

— ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ —

УДК 631.445

*Т.И. оглы Сулейманов¹, К.Х. оглы Исмаилов², И.Э. оглы Мамедов¹*¹ Национальное аэрокосмическое агентство, г.Баку, Азербайджан² Национальная академия авиации, г.Баку, Азербайджан.**ИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ И ВАЛИДАЦИИ
СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ БПЛА**

Аннотация. Рассмотрена возможность осуществления калибровки и валидации спутниковых данных дистанционного зондирования с помощью спектрометрической аппаратуры установленной на БПЛА. Реализация общей идеи использования сенсоров БПЛА для калибровки и валидации сенсоров, установленных на спутниках требует решения ряда технических и методологических задач. Отмечена нарастающая тенденция осуществления калибровки и валидации сенсоров спутников дистанционного зондирования с помощью сенсоров, устанавливаемых на БПЛА. При этом должны быть приняты во внимание следующие различия между сенсорами спутников и БПЛА – пространственные разрешение на земле у сенсора БПЛА намного шире, чем у спутникового сенсора, кроме того, пространственный охват спутника намного шире, чем у БПЛА. Вышеуказанные причины приводят к сильной коррелированности данных спутникового сенсора при исследовании гомогенных наземных растительных полей, по сравнению с данными БПЛА. Это объясняется фильтрацией высокочастотных составляющих сигнала, формируемого оптической системой сенсора спутника на инерционных фотоприемниках дискретной структуры. Указанная неидентичность статистических показателей сенсоров БПЛА и спутника приводит к необходимости решения следующей методологической задачи: Какова должна быть временная длительность проведения измерений с помощью БПЛА, чтобы обеспечить достоверную валидацию и калибровку сенсоров спутника с помощью средств, установленных на БПЛА. Предложена методика выбора режимных показателей сенсоров БПЛА, используемого для валидации и калибровки сенсоров в спутников. Предложенная методика основана на информационном критерии Темникова и позволяет определить режимные показатели полета БПЛА, используемых для проведения калибровки. Разработана методика вычисления основных показателей полета БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, дистанционное зондирование, калибровка, валидация, спектрометр, гиперспектрометр.

СУЛЕЙМАНОВ Тофик Инаят оглы – д.т.н., проф., зам. ген. директора по науке Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджан.

E-mail: suleymanovti55@mail.ru

SULEIMANOV Tofik Inaiat oglu – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Deputy Director on Science, National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan.

E-mail: suleymanovti55@mail.ru

ИСМАЙЛОВ Камал Хейраддин оглы – д.т.н., доцент Национальной академии авиации, г. Баку, Азербайджан.

E-mail: ismaylov.kamal@mail.ru

ISMAYLOV Kamal Kheyreddin oglu – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Academy of Aviation, Baku, Azerbaijan.

E-mail: ismaylov.kamal@mail.ru

МАМЕДОВ Илкин Эльбрус оглы – аспирант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджан.

E-mail: mamedovilkin@rambler.ru

MAMEDOV Ilkin Elbrus oglu – post-graduate student, National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan.

E-mail: mamedovilkin@rambler.ru

T.I. oglu Suleimanov¹, K.Kh. oglu Ismailov², I.El. oglu Mamedov¹

¹ National Aerospace Agency, Baku, Azerbaijan

² National Academy of Aviation, Baku, Azerbaijan

Information Method for Calibration and Validation of Satellite Data Using Drones

Abstract. The possibility for carrying out of calibration and validation of satellite remote sensing data using the spectroradiometric instruments installed on the drone is considered. Realization of general idea concerning utilization of drone sensors for calibration and validation of satellites sensors requires solution of some technical and methodological tasks. The increasing tendency of carrying out of calibration and validation of satellite remote sensing sensors with the help of drone sensors is noted. In this case, following differences between sensors of satellites and drones should be taken into account – the spatial resolution of drone sensors is much better than that of satellites. Besides, the spatial scope of satellite is broader than that of drones. Above mentioned causes lead to strong correlation of satellites sensors data upon research of homogenic on-earth vegetation fields in comparison with drones data. This can be explained by filtration of high frequency components of signals formed by optical system of satellite sensors containing inertial photo receiver of matrix structure. The said non-identity property of statistical characteristics of drones and satellites sensors lead to necessity of solving the following methodology task what should be duration of measurements carried out by drones in order to provide for the authentic validation and calibration of satellite sensors using drones instruments. The method for selection of regime parameters of drone sensors used for validation and calibration of satellites sensors is developed. The suggested methodology is based on Temnikov's information criterion and allows defining the regime parameters of the drone flight used for calibration. The method for calculation of major parameters of drone flight is developed.

Keywords: drones, remote sensing, calibration, validation, spectroradiometer, hyper spectrometer.

Введение

Как сообщается в работе [1], данные, получаемые с термальных камер и спектрорадиометров, установленных на БПЛА позволяют осуществить калибровку и валидации спутниковых данных полученных от ASTER и LANDSAT 8. Использование БПЛА в указанных целях особенно важно при организации спутникового контроля за состоянием вулканов, где должны быть дистанционно измерены такие показатели как температура, давление, концентрации SO₂, H₂S, CO₂ с GPS привязкой к местности. Вопросы использования БПЛА для калибровки и валидации спутниковых данных также рассмотрены в работах [2-9]. Как отмечается в этой работе, для осуществления викариозной калибровки сенсоров установленных на спутниках дистанционного зондирования используются два гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазона. Это обуславливает высокие точностные требования, которые выставляются к метрологическим характеристикам аппаратуры, устанавливаемой на БПЛА.

Современное состояние вопроса

В работе [10] сообщается о возможности использования БПЛА для калибровки и валидации данных спутника GOES – 16 находящейся на геостационарной орбите высотой 22.300 миль. Следует отметить, что использование БПЛА для калибровки и валидации спутниковых сенсоров дистанционного зондирования становится все более развивающимся направлением в общей теории и практики обеспечения достоверности и результатов дистанционного зондирования земли с космоса. С технической стороны такая тенденция поддерживается появлением малогабаритных сенсоров, обладающих достаточно высокими метрологическими характеристиками [11, 12]. Так, например, в работе [13], сообщается о разработке малогабаритного гиперспектрометра спектрального диапазона 338-824 нм с разрешением 3 нм.

Согласно [14], еще в 2003 г. был разработан малогабаритный гиперспектрометр со спектральным диапазоном 480-880нм, со спектральным разрешением 1нм для установки на БПЛА, осуществляющую контроль за созреванием сельскохозяйственной продукции.

Технические и методологические задачи использования БПЛА

Вместе с тем, реализация общей идеи использования сенсоров БПЛА для калибровки и валидации сенсоров, установленных на спутниках требует решения ряда технических и

методологических задач. Технические задачи, заключающиеся в повышении метрологических характеристик сенсоров БПЛА, решаются достаточно успешно, что можно увидеть на таблице сравнительных данных гиперспектрометров, устанавливаемых в настоящее время на БПЛА, самолетах и на спутниках [12].

Таблица

Сравнительные данные гиперспектрометров

	БПЛА	САМОЛЕТ	СПУТНИК
Платформа	Mikrokarter Okto XL	Sky Arrow 650 TC/P68	Rapid Eye
Камера	Tetracam ADC lite	AS PIS	REIS
Количество каналов	3	12	5
Охватываемый диапазон длин волн	526 – 900 nm	415 – 910 nm	440 – 850 nm
Размеры	114 x 77 x 22 мм	270 x 250 x 20мм	656 x 361 x 824 мм
Вес	0,2 кг	10 кг	62 кг
Разрешение	2048 x 1536	2048 x 2048	12000 пикселей линейка на каждом диапазоне
Разрешение на земле	0,05 м/пиксель	0,05 м/пиксель	5 м/пиксель
Размер изображения на земле	116,5 x 87,5 м	1024 x 1024 м	77 x 45 км

Как видно из данных, приведенных на таблице, характеристики сравниваемых устройств сильно различаются в таких показателях как разрешение на Земле и размер изображения на Земле, что в свою очередь приводит к появлению некоторых методологических проблем при решении задачи использования БПЛА для калибровки и валидации спутниковых данных.

Основным из таких методологических проблем является появляющиеся различия в статистических показателях исследуемых идентичных сцен. Так, ширина гистограмм измеренных величин NDVI для БПЛА составила $0,2 \div 0,9$; для самолета $0,3 \div 0,7$; для спутника $0,5 \div 0,65$ (рис. 1) [12].

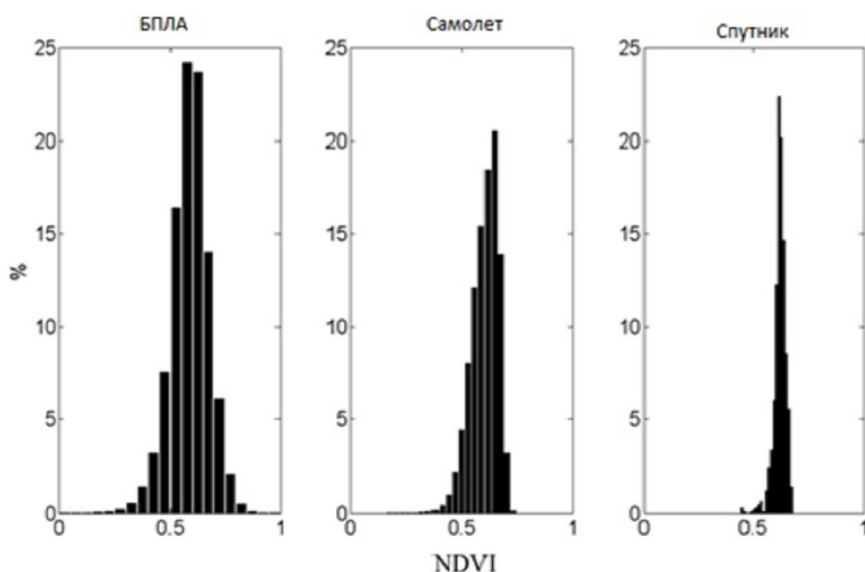


Рис. Гистограммы измеренных величин NDVI с помощью сенсоров БПЛА (слева), самолета (середина) и спутника (справа) [11]

Как видно из гистограмм, приведенных на (рис. 1), гистограмма данных спутника намного уже, чем гистограмма данных БПЛА, что обусловлена следующими причинами:

1. Пространственные разрешение на земле у сенсора БПЛА намного лучше, чем у спутникового сенсора.

2. Пространственный охват спутника намного шире, чем у БПЛА.

Вышеуказанные причины приводят к сильной коррелированности данных спутникового сенсора при исследовании гомогенных наземных растительных полей, по сравнению с данными БПЛА. Это объясняется фильтрацией высокочастотных составляющих сигнала, формируемого оптической системой сенсора спутника на инерционных фотоприемниках дискретной структуры.

Указанная неидентичность статистических показателей сенсоров БПЛА и спутника приводит к необходимости решения следующей методологической задачи: Какова должна быть временная длительность проведения измерений с помощью БПЛА, чтобы обеспечить достоверную валидацию и калибровку сенсоров спутника с помощью средств, установленных на БПЛА. Базовым положением предлагаемого критерия является следующее равенство

$$M_{SS} = M_{UAV} \tag{1}$$

где: M_{SS} – количество информации, вырабатываемой сенсором спутника за период пролета спутника над исследуемым полем; M_{UAV} – тоже для БПЛА.

Изложим математическое решение с формулированной задачи. Используя известное определение количества информации Шеннона можем записать следующие выражения

$$M_S = \frac{T_s}{\Delta t_s} \cdot \log_2 \left[\frac{v_s \cdot m}{\Delta v_s} + 1 \right] \tag{2}$$

$$M_D = \frac{T_d}{\Delta t_d} \cdot \log_2 \left[\frac{v_d \cdot m}{\Delta v_d} + 1 \right] \tag{3}$$

где: T_s, T_d – длительности съема информации с исследуемого поля с помощью спутника и БПЛА соответственно;

$\Delta t_s, \Delta t_d$ – временные дискреты съема информации спутника и БПЛА соответственно;

$U_{s,m}, U_{d,m}$ – максимальные значения измерительного сигнала спутника и БПЛА соответственно;

$\Delta U_s, \Delta U_d$ – кванты сигналов спутника и БПЛА соответственно;

Как было отмечено, измерительные сигналы спутника и БПЛА коррелированы в разной степени. Если аппроксимировать эти сигналы нормальным Марковским процессом с нормированной корреляционной функцией в виде

$$R(\tau) = e^{-\alpha/2\tau} \tag{4}$$

где: τ – временной шаг; α – показатель степени корреляции в сигнале, то используя известный среднеквадратичный критерий Темникова Ф.Е. легко можем получить следующие уравнения [14, 15]

$$\tau_s = \frac{1}{\alpha_s} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\bar{\epsilon}_s^2}{2B_s(\sigma)}} \right] \tag{5}$$

$$\tau_d = \frac{1}{\alpha_d} \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\bar{\epsilon}_d^2}{2B_d(\sigma)}} \right] \tag{6}$$

где: $\bar{\epsilon}_s, \bar{\epsilon}_d$ среднеквадратичные погрешности квантования.

С учетом выражений (1), (2), (3), (4), (5), (6) запишем

$$T_D = k \cdot T_S \tag{7}$$

$$K = \frac{\alpha_s \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\bar{\varepsilon}_d^2}{B_d(o)}} \right] \log_2 \left(\frac{v_{s \cdot m}}{\Delta v_s} \right)}{\alpha_d \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\bar{\varepsilon}_s^2}{B_s(o)}} \right] \log \left(\frac{v_{d \cdot m}}{\Delta v_d} + 1 \right)} \quad (8)$$

где:

Приняв равенства

$$\varepsilon_s = \Delta v_s$$

$$\varepsilon_d = \Delta v_d$$

$$B_d(o) = \beta \cdot v_{d \cdot m}$$

$$B_s(o) = \beta \cdot v_{s \cdot m}$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{8}}$$

$$N_d = \frac{v_{d \cdot m}}{\Delta v_d}$$

Выражение (8) запишем в следующем виде.

$$K = \frac{C_1 \cdot \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{1}{N_d^2}} \right]}{\alpha_d \cdot \log_2(N_d + 1)} \quad (9)$$

где: C_1 – обобщенный показатель измерительного сигнала спутника определяемый как:

$$C_1 = \frac{\alpha_s \cdot \log_2 \left(\frac{v_{s \cdot m}}{\Delta v_s} + 1 \right)}{\ln \left[\frac{1}{1 - \frac{\bar{\varepsilon}_s^2}{2B_s(o)}} \right]} \quad (10)$$

Отметить, что показатель C_1 характеризует информативные свойства измерительного сигнала спутника и в рассматриваемом контексте не подлежит изменению. Вместе с тем, как видно из выражения (9) величина коэффициента K сильно зависит от α_d и N_d , т.е. от показателя коррелированности измерительного сигнала БПЛА и от количества используемых квантов измерительного сигнала БПЛА.

Следовательно, для уменьшения T_D – следует увеличить количество квантов в сигнале и/или увеличить степень коррелированности сигнала БПЛА.

Методика выбора режимных показателей БПЛА

Таким образом, с учетом вышеизложенного, можно предложить следующую методику выбора режимных показателей сенсоров БПЛА, используемого для валидации и калибровки сенсоров в спутников:

1. Устанавливаются показатели T_s и C_1 характеризующие полетный режим спутника, а также сенсоров спутника и наземный полигон, используемый для калибровки и валидации.

2. По заданной величине T_D – временного ресурса, затрачиваемого на операции калибровки и валидации определяется величине K по формуле (9).

3 (а). Задаваясь величиной α_d , используя выражение (9) вычисляется необходимая величина N_d ; или

3 (б). Задаваясь величиной N_d вычисляется необходимая величина α_d .

4. Используя заданную или вычисленную по формуле (6) величину τ_d определяется скорость v передвижения БПЛА по формуле

$$v = \Delta l / \tau_d$$

где: Δl – пространственный шаг корреляции исследуемого объекта на полигоне

Заключение

В заключение сформулируем основные выводы и положения проведенного исследования:

1. Отмечена нарастающая тенденция осуществления калибровки и валидации сенсоров спутников дистанционного зондирования с помощью сенсоров, устанавливаемых на БПЛА, осуществляемых синхронный облет калибровочного полигона.
2. Предложен информационный критерий для определения режимных показателей полета БПЛА используемых для проведения калибровки.
3. Разработана методика вычисления режимных показателей полета БПЛА.

Литература

1. Geophysical Research Abstracts. – Vol. 19. – 2017.
2. Nemenyi M., Milics G. Precision agriculture technology and diversity // *Cereal Research Communications*. – 2007. – No 35. – P. 829-832.
3. Murakami E., Saraiya A.M., Ribeiro L.C.M., Cugnasca C.E., Hirakawa A.R., Correa P.L.P. An infrastructure for the development of distributed service-oriented information system for precision agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2007. – No 58. – P. 37-48.
4. Franke J., Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing // *Precision Agriculture*. – Vol. 8. – 2007. – P. 161-172.
5. Berni J.A.J., et al. 2009. «Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors.» *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci* 38: pp.6.
6. Chao Haiyang, et al. Band-reconfigurable multi-UAVbased cooperative remote sensing for real-time water management and distributed irrigation control // *IFAC World Congress, Seoul, Korea / IFAC Proceedings*. – Vol. 41, iss. 2. – 2008. – P. 11744-11749.
7. Hakala T., Honkavaara E., Saari H., Mäkynen J., Kaivosoja J., Pesonen L., Pölonen I. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions // *UAV-2013, 4-6 September 2013, Rostock, Germany*.
8. Ed. by G. Grenzdörffer R. Bill. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XL-1/W2)*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). doi: 10.5194/isprs archives-XL-1-W2-189-2013.
9. D.Potts. Hyper spectral imaging from Unmanned Aerial Vehicles for the Calibration and Validation of Earth Observation Satellites – *UCL Discovery* // (режим доступа: <http://discovery.ucl.ac.uk/1451799/>) дата обращения: 1.10.2017
10. Scientists Begin Field Campaign for NOAA's GOES – 16 // (режим доступа: <https://www.nesdis.noaa.gov/content/scientists-begin-field-campaign-noaa-%E2%80%99s-goes-16>) дата обращения: 1.10.2017
11. C.Tsouvaltsidis, N.Zaid Al Salem, G.Benari, D.Vrekalic and B.Quinea. Remote spectral imaging using a low cost UAV system // doi: 10.5194/isprs archives-XL-1-W4-25-2015
The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015
International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug-02 Sep 2015, Toronto, Canada
12. A.Matese, P.Toscano, S.F.D.Gennaro, L.Genesio, F.P.Vaccari, J.Primicerio, C.Belli, A.Zaldei, R.Bianconi, B.Gioli. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture // *Remote Sens.* – vol. 7, iss. 3. – 2015. – P.2971-2990; doi: 10.3390/rs70302971
13. von Bueren, Burkart A., Hueni A., Rascher U., Tuohy M.P., Yule I.J. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations // *Biogeosciences*. – Vol. 12, iss. 1. – 2015. – P. 163-175.
14. Johnson L.F., Herwitz S., Dunagan S., Lobitz B., Sullivan D., Slye R. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV // *Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. – Vol. 20. – 2003. – P. 845-849.
15. Крючковский В.В., Подмогильный Н.В. Контроль реализации принятых решений жизненного цикла решений // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація»*. – Вып. 17(148). – 2009. – С. 96-103.
16. Темников Ф.Е. Теоретические основы информационной техники: – М.: Энергия, 1971. – 424 с.

References

1. Geophysical Research Abstracts. – Vol. 19. – 2017.
2. Nemenyi M., Milics G. Precision agriculture technology and diversity // *Cereal Research Communications*. – 2007. – No 35. – P. 829-832.
3. Murakami E., Saraiava A.M., Ribeiro L.C.M., Cugnasca C.E., Hirakawa A.R., Correa P.L.P. An infrastructure for the development of distributed service-oriented information system for precision agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2007. – No 58. – P. 37-48.
4. Franke J., Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing // *Precision Agriculture*. – Vol. 8. – 2007. – P. 161-172.
5. Berni J.A.J., et al. 2009. «Remote sensing of vegetation from UAV platforms using lightweight multispectral and thermal imaging sensors.» *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci* 38: pp.6.
6. Chao Haiyang, et al. Band-reconfigurable multi-UAVbased cooperative remote sensing for real-time water management and distributed irrigation control // *IFAC World Congress, Seoul, Korea / IFAC Proceedings*. – Vol. 41, iss. 2. – 2008. – P. 11744-11749.
7. Hakala T., Honkavaara E., Saari H., Mäkynen J., Kaivosoja J., Pesonen L., Pölonen I. Spectral imaging from UAVs under varying illumination conditions // *UAV-2013, 4–6 September 2013, Rostock, Germany*.
8. Ed. by G. Grenzdörffer R. Bill. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XL-1/W2)*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS). doi: 10.5194/isprs archives-XL-1-W2-189-2013.
9. D.Potts. Hyper spectral imaging from Unmanned Aerial Vehicles for the Calibration and Validation of Earth Observation Satellites – UCL Discovery // (rezhim dostupa: <http://discovery.vcl.ac.uk/1451799/>) data obrashhenija: 1.10.2017: 1.10.2017.
10. Scientists Begin Field Campaign for NOAA's GOES – 16 // (rezhim dostupa: <https://www.nesdis.noaa.gov/content/scientists-begin-field-campaign-noaa-%E2%80%99s-goes-16>) data obrashhenija: 1.10.2017.
11. C.Tsouvaltsidis, N.Zaid Al Salem, G.Benari, D.Vrekalic and B.Quinea. Remote spectral imaging using a low cost UAV system // doi: 10.5194/isprs archives-XL-1-W4-25-2015
The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015
International Conference on Unmanned Aerial Vehicles in Geomatics, 30 Aug-02 Sep 2015, Toronto, Canada
12. A.Matese, P.Toscano, S.F.D.Gennaro, L.Genesio, F.P.Vaccari, J. Primicerio, C.Belli, A.Zaldei, R.Bianconi, B.Gioli. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture // *Remote Sens*. – Vol. 7, iss. 3. – 2015. – P. 2971-2990; doi: 10.3390/rs70302971
13. von Bueren, Burkart A., Hueni A., Rascher U., Tuohy M.P., Yule I.J. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations // *Biogeosciences*. – vol. 12, iss. 1. – 2015. – P.163-175.
14. Johnson L.F., Herwitz S., Dunagan S., Lobitz B., Sullivan D., Slye R. Collection of ultra high spatial and spectral resolution image data over California vineyards with a small UAV // *Proceedings of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. – Vol. 20. – 2003. – P. 845-849.
15. Kriuchkovskii V.V., Podmogil'nyi N.V. Kontrol' realizatsii priniatykh reshenii zhiznennogo tsikla reshenii // *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: «Obchislival'na tekhnika ta avtomatizatsiia»*. – Vyp. 17(148). – 2009. – С. 96-103.
16. Temnikov F.E. *Teoreticheskie osnovy informatsionnoi tekhniki*: – M.: Energiia, 1971. – 424 s.