-1315/1225/1/012013.
12. Xu X., Du H., Zhou G., Mao F., Li X., Zhu D., Li Ya., Cui L. Remote estimation of canopy leaf area index and chlorophyll content in Moso bamboo (*Phyllostachys edulis* (Carrière) J. Houz.) forest using MODIS reflectance data // Annals of Forest Science. 2018. Vol. 75, Is. 33. P. 07–21. DOI: 10.1007/s13595-018-0721-y.
13. Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В., Мельник П.Г., Донской С.А. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 31–50.