

Труды МАИ. 2022. № 130
Trudy MAI, 2022, no. 130

Научная статья
УДК 538.837
DOI: [10.34759/trd-2023-130-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-22)

АНАЛИЗ АДЕКВАТНОСТИ γ -КОРРЕКЦИИ ЭФФЕКТА ЗАТЕНЕНИЯ ПРИ СПЕКТРАЛЬНЫХ СЪЕМКАХ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Гумбатов Дилан Азиз оглы

Национальное аэрокосмическое агентство,
Баку, Азербайджанская Республика

H.Dilan@mail.ru

Аннотация. Объектом исследования является эффект затенения при спектральных съемках земли с применением БПЛА, оснащенных спектральными камерами. Предметом исследования является адекватность гамма-коррекции эффекта затенения, осуществляемой при спектральных съемках. Целью исследования является исследование степени адекватности метода гамма коррекции для объектов, которые частично затенены. Эффект затенения в реальной исследуемой сцене должен быть учтен при изучении состояния растительности с использованием различных вегетационных индексов. Так, например, значения таких широко распространенных индексов как NDVI и LAI несколько выше на солнечно-освещенных участках, по сравнению с затененными участками. Эффект затенения также может дать полезную

информацию геометрического характера о расположении дистанционно изучаемых объектов среды. Показано существенное различие в степени адекватности γ -коррекции применительно к однотипным объектам с идентичной степенью затененности в случае применения методов геометрического и алгебраического усреднения. Средняя величина DN в общем случае может быть вычислена двумя способами: 1. Метод геометрического усреднения. 2. Метод алгебраического (сверточного) усреднения.

Обнаруженное различие состоит в том, что в случае геометрического усреднения адекватность γ коррекции понимается в смысле равенства усредненной величины логарифма скорректированной величины геометрического усреднения затененных и незатененных частей объектов к усредненной величине логарифма DN для незатененной части. Однако, в случае алгебраического усреднения адекватность γ коррекции понимается в смысле равенства усредненной величины логарифма DN незатененной части к усредненной величине логарифма γ -скорректированной величины DN затененной части объектов.

Ключевые слова: БПЛА, коррекция, эффект затенения, мультиспектральные и гиперспектральные камеры, дистанционное зондирование

Для цитирования: Гумбатов Дилан Азиз оглы. Анализ адекватности γ -коррекции эффекта затенения при спектральных съемках поверхности Земли с применением беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2023. № 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-22)

Original article

ANALYSIS OF THE ADEQUACY OF gamma-CORRECTION OF THE SHADING EFFECT IN SPECTRAL SURVEYS OF THE EARTH'S SURFACE USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Dilan Aziz oglu Gumbatov

National Aerospace Agency,
Baku, Republic of Azerbaijan

H.Dilan@mail.ru

Abstract. The effect of shading in the real scene under study should be taken into account when studying the state of vegetation using various vegetation indices. For example, the values of such widely used indices as NDVI and LAI are slightly higher in sunny areas compared to shaded areas. The shading effect can also provide useful information of a geometric nature about the location of remotely studied objects in the environment. The object of the study is the effect of shading during spectral surveys of the earth using UAVs equipped with spectral cameras. The subject of the study is the adequacy of the gamma-correction of the shading effect, carried out during spectral surveys. The purpose of the study is to study the degree of adequacy of the gamma correction method for objects that are partially shaded. A significant difference is shown in the degree of adequacy of the γ -correction as applied to objects of the same type with an identical degree of shading in the case of applying the methods of geometric and algebraic averaging. The average value of DN can generally be calculated in two ways: 1. Geometric averaging method. 2. Method of

algebraic (convolutional) averaging The difference found is that in the case of geometric averaging, the adequacy of the γ correction is understood in the sense of equality of the average value of the logarithm of the corrected value of the geometric averaging of the shaded and unshaded parts of objects to the average value of the logarithm DN for the unshaded part. However, in the case of algebraic averaging, the adequacy of γ correction is understood in the sense of equality of the average value of the logarithm DN of the unshaded part to the average value of the logarithm of the γ -corrected value DN of the shaded part of objects.

Keywords: UAV, correction, shading effect, multispectral and hyperspectral cameras, remote sensing

For citation: Gumbatov Dilan Aziz oglu. Analysis of the adequacy of gamma-correction of the shading effect in spectral surveys of the earth's surface using unmanned aerial vehicles.

Trudy MAI, 2023, no. 130. DOI: [10.34759/trd-2023-130-22](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-22)

Введение

Развитие беспилотной авиационной техники неизбежным образом усилило требования, выдвигаемые к аэровизуальной и мультиспектральной технике. Связь беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с аэро и фото воспроизводящей аппаратурой и соответствующими носителями информации имеет двоякий характер. С одной стороны исходно заданные фотоизображения могут быть использованы для определения навигационных параметров БПЛА [1,2]. С другой стороны, БПЛА активно используются в целях проведения аэровидеосъемок и в этих целях разрабатываются системы стабилизации управления видеокамерой [3]. Вместе с тем,

дистанционная видеосъемка и тесно связанное с ней дистанционное зондирование сохраняют свои проблемы, связанные с освещенностью объектов даже при использовании БПЛА, способных работать в режиме проксимального зондирования. Хорошо известно, что в реальных случаях дистанционного зондирования удаленных объектов оптическими методами возможны изменения условий освещенности исследуемых объектов, такие как побочные отражения от окружающих объектов, различные блики, затенения и др. Согласно [1], беспилотные летательные аппараты (БПЛА) со встроенными камерами отличаются низкой ценой, позволяют быстро исследовать значительные территории с высоким временным и пространственным разрешением. В этом смысле БПЛА со встроенными мультиспектральными и гиперспектральными камерами наиболее пригодны для исследования состояния растительного покрова почвы [2]. При этом зондирование осуществляется попиксельно, и согласно [3] каждый пиксел может содержать участки, которые покрыты или не покрыты растительностью. Как отмечается в работе [4], эффект затенения должен быть учтен при изучении состояния растительности с использованием различных вегетационных индексов. Так, например, значения таких широко распространенных индексов как NDVI и LAI несколько выше на солнечно-освещенных участках, по сравнению с затененными участками. Вместе с тем, согласно [5], эффект затенения может дать полезную информацию геометрического характера о расположении изучаемых и окружающих объектов среды. Согласно [6] для устранения эффекта затенения вполне пригодна двухисточниковая энерго-балансная модель, в которой суммарная радиометрическая температура делится на

температуры кроны и почвы и принимается линейная связь между вегетационным индексом и радиометрической температурой.

Согласно [7], известные методы компенсации затенения позволяют удалить статистические различия в значениях индексов растительности и почвы применительно к затененным и незатененным участкам.

Для устранения эффекта затенения в основном используются следующие методы:

1. Линейная-корреляционная коррекция
2. Гамма коррекция

Суть линейной корреляционной коррекции состоит в установлении связи между скорректированным DN с затененного пиксела со стандартным отклонением и средним значением затененных и незатененных пикселей используя линейную функцию [8]:

$$DN_{kor} = \frac{\sigma_{non-shadow}}{\sigma_{shadow}} (DN_{shadow} - \mu_{shadow}) + \mu_{non-shadow}$$

где: DN_{kor} -величина DN для пикселей, у которых эффект затенения устранена; DN_{shadow} -величина DN для затененных пикселей; $\sigma_{non-shadow}$ -стандартное отклонение для незатененных пикселей; μ_{shadow} -усредненная величина затененных пикселей; $\mu_{non-shadow}$ -усредненная величина незатененных пикселей.

Для устранения эффекта затененности также используется метод γ -коррекции. В этом методе компенсация затененности осуществляется с использованием нелинейной функции. Это обстоятельство диктует необходимость исследования степени адекватности этого метода применительно к операциям линейного

(алгебраического) геометрического усреднения измерительных данных, полученных из затененных и незатененных частей изображения.

Материалы и методы

Рассмотрим точность метода гамма коррекции, применяемого для компенсации эффекта затененности. Метод гамма коррекции был предложен в работе [9]. Согласно этой работе гамма коррекция затененных DN осуществляется по следующей формуле:

$$DN_{cor} = DN_s^{1/\gamma} \quad (1)$$

где DN_{cor} -скорректированная величина DN ; DN_s -затененная величина DN ; γ -параметр коррекции, определяемый согласно [10] по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{M[\ln(DN_s)]}{M[\ln(DN_{ns})]} \quad (2)$$

где: $M[\ln(DN_s)]$ -средняя величина натурального логарифма DN подвергнутых затенению; $M[\ln(DN_{ns})]$ -средняя величина натурального логарифма DN , неподвергнутых затенению.

Целью работы является исследование степени адекватности метода гамма коррекции для объектов которые частично затенены. Допустим, что дистанционно исследуются идентичные объекты, которые подобным образом подвергнуты затенению (рис. 1). Средняя величина DN может быть вычислена двумя способами:

1. Метод геометрического усреднения
2. Метод алгебраического (сверточного) усреднения

В первом случае средняя величина DN , получаемого с такого объекта определяется по следующей формуле:

$$DN_{cp.r} = (DN_s)^\alpha \cdot (DN_{ns})^{(1-\alpha)} \quad (3)$$

где: $DN_{ср.г}$ -геометрически средняя величина DN ; DN_s - DN , получаемый с затененной части объекта; DN_{ns} - DN , получаемый с незатененной части объекта, α -весовой коэффициент.

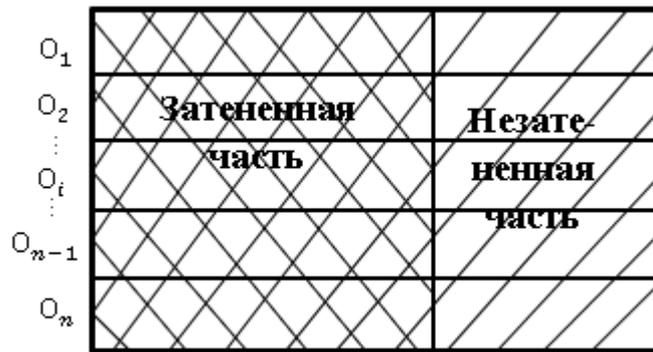


Рис. 1. Пояснительный рисунок для оценки эффекта затенения при дистанционном зондировании. Принятые обозначения: ($O_1 \div O_n$)-исследуемые объекты; область двойной штриховки-затененная часть объектов; область одинарной штриховки-незатененная часть объектов

После применения метода гамма-коррекции формула (3) приобретает следующим вид

$$DN_{ср.г.кор} = (DN_s)^{\frac{\alpha}{\gamma}} \cdot (DN_{ns})^{(1-\alpha)} \quad (4)$$

где $DN_{ср.г.кор}$ -скорректированная среднегеометрическая величина частично затененного объекта. Осуществим логарифмирование выражения (4). Имеем:

$$\ln(DN_{ср.г.кор}) = \frac{\alpha}{\gamma} \ln DN_s + (1 - \alpha) \ln DN_{ns} \quad (5)$$

Осуществим усреднение выражения (5). Имеем:

$$M[\ln(DN_{\text{ср.г.кор}})] = \frac{\alpha}{\gamma} M[\ln DN_s] + (1 - \alpha)M[\ln DN_{ns}] \quad (6)$$

С учетом (2) и (6) получим

$$M[\ln(DN_{\text{ср.г.кор}})] = \alpha \cdot M[\ln DN_s] + (1 - \alpha)M[\ln DN_{ns}] \quad (7)$$

Выражение (7) перепишем в виде

$$M[\ln(DN_{\text{ср.г.кор}})] = M[\ln DN_{ns}] \quad (8)$$

Следовательно, согласно полученному результату (8) среднелогарифмическая величина скорректированного среднегеометрического значения DN оказывается равной среднелогарифмической величине DN незатененной части объекта. Такое положение дел позволяет нам считать способ γ коррекции вполне адекватным для случая рассмотрения геометрической средней суммарной величины DN для множества одинаковых объектов, идентично подвергнутых затенению. Рассмотрим случай применения метода алгебраического усреднения. В этом среднеалгебраическая величина DN для одного из рассматриваемого типа объектов определим как

$$DN_{\text{ср.а}} = \alpha DN_s + (1 - \alpha)DN_{ns} \quad (9)$$

После γ -коррекции выражение (9) принимает следующий вид

$$DN_{\text{ср.а.кор.}} = \alpha DN_s^{1/\gamma} + (1 - \alpha)DN_{ns} \quad (10)$$

Выражение (10) перепишем как

$$\alpha DN_s^{1/\gamma} = DN_{\text{ср.а.кор.}} - (1 - \alpha)DN_{ns} \quad (11)$$

Осуществим логарифмирование (11). Получим

$$\ln \alpha + \frac{1}{\gamma} \ln DN_s = \ln[DN_{\text{ср.а.кор.}} - (1 - \alpha)DN_{ns}] \quad (12)$$

Выражение (12) перепишем как

$$\frac{1}{\gamma} \ln DN_s = \ln \left[\frac{DN_{cp.a.kop.} - (1-\alpha)DN_{ns}}{\alpha} \right] \quad (13)$$

или

$$\frac{1}{\gamma} \ln DN_s = \ln \left[\frac{(DN_{cp.a.kop.} - DN_{ns})}{\alpha} + DN_{ns} \right] \quad (14)$$

Осуществим усреднение (14) по всем объектам. Имеем:

$$\frac{1}{\gamma} \cdot M(\ln DN_s) = M \left(\ln \left[\frac{(DN_{cp.a.kop.} - DN_{ns})}{\alpha} + DN_{ns} \right] \right) \quad (15)$$

С учетом (2) и (15) получим

$$M(\ln DN_s) = M \left(\ln \left[\frac{(DN_{cp.a.kop.} - DN_{ns})}{\alpha} + DN_{ns} \right] \right) \quad (16)$$

Согласно (9)

$$\frac{DN_{cp.a.kop.} - DN_{ns}}{\alpha} = DN_s^{1/\gamma} - DN_{ns} \quad (17)$$

С учетом (16) и (17) получим

$$M(\ln DN_s) = M \left(\ln DN_s^{1/\gamma} \right) \quad (18)$$

Таким образом, согласно (18), в результате проведенной коррекции усредненная величина натурального логарифма DN_{ns} оказывается равной усредненной величине натурального логарифма DN_s , т.е. проводимая коррекция применительно к рассматриваемому типу объектов в среднем смысле адекватна.

Заключение

В заключение следует отметить различие в степени адекватности γ -коррекции применительно к однотипным объектам с идентичной степенью затененности. Это различие состоит в том, что в случае геометрического усреднения адекватность γ

коррекции понимается в смысле равенства усредненной величины логарифма скорректированной величины геометрического усреднения затененных и незатененных частей объектов к усредненной величине логарифма DN для незатененной части.

Однако, в случае алгебраического усреднения адекватность γ коррекции понимается в смысле равенства усредненной величины логарифма DN незатененной части к усредненной величине логарифма γ -скорректированной величины DN затененной части объектов.

Список источников

1. Антонов Д.А., Жарков М.В., Кузнецов И.М., Лунев Е.М., Пронькин А.Н. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75632>
2. Корнеев М.А., Максимов А.Н., Максимов Н.А. Методы выделения точек привязки для визуальной навигации беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=33061>
3. Волокитин Д.А., Князева В.В., Румянцев Д.С. Система стабилизации и управления видеокамерой для аэровидеосъемки с беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=62159>
4. Beniaich A., Silva M.L.N., Avalos F.A.P., Menezes M.D., Candido V.M. Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera //

Semina: Ciencias Agrarias, 2019, vol. 40 (1), pp. 49-66. DOI:10.5433/1679-0359.2019v40n1p49

5. Arroyo J., Guijarro M., Pajares G. An instance-based learning approach for thresholding in crop images under different outdoor conditions // Computers and Electronics in Agriculture, Athens, 2016, vol. 127, pp. 669-679. DOI:[10.1016/j.compag.2016.07.018](https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.018)

6. Dandois J.P., Olana M., Ellis E.C. Optimal altitude, overlap and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure // Remote Sensing, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 13895-13920. DOI:[10.3390/rs71013895](https://doi.org/10.3390/rs71013895)

7. Hunt J., Raymond E., Hively W.D., Fujikawa S., Linden D., Daughtry C.S., McCarty G. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring // Remote Sensing, 2010, vol. 2 (1), pp. 290–305. DOI:[10.3390/rs2010290](https://doi.org/10.3390/rs2010290)

8. Torres-Sanchez J., Pena J.M., Castro A.I., Lopez-Granados F. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV // Computers and electronics in agriculture, 2014, vol. 13, pp. 104-113. DOI:[10.1016/j.compag.2014.02.009](https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009)

9. Wen J., Liu Q., Liu, Q., Xiao Q., Li X. Scale effect and scale correction of land-surface albedo in rugged terrain // International Journal of Remote Sensing, 2009, vol. 30, pp. 5397–5420. DOI:[10.1080/01431160903130903](https://doi.org/10.1080/01431160903130903)

10. Aboutalebi M., Torres-Rua A. F., McKee M., Nieto H., Kustas W., Coopmans C. The impact of shadows on partitioning of radiometric temperature into canopy and soil temperature based on the contextual two-source energy balance model (TSEB-2T) // Proceedings SPIE. Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping IV, 2019, vol. 11008 (3). DOI:[10.1117/12.2519685](https://doi.org/10.1117/12.2519685)

11. Niu H., Zhao T., Wang D., Chen Y. Evapotranspiration Estimation with UAVs in Agriculture: A Review // Conference: 2019, Boston, Massachusetts, July 7- July 10, 2019. DOI:[10.13031/aim.201901226](https://doi.org/10.13031/aim.201901226)
12. Aboutaleb M., Torres-Rua A. F., McKee M., Nieto H., Kustas W. P., Coopmans C. Validation of digital surface models (DSMs) retrieved from unmanned aerial vehicle (UAV) point clouds using geometrical information from shadows // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping III, 2019. DOI:[10.1117/12.2519694](https://doi.org/10.1117/12.2519694)
13. Chen Y., Wen D., Jing, L., Shi P. Shadow information recovery in urban areas from very high resolution satellite imagery // International Journal of Remote Sensing, 2007, vol. 28 (15), pp. 3249–3254. DOI:[10.1080/01431160600954621](https://doi.org/10.1080/01431160600954621)
14. Nieto H., Kustas W.P., Torres-Ra A., Alfieri J.G., Gao F. et al. Evaluation of TSEB turbulent fluxes using different methods for the retrieval of soil and canopy component temperatures from UAV thermal and multispectral imagery // Irrigation Science, 2019, vol. 37 (3), pp. 389-406. DOI: [10.1007/s00271-018-0585-9](https://doi.org/10.1007/s00271-018-0585-9)
15. Qin W., Wang, J., Ma L., Wang F., Hu N. et al. UAV-Based Multi-Temporal Thermal Imaging to Evaluate Wheat Drought Resistance in Different Deficit Irrigation Regimes // Remote Sensing, 2022, vol. 14, pp. 5608. DOI: 10.3390/ rs14215608
16. Aboutaleb M., Torres-Rua A. F., McKee M., Kustas W., Nieto H., Coopmans C. Behavior of vegetation/soil indices in shaded and sunlit pixels and evaluation of different shadow compensation methods using UAV high-resolution imagery over vineyards // Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. Autonomous air

and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping III, 2018, July 30, pp. 10664. DOI:[10.1117/12.2305883](https://doi.org/10.1117/12.2305883)

17. Elarab M., Ticlavilca A.M., Torres-Rua A.F., Maslova I., McKee M. Estimating chlorophyll with thermal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precision agriculture // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, vol. 43, pp. 32-42. DOI:[10.1016/j.jag.2015.03.017](https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.017)

18. Sarabandi P., Yamazaki F., Matsuoka M., Kiremidjian A. Shadow detection and radiometric restoration in satellite high resolution images // Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04. 2004, vol. 6. DOI:[10.1109/IGARSS.2004.1369936](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1369936)

19. Victor J.D. Tsai. Automatic Shadow Detection and Radiometric Restoration on Digital Aerial Images, IGARSS 2003 // Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, vol. 2. DOI:[10.1109/IGARSS.2003.1293899](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1293899)

20. Arévalo V., González J. An experimental evaluation of non-rigid registration techniques on Quickbird satellite imagery // International Journal of Remote Sensing, 2008, vol. 29 (2), pp. 513–527. DOI:[10.1080/01431160701241910](https://doi.org/10.1080/01431160701241910)

References

1. Antonov D.A., Zharkov M.V., Kuznetsov I.M., Lunev E.M., Pron'kin A.N. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75632>

2. Korneev M.A., Maksimov A.N., Maksimov N.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 58. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33061>

3. Volokitin D.A., Knyazeva V.V., Rumyantsev D.S. *Trudy MAI*, 2015, no. 83. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=62159>
4. Beniaich A., Silva M.L.N., Avalos F.A.P., Menezes M.D., Candido B.M. Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera, *Semina: Ciências Agrarias*, 2019, vol. 40 (1), pp. 49-66. DOI:10.5433/1679-0359.2019v40n1p49
5. Arroyo J., Guijarro M., Pajares G. An instance-based learning approach for thresholding in crop images under different outdoor conditions, *Computers and Electronics in Agriculture*, Athens, 2016, vol. 127, pp. 669-679. DOI:10.1016/j.compag.2016.07.018
6. Dandois J.P., Olana M., Ellis E.C. Optimal altitude, overlap and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure, *Remote Sensing*, 2015, vol. 7, no. 10, pp. 13895-13920. DOI:10.3390/rs71013895
7. Hunt J., Raymond E., Hively W.D., Fujikawa S., Linden D., Daughtry C.S., McCarty G. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring, *Remote Sensing*, 2010, vol. 2 (1), pp. 290–305. DOI:10.3390/rs2010290
8. Torres-Sanchez J., Pena J.M., Castro A.I., Lopez-Granados F. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV, *Computers and electronics in agriculture*, 2014, vol. 13, pp. 104-113. DOI:10.1016/j.compag.2014.02.009
9. Wen J., Liu Q., Liu, Q., Xiao Q., Li X. Scale effect and scale correction of land-surface albedo in rugged terrain // *International Journal of Remote Sensing*, 2009, vol. 30, pp. 5397–5420. DOI:[10.1080/01431160903130903](https://doi.org/10.1080/01431160903130903)
10. Aboutaleb M., Torres-Rua A. F., McKee M., Nieto H., Kustas W., Coopmans C. The impact of shadows on partitioning of radiometric temperature into canopy and soil

temperature based on the contextual two-source energy balance model (TSEB-2T), *Proceedings SPIE. Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping IV*, 2019, vol. 11008 (3). DOI:10.1117/12.2519685

11. Niu H., Zhao T., Wang D., Chen Y. Evapotranspiration Estimation with UAVs in Agriculture: A Review, *Conference: 2019*, Boston, Massachusetts, July 7- July 10, 2019. DOI:10.13031/aim.201901226

12. Aboutaleb M., Torres-Rua A. F., McKee M., Nieto H., Kustas W. P., Coopmans C. Validation of digital surface models (DSMs) retrieved from unmanned aerial vehicle (UAV) point clouds using geometrical information from shadows, *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping III*, 2019. DOI:10.1117/12.2519694

13. Chen Y., Wen D., Jing, L., Shi P. Shadow information recovery in urban areas from very high resolution satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28 (15), pp. 3249–3254. DOI:10.1080/01431160600954621

14. Nieto H., Kustas W.P., Torres-Ra A., Alfieri J.G., Gao F. et al. Evaluation of TSEB turbulent fluxes using different methods for the retrieval of soil and canopy component temperatures from UAV thermal and multispectral imagery, *Irrigation Science*, 2019, vol. 37 (3), pp. 389-406. DOI: 10.1007/s00271-018-0585-9

15. Qin W., Wang, J., Ma L., Wang F., Hu N. et al. UAV-Based Multi-Temporal Thermal Imaging to Evaluate Wheat Drought Resistance in Different Deficit Irrigation Regimes, *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, pp. 5608. DOI: 10.3390/rs14215608

16. Aboutaleb M., Torres-Rua A. F., McKee M., Kustas W., Nieto H., Coopmans C. Behavior of vegetation/soil indices in shaded and sunlit pixels and evaluation of different

shadow compensation methods using UAV high-resolution imagery over vineyards, *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering. Autonomous air and ground sensing systems for agricultural optimization and phenotyping III*, 2018, July 30, pp. 10664. DOI:10.1117/12.2305883

17. Elarab M., Ticlavilca A.M., Torres-Rua A.F., Maslova I., McKee M. Estimating chlorophyll with thermal and broadband multispectral high resolution imagery from an unmanned aerial system using relevance vector machines for precision agriculture, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, vol. 43, pp. 32-42. DOI:10.1016/j.jag.2015.03.017

18. Sarabandi P., Yamazaki F., Matsuoka M., Kiremidjian A. Shadow detection and radiometric restoration in satellite high resolution images, *Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '04*. 2004, vol. 6. DOI:10.1109/IGARSS.2004.1369936

19. Victor J.D. Tsai. Automatic Shadow Detection and Radiometric Restoration on Digital Aerial Images, IGARSS 2003, *Conference: Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003, vol. 2. DOI:10.1109/IGARSS.2003.1293899

20. Arévalo V., González J. An experimental evaluation of non-rigid registration techniques on Quickbird satellite imagery // *International Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29 (2), pp. 513–527. DOI:[10.1080/01431160701241910](https://doi.org/10.1080/01431160701241910)

Статья поступила в редакцию 18.05.2023

Одобрена после рецензирования 25.05.2023

Принята к публикации 27.06.2023

The article was submitted on 18.05.2023; approved after reviewing on 25.05.2023; accepted for publication on 27.06.2023