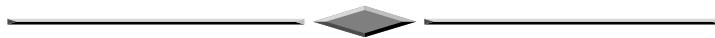


# ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, ФОТОГРАММЕТРИЯ



УДК 528.8:623.746.4-519

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-41-50

## Вопросы радиометрической калибровки устройств дистанционного зондирования, установленных на борту БПЛА

*Х. Г. Асадов<sup>1</sup>✉, А. Дж. Алиева<sup>1</sup>, Д. А. Гумбатов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

e-mail: asadzade@rambler.ru

**Аннотация.** Беспилотные летательные средства специального назначения позволяют осуществить оперативный сбор данных при различных состояниях внешних воздействующих факторов, в любое время суток. В типичном случае малые беспилотные летательные аппараты (БПЛА) осуществляют зондирование с высоты полета не более 250 м. По этой причине на практике широко используется эмпирический линейный метод (ELM) для радиометрической калибровки спектральных воспроизводящих устройств, установленных на борту БПЛА. Рассмотрен вопрос о достоверности и информационной обоснованности радиометрической калибровки спектральной аппаратуры, установленной на борту БПЛА по методу эмпирической линеаризации (ELM). На основе базовых положений этого метода составлена и решена оптимизационная задача, решение которой показало, что только при линейной зависимости показателя отражения от длины волны замена этой функциональной зависимости на ее энтропию приводит к минимальному росту информативности полученных данных. Этот обнаруженный факт может быть рассмотрен в качестве информационного обоснования метода ELM.

**Ключевые слова:** БПЛА, радиометрическая калибровка, дистанционное зондирование, энтропия, оптимизация

### *Введение*

Как отмечается в работе [1], беспилотные летательные аппараты открыли новую эру в проведении мониторинга окружающей среды в локальном масштабе. На борту БПЛА могут быть установлены малогабаритные мультиспектральные и гиперспектральные приборы, позволяющие получить изображения с высоким пространственным разрешением. Таким образом, открываются возможности обнаруживать и оценивать воздействие различных опасностей [2, 3], осуществлять контроль состояния окружающей среды [4–6], управлять природными ресурсами [7–9], исследовать изменения состояния различных

объектов на поверхности земли [10–12] и т. д. БПЛА позволяет осуществить оперативный сбор данных при различных состояниях внешних воздействующих факторов [13], в любое время суток. В типичном случае малые БПЛА осуществляют зондирование с высоты полета не более 250 м [1]. По этой причине на практике широко используется эмпирический линейный метод (ELM) для радиометрической калибровки спектральных воспроизводящих устройств, установленных на их борту [14–20].

В общем случае изображения дистанционного зондирования содержат шумы из-за влияния самой бортовой измерительной системы и/или влияния окружающей среды. Следовательно, достоверность информации получае-

мой от БПЛА без проведения радиометрической калибровки не может быть обеспечена.

Следует отметить, что радиометрическая калибровка спутниковых сканирующих воспроизводящих спектральных устройств (например, спектрорадиометров MODIS, AVHRR) осуществляется по двухступенчатой схеме: на первой ступени устанавливается линейная связь между необработанными яркостными цифровыми оценками (DN) и показателями соответствующей оптической радиации на уровне сенсоров. При этом устанавливаются также постоянные величины «усиление» (gain) и «смещение» (bias). Во второй ступени осуществляется преобразование радиационного потока на уровне сенсора в радиационные потоки на уровне верхней границы атмосферы. Для проведения подобных вычислений необходимо иметь такие данные, как расстояние от Солнца до Земли, средняя величина солнечной внеатмосферной радиации, зенитный угол Солнца [21]. При этом осуществляется преобразование DN в радиационный поток на внешней границе атмосферы и для дальнейшего перехода для вычисления отражательных характеристик объектов на Земле требуется проведение дополнительных вычислений. Так как полет БПЛА из-за технических ограничений не может обеспечить выход во внеатмосферную зону, данная процедура радиометрической калибровки неприемлема для БПЛА. Следует отметить, что метод викариозной калибровки спутниковой аппаратуры, в котором необходимо построение больших тестовых участков, также невыгоден для

радиометрической калибровки спектральной аппаратуры БПЛА по финансовым и другим соображениям. По вышеуказанным причинам для калибровки спектральной аппаратуры БПЛА используется метод эмпирической линии [22–24]. Однако эмпирический линеаризационный метод обеспечивает линейную зависимость между логарифмом показателя отражения и  $DN$ , а не между показателем отражения и  $DN$ . Следовательно, возникает вопрос, не приносит ли такая замена показателя отражения на логарифм этого показателя к появлению дополнительной информации, которая могла бы привести к искажениям дистанционно получаемой информации. Рассмотрим пути решения данного вопроса.

### Материалы и методы

В методе ELM используется калибровочный объект серого уровня яркости, устанавливаемый на поверхности земли, и предполагается наличие линейной связи между коэффициентом отражения объекта и оптической радиацией на уровне сенсора. Таким способом получают линейные уравнения указанной зависимости для каждого спектрального канала. В качестве калибровочных предметов могут быть использованы панели из сульфата бария, масонита, политетрафлуорэтилена. На рис. 1 приведена волновая зависимость показателя отражения масонитовой панели. Показана средняя линия, вычисленная по десяти различным углам обзора.

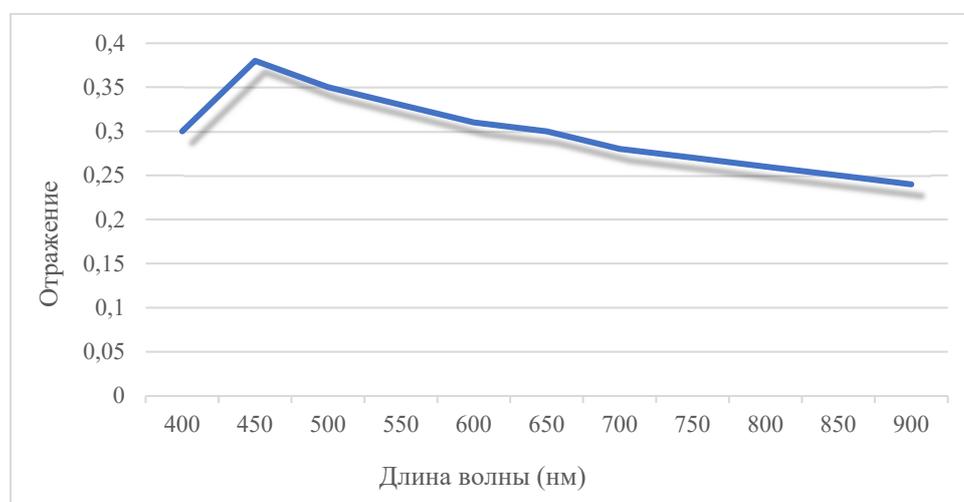


Рис. 1. Кривая волновой зависимости показателя отражения масонитовой панели с 30-процентным уровнем «серого»

На рис. 2 показаны кривые показателя отражения для каналов «зеленый», «красный» и «ближний инфракрасный» в зависимости от процента уровня «серого» [25].

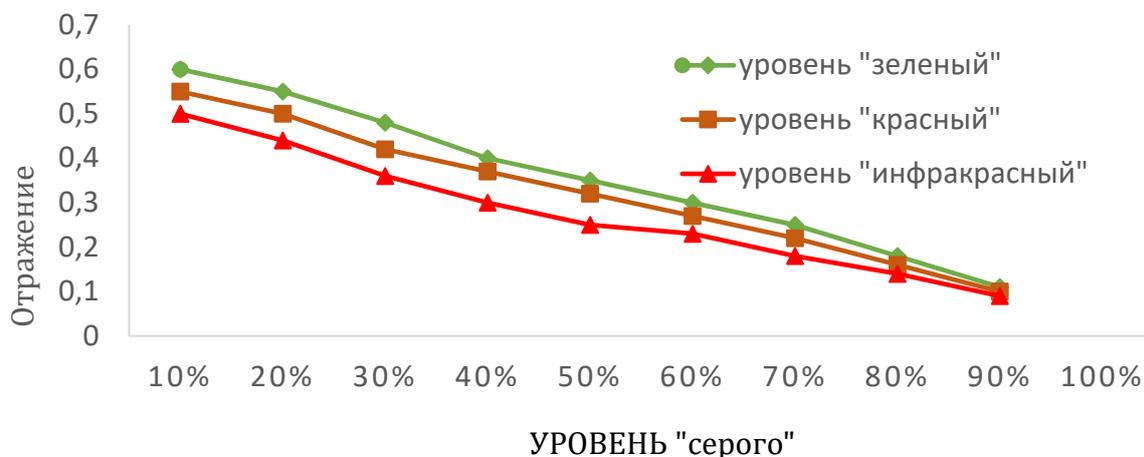


Рис. 2. Кривые зависимости показателя отражения от процента уровня «серого» для каналов «зеленый», «красный» и «ближний инфракрасный»

Как видно из кривых, представленных на рис. 2, показатели отражения различных каналов почти экспоненциально зависят от процента уровня «серого». Соответствующие отдельные кривые приведены на рис. 3, а, б, в.

Линеаризованный вид указанных экспоненциальных кривых спектральных каналов имеет вид [25]

$$\ln(R) = -a_1 DN + a_2, \quad (1)$$

где для ближнего инфракрасного канала  $a_1 = 0,0156$ ;  $a_2 = 3,79$ ;  $R$  – показатель отражения калибрационного объекта.

Для решения вышеуказанного вопроса прежде всего представим выражение (1) в виде

$$-\lambda \ln R = \lambda(-a_1 DN + a_2). \quad (2)$$

Далее учтем, что  $R$  является функцией длины волны, т. е. имеем

$$R = R(\lambda). \quad (3)$$

С учетом (2) и (3) получим

$$-\lambda \ln(R(\lambda)) = \lambda(-a_1 DN + a_2). \quad (4)$$

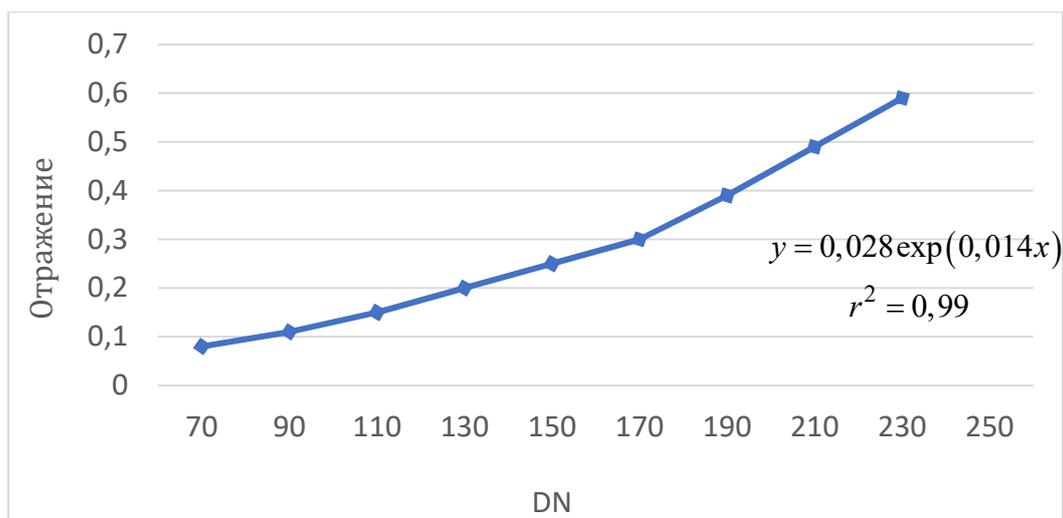
Покажем, что для фиксированной величины  $DN$  имеем постоянную величину интеграла  $\int R(\lambda) d\lambda$ , т. е. имеем

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda = C; \quad C = \text{const}. \quad (5)$$

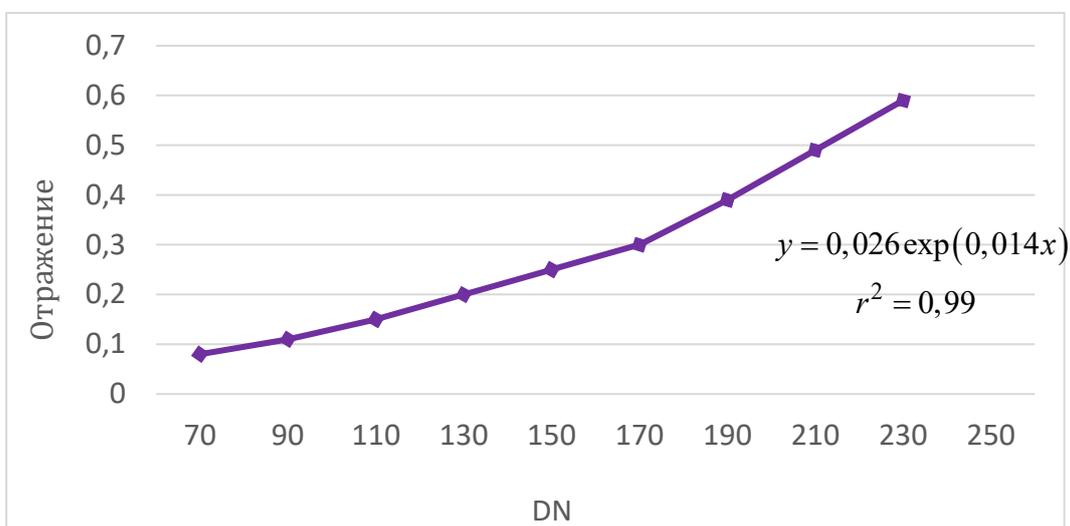
Осуществив интегрирование (4) в диапазоне  $(\lambda_1 \div \lambda_2)$ , получим

$$-\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \ln(R(\lambda)) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda(-a_1 DN(R, \lambda) + a_2) d\lambda. \quad (6)$$

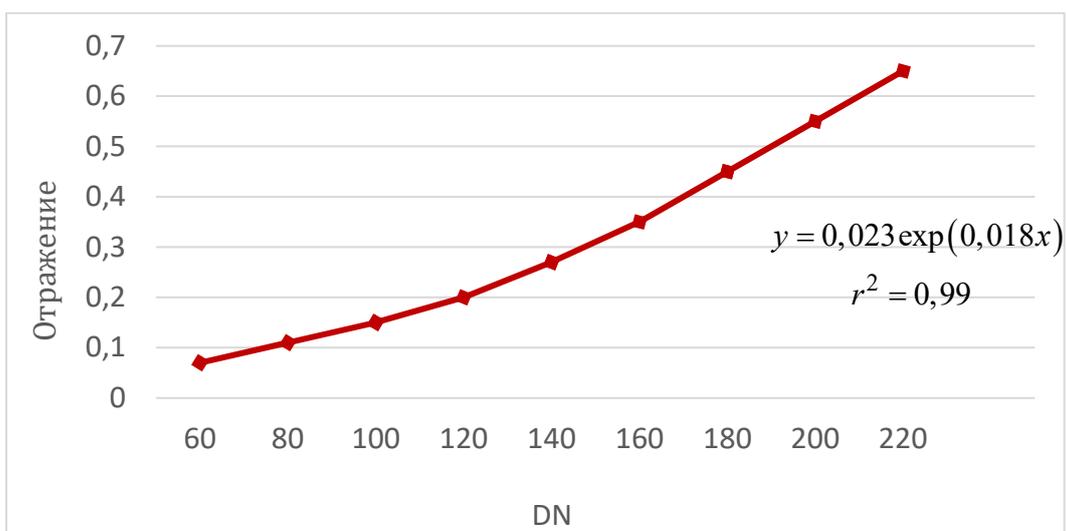
Появление в (6) функциональной зависимости  $DN(R, \lambda)$  можно понять из графиков, представленных на рис. 4.



a)



б)



в)

Рис. 3. Кривые зависимости показателя отражения от DN для каналов: а) «зеленый»; б) «красный»; в) «ближний инфракрасный»

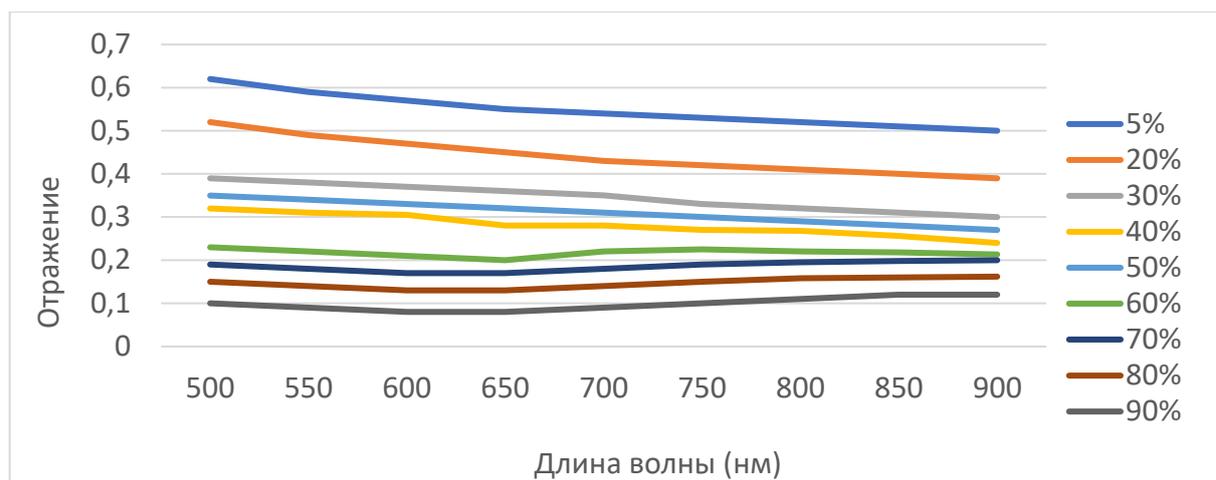


Рис. 4. Графики зависимости  $R$  от длины волны, разных значениях уровня «серого»

Как видно из графиков, показанных на рис. 4, процент уровня «серого» однозначно определяется интегралом  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda$ . Следовательно, функциональная зависимость  $DN(R, \lambda)$  имеет место быть. Следовательно, если показать, что использование взамен  $R(\lambda)$  энтропии этого показателя, т. е.  $\ln(R(\lambda))$  приводит к минимальному росту информативности именно при линейной зависимости между  $R$  и  $DN$ , то замену  $R(\lambda)$  на  $\ln(R(\lambda))$  можно логически оправдать. Проанализируем информативность левой части (6) с учетом условия (5). На базе левой части (6) и условия (5) сформируем следующую вариационную задачу поиска функции  $R(\lambda)$ , при которой следующий целевой функционал  $F$  достиг бы минимума:

$$F = -\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \ln(R(\lambda)) d\lambda + \gamma \left[ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda - C \right], \quad (7)$$

где  $\gamma$  – множитель Лагранжа.

Согласно [26], решение оптимизационной задачи (7) должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ -\lambda \ln(R(\lambda)) + \gamma [R(\lambda)] \right\}}{dR(\lambda)} = 0. \quad (8)$$

Из (8) получаем

$$-\frac{\lambda}{R(\lambda)} + \gamma = 0. \quad (9)$$

Из выражения (9) имеем

$$R(\lambda) = \frac{\lambda}{\gamma}. \quad (10)$$

С учетом (10) и (5) напишем

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\lambda}{\gamma} d\lambda = C. \quad (11)$$

Из (11) имеем

$$\frac{\lambda_2^2}{2} = \frac{\lambda_1^2}{2} = C\gamma, \quad (12)$$

следовательно,

$$\gamma = \frac{(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{2C}. \quad (13)$$

С учетом (9) и (13) находим

$$\frac{\lambda}{R(\lambda)} = \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{2C}. \quad (14)$$

Из (14) окончательно получим

$$R(\lambda) = \frac{2C\lambda}{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}. \quad (15)$$

Как видно из выражения (15), при линейной зависимости  $R$  от  $\lambda$  целевой функционал  $F$  достигает экстремума. Для определения типа экстремума вычислим вторую производную интегранта в (7) по  $R(\lambda)$ .

В результате вычисления получаем

$$\frac{d^2 \{-\lambda \ln(R(\lambda)) + \gamma[R(\lambda)]\}}{dR(\lambda)^2} = \frac{\lambda}{R^2(\lambda)}. \quad (16)$$

Следовательно, функционал  $F$  при решении (15) достигает минимума.

### **Результаты и обсуждение**

Показано, что при замене функции  $R(\lambda)$  на ее энтропию  $\ln(R(\lambda))$  может быть обеспечен минимальный прирост информативности в случае линейной зависимости  $R$  от  $\lambda$ , что соответствует свойству используемого эталонного отражателя. Это означает, что широко используемая функциональная зависимость наилучшим образом аппроксимирует именно линейную функцию  $R(\lambda)$ . Таким образом, вышеизложенное можно считать информационным обоснованием широко используемого ELM для радиометрической калибровки спектральной аппаратуры, устанавливаемой на борту БПЛА.

### **Заключение**

Рассмотрен вопрос о достоверности и информационной обоснованности радиометрической калибровки спектральной аппаратуры, установленной на борту БПЛА по методу ELM (метод эмпирической линеаризации). На основе базовых положений этого метода составлена и решена оптимизационная задача, решение которой показало, что только при линейной зависимости показателя отражения  $R$  от  $\lambda$  замена  $R(\lambda)$  на ее энтропию приводит к минимальному росту информативности полученных данных. Этот обнаруженный факт может быть рассмотрено в качестве информационного обоснования метода ELM.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Zarzar C. M., Dash P., Dyer J. L., Moorhead R., Hathcock L. Development of a simplified radiometric calibration framework for water-based and rapid deployment unmanned aerial system (UAS) operations // Drones. – 2020. – Vol. 4. – DOI 10.20944/preprints202003.0469.v1.

2. Aanstoos J. V., Hasan K., Ohara C. G., Prasad S., Dabbiru L., Mahrooghy M., Nobrega R., Lee M., Shrestha B. Use of remote sensing to screen earthen levees // 2010 IEEE 39th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR) (13–15 October 2010). – Washington, DC, USA, 2010. – DOI 10.1109/AIPR.2010.5759704.
3. Adams S. M., Friedland C. J. A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/266465037>.
4. Hardin P. J., Jensen R. R. Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing challenges and opportunities // *GIScience & Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 48(1). – P. 99–111. – DOI 10.2747/1548-1603.48.1.99.
5. Frew E. W., Elston J., Argrow B., Houston A., Rasmussen E. Sampling severe local storms and related phenomena: using unmanned aircraft systems // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. – 2012. – Vol. 19(1). – P. 85–95. – DOI 10.1109/MRA.2012.2184193.
6. Агринский М. В., Голицин А. В., Старцев В. В. Проект комплекса гиперспектрального дистанционного зондирования земель с помощью БПЛА // *Фотоника*. – 2019. – Т. 13, № 6. – С. 564–568.
7. Torres-Sanchez J., Lopez-Granados F., De Castro A. I., Pena-Barragan J. M. Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for Early site specific weed management // *PLOS ONE*. – 2013. – Vol. 8 (3). – P. e58210. – DOI 10.1371/journal.pone.0058210.
8. Gomez-Candon D., De Castro A. I., Lopez-Granados F. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat // *Precision Agriculture*. – 2013. – Vol. 15 (1). – P. 44–56. – DOI 10.1007/s11119-013-9335-4.
9. Кривичев А. И., Заленкий А. В. Беспилотные авиационные технологии мониторинга сфер человеческой деятельности на примере крупнейших производителей и эксплуатантов в России // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 186–195.
10. Messinger M., Asner G., Silman M., Messinger M., Asner G. P., Silman M. Rapid assessments of amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8(8). – P. 615. – DOI 10.3390/rs8080615.
11. Андронов В. Г., Чуев А. А. Идентификация девиаций беспилотных летательных аппаратов по параллаксам изображений // *Вестник СГУГиТ*. – 2023. – Т. 28, № 1. – С. 59–69.
12. Крупочкин Е. П., Суханов С. И., Воробьев Д. А. Съёмка археологических памятников с использованием беспилотных летательных аппаратов на примере Горного Алтая // *Вестник СГУГиТ*. – 2021. – Т. 26, № 2. – С. 56–64.
13. Yang G., Liu J., Zhao C., Li Z., Huang Y., Yu H., Xu B., Yang X., Zhu D., Zhang X. et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives // *Frontiers in Plant Science*. – 2017. – Vol. 8. – P. 1111. – DOI 10.3389/fpls.2017.01111.
14. Lu B., He Y. Species classification using unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 128. – P. 73–85. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.011.
15. Yang G., Li C., Wang Y., Yuan H., Feng H., Xu B., Yang X. The DOM generation and precise radiometric calibration of a UAV-mounted miniature snapshot hyperspectral imager // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9 (7). – P. 642. – DOI 10.3390/rs9070642.
16. Coburn C. A., Smith A. M., Logie G. S., Kennedy P. Radiometric and spectral comparison of inexpensive camera systems used for remote sensing // *International Journal of Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 39(15-16). – P. 1–22. – DOI 10.1080/01431161.2018.1466085.
17. Logie G. S. J., Coburn C. A. An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing // *International Journal of Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 39(1). – P. 1–19. – DOI 10.1080/01431161.2018.1488297.
18. Mafanya M., Tsele P., Botai J. O., Manyama P., Chirima G. J., Monate T. Radiometric calibration framework for ultra-high-resolution UAV-derived orthomosaics for large-scale mapping of

invasive alien plants in semi-arid woodlands: *Harrisia pomanensis* as a case study // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39(19). – DOI 10.1080/01431161.2018.1490503.

19. Miyoshi G. T., Imai N. N., Tommaselli A. M. G., Honkavaara E., Nasi R., Moriya E. A. S. Radiometric block adjustment of hyperspectral image blocks in the Brazilian environment // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39 (15-16). – P. 1–21. – DOI 10.1080/01431161.2018.1425570.

20. Jeong Y., Yu J., Wang L., Shin H., Koh S. M., Park G. Cost-effective reflectance calibration method for small UAV images // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – Vol. 39 (10). – P. 1–26. – DOI 10.1080/01431161.2018.1516307.

21. Chander G., Markham B. Resived Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. – Vol. 41 (11). – P. 2674–2677. – DOI 10.1109/TGRS.2003.818464.

22. Smith G. M., Milton E. J. The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance // International Journal of Remote Sensing. – 1999. – Vol. 20 (13). – P. 2653–2662. – DOI 10.1080/014311699211994.

23. Kruse F. A., Kierein-Young K. S., Boardman J. W. Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1990. – Vol. 56 (1). – P. 83–92.

24. Ben-Dor E., Kruse F. A., Lefkoff A. B., Banin A. Comparison of three calibration techniques for utilization of GER 63-channel aircraft scanner data of Makhtesh Ramon, Negev, Israel // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1994. – Vol. 60, No 11. – P. 1339–1354.

25. Wang C., Myint S. W. A simplified empirical line method of radiometric calibration for small unmanned aircraft systems-based remote sensing // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 8 (5). – P. 1–10. – DOI 10.1109/JSTARS.2015.2422716.

26. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнение и вариационное исчисление. – М. : Наука, 1974. – 472 с.

### Об авторах

*Хикмет Гамид оглы Асадов* – доктор технических наук, профессор, начальник отдела.

*Амида Джабраиль гызы Алиева* – кандидат технических наук, ученый секретарь.

*Дилан Азиз оглы Гумбатов* – докторант.

Получено 14.11.2023

© *Х. Г. Асадов, А. Дж. Алиева, Д. А. Гумбатов*, 2024

### Issues of radiometric calibration of remote sensing devices installed on UAVs' board

*Kh. G. Asadov<sup>1</sup>✉, A. J. Alieva<sup>1</sup>, D. A. Gumbatov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: asadzade@rambler.ru

**Abstract.** Unmanned aerial vehicles for special purposes make it possible to quickly collect data under various conditions of external influencing factors, at any time of the day. Typically, small UAVs perform sensing from a flight altitude of no more than 250 m. For this reason, in practice, the empirical linear method (ELM) is widely used for radiometric calibration of spectral imaging devices installed on board the UAV. The article considers issue of reliability and information validity of radiometric calibration of spectral equipment installed on board a UAV using the empirical linearization method (ELM). Based on the basic principles of this method, an optimization problem was com-

piled and solved, the solution of which showed that only if the reflection index has a linear dependence on the wavelength, replacing this functional dependence with its entropy leads to a minimal increase in the information content of the obtained data. This discovered fact can be considered as an information justification for the ELM method.

**Keywords:** UAV, radiometric calibration, remote sensing, entropy, optimization

## REFERENCES

1. Zarzar, C. M., Dash, P., Dyer, J. L., Moorhead, R., & Hathcock, L. (2020). Development of a simplified radiometric calibration framework for water-based and rapid deployment unmanned aerial system (UAS) operations. *Drones*, Vol. 4. DOI 10.20944/preprints202003.0469.v1.
2. Aanstoos, J. V., Hasan, K., Ohara, C. G., Prasad, S., Dabir, L., Mahrooghy, M., Nobrega, R., Lee, M., & Shrestha, B. (2010). Use of remote sensing to screen earthen levees. *2010 IEEE 39th Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR)*. Washington, DC, USA. DOI 10.1109/AIPR.2010.5759704.
3. Adams, S. M., & Friedland, C. J. (2011). A survey of unmanned aerial vehicle (UAV) usage for imagery collection in disaster research and management. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266465037>.
4. Hardin, P. J., & Jensen, R. R. (2011). Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing challenges and opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 99–111. DOI 10.2747/1548-1603.48.1.99.
5. Frew, E. W., Elston, J., Argrow, B., Houston, A., & Rasmussen, E. (2012). Sampling severe local storms and related phenomena: using unmanned aircraft systems. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 19(1), 85–95. DOI 10.1109/MRA.2012.2184193.
6. Agrinsky, M. V., Golitsin, A. V., & Startsev, V. V. (2019). Project of hyperspectral remote land sensing complex using UAVS. *Fotonika [Photonics Russia]*, 13(6), 564–568 [in Russian].
7. Torres-Sanchez, J., Lopez-Granados, F., De Castro, A. I., & Pena-Barragan, J. M. (2013). Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for Early site specific weed management. *PLOS ONE*, 8(3), P. e58210. DOI 10.1371/journal.pone.0058210.
8. Gomez-Candon, D., De Castro, A. I., & Lopez-Granados, F. (2013). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, 15(1), 44–56. DOI 10.1007/s11119-013-9335-4.
9. Krivichev, A. I., & Zaletsky, A. V. (2018). Unmanned aircraft technologies for monitoring the human activities on the example of the largest producers and operators in Russia. *Izvestiya vuzov "Geodeziya i aerofotos"emka" [Izvestia Vuzov "Geodesy and Aerophotosurveying"]*, 62(2), 186–195 [in Russian].
10. Messinger, M., Asner, G., Silman, M., Messinger, M., Asner, G. P., & Silman, M. (2016). Rapid assessments of amazon forest structure and biomass using small unmanned aerial systems. *Remote Sensing*, 8(8), P. 615. DOI 10.3390/rs8080615.
11. Andronov, V. G., & Chuev, A. A. (2023). Identification of deviations of unmanned aerial vehicles by parallax images. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 28(1), 59–69 [in Russian].
12. Krupochkin, E. P., Sukhanov, S. I., & Vorobyov, D. A. (2021). Survey of Archaeological Sites of Gorny Altay Using UAV. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 26(2), 56–64 [in Russian].
13. Yang, G., Liu, J., Zhao, C., Li, Z., Huang, Y., Yu, H., Xu, B., Yang, X., Zhu, D., Zhang, X., & et al. (2017). Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 8, P. 1111. DOI 10.3389/fpls.2017.01111.
14. Lu, B., & He, Y. (2017). Species classification using unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 73–85. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2017.03.011.
15. Yang, G., Li, C., Wang, Y., Yuan, H., Feng, H., Xu, B., & Yang, X. (2017). The DOM generation and precise radiometric calibration of a UAV-mounted miniature snapshot hyperspectral imager. *Remote Sensing*, 9(7), P. 642. DOI 10.3390/rs9070642.

16. Coburn, C. A., Smith, A. M., Logie, G. S., & Kennedy, P. (2018). Radiometric and spectral comparison of inexpensive camera systems used for remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 1–22. DOI 10.1080/01431161.2018.1466085.
17. Logie, G. S. J., & Coburn, C. A. (2018). An investigation of the spectral and radiometric characteristics of low-cost digital cameras for use in UAV remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 39(1), 1–19. DOI 10.1080/01431161.2018.1488297.
18. Mafanya, M., Tsele, P., Botai, J. O., Manyama, P., Chirima, G. J., & Monate, T. (2018). Radiometric calibration framework for ultra-high-resolution UAV-derived orthomosaics for large-scale mapping of invasive alien plants in semi-arid woodlands: *Harrisia pomanensis* as a case study. *International Journal of Remote Sensing, Vol. 39*(19). DOI 10.1080/01431161.2018.1490503.
19. Miyoshi, G. T., Imai, N. N., Tommaselli, A. M. G., Honkavaara, E., Nasi, R., & Moriya, E. A. S. (2018). Radiometric block adjustment of hyperspectral image blocks in the Brazilian environment. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15-16), 1–21. DOI 10.1080/01431161.2018.1425570.
20. Jeong, Y., Yu, J., Wang, L., Shin, H., Koh, S. M., & Park, G. (2018). Cost-effective reflectance calibration method for small UAV images. *International Journal of Remote Sensing*, 39(10), 1–26. DOI 10.1080/01431161.2018.1516307.
21. Chander, G., & Markham, B. (2003). Resived Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674–2677. DOI 10.1109/TGRS.2003.818464.
22. Smith, G. M., & Milton, E. J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20(13), 2653–2662. DOI 10.1080/014311699211994.
23. Kruse, F. A., Kierein-Young, K. S., & Boardman, J. W. (1990). Mineral mapping at Cuprite, Nevada with a 63-channel imaging spectrometer. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56(1), 83–92.
24. Ben-Dor, E., Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., & Banin, A. (1994). Comparison of three calibration techniques for utilization of GER 63-channel aircraft scanner data of Makhtesh Ramon, Negev, Israel. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 60(11), 1339–1354.
25. Wang, C., & Myint, S. W. (2015). A simplified empirical line method of radiometric calibration for small unmanned aircraft systems-based remote sensing. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(5), 1–10. DOI 10.1109/JSTARS.2015.2422716.
26. Elsgolts, L. E. (1974). *Differential equations and calculus of variations [Differentsial'nye uravnenie i variatsionnoe ischislenie]*. Moscow: Nauka Publ., 472 p. [in Russian].

### Author details

*Hikmet H. Asadov* – D. Sc., Professor, Head of Department.

*Amida J. Aliyeva* – Ph. D., Scientific Secretary.

*Dilan A. Gumbatov* – Postdoc.

Received 14.11.2023

© *Kh. G. Asadov, A. J. Aliyeva, D. A. Gumbatov, 2024*