



# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА  
АКАДЕМІЯ  
НАУК УКРАЇНИ

Том 28  
1 (134)  
2022

## SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ + ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. + ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК + КИЇВ

### ЗМІСТ

#### Астрономія та астрофізика

*Vavilova I. B., Khramtsov V., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu., Elyiv A. A., Melnyk O. V.* Machine learning technique for morphological classification of galaxies from SDSS. II. The image-based morphological catalogs of galaxies at  $0.02 < z < 0.1$  . . . . . 3

#### Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень

*Nihreieva O. O.* Міжнародно-правовий режим космічного простору: між *res communis* та *res nullius* . . . . . 23

#### Космічні матеріали та технології

*Gusarova I. O., Potapov O. M., Gorelov B. M., Manko T. A., Frolov G. O.* Композиційні термостійкі матеріали для багатофункціонального покриття . . . . . 43

*Poshtarenko Yu. A., Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khominich V. I., Shevchenko M. D.* Засоби вимірювання теплових потоків при термовакуумних дослідженнях та випробуваннях виробів космічної техніки . . . . . 51

#### Моніторинг космічного простору і космічне сміття

*Epishev V. P., Kudak V. I., Motrunich I. I., Perig V. M., Neubauer I. F., Prisyazhnyi V. I.* Визначення орієнтації штучного супутника Землі у випадку дифузного розсіювання світла його поверхнею . . . . . 61

#### Історія космічних досліджень

*Zhurilo D. Yu., Gutnyk M. V., Zhurilo A. G.* George Bothezat and his contribution into the world aviation and astronautics. . . . . 70

### CONTENTS

#### Astronomy and Astrophysics

*Vavilova I. B., Khramtsov V., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu., Elyiv A. A., Melnyk O. V.* Machine learning technique for morphological classification of galaxies from SDSS. II. The image-based morphological catalogs of galaxies at  $0.02 < z < 0.1$  . . . . . 3

#### Social Sciences in Space Exploration

*Nihreieva O. O.* The international legal regime of outer space: between *res communis* and *res nullius*. . . . . 23

#### Space Materials and Technologies

*Husarova I. O., Potapov O. M., Gorelov B. M., Manko T. A., Frolov G. O.* Composite heat-resistant materials for multifunctional coating. . . . . 43

*Poshtarenko Yu. A., Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khominich V. I., Shevchenko M. D.* Means of measurement of heat flows in thermal vacuum research and testing of products of space engineering . . . . . 51

#### Space Environment Monitoring and Space Debris

*Epishev V. P., Kudak V. I., Motrunich I. I., Perig V. M., Neubauer I. F., Prisyazhnyi V. I.* Determination of the orientation of the artificial Earth satellite in the case of diffusive scattering of light by its surface . . . . . 61

#### History of Space Research

*Zhurilo D. Yu., Gutnyk M. V., Zhurilo A. G.* George Bothezat and his contribution into the world aviation and astronautics. . . . . 70

*На першій сторінці обкладинки — Приклади галактик з деякими морфологічними ознаками (див. статтю Vavilova I. B. та ін. (С. 3—22)*

**Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук**

**Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО**

**Адреса редакції:** 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54  
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: [reda@mao.kiev.ua](mailto:reda@mao.kiev.ua)  
Веб-сайт: [space-scitechnjournal.org.ua](http://space-scitechnjournal.org.ua)

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.  
Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р.,  
Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

---

Підписано до друку 11.04.2022. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.  
Ум. друк. арк. 8,40. Обл.-вид. арк. 8,82. Тираж 100 прим. Зам. № 6582.

---

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України  
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.003>  
UDC 524.7+52-735

<sup>1,2</sup> **I. B. VAVILOVA**, Dr. Sci. Hab. in Phys.&Math., Prof.  
Head of the Department of the Extragalactic Astronomy and Astroinformatics  
E-mail: irivav@mao.kiev.ua  
<https://orcid.org/0000-0002-5343-1408>

<sup>3</sup> **V. KHRAMTSOV**, PhD student, Department of Astronomy & Space Informatics  
E-mail: vld.khramtsov@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-1744-7071>

<sup>1</sup> **D. V. DOBRYCHEVA**, PhD. in Phys.&Math.,  
Senior Scientist of the Department of the Extragalactic Astronomy and Astroinformatics  
E-mail: daria@mao.kiev.ua  
<https://orcid.org/0000-0001-5557-3453>

<sup>1,4</sup> **M. Yu. VASYLENKO**, PhD student,  
Junior Scientist of the Department of the Extragalactic Astronomy and Astroinformatics  
E-mail: vasmax@mao.kiev.ua  
<https://orcid.org/0000-0002-7714-0779>

<sup>1</sup> **A. A. ELYIV**, Ph.D. in Phys.&Math.,  
Senior Scientist of the Department of the Extragalactic Astronomy and Astroinformatics  
E-mail: andrii.elyiv@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-6215-1048>

<sup>1</sup> **O. V. MELNYK**, Ph.D. in Phys.&Math.,  
Senior Scientist of the Department of the Extragalactic Astronomy and Astroinformatics  
E-mail: melnykol@gmail.com

<sup>1</sup> Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine  
27 Akademik Zabolotny Str., Kyiv 03143 Ukraine

<sup>2</sup> Astronomical Observatory of the I. I. Mechnikov National University of Odesa  
1v, Marazliyivska Str., Odesa 65014 Ukraine

<sup>3</sup> Institute of Astronomy, V.N. Karazin Kharkiv National University  
35 Sumska Str., Kharkiv 61022 Ukraine

<sup>4</sup> Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine  
Nauka av., 46, Kyiv 02000 Ukraine

## MACHINE LEARNING TECHNIQUE FOR MORPHOLOGICAL CLASSIFICATION OF GALAXIES FROM SDSS. II. THE IMAGE-BASED MORPHOLOGICAL CATALOGS OF GALAXIES AT $0.02 < Z < 0.1$

---

*We applied the image-based approach with a convolutional neural network model to the sample of low-redshift galaxies with  $-24^m < M_r < -19.4^m$  from the SDSS DR9. We divided it into two subsamples, SDSS DR9 galaxy dataset and Galaxy Zoo 2 (GZ2) dataset, considering them as the inference and training datasets, respectively. To determine the principal parameters of galaxy morphology*

Цитування: Vavilova I. B., Khramtsov V., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu., Elyiv A. A., Melnyk O. V. Machine learning technique for morphological classification of galaxies from SDSS. II. The image-based morphological catalogs of galaxies at  $0.02 < z < 0.1$ . *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 1 (134). С. 03–22. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.003>

defined within the GZ2 project, we classified the galaxies into five visual types (completely rounded, rounded in-between, smooth cigar-shaped, edge-on, and spiral). Using GZ2 galaxy morphology classification, we were able to define 34 morphological features of galaxies from the inference set of our SDSS DR9 sample, which do not match with the GZ2 training set. As a result, we created the morphological catalog of 315782 galaxies at  $0.02 < z < 0.1$ , where morphological five classes and 34 detailed features were first defined for 216148 galaxies by image-based CNN classifier. For the rest of galaxies, the initial morphological classification was re-assigned as in the GZ2 project.

Our method shows the promising performance of morphological classification attaining  $>93\%$  of accuracy for five classes morphology prediction except the cigar-shaped ( $\sim 75\%$ ) and completely rounded ( $\sim 83\%$ ) galaxies. Main results are presented in the catalog of 27378 completely rounded, 59194 rounded in-between, 18862 cigar-shaped, 7831 edge-on, 23119 spiral low-redshift galaxies of the studied SDSS sample. As for the classification of galaxies by their detailed structural morphological features, our CNN model gives the accuracy in range 92–99% in depending on features, number of galaxies with the given feature in the inference dataset, and, of course, the galaxy image quality. As a result, for the first time we assigned 34 morphological detailed features (bar, rings, number of spiral arms, mergers, etc.) for more than 160000 low-redshift galaxies from the SDSS DR9. We demonstrate for the first time that implication of the CNN model with adversarial validation and adversarial image data augmentation improves classification of smaller and fainter SDSS galaxies with  $m_r < 17.7$ .

The proposed CNN model allows solving a bunch of galaxy classification problems, for example, such as a quick selection of galaxies with a bar, bulge, ring, and other morphological features for their subsequent analysis.

**Keywords.** Methods: data analysis, machine learning, convolutional neural networks; galaxies: general, morphological classification, galaxy catalogs, large-scale structure of the Universe.

---

## 1. INTRODUCTION

Since the beginning of extragalactic astronomy and the first catalogs of galaxies by Ch. Messier, F. W. Hershel and J. F. W. Hershel, J. L. E. Dreyer, the image-based morphological classifications of galaxies have played a vital role in reflecting the evolutionary history of various types of galaxies and the large-scale structure of the Universe as a whole (Davis et al. [26], Peebles [74], Barrow & Saich [8], Yang et al. [110], Bundy et al. [14], Peng et al. [75], Reid et al. [78], Leung et al. [60]).

Manual galaxy morphological classification as the most precise method requires extensive usage of human resources, either from highly skilled professionals or, in some cases, amateur astronomers and volunteers such as in the Galaxy Zoo (GZ) project [109]. Current and near-term galaxy observational surveys as the SDSS, LSST, DES, KiDS, SKA, the Euclid satellite, JWST, etc., are approaching the Exabyte scale multiwavelength databases of hundreds of millions of galaxies, which is impossible to classify manually. For instance, the Vera C. Rubin Observatory (LSST), which will be operated starting from 2022, is expected to generate about 30 TB of data per night, revealing  $\sim 20$  million galaxies over this time [49], more than the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) over its lifetime [10]. It is also worth mentioning the Euclid survey, which aims to detect billions of galaxies over 15,000 square degrees of the celestial sky

[3], and other big data astronomical projects (see, for example, a recent review of multiwavelength surveys and catalogs by Vavilova et al. [99]). Moreover, the human mind is not able to comprehend complex correlations in the diverse space of parameters, and multidimensional mathematical analysis is the best tool for determining the various common features between different types of objects. All that exaggerates the interest to use the alternatives in the form of machine learning (ML) techniques, including deep learning (DL), for the classification, forecasting, and discovery of various properties of galaxies (see, for example, [13, 43, 98]).

In this context, we note several recent prospective applications of Convolutional Neural Networks (CNNs) to classify the galaxies by their different parameters.

Cabayo et al. [15] have demonstrated the CNN capability to avoid distorting effects when extract the galaxy photometry from astronomical images as Lumos architecture. Exploiting the PAU imaging survey, the authors combined a CNN and a Mixture Density Network that allowed them to measure the photometry of a blended galaxy with the high accuracy. Diego et al. [29], in their work with DL in classifying early- and late-type galaxies in the OTELO and COSMOS databases, have used optical and infrared photometry and available shape parameters (the Sérsic index or the concentration index). Regardless of

slight differences in the photometric bands used in each catalog, their neural network architecture operates well with missing data.

The distance moduli and photometric redshift estimates benefit from the ML utilization into the big data sets, which provide a wide number of galaxy features for learning. Pasquet-Itam & Pasquet [72] used DL for classifying, detecting, and predicting photometric redshifts of quasars in SDSS. In works by Kugler & Gianniotis [58], Speagle & Eisenstein [88], Disanto et al. [30], Salvato et al. [82], and Elyiv et al. [42] the machine learning methods were applied to assign and predict photometric redshifts within large-scale galaxy surveys with good accuracy. The GAN approach serves as a basis for restoring galaxy distribution in the Zone of Avoidance (Schawinski et al. [85], Vavilova et al. [97]) and generating dark matter structures in cosmological simulations (Diakogiannis et al. [28]).

Among the CNNs modeling in tasks of multi-wavelength sky surveys we note as follows: search for blazar candidates in the Fermi-LAT Clean Sample [51]; boosted decision tree for detecting the faint gamma-ray sources with future Cherenkov Telescope Array [57, 81]; infrared color selection of Wolf-Rayet star candidates in our Galaxy using the Spitzer GLIMPSE catalog [70]; cosmic string searches in 21-cm temperature CMB maps [24]; neural network-based Faranoff-Riley classifications of radio galaxies from the Very Large Array archive [4]; deep learning classification of compact and extended radio source from Radio Galaxy Zoo project [62]; CNN for morphological assignment to radio-detected galaxies with active nuclei [64]. Scaife et al. in recent work presented the first application of group-equivariant CNN to radio galaxy and their image translations, rotations, and reflections [84].

Deep learning is promising for generating various synthetic catalogs and mock images, which helps to interpret the observational data [53] and to discover new galaxies as, for example, high- $z$  «blue nuggets» from the CANDELS survey [48]; to reveal structural properties of dark matter halos to their assembly history and environment [21]; to establish a topology of the large-scale structure of the Universe in LCDM cosmological simulation [90]; to separate the radiation from active galactic nuclei and star-forming gal-

axies with recognition method based on Deep Neural Network [19].

As for the discovery of new classes of celestial bodies with CNN, we highlight the works related to the gravitational lenses [50, 55] and the transient events and objects as supernovae, gamma-ray bursts, jets, etc. For example, the Catalina Real-Time Transient Survey serves as the platform for their detection and monitoring (see, for example, [31, 65–66]) as well as the Zwicky Transient Factory [9] as the LSST precursor and ML models implementation in synoptic sky surveys.

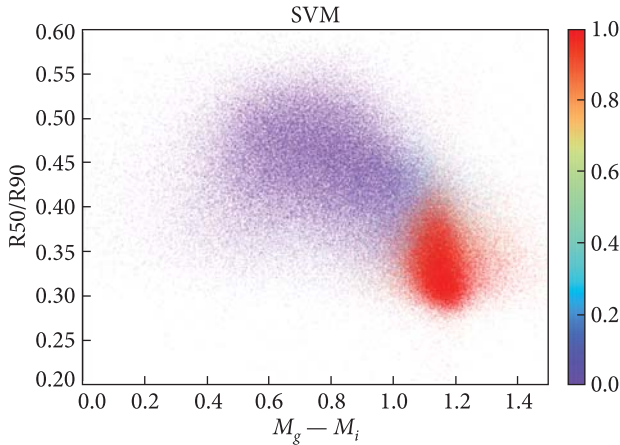
The CNN models have played a crucial role in analyzing data streams from the Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) detectors allowing to register gravitational wave signals from coalescing black hole binaries. Among such works are ones on the training an ML system for real-time glitch classification [111], on the classification of gravitational wave signals, events, and instrumental noise [45–46] as well as to test the theories on binary black hole mergers upon which the models are based [47].

So, CNNs reliably manage with tasks for a variety of image-based classification, regression, prediction, and discovery of galaxies and other celestial bodies (see, obstacle recent overviews by Baron [6], Fluke & Jacobs [43], Vavilova et al. [99]).

In our work, we used a deep CNN model for the image-based morphological classification of  $\sim 300000$  galaxies ( $0.02 < z < 0.1$ ) from SDSS DR9. To do this, we divided galaxies by their images [112] into five morphological classes (completely rounded, rounded in-between, cigar-shaped, edge-on, and spiral galaxies) as in the Galaxy Zoo 2 (GZ2) project. In our previous works [54, 93], we used binary classification but, as it turned out, it is difficult to correctly divide galaxies into two classes using the assigned label of galaxies from the GZ2. We investigate the problem of differences in these datasets and suggest ways to overcome adversarial validation. We also used our CNN model to predict 34 detailed structural morphological features (bar, ring, bulge, mergers, number of spiral arms, etc.) of these galaxies with were labeled in GZ2 project [107].

The structure of our paper is as follows. The sample of galaxies is described in Section 2. CNN model





**Fig. 1.** Diagram of color indices ( $g-i$ ) and inverse concentration indexes  $R50/R90$  of the studied low-redshift galaxies from the SDSS DR9 after applying the Support Vector Machine (SVM) method: red color — early E (from elliptical to lenticular) and blue color — late L (from S0a to irregular Im/BCG) morphological types. Color bar from 0 to 1 shows SVM probability to classify galaxy as the late to the early morphological type [98]

as the image morphological classifier, training and inference galaxy datasets are presented in Section 3. The created galaxy catalogs and results are given in Section 4 as well as discussion and conclusion in Section 5 and 6, respectively.

## 2. SAMPLE OF LOW-REDSHIFT GALAXIES FROM THE SDSS

We used a representative sample of the 316031 SDSS galaxies at  $0.02 < z < 0.1$  (with velocities correction on the velocity of Local Group,  $V_{LG} > 1500$  km/s). This sample was studied by us practically as “galaxy by galaxy” in previous works [18, 32–36, 41, 67, 77, 92–95, 98, 100, 105]. Our most previous research was to apply the ML photometry-based approach for binary morphological classification of these galaxies [98] and to create the catalog of their morphological types (early and late) obtained with the Support Vector Machine with an accuracy of 96.4 % [102].

The main stages in preparing this sample were as follows. A preliminary set of galaxies at  $z < 0.1$  with the absolute stellar magnitudes  $-24^m < M_r < -13^m$  from the SDSS DR9 contained of  $\sim 724000$  galaxies. Following the SDSS recommendation, we limited the sample to  $m_r < 17.7$  in  $r$ -band to avoid typical statis-

tical errors in spectroscopic flux. After excluding the images with stars and artifact objects as well as the duplicates of galaxy images, the final sample consisted of  $N = 315782$  galaxies. To clear the sample from segmented images of the same galaxy, we used our code based on the minimal angle distances between such SDSS objects. The absolute stellar magnitude of the galaxy was obtained by the formula

$$M_r = m_r - 5 \lg(D_L) - 25 - K_r(z) - ext_r,$$

where  $m_r$  is the visual stellar magnitude in  $r$ -band,  $D_L$  is the luminosity distance,  $ext_r$  is the Galactic absorption in  $r$ -band in accordance to [86],  $K_r(z)$  is the cosmological  $k$ -correction in  $r$ -band according to [22, 23]. The color indices were calculated as

$$M_g - M_i = (m_g - m_i) - (ext_g - ext_i) - (K_g(z) - K_i(z)),$$

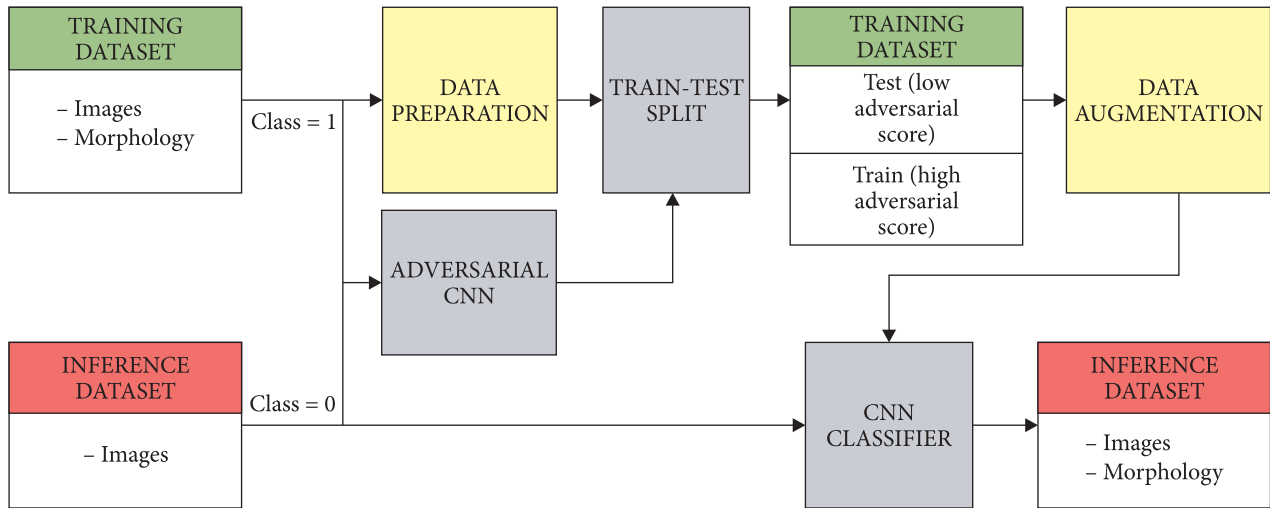
where  $m_g$  and  $m_i$  are visual stellar magnitude in  $g$ - and  $i$ -band;  $ext_g$  and  $ext_i$  are the Galactic absorption in  $g$ - and  $i$ -band;  $K_g(z)$  and  $K_i(z)$  are the  $k$ -correction in  $g$ - and  $i$ -band, respectively.

We found that Support Vector Machine gives the highest accuracy exploiting different galaxy classification techniques: human labeling, multi-photometry diagrams, and five supervised ML methods. Namely, 96.1 % early E and 96.9 % late L types of galaxies [98]. We verified dependencies between accuracy and redshifts, human labeling bias, the overlap of different morphological types for galaxies with the same color indices, edge-on and face-on galaxy shape to determine the ability of each method to predict the galaxy morphological type. Distribution of 315782 galaxies from the studied SDSS sample by their morphological type (early and late) is given in Fig. 1.

## 3. CNN MODELS FOR IMAGE-BASED MORPHOLOGICAL MULTI-LABEL CLASSIFICATION OF GALAXIES

The studied sample of 315782 galaxies from SDSS DR9 is tightly overlapped with the data from the Galaxy Zoo 2, GZ2 [109]. It allows us to divide it into two datasets: “*inference dataset*” of 143410 galaxies, which do not match with GZ2 dataset; “*training dataset*” of 172372 galaxies, which match the galaxies from our studied sample (Fig. 2).

For each galaxy from both datasets we have their SDSS images, but morphological classes are defined



**Fig. 2.** Block-scheme of the image-based classification of galaxies with CNN model for five morphological classes. Algorithm consists of the training/inference datasets, image data preparation, adversarial validation, special train-test split via adversarial scores, data augmentation, CNN classifier

only for galaxies from the training GZ2 dataset. The 315782 RGB images of galaxies were requested from the SDSS (<http://skyserver.sdss.org/dr15/en/help/docs/api.aspx##cutout>). They are composed of *gri*-bands [63] having color scaling, each of  $100 \times 100 \times 3$  pixels ( $39.6 \times 39.6$  arcsec) in each channel of the RGB image.

**3.1. Galaxy morphological image classification into five classes by shape.** It is important to note the principal difference between galaxy images in our inference dataset and the GZ2 training dataset. Galaxies from the inference dataset are much shallower than those from the GZ2 dataset. As we mentioned in Section 2, the galaxies from the studied sample were pre-selected via  $m_r < 17.7$  limit following the SDSS recommendation. This affects the value of the 90 % Petrosian flux parameter. Thereat, the galaxies, which do not match the GZ2 dataset, are fainter and smaller on average than galaxies from the training GZ2 dataset. To get around this problem, we used an adversarial CNN to compare these two datasets (training and inference). Namely, we trained it on all galaxy images of our sample, passing the class ‘0’ for the inference dataset and class ‘1’ for the training dataset (Fig. 2).

To develop the CNN model based on the images of galaxies, we used the GZ2 assigned labels for five morphological classes by shape: completely round-

ed, rounded in-between, cigar-shaped, edge-on, and spiral galaxies.

We provided additional data cleaning of 172372 galaxy images from the training sample and took into consideration only those galaxies for which GZ2’s volunteers gave the most votes for a more accurate result (Fig. 2). It turned out to be 72738 galaxies. The criteria for each image of the galaxy were defined in GZ2 project [109]; their description is available through web-site <https://data.galaxyzoo.org/>. The criteria with (\*\_count) prefix indicate the number of votes of volunteers; other criteria correspond to the debiased fraction of votes assigned in the GZ2 catalog as (\*\_debiased). So, we applied criteria for galaxies belonging to the five morphological classes by shape as follows

- completely rounded: smooth (number of votes  $>0.469$ ), completely\_round ( $>0.469$ ), smooth\_count ( $>25$ ), completely\_round\_count ( $>25$ );
- rounded in-between: smooth ( $>0.469$ ), rounded\_in\_between ( $>0.5$ ), smooth\_count ( $>25$ ), rounded\_in\_between\_count ( $>25$ );
- cigar-shaped: smooth ( $>0.469$ ), cigar\_shaped ( $>0.5$ ), smooth\_count ( $>25$ ), cigar\_shaped\_count ( $>25$ );
- edge-on: features\_or\_disk ( $>0.43$ ), edgeon\_yes ( $>0.602$ ), features\_or\_disk\_count ( $>25$ ), edgeon\_yes\_count ( $>25$ );

- spiral: features\_or\_disk (>0.43), edgeon\_no (>0.715), spiral (>0.619), features\_or\_disk\_count (>25), edgeon\_no\_count (>25), spiral\_count (>25).

These criteria with vote scores >0.4 and higher were found to be quite good for providing reliable image-based morphological classification of galaxies. The galaxy image data preparation and augmentation for our CNN model is described in detail in our paper [56].

The adversarial CNN resulted in the fact that the training dataset contains galaxies, which properties are not common with inference one. The useful parameter to solve this task is the adversarial score, which means the probability of the galaxy with some feature to be similar to the galaxy with the same feature from the GZ2 training set. So, we can test galaxies with a low adversarial score from the training dataset in a way to train them on galaxies with the high adversarial score from the training set (Fig. 2). On the step of this “train-test split”, we randomly selected ~9000 galaxies with an adversarial score less than 0.7 to test the CNN classifier (test-split training dataset), and the rest part of this dataset (~63000) to train the CNN classifier (train-split training dataset). Because this score is related to the presence of fainter and smaller galaxies in the inference galaxies, we have done the image data augmentation of galaxies from the training sample (we decreased the intensity of pixels and reduced the image size). Distribution of predicted labels vs. true labels of five morphologi-

cal classes for these ~9000 galaxies with the high adversarial score as the confusion matrix is shown in Table 1. One can see in Table 1 that our model for CNN classifier guarantees > 93 % of accuracy for rounded in-between, edge-on, and spiral morphological classes, 83 % for the completely rounded and 75 % for the cigar-shaped galaxies.

As a result of the CNN classifier, we got the morphological classes of 72738 galaxies from the training set as follows: 19468 completely rounded, 27321 rounded in-between, 3235 cigar-shaped, 4099 edge-on, and 18615 spiral galaxies.

Meanwhile, knowing the morphological class of galaxies from the training dataset, we are able to classify galaxies from the inference dataset with CNN. We compared a few CNN models for the five-class morphological classification. Following our previous works [54, 93] the best neural network for our task is DenseNet-201.

Our CNN model consists of two main parts. The first one is the convolutional part, where CNN performs the image processing with a gradually decreasing size. The highlight of CNN architectures is to use the fully connected layers at the tail. This tail corresponds to the neural network classifier, which transforms the output of the convolutional part into the dense layer, the number of neurons in which is equal to the number of classes (see, for example, <http://cs231n.stanford.edu/>). So, the second part of our model is the fully connected part, where the processed galaxy image comes through a few layers of connected neurons up to the last layer, consisting of five neurons, the output of which corresponds to the probability of a galaxy being one of five defined classes.

Our CNN model was completed by the two dense layers of neurons (with the number of neurons equal 128 and 5, respectively) and, after, by the global max-pooling. The activation functions at the tail of the CNN model were the same as in adversarial validation. As an optimizer, we used the ADAM with an initial learning rate of  $10^{-4}$ ; the optimizer minimized the categorical\_crossentropy loss function (see, in detail, [56]).

**3.2. Galaxy morphological multi-label classification by 34 features.** Besides classification into five morphological classes, the image galaxies from the training dataset attribute 37 parameters of the detailed morphology. They are estimated for each galaxy according

*Table 1. Distribution of predicted labels vs. assigned labels as the probabilities for galaxy to belong to one of five morphological classes (CNN classifier for test-split training galaxy dataset of 9000 galaxies). Each row represents the fraction of galaxies from a certain class (defined at the horizontal row) to be classified as galaxies from other classes*

True labels	Predicted labels				
	Completely rounded	Rounded in-between	Cigar-shaped	Edge-on	Spiral
Completely rounded	<b>0.83</b>	0.16	0	0.00038	0.012
Rounded in-between	0.054	<b>0.93</b>	0.0047	0.00025	0.015
Cigar-shaped	0	0.17	<b>0.75</b>	0.065	0.017
Edge-on	0	0.0076	0.049	<b>0.93</b>	0.0092
Spiral	0.0075	0.022	0.0017	0.0092	<b>0.96</b>



to volunteers' answers and form the decision tree [80, 109]. The principal restriction for classification with CNN is the presence of the only parameter, which characterizes this class of objects on an image [59]. We introduced the “similarity learning” approach: if two galaxies have similar images, then their morphological parameters are similar. In other words, we exploited the galaxy images from the training dataset, which are most similar to the galaxy images from the inference dataset by their 37 morphological detailed features. The algorithm is finding the nearest galaxies from the training dataset to the target galaxy of the inference dataset in the penultimate CNN layer of multi-parameter space and assigns the attributes of nearest neighboring galaxies to the target galaxy.

We also applied the adversarial validation to predict 37 detailed morphological features of galaxy images from the inference dataset with some adversarial score. The three very sparse features were removed from the consideration. So, we worked with the inference dataset of 160471 galaxies and with 34 galaxy morphological features (bar, ring, various number of spiral arms, disks, dust lane, merger etc.).

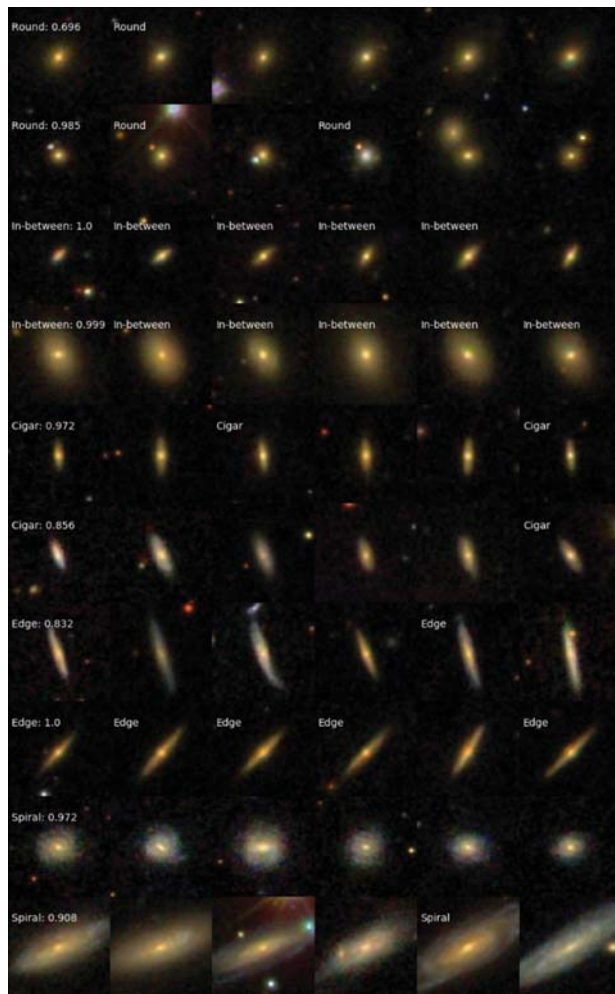
These morphological features are listed in Table 2. The names of features (“parameter”) are given in the first column as they are labeled by the GZ2’s volunteers. The numbers of galaxies in the inference dataset with the given feature are given in column 2. Columns 3–5 contain the ROC AUC<sup>1</sup> classification quality metric (ROCtest) for galaxies of GZ2 dataset. Two resulting accuracy scores, measured with ROC AUC classification quality metric, give the score for the model trained with adversarial augmentations (ROCtest AUG, column 4) and for the model, trained without these augmentations (ROCtest NOAUG, column 3). As the binary classification quality metric we used *Area Under Receiver Operating Characteristic Curve* (ROC AUC). To estimate the ROC AUC, one needs to plot the following curve: the fraction of true positives out of the positives (TPR = true positive rate) versus the fraction of false positives out of the negatives (FPR = false positive rate) at various threshold settings to estimate the area under this curve. For ideal classification, ROC AUC

equals 1; for random, it is 0.5. For more information about ROC AUC classification quality metric measuring, see the paper by Bradley [12]. Column 5 gives the difference between ROCtest AUG and ROCtest NOAUG values.

Table 2. Quality metrics of morphological detailed features of galaxies from the inference dataset

Feature's name [109]	Number of galaxies with the given feature in the inference dataset	ROCtest NOAUG, %	ROCtest AUG, %	ROCtest difference, %
1	2	3	4	5
smooth	624	89.25	88.59	-0.66
features_or_disk	19 770	92.54	91.88	-0.66
star_or_artifact	6	95.36	97.63	2.28
edgeon_yes	2 079	98.81	98.65	-0.16
edgeon_no	7 504	97.21	96.82	-0.39
bar	90	93.99	92.41	-1.57
no_bar	1 762	90.69	89.80	-0.90
spiral	1 199	93.40	92.88	-0.52
no_spiral	47	86.30	84.78	-1.52
no_bulge	63	98.36	98.35	-0.01
odd_yes	1 096	94.78	93.37	-1.41
odd_no	61 537	84.62	83.51	-1.11
completely_round	6 018	96.17	95.60	-0.58
rounded_in_between	20 107	92.31	91.46	-0.85
cigar_shaped	12 434	97.96	97.73	-0.23
ring	52	96.97	96.43	-0.54
irregular	41	96.74	96.94	0.20
other	4	95.93	89.20	-6.74
merger	8	91.79	88.89	-2.90
dust_lane	4	99.39	99.40	0.02
bulge_shape_rounded	18	96.73	96.27	-0.47
bulge_shape_no_bulge	664	98.65	98.52	-0.13
arms_winding_tight	3	89.45	88.60	-0.85
arms_winding_medium	2	75.33	77.59	2.26
arms_winding_loose	100	94.95	94.41	-0.54
arms_number_2	338	90.55	89.99	-0.56
arms_number_3	1	93.54	93.47	-0.07
arms_number_4	1	93.84	85.45	-8.39
arms_number_more_than_4	1	97.79	97.51	-0.27
arms_number_cant_tell	1	86.13	86.07	-0.06

<sup>1</sup> ROCAUC is the Receiver Operating Characteristics, which is determined with Area Under Curve quantitate value.



**Fig. 3.** A set of the inference galaxies (first column) with their five nearest neighbors from the GZ2 training dataset (the rest four columns). Each row represents the morphological class, which is intrinsic to the galaxy from the inference set. The number in the left upper corner of each image of the inference galaxies is a value of the corresponding probability of being this galaxy in a given class. Some classes of galaxies from the GZ2 training set are pointed out when possible (not all of the GZ2 galaxies fit our criteria for CNN classifier)

One can compare these scores and estimate the degree of influence of image data augmentations on the classification quality of a trained model. Scores are given for the dataset of 9000 galaxies, expanded with a fraction of galaxies, which do not pass the criteria of morphological classification.

There is a particular discrepancy in the numbers of galaxies with detailed morphological features from

the training dataset. It can be explained, among other things, by the fact that the GZ' volunteers did not notice certain morphological details while the CNN classifier found.

#### 4. IMAGE-BASED CATALOGS OF LOW-REDSHIFT SDSS GALAXIES CLASSIFIED BY FIVE MORPHOLOGICAL CLASSES AND 34 MORPHOLOGICAL FEATURES

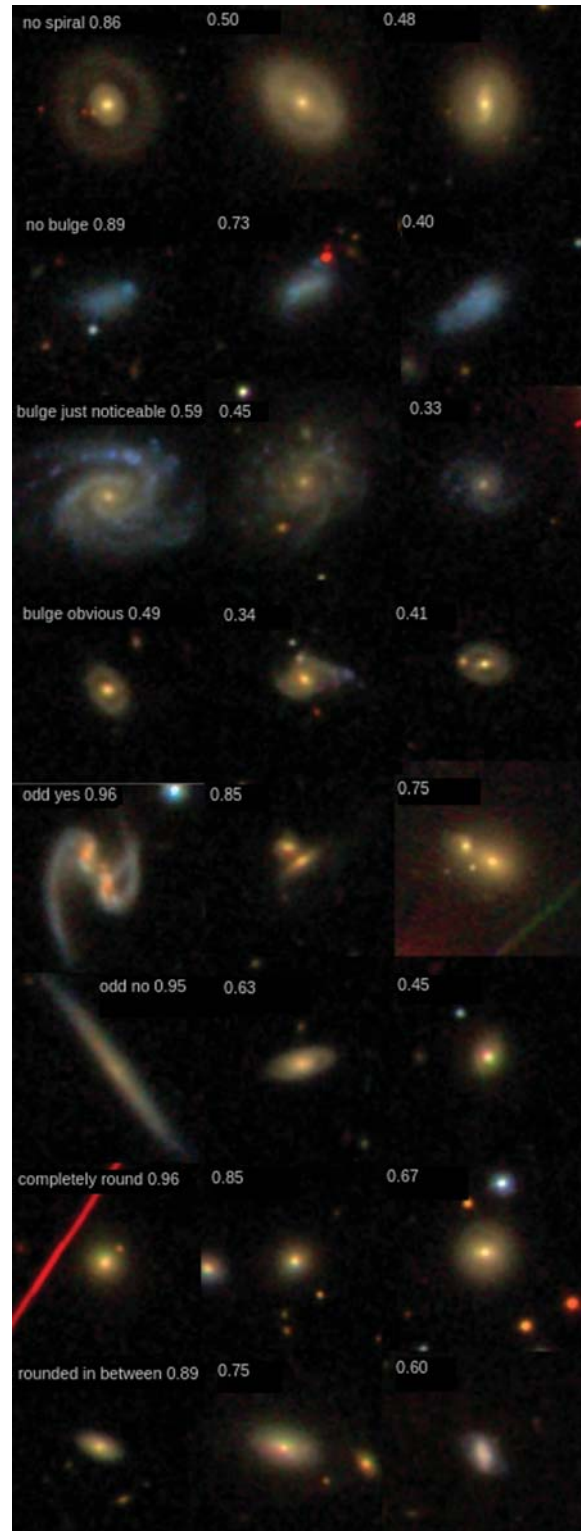
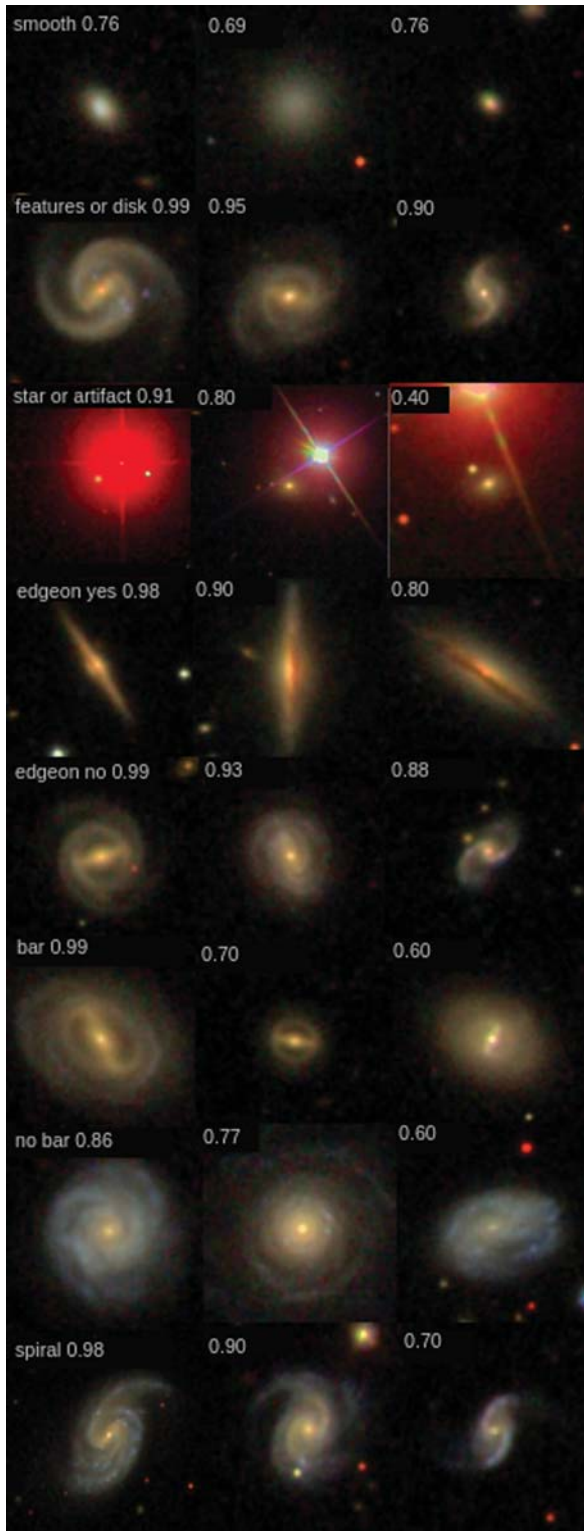
Applying the CNN classifier to the inference galaxy dataset (low panel in Fig. 2), we took into account the following labels of galaxies: predictions of belonging to one of five morphological classes (Table 1) and 34 detailed morphological features (Table 2). The augmentation procedures for image data of galaxies («decrease in stellar magnitude and correction of sizes») from the training dataset are described in our work [56].

We have trained our CNN classifier having attained the overall accuracy of 89.3% on the test set of 9000 galaxies obtained after splitting the training galaxy set (see, the distribution of predicted labels vs. true labels as the probabilities for galaxy to belong to one of five morphological classes in Table 1). Assuming that a galaxy is in a certain morphological class if the probability is the highest one, we found that the inference dataset contains of 27378 completely rounded, 59194 rounded in-between, 18862 cigar-shaped, 7831 edge-on, and 23119 spiral galaxies.

So, a common classification of the studied sample of 315782 low-redshift SDSS galaxies with  $m_r < 17.7$  and  $V_{LG} > 1500$  km/s into five morphological classes consists of the following parts:

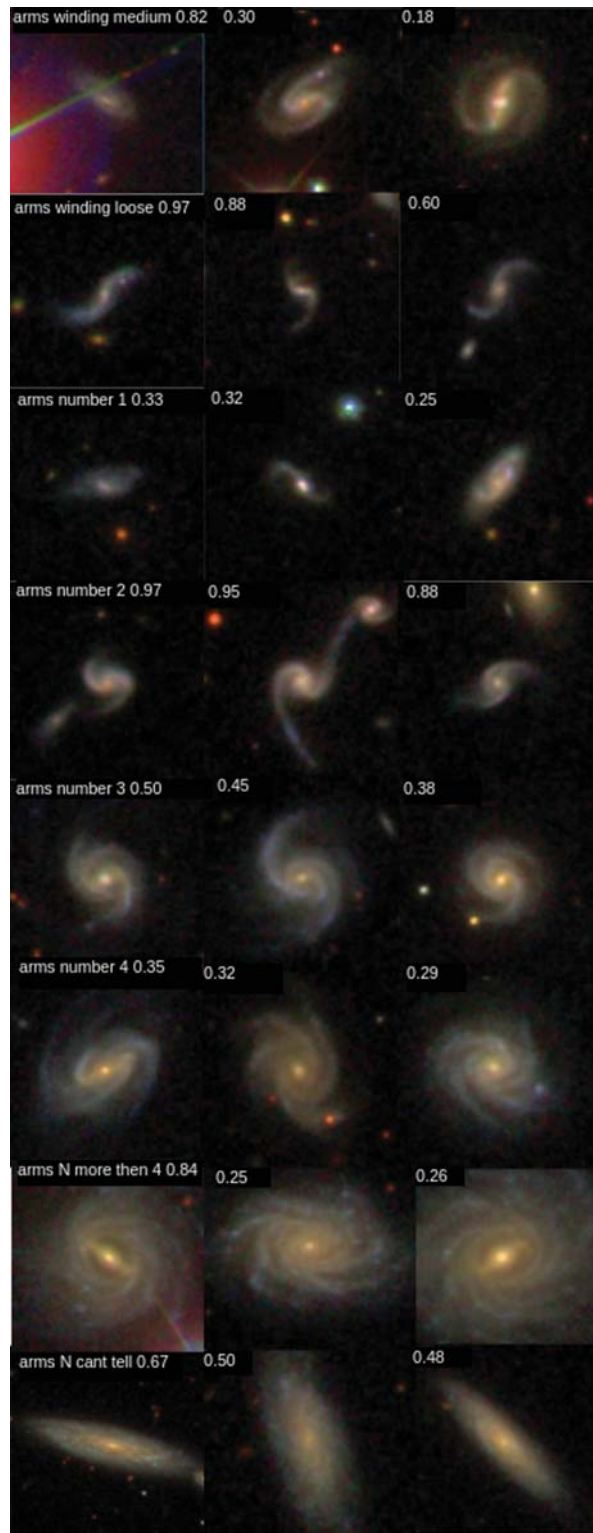
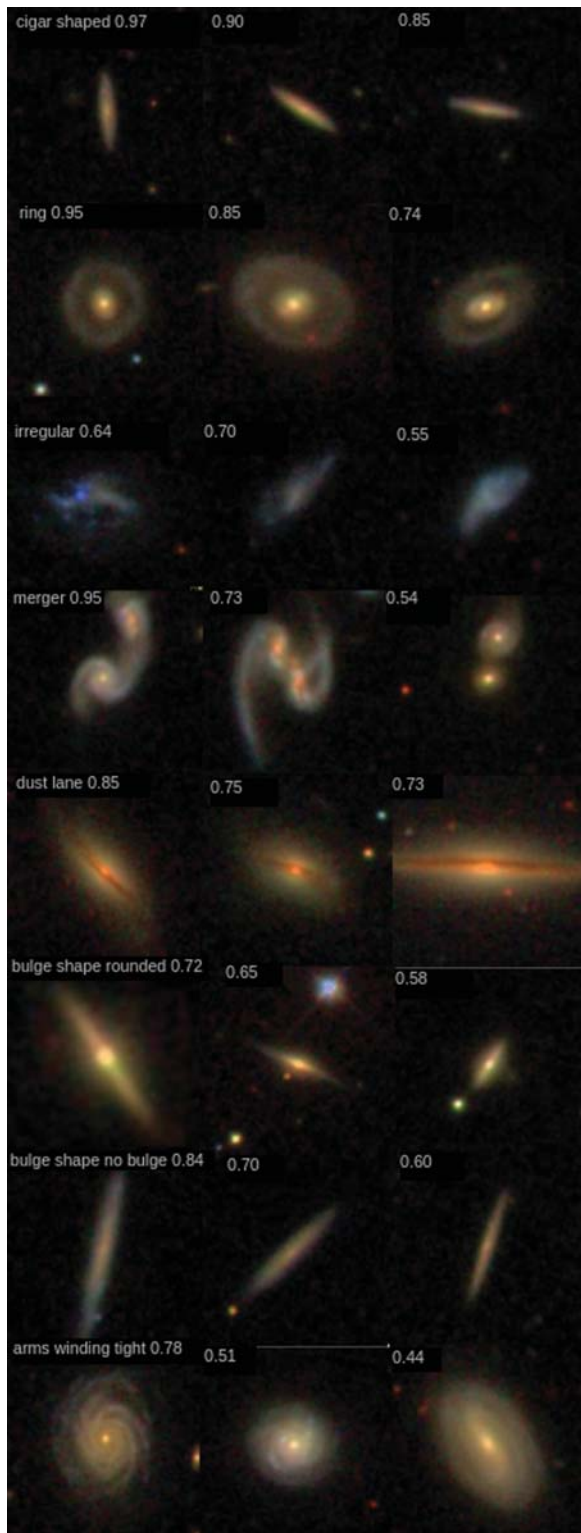
- 72738 galaxies from the training dataset and 143410 galaxies from the inference dataset, which have undergone CNN model with the high adversarial score and the accuracy pointed in Table 1. It turned out 46846 completely rounded, 86515 rounded in-between, 22097 cigar-shaped, 13930 edge-on, and 41738 spiral galaxies.
- 105560 galaxies from the studied sample were not classified with CNN model because of their low adversarial score (98534 galaxies) or technical reasons (7026 galaxies). We left the initial morphological classification for these galaxies into five classes as it was assigned in the GZ2 project.

Examples of the inference galaxies with their five nearest neighbors (in multi-label parametric space)



**Fig. 4** (parts 1–2). The examples of galaxies with some morphological features (smooth, features or disk, star or artifact, edge on yes, edge on no, bar, no bar, spiral, no spiral, no bulge, bulge just noticeable, bulge obvious, odd yes, odd no, completely rounded, rounded in between, see Table 2) from the inference SDSS dataset with their two nearest neighbors from the GZ2 training dataset





**Fig. 4** (parts 3—4). The examples of galaxies with some morphological features (cigar shaped, ring, irregular, merger, dust lane, bulge shape rounded, bulge shape no bulge, arms winding tight, arms winding medium, arms winding loose, arms number 1, arms number 2, arms number 3, arms number 4, arms N more then 4, arms N can't tell, see Table 2) from the inference SDSS dataset with their three nearest neighbors from the GZ2 training dataset

from the GZ2 training dataset classified onto five morphological classes with a given accuracy are shown in Fig. 3.

Also, we determined the number of galaxies that passed the 0.5 cut-off for the acceptance of the detailed morphological features. The number of such galaxies with the certain feature in the inference dataset is presented in Table 2. The examples of inference galaxies with some of these morphological features (ring, bar, merger, irregular, arms\_winding\_loose etc.) with two nearest neighbors (in multi-label parametric space) from the GZ2 training dataset are shown in Fig. 4. The mosaics of galaxies in Fig. 3 and

Fig. 4 illustrate well how our CNN classifier work in finding the similar morphological features of various galaxies, for instance, to find the edge-on galaxies turned to the observer under the same angles (see seventh and eighth rows in Fig. 3) or to find the galaxies with similar morphological features as ring, bar or bulge (Fig. 4, part 3–4).

We used additional morphological parameters such as a bar or ring to predict the presence of these features in galaxies from our inference set. Because these features are not mutually exclusive, we introduce a different approach to determine their types. Namely, we assumed that the penultimate layer of a

**Table 3. Examples of five galaxies from the Catalog of morphological classes of low-redshift galaxies from SDSS DR9, which have the highest probability to belong to the completely rounded, rounded in-between, cigar-shaped, edge-on, and spiral morphological classes**

Identifier	Coordinates		Probability				
	Ra	Dec	Completely rounded	Rounded in-between	Cigar-shaped	Edge-on	Spiral
SDSS ObjID 1237655468061294796 2MASS J15063732+0113452	226.655531	1.229153	<b>0.9976</b>	0.0023	0.0602	0.0554	0.0417
SDSS ObjID 1237660960793428158 2MASS J09283138+3507071	142.130736	35.118625	0.0001	<b>0.9998</b>	0.0424	0.0365	0.0263
SDSS ObjID 1237648722321473797 2MASS J14352175+0050296	218.840662	0.841566	0.0439	0.0004	<b>0.9995</b>	0.0257	0.0093
SDSS ObjID 1237648722290606136 2MASS J09532021+0041516	148.334281	0.697737	0.0338	0.1159	0.0004	<b>0.9997</b>	0.0053
SDSS ObjID 1237660240312795177 2MASS J03114746-0024108	47.947759	-0.402997	0.0059	0.0038	0.0414	0.0279	<b>0.9994</b>

**Table 4. Examples of five galaxies from the Catalog of morphological classes of low-redshift galaxies from SDSS DR9, which have the highest probability to have ring, bar, irregular shape, dust lane, two spiral arms**

Identifier	Coordinates		Probability				
	Ra	Dec	Bar	Ring	Irregular	Dust lane	Arms number 2
SDSS ObjID 1237662198283633002 2MASS J15105965+0829209	227.748594	8.489149	<b>0.9922</b>	0.0657	0.0000	0.0000	0.3236
SDSS ObjID 1237665101137641844 2MASS J14201619+3017044	215.067510	30.284630	0.0002	<b>0.9528</b>	0.0000	0.0000	0.0129
SDSS ObjID 1237668311087972614	229.630080	14.677338	0.0004	0.0000	<b>0.7009</b>	0.0000	0.0113
SDSS ObjID 1237662262714368418 2MASS J15344528+0549459	233.688611	5.829438	0.0003	0.0000	0.0000	0.8559	0.0061
SDSS ObjID 1237662196139163742 2MASS J12453820+4332122	191.409199	43.536667	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	<b>0.9778</b>



neural network consisting of 128 neurons must clearly characterize the galaxy. In its turn, the neighboring galaxies in the multidimensional parameter space must have the same characteristics. By determining the optimal number of nearest neighbors for the most accurate prediction and the optimal value of trimming the likelihood of signs, we test our hypothesis on a deferred GZ2 dataset and found a good confirmation.

We created the catalog of 315782 low-redshift galaxies from SDSS DR9, where morphological classes and detailed features were defined for the first time for 216148 galaxies by an image-based CNN classifier. For the rest of the galaxies (with the lower adversarial score) the initial morphological classification was re-assigned as in the GZ2 project. These new data will be added to our previous “Binary morphology SDSS galaxies catalog” [102]<sup>2</sup>, see also: <http://skyserver.sdss.org/dr9> (SDSS DR9 Home Page). Examples of five galaxies from this catalog, which have the highest probability to belong to the completely rounded, rounded in-between, cigar-shaped, edge-on, and spiral morphological classes, are listed in Table 3. Examples of five galaxies from this catalog, which have the highest probability to assign ring, bar, dust lane, and other morphological, structural features, are listed in Table 4.

## 5. DISCUSSION

Classification of morphological types and features of galaxies is one of the cornerstones for extragalactic astronomy and observational cosmology. Galaxies of different morphological types are distributed non-uniformly across the sky and along the cosmological scale. The early-type galaxies predominate in the central part of the cluster. They also have larger masses, less gas, higher velocity dispersion, and diverse stellar population than the late-type galaxies (see, for example, these works [5, 7, 17, 25, 32, 33, 52, 71, 76, 77, 79, 89, 91, 100, 106]).

Astronomical surveys have accumulated a large number of galaxy images and data that need deep scientific exploration. For this purpose, it is very convenient to use relevant methods for a reliable galaxy morphological automated classification. There are

many different options for sorting galaxies by type now, but each has its own drawbacks. For example, broad spectra of data are lost in spectroscopy classification because not all galaxies have spectra of good enough quality. Classifications based on the photometry give an error when trying to classify red spirals [92, 98], i.e., galaxies with a high content of old stars or interacting galaxies which affect the photometric characteristics of each other [11, 68, 73].

In favor of our choice of CNN as a basic model, we will mention several papers related to the image-based and photometry-based galaxy morphology classification with accentuating on the SDSS and Galaxy Zoo samples [61].

Cabrera et al. [16] explained how the human labeled biases in morphological photometry-based classification could be reduced through supervised ML. This coincides with our conclusion [101], where we discuss which factors and properties of galaxies exactly affect the accuracy of supervised methods. In that paper, we concluded that one could not get the accuracy significantly exceeding 76 % when using the GZ2 data as a training set for ML with the photometry-based approach. One of the reasons is the attribution of irregular galaxies in the GZ2, which have the redder color indices, to the elliptical (early) type, and vice versa the elliptical galaxies with the bluer color indices to the spirals. In any case, the morphology obtained with the ML trained photometric parameters demonstrates significantly less bias than morphology based on citizen-science classifiers. This conclusion is also important for galaxies with low surface brightness galaxies [40].

For example, Cheng et al. [20] used a set of ~2800 galaxies from Dark Energy Survey with visual classification from GZ1 to compare ML methods for galaxy classification: CNN, K-Nearest Neighbor, Logistic Regression, Support Vector Machine, Random Forest, and Neural Networks. They revealed that CNN was the most successful method in their study giving an accuracy of 99.4 % for the binary morphological classification of ellipticals and spirals. As for the combination of photometry and image galaxy SDSS data with Galaxy Zoo labels, we note the work by Hayat et al. [1], who applied self-supervised representation learning. Mittal et al. [69] introduced the data augmentation-based MOmorphological Clas-

<sup>2</sup> <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/A+A/648/A122>

sifier Galaxy (daMCOG CNN) using convolutional neural network and obtained a testing accuracy of 98 %. Their datasets of 4614 images were collected from SDSS Image Gallery, Galaxy Zoo challenge, and Hubble Image Gallery.

Walmsley et al. [107] used Bayesian CNNs and a novel generative model of Galaxy Zoo volunteer responses to infer posteriors for the visual morphology of galaxies. They show that training Bayesian CNNs with active learning requires up to 35–60 % fewer labeled galaxies depending on the morphological feature being classified. They concluded that in the synergy of human and machine intelligence, the Galaxy Zoo would be able to classify surveys of any conceivable scale, providing massive and detailed morphology catalogs to support research into galaxy evolution. These authors in their next paper [108] used Galaxy Zoo data (SDSS DR8) and DECaLS data [27] to provide the detailed visual morphology measurements in *grb*-bands with Bayesian DL classifier for 314000 galaxies brighter than  $m_r = 17.77$  at  $z < 0.15$ . Applying RGB image construction and various methods for the data processing, these authors were able to improve decision trees for GZ2' volunteer classification of galaxy morphological features.

Several useful catalogs were developed with the GZ classification scheme. Willett et al. [109] issued a catalog of morphological types from the GZ2 in the synergy with the SDSS DR7, which contains more than 16 million morphological classifications of 304122 galaxies and their finer morphological features (bulges, bars, and the shapes of edge-on disks as well as parameters of the relative strengths of galactic bulges and spiral arms). Simmons et al. [87] cross-verified morphological features of ~48000 galaxies from the CANDELS survey and GZ project (clumpiness, bar instabilities, spiral structure, merging). It allowed them to create a list of galaxies with featureless discs at  $1 \leq z \leq 3$ , representing “a dynamically warmer progenitor population to the settled disc galaxies seen at later epochs”.

Dominguez-Sanchez et al. [37] presented a morphological catalog for ~670000 SDSS-galaxies in two options: T-type, related to the Hubble sequence, and GZ2 types. Their models with DL for the GZ2 type questions have the highest accuracy (>97 %), when applied to a test dataset with the same characteristics

as the one used for the training dataset. In the recent work [38], they presented the MaNGA Deep Learning Morphological Value Added Catalog as a part of the SDSS DR17. This catalog includes a number of morphological properties: e.g. a T-Type, a finer separation between elliptical and S0, as well as the identification of edge-on/barred galaxies and a separation between early/late types.

Vega-Ferrero et al. [103] presented morphological classifications of ~27 million galaxies from the Dark Energy Survey (Data Release 1). They provided CNN model to classify these galaxies by early and late types (accuracy ~87 %) as well as by face-on and edge-on galaxies (accuracy 73 %). In work by Domingo-Sanchez et al. related to the algorithm for preparing this largest automated morphological catalog up to date [39], the authors describe how their trained SDSS image data of galaxies were transferred on Dark Energy survey images. They also modeled fainter objects by simulating what the brighter objects with well-determined classifications would look like if they were at higher redshifts. This is the same as we applied in our approach.

The results mentioned above are quite comparable in accuracy with each other in determining the peculiarities of galaxies being in good agreement with our results. They evident that CNN models are effective enough for image-based classification of galaxy morphological features.

In general, our method shows a satisfactory level of morphological classification performance, attaining more than 90 % of accuracy for most morphological classes (Table 1). Such value of the accuracy is in good agreement with the accuracy obtained in the work by Walmsley et al. [107], who used Bayesian CNN to study Galaxy Zoo volunteer responses and achieved coverage errors of 11.8 % within a vote fraction deviation of 0.2. As well as with work by Gauthier et al. [44], who applied both supervised and unsupervised methods to study the Galaxy Zoo dataset of 61578 pre-classified galaxies (spiral, elliptical, round, disk). They found that the variation of galaxy images is correlated with brightness and eccentricity, and the accuracy for galaxies to be associated with each of these four classes is about 94 %.

As for the classification of galaxies by their detailed structural morphological features, our CNN

model gives the accuracy in the range of 92–99 % depending on features, a number of galaxies with the given feature in the inference dataset, and, of course, the galaxy image quality (Table 2). As a result, for the first time we assigned 34 morphological detailed features for more than 160000 low-redshift galaxies with  $m_r < 17.7$  from the SDSS DR9, which have the highest adversarial score by our CNN classifier. If we compare our result with a largest galaxy morphological catalog presented by Vega-Ferrero et al. [103], where the face-on and edge-on galaxies were classified by their images with an accuracy of 73 %, we constitute that our CNN model gives a more significant output.

## 6. CONCLUSION

We developed a CNN model for image-based galaxy morphological classification. The studied sample of 315782 galaxies with  $m_r < 17.7$  from SDSS DR9 at  $0.02 < z < 0.1$  is overlapped with the data from the Galaxy Zoo 2 (GZ2). It allowed us to divide it into two datasets: “inference dataset” of 143410 galaxies, which do not match with the GZ2 dataset; “training dataset” of 172372 galaxies, which match with galaxies from our studied sample.

To develop the CNN model based on the images of galaxies, we used the GZ2 assigned labels for five morphological classes by shape and for 34 detailed structural morphological features of galaxies. We revealed that adversarial validation is very helpful when the labeled datasets are biased in magnitude distribution for the training dataset, and such a difference could bias the final prediction of the classifier on the inference dataset. To avoid this problem, we applied the adversarial validation method for analyzing the homogeneity of these two datasets and for modeling fainter galaxies. As a result, the galaxies were selected from the training dataset with the highest adversarial score that are most closely coincided with the inference dataset, and the images were normalized to be similar. Our CNN classifier has demonstrated >93 % of accuracy for rounded in-between, edge-on, and spiral morphological classes, 83 % for the completely rounded, and 75 % for the cigar-shaped galaxies. Assuming that a galaxy is in a certain morphological class if the probability is the highest one, we found that the inference dataset contains 27378 completely rounded, 59194 rounded

in-between, 18862 cigar-shaped, 7831 edge-on, and 23119 spiral galaxies.

As for the detailed structural features of galaxies, we worked with the inference dataset of 160471 galaxies and with 34 galaxy morphological features (bar, ring, various number of spiral arms, disks, dust lane, merger, etc.) as they are labeled by the GZ2’s volunteers. We used ROC AUC (Area Under Receiver Operating Characteristic Curve) as the binary classification quality metric, which gives accuracy scores for the model trained with adversarial augmentations and for the model trained without these augmentations. Our CNN model provides the accuracy in the range of 92–99 % depending on the features, the number of galaxies with the given feature in the inference dataset, and, of course, the galaxy image quality. As a result, for the first time, we have also visually inspected the galaxy images. As a result, for the first time we assigned 34 morphological detailed features for more than 160000 low-redshift galaxies with  $m_r < 17.7$  from the SDSS DR9, which have the highest adversarial score by our CNN classifier.

In general, we created the catalogs of 315782 low-redshift galaxies from SDSS DR9, where morphological classes and detailed features were defined for the first time for 216148 galaxies by the image-based CNN classifier. For the rest of galaxies (with the lower adversarial score) the initial morphological classification was re-assigned as in the GZ2 project. These catalogs can be accessed through the VizieR CDS platform. A vector representation of the probability distribution of a galaxy having one or another feature (the penultimate layer of our CNN model) can be founded at the Ukrainian Virtual Observatory [96] web-site (<http://ukr-vo.org/catalogs>). This will be of interest to those who will study the similarities between galaxies in more detail. Our approach to the image data augmentation can be applied as the mathematical tools in tasks of positional and photometrical processing CCD frames, archive astroplates in various bands, transient objects, artifacts [31, 70, 81, 83, 104]. The proposed CNN model allows solving a bunch of galaxy classification problems, for example, such as a quick selection of galaxies with a bar, bulge, or ring for their subsequent analysis. Our approach consumes the time at the stage of preliminary preparation of the

studied galaxy dataset and can be useful for further studies of the morphology, image, photometry, and spectroscopic data of galaxies.

**Acknowledgements.** This work was done in the frame of the budgetary program «Support for the development of priority fields of scientific research» of the NAS of Ukraine (CPCEL 6541230). The use of

the SDSS [2, 10] and SAO/NASA Astrophysics Data System was extensively applicable. The authors thank the Galaxy Zoo team.

Vavilova I. B. thanks the Wolfgang Pauli Institute, Vienna, Austria, for the support in frame of «The Pauli Ukraine Project» (2022) under the «Models in plasmas, Earth and space science» program.

## REFERENCES

1. Abul Hayat Md., Stein G., Harrington P., et al. (2020). Self-Supervised Representation Learning for Astronomical Images. eprint arXiv:2012.13083.
2. Ahn C. P., Alexandroff R., Allende Prieto C., et al. (2012). The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **203**, 2, 21. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/203/2/21>
3. Amiaux J., Scaramella R., Mellier Y., et al. (2012). Euclid mission: building of a reference survey. *SPIE Proceedings*, **8442**, Space Telescopes and Instrumentation: Optical, Infrared, and Millimeter Wave; 84420Z. <https://doi.org/10.1117/12.926513>
4. Aniyani A. K., Thorat K. (2017). Classifying Radio Galaxies with the Convolutional Neural Network. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **230**, 2, 20. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa7333>
5. Babyk I., Vavilova I. (2014). The distant galaxy cluster XLSSJ022403.9-041328 on the  $L_X$ - $T_X$ -M scaling relations using Chandra and XMM-Newton observations. *Astrophys. and Space Sci.*, **353**, 2, 613—619. <https://doi.org/10.1007/s10509-014-2057-x>
6. Baron Dalya. (2019). Machine Learning in Astronomy: a practical overview. eprint arXiv:1904.07248 <https://arxiv.org/pdf/1904.07248.pdf>
7. Barchi P. H., de Carvalho R. R., Rosa R. R., et al. (2020). Machine and Deep Learning applied to galaxy morphology. A comparative study. *Astronomy and Computing*, **30**, 100334. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2019.100334>
8. Barrow J. D., Saich P. (1993). Growth of large-scale structure with a cosmological constant. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **262**, 3, 717—725. <https://doi.org/10.1093/mnras/262.3.717>
9. Bellm E. C., Kulkarni S. R., Graham M. J., et al. (2019). The Zwicky Transient Facility: System Overview, Performance, and First Results. *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **131**, 995, id. 018002. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aaecbe>
10. Blanton M. R., Bershady M. A., Abolfathi B. (2017). Sloan Digital Sky Survey IV: Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe. *Astron. J.*, **154**, 28. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aa7567>
11. Bottrell C., Hani M., Teimoorinia H., et al. (2019). Deep learning predictions of galaxy merger stage and the importance of observational realism. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **490**, 4, 5390—5413. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2934>
12. Bradley A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, **30**, No. 7, 1145—1159. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00142-2).
13. Brugere I., Gallagher B., Berger-Wolf T. Y. (2016). Network Structure Inference, A Survey: Motivations, Methods, and Applications. eprint arXiv:1610.00782 <https://arxiv.org/pdf/1610.00782.pdf>
14. Bundy K., Scarlata C., Carollo C. M. (2010). The Rise and Fall of Passive Disk Galaxies: Morphological Evolution Along the Red Sequence Revealed by COSMOS. *Astrophys. J.*, **719**, 2, 1969—1983. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/719/2/1969>
15. Cabayol L., Eriksen M., Amara A., et al. (2021). The PAU survey: Estimating galaxy photometry with deep learning. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **506**, 3, 4048—4069. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1909>
16. Cabrera-Vives G., Miller C. J., Schneider J. (2018). Systematic Labeling Bias in Galaxy Morphologies. *Astron. J.*, **156**, 6, 284. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aae9f4>
17. Cassata P., Giavalisco M., Guo Y., et al. (2011). The Relative Abundance of Compact and Normal Massive Early-type Galaxies and Its Evolution from Redshift  $z \sim 2$  to the Present. *Astrophys. J.*, **743**, 1, 96. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/1/96>
18. Chesnok N. G., Sergeev S. G., Vavilova I. B. (2009). Optical and X-ray variability of Seyfert galaxies NGC 5548, NGC 7469, NGC 3227, NGC 4051, NGC 4151, Mrk 509, Mrk 79, and Akn 564 and quasar 1E 0754. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **25**, 2, 107—113. <https://doi.org/10.3103/S0884591309020068>
19. Chen Bo Han, Goto Tomotsugu, Kim Seong Jin. (2021). An active galactic nucleus recognition model based on deep neural network. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **501**, 3, 3951—3961. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa3865>
20. Cheng Ting-Yun, Conselice C. J., Arag S. (2020). Optimizing automatic morphological classification of galaxies with machine learning and deep learning using Dark Energy Survey imaging. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **493**, 3, 4209—4228. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa501>



21. Chen Yangyao, Mo H. J., Li Cheng. (2020). Relating the Structure of Dark Matter Halos to Their Assembly and Environment. *Astrophys. J.*, **899**, 1, 81. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba597>
22. Chilingarian I. V., Melchior A.-L., Zolotukhin I. Y. (2010). Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **405**, 1409–1420. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16506.x>
23. Chilingarian I. V., Zolotukhin I. Y. (2012). A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **419**, 1727–1739. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19837.x>
24. Ciuca R., Hernandez O. F. (2017). A Bayesian framework for cosmic string searches in CMB maps. *J. Cosmology and Astropart. Phys.*, **8**, 28. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/08/028>
25. Davies R. L., Efstathiou G., Fall S. M. (1983). The kinematic properties of faint elliptical galaxies. *Astrophys. J.*, **266**, 41–57. <https://doi.org/10.1086/160757>
26. Davis M., Efstathiou G., Frenk C. S., White S. D. M. (1985). The evolution of large-scale structure in a universe dominated by cold dark matter. *Astrophys. J.*, Part 1, **292**, 371–394. <https://doi.org/10.1086/163168>
27. Dey A., Schlegel D. J., Lang D., et al. (2019). Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys. *Astron. J.*, **157**, 5, 168. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab089d>
28. Diakogiannis F. I., Lewis G. F., Ibata R. A. (2019). Reliable mass calculation in spherical gravitating systems. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **482**, 3, 3356–3372. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2931>
29. de Diego J. A., Nadolny J., Bongiovanni A. (2020). Galaxy classification: deep learning on the OTELO and COSMOS databases. *Astron. and Astrophys.*, **638**, A134. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037697>
30. D’Isanto A., Cavuoti S., Gieseke F. (2018). Return of the features. Efficient feature selection and interpretation for photometric redshifts. *Astron. and Astrophys.*, **616**, A97. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833103>
31. Djorgovski S. G., Graham M. J., Donalek C. (2016). Real-Time Data Mining of Massive Data Streams from Synoptic Sky Surveys. eprint arXiv:1601.04385. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1601/1601.04385.pdf>
32. Dobrycheva D. V., Melnyk O. V., Vavilova I. B., Elyiv A. A. (2014). Environmental Properties of Galaxies at  $z < 0.1$  from the SDSS via the Voronoi Tessellation. *Odessa Astron. Publ.*, **27**, 26.
33. Dobrycheva D. V., Melnyk O. V., Vavilova I. B. (2015). Environmental Density vs. Colour Indices of the Low Redshifts Galaxies. *Astrophys.*, **58**, 2, 168–180. <https://doi.org/10.1007/s10511-015-9373-x>
34. Dobrycheva D. V. (2013). The New Galaxy Sample from SDSS DR9 at  $0.003 < z < 0.1$ . *Odessa Astron. Publ.*, **26**, 187.
35. Dobrycheva D. V. (2017). Morphological content and color indices bimodality of a new galaxy sample at the redshifts  $z < 0.1$ . PhD Thesis in Phys.-Math. Sciences. Kyiv: Main Astronomical Observatory, NAS of Ukraine, 132 p.
36. Dobrycheva D. V., Vavilova I. B., Melnyk O. V. (2018). Morphological Type and Color Indices of the SDSS DR9 Galaxies at  $0.02 < z < 0.06$ . *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **34**, 6, 290–301. <https://doi.org/10.3103/S0884591318060028>
37. Dominguez-Sanchez H., Huertas-Company M., Bernardi M., et al. (2018). Improving galaxy morphologies for SDSS with Deep Learning. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **476**, 3, 3661–3676. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty338>
38. Dominguez Sánchez H., Margalef B., Bernardi M., Huertas-Company M. SDSS-IV DR17: Final release of MaNGA Py-Morph photometric and deep learning morphological catalogs. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, Advance Access. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab3089>
39. Dominguez Sanchez H., Vega-Ferrero J., Huertas-Company M., Bernardi M. (2021). Constructing the Largest Galaxy Morphological Catalogue with Supervised Deep Learning ... with No Training Sample. Amer. Astron. Soc. meeting #238, id. 119.01. *Bull. American Astron. Soc.*, **53**, No. 6. e-id 2021n6i119p01
40. Du Wei, Cheng Cheng, Wu Hong et al. (2019). Low Surface Brightness Galaxy catalogue selected from the a.40-SDSS DR7 Survey and Tully-Fisher relation. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **483**, 2, 1754–1795. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty2976>
41. Elyiv A., Melnyk O., Vavilova I. (2009). High-order 3D Voronoi tessellation for identifying isolated galaxies, pairs and triplets. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **394**, 3, 1409–1418. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14150.x>
42. Elyiv A. A., Melnyk O. V., Vavilova I. B. (2020). Machine-learning computation of distance modulus for local galaxies. *Astron. and Astrophys.*, **635**, A124. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936883>
43. Fluke Christopher J., Jacobs Colin. (2020). Surveying the reach and maturity of machine learning and artificial intelligence in astronomy. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 10, 2, article id. e134910. <https://doi.org/10.1002/widm.1349>
44. Gauthier A., Jain A., Noordeh E. (2016). *Galaxy Morphology Classification*. e-proceedings <http://cs229.stanford.edu/proj2016/report/GauthierJainNoordeh-GalaxyMorphology-report.pdf>, p. 1–6
45. George D., Huerta E. A. (2018). Deep neural networks to enable real-time multimessenger astrophysics. *Phys. Rev. D* **97**, 044039. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.044039>
46. George D., Huerta E. A. (2018). Deep Learning for real-time gravitational wave detection and parameter estimation: Results with Advanced LIGO data. *Phys. Lett. B*, **778**, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.12.053>



47. Huerta E. A., Moore C. J., Kumar P. (2018). Eccentric, nonspinning, inspiral, Gaussian-process merger approximant for the detection and characterization of eccentric binary black hole mergers. *Phys. Rev. D*, **97**, 2, id. 024031. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.02403>
48. Huertas-Company M., Primack J. R., Dekel A. (2018). Deep Learning Identifies High-*z* Galaxies in a Central Blue Nugget Phase in a Characteristic Mass Range, *Astrophys. J.*, **858**, 2, 114. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabfed>
49. Ivezić Z., Kahn S. M., Tyson J. A. (2019). LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products. *Astrophys. J.*, **873**, 2, 111. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab042c>
50. Jacobs C., Collett T., Glazebrook K. (2019). Finding high-redshift strong lenses in DES using convolutional neural networks. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **484**, 4, 5330–5349. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz272>
51. Kang Shi-Ju, Fan Jun-Hui, Mao Weiming, et al. (2019). Evaluating the Optical Classification of Fermi BCUs Using Machine Learning. *Astrophys. J.*, **872**, 2, 189. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0383>
52. Karachentseva V. E., Vavilova I. B. (1994). *Clustering of Low Surface Brightness Dwarf Galaxies in the Local Supercluster*. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, **49**, 91–100.
53. Khalifa Nour Eldeen M., Taha Mohamed Hamed N., Hassanien Aboul Ella. Deep Galaxy: Classification of Galaxies based on Deep Convolutional Neural Networks. Eprint arXiv:1709.02245 (2017).
54. Khrantsov V., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu. (2019). Deep Learning for Morphological Classification of Galaxies from SDSS. *Odessa Astron. Publ.*, **32**, 21. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2019.32.182092>
55. Khrantsov V., Sergeev A., Spiniello C. (2019). KiDS-SQuAD — II. Machine learning selection of bright extragalactic objects to search for new gravitationally lensed quasars. *Astron. and Astrophys.*, **632**, A56. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936006>
56. Khrantsov V., Vavilova I. B., Vasylenko M. Yu., Dobrycheva D. V., Elyiv A. A., Akhmetov V. S., Dmytrenko A., Khlamov S. (2022). Machine learning technique for morphological classification of galaxies from SDSS. III. CNN Image-based inference of detailed morphology. *Astron. and Computing*. (submitted)
57. Krause M., Pueschel E., Maier G. (2017). Improved gamma hadron separation for the detection of faint gamma-ray sources using boosted decision trees. *Astropart. Phys.*, **89**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2017.01.004>
58. Kugler S. D., Gianniotis N. (2016). Modelling multimodal photometric redshift regression with noisy observation. eprint arXiv:1607.06059. <https://arxiv.org/pdf/1607.06059.pdf>
59. LeCun Yann, Chopra Sumit, Hadsell Raia, et al. (2006). *A tutorial on energy-based learning*. Predicting Structured Data, MIT Press. <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/lecun-06.pdf>
60. Leung E., Bekki K., While L. (2019). Automated Simulations of Galaxy Morphology Evolution using Deep Learning and Particle Swarm Optimisation. arXiv:1904.02906. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1904/1904.02906.pdf>
61. Lintott C. J., Schawinski K., Slosar A., et al. (2008). Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **389**, 3, 1179–1189. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13689.x>
62. Lukic V., Bruggen M., Banfield J. K. (2018). Radio Galaxy Zoo: compact and extended radio source classification with deep learning. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **476**, 1, 246–260. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty163>
63. Lupton R., Blanton M. R., Fekete G. (2004). Preparing Red-Green-Blue Images from CCD Data. *Publs Astron. Soc. Pacif.*, **116**, 816, 133–137. <https://doi.org/10.1086/382245>
64. Ma Zhixian, Xu Haiguang, Zhu Jie, et al. (2019). A Machine Learning Based Morphological Classification of 14,245 Radio AGNs Selected from the Best-Heckman Sample. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **240**, 2, 34. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaf9a2>
65. Mahabal A. A., Djorgovski S. G., Drake A. J. (2011). Discovery, classification, and scientific exploration of transient events from the Catalina Real-time Transient Survey. *Bull. Astron. Soc. India*, **39**, 3, 387–408.
66. Mahabal Ashish, Rebbapragada Umaa, Walters R. (2019). Machine Learning for the Zwicky Transient Facility. *Publs Astron. Soc. Pacif.*, **131**, 997, id. 038002. <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aaf3fa>
67. Melnyk O. V., Dobrycheva D. V., Vavilova I. B. (2012). Morphology and color indices of galaxies in Pairs: Criteria for the classification of galaxies. *Astrophys.*, **55**, 3, 293–305. <https://doi.org/10.1007/s10511-012-9236-7>
68. Mezcuca M., Lobanov A. P., Mediavilla E., Karouzos M. (2014). Photometric Decomposition of Mergers in Disk Galaxies. *Astrophys. J.*, **784**, 1, 16. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/1/16>
69. Mittal A., Soorya A., Nagrath P., Hemant D. J. (2020). Data augmentation based morphological classification of galaxies using deep convolutional neural network. *Earth Sci. Inform.*, **13**, 601–617. <https://doi.org/10.1007/s12145-019-00434-8>
70. Morello G., Morris P. W., Van Dyk S. D. (2018). Applications of machine-learning algorithms for infrared colour selection of Galactic Wolf-Rayet stars. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **473**, 2, 2565–2574. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2474>

71. Parikh T., Thomas D., Maraston C., et al. (2019). SDSS-IV MaNGA: local and global chemical abundance patterns in early-type galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **483**, 3, 3420–3436. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty3339>
72. Pasquet-Itam J., Pasquet J. (2018). Deep learning approach for classifying, detecting and predicting photometric redshifts of quasars in the Sloan Digital Sky Survey stripe 82. *Astron. and Astrophys.*, **611**, A97. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201731106>
73. Pearson W. J., Wang L., Trayford J. W., et al. (2019). Identifying galaxy mergers in observations and simulations with deep learning. *Astron. and Astrophys.*, **626**, A49. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935355>
74. Peebles P. E. (1993). *Principles of Physical Cosmology*. Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press, 718 p.
75. Peng Ying-jie, Lilly S. J., Kova K., et al. (2010). Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function. *Astrophys. J.*, **721**, 1, 193–221. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/1/193>
76. Rodriguez-Puebla A., Calette A. R., Avila-Reese V., et al. (2020). The bivariate gas-stellar mass distributions and the mass functions of early- and late-type galaxies at  $z \sim 0$ . *Publ. Astron. Soc. Austral.*, **37**, article id. e024. <https://doi.org/10.1017/pasa.2020.15>
77. Pulatova N. G., Vavilova I. B., Sawangwit U., Babyk Iu., Klimanov S. (2015). The 2MIG isolated AGNs. I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 3, 2209–2223. <https://doi.org/10.1093/mnras/stu2556>
78. Reid B. A., Samushia L., White M., et al. (2012). The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: measurements of the growth of structure and expansion rate at  $z = 0.57$  from anisotropic clustering. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **426**, 4, 2719–2737. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21779.x>
79. dos Reis S. N., Buitrago F., Papaderos P., et al. (2020). Structural analysis of massive galaxies using HST deep imaging at  $z < 0.5$ . *Astron. and Astrophys.*, **634**, A11. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936276>
80. Richert Willi, Luis Pedro Coelho (2013). *Building Machine Learning Systems with Python*. URL: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=7a375749558682503761fa801a67d7ec> (Last access 07.03.2022).
81. Ruhe Tim. (2020). Application of machine learning algorithms in imaging Cherenkov and neutrino astronomy. *Int. J. Modern Phys. A*, **35**, 33, 2043004. <https://doi.org/10.1142/S0217751X20430046>
82. Salvato M., Ilbert O. (2019). Hoyle Ben, the many flavours of photometric redshifts. *Nature Astron.*, **3**, 212–222. <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0478-0>
83. Savanevych V. E., Khlamov S. V., Vavilova I. B., et al. (2018). A method of immediate detection of objects with a near-zero apparent motion in series of CCD-frames. *Astron. and Astrophys.*, **609**, id. A54, 11 p. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630323>
84. Scaife A. M. M., Porter F. (2021). Fanaroff-Riley classification of radio galaxies using group-equivariant convolutional neural networks. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **503**, 2, 2369–2379. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab530>
85. Schawinski Kevin, Zhang Ce, Zhang Hantian (2017). Generative adversarial networks recover features in astrophysical images of galaxies beyond the deconvolution limit. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Lett.*, **467**, 1, L110–L114. <https://doi.org/10.1093/mnrasl/slx008>
86. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. (1998). Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds. *Astrophys. J.*, **500**, 2, 525–553. <https://doi.org/10.1086/305772>
87. Simmons B. D., Lintott C., Willett K. W., et al. (2017). Galaxy Zoo: quantitative visual morphological classifications for 48 000 galaxies from CANDELS. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **464**, 4, 4420–4447. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw2587>
88. Speagle J. S., Eisenstein D. J. (2017). Deriving photometric redshifts using fuzzy archetypes and self-organizing maps. II. Implementation. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **469**, 1, 1205–1224. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx510>
89. Sybilska A., Lisker T., Kuntschner H., et al. (2017). The hELENA project. I. Stellar populations of early-type galaxies linked with local environment and galaxy mass. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **470**, 1, 815–838. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1138>
90. Tsizh M., Novosyadlyj B., Holovatch Yu. (2020). Large-scale structures in the Lambda-CDM Universe: network analysis and machine learning. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **495**, 1, 1311–1320. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1030>
91. Tamburri S., Saracco P., Longhetti M., et al. (2014). The population of early-type galaxies: how it evolves with time and how it differs from passive and late-type galaxies. *Astron. and Astrophys.*, **570**, A102. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424040>
92. Vasylenko M. Yu., Dobrycheva D. V., Vavilova I. B. (2019). Verification of Machine Learning Methods for Binary Morphological Classification of Galaxies from SDSS. *Odessa Astron. Publ.*, **32**, 46. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2019.32.182538>
93. Vasylenko M., Dobrycheva, D., Khramtsov V. (2020). Deep Convolutional Neural Networks models for the binary morphological classification of SDSS-galaxies. *Commun. BAO*, **67**, 354. <https://doi.org/10.52526/25792776-2020.67.2-354>

94. Vavilova I. B., Karachentseva V. E., Makarov D. I., Melnyk O. V. (2005). Triplets of Galaxies in the Local Supercluster. I. Kinematic and Virial Parameters. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **21**, 1, 3–20.
95. Vavilova I. B., Melnyk O. V., Elyiv A. A. (2009). Morphological properties of isolated galaxies vs. isolation criteria. *Astron. Nachr.*, **330**, 1004. <https://doi.org/10.1002/asna.200911281>
96. Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I., et al. (2012). UkrVO Joint digitized archive and scientific projects. *Baltic Astron.*, **21**, 356–365. <https://doi.org/10.1515/astro-2017-0394>
97. Vavilova I. B., Elyiv A. A., Vasylenko M. Yu. (2018). Behind the Zone of Avoidance of the Milky Way: what can we Restore by Direct and Indirect Methods? *Radio Phys., Radio Astron.*, **23**, 4, 244–257. <https://doi.org/10.15407/rpra23.04.244>
98. Vavilova I., Dobrycheva D., Vasylenko M. (2020). *Multiwavelength Extragalactic Surveys: Examples of Data Mining*. Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation, 1st Edition. Ed. by Petr Skoda and Fathallahman Adam. Elsevier, 307–323 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00028-X>
99. Vavilova I., Pakuliak L., Babyk Iu. (2020). *Surveys, Catalogues, Databases, and Archives of Astronomical Data*. Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation, 1st Edition. Ed. by Petr Skoda and Fathallahman Adam. Elsevier, 57–102. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00015-1>
100. Vavilova I., Elyiv A., Dobrycheva D., Melnyk O. (2021). *The Voronoi tessellation method in astronomy*. Intelligent Astrophysics. Ed. by I. Zelinka, M. Brescia and D. Baron. Emergence, Complexity and Computation, **39**. Springer, Cham, 57–79. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65867-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65867-0_3)
101. Vavilova I. B., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu. (2021). Machine learning technique for morphological classification of galaxies from the SDSS. I. Photometry-based approach, **648**, A122. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038981>
102. Vavilova I. B., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu. (2021). *VizieR Online Data Catalog: SDSS galaxies morphological classification* (Vavilova+, J/A+A/648/A122, 2021). <https://doi.org/10.26093/cds/vizie.36480122>
103. Vega-Ferrero J., Dominguez Sanchez H., Bernardi M., et al. (2021). Pushing automated morphological classifications to their limits with the Dark Energy Survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **506**, 2, 1927–1943. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab594>
104. Villarroel B., Soodla J., Comerón S., et al. (2020). The Vanishing and Appearing Sources during a Century of Observations Project. I. USNO Objects Missing in Modern Sky Surveys and Follow-up Observations of a “Missing Star”. *Astron. J.*, **159**, 1, article id. 8, 19 p. <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab570f>
105. Vol’Vach A. E., Vol’Vach L. N., Kut’kin A. M., et al. (2011). Multi-frequency studies of the non-stationary radiation of the blazar 3C 454.3. *Astron. Reports*, **55**, 7, 608–615. <https://doi.org/10.1134/S1063772911070092>
106. Vulcani B., Poggianti B. M., Aragon-Salamanca A., et al. (2011). Galaxy stellar mass functions of different morphological types in clusters, and their evolution between  $z = 0.8$  and 0. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **412**, 1, 246–268. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17904.x>
107. Walmsley M., Smith L., Lintott C. (2020). Galaxy Zoo: probabilistic morphology through Bayesian CNNs and active learning. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **491**, 2, 1554–1574. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2816>
108. Walmsley M., Lintott C., Geron T., et al. (2021). Galaxy Zoo DECaLS: Detailed Visual Morphology Measurements from Volunteers and Deep Learning for 314,000 Galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **509**, 3, 3966–3988. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab2093>
109. Willett K. W., Lintott C. J., Bamford S. P., et al. (2013). Galaxy Zoo 2: detailed morphological classifications for 304 122 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **435**, 4, 2835–2860. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt1458>
110. Yang Xiaohu, Mo H. J., van den Bosch Frank C. (2003). Constraining galaxy formation and cosmology with the conditional luminosity function of galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **339**, 4, 1057–1080. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06254.x>
111. Zevin M., Coughlin S., Bahaadini S., et al. (2017). Gravity Spy: integrating advanced LIGO detector characterization, machine learning, and citizen science. *Classical and Quantum Gravity*, **34**, 6, id. 064003. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa5cea>
112. Zhu Xiao-Pan, Dai Jia-Ming, BianChun-Jiang, et al. (2019). Galaxy morphology classification with deep convolutional neural networks. *Astrophys. and Space Sci.*, **364**, 4, 55. <https://doi.org/10.1007/s10509-019-3540-1>

Стаття надійшла до редакції 21.09.2020  
Після доопрацювання 01.08.2021  
Прийнято до друку 07.03.2022

Received 21.09.2020  
Revised 01.08.2021  
Accepted 07.03.2022

<sup>1</sup> I. B. Vavilova, зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук, проф.

<sup>2</sup> старш. наук. співроб.

E-mail: irivav@mao.kiev.ua

<https://orcid.org/0000-0002-5343-1408>

<sup>3</sup> B. Храмцов, аспірант

E-mail: vld.khrantsov@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1744-7071>

<sup>1</sup> Д. В. Добричева, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук,

E-mail: daria@mao.kiev.ua

<https://orcid.org/0000-0001-5557-3453>

<sup>1</sup> М. Ю. Василенко, мол. наук. співроб.

<sup>4</sup> аспірант

E-mail: vasmax@mao.kiev.ua

<https://orcid.org/0000-0002-7714-0779>

<sup>1</sup> А. А. Елиів, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: andrii.elyiv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6215-1048>

<sup>1</sup> О. В. Мельник, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: melnykol@gmail.com

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія НАН України  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

<sup>2</sup> НДІ «Астрономічна обсерваторія» Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова  
вул. Маразліївська 1 в, Одеса, Україна, 65014

<sup>3</sup> Інститут астрономії, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна  
вул. Сумська 35, Харків, Україна, 61022

<sup>4</sup> Інститут фізики НАН України  
пр. Науки 46, Київ, Україна, 02000

## МАШИННЕ НАВЧАННЯ ДЛЯ МОРФОЛОГІЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ГАЛАКТИК ІЗ ОГЛЯДУ SDSS.

### II. МОРФОЛОГІЧНІ КАТАЛОГИ ЗОБРАЖЕНЬ ГАЛАКТИК НА $0.02 < Z < 0.1$

Ми застосували згорткову нейронну мережу (CNN) до вибірки зображень галактик на малих червоних зміщеннях із  $-24^m < M_r < -19.4^m$  огляду неба SDSS DR9. Ми розділили її на дві підвибірки галактик SDSS DR9 і галактик Galaxy Zoo 2 (GZ2), розглядаючи їх як цільову з невідомими параметрами (inference) та навчальну (training), відповідно. Щоб визначити основні морфологічні параметри галактик, визначені в рамках проекту GZ2, ми класифікували галактики на п'ять візуальних класів (повністю заокруглені, майже заокруглені, гладкі сигароподібні, видимі з ребра, спіральні). Використовуючи класифікацію морфології галактик GZ2, ми також визначили 34 морфологічні характеристики галактик із вибірки SDSS DR9, які не збігаються з навчальною підвибіркою галактик GZ2. У результаті ми створили морфологічний каталог зображень 315782 галактик на  $0.02 < z < 0.1$ , де морфологічні п'ять класів і 34 детальні характеристики були вперше визначені для 216148 галактик із застосуванням CNN класифікатора. Для решти галактик початкову морфологічну класифікацію було перевизначено, як у проєкті GZ2.

Наш метод демонструє багатообіцяючу ефективність морфологічної класифікації, що досягає понад 93 % точності для прогнозування морфології п'яти класів, за винятком сигароподібних (~75 %) та повністю округлених (~83 %) галактик. В результаті були отримані каталоги 27378 повністю заокруглених, 59194 майже заокруглених, 18862 сигароподібних, 7831 видимих з ребра, 23119 спіральних галактик на малих червоних зміщеннях досліджуваної вибірки SDSS. Що стосується класифікації галактик за їхніми детальними структурними морфологічними особливостями, то наша модель CNN дає точність 92–99 % залежно від морфологічної ознаки та якості зображення галактики. Створено каталоги, де вперше 34 детальні морфологічні особливості (бар, кільця, кількість спіральних рукавів, злиття тощо) визначено для понад 160000 галактик цільової підвибірки SDSS DR9. Ми вперше показуємо, що застосування моделі CNN зі змагальною валідацією та математичними перетвореннями зображень галактик покращує класифікацію менших за розмірами та слабкіших  $m_r < 17.7$  галактик SDSS.

Запропонована модель CNN дозволяє вирішити різні проблеми класифікації галактик, наприклад, таких як швидкий відбір галактик із баром, балджем, кільцем та іншими морфологічними особливостями для їх подальшого аналізу.

**Ключові слова.** Методи: аналіз даних, машинне навчання, згорткові нейронні мережі; галактики: морфологічна класифікація, зображення галактик, каталоги галактик, великомасштабна структура Всесвіту.



<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.023>

УДК 341.229

О. О. НІГРЕЄВА, доц., канд. юрид. наук

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4719-6050>

E-mail: nihreieva@onu.edu.ua, anodessa9@gmail.com

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова  
вул. Дворянська 2, Одеса, Україна, 65000

## МІЖНАРОДНО-ПРАВОВИЙ РЕЖИМ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ: МІЖ *RES COMMUNIS* ТА *RES NULLIUS*

Публікацію присвячено питанню міжнародно-правового режиму космічного простору. Робиться спроба визначити оптимальну модель міжнародно-правового регулювання відносин у сфері використання космічного простору та його ресурсів.

Досліджуються основні міжнародно-правові режими, застосовувані до просторів, що перебувають поза виключною національною юрисдикцією. Основну увагу приділено режимам *res nullius*, *res communis*, принципу загальної спадщини людства. Сучасне міжнародно-правове регулювання відносин, що складаються у зв'язку з дослідженням та використанням космічного простору, проаналізовано крізь призму цих режимів, а також у контексті категорії *global commons*, до яких часто зараховують космічний простір. Наголошується на тому, що останній категорії, хоча вона й є широко застосованою у сучасному науковому правовому дискурсі, бракує визначеності. Зважаючи на те що концепція публічних благ отримала особливий розвиток у економічній теорії, пропонується враховувати саме економічні властивості таких благ при розробленні режимів їхнього правового регулювання.

У роботі визначено особливості та комплексність відносин із використання космосу як об'єкта правового регулювання. Наголошується на необхідності формування комплексного міжнародно-правового режиму, який би поєднував елементи *res nullius*, *res communis* та загальної спадщини людства щодо об'єктів космічного простору із різними природними та, як наслідок, економічними властивостями.

Аналізуються останні тенденції у національній та міжнародній правотворчості, пов'язані із формуванням правового режиму експлуатації ресурсів небесних тіл та комерціалізацією цієї діяльності. Визначено їхній вплив на міжнародно-правовий режим космічного простору та тенденції його майбутньої еволюції. Наголошено на важливості виваженої національної позиції щодо формування правового регулювання комерційного видобутку ресурсів небесних тіл.

**Ключові слова:** космічний простір, ресурси небесних тіл, міжнародно-правовий режим, *res nullius*, *res communis*, загальна спадщина людства, *global commons*, Домовленості щодо програми «Артеміда», міжнародна правотворчість.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження питань правового регулювання комерційної діяльності у космічному просторі можуть здаватися передчасними та такими, що не мають практичного сенсу. Разом з тим часто те, що здається фантастикою сьогодні, завтра стає реальністю. Це підтверджує, наприклад, напрям космічного туризму, що продовжує розвивати-

ся. Так, в липні цього року комерційні польоти в космос було здійснено двома американськими мільярдерами Річардом Бренсоном та Джефом Безосом, що інвестують у космічний туристичний бізнес. Останній заявив, що тільки протягом першого дня після промпольоту, тобто 20 липня 2021 р., його компанія «Blue Origin» продала квитків на наступні подорожі у космос на

Цитування: Нігреєва О. О. Міжнародно-правовий режим космічного простору: між *res communis* та *res nullius*. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1 (134). С. 23–42. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.023>



100 мільйонів доларів [41]. Отже, комерційне освоєння космосу стає усе більш реальним. Ще одним напрямком цієї діяльності, що викликає дедалі більший інтерес у потенційних інвесторів, є видобування та використання різноманітних ресурсів цього безмежного простору.

Хоча наразі не йдеться про індустріальні масштаби такої діяльності, із часом попит на воду та мінеральні ресурси небесних тіл тільки зростатиме. Перш за все це зумовлено їхньою обмеженістю чи нестачею на Землі. Навіть зараз доступ до природних ресурсів є однією з головних причин численних військових конфліктів. За виразом Ібрагіма Тіау, виконавчого директора Конвенції ООН про боротьбу з опустелюванням у тих країнах, що потерпають від серйозної посухи та/або опустелювання, як-от у Африці 1994 р., людство в усі часи вступало у конфлікти, пов'язані із природними ресурсами, однак «сьогодні ці сутички відбуваються із безпрецедентною частотою та інтенсивністю» [7]. За прогнозами спеціалістів у галузі міжнародних відносин, однією з закономірностей їхнього розвитку у XXI ст. стане посилення боротьби між націями та цивілізаціями за геополітичний простір, транспортні коридори та природні ресурси [18, с. 546]. У свою чергу, їхня обмеженість при збереженні теперішніх темпів споживання та динаміки зростання населення із великою ймовірністю призведе до виникнення нових локальних і навіть глобальних конфліктів [20, с. 41].

Так, за оцінками Організації європейського співробітництва та розвитку кількість людей, що проживають у регіонах із нестачею водних ресурсів, до 2030 р. зросте до 3.9 млрд, що становитиме половину населення Землі та 80 відсотків населення країн, які розвиваються [51, с. 8]. Із вичерпанням мінеральних ресурсів Землі ситуація не така складна, незважаючи на прогнози, наприклад, Римського клубу, відповідно до яких деякі основні мінеральні ресурси Землі, такі як мідь, природний газ, нафта, алюміній, свинець, вугілля, хром, залізо можуть скінчитися протягом наступних 30—150 років [8, с. 32]. На погляд інших вчених, реальні запаси мінеральних копалин у земній корі невідомі, а отже, потенціал їхнього видобутку є необмеженим. Це дає під-

стави вважати, що економічне вичерпання мінералів стане реальною турботою для людства тільки у віддаленому майбутньому [34, с. 7]. Разом з тим підвищення попиту на мінеральні ресурси з боку індустріальних країн, перш за все Китаю, призведе до подальшого зростання цін [51, с. 9]. Крім того, певні метали, зокрема метали платинової групи, визначені як критичні для розвитку економіки деяких регіонів [51, с. 9], є досить рідкісними та дорогими.

Усі ці фактори змушують людство усе частіше звертати свою увагу до космосу, маючи на увазі можливість видобування різноманітних ресурсів небесних тіл. Так, згідно з оцінками «Planetary Resources», однієї з компаній, яка працює над проектами комерційного освоєння ресурсів у космосі, один 500-метровий платиновий астероїд може містити більше металів платинової групи, ніж будь-коли було видобуто на Землі [51, с. 9]. Астероїди можуть стати джерелом також інших ресурсів, таких як вода та металічні копалини [1], а серед потенційних ресурсів Місяця зазначають гелій, рідкоземельні матеріали та воду [57]. Результати дослідження, замовленого Космічним агентством Люксембургу, показали, що використання ресурсів космосу може принести до 170 мільярдів доларів США, починаючи з 2018—2045 рр. [54].

Наведені вище фактори викликають цікавість до можливостей видобутку та використання космічних ресурсів. Однак розвиток відповідних проектів для багатьох країн наразі є неможливим без значних інвестицій з боку приватного сектору. Останній також демонструє усе більшу зацікавленість у зазначеному напрямку, що підтверджує зростання кількості компаній, які займаються космічними проектами. Серед основних з них вже зазначена «Planetary Resources», а також «Deep Space Industries», «Moon express» та інші. Проте ефективно залучення приватних інвестицій неможливе без сприятливого інвестиційного клімату, однією з головних умов якого є зрозумілий правовий режим відповідної діяльності, що, у свою чергу, мав би економічно приваблювати податкову складову та міг би гарантувати надійність прав на розвідку та видобуток ресурсів, придатність для банківського фінансування та

можливість примусового виконання укладених договорів [24, с. 30].

Правовою базою режиму космосу та його ресурсів є міжнародне космічне право, з такими його джерелами, як: Договір про принципи діяльності держав стосовно дослідження та використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла 1967 р. (далі — Договір про космос); Угода про діяльність держав на Місяці й інших небесних тілах 1979 р. (далі — Угода про Місяць); Угода про рятування космонавтів, повернення космонавтів і повернення об'єктів, запущених у космічний простір 1968 р.; Конвенція про міжнародну відповідальність за шкоду, завдану космічними об'єктами 1972 р.; Конвенція про реєстрацію об'єктів, що запускаються у космічний простір 1975 р. Серед них основними для визначення правового режиму використання космічних ресурсів є Договір про космос (Україна (УРСР) є учасницею з 22 травня 1967 р.) та Угода про Місяць (Україна не приєдналася), які визначають дослідження та використання космічного простору як надбання всього людства, а також закріплюють так званий принцип непривласнення космосу, включаючи Місяць та інші небесні тіла. Останній принцип, зокрема, конкретизується у ст. 2 Договору про космос та частині 2. ст. 11 Угоди про Місяць, які визначають, що зазначений простір не підлягає національному привласненню ні шляхом проголошення суверенітету, ні шляхом використання чи окупації, ні будь-якими іншими засобами [5; 22]. Частина 1 ст. 11 Угоди про Місяць йде ще далі, визначаючи Місяць та його природні ресурси спільним спадком людства [22].

Ці положення та особливо остання норма стали причиною, через яку у багатьох міжнародно-правових дослідженнях космос та його ресурси визначаються не просто як *res omnium communis*, тобто території та ресурси у загальному користуванні, а як *res communis humanitatis*, тобто такі, що належать усій міжнародній спільноті у цілому, а отже, вигоду від їхнього видобутку має отримувати вся спільнота за принципом справедливого розподілу. Однак цю позицію, хоча й доволі поширену, поділяють далеко не всі вчені та навіть держави, про що свідчить прийняття

Закону США про конкурентоздатність у галузі комерційних космічних запусків 2015 р. та Закону Люксембургу про дослідження та використання космічних ресурсів 2017 р. Ці акти стали одними з перших в історії людства, що дозволили комерційне видобування та використання космічних ресурсів приватними компаніями. У 2019 р. ОАЕ також схвалили федеральний закон № 12 про регулювання космічного сектору, який містить положення щодо діяльності приватних компаній у цій галузі. Крім того, Акт про сприяння підприємницькій діяльності, пов'язаний із дослідженням та видобутком космічних ресурсів, був прийнятий у червні 2021 року в Японії.

Поява зазначених законів спричинила широку дискусію у науковій спільноті та на рівні міжнародних організацій щодо їхньої відповідності нормам міжнародного космічного права, адже таке комерційне використання ресурсів, на думку багатьох, не відповідає режиму загальної спадщини людства космічного простору, надаючи йому замість статусу *res communis*, тобто територій та ресурсів, які не належать нікому конкретно, бо перебувають у загальному користуванні та не можуть бути привласнені, статус *res nullius*, тобто територій та ресурсів, що не належать нікому, а отже, можуть бути привласнені за принципом первинного заволоніння. Разом з тим застосування щодо космосу правового режиму загальної спадщини людства не є однозначним, як і сам зміст цього режиму.

Останньою новелою, яка може суттєво позначитися на міжнародно-правовому режимі космосу, стало підписання на ініціативу США вісьмома державами, серед яких Сполучені Штати Америки, Великобританія, Об'єднані Арабські Емірати, Люксембург, Японія, Італія, Канада та Австралія 13 жовтня 2020 р. Домовленостей щодо програми «Артеміда» про принципи співпраці у цивільному дослідженні та використанні Місяця, Марсу, комет та астероїдів для мирних цілей (Artemis Accords) (далі — Домовленості щодо програми «Артеміда»), до яких 13 листопада 2020 р. приєдналася також Україна. Станом на червень 2021 до угоди приєдналося 12 країн (крім вище зазначених, учасниками є також Бразилія, Нова Зеландія, Південна Корея). Укладення

цієї угоди викликало побоювання щодо спроби США змінити міжнародно-правовий режим космічного простору, закріплений Договором про космос та Угодою про Місяць, відійшовши від принципу непривласнення.

Визначаючи міжнародний правовий режим космічного простору, у зарубіжних наукових дослідженнях часто застосовують також термін *global commons*, які означають простори та ресурси за межами національної юрисдикції. Незважаючи на його поширеність, змістовне навантаження цього концепту є неоднозначним, що спричинює ще більшу термінологічну плутанину у цьому питанні.

Враховуючи викладене вище, у рамках дослідження ми зробимо спробу визначити міжнародно-правовий режим космічного простору та його ресурсів та проаналізувати тенденції його змін, розглянувши його крізь призму таких концепцій, як загальна спадщина людства, *res communis*, *res nullius* та *global commons*. Розуміння міжнародного правового режиму космосу має важливе значення також для розроблення національної космічної політики та прийняття відповідного законодавства, адже враховуючи стрімку правотворчу діяльність, що її можна спостерігати в останні роки щодо освоєння ресурсів космосу, чітке та своєчасне визначення національної позиції у цьому питанні може мати далекосяжні політичні та економічні наслідки.

У роботі буде розглянуто міжнародно-правовий режим космічного простору у цілому. Питання правового статусу геостационарної орбіти, визначення таких понять, як «космічний об'єкт», «небесне тіло», «ресурси *in situ*», «корисні копалини» заслуговують на окремі наукові дослідження, тому детально у цій праці аналізуватися не будуть.

Питання міжнародно-правового режиму космічного простору завжди привертало увагу дослідників, серед яких такі видатні науковці, як А. Я. Капустін, Ю. М. Колосов, Н. Р. Малишева, Ю. С. Шемшученко, А. Кокка, Б. Ченг, Е. Фазан, Т. Л. Массон-Зван, Дж. Е. Нойес та інші. Останні тенденції у національній та міжнародній правотворчості активізували дослідницьку роботу у напрямку вироблення ефективного

правового регулювання видобутку та використання космічних ресурсів. Серед останніх варто звернутися до публікацій: Р. Деппано «Домовленості щодо програми «Артеміда»: еволюція чи революція у міжнародному космічному праві?» (2021); Дж. В. Нельсон «Домовленості щодо програми «Артеміда» та майбутнє міжнародного космічного права» (2020); Д. Вренч «Непривласнення, немає проблем: Договір про космос готовий до видобутку астероїдів» (2019); Дж. Хейс «Космос, останній рубіж підприємництва: стимулювання видобутку астероїдів за новими міжнародними правилами» (2018); С. В. Андерсон, К. Крістенсен, Дж. Ламанна «Освоєння природних ресурсів у космічному просторі» (2018); А. М. Леон «Видобуток як належно: дослідження законності прав власності на космічні ресурси» (2018); Т. Массон-Зван, Н. Палковіц «Регулювання прав на космічні ресурси: задоволення потреб держав та приватних сторін» (2017). Не залишаються поза світовими трендами також представники української науки. На окрему увагу заслуговують наукові праці: Н. Р. Малишевої «Міжнародно-правові засади розробки ресурсів Місяця, Марса та інших небесних тіл» (2021); О. П. Світличного «Право власності на космічні об'єкти» (2018); А. М. Гурової «Законодавче закріплення видобування та привласнення ресурсів космосу: перспектива чи авантюра» (2017).

#### МІЖНАРОДНО-ПРАВОВІ РЕЖИМИ ПРОСТОРІВ ЗА МЕЖАМИ НАЦІОНАЛЬНОЇ ЮРИСДИКЦІЇ

Перш за все, розглянемо особливості міжнародно-правових режимів, що застосовуються щодо просторів поза національною юрисдикцією. Окрім космосу, найчастіше мова йде про такі простори, як відкрите море, міжнародний район морського дна та Антарктику.

***Res communis vs. res nullius.*** Одними із базисних концепцій щодо просторів та ресурсів, які не належали нікому конкретно, були давньоримські концепції *res communis* (лат., у множині — *res communes*) та *res nullius*. Останній вираз можна перекласти як «нічия річ» або «безхазяйна річ», у той час як перший означає «спільну річ». Принципова різниця між цими концептами полягає у можливості привласнення відповідної

«речі». Якщо *res communis* є спільною та не може бути привласнена окремою особою, то *res nullius* може бути привласнена першим, хто отримає її у своє володіння. Останнє твердження пов'язує концепцію *res nullius* із принципом суверенітету [30, с. 215], що є базисним у міжнародному праві щодо ресурсів у межах національної юрисдикції. Як зазначає І. І. Лукашук, у минулому усе, що не перебувало під суверенітетом держави, розглядалося як нічیه та могло бути привласнено державами [11, с. 135]. На думку К. Коліс, простір, який ще нікому не належить, не перебуває поза володінням, він просто чекає на перехід у володіння [32, с. 290].

Що ж до класичної концепції *res communis* або ж у повному варіанті *res communis omnium*, яка часто перекладається також як «загальне надбання», то вона передбачала, що у певних речей не могло бути власника, адже вони перебували у загальному користуванні, отже до них мала бути свобода доступу (наприклад повітря, вода, що тече, моря та їхні береги). Такі речі належали до *res extra commercium*, тобто були вилучені з цивільного обороту [2, с. 44]. Однак це не стосувалося ресурсів, що могли бути видобуті при використанні таких «речей», або прибутку від їхньої експлуатації. Як зазначав відомий дослідник римського права Д. Д. Грімм, така категорія речей, як *res naturali jure omnium communes* вважалися такими, що нікому не належали, але окремі відділені частини цих речей могли отримати значення *res in commercio*, тобто стати об'єктом приватної власності [2, с. 44]. Дещо іншу інтерпретацію пропонує А. Капурсо, на чий погляд «спільні речі» включають дві різні складові: «контейнер», тобто зовнішню форму, у якій містяться певні ресурси, та його «зміст», з яких перша не може бути привласнена, а друга є *res nullius*, а отже, може бути привласнена [29]. Саме такий режим наразі застосовується щодо відкритого моря, що є міжнародною територією, яка не може бути привласнена, однак ресурси якої можуть використовуватися та привласнюватися державами, їхніми громадянами або іншими зареєстрованими у них приватними суб'єктами. Ця інтерпретація *res communis* є ключовою для розуміння останніх змін у міжнародному режи-

мі космічного простору, що відбуваються у світлі прийняття національного законодавства про видобуток його ресурсів та підписання Домовленостей щодо програми «Артеміда», до чого ми повернемося пізніше.

**Правовий статус та зміст концепції загальної спадщини людства.** Окрім концепції *res omnium communis*, яка має саме давньоримське походження, у середині ХХ ст. отримала поширення інша, пов'язана із нею, але змістовно відмінна концепція — *res communis humanitatis*. Саме вона, на погляд дослідників, лягла спочатку у основу концепції загального надбання людства, а згодом — в основу концепції загальної спадщини людства [11, с. 135]. Один з ініціаторів затвердження останньої саме щодо космічного простору аргентинський науковець А. Кокка вважав, що давньоримська концепція *res communis omnium* не має нічого спільного з *res communis humanitatis* [31, с. 212]. Таке твердження здається занадто радикальним, адже ці два режими мають спільну основу — принцип непривласнення території. Різниця між ними полягає у правових підходах до можливості видобутку та привласнення її ресурсів. Якщо концепція *res omnium communis*, як вже було зазначено, передбачає таку можливість, то концепція *res communis humanitatis* передбачає можливість видобутку таких ресурсів тільки при умові їхнього справедливого розподілу серед усіх членів міжнародної спільноти. Саме такий режим був вироблений для ресурсів міжнародного району морського дна. При розробленні проекту Угоди про Місяць країни, що розвиваються, не вбачали серйозних підстав не застосовувати до природних ресурсів небесних тіл, особливо до Місяця, той самий режим, що й до морського дна за межами національної юрисдикції [21, с. 4].

Стаття 136 Конвенції ООН з морського права 1982 р. визнала цю територію та її ресурси загальною спадщиною людства, що було деталізовано у ст. 137, яка закріпила, що: 1) жодна держава не може претендувати на суверенітет чи суверенні права або здійснювати їх відносно будь-якої частини Району, тобто дна морів і океанів і його надр за межами національної юрисдикції (ст. 1 конвенції), чи його ресурсів; 2) жодна держава,



фізична або юридична особа не може привласнити будь-яку їхню частину; 3) усі права на ресурси Району належать усьому людству, від імені якого діє спеціальний орган. Ці ресурси не підлягають відчуженню; 4) корисні копалини, що видобуваються в Районі, можуть бути відчужені, але лише згідно з конвенцією; 5) жодна держава, фізична або юридична особа не може претендувати на права на корисні копалини, що видобуваються в Районі, набувати або здійснювати їх інакше, як згідно з конвенцією [10]. Зазначений режим було доповнено положеннями п. 1 ст. 140 конвенції, згідно з якими діяльність у Районі здійснюється ... на благо всього людства, незалежно від географічного положення держав, як прибережних, так і таких, що не мають виходу до моря, із особливим урахуванням інтересів і потреб держав, що розвиваються, та народів, які не досягли повної незалежності або іншого статусу самоврядування [10]. Для реалізації цієї політики конвенцією утворений Міжнародний орган з морського дна, що забезпечує справедливий розподіл фінансових та інших економічних вигод, отримуваних від діяльності в Районі, через відповідний механізм на недискримінаційній основі (п. 2 ст. 140 конвенції) [10].

Наведені статті яскраво демонструють сутність режиму загальної спадщини людства, що, як було вже зазначено, на думку певної частини держав світу, сформувався також щодо космосу та його ресурсів. Перш ніж перейти до його аналізу, розглянемо ключові положення концепції загальної спадщини людства.

Для правильного розуміння сутності та цілей концепції слід звернутися до історичного контексту, у якому вона формувалася. Виникнення та розвиток ідеї загальної спадщини відбувався у 1960—1970-ті рр. на тлі фінальної стадії розпаду колоніальних систем та початку формування нового міжнародного економічного порядку, в рамках якого молоді країни Азії, Африки та Латинської Америки почали вимагати встановлення справедливих умов у міжнародній торгівлі та у розподілі ресурсів територій поза національною юрисдикцією. За виразом А. Пардо, одного із основоположників концепції загальної спадщини стосовно міжнародного району морсько-

го дна, концепція кинула виклик структурним відносинам між багатими та бідними країнами та стала революцією не тільки у морському праві, але й у міжнародних відносинах [49, с. 559]. Її основною метою було завадити індустріально розвинутим країнам, чий економічний достаток і так багато у чому базувався на кількасотрічній експлуатації колоній, отримати доступ до необмеженого видобутку глобальних спільних ресурсів на тлі відсутності відповідної технологічної спроможності у країн, що розвиваються.

Це мають забезпечити ключові змістовні елементи концепції. Слід зазначити, що погляди на них у науці міжнародного права не співпадають. Так, вчені відносять до їхнього кола:

- 1) неможливість проголошення суверенітету щодо будь-якої частини відповідної території;
- 2) використання територій тільки у мирних цілях;
- 3) спільне управління;
- 4) розподіл прибутків від експлуатації [39, с. 377];
- 5) захист природного середовища [47, с. 450—451] чи, як його іноді ширше формулюють, захист об'єкта загальної спадщини від деградації [11, с. 140];
- 6) належність прав щодо ресурсів людству або ж міжнародній спільноті як єдиному цілому [47, с. 450—451] з урахуванням інтересів також майбутніх поколінь [11, с. 140].

Крім того, слід наголосити на тому, що хоча на думку дослідників принцип загальної спадщини стосується скоріше використання ресурсів в межах певної території, ніж самої території [30, с. 214], під загальною спадщиною розуміють саме простори та пов'язані із ними ресурси, які перебувають за межами державної юрисдикції [11, с. 136], а не ресурси, що можуть мати характер глобальних суспільних (*global public goods*) чи спільних благ (*global common goods* чи *global commons*), незалежно від місця їхнього розташування.

Режим спільного управління загальною спадщиною є одним із сильних місць у концепції, адже він має забезпечити дієві механізми видобутку та розподілу ресурсів без усіякої дискримінації та на справедливій основі [11, с. 140]. Однак саме утворення та об'єм повноважень струк-

тур, які могли б здійснювати таке управління, становить значні проблеми [53, с. 534]. Дійсно, поки що єдиним режимом загальної спадщини, забезпеченим відповідним механізмом, є режим міжнародного району морського дна.

Питання викликає статус концепції у нормативній системі міжнародного права. Дехто називає її принципом, що закріпився у загальному міжнародному звичаєвому праві [61, с. 337], дехто вважає, що про її звичаєвий статус можна казати виключно щодо міжнародного району морського дна [47, с. 456], дехто взагалі ставить під сумнів її нормативний статус, зважаючи на наявність так званих «постійних заперечувальників», які унеможливають утворення міжнародних звичаїв [47, с. 455]. Мірзаї С. вбачає основою застосування концепції загальної спадщини людства принцип справедливості, який, на його думку, не отримав належного закріплення у позитивному міжнародному праві, однак широко застосовується у практиці міжнародних судів [14, с. 13].

У жодному разі питання правового статусу концепції не є однозначно визначеним, що ускладнює її розвиток і застосування, а також призводить до її некоректного використання та навіть зловживання посиланнями на неї. Так, у публікаціях можна зустріти сміливі пропозиції відносити до загальної спадщини людства не тільки міжнародний район морського дна, а й космічний простір із небесними тілами [14], Антарктику, хоча й з певними зауваженнями щодо комплексності режиму [32, с. 300], відкрите море та повітряний простір за межами національної юрисдикції [16, с. 52]. Крім того, робляться пропозиції щодо можливого поширення цього режиму на такі об'єкти, як кіберпростір, людський геном [28], культурний спадок [36] та навіть клімат [53, с. 534] чи атмосферу [11, с. 139]. Як можна побачити, деякі із названих об'єктів, зокрема відкрите море, насправді не належать до загальної спадщини людства, а скоріше відносяться до *res communes*. На інші взагалі із низькою ймовірністю може бути поширений відповідний режим, зважаючи на особливі характеристики, які унеможливають обмеження та контроль за доступом до ресурсів (наприклад кіберпростір),

відсутність чітких кордонів (наприклад атмосфера), перебування під юрисдикцією окремих держав (наприклад культурний спадок).

#### ***Global commons* як об'єкти міжнародного права.**

Такий широкий перелік об'єктів загальної спадщини людства зумовлений та пов'язаний ще з однією концепцією, яка останніми роками широко застосовується у наукових дослідженнях, — концепцією глобальних спільних благ (*global commons*). Слід відмітити, що до неї звертаються представники різних наук, — економіки, політології, міжнародних відносин та права, хоча походить вона саме з економічних досліджень, у яких проводиться класифікація видів благ та виокремлюються їхні визначальні характеристики. Саме останнє є цінним для правової теорії, адже відмінності сутнісних характеристик досліджуваних благ впливають на можливості їхнього привласнення, використання та, у результаті, правового регулювання.

У найзагальнішому вигляді блага поділяють на приватні та публічні (чи суспільні). Першим властиві виключність та конкурентність, тоді як останні є невиключними та неконкурентними [19, с. 131]. Категорії виключності та конкурентності є ключовими для розрізнення благ, що можуть перебувати у приватній чи спільній власності. Так, виключність означає, що можливість доступу до блага надається тільки його власнику та, головне, що він може бути забезпечений правовими засобами, а конкурентність означає, що споживання блага одним суб'єктом зменшує можливість його споживання іншими. Водночас різноманітність економічних благ не вкладається у такий спрощений дихотомічний поділ, що призвело дослідників до більш складної класифікації. Так, один з авторів теорії спільних благ П. Самуельсон у своїй відомій праці «Чиста теорія державних витрат» (1954) дослідив категорію так званих «чистих» суспільних благ [52], тобто дійсно невиключних та неконкурентних. Поряд із ними наразі виокремлюють так звані «чисті» приватні блага та «змішані» блага, останні у свою чергу поділяють на клубні, виключні та неконкурентні, та спільні, невиключні та конкурентні [17, с. 25; 26, с. 8; 58, с. 8]. Саме до останньої категорії відносяться також глобальні спільні блага (*global commons*),

тобто такі блага, якими можуть користуватися всі країни, народи та навіть покоління [42, с. 95].

Отже, з точки зору економічної теорії глобальні спільні блага — це такі ресурси, доступ до яких є загальним, але їхнє споживання поступово призводить до деградації, тобто зменшення кількості чи якості ресурсу. Саме у цьому, кажучи спрощено, полягає добре відома «трагедія спільного» чи «трагедія общин» (“the tragedy of commons”), як її перекладають українською, що була обґрунтована Г. Хардіном у 1968 р.

Разом з тим це поняття, запозичене з економіки, у теорії міжнародних відносин та міжнародному праві отримало дещо інше тлумачення. Під глобальними спільними благами у цих науках часто розуміють такі простори та їхні ресурси, які не підпадають під ексклюзивну юрисдикцію жодного уряду [37, с. IX], перебувають поза національною юрисдикцією та до яких усі держави мають доступ [38, с. 5–6], який ніким не може бути обмежений [60, с. 1]. Таке визначення споріднює *global commons* із *res communes*.

Серед просторів, які належать до зазначеної категорії, найчастіше зазначають відкрите море, повітряний простір, космос та кіберпростір [55, с. 1]. Але цим пропозиції не обмежуються, адже до них зараховують також клімат, озоновий шар, Антарктику, рибні ресурси відкритого моря, міжнародні води, міграційні види [37, с. IX], тропічні ліси, біорізноманіття [38, с. 5–6], полярні регіони [27, с. 37], океани, океанічну атмосферну систему та навіть Землю у цілому [60, с. 18].

Як можна побачити, серед запропонованих об’єктів наявні як глобальні «чисті» суспільні блага — невиключні та неконкурентні (наприклад клімат, озоновий шар), так і глобальні спільні блага — невиключні, але конкурентні (наприклад геостационарна орбіта, рибні ресурси відкритого моря). Таке різноманіття відмінних за своїми характеристиками ресурсів та просторів, що пропонують об’єднати у рамках однієї категорії, свідчить про наявність значної термінологічної плутанини та, як наслідок, правової невизначеності щодо статусу та режиму використання цих об’єктів та просторів.

Слід також зазначити, що розуміння *global commons* саме як просторів значно ускладнює

розроблення ефективного режиму їхнього правового регулювання. Віднесення усіх глобальних спільних благ до *res communes* спрощує ситуацію, однак, на жаль, не вирішує проблему «трагедії спільного», адже необмежене використання конкурентних ресурсів таких територій невідворотно призведе до їхньої деградації. Ускладнюється ситуація ще й тим фактом, що на практиці у межах одного простору можуть міститися різноманітні блага, наприклад, «чисті» суспільні блага, спільні блага та навіть приватні блага. Так, якщо розглянути ресурси космічного простору, то серед них можна виокремити «чисті» суспільні блага, як-от: мінеральні ресурси *in situ* Місяця, інших планет та астероїдів, що наразі є невиключними (потенційно доступ до них може бути надано усім державам та відповідно до законодавства останніх, певним суб’єктам господарювання) та неконкурентними (зважаючи на те, що якнайменш на сучасному етапі ресурси цих космічних тіл можна вважати необмеженими) благами; спільні блага, як-от: геостационарна орбіта, що є невиключним (доступ до неї мають усі держави та, відповідно до законодавства останніх, певні суб’єкти господарювання), але конкурентним (простір геостационарної орбіти є обмеженим природним ресурсом, адже у ньому можна розмістити тільки лімітовану кількість супутників) благом; приватні блага, як-от: у перспективі відобуті ресурси небесних тіл у разі визнання щодо них приватних прав, які у цьому випадку будуть виключними (доступ до них будуть мати тільки відповідні суб’єкти господарювання) та конкурентними (їхнє використання одним суб’єктом не залишатиме такої можливості для інших) благами. Усе це свідчить про неможливість наявності тільки одного гомогенного режиму правового регулювання щодо таких комплексних об’єктів, яким є космічний простір.

Явище поєднання різних міжнародно-правових режимів щодо певних територій, яке ми пропонуємо називати фрагментацією, вже привертало до себе увагу науковців. Так, К. Коліс наголошує на різноманітності правових режимів, що стосуються Антарктики та космічного простору [32, с. 10]. Крім того, це логічно пояснюється зазначеною вище теорією А. Капурсо щодо

*res communes*, який пропонує окремо розглядати «контейнер» та «зміст» певних об'єктів. Ще одним проявом фрагментації може бути розрізнення правого режиму видобутих ресурсів та ресурсів *in situ*, що є особливо актуальним у контексті видобутку ресурсів космічного простору.

Отже, викладене вище дозволяє дійти певних попередніх висновків. Перш за все, потрібно розрізнити поняття глобальних спільних благ (*global commons*) та міжнародні правові режими, які встановлюють порядок їхнього використання. До останніх належать режими *res nullius* (або приватної власності), *res communis* та загальної спадщини людства, який можна розглядати як модифікацію режиму *res communis*. Якщо останній дає можливість необмеженого доступу до ресурсів спільних просторів, то режим загальної спадщини людства фактично підпорядковує такий доступ колективному управлінню та контролю, що певною мірою може вирішити проблему «трагедії спільного».

#### МІЖНАРОДНІ ДОГОВОРИ ЩОДО КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ ТА ЙОГО РЕСУРСІВ

З'ясувавши сутність та особливості правових категорій, які пропонується застосовувати до космічного простору та його ресурсів, розглянемо його відповідність окресленим правовим режимам.

Перш за все спробуємо встановити, наскільки правові положення, що визначають міжнародно-правовий режим космічного простору, корелюють із ключовими елементами концепції загальної спадщини людства. Як вже зазначалося, основними документами, які регламентують діяльність у космосі, є Договір про космос та Угода про Місяць, хоча визначення статусу космосу почалося ще до їхнього підписання із прийняттям у 1963 р. Генеральною Асамблеєю ООН Декларації правових принципів, що регламентують діяльність держав з дослідження та використання космічного простору. Саме вона уперше проголосила принцип непривласнення космосу та здійснення діяльності у ньому на благо і в інтересах усього людства [4]. Однак ключовим джерелом регламентації такої діяльності став та залишається Договір про космос, який

станом на 2021 р. був ратифікований 111 державами, включно з усіма найбільшими космічними державами, зокрема США та Люксембургом. Така значна міжнародна підтримка цього договору дає підстави вважати, що його положення можна розглядати також як частину загального звичаєвого права, що, однак, потребує окремих досліджень.

Слід підкреслити, що в договорі не міститься посилання на загальну спадщину людства, а тільки на «надбання всього людства» (ст. 1). У англійському перекладі цей вираз звучить, як «the province of all mankind», що може перекладатися також як «сфера діяльності» або «царина людства». Ключовим принципом, що міститься у Договорі про космос, є саме принцип непривласнення його території та ресурсів, який лежить в основі як режиму *res communis*, так і режиму загальної спадщини людства. Так само закріплено принцип використання космосу виключно у мирних цілях (ст. 4). Стаття 9 встановлює правило щодо необхідності уникнення шкідливого забруднення, яке можна із певними зауваженнями трактувати як зобов'язання щодо захисту природного середовища [5]. Разом з тим договір не утворює механізмів спільного менеджменту та розподілу прибутків від експлуатації космічних ресурсів, як це робить Конвенція ООН про морське право щодо міжнародного району морського дна.

Основним джерелом, що закріплює принцип загальної спадщини людства щодо космосу, прийнято вважати Угоду про Місяць, яка, і на цьому потрібно окремо наголосити, станом на 2021 р. є ратифікованою тільки 18 державами, серед яких немає жодної крупної космічної держави. Такий низький рівень представництва не дозволяє казати про міжнародний звичаєвий статус положень документу.

Угода визначає міжнародно-правовий режим Місяця та інших небесних тіл Сонячної системи, окрім Землі, за винятком тих випадків, коли набирають чинності конкретні правові норми стосовно будь-якого з цих небесних тіл (п. 1 ст. 1) [22]. Останнє положення привертає до себе увагу, адже передбачає можливість утворення спеціальних правових режимів.



Ключовою статтею угоди, яка визначає особливості режиму зазначених тіл, є ст. 11, п. 2 якої також закріплює принцип непривласнення. Однак головним є те, що п. 1 цієї статті визначає Місяць та його природні ресурси загальною спадщиною людства [22]. Цікаво, що саме цей факт тлумачиться дослідниками як основна причина неефективності угоди [14, с. 96].

Далі у п. 3 ст. 11 Угода про Місяць наголошує, що «природні ресурси, там де вони є (прим. автора — *in situ*), не можуть бути власністю будь-якої держави, міжнародної міжурядової чи неурядової організації, національної організації чи неурядової установи чи будь-якої фізичної особи» [22]. Цей пункт дає підстави багатьом прихильникам концепції загальної спадщини людства заперечувати можливість встановлення приватної власності щодо ресурсів небесних тіл. З іншого боку, супротивники такого підходу наголошують на тому, що цей припис стосується тільки ресурсів *in situ*, та припиняє свою дію щодо видобутих корисних копалин [13, с. 897].

І нарешті, п. 5 ст. 11 закріплює зобов'язання держав-учасниць встановити міжнародний режим, включаючи відповідні процедури, для регулювання експлуатації природних ресурсів Місяця, коли стане очевидно, що така експлуатація стане можливою найближчим часом. Це положення є базою для створення механізму спільного менеджменту, який є визначальною ознакою режиму загальною спадщини. Такий механізм, однак, так і не був утворений. Хоча останні події щодо підписання Домовленостей щодо програми «Артеміда» наводять на думку про його можливий розвиток.

Отже, аналіз положень Договору про космос та Угоди про Місяць дозволив встановити, що міжнародно-правовому режиму космосу властиві деякі риси загальної спадщини людства. Разом з тим йому не вистачає таких ключових елементів її концепції, як механізм спільного управління та механізм розподілу ресурсів. Положення Угоди про Місяць хоча й заклали основу для подальшого розвитку режиму загальної спадщини щодо космосу, але за відсутності широкої міжнародної підтримки залишилися тільки декларативними. У цілому, враховуючи той факт, що

деякі держави, наприклад СРСР, з самого початку виступали проти закріплення принципу загальної спадщини в Угоді про Місяць, можна дійти висновку про те, що принцип загальної спадщини людства стосовно космічного простору не отримав статусу міжнародного звичаю, а положень компромісного Договору про космос недостатньо для його остаточного договірної закріплення. Натомість загальноновизнаною нормою міжнародного космічного права є принцип непривласнення території космосу ані шляхом проголошення суверенітету, ані шляхом звернення до окупації, ані іншими засобами.

### МАЙБУТНЄ МІЖНАРОДНО-ПРАВОВОГО РЕЖИМУ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

**Принцип непривласнення та національне законодавство щодо видобутку та використання ресурсів космічного простору.** Спроби закріпити права власності на космічні ресурси робилися неодноразово. Варто згадати діяльність широковідомої компанії «Lunar Embassy» із продажу земельних ділянок на Місяці, яку можна кваліфікувати як шахрайську [46, 50], та невдалу спробу привласнити права на астероїд у судовому порядку, яку зробив у 2003 р. громадянин США Грег Неміц [62, с. 446].

Однак справжніми правовими новелами останніх років стало прийняття Закону США про конкурентоздатність у галузі комерційних космічних запусків 2015 р. та Закону Люксембургу про дослідження та використання космічних ресурсів 2017 р. Окрім цілої низки рішень, які регламентують діяльність приватних компаній з розвідки, видобутку та експлуатації ресурсів небесних тіл та визначають процедури отримання дозволів та проведення контролю за діяльністю відповідних компаній, ці закони визнали за останніми право приватної власності щодо зазначених ресурсів. Так, секція 402 закону США встановлює, що «громадянин США, який займається комерційним видобутком ресурсів астероїда чи космосу відповідно до цього розділу, має право на будь-який отриманий ресурс, включаючи право володіння, привласнення, транспортування чи продажу ресурсу астероїда чи космосу, отриманого відповідно до застосо-

ваного права, включаючи міжнародні зобов'язання США» [59]. Закон Люксембургу є набагато більш лаконічним, адже ст. 1 в одному реченні визнає, що космічні ресурси можуть бути привласненими [48].

Зазначені положення викликали широку міжнародну дискусію щодо правомірності закріплення на рівні національного законодавства прав приватної власності на космічні ресурси [6, п. 233], адже на перший погляд такі дії держав суперечать принципу непривласнення, закріпленому у Договорі про космос. Разом з тим таку думку поділяють не всі. Останні публікації, особливо американських вчених, демонструють інші підходи до вирішення проблеми та тлумачення принципу непривласнення. Так, на думку Дж. Вренча, ст. 2 Договору про космос не закріплює абсолютну заборону на володіння ресурсами, видобутими у космосі [62, с. 447], адже принцип непривласнення стосується саме території, а не видобутих ресурсів [62, с. 461]. Отож, договір не потребує ніяких змін у цьому аспекті. Інша ідея, що виправдовує прийняття вищезазначених законів, стосується положення п. 3 ст. 11 Угоди про Місяць щодо заборони привласнення ресурсів саме *in situ*, а не видобутих корисних копалин [35, с. 268].

Натомість А. М. Леон у своєму дослідженні щодо законності прав власності на космічні ресурси приходять до висновку, що відносно широкомасштабного видобутку ресурсів законодавство США все ж порушує принцип непривласнення [43, с. 543]. Таке протиріччя викликає занепокоєність у потенційних приватних інвесторів, адже у перспективі їхні права можуть бути оскаржені. Це спонукає дослідників до пошуку шляхів виходу з ситуації, що склалася, причому, якщо представники країн, що розвиваються, вимагають того, щоб комерціалізація космосу не відбувалася [6, п. 233], представники розвинутих країн пропонують змінити Договір про космос, зокрема ст. 2, доповнивши її новою частиною про те, що заборона національного привласнення не стосується приватних компаній [40, с. 207].

Отже, одним із шляхів вирішення проблеми зміни міжнародно-правового режиму щодо експлуатації ресурсів космічного простору може

бути міжнародна договірна правотворчість, тобто внесення змін до чинного Договору про космос, або ж навіть укладення нового договору. Однак це не єдиний спосіб, у який утворюють або змінюють норми міжнародного права, адже це може відбуватися також завдяки міжнародній звичаєвій правотворчості.

**Домовленості щодо програми «Артеміда» як чинник формування нового міжнародно-правового режиму космічного простору.** На тлі гострих дискусій про правомірність прийняття національних правових актів щодо комерціалізації космічного простору 13 жовтня 2020 р. на ініціативу США була підписана Домовленості щодо програми NASA «Артеміда» про принципи співпраці у цивільному дослідженні й використанні Місяця, Марса, комет та астероїдів для мирних цілей. Цей міжнародний акт викликав ще більш бурхливу реакцію міжнародної спільноти, адже дехто побачив у ній спробу США замінити ним Угоду про Місяць, впровадивши у нормативний масив міжнародного космічного права принципово нові положення.

Насправді, Домовленості щодо програми «Артеміда» привертають до себе увагу як завдяки своєму змісту, так і завдяки правовому статусу та формату підписання, які необхідно враховувати, намагаючись зробити висновок про міжнародне правотворче значення цього акту. Як зазначає Р. Деplано, з точки зору змісту усі положення угоди можна поділити на три групи: 1) ті, що інкорпорують чинне міжнародне право, перш за все норми Договору про космос (секції 3, 4, 5, 6, 7, 12), 2) ті, що конкретизують чинне міжнародне право (секції 10, 11), та 3) ті, що є новими у порівнянні із чинним міжнародним правом (секції 9, 11) [33, с. 802—812]. Отож, на погляд дослідниці, положення угоди про видобуток космічних ресурсів (секція 10) не є цілком новими, а скоріше такими, що доповнюють сучасне міжнародне космічне право. Дійсно, положення секції 10, на перший погляд, відповідають чинному міжнародно-правовому режиму космосу. Принаймні п. 2 секції наголошує на тому, що видобуток та використання космічних ресурсів, як з поверхні, так і з надр небесних тіл, має здійснюватися у відповідності до Договору про космос. Цей

припис доповнюється п. 1 секції, де закріплено, що використання ресурсів космосу може піти на благо людству, сприяючи безпечним майбутнім місіям [56]. Однак, як можна побачити, угода не тільки не заперечує можливості комерційного видобутку ресурсів, але й уточнює у п. 2. секції 10 зобов'язання її підписантів гарантувати те, що видобуток космічних ресурсів не становить національного привласнення відповідно до ст. 2 Договору про космос та що контракти та будь-які інші правові акти, пов'язані із космічними ресурсами, мають відповідати Договору про космос. Такий підхід, вочевидь, більшою мірою відповідає прагненню США «легалізувати» комерційну експлуатацію ресурсів космосу також на рівні міжнародного права.

Для того щоб зрозуміти, яким чином це може відбуватися, потрібно визначитись із правовим статусом угоди та її потенційним правотворчим впливом. Перш за все слід наголосити на тому, що Домовленості щодо програми «Артеміда» не є саме міжнародним нормативним договором у дусі Віденської конвенції про право міжнародних договорів. Її можна визначити як міжнародну політичну угоду або ж протокол про наміри [9]. На погляд Н. Р. Малишевої, «Домовленості в рамках програми «Артеміда» за сукупністю ознак слід віднести до міжвідомчого акту міжнародного м'якого права відкритого типу» [12, с. 77]. Принаймні цей документ не закріплює чітких міжнародних зобов'язань держав-учасниць. Про це свідчить, окрім положень секції 1 угоди, де її названо політичним зобов'язанням, також форма його укладення (зокрема, як зазначається у секції 13 угоди, вона не підлягає реєстрації у Секретаріаті ООН), суб'єкти підписання (космічні агенції держав-учасниць) та «лінгвістичні маркери, якими визначається вектор майбутньої діяльності підписантів, не обумовлюючи їхніх зобов'язань» [9]. Це, однак, не означає, що угода не має жодного правотворчого чи, як у нашому випадку, правозмінюючого ефекту.

Як відомо, міжнародна правотворчість — складний та не завжди очевидний процес, що особливою мірою стосується міжнародної звичаєвої правотворчості [15, с. 123]. Якщо принцип непривласнення космічного простору наразі

можна розглядати як звичаєву норму загального міжнародного права, то підписання угоди, навіть політичного характеру, може стати початком поступової зміни цього звичаю або утворенням його «нової» інтерпретації. Насправді сприйняття Домовленостей щодо програми «Артеміда» як засобу тлумачення положень ст. 2 Договору про космос цілком відповідає положенням ст. 31 Віденської конвенції про право міжнародних договорів, зокрема положенню п. 3 (b) про наступну практику застосування договору, яка становить угоду учасників про її тлумачення [33, с. 707]. Хоча негативна реакція деяких країн, зокрема Китаю та Росії, на її підписання ставить під сумнів одноманітність такої практики, а отже, і її формування.

Таким чином, Домовленості щодо програми «Артеміда» справляють певний правотворчий вплив на сучасний міжнародно-правовий режим космічного простору. Слід зауважити, що велике значення для визначення наявності *opinion juris* держав має також їхнє нове національне законодавство [44, с. 17]. У цьому контексті останні новели у правовому регулюванні космічної сфери дозволяють деяким дослідникам казати навіть про формування нового міжнародного космічного порядку [23, с. 28]. Яким він буде, залежить від поведінки держав, підтримки або відсутності підтримки з їхнього боку нової інтерпретації принципу непривласнення, що просувається США та іншим країнами, зацікавленими у комерціалізації космосу. Принаймні у наш час багатостороння правотворчість у космічній сфері переживає важкі часи [45, с. 6].

## ВИСНОВКИ

Наразі міжнародне космічне право проходить наступний етап еволюції, особливо в тому, що стосується міжнародно-правового режиму космосу та його ресурсів. Космос розглядають як один із найважливіших, але недостатньо врегульованих *global commons*, сферу інтенсивної стратегічної конкуренції [54, п. 13]. Однак вироблення ефективного міжнародно-правового регулювання вимагає чіткого розуміння характеристик та особливостей як самого космічного простору, так і різноманітних ресурсів, що можуть видобуватися або використовуватися у ньому. У цьому

аспекті звернення до доробку економічної науки, яка розрізняє глобальні суспільні блага (*global public goods*) та глобальні спільні блага (*global common goods*), є дуже важливим, адже ці категорії, хоча й можуть перебувати у межах одного простору, потребують різного правового регулювання та механізмів захисту.

Таке регулювання можна забезпечити завдяки різноманітним міжнародно-правовим режимам, які склалися протягом історії людства стосовно різних видів благ та просторів. Основними з них є режими *res nullius*, *res communis* та загальної спадщини людства. З аналізу чинних норм міжнародного космічного права випливає висновок про те, що принцип загальної спадщини людства не був остаточно закріплений у міжнародному праві щодо космічного простору та його ресурсів. Натомість широке міжнародне визнання принципу непривласнення космосу дозволяє визнати, що наразі панівним міжнародно-правовим режимом, який визначає порядок його використання, є саме режим *res communis*. На користь цього свідчить також прийняття національного законодавства, що дозволяє привласнення та комерційну експлуатацію видобутих космічних ресурсів при дотриманні принципу непривласнення щодо території їхнього видобування. Разом з тим таке привласнення ресурсів у випадку, наприклад, експлуатації астероїда, викликає сумніви щодо готовності приватної компанії передати такий астероїд у спільне користування, як того вимагає режим *res communis*. Такі побоювання наводять на думку про можливість повернення у міжнародному космічному праві навіть до практики *res nullius* та доктрини «першого володіння», яка може бути лаконічно передана висловом «перший у часі, перший у праві» [30, с. 217]. Такий розвиток подій, однак, не розглядається як припустимий більшістю держав світу, адже є очевидним, що саме цього прагнуть розвинені космічні країни, перш за все США.

Водночас важко не побачити беззаперечні переваги, які може дати людству комерціалізація космосу. І хоча наразі не йдеться про індустриальний видобуток ресурсів Місяця та астероїдів з метою їхнього подальшого транспортування на Землю [54, п. 16], навіть можливість їхнього

майбутнього використання для забезпечення місії на Місяці та Марсі є дуже перспективною. Необхідно також усвідомлювати і той факт, що без інвестицій приватного сектору просування таких високовартісних проєктів є майже неможливим навіть для розвинутих країн. У свою чергу, зрозуміло, що приватні компанії прагнуть отримання прибутків, сприятливого інвестиційного клімату та чітких правил «гри». Вони не бажають просто ділити отримані ресурси із бідними країнами, які, на жаль, іноді намагаються зловживати правами, що гарантує їм принцип загальної спадщини людства. Варто згадати проблему так званих «паперових супутників». Отже, ситуація, що склалася, вимагає винайдення ефективних механізмів правового регулювання, які б дозволили збалансувати інтереси розвинутих країн та країн, що розвиваються, державних та приватних підприємств.

На нашу думку, це неможливо у межах вже відомих людству міжнародно-правових режимів щодо просторів за межами виключної національної юрисдикції. Зауваження про недоречність застосування до космосу наземних правових режимів вже неодноразово лунали у міжнародній спільноті [62, с. 461]. Комплексність об'єкта правового регулювання, яким є космос із його нескінченним простором, незчисленними небесними тілами та необмеженими й різноманітними можливостями використання, вимагає утворення унікального міжнародно-правового режиму, який би поєднував у собі елементи інших, вже випробуваних людством режимів. Його базою може виступати режим *res communis*, який, однак, варто доповнити елементами концепції загальної спадщини людства, зокрема чітким механізмом контролю, який би гарантував захист космосу, небесних тіл та навіть «космічної спадщини» (концепт, введений у правовий дискурс секцією 9 Домовленостей щодо програми «Артеміда») від деградації та надмірної експлуатації, що дозволило б відвернути «трагедію загального». Логічно було б також передбачити у рамках цього режиму процедуру визнання прав власності приватних суб'єктів щодо видобутих ресурсів та інших об'єктів, можливо, на основі пріоритету заявлених прав.



У цей важливий для космічного права момент окремі держави, зокрема Україна, повинні чітко розуміти, у чому полягають їхні національні інтереси, та наполегливо реалізовувати їх як шляхом активної міжнародної співпраці, так і шляхом розроблення ефективного національного законодавства. Крім того, важливо усвідомлювати, які правові наслідки з огляду на чинне міжнародне право та національне законодавство може мати та чи інша поведінка держави. Ідея прийняття закону, який би дозволив привласнення та видобуток космічних ресурсів приватним особам на кшталт законів США та Люксембургу, є дуже привабливою, адже відповідні держави можуть розглядатися як «хаби» для крупних міжнародних компаній, які будуть реєструвати свої представництва у цих країнах задля так званого «прапору зручності» [44, с. 18]. Але слід також пам'ятати, що питання про відповідність такого законодавства положенням Договору про космос не є остаточно вирішеним. У перспективі його прийняття може розглядатися як порушення міжнародних зобов'язань держави та призвести до міжнародної відповідальності. Крім того, можливе ухвалення такого закону в Україні вимагатиме внесення комплексних змін до цілої низки законів та підзаконних нормативно-правових актів, без яких цей режим просто не запрацює [3, с. 500].

Безперечно економічно цікавою є для України також участь в Домовленостях щодо програми «Артеміда», зокрема з огляду на можливість поновлення Рамкової угоди між Кабінетом Міністрів України та Урядом США про співробітництво у дослідженні та використанні космічного простору у мирних цілях, яка припинила дію у 2019 р. Більш плідне співробітництво між державами може бути забезпечено у майбутній двосторонній угоді, підписаній на основі програми «Артеміда», що зробить можливим реалізацію власного концепту дослідно-промислової

бази на Місяці, розробленого Державним підприємством «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», а також виробництво інших зразків космічної техніки, що проєктуються в Україні [9]. Для підписання такої угоди Україна має якнайскоріше визначитись із конкретними суб'єктами, напрямками та формами участі у програмі [12, с. 80], без чого вона так і залишиться для нашої держави протоколом про наміри.

Однак, заглиблюючись у таку співпрацю, слід розуміти, що підписання відповідних угод та прийняття законів демонструє юридичну позицію держави, яка відповідно до принципу добросовісності має бути послідовною та яка може бути сприйнята як прояв *opinio juris*, тобто згоди держави із формуванням нової норми міжнародного права. У випадку формування міжнародних звичаїв іноді досить важко заздалегідь передбачити його конкретний зміст. Враховуючи це, Україна повинна розуміти, чи дійсно відповідають її національним інтересам тенденції щодо комерціалізації космосу та привласнення його ресурсів приватними компаніями, зважаючи на те, що більшість з них утворені іноземними громадянами та юридичними особами.

Отже, на завершення нашого дослідження бажаємо ще раз наголосити на необхідності вироблення нового ефективного міжнародно-правового режиму космічного простору. Доречніше було б зробити це саме шляхом міжнародної договірної правотворчості, яка є більш прозорою та передбачуваною, хоча і потребуватиме часу, необхідного для узгодження волі держав. У цьому зв'язку деякі дослідники пропонують укласти новий договір про космос [40, с. 207]. Однак, на наш погляд, внесення змін у чинний Договір про космос допомогло б зменшити транзакційні витрати та зробило б цей важливий міжнародний договір ще більш дієвим механізмом регулювання міжнародних відносин у сфері використання космосу та його ресурсів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Відьмаченко А. П. Малі тіла Сонячної системи. *Енциклопедія сучасної України*. Гол. редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін. Київ: Ін-т енциклопедичних досліджень НАН України, 2006. URL: [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=63101](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=63101) (дата звернення: 30.07.2021).
2. Гримм Д. Д. *Лекции по догме римского права: пособие для слушателей*. 6-е изд., испр. и доп. Киев: Товарищество печатного и издательского дела авторов-издателей «Голос», 1919. XI, 279 с. URL: <https://dspace.spbu.ru/handle/11701/18236?mode=full> (дата звернення: 30.07.2021).
3. Гурова А. М. Законодавче закріплення видобування та привласнення ресурсів космосу: перспектива чи авантюра. *Правова держава*. 2017. Вип. 28. С. 493—501.
4. *Декларация правовых принципов, регулирующих деятельность государств по исследованию и использованию космического пространства*: Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН № 1962 (XVIII) от 13 декабря 1963 г. URL: [https://www.un.org/gu/documents/decl\\_conv/declarations/outerspace\\_principles.shtml](https://www.un.org/gu/documents/decl_conv/declarations/outerspace_principles.shtml) (дата звернення: 30.07.2021).
5. *Договір про принципи діяльності держав стосовно дослідження та використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла 1967 р.* (набув чинності 10.10.67). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_480#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_480#Text) (дата звернення: 30.07.2021).
6. *Доклад Комитета по использованию космического пространства в мирных целях*: Шестидесятая сессия (7—16 июня 2017 года). URL: [https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2017/aac\\_1051/aac\\_1051\\_309add\\_1\\_0\\_html/AC105\\_L309Add01R.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2017/aac_1051/aac_1051_309add_1_0_html/AC105_L309Add01R.pdf) (дата звернення: 30.07.2021).
7. Замкнутый круг: борьба за ресурсы приводит к конфликтам, которые уничтожают природу: *Новости ООН*. 17.09.2020. URL: <https://news.un.org/gu/story/2020/09/1386042> (дата звернення: 30.07.2021).
8. Иванов Є. *Геокадастрові дослідження гірничопромислових територій*: Монографія. Львів: Видав. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2009. 372 с.
9. Кірачова М. За кулісами Угоди «Артеміда»: аналіз політичних та правових аспектів. *Вокс Україна*, 17.11.20. URL: <https://voxukraine.org/tag/nasa/> (дата звернення: 30.07.2021).
10. *Конвенция ООН по морскому праву 1982 р.* (набула чинності: 16.11.94). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_057#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_057#Text) (дата звернення: 30.07.2021).
11. Лукашук И. И. *Международное право: особенная часть: учебник*. Изд. 3-е. Москва: Волтерс Клувер, 2005. 517 с.
12. Малишева Н. Р. Міжнародно-правові засади розробки ресурсів Місяця, Марса та інших небесних тіл. *Космічна наука та технологія*. 2021. 27, № 4 (131). С. 74—82. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.074>
13. *Международное право: учеб.* Отв. ред. А. Н. Вылегжанин. 2-е изд. Москва: Юрайт, 2010. 1003 с.
14. Мирзай С. *Концепция общего наследия человечества в современном международном праве*: дис. ... канд. юрид. наук. Москва, 2018. 173 с.
15. Нігреєва О. О. Міжнародна звичаєва правотворчість: окремі аспекти. *Актуальні проблеми держави і права*. 2014. Вип. 74. С. 123—128.
16. Пашенко И. Ю. Концепция общего наследия человечества в современном международном праве и проблемы ее реализации. *Sci. Time*. 2014. № 2. С. 50—55.
17. Пилипенко А. Н., Горбанев В. С. Глобальные блага в структуре благ общественного назначения. *Вестн. соц.-эконом. исслед.* 2018. № 2 (66). С. 19—28.
18. Подберезкин А. И., Харкевич М. В. *Мир и война в XXI веке: опыт долгосрочного прогнозирования развития международных отношений*. Москва: МГИМО-Университет, 2015. 581 с.
19. Радіонов Ю. Д. Теорія виробництва і надання суспільних благ. *Наук. вісник Ужгородського нац. ун-ту. Сер.: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2017. Вип. 11. С. 129—133.
20. Сотник І. М., Шевельова Д. С. *Боротьба за обмежені ресурси як підґрунтя виникнення військових конфліктів*. Економічні проблеми сталого розвитку: матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Суми, 27 травня 2015 р.). Суми: СумДУ, 2015. С. 40—42.
21. *Тридцатилетие Соглашения по Луне: итоги и перспективы: Неотредактированная стенограмма, Комитет по использованию космического пространства в мирных целях, Юридический подкомитет* (Симпозиум, Вена, 23 марта 2009 г.). URL: [https://www.unoosa.org/pdf/transcripts/legal/LEGAL\\_T784R.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/transcripts/legal/LEGAL_T784R.pdf) (дата звернення: 30.07.2021).
22. *Угода про діяльність держав на Місяці й інших небесних тілах 1979 р.* (набула чинності 11.07.84). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_482#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_482#Text) (дата звернення: 30.07.2021).
23. Alshdaifat Sh. A. Who Owns What in Outer Space? Dilemmas regarding the Common Heritage of Mankind. *Pécs J. Inter. and Eur. Law*. 2018. 2. P. 21—43.
24. Anderson S. W., Christensen K., LaManna J. The Development of Natural Resources in Outer Space. *J. Energy & Natural Resources Law*. 2018. 36. P. 1—32.

25. Atkinson N. *What Are Asteroids Made of?* September 12, 2015. URL: <https://www.universetoday.com/37425/what-are-asteroids-made-of/> (дата звернення: 30.07.2021).
26. Bizzarri K. *Beni pubblici globali*. Come gestire la globalizzazione nel 21° Secolo. Firenze: Campagna per la Riforma della Banca Mondiale, Fondazione Culturale Responsabilità Etica, 2005. 42 p.
27. Buttigieg J. The Common Heritage of Mankind: From the Law of the Sea to the Human Genome and Cyberspace. *Symposia Melitensia*. 2012. **8**. P. 81—92.
28. Bosselmann K. Governing the Global Commons: the “Planetary Boundaries” Approach. *Policy Quarterly*. 2017. **13**, № 1. P. 37—42.
29. Capurso A. *The Non-Appropriation Principle: A Roman Interpretation*. 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, 1—5 October 2018. URL: <http://iislweb.org/awards-and-competitions/diederiksverschuur-award/> (дата звернення: 30.07.2021).
30. Cherian J. G., Abraham J. Concept of Private Property in Space – An Analysis. *J. Int. Commercial Law and Technology*. 2007. **2**, № 4. P. 211—220.
31. Cocca A. A. Mankind as the New Legal Subject: A New Juridical Dimension Recognized by the UN. *IISL Colloquium on the Law of Outer Space*. 1971. **14**. P. 209—218.
32. Collis C. Territories beyond possession? Antarctica and Outer Space. *Polar J*. 2017. № 7(2). P. 287—302. URL: <https://eprints.qut.edu.au/110967/2/110967.pdf> (дата звернення: 30.07.2021).
33. Deplano R. The Artemis Accords: Evolution or Revolution in International Space Law? *Int. and Comparative Law Quarterly*. 2021. **70**, № 3. P. 799—819.
34. Ericsson M., Söderholm P. *Mineral Depletion and Peak Production*: POLINARES working paper n. 7. Brussels: POLINARES Consortium, 2010. 9 p.
35. Force M. K. The Paradox of United States’ Position on Regulation of Space Resource Extraction. *Proceedings of the IISL*. 2016. № 9. P. 259—277.
36. Forrest C. Cultural Heritage as the Common Heritage of Humankind: A Critical Reevaluation. *Comp. and Int. Law J. South Afr.-Cilsa*. 2007. **40**, № 1. P. 124—151.
37. *Global Commons: Expert Paper Series Two*. Secretariat of the International Task Force on Global Public Goods. Stockholm: Erlanders Infologistics Väst AB, 2006. 204 p.
38. Global Governance and Governance of the Global Commons in the Global Partnership for Development Beyond 2015: Report. UN System Task Force on the Post-2015 Development Agenda. Thematic Think Piece by OHCHR, OHRLS, UNDESA, UNEP, UNFPA, 2013. URL: = [http://www.un.org/en/development/desa/policy/untaskteam\\_undf/thinkpieces/24\\_thinkpiece\\_global\\_governance.pdf](http://www.un.org/en/development/desa/policy/untaskteam_undf/thinkpieces/24_thinkpiece_global_governance.pdf) (дата звернення: 30.07.2021).
39. Guntrip E. The Common Heritage of Mankind: an Adequate Regime for Managing the Deep Seabed? *Melbourne J. Int. Law*. 2003. № 4 (2). P. 376—405.
40. Heise J. Space, the Final Frontier of Enterprise: Incentivizing Asteroid Mining Under a Revised International Framework. *Michigan J. Int. Law*. 2018. **40**, № 1. P. 189—213.
41. *Jeff Bezos Says Sales of Blue Origin Space Tourist Flights Are ‘Approaching \$100 Million’ Already, July 20, 2021*. URL: <https://www.cnn.com/2021/07/20/jeff-bezos-blue-origin-space-tourist-sales-approaching-100-million.html> (дата звернення: 30.07.2021).
42. Kaul I., Mendoza R. U. *Advancing the Concept of Public Goods*. Providing Global Public Goods: Managing Globalization. Eds I. Kaul, P. Conceicao, K. Le Goulven, R. U. Mendoza. Oxford: Oxford University Press, 2003. 672 p.
43. Leon A. M. Mining for Meaning: An Examination of the Legality of Property Rights in Space Resources. *Virginia Law Review*. 2018. **104**. P. 497—546.
44. Masson-Zwaan T., Palkovitz N. Regulation of Space Resource Rights: Meeting the Needs of States and Private Parties. *Quest. Int. Law*. 2017. № 35. P. 5—18.
45. Nelson J. W. The Artemis Accords and the Future of International Space Law. *Insights*. 2020. **24**, № 31. P. 1—7.
46. *Novelty Merchant Raided over ‘Lunar Subdivision’*: Published on May 25, 2004. URL: <https://www.expatica.com/de/uncategorized/novelty-merchant-raided-over-lunar-subdivision-103152/> (дата звернення: 30.07.2021).
47. Noyes J. E. The Common Heritage of Mankind: Past, Present, and Future. *Denver J. Int. Law and Policy*. 2011—2012. **40** (1—3). P. 447—471.
48. *On the Exploration and Use of Space Resources: Law of the Grand Duchy of Luxembourg of July 20th, 2017*. URL: [https://space-agency.public.lu/en/agency/legal-framework/law\\_space\\_resources\\_english\\_translation.html](https://space-agency.public.lu/en/agency/legal-framework/law_space_resources_english_translation.html) (дата звернення: 30.07.2021).
49. Pardo A. Ocean, Space and Mankind. *Third World Quarterly*. 1984. **6**, № 3. P. 559—572.

50. Pop V. *Extraterrestrial Real Estate: Debunking the Myth*: Paper presented at the 47th Colloquium on the Law of Outer Space, 55th International Astronautical Congress, Vancouver, 6 October 2004. URL: [https://www.researchgate.net/publication/314236538\\_Extraterrestrial\\_Real\\_Estate\\_Debunking\\_the\\_Myth](https://www.researchgate.net/publication/314236538_Extraterrestrial_Real_Estate_Debunking_the_Myth) (дата звернення: 30.07.2021).
51. *Resource Scarcity – A Global Security Threat?* Eds S.-A. Mildner, S. Richter, G. Lauster. SWP Research Paper. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik, 2011. 30 p.
52. Samuelson P. A. The Pure Theory of Public Expenditure. *Rev. Econ. and Statist.* 1954. № 36. P. 387–389.
53. Shaw M. *International Law*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008. 1541 p.
54. *Space Resource Utilization and the Artemis Accords: Proposal, Ministry of Business, Innovation and Employment of New Zealand, June 30, 2021*. URL: <https://www.mbie.govt.nz/dmsdocument/15305-space-resource-utilisation-and-the-artemis-accords-proactiverelease-pdf> (дата звернення: 30.07.2021).
55. Stang G. Global Commons: Between Cooperation and Competition. *European Union Institute for Security Studies*, April 2013. P. 1–4. URL: <https://www.iss.europa.eu/content/global-commons-between-cooperation-and-competition> (дата звернення: 30.07.2021).
56. *The Artemis Accords: Principles for Cooperation in the Civil Exploration and Use of the Moon, Mars, Comets, and Asteroids for Peaceful Purposes, signed 13.10.20*. URL: <https://www.nasa.gov/specials/artemis-accords/index.html> (дата звернення: 30.07.2021).
57. *The Lunar Gold Rush: How Moon Mining Could Work, May 29, 2015*. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/infographics/the-lunar-gold-rush-how-moon-mining-could-work> (дата звернення: 30.07.2021).
58. Toppetta A. *Beni comuni: dalla tragedia alla riscoperta: Tesi di Master. Roma, 2017*. 38 p. URL: <https://tesi.luiss.it/id/erprint/19924>. (дата звернення: 30.07.2021).
59. *U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act: Public Law 114-90 of November 25, 2015*. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-114publ90/pdf/PLAW-114publ90.pdf> (дата звернення: 30.07.2021).
60. Weiss E. B. Nature and the Law: the Global Commons and the Common Concern of Humankind. *Sustainable Humanity, Sustainable Nature: Our Responsibility*, Pontifical Academy of Sciences, 2014, Extra Series 41. P. 1–16. URL: [www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/es41/es41-brownweiss.pdf](http://www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/es41/es41-brownweiss.pdf). (дата звернення: 30.07.2021).
61. Wolfrum R. *The Principle of the Common Heritage of Humankind*. Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, 1983. P. 312–337. URL: <http://www.zaoerv.de> (дата звернення: 30.07.2021).
62. Wrench J. G. Non-Appropriation, No Problem: The Outer Space Treaty Is Ready for Asteroid Mining. *Case Western Reserve J. Int. Law*. 2019. 51, № 1. P. 437–462.

#### REFERENCES

1. Vidmachenko A. P. (2006). Small Bodies of the Solar System. *Encyclopedia of Modern Ukraine*. Eds.: I. M. Dziuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak, et al. Kyiv: Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. URL: [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=63101](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=63101) (Last accessed: 30.07.2021) [in Ukrainian]
2. Grimm D. D. (1919). *Lectures on the Dogma of Roman Law: A Guide for Students*. 6th ed., corrected and ed. Kiev: Society of Printing and Publishing of Authors-Publishers “Voice”. URL: <https://dspace.spbu.ru/handle/11701/18236?mode=full> (Last accessed: 30.07.2021) [in Russian].
3. Gurova A. M. (2017). Legal Regulation of Mining and Appropriation of Space Resources: Perspective or Adventure. *Constitutional state*, 28, 493–501 [in Ukrainian].
4. *Declaration of Legal Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space: Resolution of the UN General Assembly No. 1962 (XVIII) of December 13, 1963*. URL: [https://www.un.org/ru/documents/decl\\_conv/declarations/outerspace\\_principles.shtml](https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/outerspace_principles.shtml) (Last accessed: 30.07.2021) [in Russian].
5. *Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies of 1967* (entered into force: 10.10.67). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_480#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_480#Text) (Last accessed: 30.07.2021) [in Ukrainian].
6. *Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (2017), 60th session (June 7–16, 2017)*. URL: [https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2017/aac\\_1051/aac\\_1051\\_309add\\_1\\_0\\_html/AC105\\_L309Add01R.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2017/aac_1051/aac_1051_309add_1_0_html/AC105_L309Add01R.pdf) (Last accessed: 30.07.2021) [in Russian].
7. A Vicious Circle: The Struggle for Resources Leads to Conflicts That Destroy Nature (2020): *UN News*, 17.09.2020. URL: <https://news.un.org/ru/story/2020/09/1386042> (Last accessed: 30.07.2021) [in Russian].
8. Ivanov E. (2009). *Geocadastral Studies of Mining Areas*: Monograph. Lviv: Ivan Franko Lviv National University Publishing Center [in Ukrainian].
9. Kirpachova M. (2020). Behind the Scenes of the Artemis Accords: Analysis of Political and Legal Aspects. *Vox Ukraine*, 17.11.20. URL: <https://voxukraine.org/tag/nasa/> (Last accessed: 30.07.2021) [in Ukrainian].



10. *UN Convention on the Law of the Sea of 1982* (entered into force: 16.11.94). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_057#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_057#Text) (Last accessed: 30.07.2021) [in Russian].
11. Lukashuk I. I. (2005). *International law. Special part: textbook*. 3rd ed. Moscow: Walters Clover [in Russian].
12. Malysheva N. R. (2021). International Legal Framework for the Development of Resources of the Moon, Mars and Other Celestial Bodies. *Space Science and Technology*, № 4 (131), 74–82 [in Ukrainian].
13. *International Law: textbook*. Ed. A. N. Vylegzhanin. 2nd ed. Moscow: Yurayt, 2010 [in Russian].
14. Mirzaee S. (2018). *The Concept of the Common Heritage of Mankind in Modern International Law*: PhD thesis. Moscow [in Russian].
15. Nihreieva O. O. (2014). International Customary Lawmaking: Some Aspects. *Current Problems of State and Law*, **74**, 123–128 [in Ukrainian].
16. Pashchenko I. Y. (2014). The Concept of the Common Heritage of Mankind in Modern International Law and the Problems of Its Implementation. *Sci. Time*, № 2, 50–55 [in Russian].
17. Pilipenko A. N., Gorbanev V. S. (2018). Global Goods in the Structure of Public Purpose Goods. *Socio-Economic Res. Bull.*, № 2 (66), 19–28 [in Russian].
18. Podberezkin A. I., Kharkevich M. V. (2015). *Peace and War in the XXI Century: The Experience of Long-Term Forecasting of International Relations*. Moscow: MGIMO-University [in Russian].
19. Radionov Y. D. (2017). Theory of Production and Provision of Public Goods. *Scientific Bull. Uzhhorod Na. Univ. Ser.: Int. Economic Relations and the World Economy*, **11**, 129–133 [in Ukrainian].
20. Sotnik I. M., Shevelyova D. S. (2015). The Struggle for Limited Resources as a Basis for Military Conflicts. *Economic Problems of Sustainable Development*: mater. of Int. scientific-practical conf. (Sumy, May 27, 2015). Sumy: SSU, 40–42 [in Ukrainian].
21. *Thirty Years of the Moon Agreement: Outcomes and Prospects: Unedited Transcript, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, Legal Subcommittee* (Symposium, Vienna, 23 March 2009). URL: [https://www.unoosa.org/pdf/transcripts/legal/LEGAL\\_T784R.pdf](https://www.unoosa.org/pdf/transcripts/legal/LEGAL_T784R.pdf) (Last accessed: 30.07.2021) [in Russian].
22. *Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies* (entered into force: 11.07.84). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_482#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_482#Text) (Last accessed: 30.07.2021) [in Ukrainian].
23. Alshdaifat Sh. A. (2018). Who Owns What in Outer Space? Dilemmas regarding the Common Heritage of Mankind. *Pécs J. Int. and Eur. Law*. Vol. II, 21–43 [in English].
24. Anderson S. W., Christensen K., LaManna J. (2018). The Development of Natural Resources in Outer Space. *J. Energy & Natural Resources Law*, **36**, 1–32 [in English].
25. Atkinson N. (2015). *What Are Asteroids Made of?* URL: <https://www.universetoday.com/37425/what-are-asteroids-made-of/> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
26. Bizzarri K. (2005). *Beni pubblici globali*. Come gestire la globalizzazione nel 21° Secolo. Firenze: Campagna per la Riforma della Banca Mondiale, Fondazione Culturale Responsabilità Etica [in Italian].
27. Buttigieg J. (2012). The Common Heritage of Mankind: From the Law of the Sea to the Human Genome and Cyberspace. *Symposia Melitensia*, **8**, 81–92 [in English].
28. Bosselmann K. (2017). Governing the Global Commons: the “Planetary Boundaries” Approach. *Policy Quarterly*, **13**(1), 37–42 [in English].
29. Capurso A. (2018). *The Non-Appropriation Principle: A Roman Interpretation*: 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, October 1–5, 2018. URL: <http://iislweb.org/awards-and-competitions/diederikverschoor-award/> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
30. Cherian J. G., Abraham J. (2007). Concept of Private Property in Space – An Analysis. *J. International Commercial Law and Technology*, **2**, № 4, 211–220 [in English].
31. Cocca A. A. (1971). Mankind as the New Legal Subject: A New Juridical Dimension Recognized by the UN. *IISL Colloquium on the Law of Outer Space*, **14**, 209–218 [in English].
32. Collis C. (2017). Territories beyond possession? Antarctica and Outer Space. *Polar J.*, № 7(2), 287–302. URL: <https://eprints.qut.edu.au/110967/2/110967.pdf> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
33. Deplano R. (2021). The Artemis Accords: Evolution or Revolution in International Space Law? *International and Comparative Law Quarterly*, **70**, № 3, 799–819 [in English].
34. Ericsson M., Söderholm P. (2010). *Mineral Depletion and Peak Production*: POLINARES working paper n. 7. Brussels: POLINARES Consortium [in English].
35. Force M. K. (2016). “The Paradox of United States” Position on Regulation of Space Resource Extraction. *Proceedings of the IISL*, № 9, 259–277 [in English].

36. Forrest C. (2007). Cultural heritage as the common heritage of humankind: a critical re-evaluation. *Comp. and Int. Law J. South. Afr.-Cilsa*, **40** (1), 124—151 [in English].
37. Global Commons: *Expert Paper Series Two*. Secretariat of the International Task Force on Global Public Goods. Stockholm: Erlanders Infologistics Väst AB, 2006 [in English].
38. Global Governance and Governance of the Global Commons in the Global Partnership for Development Beyond 2015: Report. UN System Task Force on the Post-2015 Development Agenda. Thematic Think Piece by OHCHR, OHRLLS, UNDESA, UNEP, UNFPA, 2013. URL: = [http://www.un.org/en/development/desa/policy/untaskteam\\_undf/thinkpieces/24\\_thinkpiece\\_global\\_governance.pdf](http://www.un.org/en/development/desa/policy/untaskteam_undf/thinkpieces/24_thinkpiece_global_governance.pdf) (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
39. Guntrip E. (2003). The Common Heritage of Mankind: an Adequate Regime for Managing the Deep Seabed? *Melbourne J. Int. Law*, № 4 (2), 376—405 [in English].
40. Heise J. (2018). Space, the Final Frontier of Enterprise: Incentivizing Asteroid Mining Under a Revised International Framework. *Michigan J. Int. Law*, **40**, № 1, 189—213 [in English].
41. *Jeff Bezos Says Sales of Blue Origin Space Tourist Flights Are 'Approaching \$100 Million' Already, July 20, 2021*. URL: <https://www.cnn.com/2021/07/20/jeff-bezos-blue-origin-space-tourist-sales-approaching-100-million.html> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
42. Kaul I., Mendoza R. U. (2003). Advancing the Concept of Public Goods. *Providing Global Public Goods: Managing Globalization*. Eds I. Kaul, P. Conceicao, K. Le Goulven, R. U. Mendoza. Oxford: Oxford University Press [in English].
43. Leon A. M. (2018). Mining for Meaning: An Examination of the Legality of Property Rights in Space Resources. *Virginia Law Review*, **104**, 497—546 [in English].
44. Masson-Zwaan T., Palkovitz N. (2017). Regulation of Space Resource Rights: Meeting the Needs of States and Private Parties. *Questions of International Law*, № 35, 5—18 [in English].
45. Nelson J. W. (2020). The Artemis Accords and the Future of International Space Law. *Insights*, **24**, № 31, 1—7 [in English].
46. *Novelty Merchant Raided over 'Lunar Subdivision'*: Published on May 25, 2004. URL: <https://www.expatica.com/de/uncategorized/novelty-merchant-raided-over-lunar-subdivision-103152/> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
47. Noyes J. E. (2011—2012). The Common Heritage of Mankind: Past, Present, and Future. *Denver J. Int. Law and Policy*, **40** (1—3), 447—471 [in English].
48. *On the Exploration and Use of Space Resources: Law of the Grand Duchy of Luxembourg of July 20th, 2017*. URL: [https://space-agency.public.lu/en/agency/legal-framework/law\\_space\\_resources\\_english\\_translation.html](https://space-agency.public.lu/en/agency/legal-framework/law_space_resources_english_translation.html) (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
49. Pardo A. (1984). Ocean, Space and Mankind. *Third World Quarterly*, **6**, № 3, 559—572 [in English].
50. Pop V. (2004). *Extraterrestrial Real Estate: Debunking the Myth*: Paper presented at the 47th Colloquium on the Law of Outer Space, 55th International Astronautical Congress, Vancouver, 6 October 2004. URL: [https://www.researchgate.net/publication/314236538\\_Extraterrestrial\\_Real\\_Estate\\_Debunking\\_the\\_Myth](https://www.researchgate.net/publication/314236538_Extraterrestrial_Real_Estate_Debunking_the_Myth) (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
51. *Resource Scarcity – A Global Security Threat?* (2011). Eds S.-A. Mildner, S. Richter, G. Lauster. SWP Research Paper. Berlin: Stiftung Wissenschaft und Politik [in English].
52. Samuelson P. (1954). The Pure Theory of Public Expenditure. *Rev. Econ. and Statist.*, № 36, 387—389 [in English].
53. Shaw M. (2008). *International Law*. Cambridge: Cambridge University Press [in English].
54. *Space Resource Utilization and the Artemis Accords: Proposal, Ministry of Business, Innovation and Employment of New Zealand, June 30, 2021*. URL: <https://www.mbie.govt.nz/dmsdocument/15305-space-resource-utilisation-and-the-artemis-accords-proactiverelase-pdf> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
55. Stang G. (2013). Global Commons: Between Cooperation and Competition. *European Union Institute for security studies*, 1—4. URL: <https://www.iss.europa.eu/content/global-commons-between-cooperation-and-competition> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
56. *The Artemis Accords: Principles for Cooperation in the Civil Exploration and Use of the Moon, Mars, Comets, and Asteroids for Peaceful Purposes, signed 13.10.20*. URL: <https://www.nasa.gov/specials/artemis-accords/index.html> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
57. *The Lunar Gold Rush: How Moon Mining Could Work, May 29, 2015*. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/infographics/the-lunar-gold-rush-how-moon-mining-could-work> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
58. Toppetta A. (2017). *Beni comuni: dalla tragedia alla riscoperta: Tesi di Master*. Roma. URL: <https://tesi.luiss.it/id/eprint/19924> (Last accessed: 30.07.2021) [in Italian].
59. *U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act: Public Law 114-90 of November 25, 2015*. URL: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-114publ90/pdf/PLAW-114publ90.pdf> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
60. Weiss E. B. (2014). Nature and the Law: the Global Commons and the Common Concern of Humankind. *Sustainable Humanity, Sustainable Nature: Our Responsibility*, Pontifical Academy of Sciences, Extra Series 41, 1—16. URL: [www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/es41/es41-brownweiss.pdf](http://www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/es41/es41-brownweiss.pdf) (Last accessed: 30.07.2021) [in English].

61. Wolfrum R. (1983). *The Principle of the Common Heritage of Humankind*. Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht, 312—337. URL: <http://www.zaoerv.de> (Last accessed: 30.07.2021) [in English].
62. Wrench J. G. (2019). Non-Appropriation, No Problem: The Outer Space Treaty Is Ready for Asteroid Mining. *Case Western Reserve J. Inter. Law*, 51, № 1, 437—462.

Стаття надійшла до редакції 06.05.2021

Received 06.05.2021

Після доопрацювання 15.11.2021

Revised 15.11.2021

Прийнято до друку 24.11.2021

Accepted 24.11.2021

O. O. Nihreieva, Associate Professor, PhD in Law

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4719-6050>

E-mail: [nihreieva@onu.edu.ua](mailto:nihreieva@onu.edu.ua)

Odessa I. I. Mechnikov National University

2, Dvorianska Str., Odesa, 65000 Ukraine

#### THE INTERNATIONAL LEGAL REGIME OF OUTER SPACE: BETWEEN *RES COMMUNIS* AND *RES NULLIUS*

The publication is devoted to the issue of the international legal regime of outer space. The author attempts to determine the optimal model of international legal regulation for relations regarding the utilization of outer space and its resources.

The basic international legal regimes applied to areas outside the exclusive national jurisdiction are studied. The main attention is paid to the regimes of *res nullius*, *res communis*, and the principle of the common heritage of mankind. The current international legal regulation of outer space exploration and utilization activities is analyzed through the prism of these regimes, as well as in the context of the category of global commons, which often includes outer space. It is emphasized that the mentioned category, although widely used in modern scientific legal discourse, is not clearly defined. Given that the concept of public goods has received a special development in economic theory, it is proposed to take into account the economic properties of such goods in developing regimes for their legal regulation.

The peculiarities and complexity of outer space utilization relations as an object of legal regulation are identified. In this regard, a comprehensive and complex international legal regime that combines elements of *res nullius*, *res communis*, and the common heritage of mankind in relation to the objects of outer space with different natural and, consequently, economic properties should be elaborated.

In addition, the latest trends in national and international law-making related to the formation of a legal regime for the extraction of celestial bodies resources and the commercialization of these activities are analyzed. Their influence on the international legal regime of outer space and tendencies of its future evolution is determined. The importance of a balanced national approach to a new legal regulation of space resources commercial development is emphasized.

**Keywords:** outer space, resources of celestial bodies, international legal regime, *res nullius*, *res communis*, common heritage of mankind, global commons, Artemis Accords, international law-making.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.043>

УДК 620.22:629.7.023.224

**І. О. ГУСАРОВА<sup>1</sup>**, нач. відділу, д-р. техн. наук

E-mail: info@yuzhnoye.com

**О. М. ПОТАПОВ<sup>1</sup>**, нач. комплексу нових матеріалів і перспективних технологій, канд. техн. наук,

акад. Міжнарод. Акад. астронавтики, акад. Акад. технол. наук, лауреат Державної премії в галузі науки і техніки

**Б. М. ГОРЕЛОВ<sup>2</sup>**, зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук

**Т. А. МАНЬКО<sup>3</sup>**, проф., д-р техн. наук, проф.

**Г. О. ФРОЛОВ<sup>4</sup>**, зав. відділу, д-р техн. наук

<sup>1</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»,  
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

<sup>2</sup> Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка Національної академії наук України  
вул. Генерала Наумова 17, Київ, Україна, 03164

<sup>3</sup> Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
Пр. Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49000

<sup>4</sup> Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України  
вул. Кржижановського Київ-142, Україна, 03680

## КОМПОЗИЦІЙНІ ТЕРМОСТІЙКІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ

Запропоновано принципову схему композиційного матеріалу для термостійкого багатофункціонального покриття, що забезпечує радіонепомітність і тепловий захист частин ракет. З метою вибору матеріалів термостійкої матриці досліджено кремнійорганічне сполучне КО-08К, неорганічне сполучне НС-1А та жаростійку мастику НЕОМІД-ТИТАН. На основі аналізу результатів термодесорбційної спектроскопії кремнійорганічного сполучного і мастики НЕОМІД-ТИТАН з термостійкими наповнювачами встановлено, що найбільш ефективно знижує термодеструкцію наповнення матриці перлітом і оксидом алюмінію. Ефективність обраних композицій за високої швидкості зміння температури оцінювали методом теплового удару. Встановлено, що на зразках на основі кремнійорганічного сполучного з наповнювачами не вдалося забезпечити необхідну термостійкість матеріалу; мастику НЕОМІД-ТИТАН можна використовувати у разі наповнення 2 % оксиду алюмінію; алюмосилікатне сполучне НС-1А — у разі наповнення 5 % оксиду алюмінію і 10 % муліту.

Обрані матеріали було випробувано у струмені газодинамічного пальника. Результати підтвердили необхідність армування матриці термостійкими тканинами для підвищення її міцності та ерозійної стійкості. Як термостійкі радіопрозорі армувальні тканинні наповнювачі використано термостійку кремнеземну тканину КТ-11 і кремнеземну термостійку стрічку ЛКА-1200.

Термоерозійні випробування армованих зразків у струмені газодинамічного пальника показали, що мінімальне лінійне винесення отримано на зразках з матрицею на основі мастики НЕОМІД-ТИТАН, армованих тканиною КТ-11 (зовнішній шар) і стрічкою ЛКА-1200, що дозволяє використовувати зазначені матеріали для створення багатофункціонального покриття.

**Ключові слова:** композиційний матеріал, багатофункціональне покриття, матриця, наповнювач.

Цитування: Гусарова І. О., Потапов О. М., Горелов Б. М., Манько Т. А., Фролов Г. О. Композиційні термостійкі матеріали для багатофункціонального покриття. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1 (134). С. 43—50. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.043>



## ВСТУП

Використання ефективних гіперзвукових виробів ракетної техніки передбачає вирішення проблем їхньої радіолокаційної непомітності і теплового захисту під час проходження атмосферних шарів. Перспективним є створення покриттів, які виконують багато функцій і забезпечують комплексний захист частин ракет.

Таке багатофункціональне покриття повинне бути стійким до винесення і зберігати свої функції у робочому діапазоні температур 650...1350 °С. Вимоги щодо високої термостійкості при мінімально можливій вазі і радінепомітності у заданому частотному інтервалі значно обмежують клас матеріалів, які можна використовувати для створення багатофункціональних покриттів [2, 3, 5, 6]. Такі матеріали і технологія нанесення покриття на поверхню літального апарата потребують розроблення.

**Метою роботи** є розроблення модельного багатофункціонального покриття, що має високу термостійкість, і технології його нанесення.

Розроблюване покриття має виконувати декілька функцій. Однією з основних вимог до його зовнішнього шару є висока термостійкість, оскільки максимальна температура 1350 °С діє на окремі елементи ракети протягом 30 с на початковому відрізку траєкторії і 20 с перед закінченням роботи виробу. Не менш важливим є узгодження хвильового опору матеріалу з повітрям для зменшення відбиття падаючого електромагнітного випромінювання.

Принципова схема багатофункціонального покриття складається з трьох шарів різного призначення (рис. 1):

- перший (зовнішній) шар забезпечує термостійкість покриття та узгодження хвильового

1. Узгоджувальний шар
2. Поглинальний шар
3. Теплоізоляційний шар (залежно від умов експлуатації)
Силова оболонка корпусу

Рис. 1. Принципова схема багатофункціонального покриття

опору матеріалу з повітрям і призначений для зменшення відбиття падаючого електромагнітного випромінювання;

- другий шар використовують для ослаблення електромагнітного випромінювання у широкому частотному діапазоні, він забезпечує поглинання енергії радіохвиль і містить поглинальні компоненти з градієнтним розподілом концентрацій, водночас є теплоізоляційним;

- третій шар — теплоізоляційний — вводять залежно від умов експлуатації.

Під час розроблення складнопрофільних виробів технологічним рішенням нанесення покриттів є напилення. Проте згідно з експериментальними дослідженнями встановлено, що необхідні фізико-механічні властивості радіопоглинального покриття забезпечує лише армування термостійкої матриці термостійкими радіопрозорими волокнами [1].

Залежно від умов роботи виробу додатково вводять теплоізоляційний шар, для якого доцільно застосовувати відомі теплозахисні матеріали, що наносять напиленням.

## ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ТЕРМОСТІЙКОЇ МАТРИЦІ

З урахуванням доступності на ринку України для експериментальних досліджень щодо створення багатофункціональних покриттів обрано такі термостійкі сполучні:

- *кремнійорганічне сполучне КО-08К* — однорідний розчин поліметилфенілсілоксанової смоли в толуолі, термостійкий при температурі 500...700 °С, має гарну адгезію до сталі, титану, кераміки, скла і міді;

- жаростійку склеювальну *мастику НЕО-МІД-ТИТАН* (зарубіжного виробництва) — універсальну термостійку мастику для склеювання різних поверхонь, дерева, бетону, цегли, натурального і штучного каменю, облицювання печей і камінів. Витримує перепад температур від –50 °С до 1500 °С (короткочасно);

- *сполучне НС-1А* (зарубіжного виробництва) — високотемпературний алюмосилікатний клей на водній основі. Температура використання — до 1500 °С (короткочасно).

Досліджувані сполучні працюють при температурах понад 1000 °С короткочасно. Їхню тер-

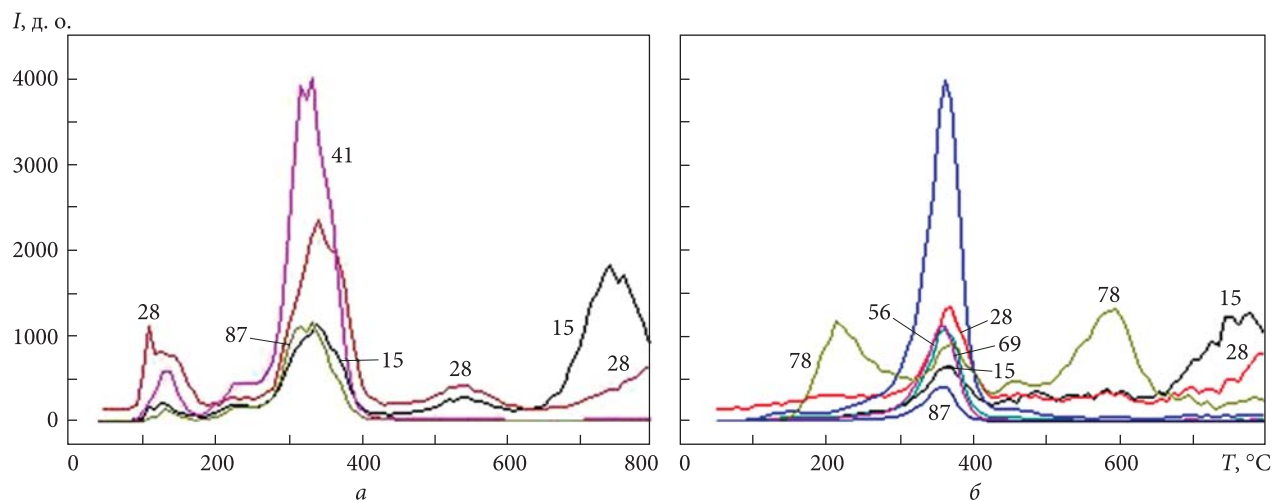


Рис. 2. Термодесорбційні криві продуктів термічної деструкції зразків на основі кремнійорганічного сполучного КО-08К: а — зразок КО-08К, б — зразок КО-08К, наповнений 5 % перліту і 5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$

мостійкість можна підвищити введенням спеціальних наповнювачів: перліту (основні компоненти — діоксид кремнію і оксид алюмінію), оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , муліту (має непостійний хімічний склад від  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  до  $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ), карбіду кремнію  $\text{SiC}$ , маршаліту (основний компонент  $\text{SiO}_2$ ).

Вибір наповнювачів, що підвищують термостійкість матриці, здійснено на основі експериментальних досліджень.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Оцінювання ефективності використання наведених вище наповнювачів здійснювали за кількістю летких продуктів, які виділяються внаслідок швидкого підвищення температури, методом термодесорбційної спектрометрії. Температурні інтервали виділення продуктів термічного руйнування встановлювали методом термопрограмованої десорбції з мас-спектрометричною реєстрацією летких продуктів.

Для мас-спектрометричного аналізу зразки масою порядку 1 мг уміщували за тиску до 0.1 Па у кварцево-молібденову трубку, вмонтовану в нагрівач, з програмованою зміною температури в інтервалі від +25 до +800 °С. Швидкість змінення температури не перевищувала 8 К/хв. З трубки продукти розкладу зразків надходили до

вхідної системи однополюсного мас-аналізатора МХ 7304А.

Результати досліджень отримано у вигляді спектрів термодесорбції (термодесорбційних кривих) легких компонентів, що виділяються під час нагрівання зразків. На рис. 2 наведено термодесорбційні криві продуктів термічної деструкції кремнійорганічного сполучного КО-08К у початковому стані і з термостійкими наповнювачами.

Згідно з аналізом термодесорбційних кривих встановлено, що під час використання кремнійорганічного сполучного КО-08К виділення продуктів деструкції відбувається у трьох інтервалах температур: у низькотемпературному інтервалі температур від 100 до 180 °С максимальне виділення пов'язане з виходом вуглекислого газу ( $\text{CO}$ ); у інтервалі температур 270...400 °С спостерігається найбільш інтенсивне виділення продуктів термодеструкції, пов'язане з виділенням сполук  $\text{COCH}$ ,  $\text{SiCH}$  (41),  $\text{COCHCO}$ ,  $\text{CSiCHCO}$  (69), і у високотемпературному інтервалі від 670 до 800 °С виділяються  $\text{CO}$  (28) і  $\text{CH}_3$  (15).

На основі проведених досліджень кремнійорганічного сполучного, де як наповнювач застосовували перліт, оксид алюмінію, карбід кремнію, муліт при концентрації 5 % кожного наповнювача в різних поєднаннях, можна зробити

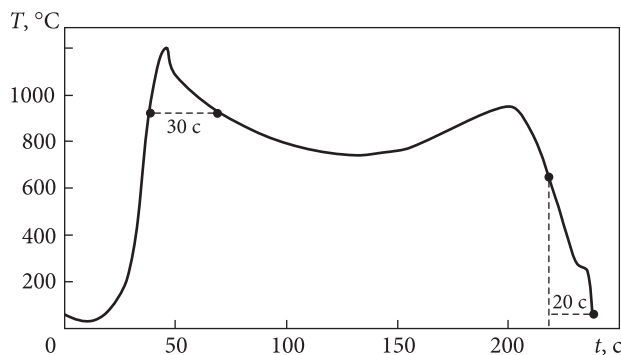


Рис. 3. Графік залежності температури поверхні від часу експлуатації

висновок, що наповнення кремнійорганічного полімеру 5 % перліту і 5 % оксиду алюмінію найбільш ефективно знижує термодеструкцію і виділення летких продуктів.

Під час дослідження зразків на основі термостійкої мастики НЕОМІД-ТИТАН, наповненої наведеними вище термостійкими наповнювачами, спостерігається кореляція з результатами аналізу термодесорбційних кривих кремнійорганічного сполучного з домішками  $Al_2O_3$  і перліту. Найбільш ефективно знижує термодеструкцію і виділення летких продуктів мастики НЕОМІД-ТИТАН її наповнення 2 %  $Al_2O_3$  і 2...15 % перліту. Це зменшує виділення води в інтервалі температур від 50 до 250 °С. Крім того, наповнювач підвищує термостійкість композиції за рахунок зміщення основної смуги розкладання сполучного на 70 °С у бік підвищення температур і знижує виділення продуктів розкладання.

Ефективність обраних композицій на основі кремнійорганічного сполучного і мастики НЕОМІД-ТИТАН з термостійкими наповнювачами за високої швидкості змінення температури оцінювали методом теплового удару. Зразки композитів вміщували у кварцову трубку з прямокутним вирізом, яку вводили в циліндричну камеру печі СУОЛ 1100, розігрітої до потрібної температури.

Композити на основі кремнійорганічного сполучного, наповненого 5 % перліту і різним вмістом  $Al_2O_3$ , вміщували в камеру печі, нагріту до температури 650 °С, на 7 хв. Після введення

зразків у піч вони спалахували, а після виймання з печі — ставали чорними і розсипалися.

Отже, на зразках на основі кремнійорганічного сполучного КО-08 К з наповнювачами не вдалося отримати необхідну термостійкість матеріалу під час нагрівання до максимальної температури 650 °С, тому для подальших робіт його не використовували.

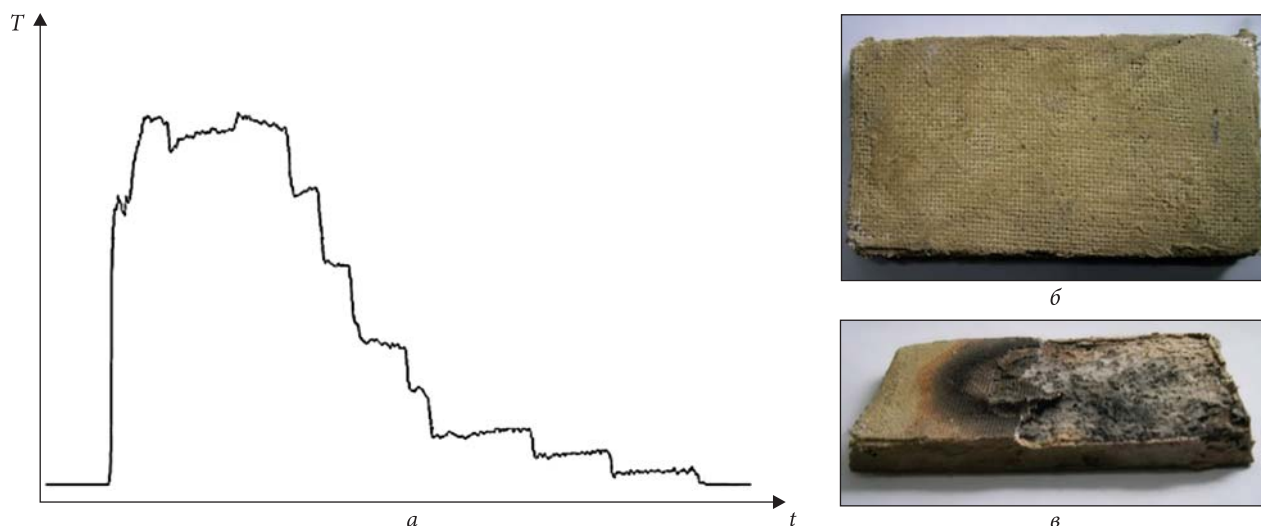
Термостійкість зразків на основі мастики НЕОМІД-ТИТАН також досліджували методом теплового удару у початковому стані і після наповнення оксидом алюмінію в діапазоні концентрацій 1.5...5 %, перлітом — у діапазоні концентрацій 5...10 %, мулітом — у діапазоні концентрацій 2.2...10 %, карбідом кремнію — 10 %. Під час виготовлення зразків як розчинники використовували метилсиліканат і алюмосиліканат калію.

Зразки вміщували у піч СУОЛ, нагріту до температури 1050 °С. Кварцова трубка зі зразками перебувала у печі протягом 5...8 с, потім через 20...25 с температуру печі знижували до 850...880 °С, а через 6—7 хв піч знову нагрівали до 1000...1020 °С. Після цього зразки витягували з печі. Температурний режим під час випробувань максимально наближений до умов експлуатації (рис. 3).

За результатами проведених випробувань встановлено, що зразок сполучного, що перебуває в початковому стані, після нагрівання за заданим режимом сильно деформувався. Уведення термостійких наповнювачів зменшило його деформацію. Мінімальну зміну об'єму і форми має зразок з мастикою НЕОМІД-ТИТАН, наповненою 2 % оксиду алюмінію.

Зразки на основі високотемпературного неорганічного сполучного НС-1А досліджено без наповнення і наповненими 5 % оксиду алюмінію і 10 % муліту.

Зразки нагрівали в камері печі за температурним режимом, що моделює експлуатаційний (рис. 3). Після вилучення матеріал зберіг цілісність і механічну міцність. Проте на поверхні з'явилися численні здуття, що свідчить про пороутворення всередині зразків. Зразки на основі сполучного НС-1А, наповнені 5 % оксиду алюмінію і 10 % муліту, мають найменший ступінь



**Рис. 4.** Результати випробувань зразків з матрицею на основі мастики НЕОМІД-ТИТАН: *a* — графік змінення температури під час дослідження (максимальна температура — 1300 °С); *б, в* — зовнішній вигляд зразків до і після випробувань

деформації і перспективні для застосування як матриці багатофункціонального покриття.

Проведені випробування зразків досліджуваних високотемпературних сполучних з визначення термостійкості методом теплового удару показали:

- на зразках на основі кремнійорганічного сполучного з наповнювачами не вдалося забезпечити необхідну термостійкість матеріалу;
- мастику НЕОМІД-ТИТАН можна використовувати у разі наповнення 2 % оксиду алюмінію;
- у композитах на основі високотемпературного алюмосилікатного сполучного НС-1А найбільшу термостійкість показали зразки, наповнені 5 % оксиду алюмінію і 10 % муліту.

На основі проведених експериментальних досліджень показано, що для матриці багатофункціонального покриття перспективним є використання жаростійкої мастики НЕОМІД-ТИТАН і високотемпературного алюмосилікатного сполучного НС-1А з термостійкими наповнювачами. Обрані матеріали було випробувано у струмені газодинамічного пальника ГВО-2 з діаметром критичного перерізу сопла 11 мм, що працює на паливній парі гас — повітря на універсальному термоструминному

стенді (УТС) ІПМ НАН України. Максимальна температура газового потоку становила 1250 °С. Усі зразки сполучного зруйнувалися під час випробувань.

Результати випробувань підтвердили правильність висновків про необхідність армування матриці термостійкими тканинами або стрічками з високотемпературних керамічних радіопрозорих волокон для підвищення її міцності та ерозійної стійкості [4].

Наступну серію експериментів проводили на зразках композиційних матеріалів, що містять матрицю з жаростійкої мастики НЕОМІД-ТИТАН або високотемпературного алюмосилікатного сполучного НС-1А, армовану радіопрозорими термостійкими тканинами.

Як термостійкі радіопрозорі армувальні тканинні наповнювачі для експериментальних досліджень використовували такі доступні на ринку України матеріали:

- термостійку кремнеземну тканину КТ-11, яка характеризується низькою теплопровідністю, високою стійкістю до теплових ударів, є електроізолятором за підвищених температур, тривало експлуатується без зміни властивостей при температурах 1000...1200 °С і короткочасно — при температурі до 1700 °С;



- кремнеземну термостійку стрічку ЛКА-1200, яка має такі характеристики: коефіцієнт теплопровідності при температурі 500 °С становить 0.15 Вт/(м·К), а при 1000 °С — 0.24 Вт/(м·К), питомий електричний опір —  $10^{17} \dots 10^{18}$  Ом·см (20 °С), діелектрична проникність — 3.7; може довго працювати при температурах до 1000 °С і короткочасно — при температурах 1200 °С.

Під час виготовлення зразків зовнішній термостійкий шар покриття армовано тканиною КТ-11, а внутрішній теплоізоляційний шар — кремнеземною стрічкою ЛКА-1200. Загальна товщина зразків становить 9.9...10 мм. Як сполучне використовували мастику НЕОМІД-ТИТАН і високотемпературне алюмосилікатне сполучне НС-1А.

Термоерозійні випробування армованих зразків проводили також у струмені газодинамічного пальника ГВО-2 на стенді УТС ІПМ НАН України. Кут обтікання зразків потоком становив 30°, що відповідає умовам експлуатації матеріалу. Поточні термодинамічні параметри потоку встановлювали так, щоб моделювати залежність температури поверхні від часу під час експлуатації, як наведено на рис. 3.

Результати експериментальних досліджень показали, що мінімальне лінійне винесення — 1.5 мм (9.67 г) отримано на зразках з матрицею на основі мастики НЕОМІД-ТИТАН.

Графік зміни температури у процесі випробувань і зовнішній вигляд зразків подано на рис. 4.

За результатами випробувань у струмені газодинамічного пальника ГВО-2 на стенді УТС ІПМ НАН України встановлено, що термоерозій-

зійна стійкість композиційного матеріалу з матрицею на основі мастики НЕОМІД-ТИТАН, армованого тканиною КТ-11 (зовнішній шар) і стрічкою ЛКА-1200, дозволяє використовувати зазначені матеріали для створення багатофункціонального покриття.

## ВИСНОВКИ

На основі теоретичного аналізу в роботі показано, що термостійке багатофункціональне покриття має складатися із зовнішнього термостійкого шару, що забезпечує узгодження хвильового опору матеріалу з повітрям, та внутрішнього теплоізоляційного, що поглинає електромагнітне випромінювання в заданому частотному діапазоні. Залежно від умов експлуатації можуть вводити додатковий теплоізоляційний шар.

Перспективним є розроблення композиційного багатошарового покриття на основі термостійкої матриці з функціональними домішками армованої тканинами або стрічками з високотемпературних керамічних радіопрозорих волокон.

На основі експериментальних досліджень для матриці багатошарового покриття рекомендовано використовувати неорганічне сполучне НЕОМІД-ТИТАН. Мас-спектрометричним аналізом і випробуваннями на тепловий удар доведено, що термостійкість матриці ефективно підвищує введення 2 % оксиду алюмінію.

За результатами випробувань на термоерозійну стійкість встановлено доцільність застосування як армувальних наповнювачів кремнеземної тканини КТ-11 (зовнішній шар) і стрічки ЛКА-1200.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гусарова І. А., Потапов А. М., Манько Т. А., Фальченко Ю. В., Петрушинец Л. В., Фролов Г. А., Солнцев В. П. Проблеми створення теплозахити возвращаемых апаратів. *Технол. системи*. 2017. № 4(81). С. 47–55.
2. Звонко А. А. Можливості застосування існуючих радіопоглинаючих покриттів до бойових частин ракет. *Військово-технічний зб.* 2012. 7. С. 29–32.
3. Николайчук Г., Иванов В., Яковлев С. Радиопоглощающие материалы на основе наноструктур. *Новые технол. Сер. Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2010. № 1. С. 92–95.
4. Потапов А. М. Оценка возможности создания напыляемого неуносимого покрытия для ракетной техники. *Космич. техника. Ракетное вооружение*. 2015. Вып. 3 (110). С. 39–46.
5. Симбиркина А. Н., Гусарова И. А., Пронцевич О. А., Пронцевич Е. В. *Многофункциональные покрытия для ракетной техники*. Материали VII міжнар. конф. «Космические технологии: настоящее и будущее», 21–24 травня 2019 р. Дніпро: ДП «КБ «Південне», 2019. С. 91.
6. Lutsev L. V., Yakovlev S. V., Zvonareva T. K., Alexeyev A. G., Starostin A. P., Kozyrev S. V. Microwave Properties of Granular Amorphous Carbon Films with Cobalt Nanoparticles. *J. Appl. Phys.* 2005. 97, № 10. С. 47–53.

## REFERENCE

1. Husarova I. A., Potapov A. M., Manko T. A., Falchenko Y. V., Petrushinets L. V., Frolov G. A., Solntsev V. P. (2017). Problems of Creating Thermal Protection Of Reentry Vehicles. *Technology Systems*, № 4 (81), 47–55 [in Russian].
2. Zvonko A. A. (2012). Possibility Of Using Existing Radio-absorbing Coating Of Missile Warheads. *Military Technical Collection*, 7, 29–32 [in Ukrainian].
3. Nikolaychuk G., Ivanov V., Yakovlev C. (2010). Radio-absorbing materials based on nanostructures. *New Technologies. Ser. Electronics: Science, Technology, Business*, № 1, 92–95 [in Russian].
4. Potapov A. M. (2015). Assessment of the Possibility of Creating a Sprayed Non-wearable Coating for Rocket Technology. *Space technology. Rocket armament*, № 3 (110), 39–46 [in Russian].
5. Simbirkina A. N., Husarova I. A., Prontsevich O. A., Prontsevich E. V. (2019). *Multifunctional Coating for Rocket Technology*. Materials VII inter. conf. «Space technologies: present and future», 21–24 May 2019. Dnipro: Yuzhnoye SDO, 91 [in Russian].
6. Lutsev L. V., Yakovlev S. V., Zvonareva T. K., Alexeyev A. G., Starostin A. P., Kozyrev S. V. (2005). Microwave Properties of Granular Amorphous Carbon Films with Cobalt Nanoparticles. *J. Appl. Phys.*, 97, № 10, 47–53.

Стаття надійшла до редакції 25.08.2021

Received 25.08.2021

Після доопрацювання 10.01.2022

Revised 10.01.2022

Прийнято до друку 24.01.2022

Accepted 24.01.2022

I. O. Husarova<sup>1</sup>, Dr. Sci. in Tech., Head of the Department of Physical Methods of Control of Materials and Structures  
E-mail: info@yuzhnoye.com

O. M. Potapov<sup>1</sup>, Dr. Sci. in Tech., Head of the Department of New Materials and Advanced Technologies, Acad. of the International Academy of Astronautics, Acad. of the Academy of Technical Sciences, Laureate of the State Awards in Science and Technology of Ukraine

B. M. Gorelov<sup>2</sup>, Dr. Sci. in Phys.&Math., Head of the Department

T. A. Manko<sup>3</sup>, Dr. Sci. in Tech., Prof. of the Department of Production Technology of the Faculty of Physics and Technology

G. O. Frolov<sup>4</sup>, Dr. Sci. in Tech., Head of the Department

<sup>1</sup> Yangel Yuzhnoye State Design Office

3, Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine.

<sup>2</sup> Chuiko Institute of Surface Chemistry

17, Generala Naumova Str., Kyiv, 03164 Ukraine

<sup>3</sup> Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarina Str., Dnipro, 49000 Ukraine

<sup>4</sup> Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NAS of Ukraine

3, Krzhizhanovsky Str, Kyiv-142, 03680 Ukraine

## COMPOSITE HEAT-RESISTANT MATERIALS FOR MULTIFUNCTIONAL COATING

A schematic diagram of composite material for a heat-resistant multifunctional coating providing radio invisibility and thermal protection of parts of missiles is proposed.

Organosilicon binder KO-08K, inorganic binder HC-1A, and heat-resistant mastic NEOMID-TITANIUM were researched to select the materials of the heat-resistant matrix. Based on the analysis of the results of thermal desorption spectrometry of organosilicon binder and mastic NEOMID-TITANIUM with heat-resistant fillers, it was found that the thermal destruction is most effectively reduced by the matrix filler with perlite and aluminum. The efficiency of the selected composites at a high rate of temperature change was evaluated by the heat stroke method. It was revealed that samples based on the organosilicon binder with fillers failed to provide the required heat resistance of the material: NEOMID-TITANIUM mastic can be used in case of filling with 2 % of aluminum and aluminum-silicate binder HC-1A in the case of filling with 5 % aluminum and 10 % mullite.

Selected materials were tested in a jet of a gas-dynamic burner. The results confirmed the need to reinforce the matrix with heat-resistant fabrics to increase its strength and erosion resistance. Heat-resistant silica fabric KT-11 and silica heat-resistant tape LKA-1200 were used as heat-resistant radio-transparent reinforcing fabric fillers.

Thermo-erosion tests of reinforced samples in the jet of a gas-dynamic burner showed that the minimum linear removal was obtained on samples with a matrix based on NEOMID-TITANIUM mastic, which was reinforced with KT-11 fabric (outer layer) and LKA-1200 tape, which allows using these materials to create the multifunctional coating.

**Keywords:** composite material, multifunctional coating, matrix, filler.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.051>  
УДК 629.782:536.24.08

**Ю. А. ПОШТАРЕНКО**, інж.  
**Б. М. РАССАМАКІН**, старш. наук. співроб., канд. тех. наук  
**В. А. РОГАЧОВ**, старш. наук. співроб., канд. тех. наук  
**В. І. ХОМІНІЧ**, старш. наук. співроб., канд. тех. наук, доцент  
E-mail: [hominichv@gmail.com](mailto:hominichv@gmail.com)  
**М. Д. ШЕВЧЕНКО**, пров. інж.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Прспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

## ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ПРИ ТЕРМОВАКУУМНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ТА ВИПРОБУВАННЯХ ВИРОБІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

*З метою адаптації вітчизняного давача-перетворювача теплового потоку ПТП-1Б до умов, характерних для наземних термовакуумних досліджень та випробувань виробів космічної техніки при відсутності в Україні атестованих давачів-перетворювачів сумарних теплових потоків у діапазоні до значень щільності  $2000 \text{ Вт/м}^2$  у спектральному діапазоні 0.2...20 мкм проведено порівняльний аналіз його характеристик з характеристиками широко застосовуваного давача-перетворювача ФОА-020 імпортного виробництва.*

*Експериментальні дослідження проводились у термовакуумній камері експериментального стенду ТВК-2,5 при температурі її стінок  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наведено рекомендації стосовно можливого використання вітчизняного давача-перетворювача ПТП-1Б як робочого засобу вимірювань в системах моніторингу та діагностування при проведенні наземного відпрацювання об'єктів космічної техніки.*

**Ключові слова:** космічна техніка, термовакуумні випробування, інфрачервоне випромінювання, давач-перетворювач теплового потоку, щільність теплового потоку, власна температура давача.

На сьогодні загальноприйнятим вважається, що для всебічного дослідження теплових режимів космічних апаратів (КА) та виробів космічної техніки в наземних експериментальних установках достатньо відтворити такі основні умови космічного простору: високий вакуум, низьку температуру, ступінь чорноти навколишнього космічного простору, випромінювання від Сонця та планет [1, 11]. Термовакуумні випробування нових об'єктів космічної техніки в наземних моделювальних установках у відповідності з єв-

ропейськими нормами є обов'язковими для виконання [28].

В Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» розроблено та створено експериментальні стенди для наземного відпрацювання малогабаритних КА та їхніх компонентів. Так, на вітчизняному стенді ТВК-2,5 вперше досліджено тепловий макет першого українського мікросупутника МС-1-ТК-ТВ, розробленого та виготовленого в ДКБ «Південне» [20, 23—26].

Цитування: Поштаренко Ю. А., Рассамакін Б. М., Рогачов В. А., Хомініч В. І., Шевченко М. Д. Засоби вимірювання теплових потоків при термовакуумних дослідженнях та випробуваннях виробів космічної техніки. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1 (133). С. 51—60. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.051>



На стендах ТВК-2,5 та ТВК-0,12 спільно з КП «Арсенал» проведено термовакuumні випробування оптико-механічних блоків та системи навігації КА «Січ-2» (МС2-8, EgyptSat-1) [21, 22], відпрацьовані перші наносупутники України серії POLYITAN виробництва КПІ ім. Ігоря Сікорського [19]. Розробляються нові програми та методики випробувань різних об'єктів космічної техніки.

Теплову взаємодію КА в орбітальному польоті із зовнішніми природними джерелами тепла і космічним простором вивчено достатньо добре; розрахунковими методиками вони визначаються з високим ступенем точності [7, 9, 12]. Однак достовірну інформацію про внутрішній тепловий зв'язок елементів конструкцій КА і електронних приладів між собою в основному можна отримати тільки експериментальним шляхом. Тому вивчення складних процесів теплообміну КА забезпечується збалансованим поєднанням методів розрахунково-теоретичного аналізу і наземним експериментальним відпрацюванням КА в моделювальній установці, оскільки жоден підхід у чистому вигляді не може гарантувати адекватного відображення процесів, які відбуваються в натурних умовах.

Випробування космічних виробів в наземних установках відрізняються від польотних умов суттєвою геометричною обмеженістю навколишнього простору, у якому можуть бути наявними джерела як прямого, так і розсіяного випромінювання.

При наземних випробуваннях в активному робочому об'ємі камери, крім випробовуваних виробів, перебувають багато технічних пристроїв, що мають забезпечити адекватне моделювання навколишнього середовища. Зокрема, до них належать імітатори сонячного випромінювання, різні прилади, допоміжні монтажні кріплення, технологічне оснащення тощо. Перелічені об'єкти є інтенсивними джерелами зовнішнього прямого і відбитого теплових потоків та можуть спотворювати очікувану реальну або прогнозовану теплофізичну ситуацію. Тому у випробувальній камері завжди встановлюються досить складні теплообмінні умови, які вимагають контролю та керування процесом [3, 5].

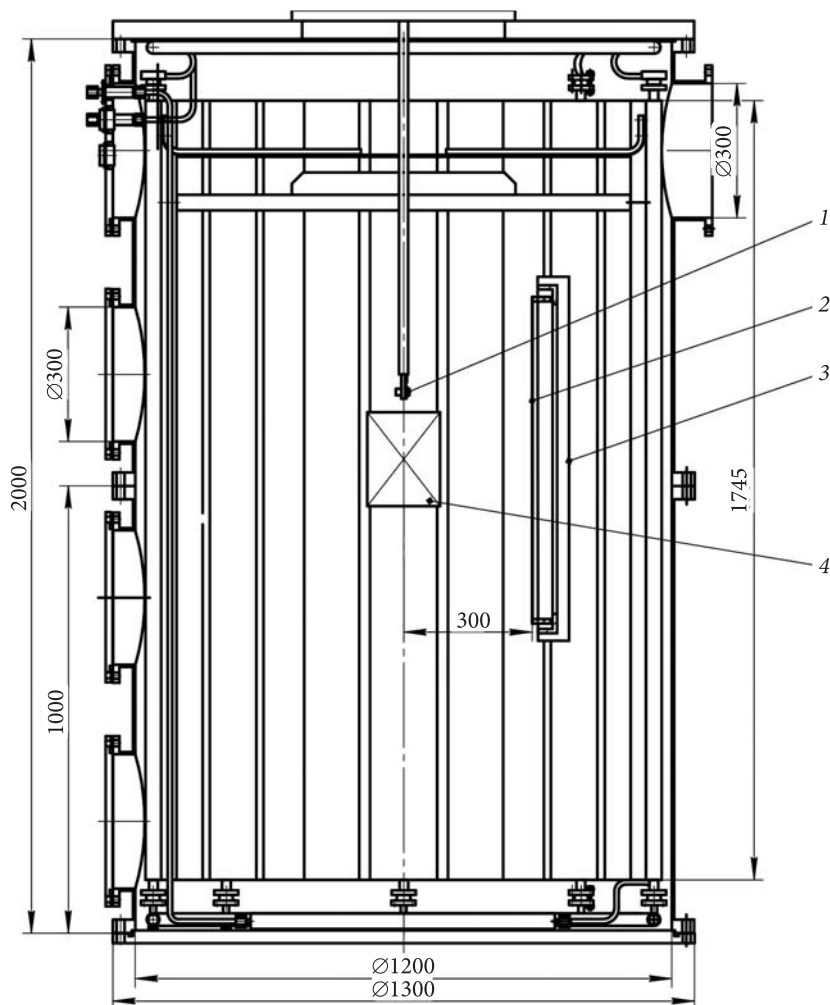
Невід'ємною частиною термовакuumних досліджень та випробувань є засоби вимірювань температур та теплових променистих потоків, які повинні мати унормовані похибки і відтворювати необхідну та достовірну науково-технічну інформацію в ході експериментів.

На сьогодні в Україні немає атестованих вітчизняних давачів-перетворювачів (ДП) сумарних теплових потоків в діапазоні щільностей теплових потоків до  $2000 \text{ Вт/м}^2$  та спектральному діапазоні  $0.2...20 \text{ мкм}$ . При цьому вивчення термічних характеристик в діапазоні середніх щільностей теплових потоків до  $1500 \pm 50 \text{ Вт/м}^2$  та спектральному діапазоні  $0.2...20 \text{ мкм}$  є дуже важливим, оскільки зазначені величини є характерними для спектрального складу та середньої освітленості заатмосферного Сонця.

З метою вивчення можливості використання вітчизняного ДП моделі ПТП-1Б виробництва Інституту технічної теплофізики НАН України [4, 17] та розширення номенклатури діагностичних теплотехнічних засобів при здійсненні наземних теплофізичних експериментів у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» проведено перші дослідження з вивчення характеристик ДП ПТП-1Б, що працює у специфічних умовах.

Давач-перетворювач ПТП-1Б призначений для експлуатації у ролі первинного вимірювального перетворювача теплового потоку в електричну напругу постійного струму у складі вимірювальної системи з метою контролю щільності теплового потоку, що надходить від випромінювача. ПТП-1Б відноситься до ДП генераторного типу. Він виконаний за принципом дії допоміжної стінки. Основні технічні характеристики ДП ПТП-1Б: діапазон вимірювання щільності теплового потоку —  $0...1500 \text{ Вт/м}^2$ , діапазон робочої температури від  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$ , коефіцієнт поглинання інфрачервоного (ІЧ) випромінювання поверхнею —  $0.91 \pm 0.05$ , діаметр —  $30 \pm 0.5 \text{ мм}$ , товщина —  $2.0 \pm 0.2 \text{ мм}$ , максимальна маса —  $50 \text{ г}$ .

Для порівняння теплових характеристик, отриманих за допомогою ДП ПТП-1Б, було застосовано спеціалізований ДП сумарного те-



**Рис. 1.** Схема експерименту перевірки характеристик давачів ФОА-020 та ПТП-1Б в камері ТВК-2,5 при тепловакуумних випробуваннях: 1 — давачі ФОА-020 та ПТП-1Б, 2 — ніхромовий електронагрівач, 3 — відбивач ІЧ-випромінювання, 4 — виріб космічної техніки, що досліджується

плового потоку ФОА-020, який давно і широко використовується при дослідженнях та випробуваннях об'єктів космічної техніки [13, 27]. ДП ФОА-020 є теплоприймачем градієнтного типу з поперечним градієнтом температури і застосовується для вимірювання теплової дії на елементи конструкції космічних апаратів як в ході їхніх наземних випробувань, так і на етапі виведення на орбіту. Основні технічні характеристики ДП ФОА-020: діапазон вимірювання щільності теплового потоку —  $0...3500 \text{ Вт/м}^2$ , спектральний діапазон теплового потоку —  $0.2...10 \text{ мкм}$ , діапазон зміни температури корпусу теплоприйма-

ча — від  $-100 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ , габаритні розміри —  $38 \times 30.4 \text{ мм}$ , маса — не більша від  $0.18 \text{ кг}$ .

Для обох випробуваних ДП межа допустимого значення основної похибки вимірювання теплового потоку не перевищує  $\pm 5 \%$  з ймовірністю  $0.95$ .

Тестування обох ДП проводилось у термовакуумній камері експериментального стенду ТВК-2,5 [18], який може забезпечувати одночасний вплив на виріб космічної техніки глибокого вакууму на рівні  $5 \cdot 10^{-5} \text{ торр}$  ( $6.7 \text{ мПа}$ ), температури навколишнього середовища — до  $-190 \text{ }^\circ\text{C}$ , чорноти простору з коефіцієнтом поглинання  $A_3 \geq 0.93$ . Пряме «сонячне» випромінювання мо-

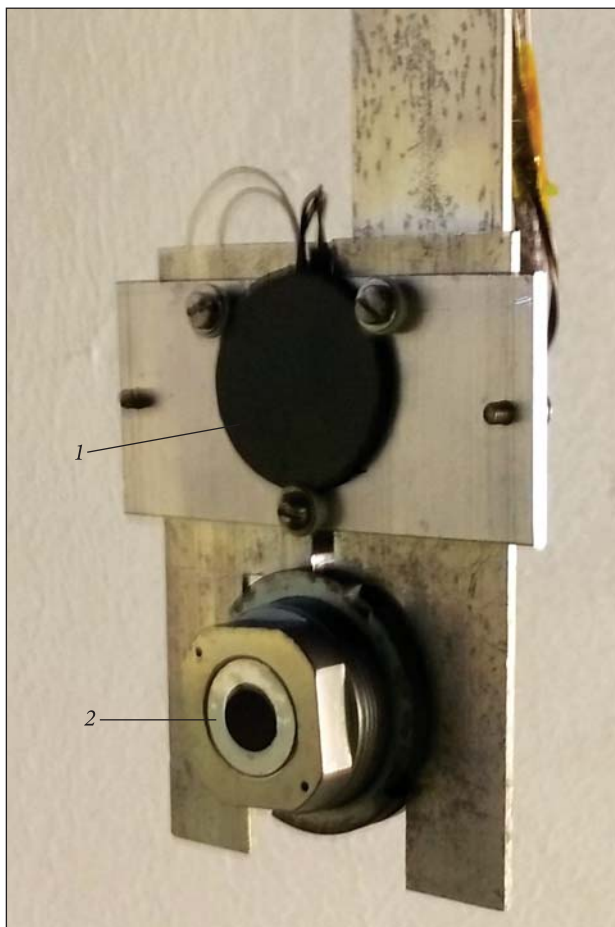


Рис. 2. Взаємне розміщення двох давачів теплового потоку в процесі експерименту: 1 – ПТП-1Б, 2 – ФОА-020

делюється ІЧ-випромінювачем, розробленим та виготовленим згідно з рекомендаціями робіт [6, 10, 16]. Окремі нагрівальні елементи являють собою ніхромові смужки шириною 10 мм та довжиною 500 мм, закріплені на прямокутному металевому каркасі розміром  $500 \times 500$  мм з кроком між ними не більш ніж 50 мм. Позаду нагрівальних елементів розміщено злегка увігнутий відбивач з полірованого алюмінію. Його бік, звернений до криогенного екрану, покрито чорною емаллю АК-512. Така конструкція забезпечувала рівномірний розподіл теплового потоку на контрольній поверхні. Загальна електрична потужність, що подається на ІЧ-нагрівач, плавно регулюється і не перевищує 1 кВт. Нагрівач закріплюється на опорі всередині вакуумної

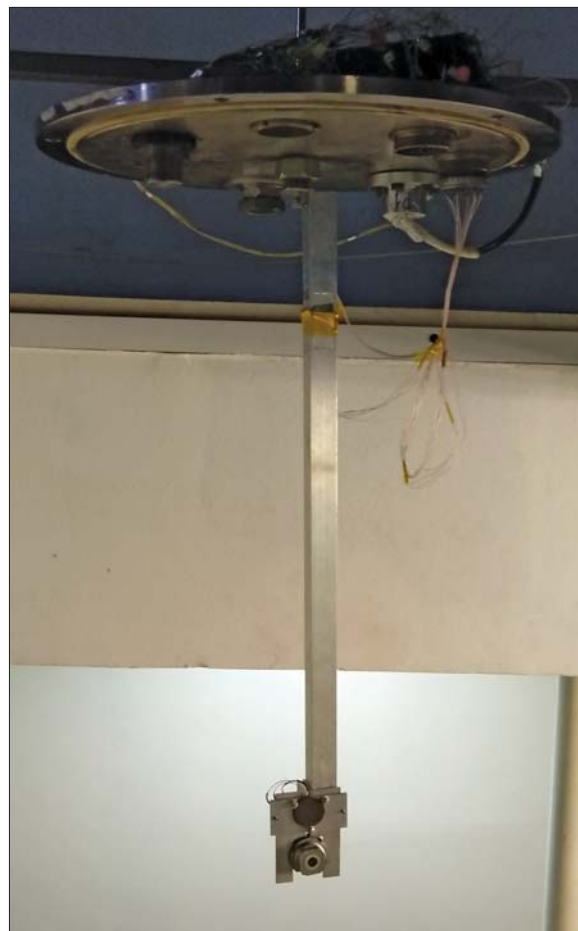


Рис. 3. Кріплення давачів на верхньому фланці випробувальної камери ТВК-2,5

камери на заданій відстані від випробуваного об'єкта (рис. 1).

В процесі проведення досліджень обидва ДП були розташовані в робочій контрольній зоні з однаковою щільністю фронтального опромінення та встановлювались поряд один з одним на пластині (рис. 2). Для забезпечення одночасного та однакового впливу теплового опромінення обидва ДП закріплювались на єдиній жорсткій підвісній опорі верхнього фланця камери (рис. 3) і розміщувались в середній частині досліджуваного космічного виробу, тобто, ДП перебували в одній площині з тестованим космічним виробом і піддавались опроміненню тепловими потоками від ІЧ-випромінювача (рис. 4) в діапазоні його середніх щільностей  $900 \dots 1600$  Вт/м<sup>2</sup>.

Інформація, отримана від контактних термоелектричних перетворювачів (термопар, термометрів опору) та давачів теплового потоку, за допомогою автоматизованої багатоканальної вимірювальної системи спрямовувалась у комп'ютер. Сигнали, які надходили від ДП ПТП-1Б, порівнювались з відповідними сигналами, які надходили від ДП ФОА-020. При цьому робота вимірювальної системи здійснювалась під керуванням спеціального програмного забезпечення, розробленого в НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», яка надавала можливість використання стандартних програмних продуктів «VS Excel». «MathCad», орієнтованих на таблично-графічне представлення експериментальних даних та попередню їхню обробку [23–25].

За результатами досліджень на рис. 5 приведені залежності зміни виміряної щільності теплового потоку у часі для двох порівнюваних ДП в ході тепловакуумних випробувань при різних фіксованих рівнях опромінення ІЧ-випромінювачем. Середній час опромінення (експозиція) обох ДП дорівнював 10...25 хв, в залежності від режимів опромінення і виходу їх на стаціонар, позначених на рис. 5 цифрами 1–4. Середні щільності потоків, що забезпечувалися ІЧ-випромінювачем, становили: для режиму 1 — 900 Вт/м<sup>2</sup>, для режиму 2 — 1500 Вт/м<sup>2</sup>, для режиму 3 — 1400 Вт/м<sup>2</sup>, для режиму 4 — 1300 Вт/м<sup>2</sup>. Час переключення режимів та перехід на новий становив в середньому не перевищував 2...3 хв.

З верхньої суцільної кривої для ФОА-020 видно, що в кожному режимі спостерігається невеликий нахил кривих, який характеризує поступове збільшення щільності теплового потоку у часі. Так, найбільша швидкість зростання 0.15 (Вт/м<sup>2</sup>)/с має місце в режимі 2, в якому теплова потужність, яка розсіювана ІЧ-випромінювачем, максимальна. На відміну від ДП ФОА-020, значення щільностей ДП ПТП-1Б (нижня крива) для кожного режиму практично не змінюються з часом, але мають суттєво нижчий рівень. Так, для режиму 1 значення щільності менші в середньому на 25 %, для режиму 2 — на 40 %, для режиму 3 — на 53 %, для режиму 4 — на 60 %. Здавалося б, що при однако-

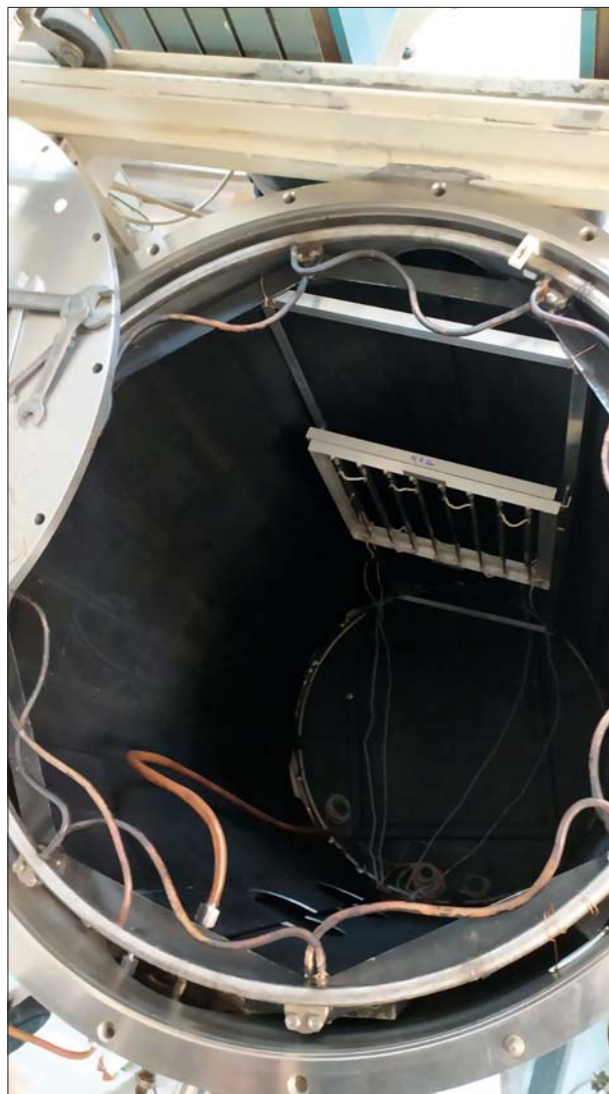


Рис. 4. Розміщення ІЧ-нагрівача всередині випробувальної камери

вих умовах теплообміну в камері і одночасному зовнішньому опроміненні обох ДП їхні виміри повинні збігатися в рамках теплофізичних похибок, але цього в експерименті не спостерігається. Очевидно, така розбіжність даних може бути пов'язана з особливостями конструкції та принципом дії ДП і висунутими до них вимогами експлуатації. Наприклад, за вимогою виробника з метою отримання коректних результатів тильна (неопромінена) поверхня ДП ПТП-1Б при проведенні вимірювань завжди



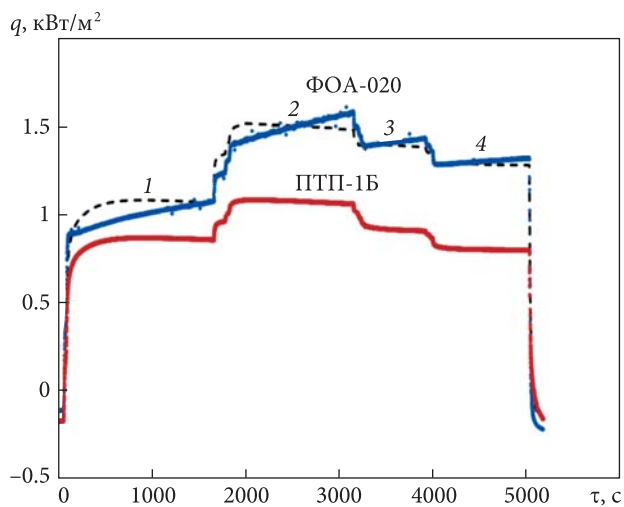


Рис. 5. Залежність щільності вимірюваного датчиками теплового потоку від часу. Режими опромінення інфрачервоним опромінювачем: 1 — 1000 Вт/м<sup>2</sup>, 2 — 1500 Вт/м<sup>2</sup>, 3 — 1400 Вт/м<sup>2</sup>, 4 — 1300 Вт/м<sup>2</sup>

повинна бути термостабілізованою. Цієї специфічної вимоги в ході проведених експериментів, з об'єктивних причин, вказаних вище, авторами статті не було дотримано. Можливо, через це показники ДП ПТП-1Б на всіх режимах виявилися дуже заниженими. Водночас за даними виробника до експлуатації ДП ФОА-020 ніяких додаткових вимог не висувається, оскільки в його конструкції передбачено схему одночасного вимірювання як щільності потоку, так і температури корпусу датчика, причому ці параметри є взаємопов'язаними при кінцевому визначенні щільності за паспортною формулою. Отже, слід очікувати, що отримані результати вимірювання ДП ФОА-020 для даних умов теплообміну порівняно з ДП ПТП-1Б є більш точними та достовірними, тобто їх можна вважати «еталонними».

Теза про «еталонність» ДП ФОА-020 була підтверджена додатковими дослідженнями, що передували основному термовакуумному експерименту. Тестування обох ДП відбувалось в умовах атмосферного тиску і кімнатній температурі. В експерименті ДП ПТП-1Б, як цього і вимагає виробник, своєю зворотною стороною встановлювався на поверхню проточного калориметра, який забезпечував стабільну температуру стінки близько 20 °С. Одночасне опромінення ДП здійснюва-

лось каліброваним джерелом у вигляді імітатора сонячного випромінювання (ІСВ), який було розроблено і виготовлено авторами даної статті. До складу ІСВ входить ксенонова лампа ДКсШ-3000-3 з оптичною системою. Імітатор забезпечує спектральний розподіл енергії, близький до сонячного випромінювання, а інтервал робочих довжин хвиль становить 0.26...2.50 мкм. Імітатор застосовувався в ряді термовакуумних випробувань і показав стабільність та надійність своїх характеристик [23—25]. Налаштування та градування ІСВ відбувалась за методиками, запропонованими в роботах [2, 8, 14, 15] з використанням калориметричного вимірювача потужності лазерного випромінювання ИМО-2Н та комплексу оптичних світлофільтрів. Застосування цієї методики забезпечило похибку вимірювань характеристик, не більшу за 5 %, а параметри ІСВ з неоднорідності променевого теплового потоку, рівня опромінення та його спектру дозволило вважати його прийнятними для термовакуумних випробувань. Зі сказаного випливає, що за допомогою даного ІСВ можна тестувати будь-які засоби вимірювання, зокрема і ДП.

Отже, як показало тестування, при одночасному опроміненні ДП каліброваним ІСВ в нормальних умовах на різних режимах вимірювань, покази ПТП-1Б порівняно з ФОА-020 завжди були занижені приблизно на 40...50 %. Практично таке ж заниження спостерігалось згодом в основному експерименті при термовакуумних випробуваннях (рис. 5).

З метою оцінки температури корпусу ДП ПТП-1Б та впливу її на значення щільності потоку, виконано дослідження з вимірювання температури пластини, на якій кріпляться ДП ПТП-1Б та ФОА-020 (рис. 2). На рис. 6 та 7 представлено результати вимірювань температур та теплових потоків у ході термовакуумних випробувань електричного ракетного двигуна в камері ТВК-2,5. Умови проведення випробувань: вакуум —  $5 \cdot 10^{-6}$  торр (0.67 мПа), температура криоекранів — 80 К, діапазон значень щільності випромінювання імітатором «Сонця» 900...1500 Вт/м<sup>2</sup>, час опромінення — не більше 15 хв.

Температура пластини, на якій закріплювався ДП ПТП-1Б відповідає верхній кривій (рис. 6) і

змінювалась у діапазоні  $-20 \dots -5$  °С. Крива власної температури ДП ФОА-020 лежить суттєво нижче, а його температура змінюється від  $-25$  до  $-15$  °С. Значення щільності потоків, які фіксуються ДП ПТП-1Б (рис. 7), при однакових умовах режиму теплообміну у камері, зокрема, при щільності опромінення  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , менші від значень, приблизно на 20 %. З проведеного дослідження випливає, що початковий паспортний коефіцієнт перетворення ДП ПТП-1Б, гарантований виробником, необхідно скоригувати у бік збільшення. Такий висновок добре корелює з наведеними вище результатами основного експерименту та тестуванням ДП за допомогою ІСВ при атмосферному тиску і кімнатній температурі.

Тому, враховуючи зазначене і з метою коригування експериментальних даних, отриманих за допомогою ДП ПТП-1Б та приведення їх до реальних значень, що встановлюються в камері під час випробувань, автори застосовували для кожного режиму емпіричні перерахункові коефіцієнти, які дозволили підняти криву ДП ПТП-1Б на рівень значень, характерних для ДП ФОА-020, тобто отримати нову градувальну криву для ДП ПТП-1Б (рис. 5) Так, для режиму 2, що відповідає середній щільності заатмосферного «сонячного» випромінювання ( $1500 \text{ Вт/м}^2$ ) у камері, при визначенні щільності потоку ДП ПТП-1Б попередні дані (нижня крива на рис. 5) помножуються на визначений експериментально середній корегувальний коефіцієнт 1.40. З аналізу скоригованої штрих-пунктирної кривої ДП ПТП-1Б та кривої ДП ФОА-020 видно, що розбіжності між ними лежать у межах похибки вимірювань і не перевищують  $\pm 5$  %, що є ознакою правильного визначення градувального коефіцієнта.

## ВИСНОВКИ

За результатами експериментальних термовакуумних досліджень проведено порівняльний аналіз теплотехнічних характеристик давачів-перетворювачів сумарного теплового потоку ПТП-1Б та ФОА-020 та запропоновано такі рекомендації.

1. Вітчизняний ДП моделі ПТП-1Б показав широкі експериментальні можливості, але, порівняно з ДП ФОА-020, який вважався авторами

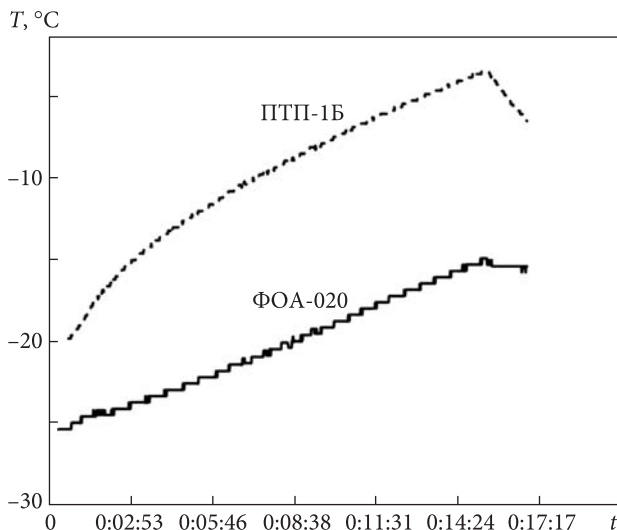


Рис. 6. Зміни температур на пластині ДП ПТП-1Б та корпусі ФОА-020 при опроміненні  $1000 \text{ Вт/м}^2$

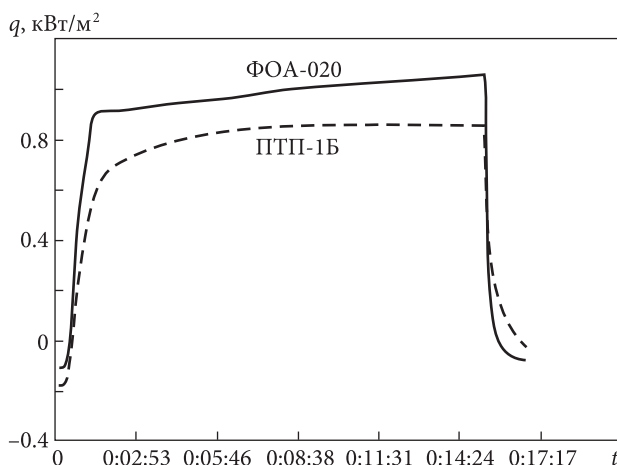


Рис. 7. Теплові потоки, що вимірюються ДП ПТП-1Б та ФОА-020 при опроміненні  $1000 \text{ Вт/м}^2$

«еталонним» засобом вимірювання, дає занижені значення щільності теплового потоку. Тому перед застосуванням його теплової характеристики потрібно попередньо верифікувати шляхом порівняння з результатами, одержаними за допомогою ДП ФОА-020 та провести тестовий експеримент у термовакуумній камері.

2. Для коректного визначення щільності теплового потоку ДП ПТП-1Б пропонується в його паспортну формулу вводити градуваль-

ний коригувальний коефіцієнт, отриманий за результатами тестового експерименту.

3. Зважаючи на те що умови проведення термовакуумних випробувань не дозволяють реалізувати вимоги щодо термостабілізації ДП типу ПТП-1Б, пропонується при розрахунку вихідних даних теплового потоку застосувати алгоритм

термокомпенсації в залежності від температури корпусу ДП, тобто подальше удосконалення його конструкції.

4. В роботі показано можливість заміни імпортного ДП ФОА-020 вітчизняним ДП ПТП-1Б в умовах наземних термовакуумних випробувань космічних виробів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Андрейчук О. Б., Малахов Н. Н. *Тепловые испытания космических аппаратов*. М.: Машиностроение, 1982. 202 с.
2. Асланян Р. О., Анисимов Д. И., Марченко И. А., Пантелеев В. И. Имитаторы солнечного излучения для термовакуумных испытаний космического аппарата. *Сиб. журн. науки и технол.* 2017. **18**, № 2. С. 323–327.
3. Быков А. П., Андросов С. В., Пиганов М. Н. Методика тепловакуумных испытаний приборов космического аппарата. *Надежность и качество сложных систем*. 2019. № 3 (27). С. 78–83. DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-9.
4. Воробийов Л. Й., Декуша Л. В., Ковтун С. І. Нові моделі сенсорів теплового потоку для систем моніторингу та діагностики енергетичного обладнання. *Пром. теплотехніка*. 2016. **38**, № 5. С. 86–97.
5. Гаврилов Р. В. Стенд для тепловакуумных испытаний космических аппаратов. *Космічна наука і технологія*. 2004. **10**, № 5/6. С. 42–46.
6. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Меленевский Ю. А., Церковный А. И. Имитатор излучения Земли для термовакуумных испытаний космических аппаратов. *Космічна наука і технологія*. 2004. **10**, № 5/6. С. 35–38.
7. Гаврилов Р. В., Кислов А. М., Романенко В. Г., Фенченко В. М. Пакет программ TRASSA для расчета тепловых режимов космических аппаратов. *Космічна наука і технологія*. 2004. **10**, № 4. С. 3–16.
8. Двирный Г. В., Шевчук А. А., Двирный В. В., Елфимова М. В., Крушенко Г. Г. Анализ возможности создания имитатора солнечного излучения на основе светодиодных источников для наземной отработки космических аппаратов. *Сиб. журн. науки и технол.* 2018. **19**, № 2. С. 271–280.
9. Зарубин В. С. *Температурные поля в конструкции летательных аппаратов (методы расчета)*. М.: Машиностроение, 1978. 182 с.
10. Козелкин В. В., Усольцев И. Ф. *Основы инфракрасной техники*. М.: Машиностроение, 1985. 382 с.
11. Козлов Л. В., Нусинов М. Д., Акишин А. И. *Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды*. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
12. Колчанов И. П. Математическое моделирование тепловых испытаний космических аппаратов с применением криогенных экранов. *Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2015. № 1. С. 57–64.
13. Крат С. А. *Теплоприемник ФОА-020 как альтернативное средство контроля освещенности при тепловакуумных испытаниях космических аппаратов*. Решетневские чтения. Контроль и испытания ракетно-космической техники. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2017. С. 340–342.
14. Крат С. А., Филатов А. А., Христин В. В. Тепловакуумные испытания космического аппарата: опыт создания имитатора солнечного излучения на основе современных газоразрядных ламп высокого давления. *Вестн. СибГАУ*. 2010. Вып. 2 (28). С. 257–259.
15. Крат С. А., Филатов А. А., Христин В. В. Схема суммирования световых потоков от набора газоразрядных ламп для имитатора солнечного излучения. *Оптич. журн.* 2011. № 11. С. 66–72.
16. Михеев С. В. *Основы инфракрасной техники*. СПб: Ун-т ИТМО, 2017. 127 с.
17. Перетворювач теплового потоку модель ПТП-1Б. 18.2.1.11.Д.00.0.56.00.0-ДСТУ 3756-98. Настанова з експлуатації. 2020. 10 с.
18. Поштаренко Ю. А., Рассемакин Б. М., Сидоренко Ю. М., Хомініч В. І., Шевченко М. Д. Дослідницько-випробувальний експериментальний термовакуумний стенд ТВК-2,5. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 23–26. DOI. org/10.15407/knit2020. 06. 023
19. Рассемакин Б. М., Душейко М. Г., Байсков Н. Ф., Остапчук С. В., Лауш А. Г., Ланевский Е. В., Хоминич В. И., Мельник Р. С. *Наноспутники серии «POLYITAN»: результаты испытаний и планы развития*. Науч. работы X Международн. науч. конф. «Функциональные основы наноэлектроники». Список научных работ (16–21 сентября 2019 г.). Харьков — Одесса, 2019. С. 164–173.
20. Рассемакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрмасов С. М., Петров Ю. В. Экспериментальное и численное исследования тепловых режимов микроспутника. *Энергетика: економіка, технології, екологія*. 2009. № 2(25). С. 36–42.

21. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасое С. М., Хоминич В. И., Гренюк Е. И. *Исследование тепловых режимов эксплуатации оптико-электронных приборов КА «Сич-2» (МС2-8) в термовакуумной камере ТВК-2,5*. Сб. тр. IX Междунар. конф. «Современные информационные и электронные технологии» (19—23 мая 2008 г.). Одесса, 2008. С. 43.
22. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасое С. М., Хоминич В. И., Гренюк Е. И. Термовакуумные испытания оптико-электронных приборов космического аппарата МС-2-8. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2008. № 4 (76). С. 42—46.
23. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И., Петров Ю. В., Хайрнасое С. М. *Тепловые испытания малогабаритного космического аппарата МС-1-ТК-ТВ в моделирующей установке ТВК-2.5*. Сб. тр. Первой укр. конф. по перспективным космич. исслед. Киев, 2001. С. 184—193.
24. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И., Петров Ю. В., Хайрнасое С. М. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. I. Термовакуумная установка ТВК-2,5. *Космічна наука і технологія*. 2002. **8**, № 1. С. 37—41.
25. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И., Петров Ю. В., Хайрнасое С. М. Цегельник Ю. В. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. II. Результаты термовакуумных испытаний макета микроспутника типа МС-1-ТК-ТВ. *Космічна наука і технологія*. 2002. **8**, № 4. С. 3—10.
26. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасое С. М., Мархай С. М. Моделирование тепловых режимов микроспутника. *Наук. вісті НТУУ «КПІ»*. 2009. № 5. С. 45—53.
27. Теплоприемник суммарного теплового потока ФОА-020. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЛС2. 000.001ТО, 1981. 15 с.
28. ECSS-E-ST-10-03C. Космічні проектно-конструкторські розробки: Випробування. Введ. 06.12.2012. Стандарт Європейського співтовариства з космічної стандартизації. Секретаріат ECSS ESA-FSTEC. Нордвік, Нідерланди, 176 с.

#### REFERENCES

1. Andreychuk O. B., Malakhov N. N. (1982). *Thermal tests of spacecraft*. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
2. Aslanyan R. O., Anisimov D. I., Marchenko I. A., Panteleyev V. I. (2017). Solar radiation imitators for thermal-vacuum tests of the spacecraft. *Sib. Sci. and Technol. J.*, **18**, № 2, 323—327 [in Russian].
3. Bykov A. P., Androsov A. P., Piganov M. N. (2019). Thermal-vacuum tests of a spacecraft components technique. *Qual. and Reliability of Complex Systems*, **3** (27), 78—83. DOI 10.21685/2307-4205-2019-3-9 [in Russian].
4. Vorobyov L. Y., Dekusha L. V., Kovtun S. I. (2016). New models of heat flow sensors for systems for monitoring and diagnostics of energy supply. *Industrial Heat Engineering*, **38**, № 5, 86—97 [in Ukrainian].
5. Gavrilo R. V. (2004). Spacecraft thermal-vacuum tests bench. *Space Sci. and Technol.*, **10**, № 5/6, 42—46 [in Ukrainian].
6. Gavrilo R. V., Kislov A. M., Melenevskiy Yu. A., Tserkovnyy A. I. (2004). Earth radiation imitator for thermal-vacuum tests of spacecrafts. *Space Sci. and Technol.*, **10**, № 5/6, 35—38 [in Russian].
7. Gavrilo R. V., Kislov A. M., Romanenko V. G., Fenchenko V. M. (2004). TRASSA software for spacecrafts thermal modes calculations. *Space Sci. and Technol.*, **10**, № 4, 3—16 [in Russian].
8. Dvirnyy G. V., Shevchuk A. A., Dvirnyy V. V., Yelfimova M. V., Krushenko G. G. (2018). LED-based solar radiation imitator for the ground-based tests of spacecrafts. Analysis of the possibility of production. *Sib. Sci. and Technol. J.*, **19**, № 2, 271—280 [in Russian].
9. Zarubin V. S. (1978). *Temperature fields in the design of aircraft (calculation methods)*. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
10. Kozelkin V. V., Usol'tsev I. F. (1985). *Fundamentals of infrared technology*. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
11. Kozlov L. V., Nusinov M. D., Akishin A. I. (1971). *Modeling of thermal modes of the spacecraft and its environment*. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
12. Kolchanov I. P. (2015). Mathematical simulation of spacecrafts thermal-vacuum testing using cryo-shields. *Herald of B. C. Bowman Moscow State Technical University. Faculty of Mechanical engineering*, № 1, 57 — 64 [in Russian].
13. Krat S. A. (2017). *Heat receiver FOA020 as an alternative means of controlling illumination during thermal vacuum testing of spacecraft*. Reshetnev readings. Control and testing of rocket and space technology. Krasnoyarsk: Sib. state aerospace un-t, 340—342 [in Russian].
14. Krat S. A., Filatov A. A., Khristich V. V. (2010). Thermal-vacuum tests of a spacecraft: creation of a modern high-pressure gas-discharge lamps based solar emission simulator. *Herald of M. F. Reshetnev Siberian Science and Technology State University*, **2** (28), 257—259 [in Russian].
15. Krat S. A., Filatov A. A., Khristich V. V. (2011). Scheme for summing light fluxes from a set of gas discharge lamps for a solar radiation imitator. *J. Opt.*, **11**, 66—72 [in Russian].



16. Mikheyev S. V. (2017). *Fundamentals of infrared technology*. Saint-Petersburg: ITMO University.
17. The model PTP-1B.18.2.1.11.D.00.0.56.00.0-DSTU 3756-98 heat flux transducer. Operation manual. 2020. [in Ukrainian].
18. Poshtarenko Yu. A., Rassamakin B. M., Sidorenko Yu. M., Khominich V. I., Shevchenko M. D. (2020). Research and testing experimental thermovacuum stand TVK-2,5. *Space Sci. and Technol.*, **26**, № 6, 23–26 [in Ukrainian].
19. Rassamakin B. M., Dusheiko M. G., Baiskov N. F., Ostapchuk S. V., Laush A. G., Lanevsky E. V., Khominich V. I., Melnik R. S. (2019). *Nanosatellites of the POLYTAN series: test results and development plans*. Scientific work of the X International Scientific Conference “Functional foundations of nanoelectronics”, 16–21 Sept. 2019. List of scientific works. Kharkov-Odessa, 164–173 [in Russian].
20. Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Petrov Yu. V. (2009). Experimental and numerical studies of thermal regimes of a microsatellite. *Energy: economics, technology, ecology*, **2** (25), 36–42 [in Russian].
21. Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Khominich V. I., Grenyuk E. I. (2008). *Investigation of thermal modes of operation of optoelectronic devices of the Sich-2 (MC2-8) spacecraft in the TVK-2. 5 thermal vacuum chamber*. IX-th Int. conf. “Modern information and electronic technologies”, 19–23 May. Odessa, 43. [in Russian].
22. Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Khominich V. I., Grenyuk E. I. (2008). Thermal vacuum tests of optical-electronic devices of the MS-2-8 spacecraft. *Technol. and design in electronic equipment*, **4** (76), 42–46 [in Russian].
23. Rassamakin B. M., Rogachev V. A., Khominich V. I., Petrov Yu. V., Khairnasov S. M. (2001). *Thermal tests of a small spacecraft MS-1-TK-TV in the TVK-2.5 simulator Sat*. Proceedings of the First Ukrainian Conference on Advanced Space Research. Kiev, 184–193 [in Russian].
24. Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khominich V. I., Petrov Yu. V., Khairnasov S. M. (2002). Experimental modeling of thermal regimes of small-sized spacecraft and their external heat flows. I. Thermovacuum installation TVK-2.5. *Space Sci. and Technol.*, **8**, № 1, 37–41 [in Russian].
25. Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khominich V. I., Petrov Yu. V., Khairnasov S. M. (2002). The results of thermovacuum tests of the model of the microsatellite type MS-1-TC-TV. *Space Sci. and Technol.*, **8**, № 4, 3–10 [in Russian].
26. Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Markhai S. M. (2009). Modeling of thermal modes of a microsatellite. *Scientific news of NTUU “KPI”*, **5**, 45–53 [in Ukrainian].
27. Heat receiver of total heat flux FOA 020 (1981) Technical description and operating instructions. BY2. 825. 020 TO [in Russian].
28. ECSS-E-ST-10-03C. Entered into force from 06.12.2012. European Community standard for space standardization. Space design: Tests. ECSS ESA-FSTEC Secretariat, Standards and Requirements Division. Nordvik, The Netherlands.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2021

Після доопрацювання 31.01.2022

Прийнято до друку 11.02.2022

Received 19.03.2021

Revised 31.01.2022

Accepted 11.02.2022

Yu. A. Poshtarenko, Engineer

B. M. Rassamakin, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

V. A. Rogachov, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

V. I. Khominich, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

M. D. Shevchenko, Leading Engineer

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37 Peremohy Ave, Kyiv, 03056 Ukraine

## MEANS OF MEASUREMENT OF HEAT FLOWS IN THERMAL VACUUM RESEARCH AND TESTING OF PRODUCTS OF SPACE ENGINEERING

In order to adapt the domestic heat flux sensor PTP-1B to the conditions typical of ground-based thermovacuum research and testing of space technology products in the absence of certified transducers of integral heat fluxes within the range of densities of up to 2000 W/m<sup>2</sup> and spectral range of 0.2...20 μm in Ukraine, a comparative analysis of its characteristics with the widely used in this area sensor FOA-020.

Experimental studies were performed in a thermovacuum chamber of the experimental stand TEC-2,5 at a wall temperature of 20 °C. Recommendations are given regarding the possible use of the locally produced transducer PTP-1B sensor as a working means of measurement in monitoring and diagnostic systems during the processes of ground testing of space technology objects.

**Keywords:** ground-based experimental testing of space technology products, thermovacuum tests, external infrared radiation, heat flow sensor, heat flux density, own temperature of the senso.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.061>  
УДК 520.82, 520.88

**В. П. ЄПШЕВ<sup>1</sup>**, старш. наук. співроб., доц. каф. оптики, канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

**В. І. КУДАК<sup>1</sup>**, мол. наук. співроб.  
E-mail: viktor.kudak@uzhnu.edu.ua

**І. І. МОТРУНИЧ<sup>1</sup>**, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук  
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

**В. М. ПЕРІГ<sup>1</sup>**, мол. наук. співроб.  
E-mail: vasyi.perig@uzhnu.edu.ua

**І. Ф. НАЙБАУЕР<sup>1</sup>**, інженер  
E-mail: lkd.uzhgorod@gmail.com

**В. І. ПРИСЯЖНИЙ<sup>2</sup>**, нач. Національного центру управління та випробувань космічних засобів  
E-mail: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

<sup>1</sup>ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Лабораторія космічних досліджень  
вул. Далека 2а, Ужгород, Україна, 88000

<sup>2</sup>Національний центр управління та випробувань космічних засобів  
вул. Московська 8, Київ, Україна, 01010

## ВИЗНАЧЕННЯ ОРІЄНТАЦІЇ ШТУЧНОГО СУПУТНИКА ЗЕМЛІ У ВИПАДКУ ДИФУЗНОГО РОЗСІЮВАННЯ СВІТЛА ЙОГО ПОВЕРХНЕЮ

*Описуються основи розробленої методики визначення орієнтації низькоорбітальних і геосинхронних космічних апаратів за результатами спостережень дифузного розсіювання світла їхніми поверхнями. Дане розсіювання можна описати фазовими функціями, які залежать від форми розсіювальної поверхні, її орієнтації відносно напрямків на джерело випромінювання і приймач. Визначення за цими даними орієнтації опроміненого об'єкта у вибраній системі координат є одним із випадків розв'язку оберненої задачі. Поверхня космічного апарата є суперпозицією кількох стереометричних поверхонь, що одночасно розсіюють світло на спостерігача, але по-різному орієнтовані до нього, що значно ускладнює розв'язок. Реалізацію розробленої методики показано на результатах колориметричних спостережень американського метеорологічного штучного супутника Землі NOAA-18 циліндроподібної форми з двома плоскими панелями сонячних батарей.*

**Ключові слова:** штучні супутники Землі, орієнтація, методика, фотометрія, колориметрія.

### ВСТУП

Орієнтація космічного апарату (КА) на орбіті у першу чергу зумовлена поставленим перед ним завданням. Її стан, підтримка, зміна та відсутність є однією із ключових характеристик поведінки штучного супутника Землі (ШСЗ) на

орбіті, викликані природними чи штучними причинами. Тому постійний контроль за станом орієнтації КА його власником, з одного боку, та її оцінка зацікавленими з різних причин іншими країнами, з іншого боку, є пріоритетним завданням в області космічного моніторингу навколоземного простору.

Цитування: Єпшев В.П., Кудак В. І., Мотрунич І. І., Періг В. М., Найбауер І. Ф., Присяжний В. І. Визначення орієнтації штучного супутника Землі у випадку дифузного розсіювання світла його поверхнею. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1 (134). С. 61—69. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.061>

Як показує практика, у випадку відсутності зв'язку з КА його орієнтацію можна оцінити досить точно за результатами пасивних наземних позиційних та фотометричних спостережень в оптичному діапазоні.

До фотометричного методу оцінки форми і орієнтації ШСЗ науковці почали звертатися ще у першому десятиріччі космічної ери. Але більшість відомих публікацій носили теоретичний характер, або в них розглядалися окремі спрощені випадки орієнтації космічного об'єкта [2, 3, 10]. У наступні десять років найбільш глибоко в теоретичному плані задачу визначення орієнтації чисто циліндроподібних об'єктів, як у випадку дифузного, так і дзеркального відбивання світла за результатами фотометричних спостережень, було розглянуто в роботі [11]. При дифузному відбиванні світла автор аналізує різні можливі варіанти кривих блиску в залежності від розмірів об'єкта і фазового кута, а також положення у просторі площини його власного обертання. У випадку дзеркального відбивання автор розглядає використання законів відбивання світла від поверхонь.

Підсумки розвитку систем орієнтації ШСЗ і їхня оцінка за 20 років були підведені в роботі [7].

З другої половини 1970-х рр. практичне використання результатів фотометричних спостережень ШСЗ в США стали носити закритий характер майже до початку 2000-х рр. За цей час вони набули швидкого розвитку в Одесі і Ужгороді, зокрема і в напрямку їхнього практичного застосування в комплексі з результатами позиційних спостережень [1, 5, 12]. Але в цих роботах в основному розглядалося лише дзеркальне відбивання світла.

Наростання фотометричних спостережень геостационарних супутників (ГСС) теж поставило питання про оцінку їхньої орієнтації, особливо різних антен, розміщених на поверхнях цих об'єктів, або ступеня їхньої дестабілізації [4, 6, 8, 17].

З початку 2000-х років у відкритих джерелах США з'явилися ряд публікацій, в яких теж розглядалося практичне використання сучасних досягнень в області фотометрії штучних космічних об'єктів для їхньої ідентифікації та оцінки пове-

дінки на орбіті [9, 15, 18]. Наприклад, в роботі [18] криві блиску використовувалися вже для автономного (майже в режимі реального часу) визначення форми КА разом з його станом (обертальним та поступальним) на базі багатомодельного адаптивного підбору [14].

Питання практичного використання фотометричних даних у випадку чисто дифузного розсіювання світла у задачах визначення орієнтації ШСЗ в реальному часі протягом цих років залишалося в основному на стадії обговорення. Перш ніж робити оцінку орієнтації КА, потрібно врахувати велику кількість чинників, які діють на видимий блиск ШСЗ. Крім того, дифузне розсіювання світла від будь-якої поверхні (часто досить складної конфігурації) залежить від форми цієї поверхні і її орієнтації у просторі, тобто від двох невідомих факторів.

Обробка навіть однієї кривої блиску вимагала багато обчислень та затрат часу і ставила ряд питань до ступеня достовірності отриманих результатів, коли поверхня супутника складається з двох чи більше стереометричних поверхонь, що блокувало шляхи реалізації методу на практиці.

Останнім часом в ЛКД УжНУ завдяки розробленим відповідним програмам вдалося обійти більшість труднощів при аналізі дифузного розсіювання світла, особливо одночасного від кількох стереометричних поверхонь. Розроблені ключові засади методики відпрацьовані на результатах спостережень діючих на орбіті КА. Її успішне впровадження, на наш погляд, допоможе в десятки разів розширити можливості космічного моніторингу як діючих ШСЗ, так і об'єктів «космічного сміття».

#### БАЗОВІ ЗАСАДИ МЕТОДИКИ

На практиці дзеркальні спалахи, та ще й в достатній кількості, спостерігаються далеко не завжди. Блиск супутників в основному зумовлений дифузним розсіюванням світла їхніми поверхнями, тобто розсіюванням світла у будь-якому напрямку в залежності від стереометричної форми освітленої ділянки цієї поверхні. Через це розв'язок задачі значно ускладнюється, бо характер дифузного відбивання світла зумовлений вже двома взаємопов'язаними причина-

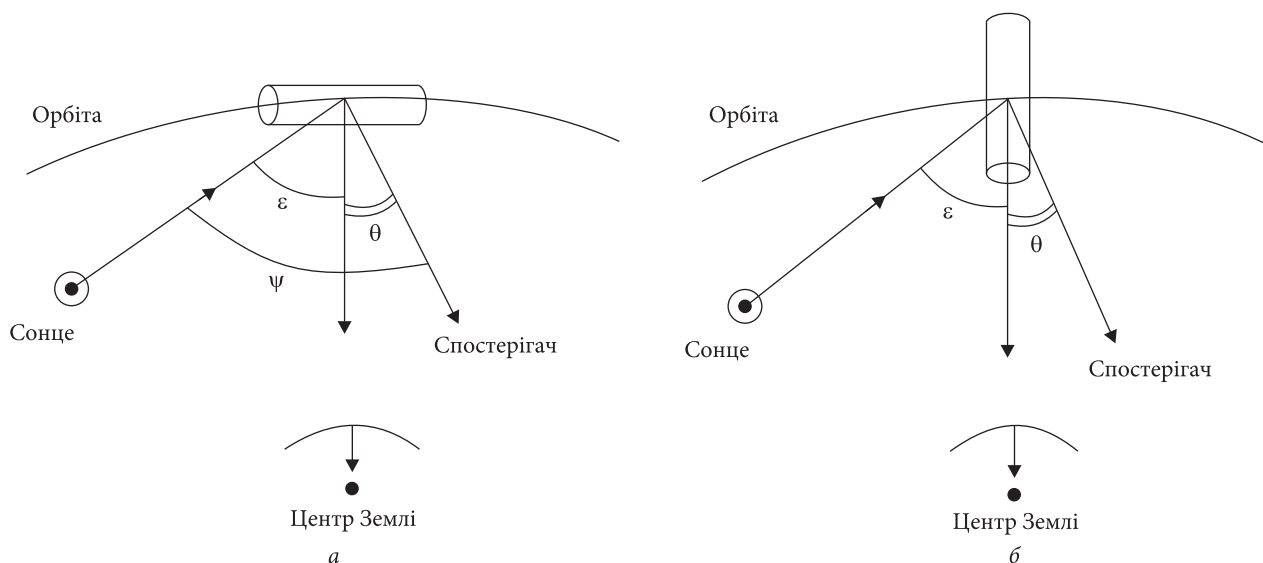


Рис. 1. Можливі варіанти орієнтації циліндроподібного ШСЗ на орбіті: *a* — варіант I, *б* — варіант II ( $\psi$  — фазовий кут об'єкта,  $\varepsilon$  — кут падіння світла,  $\theta$  — кут відбивання світла відносно напрямку «центр КА — центр Землі»)

ми — формою розсіювальної поверхні та її орієнтацією у просторі відносно Сонця та спостерігача. Зміна блиску при цьому виражається так званою фазовою залежністю, де невідомих (форма, орієнтація) може бути два чи більше. Визначення за цими даними орієнтації відбивальної поверхні можливе лише через врахування її форми шляхом використання відомих моделей різноманітних об'єктів або заданням всіх відомих систем орієнтації та зіставленням розрахункових даних з результатами спостережень методом послідовних наближень, щоб знайти, при якій орієнтації об'єкта спостережувана фазова залежність блиску КА описується найкраще.

На практиці розв'язок задачі полягає у правильному виборі фазової функції  $\varphi(\psi_i)$  і визначенні на її основі поправки

$$\Delta m_{\psi_i} = -2.5 \lg[\varphi(\psi_i)/\varphi(\psi_{CT})], \quad (1)$$

яка при перерахунку стандартизованого блиску ШСЗ на фазовий кут  $\psi_{CT} = 0$  привела б його у межах похибок до постійного значення вздовж окремої ділянки чи всієї кривої блиску. Тут  $\varphi(\psi_i)$  — фазова функція на *i*-му фазовому куті,  $\varphi(\psi_{CT})$  — на стандартному фазовому куті (як правило,  $\psi_{CT} = 0$ ), де вона для сфери і циліндра дорівнює одиниці [1], і у подальших розрахунках не розглядається.

Розглянемо реалізацію методики на прикладі визначення орієнтації нескінченно витягнутих циліндроподібних ШСЗ. Дані об'єкти в застіблізованому робочому стані можуть бути орієнтовані на орбіті головною повздовжньою віссю вздовж напрямку вектора його руху по орбіті (рис. 1, *a*), або до центра Землі (рис. 1, *б*).

З роботи [16] відомо, що фазова залежність розсіяного світла циліндром по відношенню до його основних осей, поперечної і повздовжньої (рис. 1), має вигляд

$$\varphi(\psi) = 1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \cos \varepsilon \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

$$\varphi(\psi) = 1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \sin \varepsilon \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

де  $\psi$  — фазовий кут об'єкта (між напрямками на спостерігача і на Сонце),  $\varepsilon$  — кут падіння світла на об'єкт по відношенню до однієї з основних осей,  $\theta$  — кут відбивання світла від поверхні об'єкта на спостерігача до цієї самої осі.

У випадку фотометричних спостережень циліндроподібних ШСЗ наведену вище фазову залежність розсіяння можна використати, згідно з відомою з астрономії формулою Погсона, в шкалі зоряних величин як поправку за фазу у блиск КА, приведеного раніше до стандартних умов з урахуванням змін блиску за віддаль, повітряну



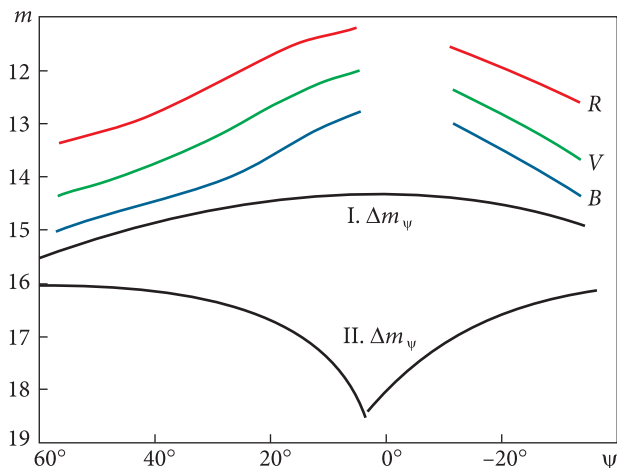


Рис. 2. Крива блиску у спектральних смугах  $B, V, R$  циліндроподібного геостационарного ШСЗ і зміни фазової поправки для такого об'єкта в залежності від його орієнтації на орбіті. Варіант I відповідає орієнтації на рис. 1,  $a$ , варіант II — рис. 1,  $b$

масу, відбитого від земної поверхні світла, як:

$$\Delta m_{\psi 1} = 2.5 \lg(1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \theta), \quad (4)$$

$$\Delta m_{\psi 2} = 2.5 \lg(1/\pi [\sin \psi + (\pi - \psi) \cdot \cos \psi] \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \theta). \quad (5)$$

Якщо КА орієнтований на орбіті згідно з рис. 1,  $a$ , до центра Землі буде направлено його поперечну вісь, а згідно з рис. 1,  $b$  — його поздовжню вісь. Напрямок із центра супутника до центра Землі (а він в даній методиці базовий), розраховується за результатами позиційних спостережень через визначення геоцентричних координат ШСЗ на момент спостережень в екваторіальній системі координат з подальшим їхнім поворотом на  $180^\circ$ . Всі інші кути ( $\psi, \varepsilon, \theta$ ) на вибрані моменти часу теж визначаються з даних позиційних спостережень за відомою в астрономії формулою косинусів, а за формулами (4), (5) розраховуються вже поправки  $\Delta m_{\psi 1}$  і  $\Delta m_{\psi 2}$ . Їхню зміну з часом для обох випадків орієнтації КА приведено на рис. 2.

Отримані таким чином результати зіставляються з кривою зміни блиску досліджуваного КА, приведеною до стандартних умов з урахуванням поправки за топоцентричну віддаль до нього, зміну товщини повітряної маси на шляху «супутник — спостерігач», стану земної атмос-

фери. Аналіз збігу чи розходження розрахункових поправок  $\Delta m_{\psi}$  та отриманих зі спостережень змін стандартизованого блиску об'єкта дозволяє остаточно визначитися, яку орієнтацію на орбіті має даний КА. Якщо у блиск ШСЗ вносять суттєвий вклад ще й панелі сонячних батарей (ПСБ), які у більшості випадків плоскі, його розрахунок, за потреби, проводиться окремо за іншою фазовою функцією розсіювання світла від площини [16]. У шкалі зоряних величин ця фазова функція має вигляд

$$\Delta m_{\psi 3} = 2.5 \lg(\cos \varepsilon_2 \cdot \cos \theta_2), \quad (6)$$

де  $\varepsilon_2$  і  $\theta_2$  — відповідно кут падіння та кут відбивання світла від поверхні ПСБ відносно напрямку нормалі до неї. Якщо поверхня КА охоплює ще більше складових, потрібно продовжити процес підбору відповідних фазових функцій і їхнє включення в розрахунок.

#### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРІЄнтації НА ОРбіті КА NOAA-18

Розроблену методику було відпрацьовано у процесі дослідження функціонування на орбіті КА NOAA-18 (рис. 3) за результатами його спостережень у двох смугах  $B, V$ . Типові криві блиску супутника приведено на рис. 4.

Розрахункові дані відповідних кутів на моменти спостережень даного КА, поправки за фазову функцію  $\Delta m_{\psi 2}$  та  $\Delta m_{\psi 3}$ , стандартизоване значення блиску супутника до та після введення поправки за фазу, представлено в табл. 1. У першій графі таблиці — час спостережень КА NOAA-18



Рис. 3. Загальний вид КА NOAA-18

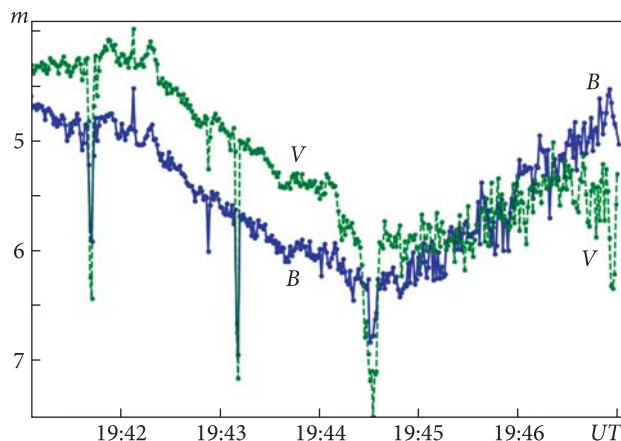


Рис. 4. Крива блиску КА NOAA-18, отримана 21.05.2020 р. Супутник орієнтований повздовжньою віссю до центра Землі. У момент часу 19:44:30 він був напрямлений торцевою частиною до спостерігача

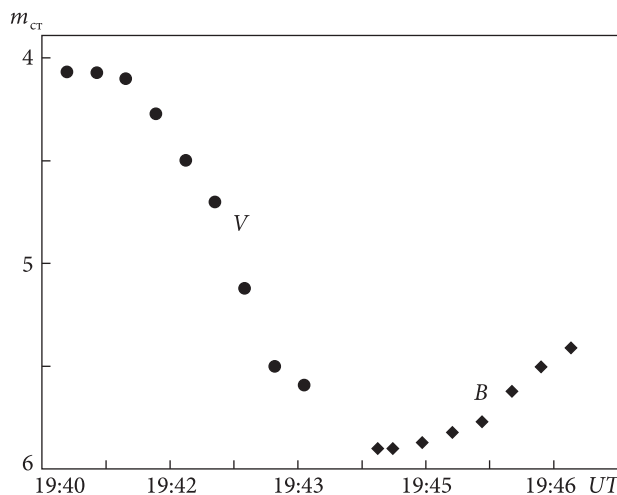


Рис. 5. Стандартизоване значення блиску КА NOAA-18 від його корпусу (смуга V) та ПСБ (смуга B)

Таблиця 1. Розраховані значення фазових поправок  $\Delta m_{\psi 1}$  і  $\Delta m_{\psi 2}$  і їхнє врахування у блиск ПСЗ NOAA-18 за 21.05.2020 р.

UT	$\psi$	$\varepsilon_1$	$\theta_1$	$\Delta m_{\psi 2}$	$m_{ст}$	$m_{ст}^x$	$\varepsilon_2$	$\theta_2$	$\Delta m_{\psi 3}$	$m_{ст}$	$m_{ст}^x$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
19 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup>	63.25°	74.19°	49.92°	-0.80	4.07	3.27					
19 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup> 25 <sup>s</sup>	66.96	75.11	47.82	-0.89	4.07	3.18					
19 <sup>h</sup> 41 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	72.21	76.09	45.55	-0.98	4.10	3.12					
19 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup>	76.03	77.07	43.23	-1.15	4.27	3.12					
19 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup> 25 <sup>s</sup>	81.42	78.05	41.00	-1.37	4.50	3.13					
19 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	87.31	79.03	39.09	-1.64	4.70	3.16					
19 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup>	93.59	80.01	37.77	-1.99	5.12	3.13					
19 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 25 <sup>s</sup>	100.09	81.00	37.27	-2.49	5.50	3.01					
19 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	106.60	81.98	37.68	-3.38	5.59	3.60					
19 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup>	112.90	82.98	38.91	$\mu$	6.50	—					
19 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 35 <sup>s</sup>	121.50						33°	84.80°	-2.82	5.90	3.19
19 <sup>h</sup> 44 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	124.30						33	84.20	-2.71	5.90	3.19
19 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup>	129.10						33	83.60	-2.61	5.87	3.26
19 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 25 <sup>s</sup>	133.40						33	83.10	-2.51	5.82	3.31
19 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	137.20						33	82.60	-2.45	5.77	3.32
19 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> 05 <sup>s</sup>	140.40						33	82.10	-2.37	5.62	3.25
19 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> 25 <sup>s</sup>	143.20						33	81.60	-2.31	5.50	3.19
19 <sup>h</sup> 46 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	145.60						33	81.10	-2.27	5.41	3.16

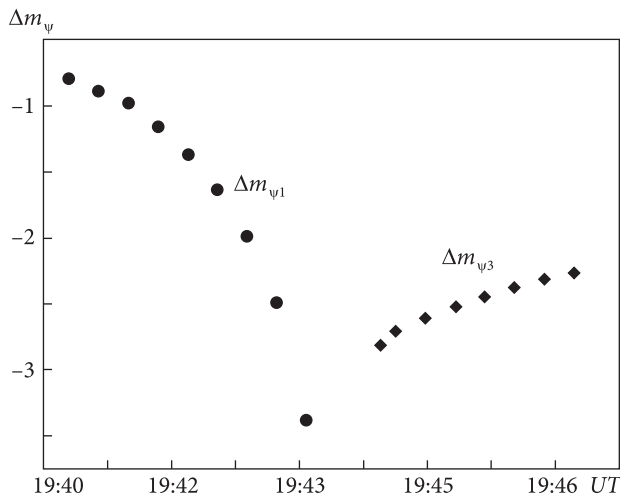


Рис. 6. Фазова поправка у блиск КА NOAA-18 від циліндроподібного корпусу ( $\Delta m_{\psi 1}$ ) та ПСБ ( $\Delta m_{\psi 3}$ )

у шкалі всесвітнього часу, у другій — фазовий кут супутника, в третій і четвертій — кут падіння світла на його корпус  $\varepsilon_1$  та відбивання від нього  $\theta_1$ , у п'ятій — фазова поправка, розрахована згідно з формулою (5), у шостій — стандартизована зоряна величина об'єкта до введення фазової поправки  $\Delta m_{\psi 1}$  (взята з кривої блиску — рис. 4), у сьомій — зоряна величина КА після врахування фазової поправки  $\Delta m_{\psi 1}$ , у восьмій і дев'ятій — кут падіння світла на ПСБ  $\varepsilon_2$  та відбивання від нього  $\theta_2$ , у десятій — фазова поправка, розрахована згідно з формулою (6), в одинадцятій — зоряна величина об'єкта до введення фазової поправки  $\Delta m_{\psi 2}$  (права гілка кривої блиску, рис. 4), у дванадцятій — зоряна величина КА після врахування фазової поправки  $\Delta m_{\psi 2}$ .

Даний КА має синхронно-сонячну, практично полюсну орбіту з кутом нахилу орбіти  $i = 99.05^\circ$ . Його освітлення Сонцем змінюється в досить малих межах, а освітлення ПСБ на інтервалах до 10 хв залишається постійним. В даному випадку за результатами спостережень видно, що кут  $\varepsilon_2$  лежить у межах  $31...35^\circ$ . В розрахункових поправках  $\Delta m_{\psi 3}$  взято його середнє значення  $\varepsilon_2 \approx 33^\circ$ .

Графічно результати аналізу відображено на рис. 5 і 6. З приведених даних видно, що зміна блиску КА вздовж лівої гілки кривої досить добре описується фазовою функцією для цилін-

дроподібних об'єктів, орієнтованих повздовжньою віссю до центра Землі, а вздовж правої — фазовою функцією для площини. На фазових кутах  $106...110^\circ$  фазова функція для циліндра переходить у невизначеність (див. табл. 1). Тобто, відбитого світла на  $\psi > 106^\circ$  спостерігач від циліндра бачити не може. Отже, на правій гілці кривої, де  $\psi \geq 110^\circ$ , блиск даного КА зумовлений лише ПСБ, яку спостерігачеві видно з часом все краще і краще. Різке зменшення блиску КА поблизу кульмінації викликане орієнтацією торцевої частини у бік спостерігача і відсутністю блиску від його корпусу на фазових кутах понад  $106^\circ$ .

Отримані результати підтверджуються значеннями колор-індекса  $C = B - V$ , отриманого з кривих блиску у системі  $B$  і  $V$  (рис. 4). Вздовж лівої гілки кривої  $C = 0.65^m$  (відбиття світла від білої металевої поверхні). Вздовж правої гілки  $C = 0.00^m...-0.31^m$  в даному випадку поверхня ПСБ.

## ВИСНОВКИ

Розроблена методика може застосовуватися незалежно від конструкції об'єкта, розміщення відбивальних ділянок його поверхні відносно головних осей та фізичних характеристик розсіюваного ним сонячного світла. Це значно розширює коло досліджуваних об'єктів, їхнього стану (робочого чи дестабілізованого).

Похибка оцінки орієнтації ШСЗ, коли він розсіює світло лише дифузно, збільшується що найменше до  $1^\circ-2^\circ$ . В даному випадку, на відміну від дзеркального відбивання, коли вона в основному зумовлена точністю визначення положення КА у момент дзеркального спалаху, його формою і тривалістю, у випадку дифузного відбивання якість відбитого світлового променя залежить від цілого ряду додаткових чинників. Це похибка врахування поправок за топоцентричну віддаль до об'єкта, товщину повітряної маси на шляху променя від КА, стану атмосфери, визначення фазового кута, використання фазових функцій розсіювання світла від тих чи інших стереометричних поверхонь, їхньої суперпозиції. Але попри всі складнощі розрахунків значно розширюється число досліджуваних космічних об'єктів, бо вони у переважній більшості відбивають світло дифузно.

Бажано проводити не просто фотометрію КА, а її різновид — колориметричні спостереження ШСЗ, тобто синхронно в кількох спектральних областях. Це дає можливість відділити і ототожити конкретний фрагмент поверхні об'єкта, що в даний момент відбиває світло на спостерігача,

і далі визначити його орієнтацію у заданій системі координат. Що більше таких колірних каналів використовуються під час спостережень, то достовірнішою буде інформація про конструктивні особливості поверхні та функціонування ШСЗ на орбіті і його програмні завдання.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Братийчук М. В., Гвардионов А. Б., Епишев В. П. и др. Фотоэлектрическая фотометрия спутника “Интеркосмос-Болгария 1330”. *Кинематика и физика небес. тел.* 1986. **2**, № 1. С. 60—65.
2. Григоревский В. М. Определение ориентации ИСЗ у пространстве по фотометрическим данным. *Бюл. ст. оптич. наблюд. искусств. спутников Земли.* 1959. № 10. С. 1—9.
3. Григоревский В. М., Лейкин Г. А. Определение положения оси вращения продолговатого спутника по отношению экстремальных значений блеска и смещению моментов экстремума. *Бюл. ст. оптич. наблюд. искусств. спутников Земли.* 1960. № 12. С. 3—9.
4. Диденко А. В., Усольцева Л. А. Анализ наземной информации об аварийном геостационарном спутнике DSP F-23. *Изв. НАН РК. Сер. физ.-мат.* 2010. № 4. С. 81—84.
5. Епишев В. П. Определение ориентации ИНТ в пространстве по их зеркальному отражению. *Астрометрия и астрофизика.* 1983. № 50. С. 89—93.
6. Єпішев В. П., Сухов П. П., Мотрунич І. І. та ін. Можливості національних оптичних засобів спостереження за космічним простором щодо контролю геостационарної орбіти у інтересах збройних сил України. *Сучасні інформ. технології у сфері безпеки та оборони.* 2018. № 3 (33). С. 72—81.
7. Робертсон Р. Е. Двадцатилетняя история развития систем ориентации космических аппаратов. *Ракетная техника и космонавтика.* 1979. **17**, № 2. С. 120—128.
8. Сухов П. П., Епишев В. П., Сухов К. П., Карпенко Г. Ф., Мотрунич И. И. Результаты комплексных исследований функционирования на орбите геосинхронного спутника “SBIRS GEO-2”. *Космічна наука і технологія.* 2017. **23**, № 1. С. 63—70.
9. Dao P., Josties E. H., Boroson T. *Automated algorithms to identify geostationary satellites and detect mistagging using concurrent spatio-temporal and brightness information.* Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2016. URL: [www.amostech.com](http://www.amostech.com) (дата звернення: 26.01.2021).
10. Davis R. J., Whipple F. L., Zirker J. B. *The orbit of a small Earth satellite.* London, 1958.
11. Giese Richard H. Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites. *SAO Special Report.* 1963. № 127. P. 1—47.
12. Koshkin N., Korobeynikova E., Shakun L., Strakhova S., Tang Z. H. Remote sensing of the EnviSat and Cbers-2B satellites rotation around the centre of mass by photometry. *Adv. Space Res.* 2016. **58**, № 3. P. 358—371.
13. Kudak V. I., Epishev V. P., Perig V. M., Neybauer I. F. Determining the orientation and spin period of TOPEX/Poseidon satellite by a photometric method. *Astrophys. Bull.* 2017. **72**, № 3. P. 340—348.
14. Linares R., Crassidis J., Jah M., Kim H. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference.* 2010. P. 8341.
15. Payne T. E., Castro P. J., Moody J. W. A discrimination analysis of Sloan and Johnson photometric systems for non-resolved object characterization. *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference.* 2016. URL: [www.amostech.com](http://www.amostech.com) (дата звернення: 26.01.2021).
16. Rambauske W. R., Gruenzel R. R. Distribution of diffuse optical reflection around some stereometric surfaces. *J. Opt. Soc. Amer.* 1965. **55**(3). P. 315—318.
17. Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I. Photometrical research of GSS “Intelsat 10-02”. *Odessa Astron. Pubs.* 2009. **22**. P. 55—59.
18. Wetterer C. J., Jah M. Attitude estimation from light curves. *J. Guid., Contr. and Dyn.* 2009. **32**, № 5. P. 16482.



## REFERENCES

1. Bratiychuk M. V., Guardionov A. B., Epishev V. P., et al. (1986). Photoelectric photometry of the satellite “Intercosmos-Bulgaria 1330”. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, **2**(1), 60–65 [In Russian].
2. Grigorevsky V. M. (1959). Determination of the satellite orientation in space using photometric data. *Bul. stations wholesale. satellite observations*, № 10, 1–3 [In Russian].
3. Grigorevsky V. M., Leikin G. A. (1960). Determination of the position of the axis of rotation of an elongated satellite in relation to the extreme values of brightness and the shift of the moments of the extremum. *Bul. stations wholesale. satellite observations*, № 12, 3–9 [In Russian].
4. Didenko A. V., Usoltseva L. A. (2010). Analysis of ground information on the emergency geostationary satellite DSP F23. *Bull. NAS RK. Ser. Phys. and mathemat.*, № 4, 81–84 [In Russian].
5. Epishev V. P. (1983). Determination of the orientation of ASE in space by their mirror reflection. *Astrometry and Astrophysics of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, № 50, 89–93 [In Russian].
6. Yepishev V. P., Motrunich I. I., Perig V. M., Kudak V. I., Nibauer I. F., Sukhov P. P., ... Myslyvyy S. O. (2018). Possibilities of national optical means of space observation for control of geostationary orbit in the interests of the Armed Forces of Ukraine. *Modern Inform. Technologies in the Sphere of Security and Defence*, **33**, № 3, 61–70 [In Ukrainian].
7. Robertson R. E. (1979). Twenty-year history of the development of spacecraft attitude control systems. *Rocket Technol. and Astronaut.*, **17**(2), 120–128.
8. Sukhov P. P., Epishev V. P., Sukhov K. P., Karpenko G. F., Motrunich I. I. (2017). The results of comprehensive studies of the operation of the geosynchronous satellite “SBIRS-GEO-2” in orbit. *Space Science and Technol.*, **23**, № 1, 63–70 [In Russian].
9. Dao P., Heinrich-Josties E., Boroson T. (2016). *Automated algorithms to identify geostationary satellites and detect mistagging using concurrent spatio-temporal and brightness information*. Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. URL: www.amostech.com (Last accessed: 26.01.2021).
10. Davis R. J., Whipple F. L., Zirker J. B. (1958). *The orbit of a small earth satellite*. London.
11. Giese R. H. (1963). Attitude determination from specular, and diffuse reflection by cylindrical artificial satellites. *SAO Special Report*, 127.
12. Koshkin N., Korobeynikova E., Shakun L., Strakhova S., Tang Z. H. (2016). Remote sensing of the EnviSat and Cbers-2B satellites rotation around the centre of mass by photometry. *Adv. Space Res.*, **58**(3), 358–371.
13. Kudak V. I., Epishev V. P., Perig V. M., Neybauer I. F. (2017). Determining the orientation and spin period of TOPEX/Poseidon satellite by a photometric method. *Astrophys. Bul.*, **72**(3), 340–348.
14. Linares R., Crassidis J., Jah M., Kim H. (2010). Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 8341.
15. Payne T. E., Castro P. J., Moody J. W., Beecher E. A., Fisher M. D., Acosta R. I. (2016). A discrimination analysis of Sloan and Johnson photometric systems for non-resolved object characterization. Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. URL: www.amostech.com (Last accessed: 26.01.2021).
16. Rambausk W. R., Gruenzel R. R. (1965). Distribution of diffuse optical reflection around some stereometric surfaces. *J. Opt. Soc. Amer.*, **55**(3), 315–318.
17. Sukhov P. P., Karpenko G. F., Epishev V. P., Motrunych I. I. (2009). Photometrical research of GSS «INTELSAT 10-02». *Odessa Astron. Pubs*, **22**, 55–59.
18. Wetterer C. J., Jah M. (2009). Attitude determination from light curves. *J. Guid., Contr. and Dyn.*, **32**(5), 1648–1651.

Стаття надійшла до редакції 26.01.2021

Після доопрацювання 12.01.2022

Прийнято до друку 24.01.2022

Received 26.01.2021

Revised 12.01.2022

Accepted 24.01.2022

*V. P. Epishev*<sup>1</sup>, Senior Researcher, Associate Professor at the Dept. of Optics, Ph.D. in Phys.&Math.

Email: lkd.uzhgorod@gmail.com

*V. I. Kudak*<sup>1</sup>, Junior Researcher

Email: viktor.kudak@uzhnu.edu.ua

*I. I. Motrunich*<sup>1</sup>, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

Email: lkd.uzhgorod@gmail.com

*V. M. Perig*<sup>1</sup>, Junior Researcher

Email: vasyi.perig@uzhnu.edu.ua

*I. F. Neubauer*<sup>1</sup>, Engineer

Email: lkd.uzhgorod@gmail.com

*V. I. Prysiazhnyi*<sup>2</sup>, Chief of the National Space Facilities Control and Test Center

Email: ncuvkz@spacecenter.gov.ua

<sup>1</sup>Space Research Laboratory, Uzhhorod National University

2a, Daleka Str., Uzhhorod, Zakarpatska Distr., 88000, Ukraine

<sup>2</sup>National Space Facilities Control and Test Center

8, Moskovska Str., Kyiv, 01010 Ukraine

#### DETERMINATION OF THE ORIENTATION OF THE ARTIFICIAL EARTH SATELLITE IN THE CASE OF DIFFUSIVE SCATTERING OF LIGHT BY ITS SURFACE

The paper considers the basics of the developed method for determining the orientation of low-orbit and geosynchronous spacecraft based on the results of observations of diffuse light scattering by their surfaces. This scattering can be described by phase functions that depend on the shape of the scattering surface, its orientation relative to the directions to the radiation source, and the receiver. Determining the orientation of the irradiated object in the selected coordinate system is one of the cases of solving the inverse problem. The surfaces of the spacecraft are a superposition of several stereometric surfaces that simultaneously scatter light onto the observer, but are differently oriented towards him, which greatly complicates the solution. The application of the developed method was carried out using the data of colorimetric observations of the American meteorological artificial satellite “NOAA-18”, which has a cylindrical shape with two flat solar panels.

**Keywords:** artificial satellites of the Earth, colorimetry, methodology, orientation, photometry.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.01.070>  
UDC 629.7(929)

**D. Yu. ZHURILO**, PhD (tech.), associate Professor  
orcid.org /0000-0002-0015-9412

E-mail: zhurilo.dm@gmail.com

**M. V. GUTNYK**, PhD (hist.), associate Professor

ORCID: orcid.org / 0000-0002-2723-2755

E-mail: marinazoza@gmail.com

**A. G. ZHURILO**, PhD (tech.), associate Professor

orcid.org /0000-0003-4084-4622

E-mail: zhurilo.alla@ukr.net

National technical university «Kharkiv Polytechnic Institute»  
2, Kirpicheva Str., Kharkiv, 61002 Ukraine

## GEORGE BOTHEZAT AND HIS CONTRIBUTION INTO THE WORLD AVIATION AND ASTRONAUTICS

*The article dedicated the life and scientific way of George de Bothezat, the first Doctor of Sciences in the field of aviation. Together with Nikolay Zhukovsky, Igor Sikorsky, Stephen Timoshenko, Alexander Fan-der-Flit, and Alexey Lebedev, he was one of the organizers of the Air Fleet of the Russian Empire. He is the author of various inventions: gyroscopic sight and other types of aviation equipment. We analyze works by G. Bothezat on the impulse theory of propellers. In particular, the scientist derived formulas for ensuring the flight stability of airplanes and helicopters. He developed training ballistic tables, which allowed making corrections for the speed of the flight and the direction of the wind.*

*We briefly described a biography of G. Bothezat, focusing on the student period of his life in Kharkiv, Ukraine, and the reasons for G. Bothezat's departure to the United States in 1918. It is stated that it was there that his talent as a designer and creator of helicopters of the original system was disclosed in the best way. In 1922, George Bothezat obtained the financial support of the American government to build a workable helicopter model without prototypes and experiments, only based on the results of calculations. The reasons why G. Bothezat did not manage to achieve the launch of the serial production of helicopters are analyzed. We also mention the activities of the company founded by G. Bothezat, which was engaged in the production of fans of a new type for the US Navy. The Bothezat system fans were installed at the Rockefeller Center in New York as well as in American tanks. It is emphasized that I. Sikorsky also used the works of G. Bothezat in his research. It is stated that the flight trajectory calculated by G. Bothezat in air and airless space was used in the development of the American program of a manned landing on the Moon using the "Apollo" system.*

**Keywords:** Personalities: George Bothezat, Igor Sikorsky, Nikolay Zhukovsky; helicopter, history of aviation, Kharkiv Institute of Technology.

### INTRODUCTION

One of the main achievements of world astronautics is the flight and landing on the Moon. The implementation of the ideas of science fiction writers took place in July 1969. This result was not immediate-

ly obtained: several lunar stations and ships failed. One of the reasons for this was the incorrectly chosen flight trajectory. To calculate the correct trajectory, the works on the study of flight trajectories in air and airless space found in the archives of NASA

Цитування: Zhurilo D. Yu., Gutnyk M. V., Zhurilo A. G. George Bothezat and his contribution into the world aviation and astronautics. *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 1 (134). С. 70–80. <https://doi.org/10.15407/knit2022.01.070>

were applied. In particular, it was these developments that were used in the preparation of the American program for a manned landing on the Moon by the “Apollo” system. The author of these calculations was George Alexandrovich Bothezat [3].

Despite the significance of scientific discoveries, the name of this scientist is still little known in Ukraine. In the scientist’s homeland, in Moldova and Ukraine, there is not a single memorial plaque to G. Bothezat. The authors failed to find any publications in Ukraine similar to the fairly thorough monograph by V. Mikheev [15], dedicated to the figure of George Bothezat and published in the Russian Federation. Because the authorship belongs to a Russian, the text itself has an ideological slant, and it is emphasized in it that Bothezat was a Russian scientist, referring to his scientific activity during his life in the Russian Empire. Also, the period of George Bothezat’s studies at the Kharkiv Technological Institute was out of the author’s attention, namely his teachers, who in one way or another influenced the formation of his personality during his student years.

Some information about the scientist is contained in the review article “Pioneering works of Kharkiv technologists in the field of aviation technology” by Nazarenko and Pavlova [17, p. 45–46]. It is only mentioned here that G. Bothezat was a graduate of KhTI and defended his first doctoral dissertation in the field of aeronautics.

Numerous photos of the designs developed by Bothezat are included in the Smithsonian National Air and Space museum album [3] and are posted on American aviation websites. In particular, the website of the Association of the United States Army posted an article by Bruce H. Charnov “The Flying Octopus’: The Forgotten Beginning of Army Helicopter Aviation” [12]. The author describes in some detail the tests of the “H-1” helicopter and the failures of G. Bothezat during its tests. However, Bruce H. Charnov noted: “The de Bothezat helicopter cost too much, performed too little and was too complex to be reliable. While it was not the first military project to go over budget and promise more than it delivered, it was the first rotary-wing project to do so”.

An article “The Flying Octopus” [10] by C. V. Glines is available on the Air Force magazine website. In this publication, the work of Bothezat in the

United States in the early 20s of the XX century is also considered. The author talks about Bothezat’s work in Dayton and notes: “After de Bothezat arrived in Dayton, Maj. Gen. Mason Patrick, Chief of the Air Service, authorized a contract with him, without open bidding, for the construction of a helicopter. This unusual procedure was authorized because no other qualified bidders existed. However, de Bothezat first had to produce a written proposal to make the transaction legal”. The information on the “Octopus” helicopter testing is also provided.

Bogdan Boreschievici, a researcher from Romania, in his publication [2, p. 112–120], analyzes the ethnological origin of the Bothezat family, and he posted the works by George Bothezat since 1913. However, in this article, the researcher ignores the Ukrainian period of the scientist’s life.

The purpose of the publication is to conduct a comprehensive historical and scientific study of Professor George Bothezat’s contribution to the world development of aviation and astronautics. Based on archival materials, in particular, the personal file of George Bothezat, we intend to reveal the formation of Bothezat, as a scientist, to show the socio-political conditions in which the formation of his scientific worldview took place in his student years.

#### **SELECTED FACTS OF BIOGRAPHY**

The future scientist was born on June 7, 1882, in St. Petersburg in a family of hereditary nobles of Moldavian origin [21, p. 7]. The literal translation of the surname from the Moldavian language meant “baptized”. The boy’s father, Alexander Ilyich, served in the Ministry of Foreign Affairs of the Russian Empire. The family lived in Paris until the death of Alexander Ilich in 1900.

In 1902, George graduated from the Chisinau Real School and tried to enter the St. Petersburg Technological Institute of Emperor Nicholas I. The applicant passed the exams successfully but did not score the necessary points for admission: the competition in the capital’s universities was high. With such a number of points, it was possible to enter other institutes. George chose the Kharkiv Technological Institute of Emperor Alexander III (KhTI) [21, p. 2].

At that time, the Institute had two departments: Mechanical and Chemical. At the Mechanical de-





*Fig. 1.* George Bothezat, 1905, from the open sources

partment, engineers were training in a wide variety of specializations: from metal cutting and mechanical engineering to construction and electrical engineering. The young man became interested in electrical engineering. This science at KhTI was taught by the leading figures of Russian engineering of that time: Professor Alexander Pogorelko, teachers Mykola Klobukov and Pavlo Kopniaev, laboratory assistant Alexander Ilyev [12, p. 157; 22, p. 1262–1263].

George Bothezat studied not just well, as it is written in his personal file, “with impeccable behavior, he showed excellent success” [21, p. 36]. In Bothezat’s record book, there was only one grade: “excellent” in all disciplines! Painstaking and serious work was behind such success. The training program for an engineer in Russian universities was extremely varied. It should be mentioned that within the 5-year educational period part of those who entered KhTI, no more than a third of students managed to finish it. (For example, from 101 entrants to the KhTI’s Mechanical Department in 1908, only three graduated from the Institute in 5 years [22, pp. 33–34]. Next year from 98 entrants, none of them graduated from the KhTI in 5 years [22, pp. 35–36]).

But, in the level of knowledge and diversity of scientific and applied interests, Ukrainian engineers far surpassed their counterparts around the world. But

by the end of George Bothezat’s third year of education, in 1905, the KhTI of Emperor Alexander III was closed due to “Schiller’s history” and the Russian Revolution.

Many teachers negatively assessed the Director’s administrative pressure on students and faculty. As a result, the dismissals began, in particular, of two professors, two teachers, two laboratory assistants, and later of others. In total, 24 teaching staff remained at the institution [23, p. 87]. 239 students were fired from KhTI for participating in the riots, 25 of them without the right to enter any other educational institution [24, p. 8]. That was the only year in the history of the Institute when no one engineer graduated from this institution [29, p. 58].

G. Bothezat believed that the Russian Empire should be transformed, not through shaking the air at rallies and shooting at windows, but through selfless work. An attempt to transfer to the capital’s institute did not succeed: turmoils seized St. Petersburg. Not wanting to waste time, the student turned to the institute administration for permission to “go abroad to continue his studies”.

At the end of August 1905, he left for Belgium (Fig. 1). In Liege, he graduated with honors from the Electrotechnical Institute of Montefiore, and in 1908 returned to his homeland with a diploma in electrical engineering. On the one hand, an engineering degree almost guaranteed a well-off future. On the other hand, foreign diplomas were not considered prestigious: the course of study in Russian institutes was more extensive than in foreign ones. Not wishing to lag, G. Bothezat graduated in 1908 with honors from the Kharkiv Technological Institute. The list of graduates of the Institute says: “Bothezat Georgy Alexandrovich (with honors), foreign engineer” [22, p. 33]. At KhTI, Bothezat completed a graduation project on the design of a power plant. In the same 1908, the former teacher of Georgy at KhTI – the Holy Father Vasyl Dobrovolskyi baptized Pavlo – the first-born of Lidiia Alexandrovna and Georgy Alexandrovich Bothezat [25, p. 209].

After receiving his diploma, Georgy Alexandrovich at once became an intern at the Göttingen and Berlin universities. There he was going to stay for two years. In Göttingen, G. Bothezat was lucky – he had the opportunity to listen to lectures by one of the

founders of world aerodynamics, Professor Ludwig Prandtl, and then under his leadership to engage in research work. But, politics intervened in the work of the engineer. Relations between Germany and Russia became more and more complicated. That began to affect his work, and in 1910 G. Bothezat moved to France (Russia's military ally in the Entente). In this country, Georgy Alexandrovich began to use the prefix "de" to his surname and signed all his printed works "de Bothezat". In democratic France, the ancient nobility was still looked upon with respect. True, the prefix "de" usually indicated the presence of a castle, identical to the surname of a nobleman. Of course, there is no Bothezat's castle either in Russia or in Moldova.

G. de Bothezat continued his work on aircraft flight dynamics at the Sorbonne. The aerodynamic laboratory of the university was well equipped: the leaders of the Sorbonne did not spare money for it and did not hide anything from their Russian colleagues. France has long sought to have Russia as an ally. Russian military agents also contributed a lot to this. The most famous of them was Count Aleksei Ignatiev.

At that time, aviation was only in the process of formation. Practical research was significantly ahead of theoretical one, and scientific ideas about many classical flight phenomena have not yet existed. For the first time, G. de Bothezat decided to use the accumulated theoretical knowledge of the dynamics of objects movement. It should be mentioned that the scientist could do similar research in Russia.

But the Russian bureaucracy could drive anyone crazy. Paul Painlevé himself, an academician, a world-renowned scientist, invited the Russian engineer to study the problem of application of classical knowledge in the theory of object dynamics to aviation problems, which he had long been interested in. As a result of two years of research at the Sorbonne, G. Bothezat, under the guidance of P. Painlevé, prepared and in 1911 successfully defended his thesis on the topic: "Study of the airplane stability". The book was written in French, and it was divided into two parts. The first was "Les Forces Agissantes sur L'Aeroplan", and the second was titled "Le Probleme General de la Stabilité de L'Aeroplan". The candidate considered his main goal: "a mathematical analysis of the general phenomena of the stability of

an airplane with the derivation of necessary and sufficient conditions for its equilibrium and the study of the possibility of fulfilling them to a degree sufficient for practice" [10]. This was the first doctoral dissertation in aviation in the world! Bothezat was one of the first who divided the system of equations of airplane motion into equations of angular motion around the center of gravity and equations of linear motion of the center of gravity of the airplane and then investigated them separately. This approach is still used today as a first approximation to the analysis of aircraft stability. The main conclusion of the dissertation was one about the need to equip the airplane with an automatic stabilizing device.

Of course, G. Bothezat's work, like any other dissertation, had several shortcomings. The father of Russian aviation, Nikolay Zhukovsky, put attention on them, but he also pointed out the undoubted advantages of the work. G. A. de Bothezat's dissertation on the topic "Study of the airplane stability" is the first work in the world devoted to deep and complex mathematical research on this issue, significantly ahead of all previous ones in this area.

Bothezat can rightfully be considered one of the founders of the science of aircraft flight dynamics. N. Zhukovsky positively assessed the work of the young scientist as a whole: "Bothezat, in his dissertation on the stability of an airplane, gave a good-looking geometric method for dynamic stability analyzing" [28]. Later Professor N. Zhukovsky, in his educational course "The theoretical Foundations of Aeronautics", referred to the calculations of George Bothezat.

At the end of the summer of 1911, after defending his dissertation, the young doctor of mathematics returned to Russian Empire. He went to Petersburg, where the main aviation institutions of the Empire were concentrated. But G. Bothezat's plans for teaching and for obtaining the title of professor did not come true. There were many qualified scientists in Petersburg, and it was not easy to become one of them. To obtain in Russia the title of not only a professor but at least an adjunct professor, it was necessary to submit a significant number of works of a high professional level to the Council of the university. It also required many years of teaching experience. To have only a dissertation was not enough. In 1911, the Polytechnic Institute of Peter the Great was the only

educational institution in Russia that prepared certified aeronautical engineers. G. Bothezat was offered to give several trial lectures there. On December 20, 1911, at a meeting of the Council of the Institute, G.A. Bothezat was elected to the position of a teacher “for hire” in the aeromechanics course. It was a temporary position, as the teacher was re-elected every year, but it was also a great success.

In addition to teaching, G. Bothezat also worked in the aerodynamic laboratory of the Polytechnic Institute. In the laboratory, he took part in the research of some parts of the C-6B airplane designed by I. Sikorsky [20]. In September 1911, G. Bothezat received a Safety Certificate (Priority Certificate) no. 49706 for “Automatically absolutely stable airplane”.

In September 1912, the S-6B became the winner of the military airplane competition. Then, Igor Sikorsky’s “Russian Vityaz” airplane model and the designer’s masterpiece “Ilya Muromets” airplane model were tested in the wind tunnel. For today, aviation historians pointed out that the rapid-fire cannon was installed on this world’s first passenger airplane for the first time. And they emphasized that among almost a hundred such airplanes that took part in World War I, only one was shot down. Of course, in the creation of the first multi-engine aircraft, there was a lot of work of G. Bothezat too, because he advised I. Sikorsky in the problems of flight dynamics.

Despite his fruitful scientific and pedagogical activity, G. Bothezat could not wait for the Professor’s rank. In early 1914, Bothezat applied to the Don Polytechnic Institute with a request to provide him with work. Soon he received an invitation to Novochoerkassk with the appointment of an extraordinary professor and an offer to start work in the 1914/1915 academic year.

Brilliant prospects opened up before him to head the creation of the third (after Moscow and St. Petersburg) scientific aviation base in the Cossack capital. G. Bothezat arrived in Novochoerkassk and immediately became actively involved in the educational and scientific processes of the established institution. Soon, an introductory lecture by G.A. Bothezat “The Great Law of Inertia” was published in the Bulletin of the Alekseevsk Don Polytechnic Institute [4]. It was materials of the lecture he had read to first-year students in the fall of 1914.

Soon, G. Bothezat received the title of an ordinary professor and the corresponding high rank of State Councilor.

The outbreak of World War I messed up all the grandiose plans. At the end of 1915, G. de Bothezat returned to the northern capital, while his position and rank at the Novochoerkassk Polytechnic were retained. Soon, the Head of the Training Department of the Ministry of Trade and Industry, to which all polytechnic institutes were subordinate, received a petition from the Head of the Air Force Directorate (AFD) on the permission of G.A. Bothezat to join the Technical Committee, because he was the most appropriate for the position of “specialist in the theory of aeronautics” [15, p. 43].

In addition to George Bothezat, Professors Stephen Timoshenko, Alexander Fan-der-Flit, and Alexey Lebedev were approved by the members of the Technical Committee of the AFD. A commission headed by A. Fan-der-Flit, consisting of professors N. Zhukovsky, G. Bothezat, and S. Timoshenko, engineers Vetchinkin, Lukyanov, Tupolev, Florin, and other scientists, developed the first aircraft Strength Standards in the Russian Empire [19, p. 241].

In 1916–1917, G. Bothezat and S. Timoshenko, for the first time, organized comprehensive strength tests of aircraft parts and components, as well as aviation materials, in the mechanical laboratories of the Central Scientific and Technological Laboratory and Petrograd university. To determine the stresses in the wing bracing of aircraft, G. Bothezat used his tensiometers, which were ten to fifteen years ahead of the methodology of foreign researchers.

G. Bothezat becomes an authoritative scientist: I. Sikorsky, listing the most prominent figures of Russian pre-revolutionary aviation science in his work “Air Way”, put G. Bothezat in second place after “the father of Russian aviation” N. Zhukovsky.

George Bothezat’s huge contribution to the victory in World War I was the creation of bombing tables for all types of airplanes of that time. Understanding well the resource intensity of the technical component of his work, Georgy Aleksandrovich was very careful about state money. So, in the spring of 1916, Bothezat, the first in the world, developed formulas for the preliminary calculation of the cost of aviation products and the payback of aircraft manufacturing enterprises.

Only in 1917, the scientist has got the title of Professor of the Petrograd Polytechnic Institute, which he had long deserved. Before the war, Georgy Alexandrovich wrote and published the book: "Introduction to the study of the stability of airplanes" (SPb., 1912) [3]. According to the results of his work in the Technical Committee, the books "Study on the phenomenon of the blade rotor operation" and "The theory of a flat-radial blade propeller" were published too (Pg., 1917) [5, 6]. Named books became the most important contribution to aviation science during these years. From a single point of view, all propeller operating modes were analyzed by the scientist. The impulse theory of Bothezat propellers was developed in 1916 and was highly appreciated by both domestic and foreign experts. During all his future life, Georgy Aleksandrovich was engaged in its improvement.

Under his supervision, gyroscopic sight and other types of aviation equipment were built, and airplanes for various purposes were designed. Since 1915, Bothezat's ballistic tables have been successfully used in aviation units, which made it possible to make corrections for flight speed and wind direction. The first airplane designed by G. Bothezat was built in October 1917 [15, p. 81]. The revolution in October interrupted the construction of other machines by engineer G. de Bothezat.

Namely, thanks to the impulse theory of propellers, G. Bothezat was able to derive formulas for ensuring the stability of the flight of not only an airplane but also a helicopter. According to the designer's idea, four propellers, installed in pairs longitudinally and transversely (rhombus) and also inclined relative to each other, were supposed to provide static stability. It should be noted, that the scheme turned out to be not only working but today it is widely used in practice in quadrocopters and drones. And their small size and weight significantly complicate the stability of their flight. But, thanks to the technical genius of George Bothezat, the problem of the stability of such aircraft has been successfully solved.

So, in 1917, G. Bothezat managed to develop the basic methods of creating a flying helicopter. Employees of the aviation department of the DECA plant (today it is Motor Sich JSC), under the leadership of G. Bothezat, began to design parts and com-

ponents of the apparatus. It was planned to complete the assembly of the helicopter by 1918.

But the Bolshevik Coup took place. The first thoughts of G. Bothezat, like many Russian intellectuals, were that this revolution was temporal. Among the new leaders were good acquaintances: his former students, colleagues at work, and social activities. However, as events have developed, Bothezat's hopes for a new authority remained less and less.

Illiterate people made their way to the management of the industry and the Armed Forces. At the end of January 1918, the scientist was officially dismissed from the Technical Committee. The Bolsheviks mockingly recommended to G. Bothezat to find another state for himself to apply his remarkable abilities and even provided him with a document exempting him from any obligations to Russia: "We hereby certify that there are no obstacles on the part of the AFD for Professor G.A. Bothezat entering into agreements with the Allied authorities regarding the use of his discoveries and inventions". Other members of the Technical Committee received the same paper. Outstanding scientists and patriots of Russian aviation were left without means of survival.

Institutes did not work, laboratories were looted, and factories were closed. Gangs of drunken sailors roamed the streets of Petrograd, killing everyone they didn't like. The Red Terror began, hunger, cold, and unemployment. Unfortunately, G. Bothezat had nowhere to use his talents under the new government. Throughout Russian history, most scholars have either died or emigrated.

G. Bothezat received invitations from diplomatic representatives of several countries with a proposal to continue his work abroad. The US naval attach was persuading more than others, and this was not surprising. Military aviation in America was in its beginning, and research on flight theory was in its initial stage. Initially, G. Bothezat moved from the northern capital to Odessa, closer to his estate and the main airfield that was in the process of construction.

After Odessa had been captured by the Austro-Hungarian troops, at the invitation of the King of Romania, Bothezat visited the temporary capital of the country, Iasi city, where he made reports on various problems of aviation. Local officials promised "mountains of gold" to the professor and persuaded



him to stay in the “historical homeland”, but to no avail [15, p. 91].

Having sold all his property, G. Bothezat returned to Petrograd. The American naval attaché and contacts in the Bolshevik government helped to obtain permission to travel abroad. In May 1918, G. de Bothezat sailed on a British warship from Arkhangel'sk. He managed to take out not only all his scientific works and working papers but also most of his technical library. Together with him was his faithful assistant Ivan Yeremeev.

The journey to the USA took two weeks. In the USA, G. de Bothezat was met by representatives of the oldest and most prestigious higher technical institution in America, the Massachusetts Institute of Technology. They immediately invited a Russian professor to read a series of lectures. At the same time, the scientist began to teach at Columbia University in New York.

In the United States, the most prestigious universities invited G. de Botezat to visit them. In 1919 he was elected as a professor of the University of Chicago, and a few years later – of Michigan one. After his arrival to the United States, Georgy Alexandrovich again changed his surname to “de Botezat” and wrote it in such a way for the rest of his life.

Three weeks after arriving in the United States, de Bothezat was invited as a scientific advisor on aerodynamics to the newly formed center of American aviation science – the National Advisory Committee for Aeronautics, or, for short, NACA. The US government appropriated \$ 5000 to the scientist, a considerable sum at that time, to continue the work begun in Russia, primarily on the theory of propellers [15, p. 103].

Surprisingly, Russian pre-revolutionary science was ahead of American one in many areas for many years. The majority of Russian emigre scientists began their scientific activities overseas with the reprint of their works, published in their homeland in the previous years. Reprinted in English, Botezat's “impulse theory” made a stunning impression on American and European aerodynamics. They were surprised: it turned out that “wild Russia” had not only advanced aviation technology but also science.

The knowledge and natural talent gained in the Russian Empire allowed de Bothezat to quickly as-

send to the Olympus of American science. However, it was not so difficult because the general level of training of American engineers was low. Another outstanding Ukrainian scientist S. Timoshenko, who arrived in the USA a little later, wrote in his memoirs: “Thorough training in mathematics and basic technical subjects gave us a huge advantage over the Americans [26, p. 238].

Later, when I became more familiar with the setting of education in America, I learned that insufficient requirements in mathematics begin in high school. An American graduating from the high school knows no more in mathematics than what is taught in the first four grades of Russian real schools” [26, p. 241].

It should be emphasized that after signing a memorandum on the prospects of helicopters, in 1921 the US Congress appropriated the astonishing sum of \$ 200 000 for work on the project. G. de Bothezat was hired as acting chief of the Engineering Division's Special Research Section at an annual salary of \$ 10 000 [10]. (For example, a Ford car in those years cost about \$ 250).

The government specified that G.de Bothezat had to prepare “drawings and data for the design, construction, and control of the helicopter flight tests”. In turn, the government had to provide engineers, materials, equipment, hangar areas. When the Engineering Division received the first set of drawings and computations from G. de Bothezat, he was to receive \$ 5 000. When the machine was fully constructed, he would receive another \$ 4 800. If it actually left the ground, climbed to 300 feet, and returned to its takeoff point without mishap, he would receive further payments totaling \$ 20 000. The craft was to be ready for flight by January 1, 1922 – that is, in seven months [10].

To keep the curious away and allow G. de Bothezat and his assistants to work unmolested, the project was given “top secret” status. Work began in a tin-roofed hangar. When the machine began to take shape and outgrew the hangar, a wall of canvas was erected outside to enclose it from view.

Engineers assigned to work with G. de Bothezat enjoyed the task, despite the Russian's angry outbursts when things didn't go his way. He hovered over their workbenches, watching them turn his drawings

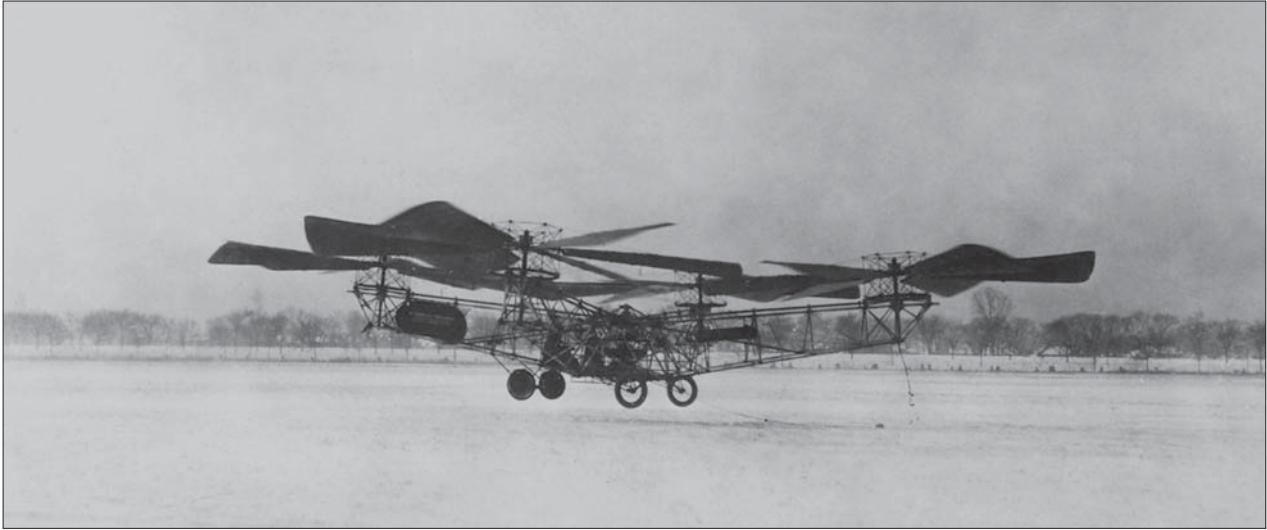


Fig. 2. Bothezat's helicopter "Flying Octopus", 1922, USA, from [12]

into strangely shaped pieces of metal. He spent his waking hours tinkering, figuring, and writing furiously. There were many problems. It is interesting that G. de Botezat, himself an ascetic man, was in great need of money because he supported several families of scientists who had immigrated to the United States but had not yet found a job.

Toward the end of 1921, G. de Bothezat realized he could not meet the deadline and pleaded for more time. He got an extension, and he and his assistants worked through the winter, spring, and summer. By the fall of 1922, the Air Service's first helicopter was near completion. On December 18, 1922, the machine was ready for the world to see. It was the first helicopter on the planet capable of manned, stable, and controlled flight! [10, 14, p. 29]. The first flight of the new helicopter lasted less than two minutes, but it was a huge leap forward in world helicopter engineering.

After all, when it comes to the history of helicopter construction, Paul Cornu using the ideas of Leonardo da Vinci, created the first helicopter capable of lifting a person but succeeded in remaining airborne for about 20 seconds at a height of 30 cm on November 13, 1907. Thus it was he who was officially recognized as having made the first free flight [16, p. 12]. Later, P. Cornu improved his achievements, but he failed to achieve a stable and controlled flight.

It must be said that Bothezat's helicopter differed significantly from the later helicopters of the classical scheme. It was a giant quadcopter with propellers over 8 meters in diameter and a 180 hp engine. The Americans nicknamed Bothezat's helicopter "Flying Octopus" (Fig 2). In 1922–1923, Bothezat's helicopter made more than 100 flights. On January 23, 1923, it left the ground with two people aboard and lifted a payload of 450 pounds (~204 kg) to a height of four feet (~1.2 m). In April 1923, it lifted four men off the ground (Fig 3) [27, p.13].

Subsequently, Igor Sikorsky created in 1940 the first helicopter of the classical scheme: with one main propeller and with a tail propeller. The overwhelming majority of helicopters are built today according to this scheme.

The four-rotor scheme has not become widespread in the creation of manned helicopters, but now it is very actively used for unmanned aerial vehicles! All current drones and quadcopters are the embodiment of George de Bothezat's ideas.

The flights of the Flying Octopus were followed not only by the public but also by officials. Among them were Herbert Hoover – Minister of Trade and the future President of the United States; General William Mitchell – founder of the United States Air Force; Newton Diehl Baker – US Secretary of War at the time.

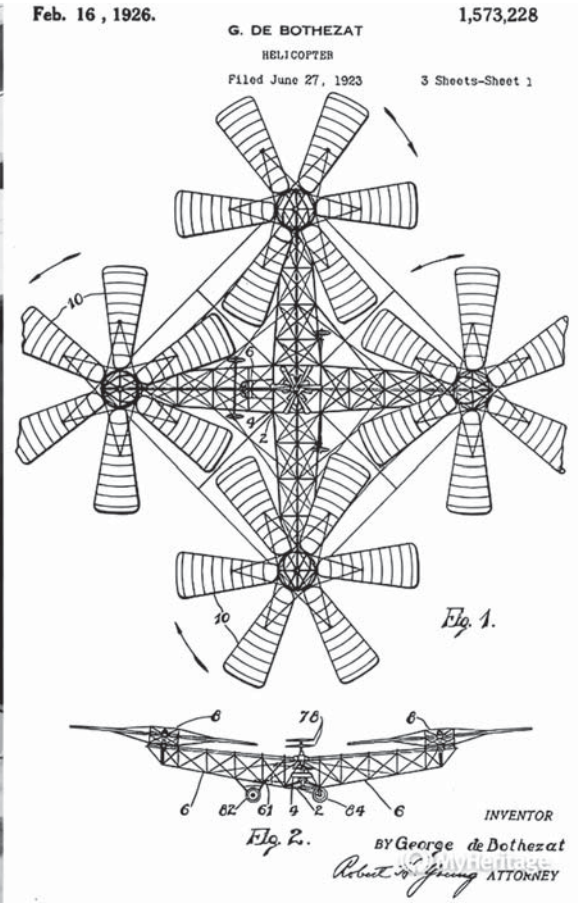


Fig. 3. G. de Bothezat beneath one of the rotor arms of his helicopter in 1923 at Wright Field, Ohio [5]

Despite the obvious successes, Bothezat failed to achieve the launch of serial production of helicopters. “Flying Octopus” by George de Bothezat remained, albeit an outstanding but single, experimental model. Bothezat’s greatness lies in the fact that his helicopter was built without preliminary experiments, without prototypes, only based on of mathematical calculations of a brilliant designer. And this was done even before the advent of computers.

After creating his “Flying Octopus”, Bothezat was engaged in the design of airplanes and experimental helicopters. In 1926, he founded the “G. de Bothezat Impeller Company”, which started the production of new types of fans for the US Navy. Subsequently, Bothezat fans were installed at the famous Rockefeller Center in New York, and, in addition, they were installed on American tanks. The outstanding engineer I. Sikorsky also used them in his developments [7].

In addition to his inventive activity, being a versatile scientist, he did not stop doing science. Georgy Alexandrovich published several papers on a new method for solving differential equations, criticism of Einstein’s theory of relativity, fundamental research on the theory of helicopter stability, the study of flight trajectories in air and airless space, and even works on philosophy and overcoming the economic depression of the 1930s [12, p. 8; 11].

Of course, Bothezat’s first helicopter was hardly a successful design. But, he had no one to rely on: he was the first. So it happened in the history of aviation. It turned out that, perfect from a theoretical point of view, in practice, aircrafts were of little importance.

A striking example is the relatively insignificant practical application of the NEZH wing profiles, developed by N. Zhukovsky.



On February 1, 1940, George de Bothezat died in Boston after undergoing emergency heart surgery. He was fifty-eight. Bothezat was buried with military honors in New York. The archive of the scientist and designer is kept in the library of the US Air Force Academy [3].

One can only regret the untimely death of an outstanding engineer. How much more he could give to humanity!

## CONCLUSION

Georgy Alexandrovich Bothezat was undoubtedly an outstanding scientist-theoretician and practitioner of aviation, one of the founders of the theory of stability of aircraft and the theory of propellers.

He was the first in the history of aviation to build a flying model of a helicopter. George de Bothezat's work in the field of dynamics, stability, and theory of flying vehicles has become classic. Subsequently, in practice, Bothezat's helicopter schemes were applied in the form of quadcopters and drones. The flight trajectory in air and airless space was used in the development of the American Apollo manned lunar landing program.

At present, in Kharkiv, the problems of aviation science and technology, as well as training of scientific and engineering personnel for aviation, are handled by the Kharkiv Aviation Institute (now the NAU "KhAI") that 90 years ago separated from the Kharkiv Polytechnic Institute (name of Kharkiv Technological Institute from December 1929).

## REFERENCES

- Album of eleven photographs of the de Bothezat helicopter in flight. URL: <https://airandspace.si.edu/collection-objects/de-bothezat-helicopter-album> (Last accessed: 19.10.2020)
- Boreschievici B. (2018). Un poinieral inventicii romanesti — George de Bothezat. Repere biografice. *Intellectus*, № 2, 112—120. URL: [https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag\\_file/112-120\\_0.pdf](https://ibn.idsi.md/sites/default/files/imag_file/112-120_0.pdf) (Last accessed: 23.10.2020).
- Bothezat G. (1912). *Introduction to the study of airplane stability: lectures, read to Officer. aeronaut. school*, 230 [in Russian].
- Bothezat G. A. (1915). The Great Law of Inertia. *Bull. Alekseev. Don. Polytechnic Institute.*, 4, dep. 2, 1—26 [in Russian].
- Botezat G. A. (1917). *Investigation of the phenomenon of the blade propeller*. Pg.: Main airfield of Air Force Directorate, 55 [in Russian].
- Botezat G. A. (1917). *Theory of a flat-radial blade rotor: a new method for the experimental determination of the coefficients of aerodynamic and hydrodynamic resistance*. Pg.: Main airfield of Air Force Directorate, 6 [in Russian].
- Botezat (Bothezat) Georgy Alexandrovich. URL: <http://library.kpi.kharkov.ua/uk/graduate/BothezatGA> (Last accessed: 19.10.2020) [in Russian].
- Carroll V. (1990). *Glines USAF. The flying octopus*. URL: <https://www.airforcemag.com/article/1090octopus/> (Last accessed 24.10.2020).
- Charnov B. H. (2015). U.S. Navy retired. "The Flying Octopus": The forgotten beginning of army helicopter. *Aviation*, March 12. URL: <https://www.ansa.org/articles/%E2%80%98flying-octopus%E2%80%99-forgotten-beginning-army-helicopter-aviation> (Last accessed 24.10.2020)
- de Bothezat G. (1911). *Étude de la stabilité de l'aéroplane: Academic theses*. Paris: H. Dunof et E. Pinat, 192 p.
- de Bothezat G. (1933). *The Depression. Its Real Causes and the Remedy Paperback*. New York: Publ. by the Author.
- De Transhie N. (1957). The genius of dr. George de Bothezat. *J. Amer. Helicopter Soc.*, 47, № 8.
- Diaconu M. C. (2016). Gheorghe Botezatu — românul care a creat, acum 100 de ani, cel mai bun elicopter din lume și a făcut primul calcul al traiectoriei pământ-lună. URL: <http://www.cunoastelumea.ro/gheorghe-botezatu-romanul-care-a-creat-acum-100-de-ani-cel-mai-bun-elicopter-din-lume-si-a-facut-primul-calcul-al-trajectoriei-pamant-luna/> (Last accessed: 19.10.2020).
- Guzman L. O. (2014). *First in. last out. History of the U.S. army pathfinder (1942—2011)*. Fort Leavenworth, Kansas, 248.
- Mikheev V. R. (2000). *Georgy Alexandrovich Botezat (1882—1940)*. Moscow: Nauka, 156 [in Russian].
- Munson K. (1968). *Helicopters and Other Rotorcraft Since 1907*. Blandford Press, 178.
- Nazarenko S. A., Pavlova G. V. (2014). Pioneering work of Kharkov technologists in the field of aviation technology. *Universitates = Universities. Sci. and Educ.*, № 3, 42—55 [in Russian].
- Radoguz S., Gutnyk M., Zaitsev R., Tverytnykova O. (2019). *The development of researches in the electrical engineering field in Kharkiv Practical Technological Institute. The personalities*. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (June 2—6, Lviv, Ukraine), 1260—1264. URL: <https://doi.org/10.1109/ukrcon.2019.8879924> (Last accessed 24.10.2020).



19. Shavrov V. B. (1986). *The history of aircraft designs in the USSR before 1938*. Moscow: Mechanical engineering, 750 p. [in Russian].
20. *Sikorsky Igor Ivanovich (1889—1972)*. URL: <http://xn--80aafy5bs.xn--p1ai/aviamuseum/aviatory/aviakonstrykory/5-rossijskaya-imperiya/sikorskij-igor-ivanovich/> (Last accessed: 24.10.2020) [in Russian].
21. State archive of Kharkiv region. F. 770. In. 2. C. 206. Bothezat G. A. 41 [in Russian].
22. State archive of Kharkiv region. F. 1682. In. 4. 4802. List of persons who graduated from the Kharkov Institute of Technology in 1890—1930, 104 [in Russian].
23. State archive of Kharkiv region. F. 770, In. 1, 517a, 97. Protocols of teachers' meetings [in Ukrainian].
24. State archive of Kharkiv region. F. 770, In. 1, 525, 12. On accepting back to the Institute former students who were dismissed at different times for participating in the riots [in Russian].
25. State archive of Kharkiv region. F. 40. In. 121, 200. Kaplunovskaya (Nativity of the Virgin) Church. 1905—1910, 386 [in Russian].
26. Timoshenko S. (1963). *Memories*. Paris, 416 [in Russian].
27. Vinogradov I. (1924). Development of helicopter technology. *Airplane*, 2(4), 10—14 [in Russian].
28. Zhukovsky N. E. (1950). *Theoretical foundations of aeronautics. Coll. works. M.; L., Vol. 6*, 516—517 [in Russian].
29. Zhurilo D. Yu. (2016). *Formation and development of the Kharkov Technological Institute in the late XIX — early XX centuries: monograph*. Kharkov: Pidruchnik NTU “KhPI”, 264 [in Russian].

Стаття надійшла до редакції 16.11.2021

Received 16.11.2021

Після доопрацювання 31.01.2022

Revised 31.01.2022

Прийнято до друку 10.02.2022

Accepted 10.02.2022

Д. Ю. Журило, канд. техн. наук, доцент

orcid.org / 0000-0002-0015-9412

E-mail: zhurilo.dm@gmail.com

М. В. Гутник, канд. істор. наук, доцент

ORCID: orcid.org / 0000-0002-2723-2755

E-mail: marinazoza@gmail.com

А. Г. Журило, канд. техн. наук, доцент

orcid.org / 0000-0003-4084-4622

E-mail: zhurilo.alla@ukr.net

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова 2, Харків, Україна, 61002

## ВНЕСОК ГЕОРГІЯ БОТЕЗАТА У СВІТОВУ АВІАЦІЮ ТА КОСМОНАВТИКУ

У статті показано життєвий та науковий шлях першого доктора наук у галузі авіації — Георгія Ботезата. Використано нові архівні дані, що розкривають причину його навчання за кордоном. Наводяться відомості про сім'ю Г. Ботезата. Стверджується, що учений разом із Миколою Жуковським, Ігорем Сікорським, Степаном Тимошенком, Олександром Фан-дер-Флітом і Олексієм Лебедєвим був одним із організаторів Повітряного флоту Російської Імперії. Проаналізовано роботи Г. Ботезата у галузі імпульсної теорії повітряних гвинтів, зокрема зазначено, що на основі своєї теорії вчений зміг вивести формули для забезпечення стійкості польоту літаків і вертольотів. Він автор різних винаходів: гіроскопічного прицілу та іншої авіаційної техніки. Він розробив тренувальні балістичні таблиці, що дозволяли вносити поправки на швидкість польоту і напрям вітру. Показано причини від'їзду Г. Ботезата до США. Стверджується, що саме тут його талант конструктора і творця вертольотів оригінальної системи розкрився найкращим чином. У 1922 р. Георгію Олександровичу за фінансової підтримки американського уряду вдалося побудувати дієздатну модель вертольота без прототипів та експериментів, лише за результатами розрахунків. Аналізуються причини, через які Г. Ботезату не вдалося домогтися запуску серійного виробництва вертольотів. Наведено інформацію про діяльність компанії, заснованої Ботезатом, що займалася виробництвом вентиляторів нового типу для ВМС США. Вентилятори системи Ботезата були встановлені у Рокфеллер-центрі у Нью-Йорку, а також встановлювалися на американських танках. Підкреслюється, що І. Сікорський також використовував у своїх дослідженнях роботи Г. Ботезата. Повідомляється, що розрахована Ботезатом траєкторія польоту у повітрі і безповітряному космосі використовувалася при розробці американської програми пілотованої посадки на Місяць з використанням системи «Аполлон». Розглянуто причину смерті вченого.

**Ключові слова:** Георгій Ботезат, вертоліт, історія авіації, Сікорський, Жуковський, Перша світова війна, революція, Харківський технологічний інститут.