

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

Научная статья

УДК 631.9

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_1_76

EDN: QENAHY

Цифровая мультиспектральная съемка для оценки гидрологических условий пойменных кормовых угодий Центрального Черноземья

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. Водный режим пойменных сельскохозяйственных угодий во многом определяется гидрологическими циклами прилегающего водоема. Высокая влагообеспеченность пойменных почв в весенний период сочетается с локальным переувлажнением, вызванным застоем открытой воды в аккумулятивных формах микрорельефа. Традиционные методы мониторинга пространственного распределения влаги в границах сельскохозяйственных угодий являются достаточно трудоемкими и имеют ряд ограничений по возможностям представительного охвата территории. В ходе исследования был проведен сравнительный анализ применимости нескольких спектральных индексов в параллельной комбинации для мониторинга гидрологических условий пойменного луга в лесостепи ЦЧР. Использовали индексы NDVI, NDWI и MSI, получаемые в результате обработки мультиспектральных снимков космического аппарата Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м/п. Результаты исследования показывают преимущества использования комбинации спектральных индексов в сравнении с отдельным применением для мониторинга гидрологического режима пойменных кормовых угодий. Использование связанных характеристик «фитомасса – увлажнение – тургор», коррелирующих соответственно с NDVI, NDWI и MSI, позволяет выявлять состояние растительности в каждой точке исследуемой территории в пределах возможностей пространственного разрешения съемки. Короткие интервалы съемки дают возможность проводить регулярный циклический мониторинг состояния пойменных угодий для оперативной адаптации сроков проведения технологических операций и разработки гидромелиоративных приемов для регулирования водного режима территории. Использование специализированного программного обеспечения отечественной разработки позволяет организовать производственное применение рассматриваемого подхода для рутинного мониторинга сельскохозяйственных угодий специалистами агропредприятий и профильных ведомств, заинтересованных в широкоохватном представительном наблюдении за изменениями гидрологических условий земель сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: гидрология суши, гидромелиорация, мультиспектральная съемка, цифровые агротехнологии, вегетационные индексы (NDVI, MSI, NDWI), кормовые угодья

Для цитирования: Куликов Ю.А., Куликова Е.В. Цифровая мультиспектральная съемка для оценки гидрологических условий пойменных кормовых угодий Центрального Черноземья // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2026. Т. 19, № 1(88). С. 76–83. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_1_76–83.

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

Original article

Digital multispectral survey for assessing hydrological conditions of floodplain forage lands of the Central Chernozem Region

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 water regime of floodplain agricultural lands is largely determined by the hydrological cycles of the adjacent water body. High moisture availability of floodplain soils in the spring is combined with local water damping caused by stagnation of open water in accumulative forms of microrelief. Traditional methods of spatial moisture distribution monitoring within the boundaries of agricultural lands are quite time-taking and have a number of limitations concerning the possibilities of representative coverage of the territory. In the course of the study, a comparative analysis of the applicability of several spectral indices in parallel combination for monitoring the hydrological conditions of a floodplain meadow in the forest steppe of the Central Chernozem Region was carried out. The NDVI, NDWI and MSI indices were used, obtained as a result of processing multispectral images

of the Sentinel-2 spacecraft with a spatial resolution of 10 m/p. The results of the study show the advantages of using a combination of spectral indices in comparison with their separate use for monitoring the hydrological regime of floodplain forage lands. The use of the related characteristics phytomass – moisture – turgor, correlating to NDVI, NDWI and MSI, respectively, enables identification of vegetation status at each point of the studied territory within the limits of the spatial resolution of the survey. Short survey intervals make it possible to carry out regular cyclic monitoring of the condition of floodplain lands for operational adaptation of the timing of technological operations and the development of hydro amelioration techniques for regulating the water regime of the territory. The use of specialized software developed in Russia allows organizing application of the considered approach for routine monitoring of agricultural lands by specialists from agricultural enterprises and profile authorities interested in comprehensive representative monitoring of changes in the hydrological conditions of agricultural lands.

Key words: land hydrology, hydro amelioration, multispectral surveying, digital agricultural technologies, vegetation indices (NDVI, MSI, NDWI), forage lands

For citation: Kulikov Yu.A., Kulikova E.V. Digital multispectral survey for assessing hydrological conditions of floodplain forage lands of the Central Chernozem Region. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2026;19(1):76-83. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_6_1_76-83.

Введение

Гидрологические условия сельскохозяйственных угодий, сформированных в поймах малых рек Центрального Черноземья, являются важным фактором, определяющим возможность и параметры хозяйственного использования высокопродуктивных лугов. Динамика сезонных уровней речных вод определяет изменение влагообеспеченности почвенного профиля прирусловых территорий. Для речной сети региона характерен восточноевропейский тип стока с высоким весенним половодьем, летней меженью, прерываемой эпизодическими ливнями, низкой зимней меженью и повышенным осенним стоком [1, 11]. Своевременное выявление моментов изменения фаз речного стока, а также их возможное прогнозирование определяют сроки проведения агротехнических мероприятий на пойменных участках, которые целесообразно использовать в качестве сенокосных угодий и пастбищ [8, 9].

Мониторинг водного режима речных пойм традиционно выполнялся с использованием таких методов прямых измерений, как динамическое наблюдение периодов половодья и межени, бурение с послойным отбором образцов почвы для определения водно-физических свойств с последующей пространственной интерпретацией результатов измерений. Очевидная трудоемкость натурных исследований и прямых измерений ограничивает возможную периодичность циклов мониторинга и не позволяет обеспечить обширный пространственный охват. С развитием технологий космической и автоматизированной аэрофотосъемки появилась возможность получения обзорных материалов дистанционного зондирования в широком диапазоне пространственного разрешения [2, 3, 5, 6].

В настоящее время в научно-исследовательской работе и сельскохозяйственном производстве применяется ряд производных мультиспектральной съемки в виде разностных спектральных индексов, характеризующих различные свойства объектов земной поверхности. Наиболее распространенным является индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), широко задействованный для оценки пространственно-временной динамики развития наземной растительности [10, 12, 14, 15, 16]. Использование различных спектральных каналов дает возможность расчета множества спектральных индексов, коррелирующих в том числе с гидрологическими характеристиками.

Обработка материалов мультиспектральной съемки осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения, поддерживающего работу с растровыми цифровыми данными [2, 4, 13]. Для оценки поверхностного распределения влаги на земной поверхности используется широкий набор разностных индексов, среди которых наибольшее распространение применительно к задачам сельскохозяйственного производства получили NDWI (Normalized Differential Water Index) и MSI (Moisture Stress Index).

Индекс NDWI рассчитывается как отношение разности к сумме интенсивностей зеленого ($\lambda = 560$ нм) и ближнего инфракрасного ($\lambda = 842$ нм) спектральных каналов.

Для расчета индекса MSI используется отношение интенсивности коротковолнового инфракрасного ($\lambda = 1610$ нм) к ближнему инфракрасному ($\lambda = 842$ нм) каналу.

Физический принцип спектральных индексов основан на избирательности поглощения и отражения объектов земной поверхности в различных диапазонах электромагнитных волн. Индекс MSI имеет высокую корреляцию к изменению содержания влаги в тканях растений за счет увеличения поглощения на участке $\lambda = 1599$ нм, что дает возможность дифференциации зон развития растительного покрова в разных условиях влагообеспеченности при опосредованном анализе состояния тургора, определяемого по величине индекса MSI [12]. Метод построения серии цифровых карт поверхности пойменных кормовых угодий на основе комплекса спектральных индексов позволяет проводить широкоохватный короткопериодический мониторинг компонентов агроэкосистем для диагностики состояния их водного режима и выработки способов оптимизации планирования агротехнологических операций, зависящих от состояния увлажнения поверхности.

Цель исследования заключалась в выполнении сравнительного анализа информативности и применимости материалов мультиспектральной спутниковой космосъемки в виде цифровых карт индексов NDVI, NDWI, MSI, а также снимков в естественных цветах (RGB) для мониторинга пространственного распределения поверхностных вод на территории пойменных кормовых угодий в период весеннего половодья.

Объекты и методы исследований

Исследование проводилось на территории сенокосно-пастбищного участка, расположенного в пойме реки Елань Терновского района Воронежской области с координатами 51.68677, 41.33026 (WGS 84). На северо-восточной окраине участок прилегает к руслу реки Елань, а западный и южный края охватываются старичным сезонно пересыхающим руслом, питаемым водосбором локальной овражно-балочной сети.

В ходе комплексного многолетнего исследования, затрагивающего изучение сезонной динамики продуктивности пойменных лугов, изменения гидрологических характеристик почвенного покрова речной поймы и их взаимосвязь с планированием и выполнением технологических операций сенокоса и кормозаготовки, производились обработка и анализ материалов цифровой мультиспектральной космосъемки. В качестве источника использовались снимки космического аппарата Sentinel-2, с пространственным разрешением съемочной аппаратуры в мультиспектральном режиме 10 метров на пиксель. Техническая периодичность съемки составляла от 2 до 3 суток и определялась параметрами солнечно-синхронной орбиты.

Для анализа спектральных характеристик изучаемой территории были отобраны сцены с нулевым покрытием облачности на дату съемки. Использовались тайлы следующих спектральных каналов: зеленый ($\lambda = 560$ нм), красный ($\lambda = 665$ нм), ближний инфракрасный ($\lambda = 842$ нм), коротковолновый инфракрасный ($\lambda = 1610$ нм).

Оценка пространственного распределения живой надземной фитомассы производилась на основе карт индекса NDVI. Расчет индекса выполнялся по общепринятой формуле:

$$NDVI = (B_{8,842} - B_{4,665}) / (B_{8,842} + B_{4,665}), \quad (1)$$

где $B_{8,842}$ и $B_{4,665}$ – номера спектральных каналов с соответствующей длиной волны.

Распределение поверхностной влаги оценивалось с использованием индекса NDWI по расчетной формуле

$$NDWI = (B_{30.560} - B_{80.842}) / (B_{30.560} + B_{80.842}), \quad (2)$$

где $B_{30.560}$ и $B_{80.842}$ – номера спектральных каналов с соответствующей длиной волны.

Для оценки содержания влаги в тканях растений и косвенного определения состояния тургора применялся индекс MSI, рассчитываемый по формуле

$$MSI = B_{110.1610} / B_{80.842}, \quad (3)$$

где $B_{110.1610}$ и $B_{80.842}$ – номера спектральных каналов с соответствующей длиной волны.

Обработка геопространственных данных и материалов мультиспектральной космосьемки выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения Quantum GIS и АгроСигнал [3, 4, 6, 7]. В результате обработки первичных мультиспектральных данных были построены параллельные ряды цифровых карт разностных индексов с градиентной цветокодировкой интервалов значений для представительного отображения состояния исследуемой территории. В полученных параллелях из карт NDVI, NDWI, MSI и RGB на одну дату съемки выполнялось сопоставление визуализирующих элементов поверхности.

Результаты и их обсуждение

В период с 2021 по 2025 г. было обработано 185 мультиспектральных сцен, удовлетворяющих критериям исследования – безоблачные снимки в период вегетационного сезона от момента схода снежного покрова до окончания осенней вегетации. Наибольший интерес представляли материалы космосьемки, охватывающие весенний период от начала половодья до установления летней межени, поскольку затопление и последующее высыхание поверхности пойменного луга имеют прямую взаимосвязь с динамикой влагообеспеченности верхних корнеобитаемых почвенных горизонтов, горизонтальным распределением влаги по формам микрорельефа и, соответственно, формированием оптимальных гидрологических условий для развития луговой растительности.

Серия карт индексов NDVI, NDWI, MSI и снимков RGB в весенний период каждого года исследования демонстрировала выраженную взаимосвязь с визуально наблюдаемым состоянием поверхности в части образования открытого водного зеркала в аккумулятивных формах микрорельефа после снеготаяния и разлива реки.

Индекс NDVI, традиционно используемый для оценки степени развития растительного покрова, показывал повышенные значения ($> 0,25$) на участках, свободных от открытой воды, и принимал значения от 0,05 до 0,20 в местах локального переувлажнения и затопления. Однако установленная эмпирическим путем взаимосвязь низких значений индекса с явлениями локального переувлажнения не позволяет однозначно напрямую интерпретировать показания NDVI в части вероятного присутствия избыточной влаги, поскольку такой же диапазон значений характерен и для других объектов земной поверхности, например открытой почвы с высокой отражательной способностью.

На рисунке 1 показан пример карты индекса NDVI с выраженным очагом низких значений, соответствующих в данном случае угнетению вегетации на фоне влияния локального переувлажнения.

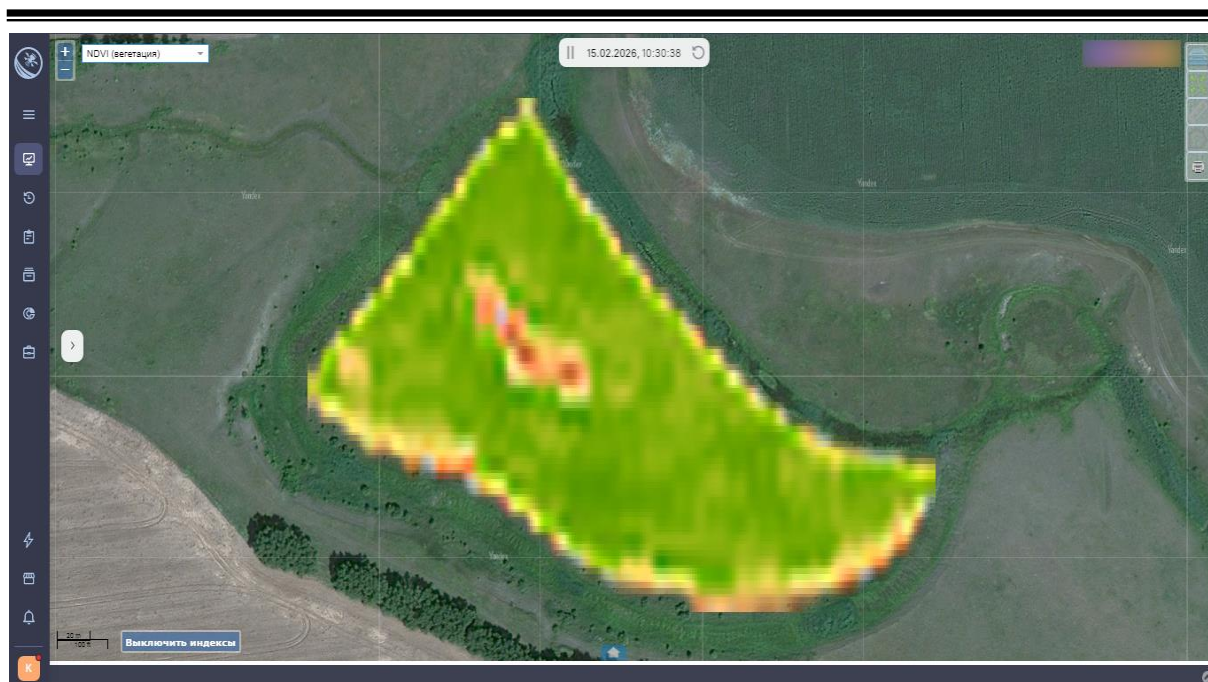


Рис. 1. Карта индекса NDVI по материалам съемки за 14.03.2023

Источник: подготовлено авторами.

Карты индекса NDWI позволили более точно определить причины снижения NDVI на фоне высокой корреляции с уровнем поверхностной влаги, что обусловлено физическим принципом работы индекса. В условиях, когда значения индекса NDVI не позволяют с высокой степенью вероятности определить причины угнетения вегетации, использование NDWI дает возможность прямой дифференциации исследуемой территории по признаку различий в степени увлажнения различных участков поверхности. На рисунке 2 представлена карта индекса NDWI из параллельной серии с показанным выше снимком NDVI.

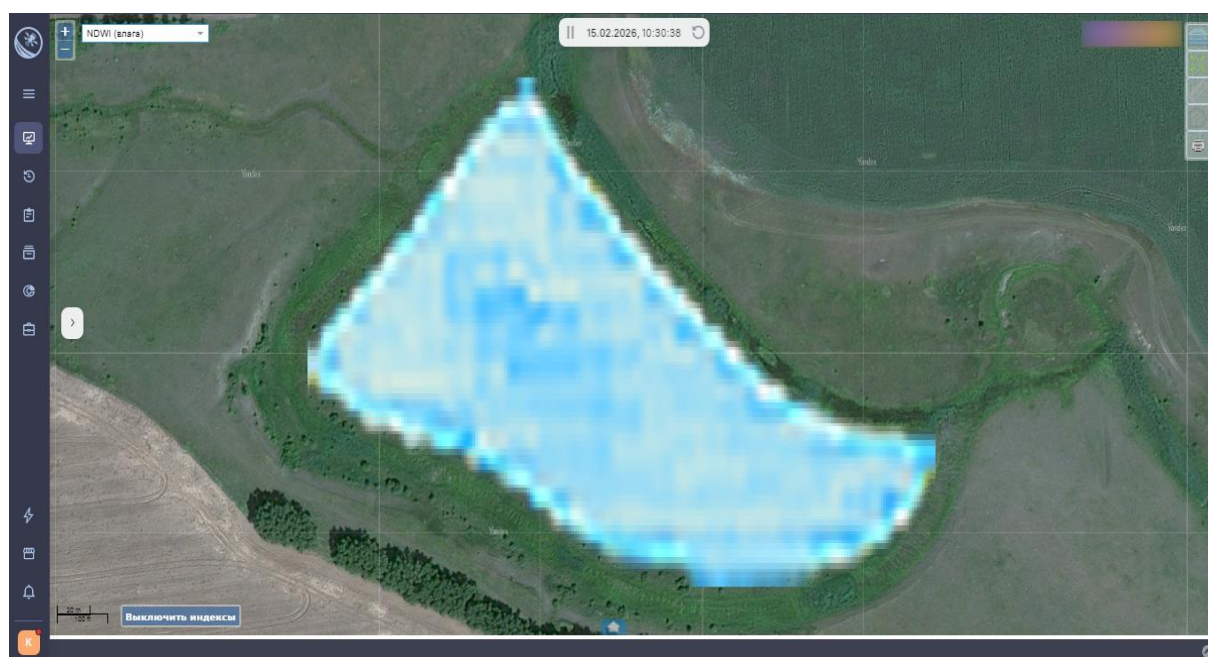


Рис. 2. Карта индекса NDWI по материалам съемки за 14.03.2023

Источник: подготовлено авторами.

Как видно при парном сравнении, индекс NDWI демонстрирует увеличение значений в зонах переувлажнения – центральная часть пойменного луга и подтопляемый прирусловой периметр. При этом на карте NDWI несколько затруднена дифференциация зон с открытым водным зеркалом и поверхностным переувлажнением. Если нормализованный вегетационный индекс позволяет выявить четкие границы угнетения вегетации, но не объясняет причин данного явления, то нормализованный водный индекс однозначно коррелирует с уровнем увлажнения территории.

В комплексном анализе гидрологического состояния территорий, подвергающихся периодическому переувлажнению или иссушению, может быть целесообразно применение физиологически чувствительных спектральных индексов, к которым относится MSI. Разница в поглотительной и отражательной способности ткани живых растений с нормальным и сниженным тургором на коротковолновом участке спектра дает возможность дифференциальной детекции состояний, вызванных дефицитом влаги или угнетением физиологических процессов. На рисунке 3 представлена карта индекса MSI из параллельной серии с рассматриваемыми примерами карт NDVI и NDWI.



Рис. 3. Карта индекса MSI по материалам съемки за 14.03.2023

Источник: подготовлено авторами.

В ходе исследования гидрологических циклов «половодье – межень» выполнены параллельные сопоставления карты индекса MSI с картами NDVI и NDWI, позволившие выявить следующие закономерности:

- обратно пропорциональную зависимость между высокими значениями индекса MSI (состояние низкого тургора) и низкими значениями индекса NDWI (недостаточное увлажнение) в случае снижения тургора растений вследствие дефицита влаги;
- взаимосвязь между индексом MSI и индексом NDVI на ограниченном участке их значений (от 0,62 до 0,80 для NDVI и от 0,55 до 0,81 для MSI) с коэффициентом корреляции, равным $-0,55$;
- в весенний период при переувлажнении после завершения снеготаяния значения индекса MSI увеличиваются (низкое состояние тургора растений) и соответствуют низким значениям индекса NDVI, сложившимся вследствие слабого развития наземной фитомассы в начальные периоды вегетации растений.

Выводы

Результаты исследования показывают, что дистанционная цифровая мультиспектральная съемка с расчетом параллельных рядов индексов NDVI, NDWI и MSI характеризуется высокой информативностью за счет наличия возможности анализа большего массива данных мониторинга гидрологических условий высокопродуктивных пойменных кормовых угодий.

Применение отдельных спектральных индексов при анализе водного режима является менее эффективным, поскольку физическая природа каждого разностного или относительного индекса ограничивает возможность трактовки причин пространственной неоднородности коррелирующего признака.

Совместное использование индексов, учитывающих связанные характеристики «фитомасса – увлажнение – тургор», позволяет анализировать причинно-следственные связи и корреляции, что особенно важно для эффективного планирования технологических операций и гидромелиоративных мероприятий, направленных на регулирование водного режима сельскохозяйственных угодий в условиях сохраняющегося тренда климатических изменений.

Список источников

1. Иванов А.Н., Неговская Т.А. Гидрология и регулирование стока: учебное пособие. Москва: Колос, 1970. 288 с.
2. Гусев А.П. Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7(17), № 2. С. 202–209.
3. Гуцаки М.А., Данилюк И.В. Изучение возможности использования различных типов данных дистанционного зондирования Земли для вычисления вегетационного индекса NDVI // Земля Беларуси. 2020. № 4. С. 20–25.
4. Заров Е.А. Основы работы в программе Quantum-GIS: учебно-методическое пособие. Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2018. 34 с.
5. Кирсанов А.Д., Комаров А.А. Использование индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 2. С. 143–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155.
6. Куликов Ю.А., Куликова Е.В. Мультиспектральная съемка как инструмент дистанционного мониторинга состояния растительности природных территорий и агроландшафтов // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы национальной научно-практической конференции (Воронеж, 01 апреля – 31 мая 2024 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2024. Ч. 3. С. 152–157.
7. Лапенко Н.Г., Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г. Продуктивность природных кормовых угодий и данные дистанционного зондирования Земли // Степи Северной Евразии: материалы VIII международного симпозиума (Оренбург, 10–13 сентября 2018 г.) Оренбург: Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, 2018. С. 552–555.
8. Трофимова Л.С., Косолапов В.М., Трофимов И.А. и др. Луговые экосистемы в биосфере, агроландшафтах и сельском хозяйстве России и мира // Фундаментальные исследования. 2014. № 3-3. С. 528–532.
9. Ненароков М.И. Сенокосы и пастбища Воронежской области. Воронеж: Книжное издательство, 1959. 144 с.
10. 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.
11. Хруцкий С.В., Семенов О.П., Косцова Э.В. Формы первичной гидрографической сети, их генезис и проблемы типизации // Геоморфология и палеогеография. 1998. № 4. С. 85–91.
12. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.
13. 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.
14. Sentinel-2 User Handbook: European Space Agency Standard Document. Paris: ESA, 2015. Issue 5, Revision 2. 64 p.

15. Toigildin A., Kulikov Yu., Toigildina I. et al. Geographic information systems in forecasting the winter wheat yield // XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021": Precision agriculture and agricultural machinery industry (Rostov-on-Don, February 24–26, 2021). Switzerland: Springer Verlag, 2022. Vol. 246. Pp. 322–329. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_36.

16. Valero S., Arnaud L., Planells M. et al. Synergy of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for early seasonal agricultural crop mapping // Remote Sensing. 2021. Vol. 13(23). Article No. 4891. DOI: 10.3390/rs13234891.

References

1. Ivanov A.N., Negovskaya T.A. Hydrology and flow regulation: study guide. Moscow: Kolos Publishers; 1970. 287 p. (In Russ.).

2. Gusev A.P. Long-term changes in vegetation indices as an indicator of the dynamics of the state of natural and anthropogenic geosystems. *Geopolitics and Ecogeodynamics of regions*. 2021;7(2):202-209.

3. Gutsaki A.N., Danilyuk I.V. Studying the possibility of using various types of Earth remote sensing data to calculate the NDVI. *Land of Belarus*. 2020;4:20-25.

4. Zarov E.A. Fundamentals of work in the Quantum-GIS program: educational and methodical manual. Khanty-Mansiysk: Yugorsky State University Publishers; 2018. 34 p.

5. Kirsanov A.D., Komarov A.A. Using the NDVI index to assess the development of perennial grasses under conditions of spatial and temporal heterogeneity. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2024;21(2):143–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155.

6. Kulikov Yu.A., Kulikova E.V. Multispectral photography as a tool for remote monitoring of vegetation conditions in natural areas and agricultural landscapes. In: Theory and practice of innovative technologies in agriculture: Proceedings of the National Research-to-Practice Conference (Voronezh, April 01 – May 31, 2024). Voronezh: Voronezh State Agrarian University Publishers. 2024;3:152-157.

7. Lapenko N.G., Eroshenko N.G., Storchak I.G. Efficiency of natural greenlands and data of remote sensing of Earth. Steppes of Northern Eurasia: Proceedings of the VIII International Symposium (Orenburg, September 10-13, 2018). Orenburg: Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2018:552-555.

8. Trofimova L.S., Kosolapov V.M., Trofimov I.A. et al. Grassland ecosystems in the biosphere, agrolandscapes and agriculture of Russia and the world. *Fundamental Research*. 2014;3-3:528-532.

9. Nenarokov M.I. Hayfields and pastures in Voronezh Oblast. Voronezh: Publishing House, 1959. 144 p.

10. Ryazanov S.S. A review of Russian and foreign sources of multispectral imagery for agroecological monitoring systems development // Russian Journal of Applied Ecology. 2024. № 2(38). Pp. 4-18. DOI: 10.24852/2411-7374.2024.2.04.18.

11. Khroutsky S.V., Semenov O.P., Kostsova E.V. Initial hydrographic system forms, their origin and problems of classification. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. 1998;4:85-91.

12. Cherepanov A.S. Vegetation indexes // Geomatics. 2011;2:98-102.

13. 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.

14. Sentinel-2 User Handbook: European Space Agency Standard Document. Paris: ESA, 2015. Issue 5, Revision 2. 64 p.

15. Toigildin A., Kulikov Yu., Toigildina I. et al. Geographic information systems in forecasting the winter wheat yield. In: XIV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2021": Precision agriculture and agricultural machinery industry (Rostov-on-Don, February 24–26, 2021). Switzerland: Springer Verlag, 2022;246:322-329. DOI: 10.1007/978-3-030-81619-3_36.

16. Valero S., Arnaud L., Planells M. et al. Synergy of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for early seasonal agricultural crop mapping. *Remote Sensing*. 2021;13(23):4891. DOI: 10.3390/rs13234891.

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