

Научная статья

УДК 630*435

doi: 10.34655/bgsha.2025.78.1.011

Использование вегетационных индексов для оценки пожаров с использованием данных со спутников SENTINEL-2 L2A

Д.Ю. Корепин^{1,2}, Н.И. Царев^{1,2}, О.Д. Рекаева², Е.Н. Наквасина¹

¹Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

² Филиал ФБУ Рослесозащита «Центр защиты леса Архангельской области», Архангельск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Юрьевич Корепин, korepin@rcfh.rosleshoz.gov.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования изменений состояния лесных насаждений после пожара с использованием вегетационных индексов. Основное внимание уделено NDVI (нормализованный разностный индекс растительности), EVI (улучшенный индекс растительности) и NBR (индекс нормализованного коэффициента выгорания), рассчитанным на основе данных космической съемки спутника Sentinel-2 L2A в Лешу-конском районе Архангельской области. Исследование состояло из нескольких этапов: сбор и обработка данных дистанционного зондирования, расчет вегетационных индексов, анализ их динамики и интерпретация результатов. Описаны методы обработки космических снимков и расчет индексов, что позволило получить точные данные о состоянии растительности до и после пожара. Анализ динамики состояния лесных насаждений после пожара выявил преимущества каждого из индексов. NDVI оказался наиболее эффективным для оценки общего состояния растительности, так как чувствителен к изменениям в плотности и здоровье зеленой массы. Индекс EVI лучше подходит для участков с высокой плотностью растительности, где NDVI может давать искаженные результаты. Индекс NBR позволил точно определить степень повреждения лесного покрова в результате пожара, что важно для оценки ущерба и планирования восстановительных мероприятий. Статистический анализ подтвердил устойчивую положительную взаимосвязь между средними значениями индексов, что позволяет их совместное использование для более точной оценки состояния лесных насаждений. Это открывает перспективы для прогнозирования восстановления экосистемы и разработки стратегий управления лесными ресурсами в условиях изменения климата. Результаты исследования важны для специалистов в сферах лесного хозяйства, экологии и дистанционного зондирования Земли. Они могут использоваться для мониторинга лесов, оценки последствий пожаров и разработки мер по восстановлению экосистем. Методика также может быть адаптирована к другим регионам с аналогичными природными условиями, что делает ее универсальным инструментом для изучения динамики лесных экосистем.

Ключевые слова: обработка и анализ данных дистанционного зондирования, дешифрирование космических снимков, программное обеспечение, вегетационные индексы, лесные пожары.

Original article

Usage of vegetation indices to assess fires using SENTINEL-2 L2A satellite data

Dmitry Yu. Korepin^{1,2}, Nikolay I. Tsarev^{1,2}, Olga D. Rekeyeva², Elena N. Nakvasina¹

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

²Branch of the Federal State Budgetary Institution "Roslesozashchita" "Center for Forest Protection of the Arkhangelsk region", Arkhangelsk, Russia

Corresponding author: Dmitry Yu. Korepin, korepin@rcfh.rosleshoz.gov.ru

Abstract. The article presents the results of a study of changes of forest vegetation conditions after fires using vegetation indices. The focus is on NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), and NBR (Normalized Burn Ratio), calculated based on satellite imagery data from Sentinel-2 L2A in the Leshukonsky district of the Arkhangelsk region. The research consisted of several stages: remote sensing data collection and its processing, calculation of vegetation indices, analysis of their dynamics, and interpretation of the results. The methods of processing satellite images and calculating indices are described, enabling to obtain accurate data on vegetation conditions before and after a fire. The analysis of the dynamics of forest vegetation conditions after the fire revealed the advantages of each index. NDVI proved to be the most effective for assessing the overall state of vegetation due to its sensitivity to changes in the density and health of green biomass. The EVI index is better suited for areas with high vegetation density, where NDVI may provide distorted results. The NBR index allowed determining precisely the degree of damage of the forest cover as a result of the fire, which is crucial for assessing losses and planning recovery measures. Statistical analysis confirmed a consistent positive correlation between the average values of the indices, enabling their combined use for a more accurate assessment of forest condition. This provides prospects for predicting ecosystem recovery and developing forest resource management strategies in the context of climate change. The study results are significant for specialists in forestry, ecology, and remote sensing. They can be used for forest monitoring, assessing the impacts of fires, and developing ecosystem restoration measures. The methodology can also be adapted to other regions with similar environmental conditions, making it a universal tool for studying the dynamics of forest ecosystems.

Keywords: processing and analysis of remote sensing data, satellite images interpretation, software, vegetation indices, forest fires.

Введение. Леса занимают около 46,4 % территории России, что делает страну мировым лидером по площади лесов. Общая площадь земель лесного фонда составляет 766,0 млн га, а ценные лесные насаждения занимают 70,2 % этой территории. Однако леса распределены по стране неравномерно. Наибольшая лесистость (более 51,1 %) наблюдается в Республике Коми и Архангельской области, чему способствуют такие факторы, как климат, географическое положение, биологическое разнообразие, типы почв и историческая защита лесов. Однако,

несмотря на это и многие другие факторы, в 2022 году в России погибло 155,8 тыс. га лесных насаждений, и вместе с тем этот показатель снижается с 2014 года. Основными причинами гибели лесов являются лесные пожары, почвенно-климатические условия, насекомые и болезни. В 2022 году из-за пожаров погибло 108,55 тыс. га лесных насаждений¹ [1].

Как отечественными, так и зарубежными учёными лесные пожары считаются глобальной проблемой, имеющей негативное влияние на окружающую среду и экосистемы. Вместе с тем происходящее

¹ Ежегодный доклад о состоянии и об охране окружающей среды российской федерации в 2022 году / Рослесхоз 2023.

изменение климата ведёт к повышению температуры и засухе, что увеличивает продолжительность сезона лесных пожаров и повышает риск их возникновения. Это приводит к учащению, расширению и усилению лесных пожаров в последние десятилетия, в том числе в труднодоступных участках, что ведёт к увеличению опасности для людей, дикой природы и окружающей среды. Для минимизации разрушения и использования сгоревших участков для экономики и общества важно иметь инструменты, позволяющие проводить эффективный поиск, раннее обнаружение, оценку площади возгорания, состояние насаждения и динамику восстановления. В последнее время все чаще используют системы и методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников [3; 4; 5].

Дистанционное зондирование земли (ДЗЗ) – это процесс сбора и анализа информации о поверхности Земли с помощью датчиков, установленных на спутниках, самолетах и других летательных аппаратах. Однако вследствие больших территории самый предпочтительный ДЗЗ – это сбор данных со спутников. Вместе с тем, материалы, получаемые со спутников в естественном цвете, могут давать недостаточно информативные данные, поэтому современные методы дистанционного зондирования Земли предусматривают использование специализированных индексов, которые являются рассчитанными показателями в результате операций с разными спектральными диапазонами, используемыми для анализа и интерпретации данных² [6-12].

На сегодняшний день в разных отраслях используется большое количество индексов, в том числе одними из самых основных, по мнению³, является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который используется для оценки состояния растительности, позволяя опреде-

лить уровень вегетации и здоровья растений; NDBI (Normalized Difference Built-up Index) – применяется для выявления городской застройки и мониторинга изменений в городских округах; MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) – позволяет выявлять водные объекты и мониторить изменения в водоемах.

Наиболее подходящими индексами для эффективного поиска, обнаружения и оценки площади возгорания и мониторинга состояния деревьев без натурального обследования являются NDVI, EVI, NBR [13].

Исходя из этого, нашей целью является изучить возможность применения последовательной совокупности индексов для определения изменения состояния насаждений после пожара по материалам космической съемки.

Объекты и методика. Для анализа пост-пирогенной обстановки был использован тестовый участок в Лешуконском лесничестве Вожгорского участкового лесничества Архангельской области (рис. 1). При выборе участка учтены следующие требования: устойчивый пожар 3-5-летней давности; качественная съемка; достаточное количество безоблачных снимков и угол падения солнечных лучей.

Снимки получены с аппарата Sentinel-2 L2A с пространственным разрешением 10 м и загружены с общедоступного портала Copernicus, программы ЕС по наблюдению за Землей (табл. 1).

Для оценки состояния лесных насаждений использовалась программа QGIS и данные спутниковой съемки Sentinel-2 L2A. Породный состав на тестовом участке определялся с помощью планов лесонасаждения и уточнялся по ДЗЗ. Участок, пострадавший от огня, представлен сосняками 1-3 группы возраста мохово-лишайникового типа леса, с одной третью площади, занятой культурами сосны 1-2 группы. Рассчитаны индексы NDVI, EVI и NBR, а также проведено сравнение состояния насаждений до и после пожара.

² The Worldwide Reference System. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/worldwide-reference-system>

³ Спектральные библиотеки - источники данных по спектрам // GISLab.ru URL: <http://gis-lab.info/qa/spectrum-lib.html>

Таблица 1 – Список снимков, покрывающих территорию тестового участка

Дата съемки	Название снимка
04.07.2022	S2A_MSIL2A_20220704T081621_N0400_R121_T38WPS_20220704T112709
21.08.2022	S2B_MSIL2A_20220821T082609_N0400_R021_T38WPS_20220821T103025
11.08.2023	S2A_MSIL2A_20230811T082611_N0509_R021_T38WPS_20230811T155100
28.06.2024	S2B_MSIL2A_20240628T081609_N0510_R121_T39WVM_20240628T095149

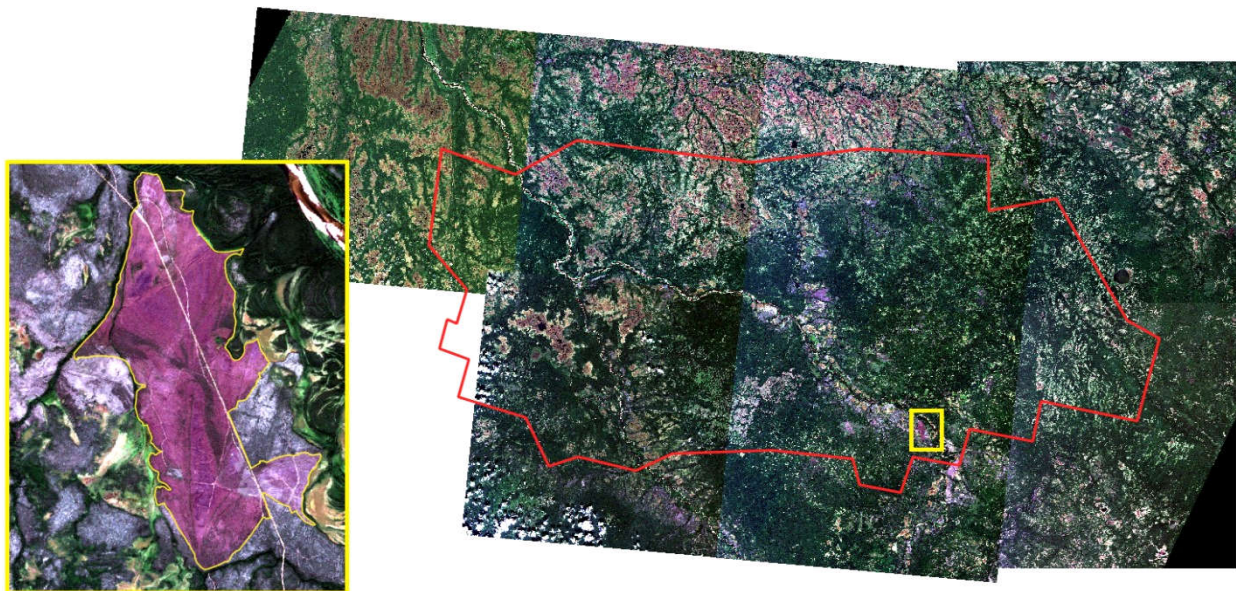


Рисунок 1. Космический снимок тестового участка

Для изучения применения совокупности индексов для определения состояния насаждений после пожара последовательно использовали NDVI, EVI, NBR.

Индекс NDVI – нормализованный разностный индекс растительности. Простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Основан на разнице между инфракрасным и видимым красным светом, отражаемым растительностью, который рассчитывается по формуле⁴ [14]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (1)$$

где: ρ_{NIR} – значения спектральной яркости пикселей в ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра, ρ_{RED} – в красных областях электромагнитного спектра.

Однако в силу высокой зависимости к количеству фотосинтезирующей био-

массы индекс может терять эффективность на снимках, где насаждения ослаблены, а также отсутствует вегетация. Чтобы добиться более объективных результатов, тестовый участок после оценки NDVI оценивался также с индексами EVI и NBR, что позволило уточнить состояние растительности.

Индекс растительности EVI (Enhanced Vegetation Index) – это спутниковый индекс, который используется для оценки состояния и здоровья растительности на Земле. EVI корректирует некоторые атмосферные условия и фоновый шум растительного покрова и более чувствителен в районах с густой растительностью [15;16].

$$EVI = 2.5 * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + (6 * \rho_{RED}) - (7.5 * \rho_{Blue}) + 1}, \quad (2)$$

где: ρ_{NIR} , ρ_{RED} и ρ_{BLUE} – это скорректированные с учетом атмосферы коэффи-

⁴ Спектральные библиотеки - источники данных по спектрам // GISLab.ru URL: <http://gis-lab.info/qa/spectrum-lib.html>

циенты отражения поверхности; L – коррективка, которая учитывает нелинейный, дифференциальный перенос NIR и красного излучения через навес; C1, C2 – коэффициенты устойчивости к аэрозолю, который использует синий спектр для коррективки аэрозольного воздействия в красном спектре. G – коэффициент усиления [17].

Для коррективки полученной информации и определения состояния пост-пирогенных насаждений применялся NBR – индекс нормализованного коэффициента выгорания. Отличительная черта индекса NBR состоит в том, что здоровая вегетация обладает высокой отражательной способностью в ближнем ИК-спектре, а участки, поврежденные пожаром, хорошо отображаются в коротковолновом ИК-спектре [10;19].

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}}, \quad (3)$$

где: ρ_{NIR} – значения спектральной яркости пикселей в ближней инфракрасной областях электромагнитного спектра, ρ_{SWIR} – коротковолновый инфракрасный диапазон электромагнитного спектра.

Для определения состояния насаждения были проведены расчеты индексов на каждом этапе, зафиксированном снимками, сравнение их по годам после прохождения пожара, а также выполнен корреляционный анализ для определения зависимости средних значений индексов друг для друга.

Результаты и обсуждения. На основании анализа материалов дистанционного зондирования Земли дано описание участка. Породный состав преимущественно представлен чистыми сосновыми насаждениями 1-3 группы класса возраста, единично представлена береза в составе, а также культуры сосны, созданные в 1991-1997 гг. Гарь имеет площадь 20,22 км². Характер пожара – низовой, высокой интенсивности, насаждения не утратили устойчивость.

На рисунке 2 представлено графическое распределение индекса NDVI. Красная зона отображения и последующее увеличение ее интенсивности указывает на значительное снижение вегетации и густоты насаждениями.

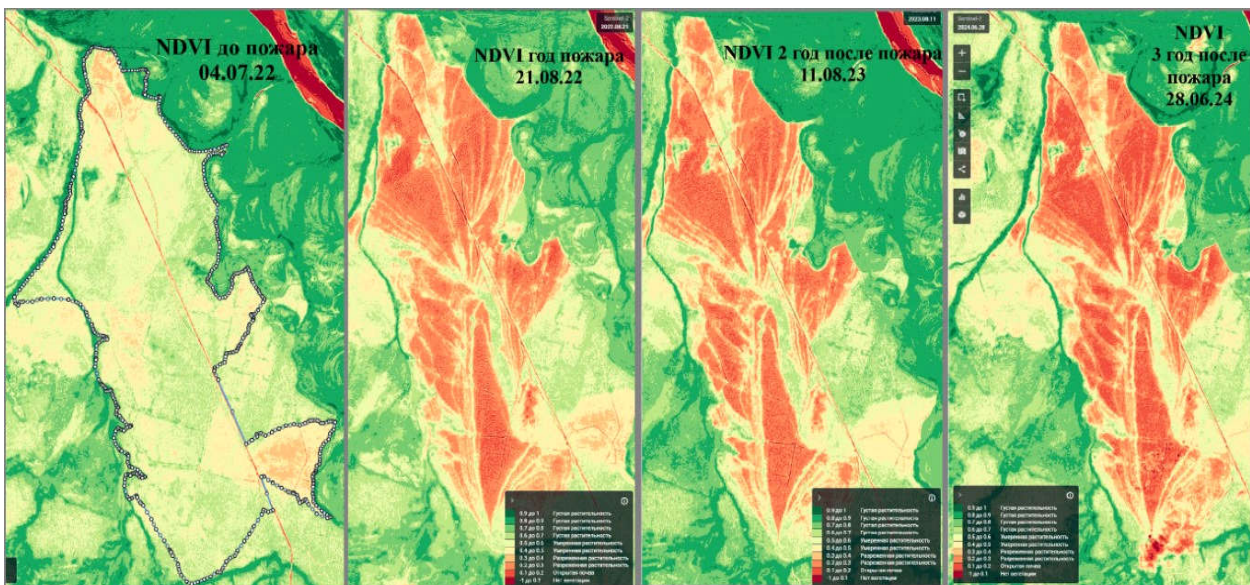


Рисунок 2. Визуализированные значения индекса NDVI

Данные, представленные на рисунке 3, подтверждают распределение средних значений индекса. Наблюдаемая асимметрия вправо отражает состояние растительности и её густоты на исследуемом лесном участке до и после пожара. Рас-

пределение значений индекса свидетельствует умеренному уровню распределения растительности по индексу NDVI до пожара, составляет 0,5 и охватывает 42% общей площади исследуемого участка. В 2024 году среднее значение индекса

NDVI изменилось до 0,2, что соответствует 19,3% от общей площади. Таким образом, это свидетельствует о том, что пожар

значительно повлиял на общее состояние насаждений на исследуемом объекте.

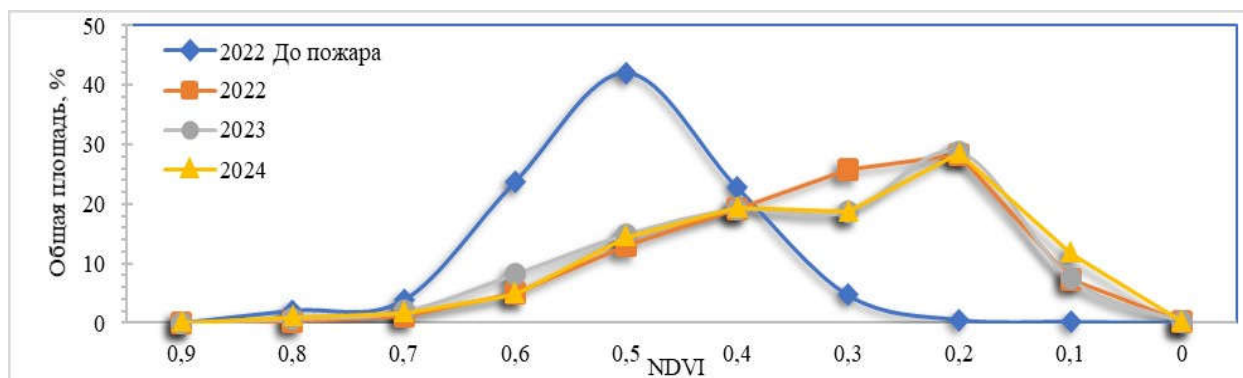


Рисунок 3. График изменения площади с разным состоянием растительности, выраженным индексами NDVI

Для дальнейшего уточнения состояния и здоровья растительных насаждений после пожара был вычислен индекс растительности (EVI). Значения данного индекса варьируются, что позволяет определить как густоту и здоровье растительности, так и её ухудшение (рис. 4). Анализ распределения средних значений индек-

са показывает, что до пожара 94% общей площади характеризовалось умеренно здоровой растительностью, тогда как после пожара этот показатель снижается до уровня от 17 до 29%. Полученные данные подтверждаются графиком на рисунке 5, что указывает на негативное воздействие пожара.

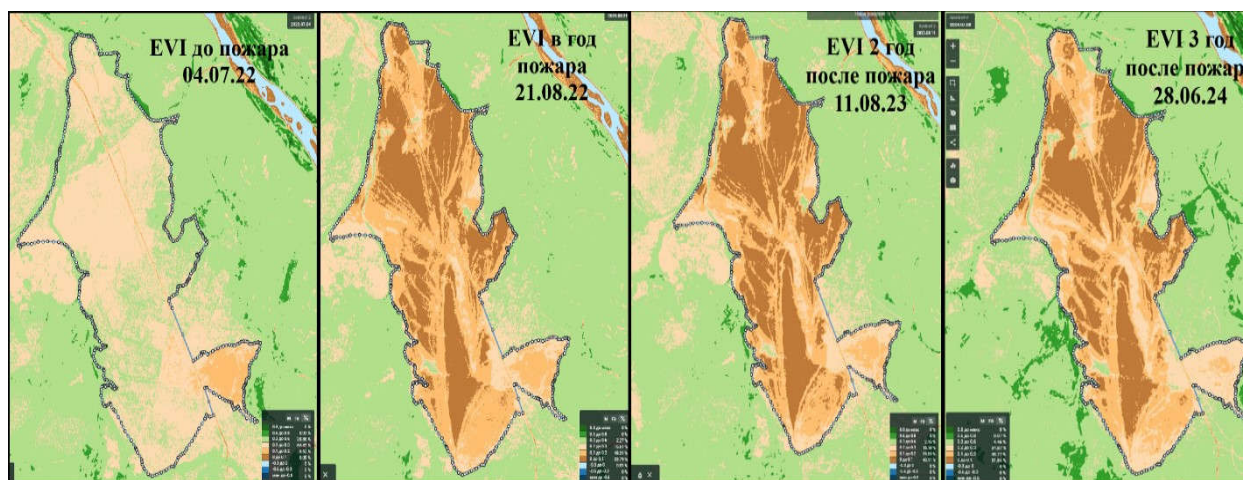


Рисунок 4. Визуализированные значения индекса EVI

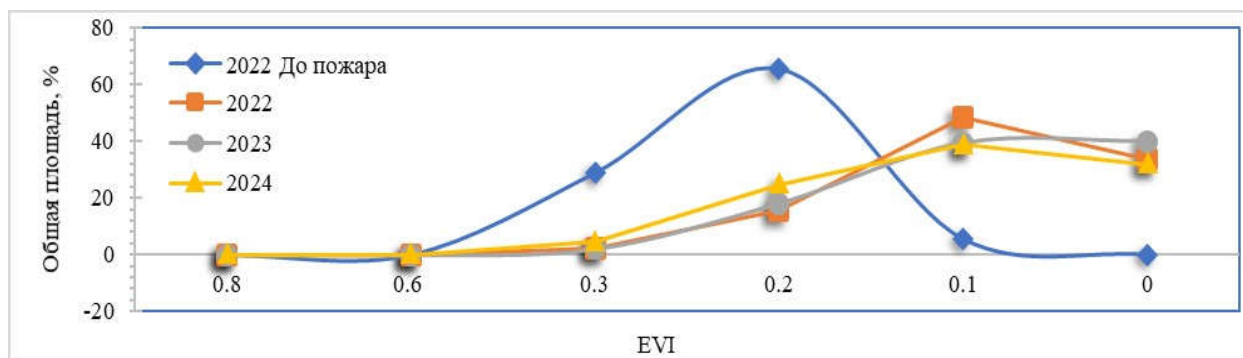


Рисунок 5. График изменения площади с разным состоянием растительности, выраженным индексами EVI

Завершающим этапом анализа состояния лесных насаждений с использованием дистанционных методов является расчет индекса степени сгорания и изменений в растительности после лесных пожаров (Normalized Burn Ratio, NBR). Градация

значений данного индекса позволяет более точно оценить текущее состояние экосистемы и определить степень повреждений, вызванных лесными пожарами (рис. 6).

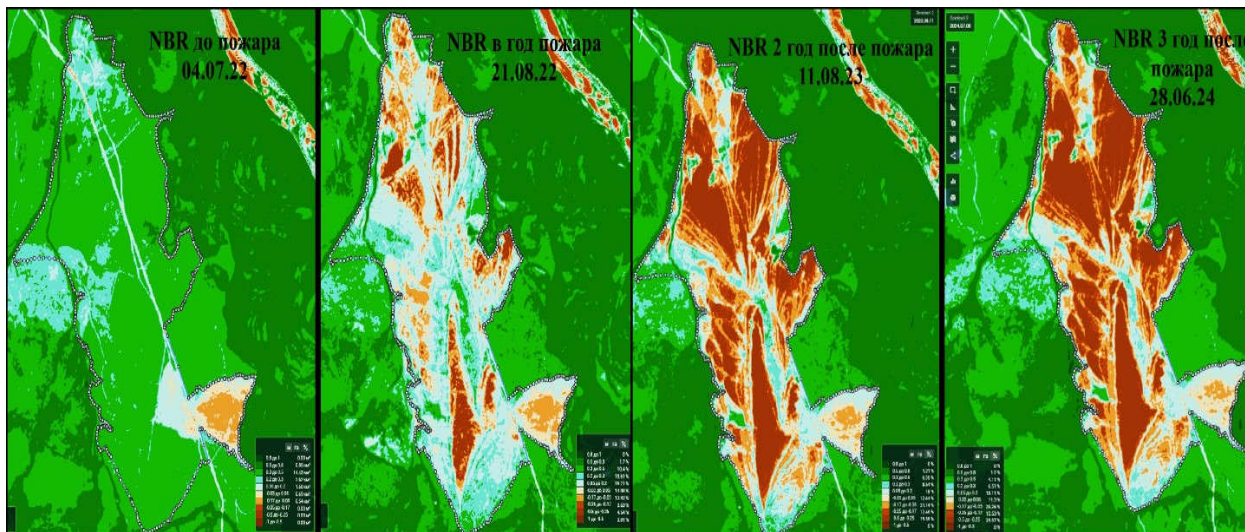


Рисунок 6. Визуализированные значения индекса NBR

До возникновения пожара состояние насаждений находится в пределах средних значений 0,4, площадь которых составляет 69,94% исследуемого участка (рис. 7). С каждым последующим годом после пожара значения индекса NBR продолжают снижаться, что указывает на более серьезные последствия, пережива-

емые лесной экосистемой. На третий год после пожара показатели индекса достигают отрицательных значений в диапазоне от $-0,25$ до $-0,5$, что свидетельствует о высокой интенсивности воздействия пожара, их усилении с возрастом, а также о наличии ослабленной или погибшей растительности.

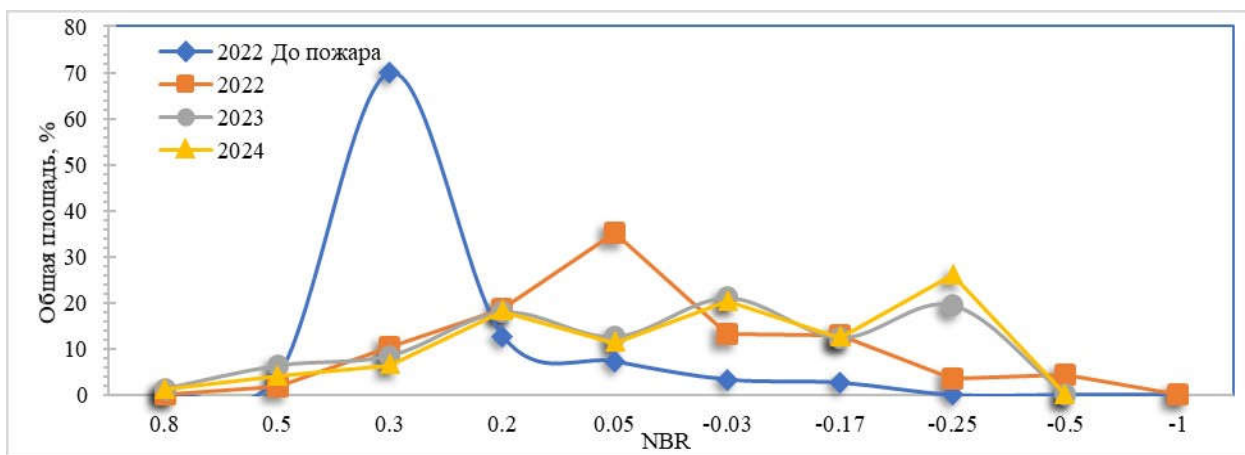


Рисунок 7. График изменения площади с разным состоянием растительности, выраженным индексами NBR

Корреляционный анализ средних значений индексов продемонстрировал умеренную положительную связь при их последовательном применении (табл. 2), что

позволяет их рассматривать в совокупности и использовать комплексно для интерпретации данных о пост-пирогенном состоянии растительности.

Таблица 2 – Корреляционный анализ средних значений индексов

Индекс	NDVI	EVI	NBR
NDVI	1		
EVI	0.484	1	
NBR	0.412	0.486	1

Применение индекса NDVI предоставило обобщенную информацию состояния и плотности насаждений в разные временные промежутки. Корректировка атмосферных условий индексом EVI, а также его лучшей справляемостью с насыщенностью в сравнении с NDVI, предоставил информацию о вегетационном состоянии. А индекс NBR скорректировал и отразил изменения в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах, предоставив окончательную картину состояния насаждений после пожара.

Приведенные результаты поддаются следующей интерпретации: при последовательном применении индексов к материалам космической съемки тестового участка позволяет более точно анализировать влияние пожаров, а также дать оценку состоянию после него. Такой подход может использоваться для оценки состояния и планирования восстановления экосистем после пожаров.

Заключение. В ходе исследования с использованием технологий дистанционного зондирования Земли проведен ана-

лиз динамики состояния лесных насаждений на ключевом участке как до возникновения пожара, так и в пост-пирогенном периоде. Полученные значения индексов позволяют охарактеризовать участок как подвергшийся значительному повреждению в результате интенсивного лесного пожара. Корреляционный анализ подтвердил наличие зависимости между средними значениями индексов состояния насаждений, что обеспечило возможность уточнения их состояния для дальнейшего прогнозирования динамики восстановления экосистемы.

С увеличением темпов технологического прогресса в области дистанционного зондирования Земли, доступность материалов космической съемки для оценки и мониторинга лесных насаждений и их повреждений существенно возросла. Метод дистанционного дешифрования предоставляет возможность оперативно проверять и анализировать полученные данные, а также выявлять закономерности, что обуславливает его значимость в исследованиях состояния экосистем.

Список источников

1. Сальмаер Т.Э., Сафронов В.В. Анализ Договора о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. №11. EDN: VSCPQH
2. Ежегодный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году // Рослесхоз, 2023.
3. Шугуров М.В. Программные основы научно-технологического сотрудничества государств ЕАЭС в сфере дистанционного зондирования Земли // Международное право. 2024. № 2. С. 66-98. EDN: DFTGCU. doi: 10.25136/2644-5514.2024.2.35260
4. Azlan Saleh, Mohd Asyraf Zulkifley, Hazimah Haspi Harun, Francis Gaudreault b, Ian Davison, Martin Spraggon. Forest fire surveillance systems: A review of deep learning methods // Heliyon. 2024, Vol. 10, Issue 1, Volume 10, Issue 1. doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e23127
5. Jaspreet Kaur Bhamra, Shreyas Anantha Ramaprasad, Siddhant Baldota, Shane Luna, Eugene Zen, Ravi Ramachandra, Harrison Kim, Chris Schmidt, Chris Arends, Jessica Block, Ismael Perez, Daniel Crawl, Ilkay Altintas, Garrison W. Cottrell, Mai H. Nguyen; Multimodal Wildland Fire Smoke Detection // *Remote Sens.* 2023, 15(11), 2790. doi: 10.3390/rs15112790
6. Remote sensing and GIS technologies in agriculture // *Geomatics Journal* No. 2 (11), 2011, 108 p.
7. Катаев М.Ю., Кислов А.В., Самохин Е.А. Оценка состояния хвойных растений методами компьютерного зрения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2020. Т. 23. № 1. С. 70–75. EDN: BBDJWA. doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-70-75.

8. Токарева и др. Оценка восстановительной динамики растительного покрова лесных гарей с использованием данных со спутников Landsat // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 7. С. 191-199. EDN: ММУНСУ doi: 10.18799/24131830/2021/7/3283.
9. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин // 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.
10. Komarov A.A. Assessment of the state of the herbage using the NDVI vegetation index // Izvestiya SPbGAU. 2018. № 2 (51). Pp. 124-129.
11. Aboveground biomass prediction by Sentinel1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel 2 data / G.V. Laurin, J. Balling, P. Corona [et al.] // Journal of Applied Remote Sensing. 2018. Vol. 12 (1). 016008. doi: 10.1117/1.JRS.12.016008
12. The Worldwide Reference System. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/worldwide-reference-system> (date of request: 5.10.2024).
13. Index DataBase. A database for remote sensing indices ://www.indexdatabase.de/ (дата обращения: 1.10.2024).
14. Saini Varinder. Monitoring Post-Mining Reclamation Success in Jharia Coalfield Using Geospatial Technology // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 2024; Vol. 52. doi: 10.1007/s12524-024-01877-3.
15. Alexandridis Thomas K. et al. Relationship between MODIS EVI and LAI across time and space // Geocarto International. 2020;35:1385-1399. doi: 10.1080/10106049.2019.1573928
16. Mazhar Usman & Jin Shuanggen & Hu Ting & Bilal Muhammad & Ali Md. Arfan & Atique Luqman. Long-Time Variation and Mechanism of Surface Energy Budget Over Diverse Geographical Regions in Pakistan // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. doi: 10.1109/JSTARS.2022.3185177
17. Xue Jinru, Su Baofeng. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications // Journal of Sensors. 2017; 1353691, 17 pages. doi: 10.1155/2017/1353691

References

1. Salmaer T.E., Safronov V.V. Analysis of the Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2015. No 11.
2. Annual report on the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. Rosleskhoz 2023 (In Russ.)
3. Shugurov M.V. Program bases of scientific and technological cooperation of the EAEU states in the field of remote sensing of the Earth. *International law*. 2024;2:66-98 (In Russ.). doi: 10.25136/2644-5514.2024.2.35260
4. Azlan Saleh, Mohd Asiraf Zulkifli, Hazima Haspi Haroon, Francis Gaudreau, Ian Davison, Martin Spraggon. Forest Fire monitoring Systems: a review of deep learning methods. *Heliyon*. 2024, Vol. 10, Issue 1, e23127. doi: 10.1016/j.heliyon. 2023.e23127
5. Jasprit Kaur Bhamra, Sriyas Ananta Ramaprasad, Siddhant Baldota, Shane Luna, Eugene Zen, Ravi Ramachandra, Harrison Kim, Chris Schmidt, Chris Arends, Jessica Block, Ismael Perez, Daniel Crowl, Ilkay Altintas, Harrison W. Cottrell, Mai H. Nguyen; Multimodal smoke detection in forest fires. *Remote the sensor*. 2023;15(11):2790. doi: 10.3390/rs15112790
6. Remote sensing and GIS technologies in agriculture. *Geomatics Journal*. 2011;2(11):108.
7. Kataev M.Yu., Kislov A.V., Samokhin E.A. Assessment of coniferous plants by computer vision methods. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*. 2020. Vol. 23. No. 1. Pp. 70-75 (In Russ.). doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-1-70-75.
8. Tokareva et al. Assessment of the regenerative dynamics of vegetation cover in forest harems using data from Landsat series satellites. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2021;Vol.332,№7:191-199 (In Russ.). doi: 10.18799/24131830/2021/7/3283.
9. Vorobyov O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Assessment of the dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Volga region based on images from the Landsat satellite. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2016;Vol.13.No.4:124-134 (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134..
10. Komarov A. A. Assessment of the state of the herbage using the vegetation index NDVI. *Izvestiya SPbGAU*. 2018;2(51):124-129 (In Russ.).
11. Laurin G.V., Balling J., Corona P. [et al.] Aboveground biomass prediction by Sentinel1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel 2 data. *Journal of Applied Remote Sensing*. 2018. V. 12 (1). 016008. doi: 10.1117/1.JRS.12.016008
12. The World Reference System. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/worldwide-reference-system> (date of request: 5.10.2024).

13. Index database. Database for remote sensing indexes ://www.indexdatabase.de / (date of access: 1.10.2024)
14. Saini Varinder. Monitoring Post-Mining Reclamation Success in Jharia Coalfield Using Geospatial Technology. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2024; Vol. 52. doi: 10.1007/s12524-024-01877-3.
15. Alexandridis Thomas K. et al. Relationship between MODIS EVI and LAI across time and space. *Geocarto International*. 2020;35:1385-1399. doi: 10.1080/10106049.2019.1573928
16. Mazhar Usman & Jin Shuanggen & Hu Ting & Bilal Muhammad & Ali Md. Arfan & Atique Luqman. Long-Time Variation and Mechanism of Surface Energy Budget Over Diverse Geographical Regions in Pakistan. / *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2022. doi: 10.1109/JSTARS.2022.3185177
17. Xue Jinru, Su Baofeng, Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*. 2017; 1353691, 17 pages. doi: 10.1155/2017/1353691

Информация об авторах

Дмитрий Юрьевич Корепин – аспирант 2 курса высшей школы естественных наук и технологий; инженер отдела ДНИГИС 2 категории, korepin@rcfh.rosleshoz.gov.ru;

Николай Иванович Царев – аспирант 2 курса высшей школы естественных наук и технологий; инженер-лесопатолог 2 категории, tsarevni@rcfh.rosleshoz.gov.ru;

Ольга Дмитриевна Рекаева – директор филиала ФБУ “Рослесозащита” “Центр защиты леса Архангельской области”, rekaevaod@rcfh.rosleshoz.gov.ru;

Елена Николаевна Наквасина – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, e.nakvasina@narfu.ru

Information about the authors

Dmitry Yu. Korepin – 2nd-year postgraduate student, Higher School of Natural Sciences and Technologies; engineer at the Department of Higher Education and Science of the 2nd category, korepin@rcfh.rosleshoz.gov.ru;

Nikolay I. Tsarev – 2nd-year postgraduate student, Higher School of Natural Sciences and Technologies; a forestry engineer of the 2nd category, tsarevni@rcfh.rosleshoz.gov.ru;

Olga D. Rekaeva – Director, Federal State Budgetary Institution Roslesozashchita Forest Protection Center of the Arkhangelsk Region, rekaevaod@rcfh.rosleshoz.gov.ru;

Elena N. Nakvasina – Doctor of Science (Agriculture), Professor, Chair of Forestry and Forest Management, e.nakvasina@narfu.ru.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 25.02.2025.

The article was submitted 24.01.2025; approved after reviewing 21.02.2025; accepted for publication 25.02.2025.