Оценка эффективности алгоритмов постобработки данных беспилотных авиационных средств для повышения точности вегетационных RGB-индексов

М. В. Тихонова, Я. С. Жигалева, Н. А. Александров, А. В. Бузылёв, А. М. Ярославцев

Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, 127434, Россия
E-mail: tmv@rgau-msha.ru

Внедрение беспилотных авиационных средств (БАС) в агроэкологический мониторинг ограничено погрешностями, возникающими при фотограмметрической обработке данных. В работе проведена оценка эффективности специализированного алгоритма постобработки, направленного на устранение артефактов сшивки ортомозаик, полученных со стандартной RGB-камеры (*англ.* Red, Green, Blue). Исследование выполнено на примере постагрогенной агроэкосистемы в Пензенской области. Проведён сравнительный анализ пяти вегетационных индексов: NGRDI (*англ.* Normalized Green Red Difference Index), VARI (*англ.* Visible Atmospherically Resistant Index), ExG (*англ.* Excess Green Vegetation Index), TGI (*англ.* Triangular Greenness Index), VEG (*англ.* Vegetativen Index), рассчитанных по данным БАС до и после коррекции. В качестве эталонного показателя использовался нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), полученный по мультиспектральным данным дистанционного зондирования спутника Sentinel-2 (L2A). Для оценки точности применялся регрессионный анализ с расчётом коэффициента детерминации (R^2). Установлено, что применение алгоритма коррекции обеспечивает систематическое и статистически значимое улучшение сопоставимости RGB-индексов со спутниковыми данными. Для точечной выборки по всей территории исследования коэффициент детерминации R^2 увеличился в среднем на 35 %. Наилучшие результаты показали индексы NGRDI (R^2 вырос с 0,372 до 0,506) и VARI (R^2 вырос с 0,361 до 0,494).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, БАС, вегетационные индексы, NDVI, обработка изображений, TGI, VARI, ExG, NGRDI, VEG, агроэкология

Одобрена к печати: 09.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-29-37

Введение

Ключевым элементом агроэкологической оптимизации современных технологий выращивания сельскохозяйственных культур являются полевые методы мониторинга, в которые всё более активно внедряются цифровые технологии оперативной обработки данных о состоянии посевов, получаемых с использованием беспилотных авиационных систем (БАС) (Пивченко и др., 2019). Изображения дистанционного зондирования, полученные с применением БАС, по сравнению со спутниковыми данными дистанционного зондирования имеют более высокое пространственное и временное разрешение, что позволяет проводить мониторинг с недостижимой ранее детализацией (Sankaran et al., 2015). На основании этих данных можно планировать объём сельскохозяйственных работ, контролировать их выполнение, прогнозировать сроки биологического созревания культур, оптимизировать внесение удобрений (Liu et al., 2016).

Точность прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур зависит от объёма и качества мониторинга за различными параметрами роста и развития растений (Wang et al., 2016). Одним из важнейших агроэкологических параметров является надземная биомасса, связанная с потреблением солнечной энергии и урожайностью (Campos-Taberner et al., 2016). Традиционные физические методы её измерения оказывают деструктивное воздействие на агроэкосистемы и являются трудоёмкими, в то время как технологии дистанционного зондирования позволяют существенно снизить трудозатраты (Li et al., 2017).

Методы дистанционного зондирования основаны на измерении спектральных характеристик исследуемых объектов. Наибольшее распространение получили вегетационные индексы (ВИ), представляющие собой математические комбинации отражения в различных каналах спектра. «Золотым стандартом» считается нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), основанный на контрасте между поглощением в красной области спектра (0,6–0,7 мкм) хлорофиллом и отражением в ближней инфракрасной области NIR (*англ.* near infrared) (0,7–1,0 мкм) клеточной структурой листа (Rouse et al., 1974). Однако массовое использование мультиспектральных камер на БАС ограничено их высокой стоимостью.

Альтернативой являются ВИ, рассчитываемые по данным стандартных RGB-камер (*англ.* Red, Green, Blue — красный, зелёный, синий). К таким индексам относятся нормализованный зелёно-красный разностный индекс NGRDI (*англ.* Normalized Green Red Difference Index), являющийся прямой адаптацией концепции NDVI для видимого диапазона (Tucker, 1979); индекс устойчивости к видимой атмосфере VARI (*англ.* Visible Atmospherically Resistant Index), использующий синий канал для снижения атмосферных влияний (Gitelson et al., 1996); индекс избытка зелёной растительности ExG (*англ.* Excess Green Vegetation Index), эффективно выделяющий зелёную растительность для задач сегментации (Meyer, Neto, 2008); индекс чувствительности к хлорофиллу TGI (*англ.* Triangular Greenness Index), чувствительный к содержанию хлорофилла в листьях, а как следствие, к фенологическим фазам и плотности биомассы (Hunt et al., 2011); и VEG (*англ.* Vegetativen Index), хорошо разделяющий растительность и почву (Hague, Tillett, 2001).

Несмотря на доступность, данные с БАС имеют существенный недостаток: процесс создания единой ортомозаики из множества отдельных снимков часто приводит к появлению артефактов — геометрических искажений, размытия, швов и цветового дисбаланса. Эти дефекты вносят значительные погрешности в значения индексов, снижая их надёжность при использовании данных с целью построения картограмм дифференцированного внесения удобрений, химических средств защиты растений и т. д., что снижает эффективность перечисленных операций и приводит к дополнительным убыткам сельхозтоваропроизводителей.

Цель данной работы — количественно оценить эффективность специализированного алгоритма постобработки ортомозаик, направленного на устранение артефактов сшивки, для повышения точности вегетационных RGB-индексов, рассчитанных по данным БАС.

Объект исследования

Исследования проводились на территории постагрогенной экосистемы «Белозёрка» (Пензенская область, Россия), представляющей собой 25-летний залежный участок, возвращаемый в интенсивное землепользование. Территория расположена в нижней трети водораздельного холма с пологим склоном (2–3°) юго-западной экспозиции. У подножия холма на расстоянии от 100 м ниже по склону находится запруженное русло старицы ручья Лисьего, притока реки Белозёрки. Территория глубоко задернована, на 63 % была покрыта 25-летним березняком, окончательно вырубленным в 2023 г. (*рис. 1*) (Tikhonova et al., 2025).

Рис. 1. Исследуемый участок полевой агроэкосистемы «Белозёрка» (QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information Systems), плагин Quick map services, Yandex Satellite)

Почвенный покров представлен черноземами, выщелоченными мощными гумусными тяжелосуглинистыми на лёссовидных глинах. На момент съёмки на участке возделывалась озимая пшеница на поздних этапах фазы кущения — в начале выхода в трубку. Несмотря на небольшие пространственные различия в фенологическом развитии культур, это оказывало существенное влияние на значения ВИ.

Методика сбора и обработки данных

Ортомозаика территории с разрешением 3 см/пиксель была получена с помощью квадрокоптера DJI Phantom 4 RTK с RGB-камерой DJI FC6310R. Полётное задание осуществлялось согласно созданной сетке с фронтальным и латеральным перекрытием 70 %, на высоте 50 м со средней скоростью полёта 5,5 м/с. Фотограмметрическая обработка проводилась в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional с использованием стандартного алгоритма: фильтрация фотографий по качеству (>0,6), выравнивание снимков, создание плотного облака точек, цифровой модели рельефа и построение итоговой ортомозаики. Однако полученный результат содержал видимые артефакты сшивки, такие как разрывы, швы, размытие и цветовой дисбаланс. Для устранения дефектов в стандартный алгоритм было добавлено несколько дополнительных шагов: гомогенизация цветового пространства «сырых» снимков и радиометрическая коррекция изображений для устранения влияния засветов и затенений, создание по новому плотному облаку точек тайловых пирамид для устранения швов и итоговой гомогенизации цветового пространства изображения.

В качестве эталона использовался мультиспектральный снимок Sentinel-2 (уровень обработки L2A, атмосферно скорректированные данные), полученный за близкую к съёмке с БАС дату с помощью модуля SCP (*англ.* Semi-Automatic Classification Plugin) для QGIS версия 3.44.

По обоим ортофотопланам с БАС были рассчитаны растровые слои пяти вегетационных индексов: NGRDI, VARI, ExG, TGI, VEG (*таблица*). В качестве референсного индекса использовался NDVI, рассчитанный по каналам B4 (665 нм) и B8 (842 нм) снимка Sentinel-2. Все расчёты выполнялись с помощью инструмента «Калькулятор растров» в QGIS.

Применяемые вегетационные индексы

Вегетационный индекс	Уравнение расчёта	Ключевая ссылка
NGRDI	(Green – Red)/(Green + Red)	Tucker, 1979
VARI	(Green – Red)/(Green + Red – Blue)	Gitelson et al., 1996
ExG	2(Green – Red – Blue)	Meyer, Neto, 2008
TGI	–0,5(190(Red – Green) – 120(Red – Blue))	Hunt et al., 2011
VEG	$Green/(Red^{0,667}Blue^{0,333})$	Hague, Tillett, 2001

Статистический анализ

Для сопоставления данных БАС и спутникового снимка была создана сетка из 150 точек (*рис. 2*, см. с. 32), покрывающая всю территорию исследуемого поля. После чего для каждой точки были извлечены значения всех перечисленных индексов из соответствующих растровых слоёв с помощью плагина Point Sampling Tool, реализованного также в QGIS (*рис. 3*, см. с. 32).

Анализ проводился на данных, агрегированных до разрешения 10 м. С помощью инструмента «Зональная статистика» в QGIS для каждой ячейки сетки 10×10 м были рассчитаны средние значения всех индексов с БАС и соответствующее значение пикселя NDVI.

Для оценки эффективности алгоритма коррекции использовался регрессионный анализ: для каждого RGB-индекса строились две линейные модели вида NDVI — значение ВИ, где

в качестве предиктора (значение ВИ) выступали значения индекса из исходного, дефектного (для упрощения назовём bad) и скорректированного (назовём corrected) наборов данных. Основным критерием сравнения моделей служил коэффициент детерминации (R^2), показывающий долю дисперсии зависимой переменной (NDVI), объясняемую моделью.

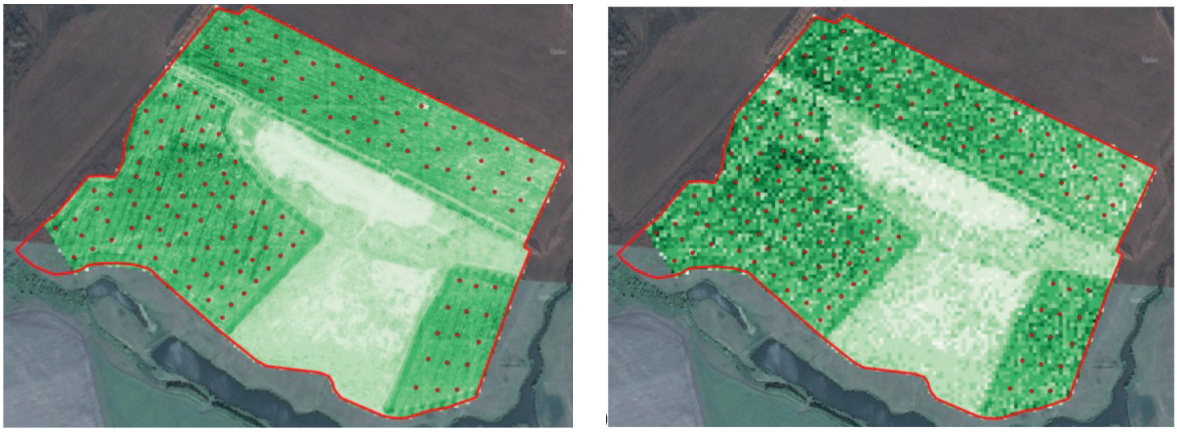
Рис. 2. Исследуемый участок полевой агроэкосистемы «Белозёрка» с расположением точек внутри ортомозаики с дефектами после сшивания снимков

Рис. 3. Исследуемый участок полевой агроэкосистемы «Белозёрка» с расположением точек внутри ортомозаики после применения дополнительного алгоритма коррекции сшивания снимков

Анализ проводился в среде статистического программирования R (версия 4.5.0) с использованием пакетов *dplyr* для обработки данных и *ggplot2* для визуализации.

Результаты и обсуждение

Несмотря на общий визуальный положительный эффект, прямое сопоставление данных с сантиметровым разрешением (БАС) и усреднённых данных с 10-метровым разрешением (Sentinel-2) методологически некорректно. Артефакты сшивки, такие как размытие, швы и засветы, по своей сути являются локальным усреднением, что может парадоксальным образом улучшить их случайную корреляцию с сильно усреднённым сигналом спутника. Алгоритм коррекции, напротив, восстанавливает детальные, «честные» значения, которые при точечном сравнении в сантиметровом разрешении могут сильнее отличаться от усреднённого спутникового пикселя, что видно при сравнении индекса TGI в сантиметровом разрешении (*рис. 4а*) и при агрегировании на 10-метровое разрешение (см. *рис. 4б*).



а *б*

Рис. 4. Исследуемый участок полевой агроэкосистемы «Белозёрка» (вегетационный индекс TGI после применения алгоритма корректировки при сшивании): *а* — исходное разрешение 3 см/пиксель с БАС; *б* — агрегированные данные с разрешением 10 м/пиксель

Решение этой проблемы лежит в приведении данных к единому масштабу. Для этого необходимо было агрегировать данные индексов, посчитанных по ортофотопланам БАС, до разрешения 10×10 м, соответствующего спутниковому снимку.

Как видно из результатов регрессионного анализа (*рис. 5*, см. с. 34), качество данных заметно улучшается в сравнении со спутниковыми снимками после применения доработанного алгоритма. Для всех пяти исследованных индексов наблюдается значительный рост коэффициента детерминации: для NGRDI R^2 увеличился с 0,372 до 0,506 (прирост +36 %), для VARI — с 0,361 до 0,494 (+37 %), для ExG — с 0,301 до 0,412 (+37 %), для VEG — с 0,362 до 0,476 (+31 %).

Это подтверждает, что предложенная методика постобработки системно устраняет негативное влияние артефактов сшивки, повышая сопоставимость данных БАС со спутниковыми. Наиболее высокую корреляцию с NDVI показали индексы NGRDI и VARI, для которых значение R^2 после коррекции приблизилось к 0,5. Для индекса TGI коэффициент детерминации также вырос после дополнительной обработки — с 0,267 до 0,355 (+33 %) (*рис. 6*, см. с. 34), но в случаях с первичной и доработанной обработкой имеет наименьшую силу связи с NDVI относительно других RGB-индексов.

Низкое значение R^2 для TGI объясняется тем, что он основан на комбинации индексов отражения в красном и зелёном диапазонах для оценки фотосинтетической активности. Точность методики снижается на ранних фенологических фазах и при низкой плотности биомассы. Также стоит отметить и причину в целом достаточно низких значений R^2 при сопоставлении индексов с NDVI. Несмотря на то, что большинство индексов говорят об одних и тех же характеристиках — состоянии и плотности растительного покрова, но NDVI, по определению, имеет более глубокий биохимический смысл.

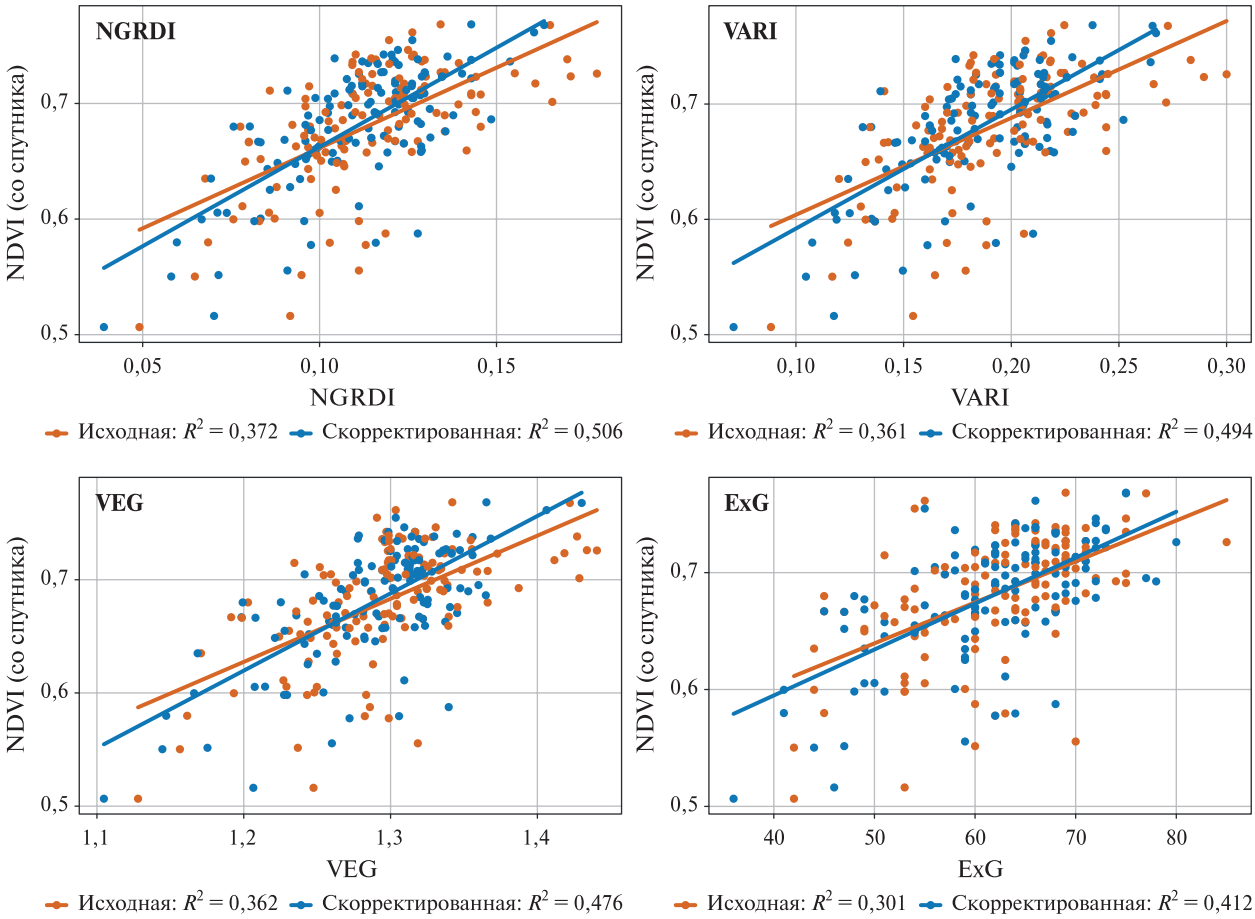


Рис. 5. Сравнение точности регрессионных моделей для четырёх вегетационных RGB-индексов, показавших наибольший прирост коэффициента детерминации (R^2) после применения алгоритма коррекции. Синим цветом показаны данные скорректированной обработки, оранжевым — исходной, с дефектами

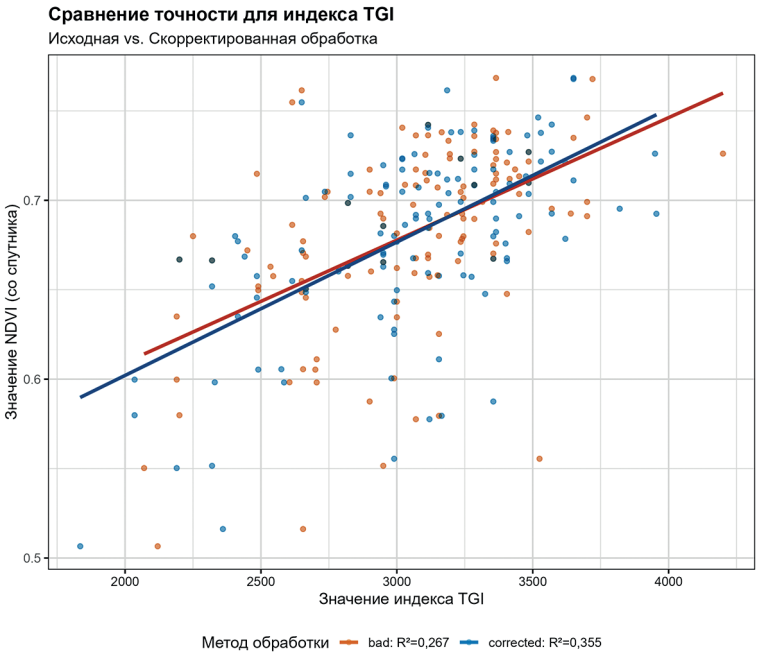


Рис. 6. Регрессионная модель сравнения индексов TGI и NDVI. Синим цветом показаны данные скорректированной обработки, оранжевым — исходной, с дефектами

Он использует канал NIR-диапазона, излучение которого сильно отражается от клеточной структуры листа (мезофилла), и канал красного диапазона, излучение которого поглощается хлорофиллом для фотосинтеза. Индексы RGB же носят исключительно колориметрический характер, так как работают только в видимом диапазоне. Они показывают, что здоровый лист зелёный (отражает зелёный свет), а не красный (поглощает красный). При этом не оценивается отражательная способность листа, как это это происходит при использовании NIR-канала. Поэтому RGB-индекс — это скорее мера «зелёности», а не прямое измерение здоровья и биомассы, несмотря на в целом схожие результаты между индексами.

Заключение

В результате проведённого исследования было установлено, что применение более полного алгоритма постобработки фотографий БАС при построении ортомозаик позволяет значительно повысить точность вегетационных RGB-индексов и их сопоставимость с данными NDVI спутника Sentinel-2. На общей выборке по всей территории исследования наблюдалось стабильное увеличение коэффициента детерминации (R^2) в среднем на 35 % для всех пяти изученных индексов (NGRDI, VARI, ExG, TGI, VEG), что свидетельствует о большом потенциале использования калиброванных данных для задач мониторинга сельскохозяйственных земель.

Таким образом, предложенный подход к обработке данных позволяет повысить надёжность и практическую ценность информации, получаемой с помощью доступных RGB-камер на БАС, приближая их по качеству к данным специализированных мультиспектральных сенсоров, что позволит оперативно принимать обоснованные управленческие решения при планировании агротехнологических операций: внесения удобрений, средств защиты растений, уборки урожая и т. д.

Литература

1. *Пивченко Д. В.*, *Мешалкина Ю. Л.*, *Ярославцев А. М. и др.* Сравнительный анализ вегетационных индексов для агроэкологического мониторинга озимой пшеницы в условиях Московской области // АгроЭкоИнфо. 2019. № 3. 14 с.
2. *Campos-Taberner M.*, *García-Haro F. J.*, *Camps-Valls G. et al.* Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 187. P. 102–118. DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.009.
3. *Gitelson A. A.*, *Kaufman Y. J.*, *Merzlyak M. N.* Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. No. 3. P. 289–298. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
4. *Hague A.*, *Tillett N. D.* A bandpass-filter-based approach to crop row detection // Mechatronics. 2001. V. 11. No. 1. P. 1–12. DOI: 10.1016/S0957-4158(00)00003-9.
5. *Hunt E. R.*, *Jr.*, *Daughtry C. S. T.*, *Eitel J. U. H.*, *Long D. S.* Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index // Agronomy J. 2011. V. 103. No. 4. P. 1090–1099. DOI: 10.2134/agronj2010.0395.
6. *Li H.*, *Chen Z.*, *Jiang Z. et al.* Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat // J. Integrative Agriculture. 2017. V. 16. P. 266–285. DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61293-X.
7. *Liu J.*, *Zhao C.*, *Yang G. et al.* Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform // Trans. Chinese Society of Agricultural Engineering. 2016. V. 32. P. 98–106. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.013.
8. *Meyer G. E.*, *Neto J. C.* Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications // Computers and Electronics in Agriculture. 2008. V. 63. No. 2. P. 282–293. DOI: 10.1016/j.compag.2008.03.009.
9. *Rouse J. W.*, *Jr.*, *Haas R. H.*, *Schell J. A.*, *Deering D. W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // 3rd ERTS-1 Symp. NASA, Goddard Space Flight Center, 1974. V. 351. P. 309–317.
10. *Sankaran S.*, *Khot L. R.*, *Zúñiga Espinoza C. et al.* Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review // European J. Agronomy. 2015. V. 70. P. 112–123. DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.

11. *Tikhonova M. V.*, *Buzylev A. V.*, *Zgigaleva Ya. S.*, *Polshina M. A.* Dynamics of carbon stock on fallow lands of black soils // Caspian J. Environmental Sciences. 2025. V. 23. No. 1. P. 13–20. DOI: 10.22124/CJES.2025.8557.
12. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. 1979. V. 8. No. 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
13. *Wang L.*, *Zhou X.*, *Zhu X. et al.* Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data // Crop J. 2016. V. 4. P. 212–219. DOI: 10.1016/j.cj.2016.01.008.

Assessment of the effectiveness of unmanned aerial system data post-processing algorithms to improve the accuracy of RGB vegetation indices

M. V. Tikhonova, Ya. S. Zhigaleva, N. A. Aleksandrov, A. V. Buzylev, A. M. Yaroslavtsev

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy
Moscow 127434, Russia
E-mail: tmv@rgau-msha.ru

The introduction of unmanned aerial vehicles (UAVs) in agroecological monitoring is limited by the errors that occur during photogrammetric data processing. This paper evaluates the effectiveness of a specialized post-processing algorithm aimed at eliminating the artifacts of orthomosaic stitching obtained from a standard RGB camera (Red, Green, Blue). The study is based on the example of a post-agricultural agroecosystem in Penza Region. A comparative analysis of five vegetation indices was conducted: NGRDI (Normalized Green Red Difference Index), VARI (Visible Atmospherically Resistant Index), ExG (Excess Green Vegetation Index), TGI (Triangular Greenness Index), and VEG (Vegetativen Index), calculated based on UAV data before and after correction. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtained from multispectral remote sensing data from the Sentinel-2 (L2A) satellite was used as a reference indicator. Regression analysis with calculation of the determination coefficient (R^2) was used to assess the accuracy. It was found that the application of the correction algorithm provides a systematic and statistically significant improvement in the comparability of RGB indices with satellite data. For a point sample across the entire study area, the R^2 increased by an average of 35 %. The best results were shown by the NGRDI (R^2 increased from 0.372 to 0.506) and the VARI (R^2 increased from 0.361 to 0.494).

Keywords: remote sensing, UAV, vegetation indices, NDVI, image processing, TGI, VARI, ExG, NGRDI, VEG, agroecology

Accepted: 09.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-29-37

References

1. Pivchenko D. V., Meshalkina Yu. L., Yaroslavtsev A. M. et al., Comparative analysis of vegetation indices for agroecological monitoring of winter wheat in the conditions of the Moscow region, *AgroEcoInfo*, 2019, No. 3, 14 p. (in Russian).
2. Campos-Taberner M., García-Haro F. J., Camps-Valls G. et al., Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring, *Remote Sensing of Environment*, 2016, V. 187, pp. 102–118, DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.009.
3. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N., Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, No. 3, pp. 289–298, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00072-7.
4. Hague A., Tillett N. D., A bandpass-filter-based approach to crop row detection, *Mechatronics*, 2001, V. 11, No. 1, pp. 1–12, DOI: 10.1016/S0957-4158(00)00003-9.

5. Hunt E. R., Jr., Daughtry C. S.T., Eitel J. U. H., Long D. S., Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index, *Agronomy J.*, 2011, V. 103, No. 4, pp. 1090–1099, DOI: 10.2134/agronj2010.0395.
6. Li H., Chen Z., Jiang Z. et al., Comparative analysis of GF-1, HJ-1, and Landsat-8 data for estimating the leaf area index of winter wheat, *J. Integrative Agriculture*, 2017, V. 16, pp. 266–285, DOI: 10.1016/S2095-3119(15)61293-X.
7. Liu J., Zhao C., Yang G. et al., Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform, *Trans. Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, V. 32, pp. 98–106, DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.24.013.
8. Meyer G. E., Neto J. C., Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, V. 63, No. 2, pp. 282–293, DOI: 10.1016/j.compag.2008.03.009.
9. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *3rd ERTS-1 Symp.*, NASA, Goddard Space Flight Center, 1974, V. 351, pp. 309–317.
10. Sankaran S., Khot L. R., Zúñiga Espinoza C. et al., Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review, *European J. Agronomy*, 2015, V. 70, pp. 112–123, DOI: 10.1016/j.eja.2015.07.004.
11. Tikhonova M. V., Buzylev A. V., Zgigaleva Ya. S., Polshina M. A., Dynamics of carbon stock on fallow lands of black soils, *Caspian J. Environmental Sciences*, 2025, V. 23, No. 1, pp. 13–20, DOI: 10.22124/CJES.2025.8557.
12. Tucker C. J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, V. 8, No. 2, pp. 127–150, DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.
13. Wang L., Zhou X., Zhu X. et al., Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data, *Crop J.*, 2016, V. 4, pp. 212–219, DOI: 10.1016/j.cj.2016.01.008.