

УДК 528.8:630

DOI: 10.58168/EnvPr2026_177-183

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ЛЕСНЫЕ РЕСУРСЫ
ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ SENTINEL-2

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF RECREATIONAL LOAD ON FOREST RESOURCES
OF THE VORONEZH REGION USING SENTINEL-2 DATA

Яковенко Н.В., д.г.н., профессор
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Россия

Рудницких А.А., аспирант
Лесного факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Россия

Старухина Е. А., аспирант
Лесного факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Россия

Варгузина М.Г., аспирант
Лесного факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Россия

Волошина О.В., аспирант
Лесного факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Россия

Лима Фарджана Актер, бакалавр
Экономического факультета
ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»,
Воронеж, Россия

Yakovenko N.V., Doctor of Geographical
Sciences, Professor
Voronezh State University of Forestry
and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Rudnitskikh A.A., Postgraduate Student
Faculty of Forestry Voronezh State
University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia

Starukhina E.A., Postgraduate Student,
Faculty of Forestry, Voronezh State
University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Varguzina M.G., Postgraduate Student,
Faculty of Forestry, Voronezh State
University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Voloshina O.V., Postgraduate Student,
Faculty of Forestry, Voronezh State
University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Lima Farjana Akhter, Bachelor, Faculty of
Economics, Voronezh State University of
Forestry and Technologies named after
G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. На основе данных Sentinel-2 и наземной таксации оценена рекреационная нагрузка на леса Воронежской области. Площадь лесов в аренде для рекреации выросла за 2017–2021 гг. на 408 га (Мусиевский и др., 2024). Установлены пороговые значения NDVI для четырёх стадий дигрессии. Построена карта NDVI ключевых зон. Потери запаса на 2 стадии – 6–8 %, на 4 стадии – до 35 % (усыхание 40 % древостоя). Гибридный метод (ДЗЗ + наземные данные) рекомендован для мониторинга.

Abstract: Based on Sentinel-2 data and ground-based forest inventory, the recreational load on the forests of the Voronezh region has been assessed. The area of forests leased for recreation increased by 408 ha from 2017 to 2021 (Musievsky et al., 2024). Threshold NDVI values for four stages of digression have been established. An NDVI map of key zones has been constructed. Stock losses at stage 2 amount to 6–8%, at stage 4 – up to 35% (with 40% stand dieback). The hybrid method (remote sensing + ground data) is recommended for monitoring.

Ключевые слова: рекреационная нагрузка, NDVI, Sentinel-2, Воронежская область, дигрессия.

Keywords: recreational load, NDVI, Sentinel-2, Voronezh region, digression.

Введение. Лесной фонд Воронежской области составляет 479,2 тыс. га при лесистости 8,3 %. Благодаря реализации национального проекта «Экология» в 2024 году лесовосстановление достигло 1,48 тыс. га, что превысило площадь выбывших лесов в 2,4 раза (Итоги госпрограммы, 2025). Однако, несмотря на позитивные тенденции в воспроизводстве лесов, рекреационная нагрузка на лесные экосистемы региона неуклонно возрастает. За период 2017–2021 гг. площадь лесных участков, переданных в аренду для рекреационной деятельности, увеличилась на 408 га, достигнув 1098 га (Мусиевский и др., 2024). Только Воронежский государственный природный биосферный заповедник им. В.М. Пескова в 2024 году посетили более 92 тыс. человек (Волошина, Яковенко, 2026). Традиционные наземные методы оценки рекреационной нагрузки трудоёмки и не позволяют оперативно охватить большие территории. В этой связи всё более актуальным становится применение геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Как показано в работах (Каширина, Голубева, Новиков, 2020; Каширина, Новиков, 2016), использование GPS-треков и ГИС-технологий даёт возможность количественно оценивать рекреационные нагрузки на особо охраняемых природных территориях. Дополнительные возможности для мониторинга открывает анализ спутниковых снимков, в частности расчёт вегетационного индекса NDVI по данным Sentinel-2 (Podolskaia, 2023). Такой подход позволяет оперативно выявлять участки дигрессии и оптимизировать функциональное зонирование природно-антропогенных комплексов (Слепнев, 2017).

Цель исследования – оценка рекреационной нагрузки на лесные ресурсы Воронежской области с использованием данных Sentinel-2 и ГИС-технологий.

Объекты и методы. Исследование выполнено на 26 пробных площадях (0,25 га) в трёх зонах Воронежской области (Пригородное лесничество, лесопарки г. Воронежа, заповедник). Для каждой площади рассчитан NDVI по данным Sentinel-2: $NDVI = (B8 -$

B4)/(B8+B4). Санитарное состояние древостоя оценено индексом $I_s = (n_1 \times 1 + n_2 \times 2 + n_3 \times 3 + n_4 \times 4) / N$ (ОСТ 56-100-95). Стадии дигрессии выделены кластеризацией k-средних, пороги NDVI: $>0,70$ (стадия 0), $0,60-0,69$ (I), $0,50-0,59$ (II), $0,35-0,49$ (III), $<0,35$ (IV). Корреляция NDVI с запасом древесины ($r = 0,78$) и I_s ($r = -0,84$) значима при $p < 0,05$. Достоверность различий между данными ДЗЗ и наземной таксацией проверена t-критерием Стьюдента.

Результаты. В результате обработки спутниковых данных Sentinel-2 и наземной таксации на 26 пробных площадях были установлены количественные взаимосвязи между вегетационным индексом NDVI и основными таксационными показателями: запасом древесины ($\text{м}^3/\text{га}$) и индексом санитарного состояния I_s . Также определены статистически значимые различия NDVI для пяти выделенных стадий рекреационной дигрессии (от 0 до IV). На **рисунке 1** представлена карта NDVI для лесопарковой зоны г. Воронежа и прилегающих лесничеств, построенная по данным Sentinel-2 за вегетационный период 2011 г. (среднемноголетняя композитная мозаика).

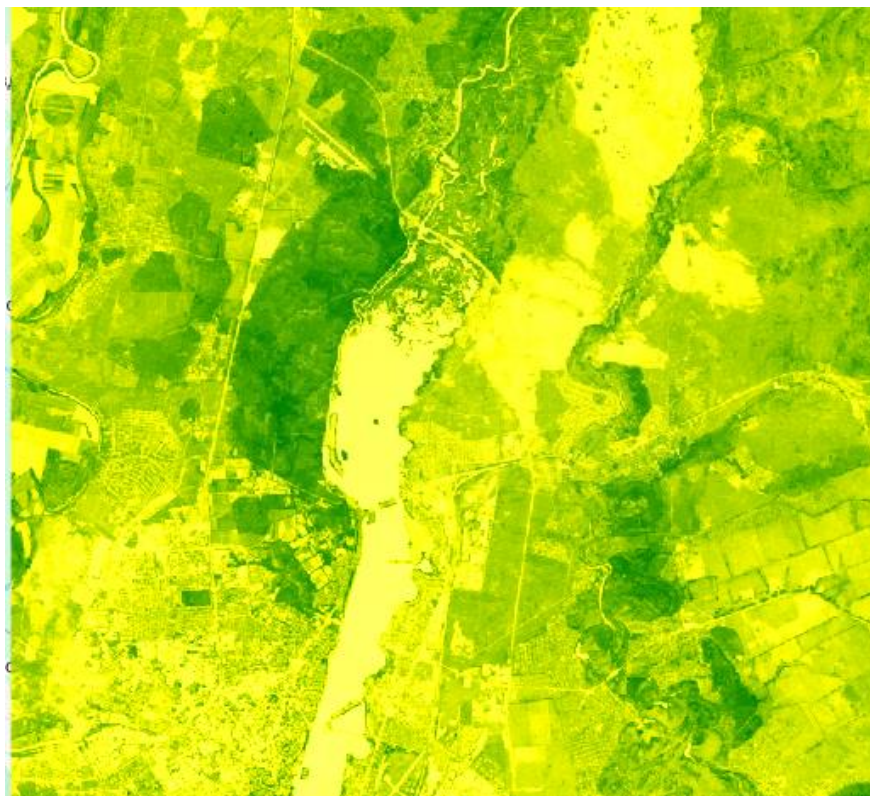


Рисунок 1 - Пространственное распределение NDVI на ключевых участках Правобережного лесничества и лесопарков г. Воронежа

В пространственном распределении вегетационного индекса NDVI отчётливо фиксируются линейные аномалии пониженных значений, приуроченные к автомобильным дорогам, а также локальные депрессии в окрестностях озёр Круглое, Шиловое и рекреационных баз. В прибрежно-пляжных зонах значения NDVI снижаются до диапазона $0,20-0,30$. Многолетний анализ спутниковых данных за период 2017–2021 гг. показал, что

площадь лесных участков, переданных в аренду для рекреационной деятельности, увеличилась на 408 га. При этом на арендованных территориях наблюдалось снижение среднего NDVI на величину от 0,09 до 0,15 в зависимости от уровня антропогенной нагрузки. На рисунке 2 представлена диаграмма рассеяния, демонстрирующая корреляционную зависимость между NDVI и запасом древесины ($\text{м}^3/\text{га}$) по выборке из 26 пробных площадей. На рисунке 2 приведена диаграмма рассеяния, иллюстрирующая связь между NDVI и запасом древесины ($\text{м}^3/\text{га}$) по всем 26 пробным площадям.

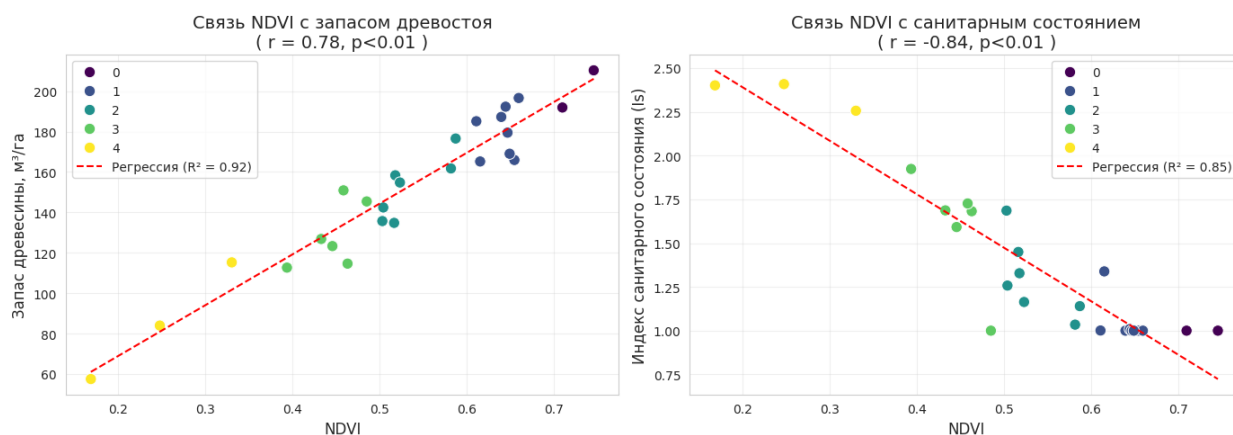


Рисунок 2 – Взаимосвязь вегетационного индекса NDVI, запаса древостоя ($\text{м}^3/\text{га}$) и санитарного состояния насаждений на пробных площадях

Коэффициент корреляции Пирсона составил $r = 0,78$ ($p < 0,01$). Это свидетельствует о высокой прямой связи между вегетационным индексом и продуктивностью насаждений: чем выше NDVI, тем больше запас древесины. Участки с NDVI ниже 0,50 (стадии II–IV) имеют запас на 20–35 % ниже среднего по региону. Методом кластеризации k-средних и на основе наземного определения стадий дигрессии установлены следующие интервалы NDVI для каждой стадии (таблица 1, рисунок 3).

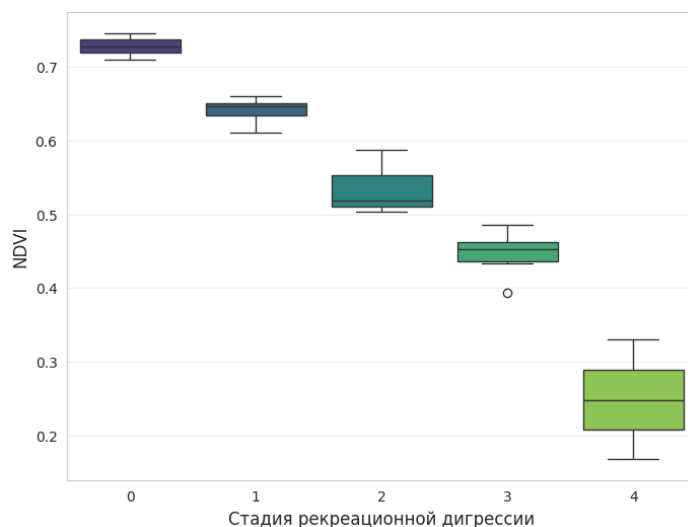


Рисунок 3 – Распределение NDVI по стадиям рекреационной дигрессии

Из рисунка 3 видно, что медианные значения NDVI последовательно снижаются от стадии 0 (0,75) до стадии IV (0,28). Разброс значений внутри стадий минимален на I и II стадиях, что говорит об однородности реакции растительности на начальное рекреационное воздействие. На стадиях III и IV разброс увеличивается, что связано с появлением локальных очагов деградации (тропы, площадки).

Таблица 1 – Стадии рекреационной дигрессии и соответствующие NDVI

Стадия	Нагрузка, чел./год	Характеристика	NDVI_max
0	< 5 000	Сомкнутый полог, нет троп	$\geq 0,70$
1	5 000 – 30 000	Начальное уплотнение, единичные тропы	0,60–0,69
2	30 000 – 55 000	Изреживание подлеска, сеть троп, снижение запаса 6–8 %	0,50–0,59
3	55 000 – 120 000	Сильное изреживание, сорные виды, фаутность	0,35–0,49
4	> 120 000	Усыхание до 40 %, оголение корней, вытопанный покров	< 0,35

Таким образом, комплексный анализ спутниковых данных и наземной таксации позволил не только количественно оценить пороговые значения NDVI для каждой стадии дигрессии, но и пространственно визуализировать очаги деградации. Предложенный гибридный метод (ДЗЗ + наземные данные) даёт оперативную информацию для принятия управленческих решений (ограничение доступа, санитарные рубки, обустройство троп).

Обсуждение и заключение

Полученные пороги NDVI хорошо согласуются с данными (Волошина, Яковенко, 2026) по заповеднику и по лесопаркам Воронежа. Установлено, что даже на 2 стадии (30–55 тыс. чел./год) снижение запаса достигает 6–8 %, а напочвенный покров сокращается на 19 %. На 4 стадии (>120 тыс. чел./год) утраты становятся катастрофическими: усыхание 40 %, потеря запаса 34 %, травяной покров сокращается в 8,5 раз.

Рекомендации:

- Внедрить ежегодный NDVI-мониторинг по Sentinel-2 для зон активной рекреации.
- При NDVI < 0,50 (3–4 стадии) – санитарные рубки и временное ограничение доступа.
- Обустраивать настилы на экотропах (Волошина, Яковенко, 2026).

Заключение

В результате проведённого исследования установлены пороговые значения вегетационного индекса NDVI, соответствующие различным стадиям рекреационной дигрессии лесных экосистем Воронежской области. На основе спутниковых данных Sentinel-2 построена карта NDVI, позволяющая визуализировать пространственное распределение очагов деградации растительности. Предложенный гибридный метод, интегрирующий данные дистанционного зондирования Земли и наземную таксацию, может быть

рекомендован для организации регулярного регионального мониторинга состояния лесов, подверженных рекреационной нагрузке.

Список литературы

1. Волошина О. В., Яковенко Н. В. Рекреационная нагрузка и стратегии ее минимизации на территории Воронежского государственного природного биосферного заповедника им. В.М. Пескова // Актуальные проблемы биоразнообразия : материалы III Всерос. науч.-практич. конф. с международным участием (Ульяновск, 24 марта 2026 г.) / редкол.: Н. А. Ленгесова [и др.]. – Чебоксары: ИД «Среда», 2026. – С. 172-177. – DOI 10.31483/r-154723.
2. Каширина, Е. С. Использование GPS-треков для оценки рекреационной нагрузки на ООПТ / Е. С. Каширина, Е. И. Голубева, А. А. Новиков // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – 2020. – Т. 2, № 5. – С. 28-32. – DOI 10.23885/2500-123X-2019-2-5-28-32. – EDN YXCULS.
3. Каширина, Е. С. Использование ГИС для расчета рекреационных нагрузок на особо охраняемых природных территориях / Е. С. Каширина, А. А. Новиков // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 174-181. – EDN XEJSGJ.
4. Мусиевский А. Л., Кулаков Е. Е., Семенов М. А. Оценка влияния рекреационной деятельности на лесопатологическое состояние и видовое разнообразие лесных фитоценозов Центральной лесостепи // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. – 2024. – № 150. – С. 109-117. – DOI 10.25684/0513-1634-2024-150-109-117.
5. Слепнев, М. А. Значение рекреационной нагрузки при функциональном зонировании природно-антропогенных территориальных комплексов / М. А. Слепнев // Экология урбанизированных территорий. – 2017. – № 4. – С. 48-53. – EDN YTMFAU.
6. Podolskaia, E. S. Remote sensing data from space for road image recognition in the forestry / E. S. Podolskaia // Forest Science Issues. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 90-104. – DOI 10.31509/2658-607x-202361-121. – EDN SGHZNT.

References

1. Voloshina, O. V., Yakovenko, N. V. "Recreational load and strategies for its minimization on the territory of the Voronezh State Nature Biosphere Reserve named after V. M. Peskov" // Actual problems of biodiversity: Proc. of the III All-Russian scientific and practical conf. with international participation (Ulyanovsk, March 24, 2026) / editorial board: N. A. Lengesova [et al.]. – Cheboksary: ID "Sreda", 2026. – Pp. 172-177. – DOI 10.31483/r-154723.
2. Kashirina, E. S. "Use of GPS tracks to assess recreational load on protected areas" / E. S. Kashirina, E. I. Golubeva, A. A. Novikov // Ecology. Economics. Informatics. Series:

Geoinformation Technologies and Space Monitoring. – 2020. – Vol. 2, No. 5. – Pp. 28-32. – DOI 10.23885/2500-123X-2019-2-5-28-32. – EDN YXCULS.

3. Kashirina, E. S. Using GIS to Calculate Recreational Loads in Specially Protected Natural Areas / E. S. Kashirina, A. A. Novikov // InterCarto. InterGIS. – 2016. – Vol. 22, No. 2. – Pp. 174-181. – EDN XEJSGJ.

4. Musievsky A. L., Kulakov E. E., Semenov M. A. Assessing the impact of recreational activities on the forest pathology state and species diversity of forest phytocenoses in the Central forest-steppe // Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden. - 2024. - No. 150. - P. 109-117. - DOI 10.25684/0513-1634-2024-150-109-117.

5. Slepnev, M. A. The importance of recreational load in the functional zoning of natural-anthropogenic territorial complexes / M. A. Slepnev // Ecology of urbanized territories. - 2017. - No. 4. - P. 48-53. - EDN YTMFAU.

6. Podolskaia, E. S. Remote sensing data from space for road image recognition in the forestry / E. S. Podolskaia // Forest Science Issues. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 90-104. – DOI 10.31509/2658-607x-202361-121. – EDN SGHZNT.