

4.1.5. МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА (СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 631.9

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_2_60

EDN: ALOBBD

Дистанционное зондирование и мониторинг динамики развития растительного покрова рекультивируемых территорий

Юрий Алексеевич Куликов^{1✉}, Елена Владимировна Куликова²

^{1, 2} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

¹ juriy.kulikov@yandex.ru[✉]

Аннотация. Представлены результаты исследования, выполненного с целью оценки применимости производных мультиспектральной космической съемки в виде разностных индексов для мониторинга динамики развития, пространственно-временной дифференциации и классификации растительного покрова рекультивируемых территорий на примере закрытого полигона твердых бытовых отходов, расположенного в Семилукском районе Воронежской области. Для мониторинга пространственно-временной динамики развития растительности в границах полигона использовался метод построения карт вегетационного индекса NDVI, получаемого в результате обработки первичных материалов космосъемки орбитального аппарата Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров на пиксель. Для расчета индекса использовались значения интенсивности красного ($\lambda = 0,665$ нм) и ближнего инфракрасного ($\lambda = 0,842$ нм) спектральных каналов. Обработка растровых изображений выполнялась в специализированном программном обеспечении «АгроСигнал» и «Quantum GIS». В результате исследования был выявлен характер взаимосвязи между типом растительности, развивающейся на рекультивируемой территории, и распределением значений индекса NDVI. Обнаружена корреляция динамики средневзвешенных значений индекса с изменением состояния поверхности полигона при выгорании травостоя после ландшафтных пожаров, сопряженных с естественным увяданием надземной травянистой фитомассы во второй половине вегетационного сезона. Практическая значимость исследования заключается в обосновании применимости разностного спектрального индекса NDVI для классификации типов растительного покрова рекультивируемых территорий, в т. ч. полигонов ТБО, с возможностью расчета площади распространения растительности разных типов в результате интервального зонирования цифровых карт NDVI, а также выявления и оценки степени воздействия ландшафтных пожаров, часто сопутствующих процессу трансформации полигонов бытовых отходов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, мультиспектральная съемка, цифровые агротехнологии, вегетационные индексы, NDVI, рекультивация территорий, растительный покров

Для цитирования: Куликов Ю.А., Куликова Е.В. Дистанционное зондирование и мониторинг динамики развития растительного покрова рекультивируемых территорий // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2026. Т. 19, № 2(89). С. 60–67. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_60–67.

4.1.5. LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS (AGRICULTURAL SCIENCES)

Original article

Remote sensing and monitoring the dynamics of vegetation cover development in reclaimed territories

Yuri A. Kulikov^{1✉}, Elena V. Kulikova²

^{1, 2} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹ juriy.kulikov@yandex.ru[✉]

Abstract. The results of a study conducted to assess the applicability of multispectral satellite imagery derivatives in the form of difference indices for monitoring the dynamics of development, spatial and temporal differentiation and classification of vegetation cover in reclaimed territories through the example of a closed solid waste landfill located in Semiluksky district of Voronezh Oblast. To monitor the spatial & temporal dynamics of vegetation development within the boundaries of the landfill, the method of constructing maps of the NDVI vegetation index was used, obtained as a result of processing primary satellite imagery data from the Sentinel-2 orbiter with 10 meters per pixel spatial resolution. The intensity values of the red ($\lambda = 0.665$ nm) and near-infrared ($\lambda = 0.842$ nm) spectral bands were used to calculate the index. Bitmap image processing was performed by AgroSignal and Quantum GIS specialized software. The study revealed the nature of the relationship between the type of vegetation developing in the reclaimed area and the distribution of NDVI index values. A correlation was found between the dynamics of the weighted average index values and changes in the condition of the landfill surface during herbage burnout after landscape fires associated with the natural wilting of aboveground herbaceous phytomass in the second half of the growing season. The practical significance of the study consists in

substantiating the applicability of the NDVI spectral difference index for classifying vegetation types in reclaimed areas, including landfills, with the possibility of calculating the area of vegetation of different types as a result of interval zoning of NDVI digital maps, as well as identifying and assessing the impact of landscape fires, which often accompany the process of transformation of domestic household waste landfills.

Key words: remote sensing, multispectral surveying, digital agricultural technologies, vegetation indices, NDVI, MSI, NDWI, land reclamation, vegetation cover

For citation: Kulikov Yu.A., Kulikova E.V. Remote sensing and monitoring the dynamics of vegetation cover development in reclaimed territories. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2026;19(2):60-67. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_60-67.

Введение

Антропогенное влияние на окружающую среду обусловлено множеством факторов, среди которых особое значение имеют процессы, связанные с вовлечением природных территорий в хозяйственную деятельность человека. Функционирование сельских и городских агломераций неизбежно сопутствует формированию большого количества бытовых и производственных отходов различного типа и состава.

Одним из традиционных и самых распространенных способов утилизации отходов является их захоронение на полигонах поверхностного или заглубленного типа. По данным В.А. Королева, в Российской Федерации ежегодно образуется более 200 млн м³ твердых бытовых отходов (ТБО), из которых 30% приходится на целлюлозно-бумажные компоненты, 30% – на органические пищевые отходы, а оставшаяся часть представлена различными материалами, в том числе пластиком, древесиной, резиной, текстилем, стеклом, керамикой [2].

Зачастую для размещения полигонов ТБО используются карьеры, оставшиеся после завершения поверхностной добычи песчаных и меловых пород. В условиях Центрального Черноземья широко распространена практика захоронения бытовых отходов в выработанных котлованах и карьерах, площадь которых достигает нескольких десятков гектаров. После завершения активного использования полигона ТБО следует его рекультивация, включающая два этапа – технический и биологический [4]. По степени формирования и пространственного распределения растительного покрова оценивают состояние полигона после его закрытия и проведения рекультивационных мероприятий.

В настоящее время известны различные способы натурной и дистанционной оценки состояния растительного покрова природных и антропогенных ландшафтов. Одним из наиболее перспективных методов является мультиспектральная съемка, позволяющая организовать представительный обзор значительной площади с периодичностью до нескольких суток. Производные мультиспектральной съемки в виде нормализованных разностных индексов дают возможность измерять относительную характеристику коррелирующих факторов земной поверхности. Среди спектральных индексов, используемых для оценки пространственно-временной динамики развития растительного покрова, наибольшее распространение получил NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс), в основе которого лежит отношение интенсивностей отражения в красной и ближней инфракрасной областях спектра [1, 3, 5].

Анализ серии карт вегетационного индекса NDVI лег в основу данного исследования, направленного на изучение применимости мультиспектральной съемки для оценки состояния растительного покрова как критерия состояния рекультивируемой территории.

Цель исследования заключалась в оценке применимости производных мультиспектральной космической съемки в виде разностных индексов для проведения мониторинга пространственно-временной дифференциации и классификации растительного покрова рекультивируемых территорий.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран закрытый по завершении эксплуатации полигон ТБО заглубленного типа, расположенный в Семилукском районе Воронежской области с координатами центра изучаемого участка 51.64884, 39.01924 в проекции WGS84.

Границы анализируемой зоны были выделены, ориентируясь на формы окружающего ландшафта. Площадь участка в рассматриваемых границах составила 57,7 га. На рисунке 1 показана форма исследуемого объекта по данным космической съемки.



Рис. 1. Размеры и форма границ объекта исследования – полигона ТБО

Источник: подготовлено авторами.

Для выполнения исследования использовались материалы космосъемки орбитального аппарата Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров на пиксель [7, 9, 10]. В качестве инструмента мониторинга и оценки пространственно-временной вариативности растительного покрова рекультивируемой территории был применен нормализованный разностный индекс NDVI. Для расчета индекса использовались значения интенсивности красного ($\lambda = 0,665$ нм) и ближнего инфракрасного ($\lambda = 0,842$ нм) каналов радиометра Sentinel-2. Расчет значений производился по общепринятой формуле: $NDVI = (NIR_{0,842} - RED_{0,665}) / (NIR_{0,842} + RED_{0,665})$ [1, 3, 8, 11].

Построение карт индекса NDVI выполнялось с помощью программных цифровых систем ГИС-класса, поддерживающих растровые вычисления – «Quantum GIS», «АгроСигнал». В результате был получен набор цифровых карт, отображающих динамику изменений интенсивности развития растительного покрова в границах полигона ТБО за период с апреля 2024 по апрель 2025 г. в пределах вегетационно активного сезона. Для пространственной классификации территории по значениям индекса применялась шкала в интервале от 0 до 1 с шагом 0,05 и соответствующей цветокодировкой каждого диапазона.

Результаты и их обсуждение

Анализ карт индекса NDVI позволил установить характер пространственного распределения наземной фитомассы травянистой и древесно-кустарниковой растительности, а также выявить сезонную динамику вегетации в условиях процессов и явлений, характерных для рекультивируемого полигона ТБО.

На рисунке 2 представлена карта распределения значений индекса на 12 апреля 2024 г. На карте отчетливо визуализируются зоны присутствия растительного покрова ($NDVI > 0,45$) и сильно изреженные пространства, в том числе с открытым грунтом ($NDVI < 0,45$). При этом в ранневесенний период, когда активная вегетация только начинается, на картах NDVI не выражена дифференциация на травянистую и древесно-кустарниковую растительность, что соотносится с результатами визуальных наблюдений на местности.



Рис. 2. Карта индекса со шкалой NDVI на 12.04.2024

Источник: подготовлено авторами.

В начале активного развития травянистой растительности и олиственения крон на деревьях и кустарниках в конце апреля стала заметна неоднородность распределения значений индекса, приуроченная к типу растительности (зоны присутствия древесно-кустарниковой поросли на юго-восточной и восточной окраинах полигона демонстрировали значения индекса $NDVI > 0,6$). В то же время для остальной части полигона, где присутствовала только травянистая растительность, были характерны значения индекса в интервале 0,4–0,6, что объясняется выраженными различиями суммарного проективного покрытия на единицу площади поверхности для древесно-кустарниковых видов и трав в ранний период вегетации.

На рисунке 3 представлена карта индекса NDVI, а на рисунке 4 – результат интервального зонирования территории полигона по диапазонам значений индекса по состоянию на 30 апреля 2024 г.

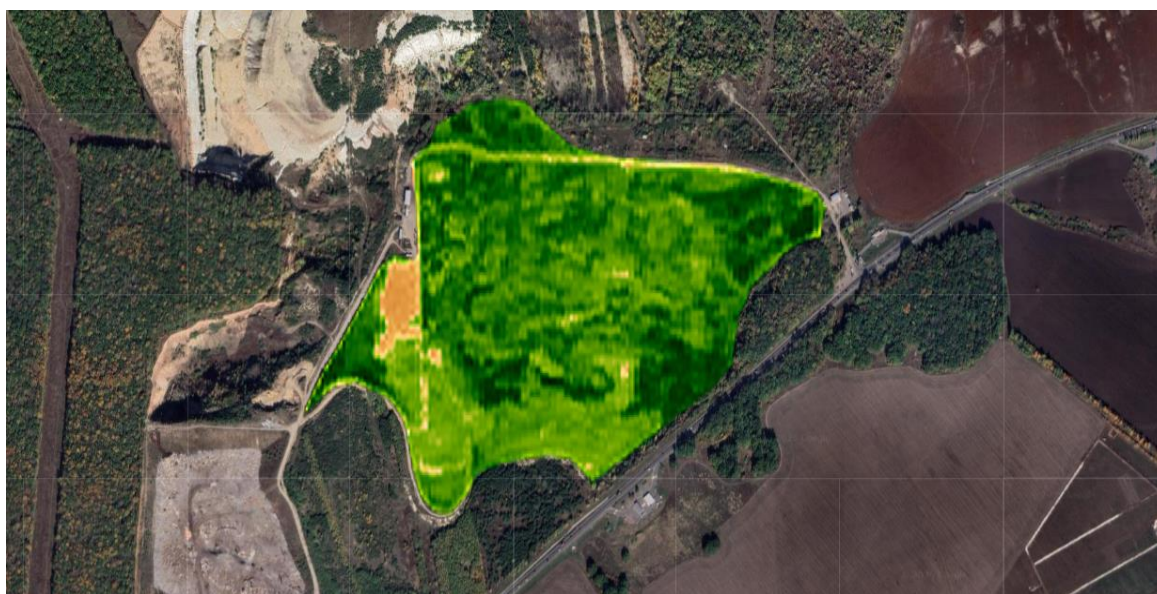


Рис. 3. Карта индекса NDVI на 30.04.2024

Источник: подготовлено авторами.

Использование принципа интервального зонирования карты NDVI позволило рассчитать площади, занимаемые каждым типом растительности. Площадь территории со значением $NDVI > 0,6$, соответствующая древесно-кустарниковой растительности, составила 8,70 га. Площадь распространения травянистого покрова высокой плотности составляла 36,41 га. Наличие трав с большей изреженностью покрытия отмечалось на площади 10,78 га.

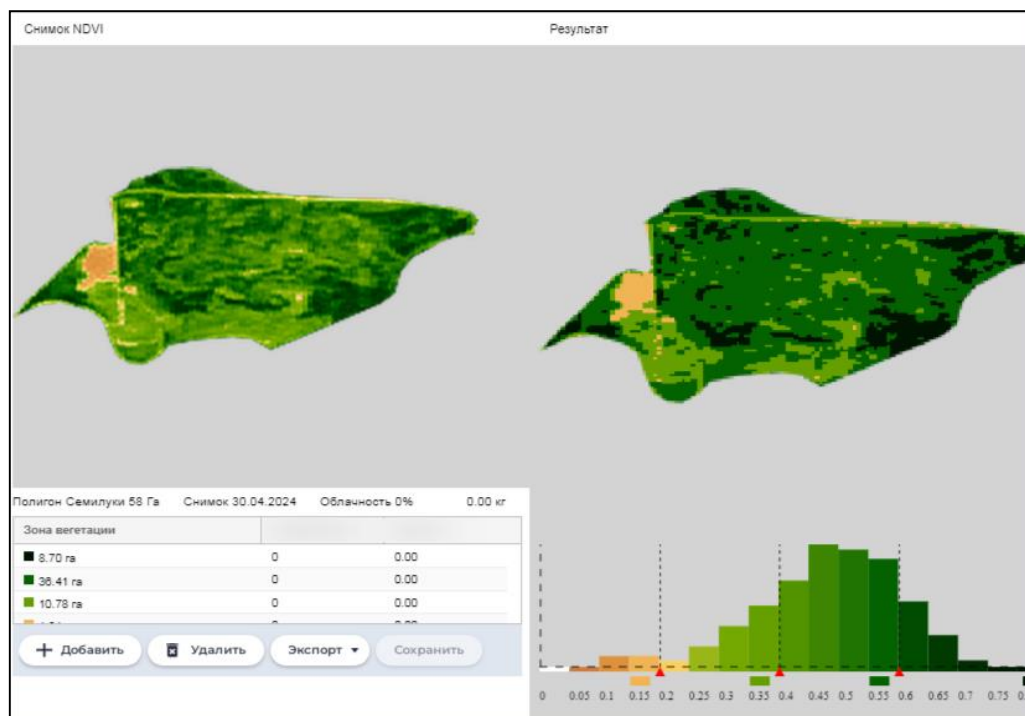


Рис. 4. Карта интервального зонирования территории полигона по индексу NDVI на 30.04.2024

Источник: подготовлено авторами.

Наибольшая пестрота растительного покрова на снимке от 30.04.2024 отмечена в центральной части рекультивируемого участка, что, по нашему мнению, связано с гетерогенной структурой «тела» полигона и сложными формами микрорельефа, обусловленными процессами вертикального перемещения, протекающими в результате неравномерной усадки.

В течение вегетационного сезона характер распределения значений индекса NDVI не менялся, но наблюдалось усиление контраста значений в зонах распространения разных типов растительности. На снимке за 29 июня 2024 г. (рис. 5), соответствующем периоду сезонного максимума развития надземной фитомассы растений в границах полигона, отчетливо прослеживаются границы дифференциации древесно-кустарниковой и травянистой растительности.

Расчет площади покрытия полигона растительностью разного типа и плотности, выполненный при интервальном зонировании снимка от 29.06.2024, позволил уточнить значения апрельских измерений. Так, площадь распространения древесно-кустарниковой растительности составила 16,57 га, травянистой растительности высокой плотности покрытия – 33,93 га, изреженного травостоя – 5,25 га.

Полученные значения автоматизированного расчета площадей на основе интервального зонирования имеют тесную взаимосвязь с ручным планиметрическим измерением визуально определяемых границ зон распространения древесно-кустарниковой растительности с коэффициентом корреляции $r > 0,97$.

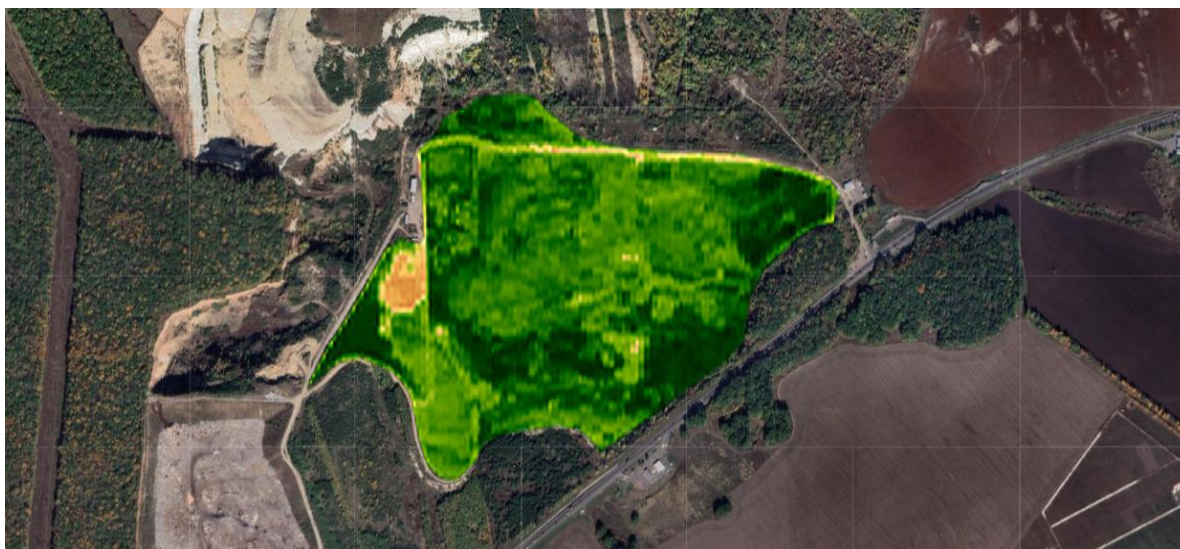


Рис. 5. Карта индекса NDVI на 29.06.2024

Источник: подготовлено авторами.

Для общей оценки временной динамики развития наземной фитомассы всех присутствующих видов было применено сопоставление средневзвешенных значений индекса NDVI для различных периодов вегетационного сезона 2024 г. В результате был построен график, характеризующий прирост и уменьшение зеленой массы растений.

Кривая, представленная на рисунке 6, иллюстрирует изменение средневзвешенных значений NDVI для всей площади рекультивируемой территории в интервале с 02.04.2024 по 24.09.2024. Выраженно отмечается момент достижения сезонного максимума (29.06) и периоды активного роста или старения вегетативных частей растений.

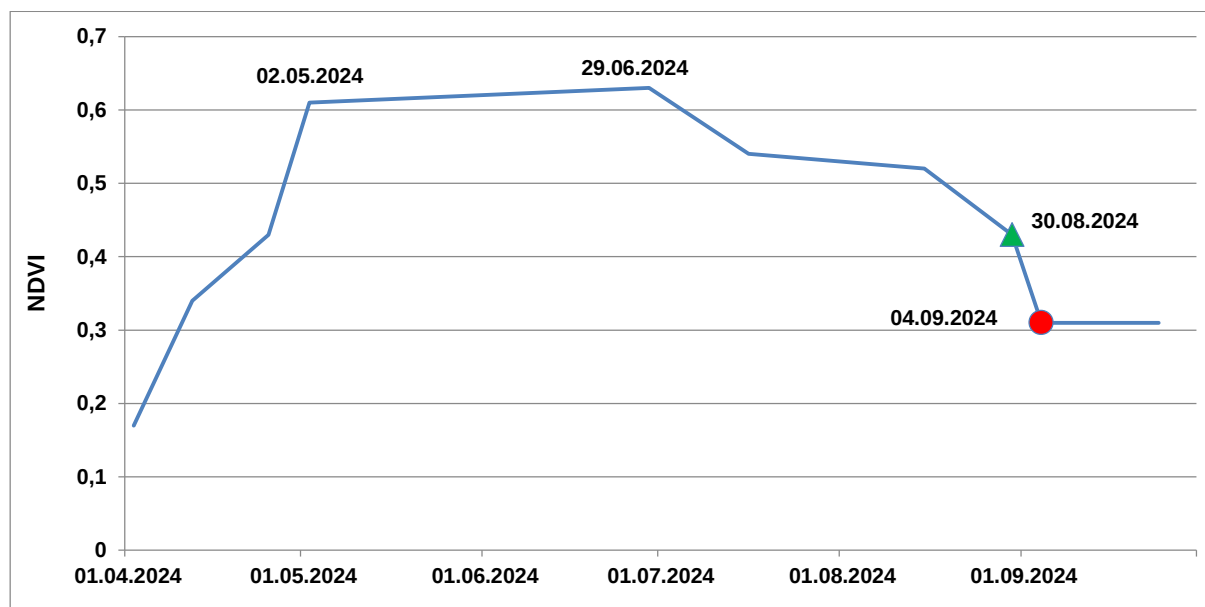


Рис. 6. Диаграмма динамики средневзвешенных значений NDVI для территории полигона ТБО

Источник: подготовлено авторами.

В период выполнения исследований на полигоне наблюдалось возгорание сухого травостоя с последующим длительным тлением верхних слоев полигона. Пожар был зафиксирован 2 сентября и после быстрого поверхностного выгорания сухой травяной массы перешел в тление, продолжавшееся в течение нескольких недель. На рисунке 6

треугольной меткой (Δ) показан момент получения последнего представительного снимка до пожара, а круглой меткой ($\circ$) – первый снимок после выгорания поверхности. При этом наблюдалось резкое снижение средневзвешенного значения NDVI на 0,12 (с 0,43 до 0,31), что обусловлено исчезновением остатков травянистой растительности в центральной части полигона после выгорания.

Анализ карт индекса NDVI за 30 августа и 4 сентября позволил рассчитать площадь выгорания растительности. Была рассмотрена зонированная карта NDVI с выделением интервалов значений, соответствующих открытой поверхности грунта ($\text{NDVI} < 0,25$). В результате была определена площадь выгорания травостоя, составившая 31,55 га.

Выводы

В результате проведенного исследования удалось показать возможный механизм применения материалов спутниковой мультиспектральной съемки для решения нескольких задач, связанных с мониторингом состояния рекультивируемых территорий и в частности полигонов ТБО.

Индекс NDVI, имеющий известную корреляцию с количеством наземной зеленой растительности, позволяет оценить пространственную и временную динамику развития растительного покрова, представленного древесно-кустарниковыми и травянистыми видами растений, рассчитать площадь, занятую растительностью каждого типа, а также выявить периоды иссушения фитомассы, связанные с физиологическими циклами развития растений [2, 4, 5, 6].

В период проведения исследования был зафиксирован ландшафтный пожар, в результате которого произошло выгорание травяного покрова на значительной площади рекультивируемой территории. Спутниковый мультиспектральный мониторинг позволил не только выявить сам факт выгорания, но и оценить площадь распространения поверхностного горения.

Совокупность полученных сведений позволяет предположить возможность масштабного использования метода мультиспектральной спутниковой съемки с расчетом вегетационного индекса NDVI для оперативного и регулярного мониторинга рекультивируемых территорий в части оценки состояния развития растительного покрова, измерения его горизонтальной неоднородности и высокоточного расчета площадей распространения различных растительных ассоциаций и группировок, а также для выработки рациональных мелиоративных приемов, обеспечивающих ускорение процесса рекультивации.

Список источников

1. Клещенко А.Д., Кровотынцев В.А., Вирченко О.В. и др. Оценка состояния сельскохозяйственных земель в субъектах Российской Федерации по спутниковым и наземным данным // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред: материалы Всероссийской научной конференции по проблемам радиофизики и дистанционного зондирования сред, проводимой в рамках IV Всероссийских Армавских чтений (Муром, 27–29 мая 2014 г.). Муром: Муромский институт (филиал) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2014. С. 135–137.
2. Королев В.А. Полигоны ТБО: есть ли альтернатива? // Инженерная геология. 2010. № 1. С. 46–56.
3. Куликов Ю.А., Высоцкая Е.А. Анализ региональных особенностей сезонной динамики продуктивности хозяйственно ценных биоценозов Воронежской области // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2024. Т. 20, № 1. С. 130–135.
4. Куприенко П.С., Ашихмина Т.В., Овчинникова Т.В. и др. Рекультивация закрытых полигонов ТБО // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2017. Т. 1, № 8. С. 445–447.
5. Остапенко С.П., Месяц С.П. Исследование динамики восстановления природных экосистем, нарушенных при освоении георесурсов, по данным спутниковых наблюдений // Горная промышленность. 2024. № 6. С. 52–58. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-52-58.
6. Родионова Н.В., Вахнина И.Л., Желибо Т.В. Оценка динамики послепожарного состояния растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край) по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2 // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 14–25. DOI: 10.31857/S0205961420030045.

7. Рязанов С.С., Кулагина В.И. Обзор российских и иностранных источников мультиспектральных снимков для создания систем агроэкологического мониторинга // Российский журнал прикладной экологии. 2024. № 2(38). С. 4–18. DOI: 10.24852/2411-7374.2024.2.04.18.
8. Amani M., Mahdavi S., Ghorbanian A. et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. Vol. 13. Pp. 5326–5350. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.
9. Polat A.B., Akcay O., Balik Sanli F. Monitoring seasonal effects in vegetation areas with Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 optic satellite // Arabian Journal of Geosciences. 2022. Vol. 15(7). Article No. 670. DOI: 10.1007/s12517-022-09947-x.
10. Sentinel-2 User Handbook: European Space Agency Standard Document. Paris: ESA, 2015. Issue 5, Revision 2. 64 p.
11. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L. et al. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations. Switzerland: Springer International Publishing AG (Springer Nature), 2015. 110 p.

References

1. Kleshchenko A.D., Volyntsev V.A., Virchenko O.V. et al. Assessment of the state of agricultural lands in the subjects of the Russian Federation based on satellite and ground data. In: Radiophysical Methods in Remote Sensing of Media: Proceedings of the All-Russian Research Conference on Problems of Radiophysics and Remote Sensing of Media, held within the framework of the IV All-Russian Armand Readings (Murom, May 27-29, 2014). Murom: Murom Institute (branch) of Vladimir State University Publishers; 2014:135-13. (In Russ.).
2. Korolev V.A. Solid Waste Landfills: is there an alternative? *Engineering Geology World*. 2010;1:46-56. (In Russ.).
3. Kulikov Yu.A., Vysotskaya E.A. Analysis of regional features of seasonal dynamics of productivity of economically valuable biocenoses of the Voronezh region. *The North Caucasus Ecological Herald*. 2024;20(1):130-135. (In Russ.).
4. Kuprienko P.S., Ashikhmina T.V., Ovchinnikova T.V. et al. Reclamation of closed Solid Waste Landfills. *Fire Safety*. 2017;1(8):445-447. (In Russ.).
5. Ostapenko S.P., Mesyats S.P. Studying the restoration dynamics of natural ecosystems disturbed by the development of geo-resources based on satellite observations. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):52-58. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-52-58. (In Russ.).
6. Rodionova N.V., Vakhnina I.L., Zhelibo T.V. Assessment of the dynamics of the postfire state of vegetation in territory of the Ivan-Arakhley Nature Park (Zabaikalsky Krai) using radar and optical Sentinel 1/2 data. *Earth Research from Space*. 2020;3:14-25. DOI: 10.31857/S0205961420030045. (In Russ.).
7. Ryazanov S.S., Kulagina V.I. A Review of Russian and foreign sources of multispectral imagery for agroecological monitoring systems development. *Russian Journal of Applied Ecology*. 2024;2(38):4-18. DOI: 10.24852/2411-7374.2024.2.04.18. (In Russ.).
8. Amani M., Mahdavi S., Ghorbanian A. et al. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020;13:5326-5350. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052.
9. Polat A.B., Akcay O., Balik Sanli F. Monitoring seasonal effects in vegetation areas with Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 optic satellite. *Arabian Journal of Geosciences*. 2022;15(7):670. DOI: 10.1007/s12517-022-09947-x.
10. Sentinel-2 User Handbook: European Space Agency Standard Document. Paris: ESA; 2015. Issue 5, Revision 2. 64 p.
11. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L. et al. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: current status, future trends, and practical considerations. Switzerland: Springer International Publishing AG (Springer Nature); 2015. 110 p.

Информация об авторах

Ю.А. Куликов – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры земледелия и защиты растений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», juriy.kulikov@yandex.ru.

Е.В. Куликова – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», melior-agronomy@inbox.ru.

Information about the authors

Yu.A. Kulikov, Candidate of Agricultural Science, Senior Lecturer, the Dept. of Soil Management and Plant Protection, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, juriy.kulikov@yandex.ru.

E.V. Kulikova, Candidate of Biological Science, Docent, Head of the Dept. of Geodesy, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, melior-agronomy@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 23.02.2026; одобрена после рецензирования 27.03.2026; принята к публикации 29.03.2026.

The article was submitted 23.02.2026; approved after reviewing 27.03.2026; accepted for publication 29.03.2026.

© Куликов Ю.А., Куликова Е.В., 2026