

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 535.2; 538.3

doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-8

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛЬБЕДОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. Дж. Алиева¹, Х. С. Алиева², М. Г. Ашрафов³, Н. Х. Мустафазаде⁴

^{1,2,3,4} Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика
¹ amidec.b@mail.ru, ² a.xumar555@mail.ru, ³ esrefov9955@gmail.com, ⁴ nm_609@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Альbedo земной поверхности является важным показателем, определяющим энергобаланс, существующий между нашей планетой и атмосферой. В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации альбедометрических измерений, осуществляемых спектрометрической аппаратурой, установленной на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Целью работы является решение задачи оптимизации альбедометрических измерений с учетом логарифмической связи между необработанными первичными цифровыми отсчетами (DN) и реальным показателем отражения природных и искусственных земных объектов в красном, зеленом и синем спектральных диапазонах. Объектом исследования являются альбедометрические измерения, осуществляемые БПЛА. Предметом исследования является оптимизация альбедометрических измерений в узких спектральных диапазонах. *Материалы и методы.* С помощью вариационного метода исследуется оптимальная зависимость показателя отражения земных объектов от зенитного угла позиции БПЛА относительно исследуемого объекта. Критерием оптимизации является целевой функционал в виде интегрированной величины DN по всему диапазону изменения указанного зенитного угла. В оптимальном режиме этот функционал должен достичь максимума при условии наложения некоторого ограничительного условия на указанную зависимость. *Результаты.* С применением вариационного метода оптимизации вычислен оптимальный вид указанной зависимости. Показано, что результаты проведенной оптимизации косвенно подтверждаются данными известных экспериментальных исследований. *Вывод.* Выбор оптимального соотношения между указанным зенитным углом и показателем отражения объектов позволяет повысить эффективность использования БПЛА в поисковых целях.

Ключевые слова: альbedo, спектрометр, БПЛА, оптимизация, зенитный угол

Для цитирования: Алиева А. Дж., Алиева Х. С., Ашрафов М. Г., Мустафазаде Н. Х. Оптимизация альбедометрических измерений с применением беспилотного летательного аппарата // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 68–75. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-8

OPTIMIZATION OF ALBEDOMETRIC MEASUREMENTS USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.J. Alieva¹, Kh.S. Alieva², M.G. Ashrafov³, N.Kh. Mustafazade⁴

^{1,2,3,4} National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan
¹ amidec.b@mail.ru, ² a.xumar555@mail.ru, ³ esrefov9955@gmail.com, ⁴ nm_609@mail.ru

Abstract. Background. The albedo of the earth's surface is an important indicator that determines the energy balance that exists between our planet and the atmosphere. The issues of optimization of albedometric measurements carried out by spectrometric equipment installed on board an unmanned aerial vehicle (UAV) are considered. The aim of the work is to solve the problem of optimizing albedometric measurements, taking into account the logarithmic relationship between the raw primary digital readings (DN) and the real indicator of reflection of natural and artificial terrestrial objects in the red, green and blue spectral ranges. The object of the study is albedometric measurements carried out by UAVs. The subject of the study is the optimization of albedometric measurements in narrow spectral ranges. *Materials and methods.* Using the variational method, the optimal dependence of the reflection index of terrestrial objects on the zenith angle of the UAV position relative to the object under study is investigated. The optimization criterion is the target functional in the form of an integrated value DN over the entire range of the change in the specified zenith angle. In the optimal mode, this functionality should reach its maximum if some restrictive condition is imposed on the specified dependence. *Results.* Using the variational optimization method, the optimal type of the specified dependence is calculated. It is shown that the results of the optimization are indirectly confirmed by the data of well-known experimental studies. *Conclusion.* Choosing the optimal ratio between the specified zenith angle and the reflection index of objects makes it possible to increase the efficiency of using UAVs for search purposes.

Keywords: albedo, spectrometer, UAV, optimization, zenith angle

For citation: Alieva A.J., Alieva Kh.S., Ashrafov M.G., Mustafazade N.Kh. Optimization of albedometric measurements using an unmanned aerial vehicle. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):68–75. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-8

Введение

Важность исследования энергобаланса всей планеты обусловила проведение масштабных работ по измерению альbedo земной поверхности спутниковыми средствами [1, 2]. В настоящее время спутниковые средства позволяют осуществлять такие измерения с периодом 2–3 дней и пространственным разрешением от 10 м (*Sentinel 2*) до нескольких сантиметров (*Digital Globe*) [3–6]. Вместе с тем результаты спутниковых измерений подвержены влиянию атмосферных условий. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) свободны от этого недостатка и при хорошем энергообеспечении позволяют проводить альбедометрические измерения на площади $0,01 \div 100 \text{ км}^2$ [7]. БПЛА, оснащенные миниатюрными мультиспектрометрами, вырабатывают спектральную информацию в виде *DN* с 8-битовой разрядностью [8–11]. Эффект виньетирования приводит к тому, что *DN*-данные, выданные мультиспектрометром в отдельных спектральных каналах, оказываются в нелинейной зависимости от показателей отражения реальных объектов. Этому способствуют также некоторые свойства камеры, построенной на базе матриц элементов с зарядовой связью (*CCD*), используемых в мультиспектрометрах [12].

Как отмечается в работе [13], определение альbedo с применением БПЛА проходит через три этапа. На первом этапе необходимо осуществить радиометрическую калибровку *DN*-данных мультиспектрометра. На втором этапе откалиброванные данные, т.е. реальные данные отражения объектов земной поверхности, корректируются по зенитному углу положения БПЛА относительно исследуемого объекта на поверхности Земли. Указанный зенитный угол легко может быть вычислен на бортовом процессоре БПЛА, имея для этого координаты БПЛА и исследуемой точки на поверхности Земли. На третьем этапе полученные узкоспектральные альbedo определенным образом формируются в широкополосное альbedo.

Вкратце охарактеризуем указанные этапы формирования широкополосного альbedo.

Согласно статье [13] экспериментально установлено, что на первом этапе между необработанными *DN*-данными и реальными значениями отражения существует логарифмическая связь, т.е.

$$Z = a [\ln(x+1)]^b, \quad (1)$$

где *Z* – необработанные *DN*-данные; *x* – отражение земных объектов; *a*, *b* – постоянные величины. Во втором этапе осуществляется коррекция *Z* по реальному зенитному углу положения БПЛА относительно исследуемой точки. На третьем этапе осуществляется линейно взвешенное суммирование узкополосных альbedo для получения относительно широкополосного альbedo [13], подобно тому, что осуществлялось для спутниковых измерений [14]. Настоящая статья посвящена анализу и оптимизации второго вышеуказанного этапа формирования оценок узкополосных альbedo.

Материалы и методы

Как сообщается в работе [15], идеальное устройство, измеряющее альbedo, должно учесть зенитный угол положения БПЛА относительно исследуемой точки. Если учесть, что зенитный

угол своим изменением существенно влияет на выходные показатели мультиспектрометра (рис.1) и такое влияние отражается на значениях DN , выдаваемых спектрометрами, в качестве необработанных данных, то уравнение (1) в случае линеаризации кривой, показанной на рис. 1, может быть представлено в виде

$$Z = \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right) \cdot a [\ln(x+1)]^b, \quad (2)$$

где β – текущий зенитный угол; β_0 – максимальная величина β . С учетом выражения (2) задача исследования формулируется следующим образом: следует определить тип зависимости $x = x(\beta)$, при которой суммарная величина Z могла бы достичь экстремума.

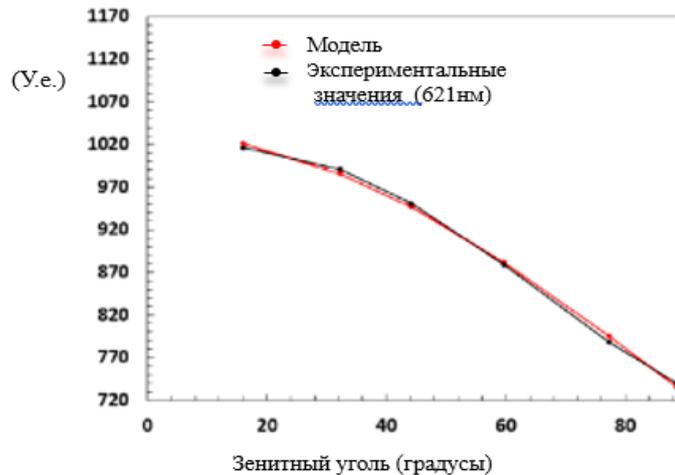


Рис. 1. Зависимость показаний мультиспектрометра (в условных единицах) в зависимости от зенитного угла на длине волны 621 нм [15]

Для решения данной задачи анализируются следующие показатели:

– функциональная зависимость показания спектрометра от угла зенита позиции БПЛА относительно исследуемой точки на поверхности Земли

$$X = X(\beta); \quad (1)$$

– функционал оптимизации в виде

$$F_1 = \int_0^{\beta_0} \left(1 - \frac{\beta}{\beta_0}\right) a [\ln(x(\beta)+1)]^b; \quad (3)$$

– ограничительное условие, задаваемое на вновь введенную функцию $x(\beta)$ в виде

$$\int_0^{\beta_0} x(\beta) d\beta = C. \quad (4)$$

Физический смысл ограничения (4) заключается в интегральной однородности рассматриваемого поля в отношении его оптических показателей в направлении сканирования поля. Функционал цели сформируем следующим образом:

– введя новый показатель Z_1 , выражение (2) перепишем в виде

$$Z_1 = \sqrt[b]{\frac{Z}{a}} = \sqrt[b]{1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)} \ln(x+1); \quad (5)$$

– с учетом выражения (5) функционал цели имеет вид

$$F_2 = \int_0^{\beta_{\max}} Z_1 d\beta = \int_0^{\beta_{\max}} \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \ln[x(\beta)+1] d\beta. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом выражений (4) и (6) можно составить задачу безусловной вариационной оптимизации целевого функционала, который приобретает следующий вид:

$$F_3 = \int_0^{\beta_0} \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}]^b \cdot \ln[x(\beta)+1] d\beta + \lambda \left[\int_0^{\beta_0} x(\beta) d\beta - C \right]. \quad (7)$$

Решение задачи (7) в соответствии с работой [16] должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}]^b \ln[x(\beta)+1] + \lambda x(\beta) \right\}}{dx(\beta)} = 0. \quad (8)$$

Из условия (8) получаем

$$\sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}]^b \frac{1}{x(\beta)+1} + \lambda = 0. \quad (9)$$

Из выражение (9), вводя обозначение

$$\phi(\beta) = \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}]^b, \quad (10)$$

запишем

$$\frac{\phi(\beta)}{x(\beta)+1} = \lambda. \quad (11)$$

Из выражения (11) находим

$$x(\beta) = - \left(1 + \frac{\phi(\beta)}{\lambda} \right). \quad (12)$$

С учетом выражений (4) и (12) получим

$$- \int_0^{\beta_0} \left(1 + \frac{\phi(\beta)}{\lambda} \right) d\beta = C. \quad (13)$$

Из выражения (13) находим

$$\lambda = \frac{- \int_0^{\beta_0} \phi(\beta) d\beta}{C + \beta_0}. \quad (14)$$

Из выражений (11) и (14) получим

$$x(\beta) = \frac{\phi(\beta)(C + \beta_0)}{\int_0^{\beta_0} \phi(\beta) d\beta} - 1. \quad (15)$$

Выражение (15) перепишем в виде

$$x(\beta) = \phi(\beta) \cdot C_1 - 1, \quad (16)$$

где

$$C_1 = \frac{(C + \beta_0)}{\int_0^{\beta_0} \phi(\beta) d\phi} = \frac{C_1 + \beta_0}{\int_0^{\beta_0} \sqrt[1-\frac{\beta}{\beta_0}]^b d\beta}. \quad (17)$$

При решении (16), (17) функционал (7) достигает максимума, так как производная выражения (9) по искомой функции оказывается всегда отрицательной величиной. Далее рассмотрим вопрос об изменении DN в оптимальном режиме. С учетом выражений (5) и (16) получим

$$Z_1 = \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \cdot \ln \left[C_1 \cdot \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \right]. \quad (18)$$

С учетом выражений (5) и (18) получим

$$\sqrt[b]{\frac{Z}{a}} = \sqrt[b]{1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)} \cdot \ln \left[C_1 \sqrt[b]{1 - \frac{\beta}{\beta_0}} \right]. \quad (19)$$

Из выражения (19) находим

$$Z = a \cdot \left[1 - \frac{\beta}{\beta_0} \right] \cdot \left[\ln \left(C_1 \sqrt[b]{1 - \left(\frac{\beta}{\beta_0}\right)} \right) \right]^b. \quad (20)$$

При нулевом зенитном угле получим

$$Z = a \left[\ln(C_1) \right]^b. \quad (21)$$

Как видно из выражения (17), с увеличением b растет и значение C_1 . При этом однозначно растет и Z .

Следовательно, при прочих равных условиях Z достигнет максимальной величины в том случае, если b имеет наивысшее значение.

Для подтверждения указанного заключения были проанализированы данные зависимости Z от значений x , приведенные в работе [13].

В табл. 1 приведены значения показателей Z , b при $x = 0,4$, извлеченные из вышеуказанных данных, приведенных в работе [13].

Таблица 1

Значения показателей Z и b

Показатели	Z	b
2а	165	0,2953
2б	165	0,2982
2с	170	0,3203
2д	160	0,2815
2е	160	0,2850
2ф	165	0,2963

Как видно из данных, приведенных на табл. 1, наивысшие значения Z достигаются при максимальной величине b , что подтверждает результаты проведенной оптимизации.

Обсуждение

Сформирована и решена задача оптимизации альбедометрических измерений с применением мультиспектрометра, установленного на БПЛА. Учтено наличие логарифмической связи между необработанными DN -данными и реальным показателем отражения земных объектов в красном, зеленом и синем спектральных диапазонах. Также учитывается смоделированная линейно спадающая характеристика зависимости показания мультиспектрометра от зенитного угла. Объектом поиска является оптимальная зависимость показателя отражения земных объектов от зенитного угла позиции БПЛА относительно исследуемой точки на поверхности Земли. При указанной оптимальной зависимости целевой функционал в виде интегрированной величины DN по всему диапазону изменения зенитного угла должен достичь максимума с учетом некоторого ограничительного условия, наложенного на данную зависимость. С применением вариационного метода оптимизации вычислен оптимальный вид указанной зависимости.

Показано, что результаты проведенной оптимизации косвенно подтверждаются данными известных экспериментальных исследований.

Заключение

Проведена оптимизация альбедометрических измерений на узкополосном спектральном канале с учетом зависимости выходного показателя мультиспектрометра от угла позиции БПЛА относительно исследуемой точки на поверхности Земли.

Определен оптимальный вид зависимости реального показателя отражения земных объектов от зенитного угла угла сканирования.

Результаты проведенной оптимизации косвенно подтверждаются результатами известных экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo // *Algorithms. Remote Sens. Environ.* 2001. Vol. 76. P. 213–238.
2. Hock R. Glacier melt: A review of processes and their modelling // *Prog. Phys. Geogr.* 2005. Vol. 29. P. 362–391.
3. Jin Y., Schaaf C. B., Gao F. [et al.]. How does snow impact the albedo of vegetated land surfaces as analyzed with MODIS data? // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. P. 1374–1384.
4. Myhre G., Kvalevåg M. M., Schaaf C. B. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data // *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29. P. 1374.
5. Jin Y., Randerson J. T., Goetz S. J. [et al.]. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2012. Vol. 117. G01036.
6. Cescatti A., Marcolla B., Vannan S. K. [et al.]. Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global FLUXNET network // *Remote Sens. Environ.* 2012. Vol. 121. P. 323–334.
7. Fernandes T., Perez J. L., Cardenal J. [et al.]. Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques // *Remote Sens.* 2016. Vol. 8, 8AP.37.
8. Saari H., Pellikka I., Pesonen L. [et al.]. Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications // *Proc. SPIE.* 2011. Vol. 8174. P. 466–471.
9. Johnson L. F., Herwitz S., Dunagan S. [et al.]. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV // *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment.* Beijing, 2003. Vol. 2–3. P. 22–26.
10. Berni J. A. J., Suarez L., Fereres E. Remote Sensing of Vegetation from UAV Platforms Using Lightweight Multispektral and Thermal Imaging Sensors. URL: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/1.4.7-W5/paper/Jimenes.Berni-155.pdf> (accessed on 21 March 2016).
11. Zahavi R. A., Dandois J. P., Holl K. D. [et al.]. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery // *Biol. Conserv.* 2015. Vol. 186. P. 287–295.
12. Ryan J., Hubbard A., Box J. E. [et al.]. Derivation of High Spatial Resolution Albedo from UAV Digital Imagery: Application over the Greenland Ice Sheet // *Front. Earth Sci.* 2017. Vol. 5. doi: 10.3389/feart.2017.00040
13. Liang Sh., Shuey Ch. J., Russ A. L. [et al.]. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation // *Remote sensing of environment.* 2009. Vol. 84. P. 25–41. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00068-8
14. Boehmler J. M., Loria-Salazar S. M., Stevens C. [et al.]. Development of a Multispektral Albedometer and Deployment on an Unmanned Aircraft for Evaluating Satellite Retrieved Surface Reflectance over Nevada's Black Rock Desert // *Sensors.* 2018. doi:10.3390/s18103504
15. Эльсгольд Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. 472 с.

References

1. Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo. *Algorithms. Remote Sens. Environ.* 2001;76:213–238.
2. Hock R. Glacier melt: A review of processes and their modelling. *Prog. Phys. Geogr.* 2005;29:362–391.
3. Jin Y., Schaaf C.B., Gao F. et al. How does snow impact the albedo of vegetated land surfaces as analyzed with MODIS data? *Geophys. Res. Lett.* 2002;29:1374–1384.
4. Myhre G., Kvalevåg M.M., Schaaf C.B. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data. *Geophys. Res. Lett.* 2002;29:1374.
5. Jin Y., Randerson J.T., Goetz S.J. et al. The influence of burn severity on postfire vegetation recovery and albedo change during early succession in North American boreal forests. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2012;117:G01036.

6. Cescatti A., Marcolla B., Vannan S.K. et al. Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global FLUXNET network. *Remote Sens. Environ.* 2012;121:323–334.
7. Fernandes T., Perez J.L., Cardenal J. et al. Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques. *Remote Sens.* 2016;8:8AP.37.
8. Saari H., Pellikka I., Pesonen L. et al. Aerial Vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications. *Proc. SPIE.* 2011;8174:466–471.
9. Johnson L.F., Herwitz S., Dunagan S. et al. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV. *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment.* Beijing, 2003;2–3:22–26.
10. Berni J.A.J., Suarez L., Fereres E. *Remote Sensing of Vegetation from UAV Platforms Using Lightweight Multispektral and Thermal Imaging Sensors.* Available at: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/1-4-7-W5/paper/Jimenes-Berni-155.pdf> (accessed on 21 March 2016).
11. Zahavi R.A., Dandois J.P., Holl K.D. et al. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. *Biol. Conserv.* 2015;186:287–295.
12. Ryan J., Hubbard A., Box J.E. et al. Derivation of High Spatial Resolution Albedo from UAV Digital Imagery: Application over the Greenland Ice Sheet. *Front. Earth Sci.* 2017;5. doi: 10.3389/feart.2017.00040
13. Liang Sh., Shuey Ch.J., Russ A.L. et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote sensing of environment.* 2009;84:25–41. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00068-8
14. Boehmler J.M., Loria-Salazar S.M., Stevens C. et al. Development of a Multispektral Albedometer and Deployment on an Unmanned Aircraft for Evaluating Satellite Retrieved Surface Reflectance over Nevada's Black Rock Deser. *Sensors.* 2018. doi:10.3390/s18103504
15. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie = Differential equations and calculus of variations.* Moscow: Nauka, 1974:472. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Амида Джабраиль гызы Алиева

кандидат технических наук, главный специалист,
ученый секретарь,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: amidec.b@mail.ru

Amida Jabrail gizi Alieva

Candidate of technical sciences, chief specialist,
scientific secretary,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Хумар Сабир гызы Алиева

кандидат технических наук, доцент,
главный научный сотрудник НИИ
Аэрокосмической информатики,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: a.xumar555@mail.ru

Khumar Sabir gizi Alieva

Candidate of technical sciences, associate professor,
head scientific researcher of Research Institute
of Aerospace Informatics,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Мурад Горхмаз оглы Ашрафов

докторант,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: esrefov9955@gmail.com

Murad Gorkhmaz oglu Ashrafov

Doctoral student,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Наира Хансувар гызы Мустафаде

кандидат технических наук, ученый секретарь,
Институт космических исследований
природных ресурсов,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: nm_609@mail.ru

Naira Khansuvar gizi Mustafazade

Candidate of technical sciences, scientific secretary,
Institute for Space Research,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования/Revised 06.08.2024

Принята к публикации/Accepted 02.09.2024