



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ

Том 29
1 (140)
2022

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

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

ЗМІСТ

Дослідження Землі з космосу

Zyelyk Ya. I., Chornyy S. V., Fedorov O. P., Pidgorodetska L. V., Kolos L. M. Spatial resolution enhancement of the land surface thermal field imagery based on multiple regression models on multispectral data from various space systems. 3

Космічна й атмосферна фізика

Колодяжний В. В., Ляшенко М. В., Ємельянов Л. Я., Дзюбанов Д. А. Моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у геокосмосі над Україною у період мінімуму 24-го циклу сонячної активності (2009 та 2019 рр.) 15

Науки про життя в космосі

Кордюм Є. Л. Проекти з космічної біології в Україні: сучасні тенденції. 36

Космічні матеріали та технології

Аврамов К. В., Успенський Б. В., Деревянко І. І., Дегтярьов М. О., Поліщук О. Ф., Чернобривко М. В. Динамічні властивості нанокompозитних та тришарових тонкостінних елементів аерокосмічної техніки, виготовлених методами адитивних технологій 52

CONTENTS

Study of the Earth from Space

Zyelyk Ya. I., Chornyy S. V., Fedorov O. P., Pidgorodetska L. V., Kolos L. M. Spatial resolution enhancement of the land surface thermal field imagery based on multiple regression models on multispectral data from various space systems. 3

Space and Atmospheric Physics

Kolodyazhnyi V. V., Lyashenko M. V., Emelyanov L. Ya., Zyubanov D. A. Modeling of spatial-temporal variations of dynamic and thermal process parameters in geospace over Ukraine during the minimum of 24-th cycle of solar activity (2009, 2019) 15

Space Life Sciences

Kordyum E. L. Space biology projects in Ukraine: nowadays trends. 36

Space Materials and Technologies

Abramov K. V., Uspensky B. V., Derevyanko I. I., Degtyaryov M. O., Polishchuk O. F., Chernobryvko M. V. Dynamic properties of nanocomposite and three-layer thin-walled aerospace elements manufactured by additive technologies 52

| | | | |
|--|----|---|----|
| <i>Шевченко О. І., Іценко А. І., Бондаренко М. О.</i> Особливості та переваги дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки методом атомно-силової мікроскопії. | 65 | <i>Shevchenko O. I., Itsenko A. I., Bondarenko M. O.</i> Peculiarities and advantages of studying the surfaces of space technique materials by atomic force microscopy. | 65 |
| Історія космічних досліджень | | History of Space Research | |
| <i>Мітіков Ю. О., Білогуров С. О.</i> Науково-технічні аспекти створення першого у світі українського космічного комплексу «Веселка». | 74 | <i>Mitkov Yu., Bilogurov S.</i> Scientific-technical aspects of the world's first Ukrainian space complex «Veselka». | 74 |
| Нотатки на сторінках книги Е. І. Кузнецова «Тридцять років на орбіті» | 87 | Notes on the pages of the book “Thirty years in orbit” by E. I. Kuznetsov | 87 |

На першій сторінці обкладинки — Обкладинка книги Е. І. Кузнецова «Тридцять років на орбіті» (див. статтю «Нотатки на сторінках книги Е. І. Кузнецова «Тридцять років на орбіті», С. 87—95)

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
Веб-сайт: space-scitechjournal.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 14.03.2023. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.
Ум. друк. арк. 10,08. Обл.-вид. арк. 10,58. Тираж 50 прим. Зам. № 6872.

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/knit2023.01.003>
UDC 528.88; 528.852+845:519.237.8:004.93

YA. I. ZYELYK, Principal Researcher, Dr. Sci. in Tech., Senior Researcher
S. V. CHORNYI, Senior Researcher, PhD. in Tech., Associate Professor
O. P. FEDOROV, Director, Head of Department, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr.Sci. in Phys. & Math., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Winner of State Awards in Science and Technology of Ukraine, Corresponding Member of the IAA
L. V. PIDGORODETSKA, Senior Researcher, PhD. in Tech.
E-mail: pidgorodetska@ukr.net
L. M. KOLOS, Senior Researcher, PhD. in Tech.
Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine
40 Academician Glushkov Ave., build. 4/1, Kyiv 187, 03187 Ukraine

SPATIAL RESOLUTION ENHANCEMENT OF THE LAND SURFACE THERMAL FIELD IMAGERY BASED ON MULTIPLE REGRESSION MODELS ON MULTISPECTRAL DATA FROM VARIOUS SPACE SYSTEMS

The methodology has been developed for enhancing the spatial resolution of the land surface thermal field satellite imagery based on the following steps: coupling images in the visible, thermal, and radar ranges into the single multispectral data product; constructing regression models of the images' relationship; performing the linear regression of the pseudo-thermal product with enhanced spatial resolution from the visible and radar ranges data. The methodology is implemented on the Google Earth Engine open cloud platform using the Earth Engine API and the software scripts created in the JavaScript language with the processing of multispectral image collections of various space systems at specified time intervals.

The possibility of practical synthesis of the pseudo-thermal image with an enhanced spatial resolution of 10 m based on the thermal image with the resolution of 100 m and the multispectral composite with the layers' resolution of 10 m and 30 m is shown.

The technology has been developed for synthesis and calibration of the land surface temperature product with enhanced spatial resolution and daily data providing rate based on the brightness temperature product in the B10 band of Landsat 8 and linear regression on the MODIS, ASTER, and Sentinel 1 products with daily to moderate data providing rates. The software in JavaScript has been developed, and technology has been implemented in the interactive web service form with open access on the Google Earth Engine Apps cloud platform.

The final data product provides the satisfactory relative root mean square error of the brightness temperature recovery of not more than 6 % according to the reference cross-calibration data of the B10 Landsat 8 band in the moderate thermal field (up to 100° C). The relative root mean square errors of the synthesized data according to the reference data on high-temperature sites (fire, hot lava) up to 28 % are due to the fact that the synthesized product contains information from high-temperature spectral bands (B07–B09 from ASTER), while the reference product (B10 from Landsat 8) does not contain such information.

Technology implementation examples show that cross-calibration of the synthesized product can be performed during the year from March to October according to reference thermal images of natural or artificial objects. Objects selected for calibration must have stable thermal characteristics at the time of the satellite flight during the data acquisition period.

Keywords: land surface temperature, brightness temperature, space resolution of imagery, multiply linear regression, heterogeneous multispectral data coupling, data providing rate, product cross-calibration, Google Earth Engine.

Цитування: Zyelyk Ya. I., Chornyy S. V., Fedorov O. P., Pidgorodetska L. V., Kolos L. M. Spatial resolution enhancement of the land surface thermal field imagery based on multiple regression models on multispectral data from various space systems. *Space Science and Technology*. 2023. **29**, № 1 (140). P. 03–14. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.003>

© Publisher РН «Akademperiodyka» of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

The problem of the land surface thermal field remote sensing, the idea and objectives of the study. A sufficiently detailed review of the problem statement of the land surface thermal field satellite monitoring and methods of its solution was carried out in [3, 6]. Among the many known methods for remote land surface temperature estimation, the single-channel methods are the most common. In particular, they are used in space systems with one infrared thermal channel of the Landsat series. When implementing the single-channel method, the spectral density of radiance in the thermal infrared channel is usually converted into the effective brightness temperature at the sensor aperture by inversion of Planck's law of thermal radiation [2, 4–6]. In turn, the spectral density of radiance at the sensor aperture in each thermal infrared channel is calculated through the processing level 1 data product, i.e., digital numbers of pixels, using coefficients of radiometric calibration, which are contained in the image metadata file. Further, the effective brightness temperature at the sensor aperture is converted into the thermodynamic temperature of the land surface using the thermal emissivity values. The thermal emissivity is estimated using satellite data of the optical radiation range of processing level 2: based on the land cover classification according to spectral reflectance for specific land cover classes [2, 4–6] or each pixel based on the determination of the normalized differential vegetation index (*NDVI*) of the land cover [3]. Thus, the retrieving of the land surface temperature according to thermal infrared channels data with low resolution using the optical range data with substantially higher resolution allows us, ultimately, to enhance the spatial resolution of the thermal field imagery.

However, the spatial resolution of the thermal field imagery of the land surface can be enhanced also at the processing level 1 of the primary data product, i.e., digital pixel numbers of the thermal infrared channels rasters. The idea of the spatial resolution enhancement of the thermal field imagery just in this way is expressed in [4]. The satellite data in the visible, thermal, and radar ranges from various space systems are coupled into the single multispectral data product of processing level 1, represented by the digital numbers of pixels in each raster layer. Based on the study of physical relationships between the fields

of thermal, visible, and radar ranges, mathematical models of their relationship can be constructed, which are based on the laws of energy balance, heat transfer, and others. In particular, regression models of functional dependencies between digital numbers of pixel images in the thermal infrared range and the visible and radar radiation ranges are constructed. As a result of the implementation of the regression procedure constructed in this way on the selected land surface area, the synthesized pseudo-thermal image will have an increased spatial resolution. It is determined by the best spatial resolution of the raster layer of the coupled multispectral data product, i.e., the image in the radar range or visible range among those involved in the regression.

Thus, one of the objectives of the present study is the methodology development and implementation for enhancement of the spatial resolution of the land surface thermal field satellite imagery based on the following steps: coupling images in the visible, thermal, and radar ranges into the single multispectral data product; constructing of regression models of the images' relationship; performing the linear regression of the pseudo-thermal product with enhanced spatial resolution on the visible and radar ranges data.

The second objective of the study is related to the need to synthesize the product of the land surface temperature, which, unlike existing temperature products, would combine the enhanced spatial resolution and high data providing rate (daily). Such a pseudo-temperature product can be constructed based on the product of the B10 Landsat 8 thermal infrared channel (as a reference), converted to radiation temperature, and linear regression according to the proposed methodology on data of other space systems with different data providing rates.

Therefore, the second study objective is the technology development and implementation for synthesis and calibration of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution with daily data providing rate based on the brightness temperature in the B10 Landsat 8 channel and linear regression on products of other space systems with data providing rate from daily to moderate.

Methodology for the spatial resolution enhancement of the land surface thermal field satellite imagery

based on regression models on multispectral data from different space systems. Based on the laws of heat balance and heat transfer for the pixels of rasters in the channels of the constructed multispectral composite, the equations are obtained which characterize the relationship between the pixel values of the thermal infrared and visible radiation ranges. With steady-state heat transfer mode for the absolute thermodynamic temperature T of the land surface area, corresponding to each pixel of the image in the thermal infrared channel, the following equation is valid:

$$T = T_0 + (k_{abs} / c) \cdot W_{abs} - (k_{diss} / c) \cdot W_{diss}, \quad (1)$$

where c is the specific heat capacity, T_0 is the absolute temperature of the external environment, k_{abs} is thermal absorption, W_{abs} is the absorbed energy from the Sun's radiation and other factors, k_{diss} is thermal emissivity, and W_{diss} is the energy emitted by the land surface area. From (1) it follows the linear regression dependence for the absolute thermodynamic temperature T of the land surface pixel from the absorbed energy W_{abs} :

$$T = G \cdot W_{abs} + B, \quad (2)$$

where the coefficients G and B have the following form:

$$G = k_{abs} / c,$$

$$B = T_0 - (k_{diss} / c) \cdot W_{diss}.$$

Similar to (2) for digital numbers of the pixel of the brightness temperature T^{ir} at a sensor, taking into account the fact that the single pixel in the thermal infrared range is covered by the set of $i = 1, n$ pixels with digital numbers DNI_i^{vis} in the panchromatic range, and a fact that $DNI_i^{vis} = f(W_{abs})$, one obtains the following regression equation of the relationship between the digital numbers of the pixel in the thermal infrared and visible radiation ranges:

$$T^{ir} = \sum_{i=1}^n (G_i^{rad} \cdot DNI_i^{vis} + B_i^{rad}). \quad (3)$$

Based on (3), the calibration coefficients G_i^{rad} , B_i^{rad} are determined from the following equations system for the cross-calibration of the spectral channels in the coupled multispectral composite:

$$T_p^{ir} = \sum_{i=1}^n (G_i^{rad} \cdot DNI_{ip}^{vis} + B_i^{rad}), \quad (4)$$

$p = 1, m; m \geq n.$

The linear multiple regression coefficients and product of the land surface temperature with the enhanced spatial resolution are determined on the basis of the (4) type equation system, extended to the case of involving the radar range data in the regression. The procedure for the (4) type equation system solution is implemented on the cloud computing platform Google Earth Engine using classifiers' functions in a linear regression mode or linear regression reducers functions [5, 6]. The classifier in the linear regression mode is trained on the pixel set of the thermal infrared band layer with a low spatial resolution. The output of the classifier in linear regression mode is the raster of the synthesized pseudo-thermal image with the enhanced spatial resolution, constructed on the basis of the thermal image of the same land site with the low spatial resolution. The enhanced spatial resolution of the synthesized pseudo-thermal image is determined by the best spatial resolution of the raster layer of the coupled multispectral data product, i. e., an image in the radar range or visible range among those involved in the regression.

The data processing stages in the methodology implementation are as follows:

- Creating the image collection from various space systems for joint processing (attribute fields are satellites, region, and time interval). When the processing time interval is set to 1 month, the collection of multispectral images is formed, containing 1-2 Landsat 8 images (OLI, TIRS), several dozen Sentinel 2 images, and more than a hundred Sentinel 1 radar images.
- Creating the single multispectral image composite with the resulting single projection and the single highest spatial resolution among all layers.
- Regression of the pseudo-thermal image with the enhanced spatial resolution on the data of the visible radiation range, and, when involving radar data in the coupling procedure, additional regression on the data of the radar range with the high spatial resolution.
- Classifier training in the linear regression mode, i.e., the determination of linear regression coefficients, which is carried out on the initial data of the thermal infrared range of a low spatial resolution.
- Validation of the output pseudo-thermal image on the independent validation data set. Three classifiers in the regression mode in GEE have been stud-

ied in relation to the aimed task: gmoLinearRegression, svm, minimumDistance.

- The final stage of data processing is the calibration of the average value of the output pseudo-thermal image with the enhanced spatial resolution on a similar value of the input image in the thermal infrared range with a low spatial resolution.

The methodology is implemented on the Google Earth Engine open cloud platform using the Earth Engine API and the software scripts created in the JavaScript language for the processing of multispectral image collections of various space systems at specified time intervals.

The methodology implementation and testing. The considered methodology for the land surface thermal field spatial resolution enhancement has been tested on the monitoring examples of the thermodynamic temperature of peat lands, wild fires, and volcanoes. The studies used data from satellite sensors in the visible, thermal, and radar ranges for the three options of the space systems' grouping: I. Sentinel 1, Sentinel 2, and Landsat 8; II. Sentinel 1 and Landsat 8; III. Sentinel 1 and Terra/ASTER.

In option I, the classifier input in the regression mode is the multispectral composite image in the next channels with the corresponding spatial resolution: Sentinel 1: VV, VH (polarization) — 10 m; Sentinel 2: $B_2...B_4, B_8$ — 10 m, B_{11}, B_{12} — 20 m; Landsat 8: B_{10} — 30 m after resampling from 100 m. The classifier output in the regression mode is the single-layer pseudo-thermal image T_I^{ir} with the enhanced spatial resolution of 10 m, corresponding to the spatial resolution of the Sentinel 1 data and satisfying the regression equation:

$$T_I^{ir} = g_{VV} \cdot VV + g_{VH} \cdot VH + \sum_{i=2}^{3,4,8,11,12} g_{B_i} \cdot B_i + L_I^0, \quad (5)$$

$(i = 2, 3, 4, 8, 11, 12),$

where $g_{VV}, g_{VH}, g_{B_i}, L_I^0$ are linear regression coefficients (L_I^0 is the offset coefficient).

In option II, the input of the classifier in the regression mode is the multispectral composite image in the next channels with the corresponding spatial resolution: Sentinel 1: VV, VH — 10 m; Landsat 8: B_6, B_7 — 30 m, B_8 — 15 m, B_{10} — 30 m. The classifier output in the regression mode is the pseudo-thermal image T_{II}^{ir} with the spatial resolution of 10 m:

$$T_{II}^{ir} = g_{VV} \cdot VV + g_{VH} \cdot VH + \sum_{i=6}^8 g_{B_i} \cdot B_i + L_{II}^0, \quad (6)$$

$(i = 6, 7, 8),$

where $g_{VV}, g_{VH}, g_{B_i}, L_{II}^0$ are linear regression coefficients (L_{II}^0 is the offset coefficient).

In option III, the input of the classifier in the regression mode is the multispectral composite image in the next channels with the corresponding spatial resolution: Sentinel 1: VV, VH with the resolution of 10 m; Terra/ASTER: $B_1...B_{3N}$ with the resolution of 15 m, B_4 with the resolution of 30 m, $median(B_5, \dots, B_9)$ is the single layer of the pixel values, which are the corresponding median pixel values in the (B_5, \dots, B_9) channels, with the resolution of 30 m, $B_{10}...B_{14}$ are the thermal channels with the resolution of 90 m. The classifier output in the regression mode is the pseudo-thermal image T_{III}^{ir} with the spatial resolution of 10 m:

$$T_{III}^{ir} = g_{VV} \cdot VV + g_{VH} \cdot VH + \sum_{i=1}^4 g_{B_i} \cdot B_i + median(B_5, \dots, B_9) + \sum_{j=10}^{14} g_{B_j} \cdot B_j + L_{III}^0,$$

$(i = \overline{1, 4}; j = \overline{10, 14}),$

where $g_{VV}, g_{VH}, g_{B_i}, L_{III}^0$ are linear regression coefficients (L_{III}^0 is the offset coefficient).

Fig. 1 shows fragments of the brightness temperature raster in the thermal infrared channel B_{10} Landsat 8 TIRS (the spatial resolution is 100 m) and a synthesized pseudo-thermal image T_I^{ir} with the enhanced spatial resolution 10 m according to the regression model (5) on the background of Google map for the selected object of the company's petroleum storage depot "BRSM-Nafta" in the Vasylyk district of the Kyiv region before the fire and on the fire date June 9, 2015, respectively. The upper limit of the brightness temperature scale of 100 °C is explained by the saturation of the 16-bit ADC in the B_{10} channel of Landsat 8 TIRS at $T_{max}^{br} = 94.88$ °C.

In the considered example, to create multispectral composites and regression equations constructed for classifier training, collections of images were formed before the fire from 1 to 30 May 2015 and during the fire from 9 to 19 May 2015 from sensors of various space systems with different spatial resolutions: Sen-

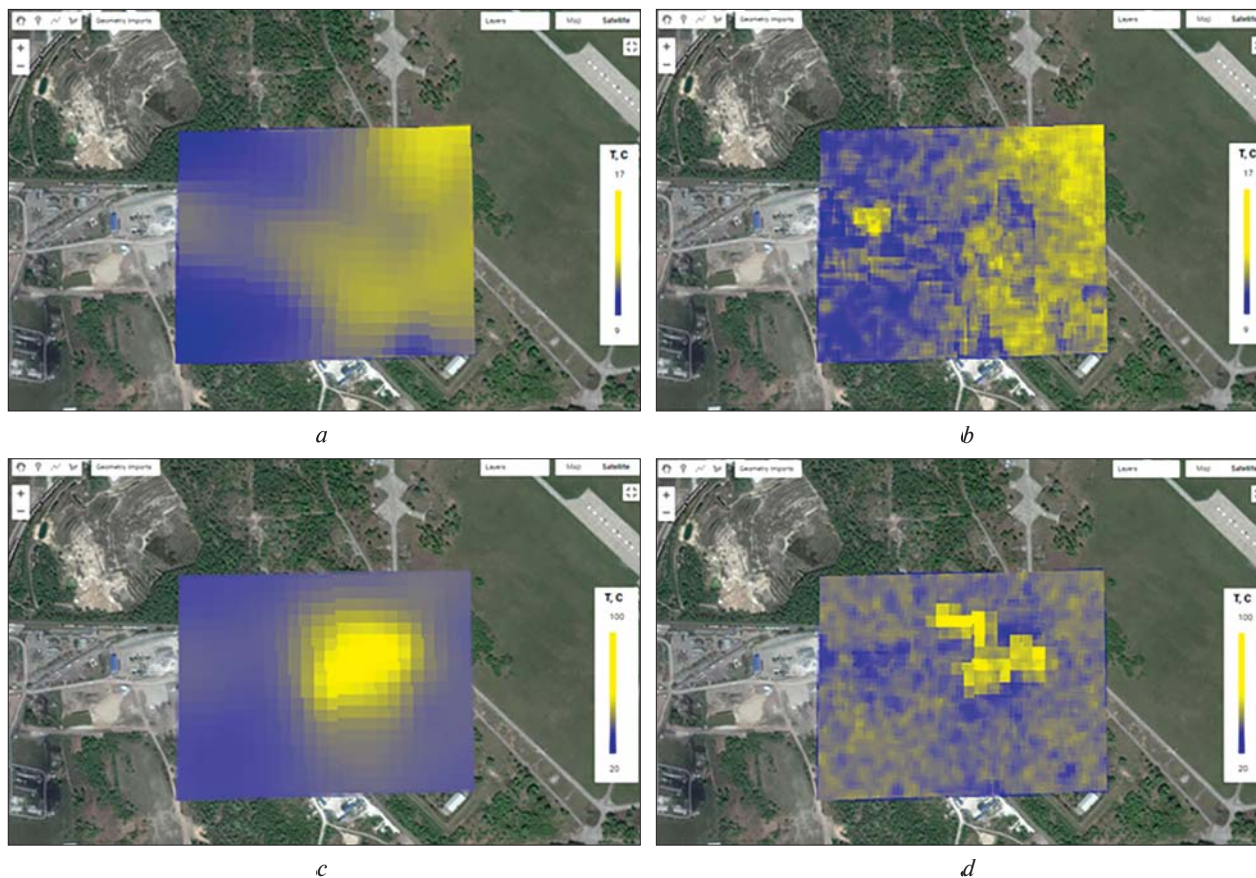


Fig. 1. *a* is the brightness temperature field raster fragment in the B_{10} channel of Landsat 8 TIRS; *b* is a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_1^{ir} with an increased spatial resolution before the fire; *c*, *d* are images of the same types as *a*, *b*, respectively, on the fire date 2015.06.09

Sentinel 1: VV, VH — 10 m; Sentinel 2: $B_2...B_4, B_8$ — 10 m, B_{11}, B_{12} — 20 m; Landsat 8: B_{10} — 100 m.

Fig. 2 shows the spatial resolution enhancement results of the brightness temperature field image (*b*) at the smoldering fire site on the peat land (*a*) near the Svarychiv village, Ivano-Frankivsk region. Fig. 2, *c* shows a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_H^{ir} with the enhanced spatial resolution of 10 m according to the regression model (6) based on data from various space systems with different spatial resolutions: Sentinel 1: VV, VH — 10 m; Landsat 8: B_6, B_7 — 30 m, B_8 — 15 m. Fig. 2, *d* shows a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_1^{ir} with an increased spatial resolution of 10 m according to the regression model (5) based on data from sensors of various space systems with different spatial resolu-

tions: Sentinel 1: VV, VH — 10 m; Sentinel 2: $B_2...B_4, B_8$ — 10 m, B_{11}, B_{12} — 20 m; Landsat 8: B_{10} — 100 m.

Fig. 3 presents the results of the spatial resolution enhancement of the brightness temperature field image with the spatial resolution of 100 m of Nyiragongo volcano, Congo (Fig. 3, *b*) and its environs in July 2018, shown in natural colors in Fig. 3, *a*. Fig. 3, *c* shows a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_1^{ir} with the increased spatial resolution of 10 m according to the regression model (5) from sensors of various space systems with different spatial resolutions: Sentinel 1: VV, VH — 10 m; Sentinel 2: $B_2...B_4, B_8$ — 10 m, B_{11}, B_{12} — 20 m; Landsat 8: B_{10} — 100 m. Fig. 3, *d* shows a fragment of the pseudo-color RGB composite of Landsat 8 data channels: R corre-

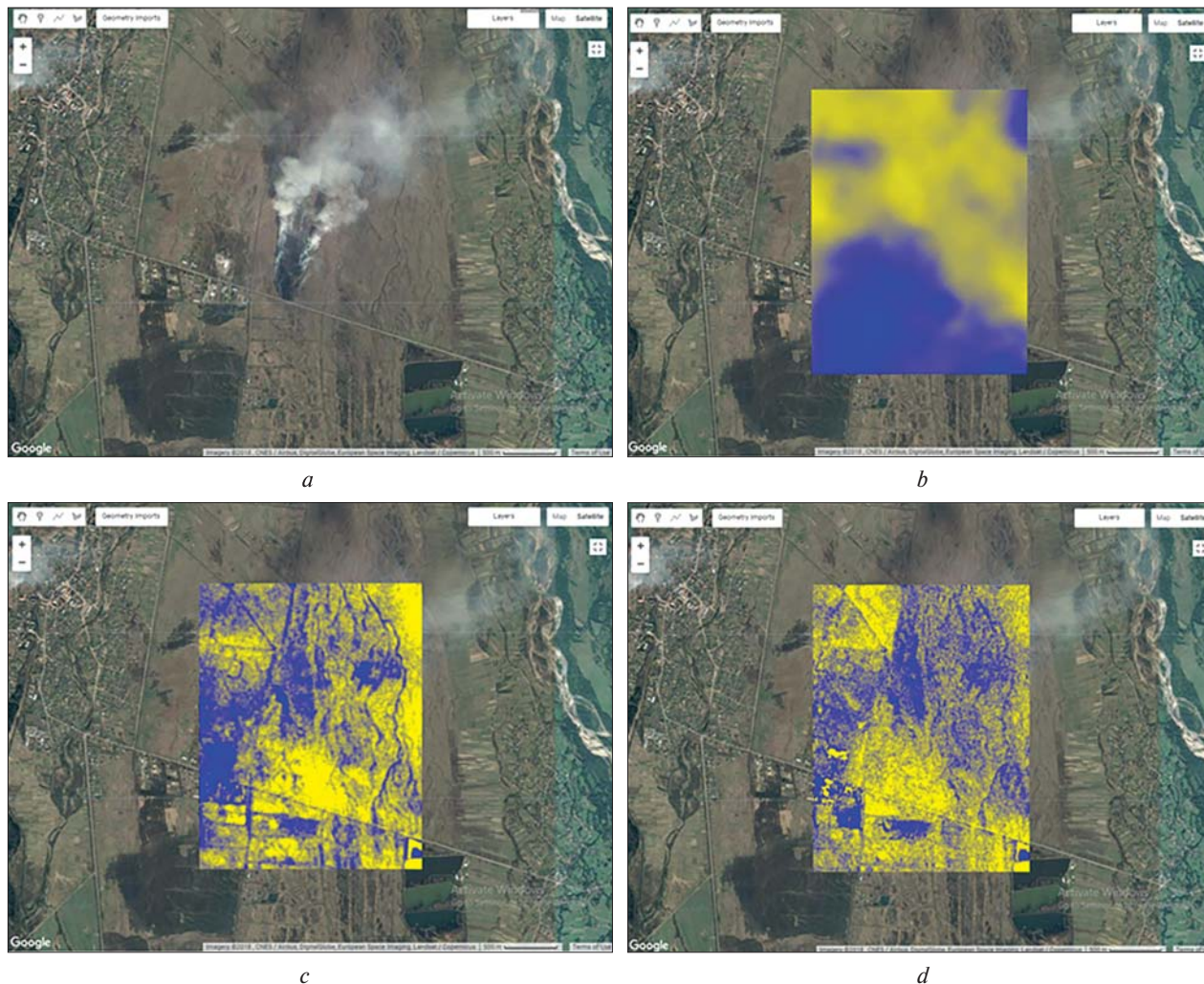


Fig. 2, *a* is the smoldering fire image on the peat land near the Svarychiv v., Ivano-Frankivsk region; *b* is a fragment of the brightness temperature raster in the channel B_{10} Landsat 8 TIRS with the spatial resolution of 100 m; *c* is a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_H^{tr} with an increased spatial resolution of 10 m; *d* is a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_I^{tr} with an increased spatial resolution of 10 m

sponds to B_6 , G corresponds to B_7 , and B corresponds to B_{10} , for which the central wavelengths correspond to the maximum spectral radiance density according to Planck's law for temperatures in the range of 800...1000 K and more, 400...500 K, and 300...400 K, respectively. The use of this composite illustrates (only approximately and qualitatively) the more contrasting picture of the pixel distribution in the specified temperature ranges in Fig. 3, *d* in comparison with the raster of the synthesized pseudo-thermal image T_I^{tr} in Fig. 3, *c*, especially in the vol-

cano crater and on its slopes, albeit with the spatial resolution of 30 m (for qualitative visualization), but not of 10 m, as in the synthesized product.

Synthesis and calibration of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution and daily data providing rate, based on the linear regression on the data from various space systems. The study objective is to implement the developed by authors technology of synthesis and calibration of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution and daily data providing rate based

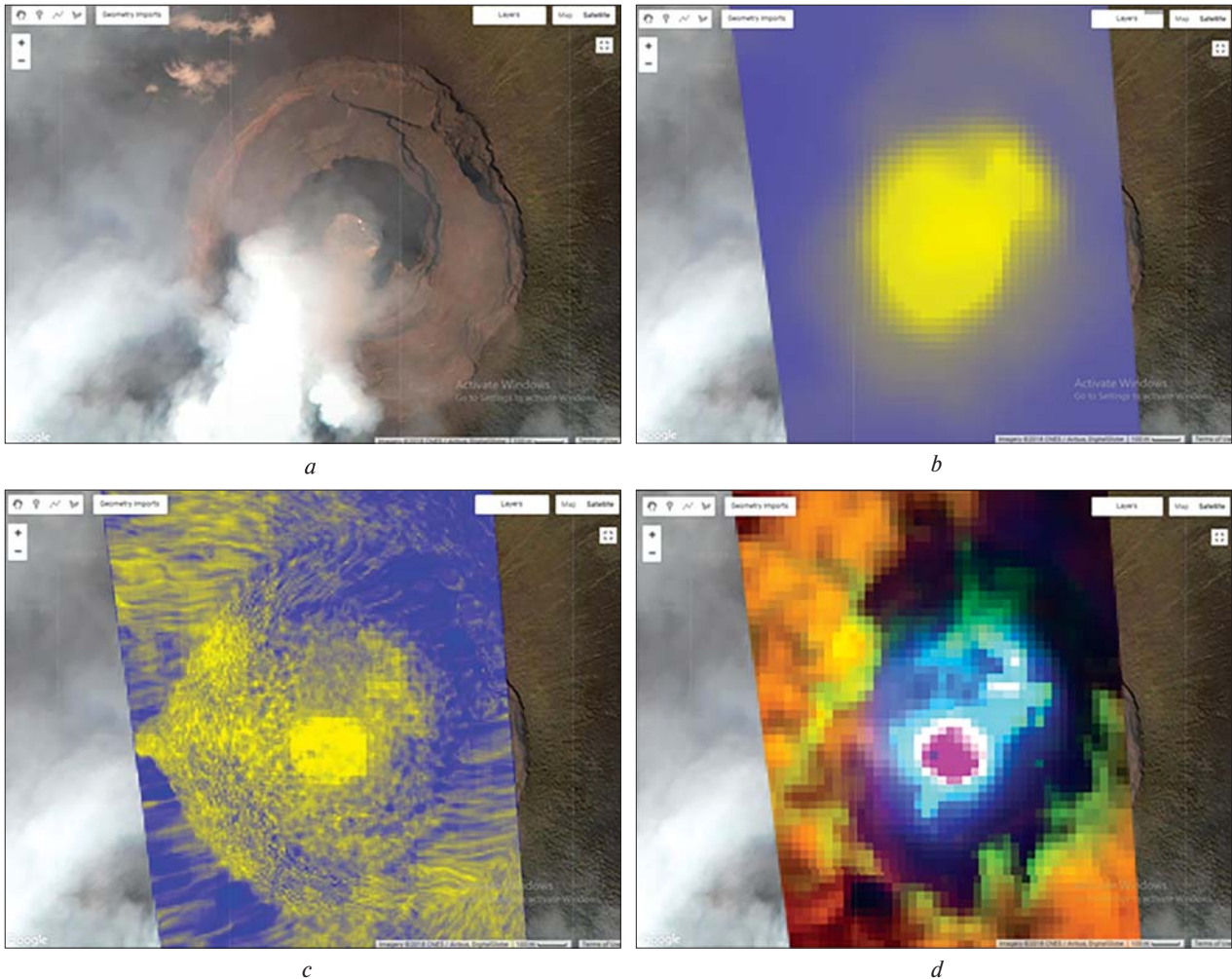


Fig. 3. *a* is a satellite image of the Nyiragongo volcano, Congo, in the natural colors; *b* is a fragment of the brightness temperature raster in the B_{10} Landsat 8 TIRS channel with a spatial resolution of 100 m; *c* is a fragment of the synthesized pseudo-thermal image T_1^{tr} with the enhanced spatial resolution of 10 m; *d* is a fragment of the pseudo-color RGB composite of Landsat 8 channels data: R corresponds to B_6 , G corresponds to B_7 , B corresponds to B_{10}

on the brightness temperature product in the B_{10} channel of the Landsat 8 and the linear regression on MODIS, ASTER and the Sentinel 1 products with data providing rate from daily to moderate. The presented technology is based on the method developed by the authors and described in this article above.

Synthesis of the land surface temperature product with a high spatial resolution and a high data providing rate. The synthesis procedure of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution consists in the implementing of the following multiple linear regression dependence of the land

surface temperature image on the test site, selected for further calibration of the synthesized product from averaged in certain time intervals input images in the short-wave infrared, thermal, and radar ranges:

$$U^d = a_0 + a_1 \cdot VV + a_2 \cdot VH + a_3 \cdot B_{07} + a_4 \cdot B_{08} + a_5 \cdot B_{09} + a_6 \cdot B_{13} + a_7 \cdot B_{14} + a_8 \cdot LST_{Day_1km}, \quad (7)$$

where U^d is the output synthesized land surface temperature image with the enhanced spatial resolution; a_i ($i = 0, 8$) are scalar coefficients determined by the least squares method; B_{07} , B_{08} , B_{09} , B_{13} , B_{14} are input images of the test site in the respective ASTER bands;

LST_{Day_1km} is the input image of the MOD11A1 product for test site.

The averaging time of the input images in (7) is chosen taking into account the acquisition of at least one qualitative reference image in the averaging period (received once every 16 days) from the Landsat 8 collection: “LANDSAT/LC08/C01/T1_RT” (i. e., the product of thermal infrared channel B10, converted into brightness temperature).

The procedure for synthesizing the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution based on the linear regression equation (7) is implemented using the classifier `ee.Reducer.linearRegression()` [5, 6] on the Google Earth Engine cloud platform.

Calibration of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution. The calibration of the product is performed for the selected test site according to the calibration equation:

$$U^k = (U^{cl} - \text{mean}(U^{cl})) \cdot \text{STD}^{kal} / \text{STD}^{cl} + \text{mean}(U^{kal}), \quad (8)$$

where U_k is the calibrated land surface temperature product with the enhanced spatial resolution; U^{kal} is reference image in the B_{10} band of Landsat 8, converted to brightness temperature; $\text{mean}(U^{cl})$ and $\text{mean}(U^{kal})$ are average values of U^{cl} and U^{kal} , respectively; STD^{cl} , STD^{kal} are standard deviations of U^{cl} and U^{kal} , respectively.

To estimate the calibration relative error according to the calibration equation (8) for the area of the synthesized image of the land surface temperature with the enhanced spatial resolution, which coincides with the area of the reference image in the B_{10} band of Landsat 8 converted to brightness temperature, the following dependence is used:

$$\varepsilon = \left(\sqrt{\frac{\sum_{ij} (U_{ij}^k - U_{ij}^{kal})^2}{\sum_{ij} U_{ij}^{kal}}} \right) \cdot 100,$$

where ε is the calibration relative error in %, which is the relative root mean square error of the synthesized pseudo-thermal image in regard to the reference image for the test site; U_{ij}^k is the brightness temperature value of the pixel of the synthesized image with the enhanced spatial resolution; U_{ij}^{kal} is the brightness temperature value of the image pixel, which is ob-

tained by resampling the reference image with a low spatial resolution to the sampling grid of the synthesized image.

The technology has been developed for synthesis and calibration of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution and daily data providing rate based on the brightness temperature product in the B_{10} band of Landsat 8 and the linear regression on the MODIS, ASTER, and Sentinel 1 products with data providing rate from daily to moderate. JavaScript software has been developed, and the technology was implemented in the form of an interactive web service with open access on the Google Earth Engine Apps cloud platform [6].

Initial data for regression processing according to the developed technology:

- thermal data with a low spatial resolution of 1000 m with a high data providing rate (daily) from the TERRA/MODIS collection “MODIS/006/MOD11A1”, i. e., the product “ LST_{Day_1km} ”;
- thermal data with the spatial resolution of 30 (90) m with a high data providing rate from the TERRA/ASTER collection “ASTER/AST_LIT_003”, i. e., products of bands B_{07} , B_{08} , B_{09} , B_{13} , B_{14} ;
- radar data with a high spatial resolution of 10 m with moderate data providing rate (2 days) from the Sentinel 1 collection “COPERNICUS/S1_GRD”, i. e., products of VV , VH bands.

Initial data for cross-calibration of synthesized thermal images:

- thermal data with the spatial resolution 30 (100) m with a low data providing rate (1 time in 16 days) (reference values) from the Landsat 8 collection “LANDSAT/LC08/C01/T1_RT”, i. e., the product of the thermal infrared channel B_{10} , converted into brightness temperature;
- the product of the land surface temperature with the enhanced spatial resolution of 10 m, synthesized as a result of regression processing on satellite data of the thermal and radar ranges.

Observation objects and events:

object 1: “BRSM-Nafta” petroleum company’s storage depot, fire, Vasylykiv district of Kyiv region, Ukraine;

object 2: Nyiragongo volcano, eruption, Congo;

object 3: peat lands, fire, Lielsalas hamlet, Latvia.

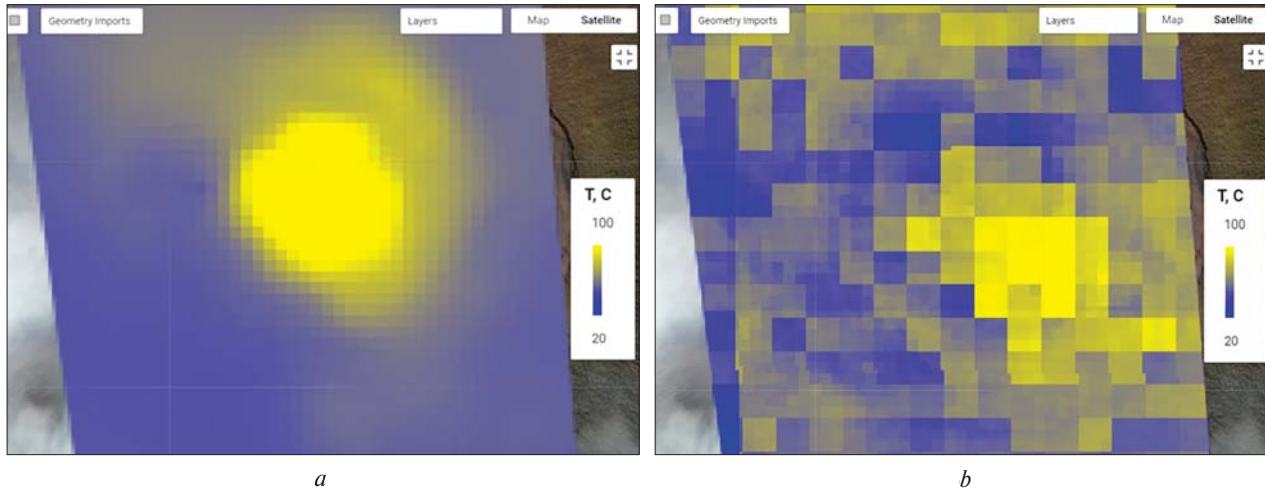


Fig. 4. *a* is a reference image of the brightness temperature for object 2 in the month when the eruption occurred; *b* is the synthesized image of the brightness temperature with the enhanced spatial resolution for object 2 in the same month

Technology implementation examples for synthesis and calibration of thermal imagery with the enhanced spatial resolution. The technology implementation results are presented in the examples of the three observation objects mentioned above.

Object 1. Data processing period: every month from the 3rd to the 10th month of the year during 2015–2019.

The values of the calibration parameters for the test site in the period of the fire 06.2015, when, in fact, the calibration took place, are as follows:

$$\begin{aligned} \text{mean}(U^{cl}) &= 3.9, \\ \text{mean}(U^{kal}) &= 23.37, \\ STD^{cl} &= 0.075, \\ STD^{kal} &= 6.47. \end{aligned}$$

The reference image of the brightness temperature for object 1 in the B_{10} band of Landsat 8 TIRS in the period of the fire (06.2015) is shown in Fig. 1, *c*. The synthesized image of the brightness temperature with the enhanced spatial resolution for object 1 in the same period (06.2015) is shown in Fig. 1, *d*.

The calibration relative errors of synthesized thermal images with the enhanced spatial resolution for object 1 according to Landsat 8 reference data for each month from the 3rd to the 10th month of the year during 2015–2019 are shown in Table 1. The

Table 1. The calibration relative errors of synthesized thermal images with the enhanced spatial resolution for object 1

| Object 1. Calibration relative errors (%) during 2015–2019 | | | | | Month |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|
| 2019 | 2018 | 2017 | 2016 | 2015 | |
| 0.7063 | 0.8149 | 0.2413 | 0.4689 | 0.8812 | 3 |
| 1.5548 | 0.588 | 0.9569 | 1.1284 | 2.6089 | 4 |
| 1.3111 | N/A | 1.8261 | 1.1685 | 0.6487 | 5 |
| 1.0723 | 1.5007 | 0.6926 | 1.9351 | 17.791 | 6 |
| 3.5248 | 4.2234 | 3.9182 | 1.7067 | 2.7682 | 7 |
| 1.0723 | 1.5007 | 0.6926 | 1.9351 | 1.4039 | 8 |
| 0.9195 | 0.5382 | 0.9581 | 1.1861 | 0.7194 | 9 |
| 1.3867 | 0.5672 | N/A | 2.4402 | 6.2002 | 10 |

table cell with the value of the calibration relative error in the month when there was a fire (06.2015) is shaded.

Object 2. Data processing period: every month from the 3rd to the 10th month of the year during 2015–2019. The reference image of the brightness temperature for object 2 in the B_{10} band of Landsat 8 TIRS in the month when the eruption occurred is shown in Fig. 4, *a*. The synthesized image of the brightness temperature with the enhanced spatial resolution for object 2 in the same month is shown in Fig. 4, *b*.

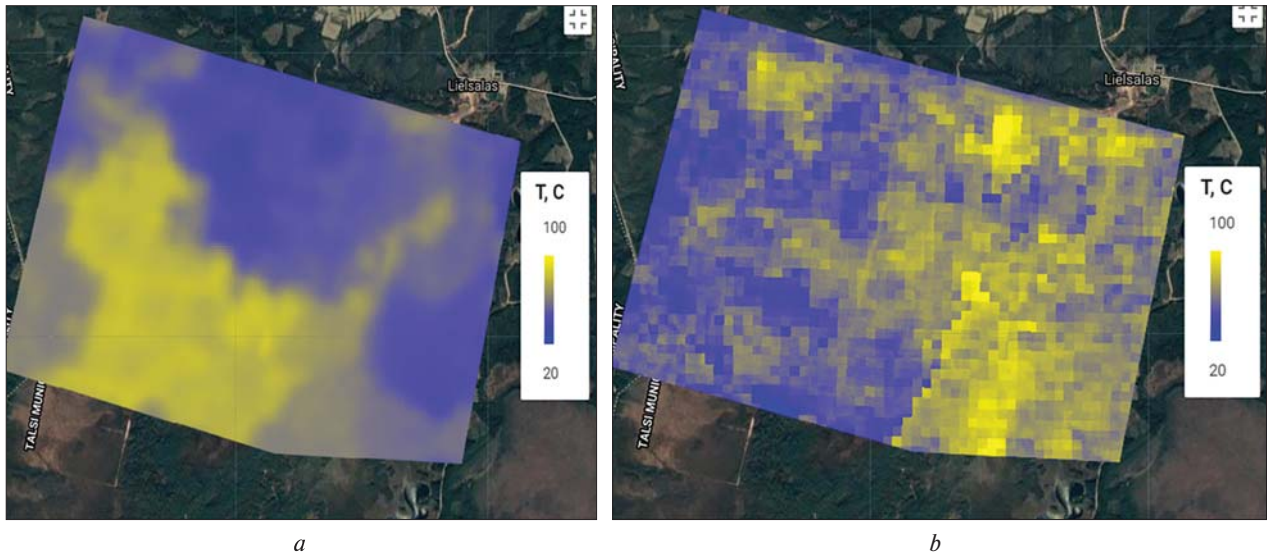


Fig. 5, *a* is a reference image of the brightness temperature for object 3 in the month when a fire occurred; *b* is the synthesized image of the brightness temperature with the enhanced spatial resolution for object 3 in the same month

Table 2. The calibration relative errors of synthesized thermal images with the enhanced spatial resolution for object 2

| Object 2. Calibration relative errors (%) during 2015–2019 | | | | | Month |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|
| 2019 | 2018 | 2017 | 2016 | 2015 | |
| 22.098 | N/A | 10.006 | N/A | N/A | 3 |
| 24.545 | N/A | 7.4642 | N/A | 5.6631 | 4 |
| 6.7206 | 7.3593 | 1.9849 | N/A | N/A | 5 |
| 18.683 | 19.406 | 19.456 | 19.713 | N/A | 6 |
| 9.2359 | 28.641 | 15.382 | 20.933 | N/A | 7 |
| N/A | 23.893 | 0.7421 | N/A | N/A | 8 |
| N/A | 6.5604 | 5.0509 | N/A | N/A | 9 |
| 3.2477 | N/A | 6.8493 | 12.934 | N/A | 10 |

The calibration relative errors of synthesized thermal images with the enhanced spatial resolution for object 2 according to Landsat 8 reference data for each month from the 3rd to the 10th month of the year during 2015–2019 are shown in Table 2. The table cells with values of the calibration relative error in the months when the volcano erupted are shaded.

Object 3. Data processing period: every month from the 3rd to the 10th month of the year during 2015–2019.

Table 3. The calibration relative errors of synthesized thermal images with the enhanced spatial resolution for object 3

| Object 3. Calibration relative errors (%) during 2015–2019 | | | | | Month |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|
| 2019 | 2018 | 2017 | 2016 | 2015 | |
| 3.8223 | 1.1401 | N/A | N/A | 0.787 | 3 |
| 0.9635 | N/A | 1.2639 | 6.2847 | 1.5476 | 4 |
| 5.1849 | 2.49 | 3.6493 | N/A | 2.3367 | 5 |
| 5.9758 | 6.1656 | 7.8078 | 6.8849 | 3.1143 | 6 |
| 5.2526 | 7.6831 | 1.5783 | 3.447 | 3.1671 | 7 |
| N/A | 3.6796 | 3.4222 | 2.7019 | N/A | 8 |
| 2.2372 | 2.6767 | N/A | N/A | 2.1915 | 9 |
| 1.6414 | 2.7593 | N/A | N/A | 2.1534 | 10 |

The reference image of the brightness temperature for object 3 in the B_{10} band of Landsat 8 TIRS in the month of the fire (07.2018) is shown in Fig. 5, *a*. The synthesized image of the brightness temperature with the enhanced spatial resolution for object 3 in the same month (07.2018) is shown in Fig. 5, *b*.

The calibration relative errors of synthesized thermal images with the enhanced spatial resolution for object 3 according to Landsat 8 reference data for each month from the 3rd to the 10th month of the

year during 2015–2019 are shown in Table 3. The table cell with the value of the calibration relative error in the month when there was a fire (07.2018) is shaded.

CONCLUSIONS

The methodology has been developed for the enhancement of the spatial resolution of the land surface thermal field satellite imagery based on the following steps: coupling images in the visible, thermal, and radar ranges into the single multispectral data product; constructing regression models of the images' relationship; performing the linear regression of the pseudo-thermal product with the enhanced spatial resolution on the visible and radar ranges data. The methodology is implemented on the Google Earth Engine open cloud platform using the Earth Engine API and the software scripts created in the JavaScript language with the processing of multispectral image collections of various space systems at specified time intervals.

The possibility of practical synthesis of the pseudo-thermal image with the enhanced spatial resolution of 10 m based on the thermal image with the resolution of 100 m and the multispectral composite with the layers resolutions of 10 m and 30 m is shown.

Extending the scope of the developed methodology to monitoring high-temperature objects with internal heating sources (fires, geothermal phenomena, etc.) requires further research in the direction of the joint use of the Landsat 8 data in the infrared bands B_6 , B_7 , and B_{10} . Calibration methods of proposed regression mathematical models and validation of the synthe-

sized thermal images with the enhanced spatial resolution require further development and research.

The technology has been developed for synthesis and calibration of the land surface temperature product with the enhanced spatial resolution and daily data providing rate based on the brightness temperature product in the B10 band of Landsat 8 and linear regression on the MODIS, ASTER, and Sentinel 1 products with data providing rate from daily to moderate one. The software in JavaScript has been developed, and technology in the interactive web service form with open access on the Google Earth Engine Apps cloud platform has been implemented.

The final data product provides the satisfactory relative root mean square error of the brightness temperature recovery of not more than 6 % according to the reference cross-calibration data of the B10 Landsat 8 band in the moderate thermal field (up to 100 °C). The relative root mean square errors of the synthesized data according to the reference data on high-temperature sites (fire, hot lava) up to 28 % are due to the fact that the synthesized product contains information from high-temperature spectral bands ($B_7...B_{09}$ from ASTER), while the reference product (B10 from Landsat 8) does not contain such information.

Technology implementation examples show that cross-calibration of the synthesized product can be performed during the year from March to October according to reference thermal images of natural or artificial objects. Objects selected for calibration must have stable thermal characteristics at the time of satellite flight during the data acquisition period.

REFERENCES

1. *Google Earth Engine Apps. Thermal Images Processing to get 10 m Spatial Resolution by S1, L8 Data Regression*. Developed by S. Chornyy, JS Code 1. URL: <https://svch1mail.users.earthengine.app/view/thermal-images-of-10m-resolution> (Last accessed: 01.06.2022).
2. *Google Earth Engine. Linear Regression*. URL: https://developers.google.com/earth-engine/guides/reducers_regression (Last accessed: 01.06.2022).
3. Stankevich S. A., Filipovich V. E., Lubsky M. S., Krylova A. B., Kritsuk S. G., Brovkina O. V., Gornyy V. I., Tronin A. A. (2015). Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal infrared satellite imaging. *Ukr. J. Remote Sensing*, № 7, 12–21. URL: <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77> (Last accessed: 01.06.2022) [In Russian].
4. Zyelyk Ya., Chornyy S., Pidgorodetska L. (2017). Mathematical models of the joint calibration process and optimal filtration of integrated multispectral data products of space Earth observations in visible, thermal and radio spectral bands. Abstracts of the 17th Ukrainian Conference on Space Research (Odesa, August, 21–25), 195.

5. Zyelyk Ya. I., Pidgorodetska L. V., Chorny S. V. (2018). Estimation of the thermodynamic temperature field of the land surface using satellite data based on land cover classification. *Astron. School's Report*, **14**, № 2, 70–77. DOI: <https://doi.org/10.18372/2411-6602.14.10> [in Ukrainian].
6. Zyelyk Ya. I., Podgorodetskaya L. V., Chorny S. V. (2019). Estimation of the thermodynamic temperature of the Earth's surface using satellite data based on the land cover classification in the optical radiation range. *J. Automat. and Inform. Sci.*, **51**, 1. 6, 25–40. DOI: 10.1615/jautomatinfscien.v51.i6.30.

Стаття надійшла до редакції 09.06.2022

Після доопрацювання 09.06.2022

Прийнято до друку 02.08.2022

Received 09.06.2022

Revised 09.06.2022

Accepted 02.08.2022

Я. І. Зєлик, голов. наук. співроб., д-р техн. наук., старш. наук. співроб.

С. В. Чорний, старш. наук. співроб., канд. техн. наук, доц.

О. П. Федоров, дир., зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук, член-кор. НАН України.

Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України у галузі науки і техніки, дійсний член Міжнародної академії астронавтики

Л. В. Підгородецька, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

E-mail: pidgorodetska@ukr.net

Л. М. Колос, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
Проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1, Київ, Україна, 03187

ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ МНОЖИННОЇ РЕГРЕСІЇ НА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ ВІД РІЗНИХ КОСМІЧНИХ СИСТЕМ

Розроблено методологію підвищення просторової роздільної здатності супутникових зображень теплового поля земної поверхні на основі поєднання зображень у видимому, тепловому та радіолокаційному діапазонах у єдиний багатоспектральний продукт даних; побудови регресійних моделей взаємозв'язку зображень; виконання лінійної регресії псевдотеплового продукту з підвищеною просторовою роздільною здатністю на даних видимого та радіолокаційного діапазонів. Методологію реалізовано на відкритій хмарній платформі Google Earth Engine з використанням Earth Engine API та програмних скриптів, створених мовою JavaScript, з обробкою багатоспектральних колекцій зображень різних космічних систем на заданих часових інтервалах.

Показано можливість практичного синтезу псевдотеплового зображення з підвищеною просторовою роздільною здатністю 10 м на основі теплового зображення з роздільною здатністю 100 м та багатоспектрального композиту з роздільною здатністю шарів 10 і 30 м.

Розроблено технологію синтезу та калібрування продукту температури земної поверхні з підвищеною просторовою роздільною здатністю і темпом надання даних щодня на основі продукту радіаційної температури у каналі B10 «Ландсат-8» та лінійної регресії на продуктах MODIS, ASTER і «Сентінель-1» з темпом надання даних від щоденного до помірному. Розроблено програмне забезпечення на JavaScript та реалізовано технологію у формі інтерактивного вебсервісу з відкритим доступом на хмарній платформі Google Earth Engine Apps.

Кінцевий продукт даних забезпечує задовільну відносну середню квадратичну похибку відновлення радіаційної температури не більше 6 % згідно з прототипами на помірному тепловому полі (до 100 °C) з перехресним калібруванням за зразковими даними «Ландсат-8». Відносні середні квадратичні помилки синтезованих даних згідно із зразковими даними на високотемпературних ділянках (пожежа, розпечена лава) до 28 % зумовлені тим, що синтезований продукт містить інформацію з високотемпературних спектральних каналів ($B_7...B_{09}$ — ASTER), а зразковий продукт (B_{10} — «Ландсат-8») такої інформації не містить.

Приклади застосування технології демонструють, що перехресне калібрування синтезованого продукту можна здійснювати протягом року з березня до жовтень за зразковими тепловими зображеннями природних чи штучних об'єктів. Об'єкти, відібрані для калібрування, повинні мати стабільні теплові характеристики на момент польоту супутників протягом періоду збору даних.

Ключові слова: температура земної поверхні, радіаційна температура, просторова роздільна здатність зображень, множинна лінійна регресія, поєднання різнорідних багатоспектральних даних, темп надання даних, перехресне калібрування продукту, Google Earth Engine.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.01.015>

УДК 629.783, 550.388

В. В. КОЛОДЯЖНИЙ^{1,2}, мол. наук. співроб., аспірант

E-mail: Vyacheslav.Kolodyazhnyi@infiz.khpi.edu.ua

М. В. ЛЯШЕНКО¹, учений секретар, канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: intercosmos80@gmail.com

Л. Я. ЄМЕЛЬЯНОВ¹, пров. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com

Д. А. ДЗЮБАНОВ², проф., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.

E-mail: Dmytro.Dziubanov@khpi.edu.ua

¹ Інститут іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України

вул. Кирпичова 16, Харків, Україна, 61001

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова 2, Харків, Україна, 61001

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ВАРІАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ГЕОКОСМОСІ НАД УКРАЇНОЮ У ПЕРІОД МІНІМУМУ 24-ГО ЦИКЛУ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ (2009 ТА 2019 рр.)

Об'єкт дослідження: фізичні процеси в іоносферній плазмі. Предмет дослідження: просторово-часові залежності основних параметрів іоносферної плазми, отримані за допомогою радара некогерентного розсіяння. Методи дослідження — наземний радіофізичний метод некогерентного розсіяння радіохвиль, статистичний аналіз результатів спостережень, напівемпіричне моделювання параметрів динамічних і теплових процесів.

Виконано моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у іоносферній плазмі на фазах мінімуму 24-го циклу сонячної активності за даними харківського радара некогерентного розсіяння. Для типових геофізичних періодів (весняне та осіннє рівнодення, літнє та зимове сонцестояння) побудовано добові залежності параметрів процесів у іоносферній плазмі на висотах від 210 до 450 км. Наведено аналіз просторових та часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у іоносфері. Розраховано значення швидкості перенесення плазми за рахунок амбіполярної дифузії, щільності повного потоку плазми та потоку заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії, значення енергії, що підводиться до електронного газу, щільності потоку тепла, яке переноситься електронами з плазмосфери до іоносфери, а також швидкості еквівалентного нейтрального вітру та меридіональної складової швидкості нейтрального вітру. Виявлено, що для більшості досліджуваних періодів слабкі варіації космічної погоди не призводять до істотних змін у просторово-часових варіаціях параметрів динамічних та теплових процесів у іоносфері. Кількісні та якісні характеристики цих параметрів та їхні добові варіації були типовими для сезонів, що розглядаються, за винятком швидкості еквівалентного нейтрального вітру, яка суттєво змінювалася (до 2...2.5 раз) навіть при незначному посиленні геомагнітної активності. Причинами таких змін можуть бути посилення горизонтальних термосферних вітрів та проникнення зональних магнітосферних електричних полів у середні широти у періоди рівнодень.

Цитування: Колодяжний В. В., Ляшенко М. В., Ємельянов Л. Я., Дзюбанов Д. А. Моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у геокосмосі над Україною у період мінімуму 24-го циклу сонячної активності (2009 та 2019 рр.). *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 1 (140). С. 15—35. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.015>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Отримані результати розрахунків можуть використовуватися у фундаментальних дослідженнях сонячно-земних зв'язків і геокосмосу, для розв'язання прикладних задач, пов'язаних з можливістю прогнозування стану космічної погоди, а також для подальшого розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ION.

Ключові слова: іоносфера, іоносферне моделювання, фізичні процеси в іоносферній плазмі, параметри динамічних та теплових процесів, радіофізичні методи досліджень геокосмосу, сонячна активність.

ВСТУП

Динамічні та теплові процеси відіграють важливу роль у формуванні висотного профілю концентрації електронів у області F іоносфери, де, як відомо, процеси перенесення плазми та енергії стають більш значущими, ніж процеси іонізації та рекомбінації. Спостереження, аналіз та моделювання варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у геокосмічній плазмі на даний час є важливими та актуальними задачами сучасної геофізики. Розв'язання цих задач розширюють наші знання про поведінку параметрів термосфери, іоносфери та магнітосфери Землі.

Метод некогерентного розсіяння радіохвиль має найбільші діагностичні можливості дослідження стану іоносфери та процесів, що протікають у ній, дозволяє одночасно отримувати дані про основні параметри іоносфери в широкому діапазоні висот та успішно застосовується як вище, так і нижче максимуму іонізації [18, 19]. Дослідження верхньої іоносфери у глобальному масштабі проводиться за допомогою сучасних засобів, включаючи мережу радарів некогерентного розсіяння (НР) та іонозондів [15, 20, 21]. Кожен з цих радарів є унікальним, оскільки всі вони розташовані у різних географічних локаціях, мають різні типи конструкцій, а також використовують різні робочі частоти.

Велику кількість публікацій присвячено дослідженням варіацій параметрів іоносферної плазми у різних геліогеофізичних умовах (див., наприклад, роботи [12, 23–25, 27, 28] та посилання там). Ця робота продовжує дослідження варіацій параметрів фізичних процесів у іоносфері та ґрунтується на результатах, які були отримані раніше у роботах [3, 6–8, 17]. Дослідження параметрів іоносфери та стану космічної погоди є однією з найважливіших проблем геофізики [9, 26]. Також особлива увага приділяється вивченню ефектів унікальних подій у геокос-

мічному просторі — сильних геомагнітних бур, сонячних затемнень та інших. Проте вивчення та аналіз поведінки іоносферної плазми у спокійних умовах є не менш актуальними, оскільки всі збурення відбуваються на цьому тлі. Під час геомагнітних бур внаслідок магнітосферної конвекції має місце посилення електричних полів, що суттєво впливає на динаміку середньоширотної іоносфери. Електричні поля проникають в середньоширотну іоносферу, і внаслідок цього виникає додатковий рух плазми у схрещених електричному та магнітному полях.

Харківський радар НР є найбільш інформативним джерелом даних про параметри геокосмічної плазми в середніх широтах Центральної Європи [16]. Із залученням експериментальних даних радару НР можуть бути розраховані параметри динамічних та теплових процесів у іоносфері. Отримані результати розрахунків сприяють подальшому розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ION (Central Europe Regional Ionospheric Model) [5, 13], створеної в Інституті іоносфери. Модель іоносфери CERIM ION базується на масиві експериментальних даних, отриманих за допомогою харківського радару НР та іонозонда. Її можна використовувати для точнішого розрахунку умов поширення радіохвиль у центральноевропейському регіоні, що дозволить зменшити потужність радіопередавальних пристроїв, а також поліпшити завадостійкість засобів радіозв'язку, радіолокації та радіонавігації.

Метою роботи є моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних і теплових процесів у іоносферній плазмі у періоди рівнодень та сонцестоянь на фазах мінімуму 24-го циклу сонячної активності у 2009 та 2019 рр. з використанням експериментальних даних харківського радару НР. Для розрахунку параметрів нейтральної атмосфери було використано емпіричну модель атмосфери NRLMSISE-00 [22].

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Харківський радар некогерентного розсіяння. Для дослідження ефектів у іоносфері використовувався радар НР метрового діапазону, розташований поблизу м. Харкова в Іоносферній обсерваторії Інституту іоносфери НАН і МОН України [16]. Географічні координати радара: 49.6° N, 36.3° E; геомагнітні: $\Phi = 45.7^\circ$, $\Lambda = 117.8^\circ$; нахилення геомагнітного поля — 66.4°, параметр Мак-Ілвейна $L \approx 1.9$.

Радар оснащено zenітною дводзеркальною параболічною антеною діаметром 100 м. Робоча частота радара — 158 МГц. Ефективна площа антени — близько 3700 м², коефіцієнт підсилення антени — близько 10⁴, ширина основної пелюстки діаграми спрямованості — близько 1°. Імпульсна потужність радіопередавального пристрою становить 2...4 МВт. Частота проходження зондувальних радіоімпульсів становить 24.4 Гц. Шумова температура радіоприймального пристрою дорівнює 120 К, а смуга пропускання вузькосмугового тракту, що визначається фільтрами нижніх частот, становить 5.5...9.5 кГц. Ефективна шумова температура системи дорівнює 470...980 К.

Радар дозволяє з високою точністю (похибка 1...10 %) і роздільною здатністю по висоті (20...100 км) вимірювати такі параметри іоносфери: концентрацію електронів N_e , температуру електронів T_e , температуру іонів T_i , вертикальну складову швидкості переносу заряджених частинок v_z та відносний вміст іонів (O^+ , He^+ , H^+). Досліджуваний діапазон висот становить 180...1000 км і залежить від рівня сонячної активності та сезону.

Цифровий іонозонд. Цифровий іонозонд використовується для загального контролю стану іоносфери та калібрування отриманого методом НР нормованого висотного профілю концентрації електронів у його максимумі за визначеною критичною частотою шару $F2$ іоносфери. Основні параметри іонозонда: імпульсна потужність — 15 кВт, тривалість радіоімпульсів — 100 мкс, діапазон частот у режимі вертикального зондування 1...20 МГц, чутливість приймача — 15 мкВ. Приймальна і передавальна антени — ромбічні з вертикальним випромінюванням, розташовані ортогонально. Похибка визначення критичної частоти шару $F2$ становить не більше 0.05 МГц.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ (ГЕЛОГЕОФІЗИЧНА ОБСТАНОВКА)

У табл. 1 представлено періоди вимірювань параметрів іоносфери за допомогою радара НР. Дослідження основних параметрів іоносферної плазми проводилися для чотирьох характерних геофізичних періодів — літнього та зимового сонцестоянь, а також весняного та осіннього рівнодень у спокійних геомагнітних умовах на фазах мінімуму 24-го циклу сонячної активності.

У табл. 2 представлено дати, які було обрано для детального аналізу варіацій параметрів

Таблиця 1. Періоди вимірювань на харківському радарі НР у 2009 та 2019 рр.

| | 2009 р. | 2019 р. |
|---------------------|---------------|---------------|
| Весняне рівнодення | 24—26 березня | 20—22 березня |
| Літнє сонцестояння | 17 червня | 19—21 червня |
| Осіннє рівнодення | 29—30 вересня | 18—20 вересня |
| Зимове сонцестояння | 13—15 грудня | 16—19 грудня |

Таблиця 2. Параметри стану космічної погоди для обраних дат

| Дата | $F_{10.7}$ | A_p | K_p |
|----------------------------|------------|-------|-----------------|
| <i>Весняне рівнодення</i> | | | |
| 24.03.2009 | 69 | 8 | 0 3 2 3 3 2 1 2 |
| 25.03.2009 | 69 | 10 | 4 4 2 3 1 1 1 1 |
| 26.03.2009 | 69 | 7 | 2 3 3 0 2 1 1 1 |
| 20.03.2019 | 77 | 5 | 1 2 2 1 2 1 1 1 |
| 21.03.2019 | 80 | 2 | 0 1 1 1 1 0 0 0 |
| 22.03.2019 | 82 | 1 | 0 0 1 0 0 0 0 0 |
| <i>Літнє сонцестояння</i> | | | |
| 17.06.2009 | 68 | 3 | 1 0 0 0 1 2 0 2 |
| 19.06.2019 | 68 | 4 | 1 1 1 1 1 1 1 1 |
| 20.06.2019 | 68 | 7 | 1 2 3 2 1 1 2 2 |
| 21.06.2019 | 67 | 6 | 1 2 2 2 2 1 2 2 |
| <i>Осіннє рівнодення</i> | | | |
| 29.09.2009 | 72 | 2 | 0 0 0 0 1 1 1 1 |
| 30.09.2009 | 72 | 4 | 1 1 1 1 1 0 2 1 |
| 18.09.2019 | 66 | 9 | 3 2 2 2 3 1 1 2 |
| 19.09.2019 | 67 | 4 | 1 1 1 1 1 1 1 1 |
| 20.09.2019 | 67 | 3 | 2 1 1 1 1 1 1 1 |
| <i>Зимове сонцестояння</i> | | | |
| 13.12.2009 | 76 | 2 | 0 0 1 1 1 0 0 0 |
| 14.12.2009 | 79 | 4 | 0 3 2 2 0 1 0 0 |
| 15.12.2009 | 82 | 0 | 0 0 0 0 0 0 0 1 |
| 16.12.2019 | 70 | 1 | 0 0 0 0 1 1 0 0 |
| 17.12.2019 | 71 | 2 | 0 0 1 1 0 0 0 0 |
| 18.12.2019 | 70 | 13 | 1 2 1 3 4 4 3 2 |
| 19.12.2019 | 70 | 13 | 3 4 4 3 2 2 2 1 |

іоносфери, та представлено інформацію про стан космічної погоди, де $F_{10.7}$ — потік сонячного радіовипромінювання на хвилі довжиною 10.7 см. Індекс $F_{10.7}$ вимірюється в сонячних одиницях потоку: 1 с.о.п. = 10^{-22} Вт/(м²Гц), A_p — планетарний індекс середньодобового рівня геомагнітної активності, який обчислюється як середнє значення з восьми добових значень K_p -індексу, перетвореного в лінійну шкалу (в нанотеслах), K_p — значення планетарного індексу магнітного поля Землі у тригодинному часовому інтервалі.

З табл. 2 видно, що періоди, які розглядалися, характеризувалися низькою сонячною активністю (значення індексу $F_{10.7}$ варіювали у межах від 66 до 82 одиниць) і спокійними геомагнітними умовами (за винятком геомагнітних збурень 25 березня 2009 р., 18 та 19 грудня 2019 р.).

ВИХІДНІ ТЕОРЕТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

В цій роботі проведено моделювання параметрів динамічних та теплових процесів у іоносфері:

- вертикальної складової швидкості перенесення частинок за рахунок амбіполярної дифузії;
- щільності потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії;
- щільності повного потоку плазми;
- енергії, що підводиться до електрону за одиницю часу;
- щільності потоку тепла, яке переноситься електронами із плазмосфери до іоносфери;
- швидкості еквівалентного нейтрального (термосферного) вітру та меридіональної складової швидкості нейтрального вітру.

Потоки заряджених частинок в іоносфері. Повний вертикальний потік іоносферної плазми можна обчислити, використовуючи дані про вертикальну складову швидкості переносу плазми та концентрацію електронів. У області F іоносфери, що розглядається, іони кисню переважають. У цьому випадку вираз для швидкості перенесення частинок за рахунок амбіполярної дифузії має вигляд [1]

$$v_d = -D_a \sin^2 I \left[\frac{1}{H_p} + \frac{1}{N_e} \frac{\partial N_e}{\partial h} + \frac{1}{T_p} \frac{\partial T_p}{\partial h} \right],$$

де

$$D_a = \frac{kT_p}{m_i v_{in}}$$

— коефіцієнт амбіполярної дифузії, m_i — маса іона кисню, v_{in} — сумарна частота зіткнень іонів з нейтральними частинками, I — нахилення геомагнітного поля, k — стала Больцмана,

$$H_p = \frac{kT_p}{m_i g}$$

— плазмова зведена висота, g — прискорення вільного падіння, N_e — концентрація електронів, $T_p = T_e + T_i$ — плазмова температура, T_e — температура електронів, T_i — температура іонів. Вираз для T_p зумовлений необхідністю показати збільшення H_p удвічі при описі амбіполярної дифузії [1].

Щільність повного потоку плазми за рахунок вітрового захоплення, електромагнітного дрейфу та дифузії у вертикальному напрямку обчислюється за формулою

$$\Pi_p = v_z N_e,$$

де v_z — вертикальна складову швидкості переносу заряджених частинок. Аналогічно обчислюється щільність потоку заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії, тобто $\Pi_d = v_d N_e$.

Підведення енергії до електронного газу. Джерелом теплової енергії заряджених частинок є фотони сонячного іонізаційного випромінювання. Характер нагрівання теплових електронів фотоелектронами істотно різний для нижньої ($h \leq 250$ км) і верхньої ($h > 250$ км) іоносфер. У областях D і E іоносфери фотоелектрони термалізуються у місці свого утворення через відносно малу довжину вільного пробігу. Таке нагрівання електронного газу називається локальним. У верхній частині іоносфери частота зіткнень електронів з нейтралами стає меншою, ніж з іонами, а основними механізмами охолодження електронного газу є втрата тепла при зіткненнях електронів з іонами, збудження тонкої структури атомів кисню та теплопровідність електронного газу. У цьому випадку не можна нехтувати перенесенням фотоелектронів, а пов'язаний з цим перенесенням нагрів електронного газу називається нелокальним.

Розглянемо діапазон висот 260...320 км. На висотах $h \leq 350$ км теплопровідністю електронного газу можна знехтувати і рівняння балансу енергії електронів у стаціонарному випадку у системі СІ має вигляд [10, 11, 14]

$$Q = L_{ei} + L_e,$$

$$L_{ei} = 8 \cdot 10^{-32} N_e^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2},$$

$$L_e = 6.4 \cdot 10^{-37} N_e N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1},$$

де Q — енергія, що передається тепловим електронам при кулонівських зіткненнях з фотоелектронами, L_{ei} — енергія, що втрачається при електрон-іонних зіткненнях, L_e — енергія, що витрачається на збудження тонкої структури атомів кисню, N_e — концентрація електронів у іоносфері, $N(O)$ — концентрація атомів кисню. Температура нейтралів T_n та концентрація $N(O)$ розраховуються за моделлю NRLMSISE-00 [22]. Тут і далі всі величини наводяться в системі одиниць СІ, зокрема концентрацію частинок приведено у m^{-3} , а температуру — у кельвінах.

Потік тепла, що переноситься електронами.

У тепловому балансі електронного газу важливу роль відіграє потік тепла з плазмосфери до іоносфери. Накопичення тепла у плазмосфері відбувається внаслідок розігріву теплових електронів, що переносяться з місця свого утворення в зовнішню іоносферу. Частина електронів втрачає свою енергію в кулонівських зіткненнях з тепловими електронами та іонами. Інша частина електронів потрапляє у магнітну силову трубку та згодом термалізується в ній внаслідок зіткнень з тепловими електронами та іонами під час багаторазових прольотів між магнітними дзеркалами на кінцях трубки.

Таким чином, у плазмосфері має місце накопичення тепла, яке потім повертається до іоносфери завдяки високій теплопровідності електронного газу.

Тепловий потік можна визначити з кінетичного рівняння з урахуванням перенесення надтеплових електронів. Далі розглядається вертикальна складова потоку тепла, що надходить з плазмосфери [2]:

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial h},$$

де $\kappa_e = 2.08 \cdot k^2 N_e T_e / (m v_{ei})$ — коефіцієнт теплопровідності електронного газу, m — маса електрона, v_{ei} — частота зіткнень електронів з іонами.

Швидкість еквівалентного нейтрального (термосферного) вітру та меридіональна складова швидкості нейтрального вітру. У нашому випадку еквівалентний нейтральний вітер являє собою перенесення плазми у вертикальному напрямку вздовж магнітних силових ліній, який не враховує перенесення заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії, але враховує перенесення плазми за рахунок електромагнітного дрейфу. Під швидкістю еквівалентного нейтрального вітру слід розуміти вертикальну складову швидкості плазми за рахунок вітрового захоплення іонів та електромагнітного дрейфу плазми.

Величину швидкості еквівалентного нейтрального вітру можна розрахувати, зробивши певні спрощення. Враховуючи незначний вплив середньоширотних електричних полів магнітосферного походження на варіації параметрів іоносферної плазми ($E_{x,y} \rightarrow 0$) у спокійних геологічних умовах та нехтуючи ефектами схилення ($D \rightarrow 0$), швидкість для еквівалентного нейтрального вітру можна подати у вигляді

$$w \approx v_z - v_d.$$

Величину меридіональної складової швидкості нейтрального вітру можна розрахувати, використовуючи вираз [4]

$$v_{nx} \approx w / (\sin I \cos I).$$

Видно, що величини швидкості еквівалентного нейтрального вітру w та меридіональної складової швидкості нейтрального вітру v_{nx} відрізняються лише постійним (при $I = \text{const}$) множником.

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ ТА ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ГЕОКОСМОСІ

Представлено результати теоретичного моделювання варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у геокосмічній плазмі з використанням експериментальних даних (концентрація електронів у іоносфері N_e , температура електронів T_e , температура іонів T_i , швидкість

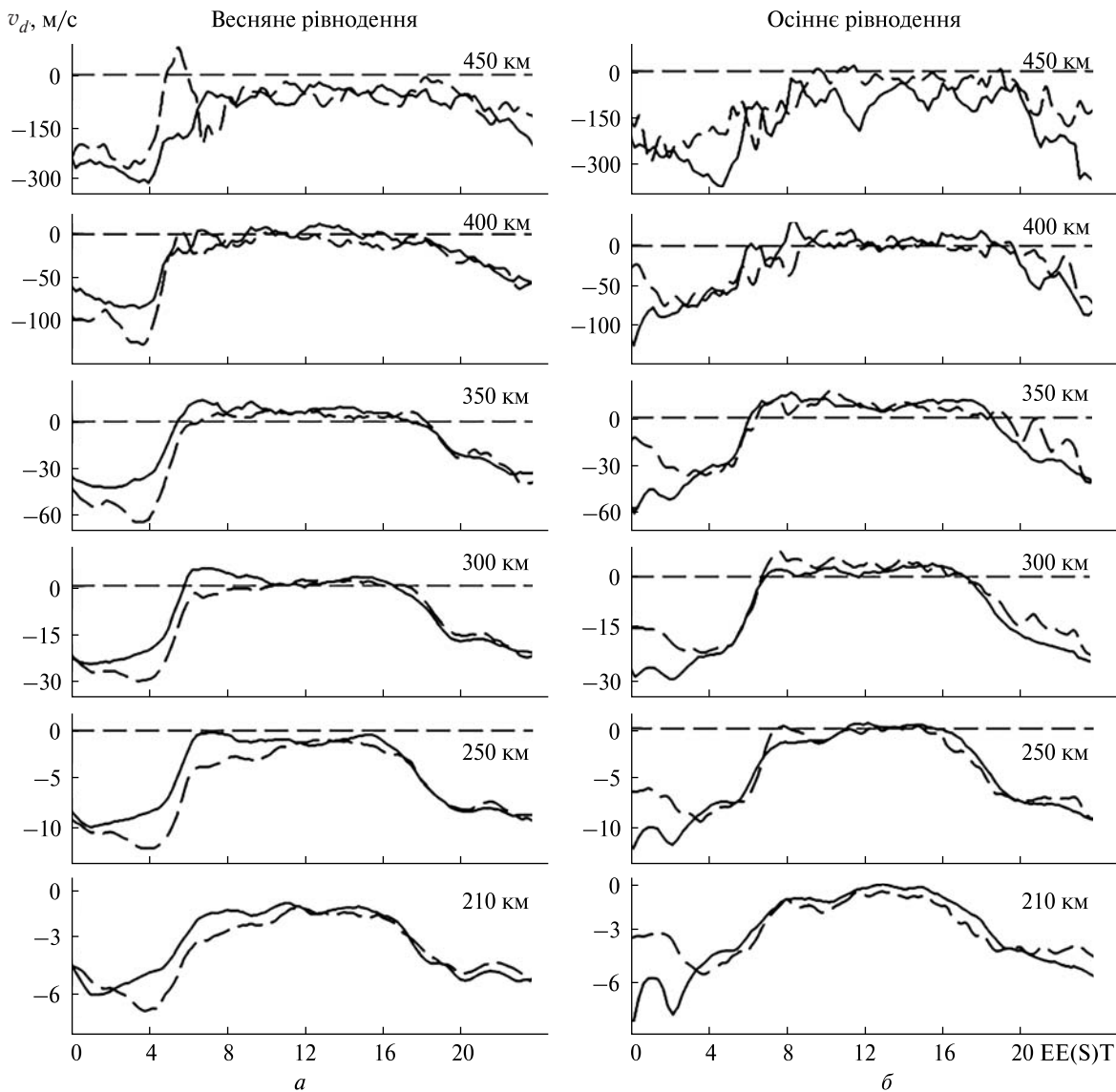
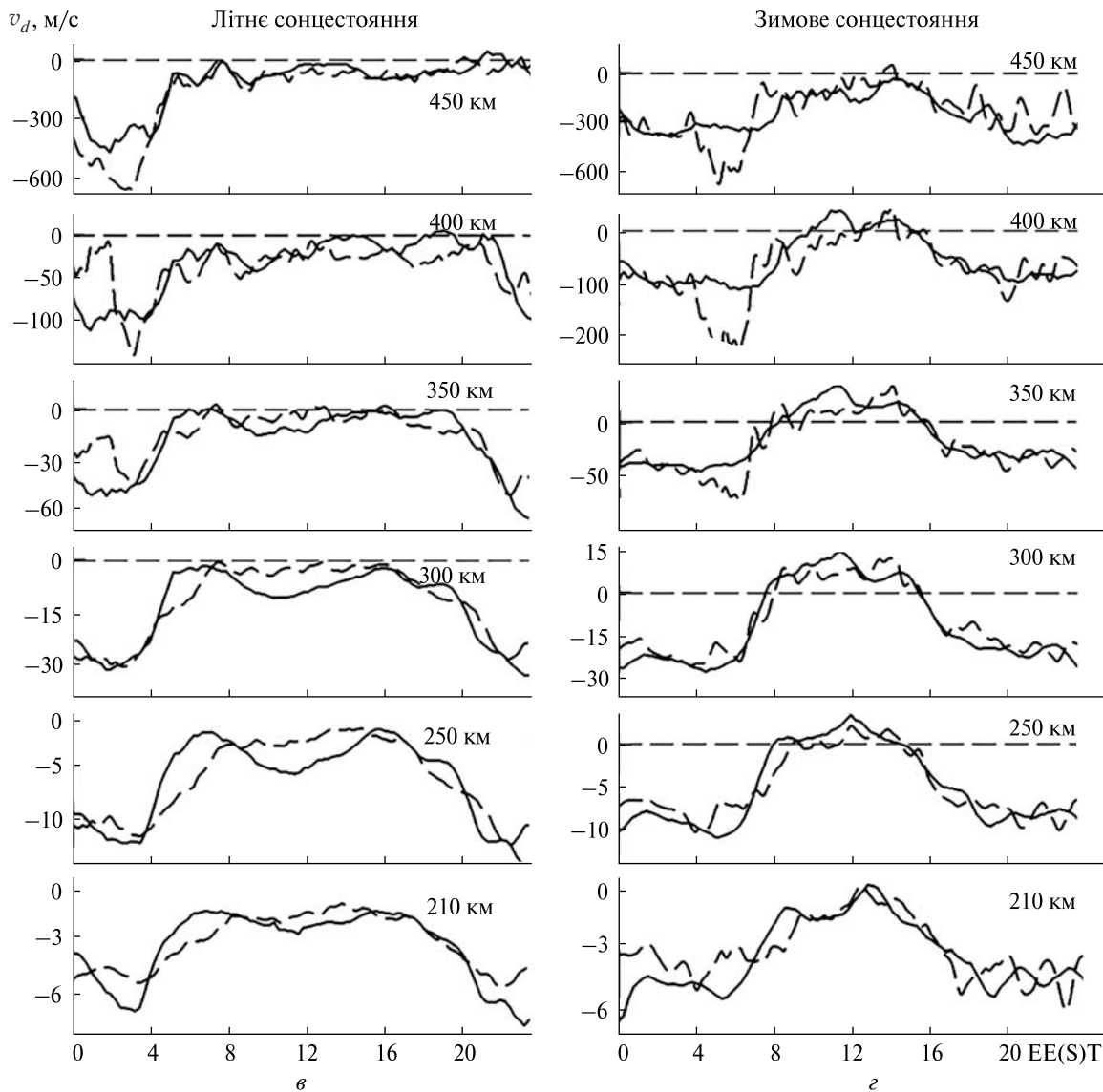


Рис. 1. Добові варіації вертикальної складової швидкості v_d переносу плазми за рахунок амбіполярної дифузії для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2009 р. (штрихова лінія) та 2019 р. (суцільна лінія)

руху плазми v_z), отриманих на харківському радарі НР на фазі 24-го циклу сонячної активності у спокійних умовах. Для розрахунків параметрів нейтральної атмосфери використовувалася емпірична модель NRLMSISE-00.

Розглянемо просторово-часові залежності параметрів фізичних процесів у іоносфері протягом характерних геофізичних періодів — рівнодень та сонцестоянь у 2009 та 2019 рр.

1. Вертикальна складова швидкості переносу плазми за рахунок амбіполярної дифузії. Весняне та осіннє рівнодення. Добові варіації швидкості v_d у періоди весняного та осіннього рівнодень є подібними між собою (рис. 1, а, б). У денні години значення v_d близькі до нуля в діапазоні висот 210...400 км. На висоті 210 км як навесні, так і для періоду осіннього рівнодення в денні години $v_d \approx -2$ м/с. У нічні години спостерігається



перенесення плазми вниз ($v_d < 0$). На висотах 210...250 км швидкість v_d вночі не перевищувала значень -15 м/с. На висоті 300 км $v_d \approx -30$ м/с навесні та восени. На висоті 350 км $v_d \approx -60$ м/с для періодів весняного та осіннього рівнодень. Значення v_d зі збільшенням висоти збільшувалися. Ця тенденція зберігалася як для весняного, так і для осіннього рівнодення. Слід також зазначити, що добові варіації v_d навесні 2009 р. мали деякі особливості. На висоті 450 км у ранкові години v_d змінила знак (напрямок), і перенесення плазми здійснювалося вгору на більші

висоти. Таку поведінку швидкості v_d можна, скоріше за все, пояснити збуреними геліогеофізичними умовами 25 березня 2009 р. Як видно з табл. 2, для цього періоду мала місце помірна магнітна буря ($K_{pmax} = 4$).

Зимове та літнє сонцестояння. Добові варіації вертикальної складової швидкості переносу плазми v_d у періоди літнього та зимового сонцестоянь наведено на рис. 1, в, г. Як видно з рис. 1, в, форми добових варіацій v_d у 2009 та 2019 рр. подібні між собою. У денні та нічні години в усьому розглянутому діапазоні висот спостерігалось пе-

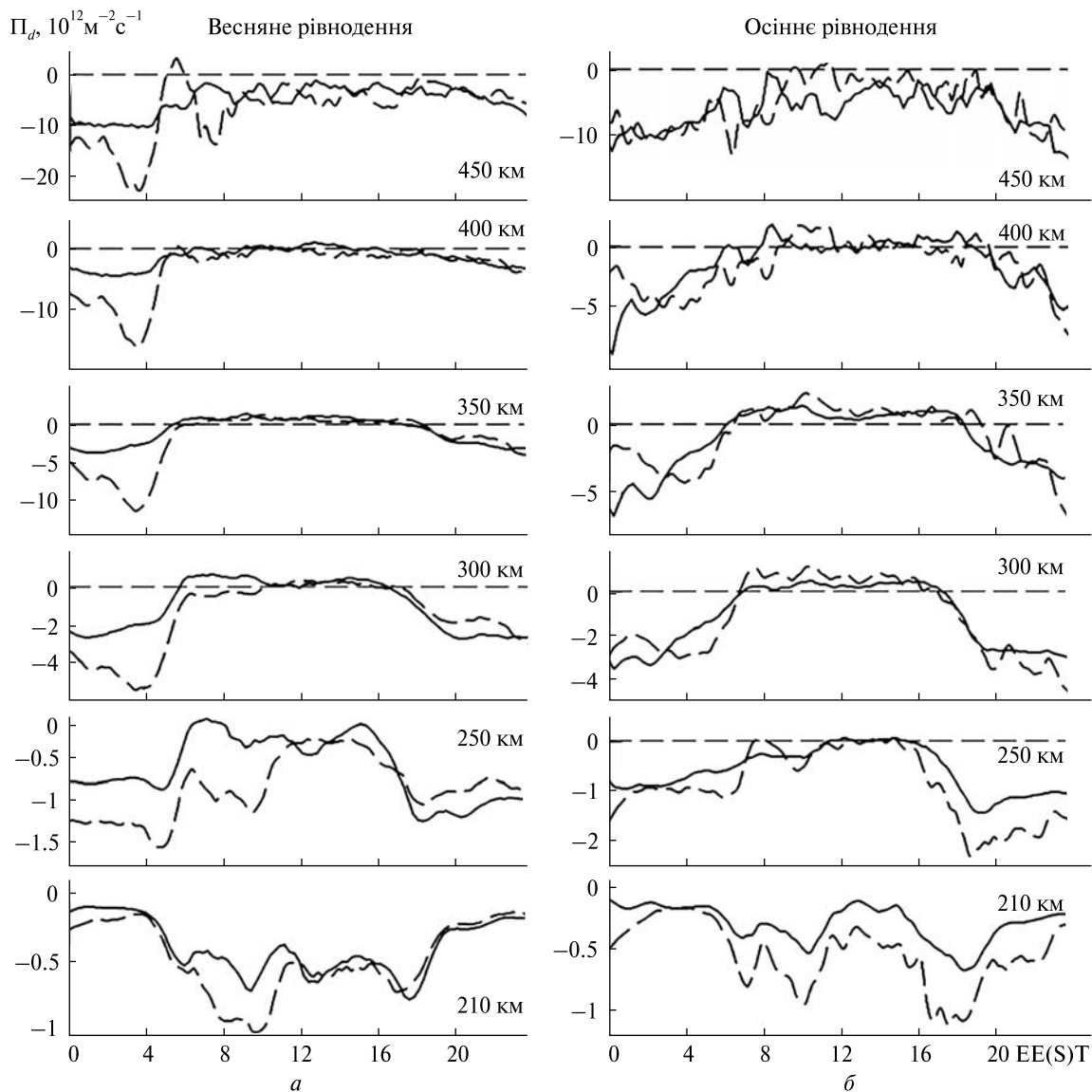
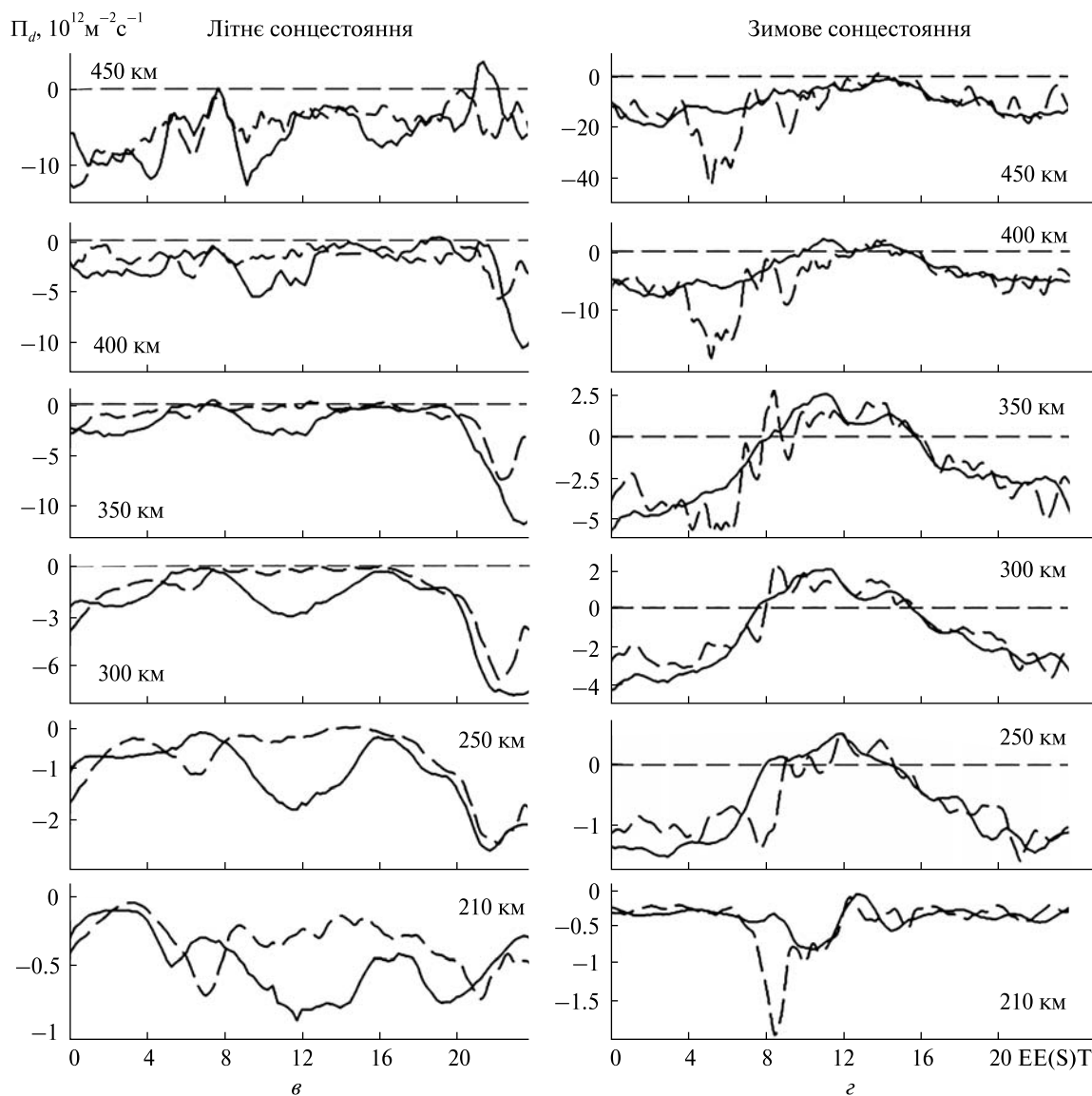


Рис. 2. Добові варіації щільності потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії P_d для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2009 р. (штрихова лінія) та 2019 р. (суцільна лінія)

ренесення плазми донизу. Зі збільшенням висоти значення швидкості v_d збільшувалися. Опівдні на висотах 210...250 км для обох розглянутих років значення v_d варіювали від 0 до -6 м/с, а у нічні години не перевищували -15 м/с. На висотах 300...350 км денні значення v_d змінювалися від 0 до -15 м/с, у нічні години — від -20 до -60 м/с. Форма висотного профілю швидкості v_d для зимового сонцестояння (рис. 1, г) є типовою для цих умов, але на висотах 250...400 км

близько опівдня спостерігалася зміна знаку, що свідчить про зміну напрямку перенесення заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії. Така поведінка може бути пов'язана зі зміною геліогеофізичних умов та наявністю хвильових збурень в іоносфері.

2. Щільність потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії. Весняне та осіннє рівнодення. На рис. 2, а, б представлено добові варіації щільності потоку заряджених частинок за рахунок



амбіполярної дифузії у періоди рівнодень у 2009 та 2019 рр. на фіксованих висотах. Як і для v_d , у період весняного рівнодення дифузійний потік плазми Π_d на малих висотах практично відсутній. Зі збільшенням висоти значення Π_d збільшуються та з'являються особливості добових варіацій. Як для весняного періоду, так і восени у денні години потоку плазми практично немає. Але 25 березня 2009 р., як описано раніше, мала місце помірна магнітна буря, ефекти якої проявилися у варіаціях Π_d в діапазоні висот 250...450 км. У нічні години для періодів рівнодень спостерігав-

ся низхідний потік плазми, починаючи з висоти 250 км. Значення Π_d на висоті 250 км не перевищували $-2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а на висоті 350 км значення Π_d не перевищували $-10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ навесні та $-8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ у період осіннього рівнодення.

Зимове та літнє сонцестояння. У період літнього сонцестояння добові варіації Π_d мали складний характер (рис. 2, в). У денні години на висотах 250, 300 та 350 км значення Π_d не перевищували $-3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для 2019 р. значення щільності потоку плазми за рахунок амбіполярної дифузії Π_d дорівнювали приблизно $-2 \cdot 10^{12}$,

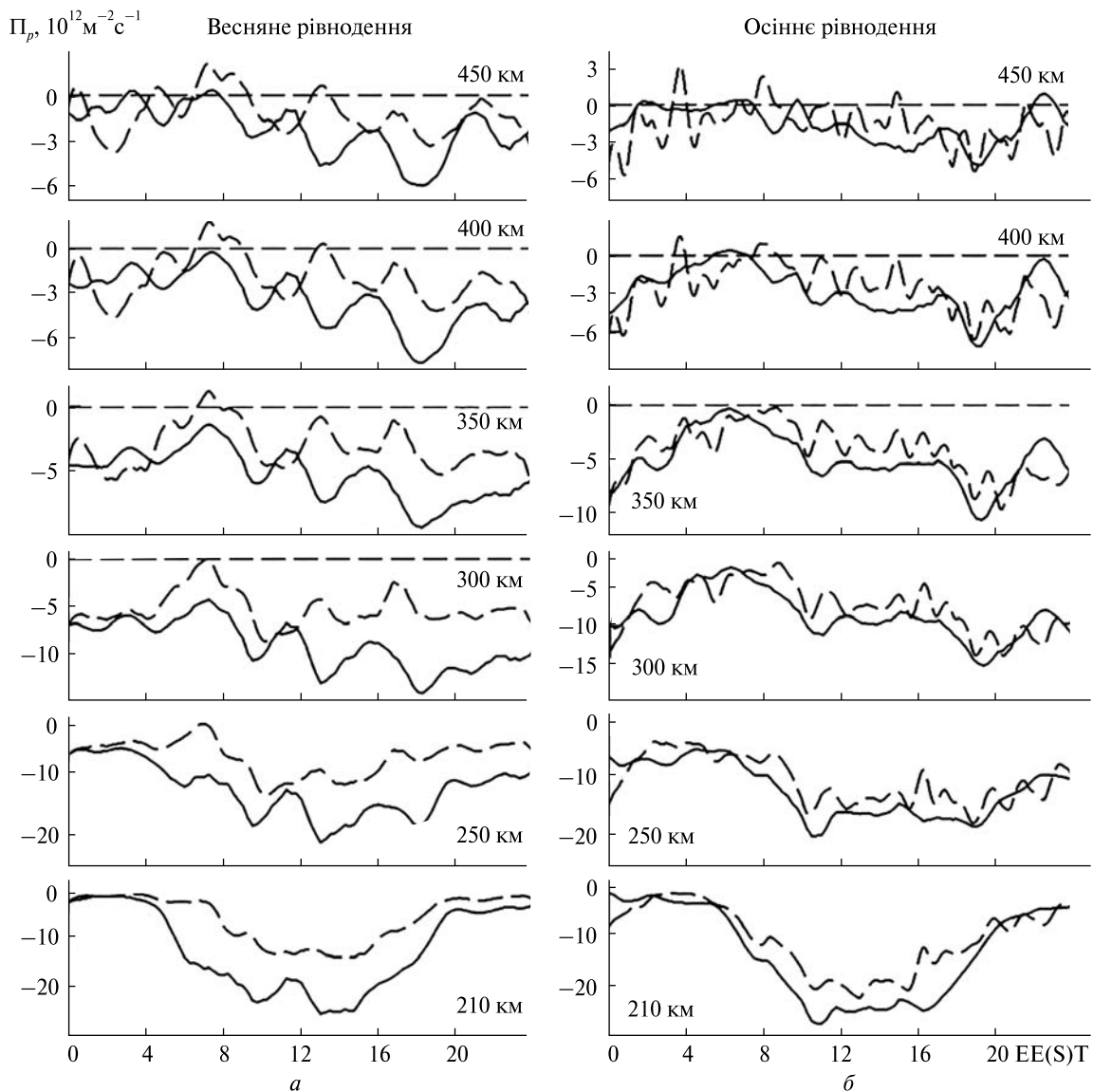
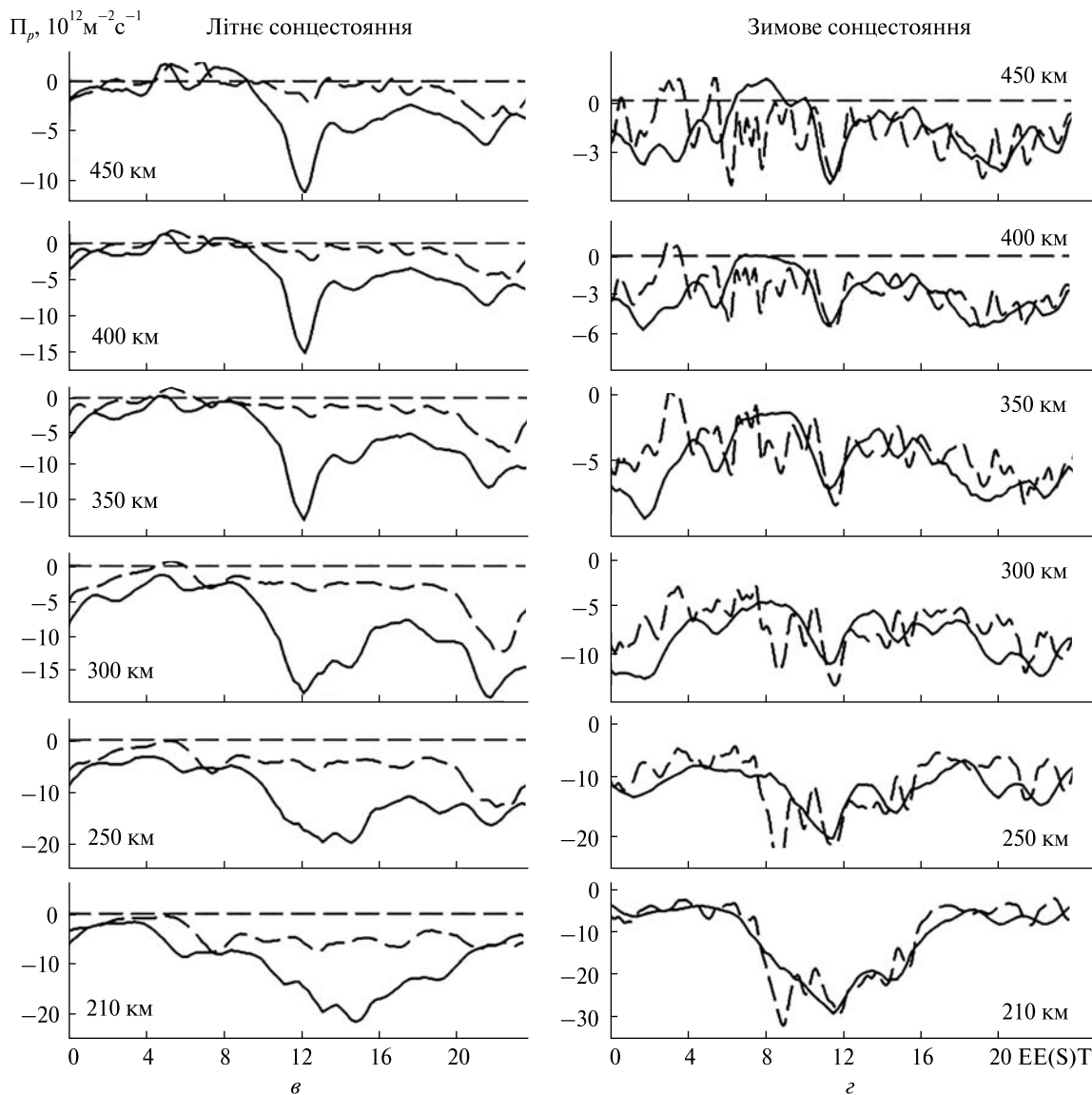


Рис. 3. Добові варіації щільності повного потоку плазми в іоносфері P_p для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2009 р. (штрихова лінія) та 2019 р. (суцільна лінія)

$-3 \cdot 10^{12}$ та $-4 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ відповідно на висотах 250, 300 і 350 км. Взимку в діапазоні висот 250...400 км у денні години спостерігався висхідний потік плазми (рис. 2, г). Значення щільності потоку плазми не перевищували $2.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. У нічні години варіації P_d взимку якісно подібні варіаціям у періоди рівнодень та літнього сонцестояння.

3. Щільність повного потоку плазми. Весняне та осіннє рівнодення. На рис. 3, а, б представлено

добові варіації щільності повного потоку плазми в іоносфері P_p у періоди весняного та осіннього рівнодень у 2009 та 2019 рр. на фіксованих висотах. Як видно з рис. 3, а, на висотах 210...350 км у денні години спостерігався низхідний потік плазми. Максимальні значення P_p спостерігалися на висотах 210 та 250 км, вони становили $-25 \cdot 10^{12}$ та $-20 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$ відповідно. Вночі на цих висотах значення P_p не перевищували $-10^{13} \text{ м}^{-2}\text{с}^{-1}$. На висотах 350...450 км значення



P_p були меншими. У денні години середні значення $P_p \approx -6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, в нічних умовах значення P_p не перевищували $-5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Добові варіації P_p у 2009 р. відрізнялися від варіацій 2019 р. (рис. 3, а), що можна пояснити збуреними умовами (індекс K_p змінювався від 2 до 4). Для осіннього рівнодення (рис. 3, б) варіації P_p подібні весняним як за якісними, так і за кількісними характеристиками. Добові варіації P_p у 2009 та 2019 рр. кількісно та якісно схожі на всіх розглянутих висотах. Максимальні значення P_p спостерігалися в денні години на висоті 210 км

та становили $-25 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Вночі на всіх розглянутих висотах значення P_p не перевищували $-10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Зимове та літнє сонцестояння. Добові варіації щільності повного потоку плазми для літнього та зимового сонцестоянь наведено на рис. 3, в, г. Влітку 2019 р. денні значення P_p в усьому висотному діапазоні, що розглядається, не перевищували $-20 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (для 2009 р. ці значення були суттєво меншими). У нічні години значення P_p становили $-5 \cdot 10^{12}$, -10^{13} , $-15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на висотах 210, 250 та 300 км відповідно. Для зи-

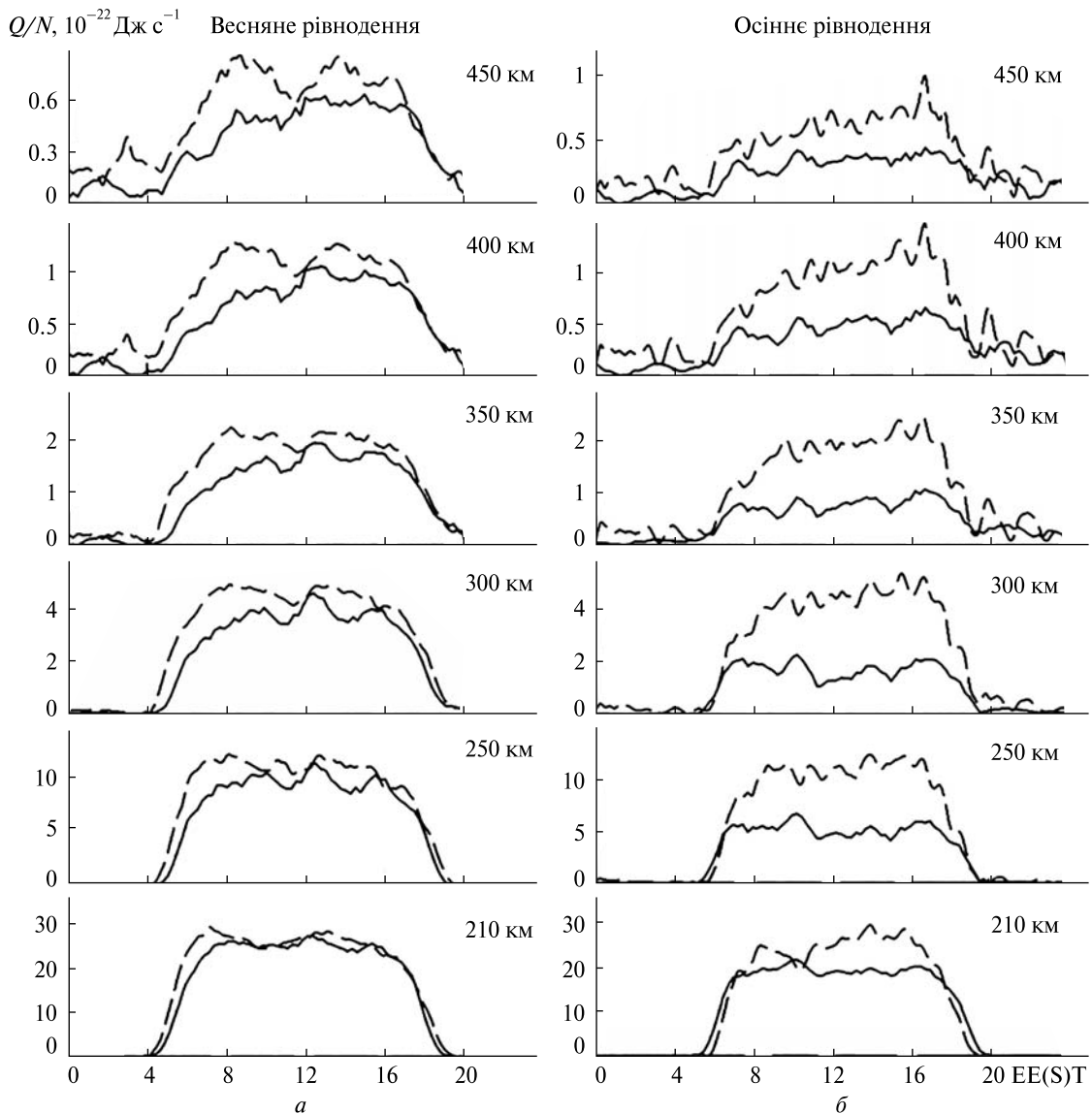
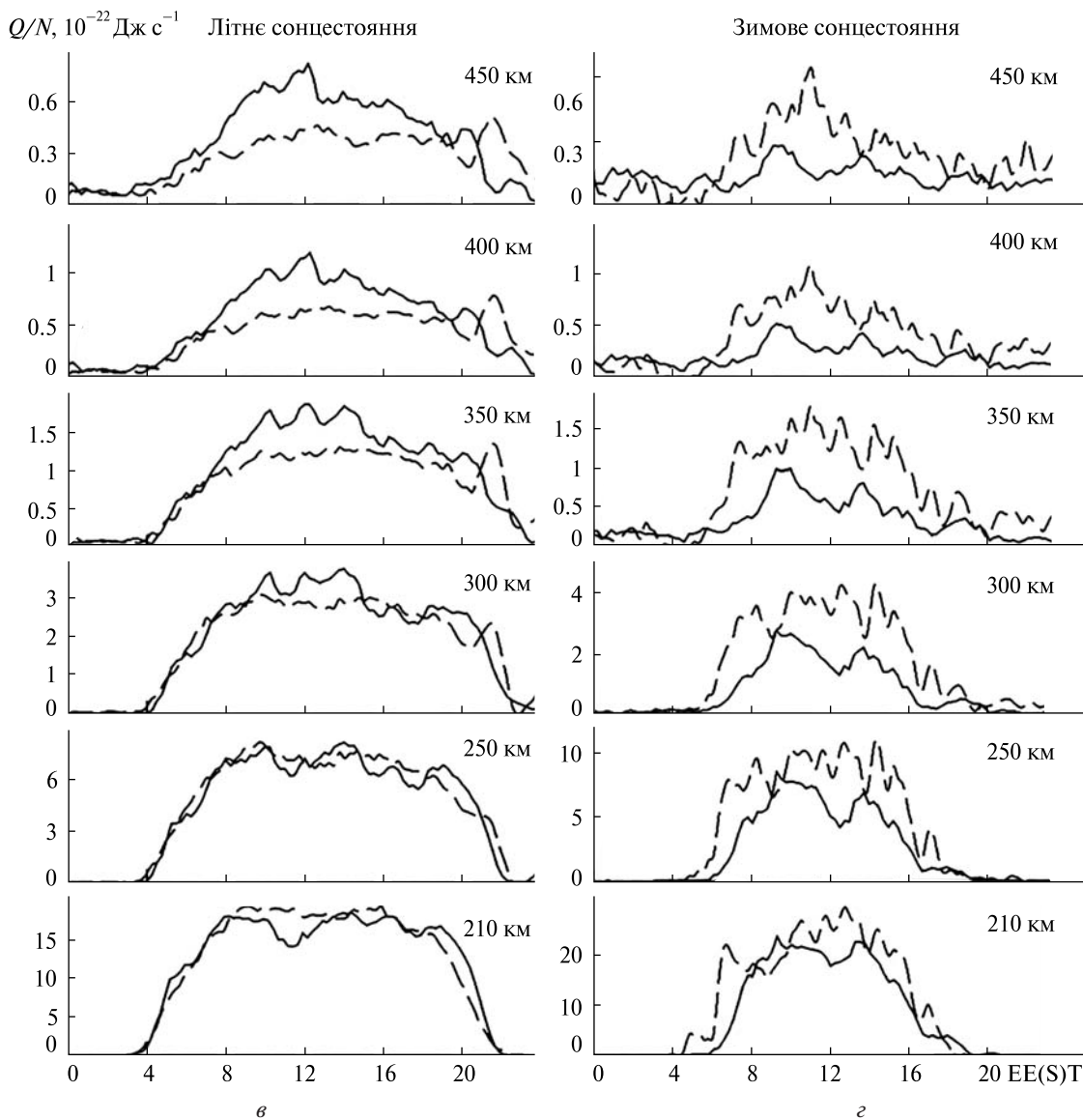


Рис. 4. Добові варіації величини енергії Q/N , яка підводиться до електрона за одиницю часу, для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2009 р. (штрихова лінія) та 2019 р. (суцільна лінія)

мового сонцестояння (рис. 3, г) на висотах 210 та 250 км добові варіації Π_p мають схожу форму часових залежностей. На висотах 350...450 км денні значення за величиною порівнянні з нічними. Максимальні значення Π_p спостерігалися у ранкові та денні години (08:00–12:00 EEST) та становили майже $-30 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на висоті 210 км та $-25 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на висоті 250 км. У нічні години $\Pi_p \approx -5 \cdot 10^{12}$ та $-10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на висотах 210 та 250 км відповідно. У висотному діапазоні

300...450 км значення Π_p стали суттєво меншими. Так, вдень на висоті 300 км $\Pi_p \approx -10^{13} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а на висоті 350 км значення Π_p зменшилися до $-7 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Вночі на розглянутих висотах щільність повного потоку плазми Π_p не перевищувала значень $-12 \cdot 10^{12}$ та $-8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ відповідно.

4. Величина енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу. Основною характеристикою добових варіацій Q/N (де $N = N_e$) є те, що у нічні



години підводу енергії до електронів не відбувається, а значення Q/N у цей час близькі до нуля в усьому розглянутому діапазоні висот. Зростання величини Q/N починається з моменту сходу Сонця, а зниження до фонових нічних значень — після заходу. Максимальні денні значення Q/N мають місце в діапазоні висот 210...250 км, далі зі збільшенням висоти величина Q/N зменшується.

Весняне та осіннє рівнодення. На рис. 4, а, б представлено добові варіації величини енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу, для періодів весняного та осіннього рівнодень у 2009

та 2019 рр. Для періодів весняного рівнодення у 2009 та 2019 рр. добові варіації Q/N подібні між собою. Максимальні значення Q/N спостерігалися на висоті 210 км та дорівнювали приблизно $30 \cdot 10^{-22}$ Дж·с⁻¹ в ранкові години та близько опівдня. На висоті 350 км у денні години максимальні значення $Q/N \approx 2.2 \cdot 10^{-22}$ Дж·с⁻¹. Для періоду осіннього рівнодення (рис. 4, б) маємо подібні значення, однак є відмінність. Значення Q/N для 2009 р. в діапазоні висот 250...450 км удвічі більші, ніж у 2019 р. Однією з причин такої поведінки Q/N є збурений стан іоносфери.

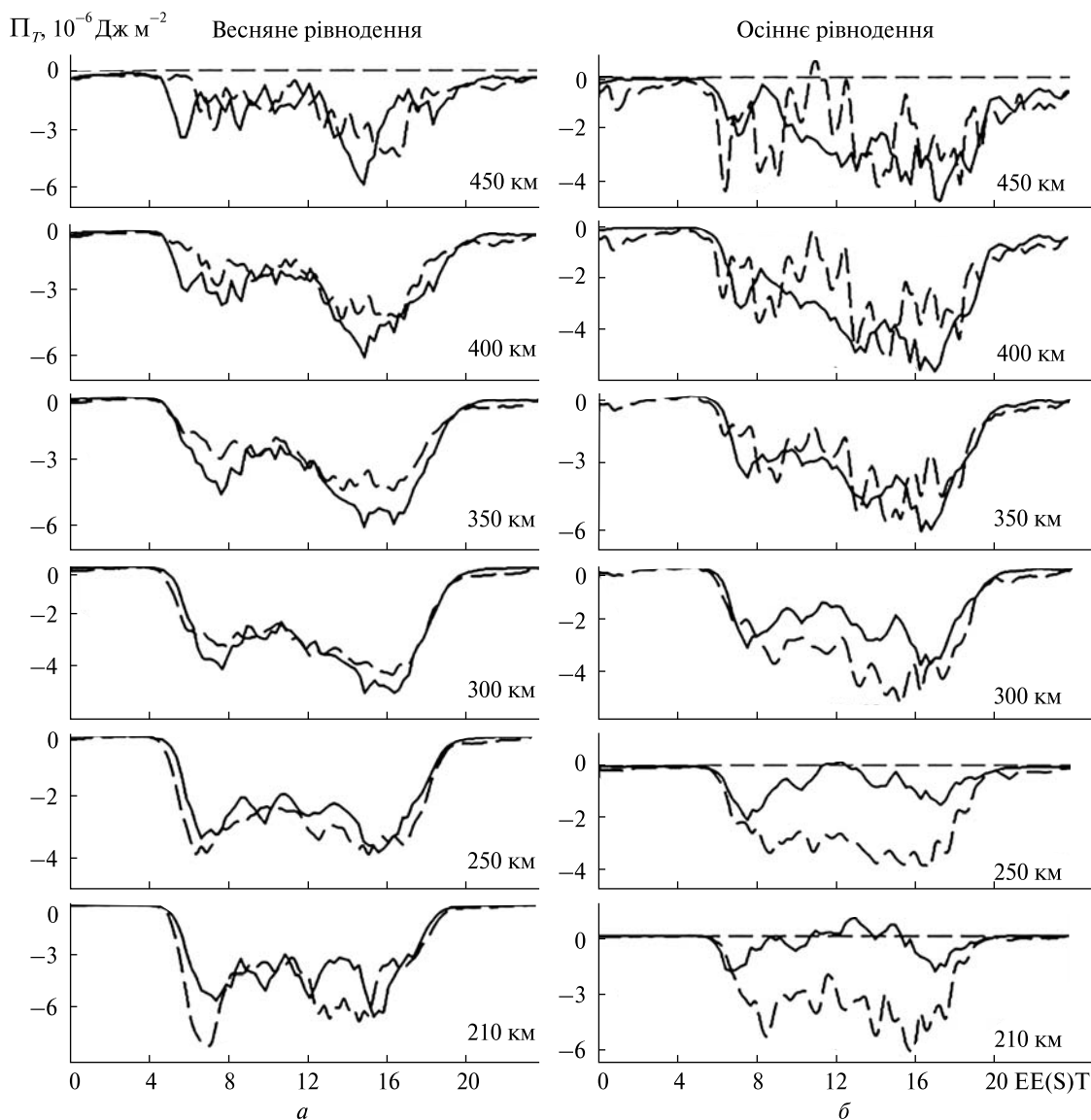
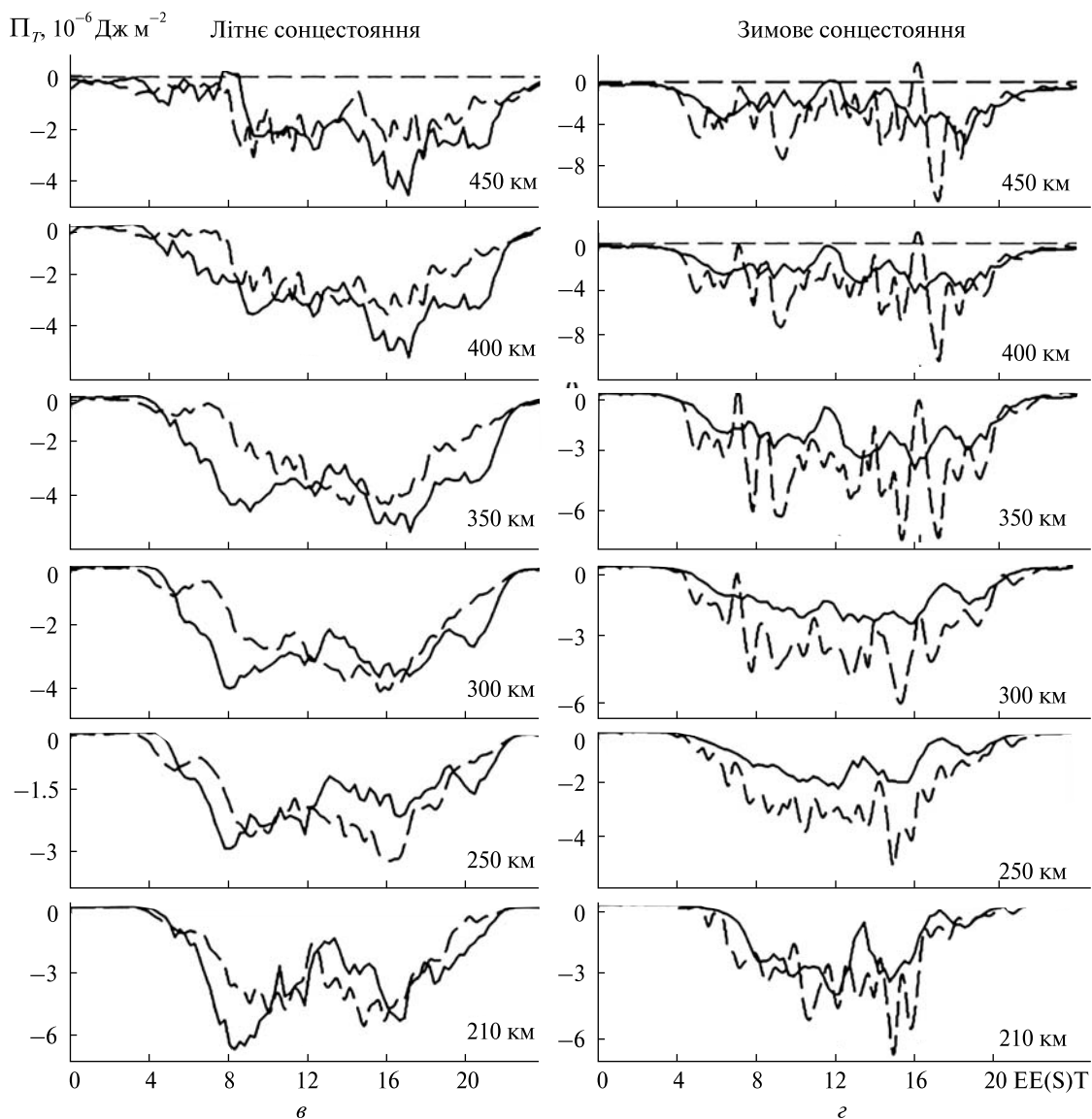


Рис. 5. Добові варіації шільності потоку тепла P_T , яке переноситься електронами в іоносферу із плазмосфери, для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2009 р. (штрихова лінія) та 2019 р. (суцільна лінія)

Зимове та літнє сонцестояння. Добові варіації величини енергії, що підводиться до електрона за одиницю часу, для літнього та зимового сонцестоянь наведено на рис. 4, в, г. Як видно з рис. 4, в, значення Q/N влітку трохи менші у порівнянні з величинами Q/N у період весняного рівнодення в діапазоні висот 210...350 км. Для періоду літнього сонцестояння варіації Q/N на висотах 210...300 км у 2009 та 2019 рр. мали при-

близно схожі значення. Денні значення Q/N на висоті 210 км сягали $20 \cdot 10^{-22}$ Дж·с⁻¹, а на висоті 250 км — $9 \cdot 10^{-22}$ Дж·с⁻¹. Зі збільшенням висоти значення Q/N зменшилося практично до нуля. У діапазоні висот 350...450 км максимальні значення Q/N варіювали від $2 \cdot 10^{-22}$ Дж·с⁻¹ до $0.9 \cdot 10^{-22}$ Дж·с⁻¹. Для періоду зимового сонцестояння (рис. 4, г) спостерігався менш тривалий період збільшення Q/N у порівнянні з формами



добових варіацій у періоди рівнодень та літнього сонцестояння. Але за максимальними значеннями Q/N взимку не поступалася літнім та у періоди рівнодень. Денні значення Q/N на висоті 210 км сягали $30 \cdot 10^{-22}$ Дж·с $^{-1}$, а на висоті 250 км — $Q/N \approx 10 \cdot 10^{-22}$ Дж·с $^{-1}$. На висотах 350...450 км максимальні значення Q/N варіювали від $1.5 \cdot 10^{-22}$ до $0.8 \cdot 10^{-22}$ Дж·с $^{-1}$.

5. Щільність потоку тепла. Основними рисами добових варіацій щільності потоку тепла P_T є практична відсутність потоку в нічний час та

максимальні значення (за модулем) у ранкові та вечірні години.

Весняне та осіннє рівнодення. На рис. 5, а, б представлено добові варіації щільності потоку тепла, яке переноситься електронами із плазмосфери в іоносферу, у періоди весняного та осіннього рівнодень у 2009 та 2019 рр. Як видно з рис. 5, а, добові варіації P_T у 2009 та 2019 рр. кількісно та якісно подібні між собою. Основною особливістю добових варіацій навесні є наявність двох максимумів — ранкового (близько

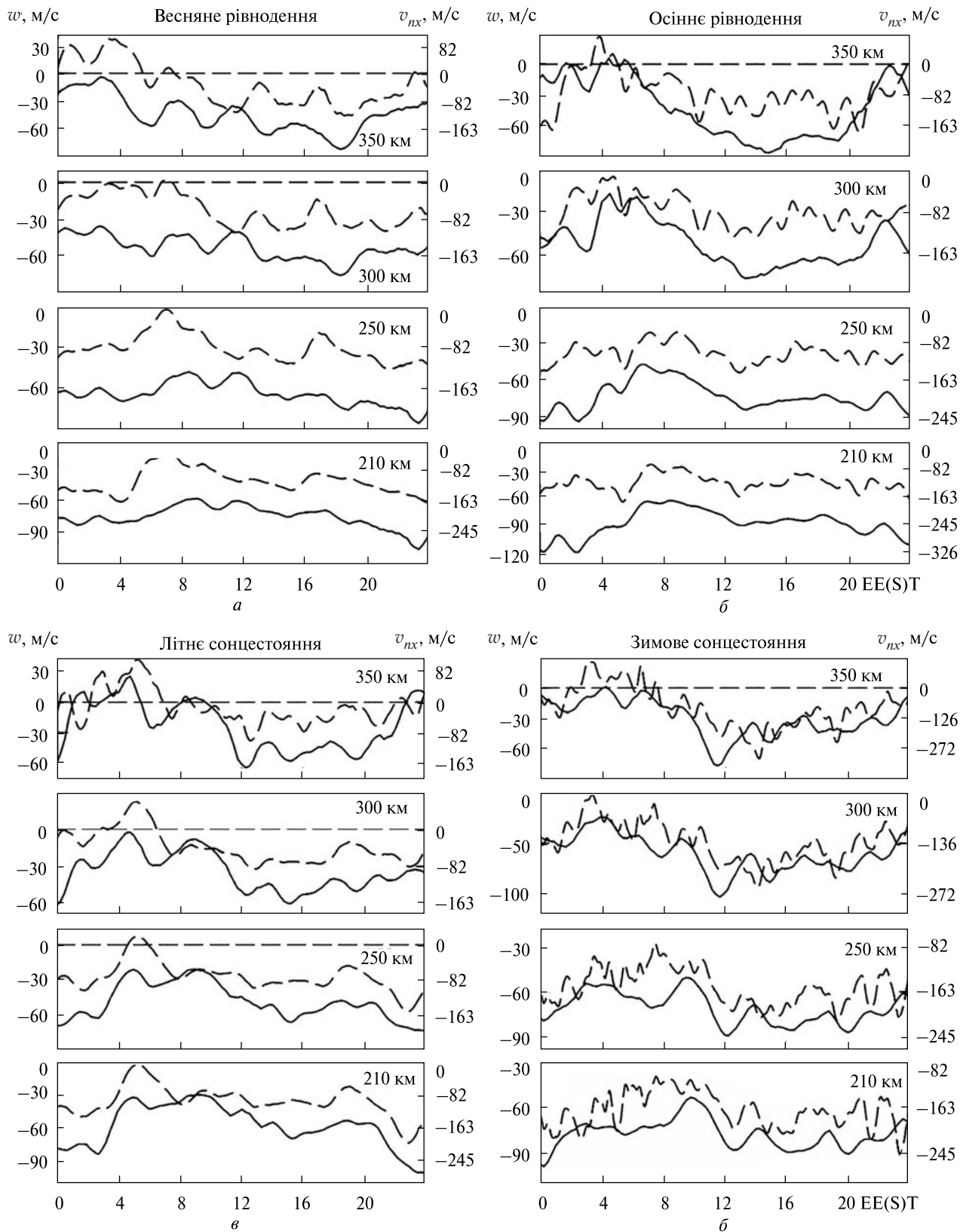


Рис. 6. Добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального вітру w і швидкості меридіональної складової нейтрального вітру v_{nx} для періодів: весняного (а) та осіннього (б) рівнодень; літнього (в) та зимового (г) сонцестоянь у 2009 р. (штрихова лінія) та 2019 р. (суцільна лінія)

08:00 EEST) та вечірнього (близько 16:00 EEST). Локалізація цих максимумів може змінюватися в залежності від висоти та сезону, а амплітуда залежить від стану космічної погоди. На поведінку P_T восени 2009 р. (рис. 5, б) також впливає стан космічної погоди. У добових варіаціях P_T помітні ефекти помірних магнітних бур. Основний ефект збурених умов — це збільшення величини P_T та посилення низхідного потоку тепла в іоносферу Землі. Така поведінка P_T цілком пов'язана з варіаціями параметрів космічної погоди та станом геомагнітної активності (див. табл. 2). Як і для Q/N , величина щільності потоку тепла залежить від рівня сонячної активності та стану космічної погоди. Як видно з рисунків, навіть невелике збурення може призвести до значних кількісних та якісних змін у добових варіаціях P_T .

Зимове та літнє сонцестояння. На рис. 5, в, г представлено добові варіації щільності потоку тепла P_T у періоди літнього та зимового сонцестоянь у 2009 та 2019 рр. на фіксованих висотах. Форма добових залежностей у періоди літнього сонцестояння (рис. 5, в) подібна формам часових залежностей, які отримано у періоди весняного та осіннього рівнодень. У період зимового сонцестояння добові варіації P_T мали складний характер (рис. 5, г). Як видно, в нічні години в усьому висотному діапазоні спостерігалися досить малі значення P_T у порівнянні з денними. У денні та вечірні години в діапазоні висот 300...450 км спостерігалися максимальні значення щільності потоку тепла, яке переноситься електронами з плазмосфери в іоносферу.

6. Швидкість еквівалентного нейтрального (термосферного) вітру. *Весняне та осіннє рівнодення.* Добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального вітру w і швидкості меридіональної складової нейтрального вітру v_{nx} у періоди весняного та осіннього рівнодень у 2009 та 2019 рр. представлено на рис. 6, а, б. Як видно з рисунків, форми добових варіацій w навесні та восени якісно подібні. Протягом всієї доби спостерігався спрямований до полюса вітер ($v_{nx} < 0$). Навесні 2009 р. під час геомагнітного збурення ($A_p = 10$, $K_{pmax} = 4$) спостерігалася зміна напрямку вітру до екватора, а величина w у цей період відрізнялася від значень швидкості еквівалентного нейтраль-

ного вітру навесні 2019 р. Максимальні значення w у період весняного рівнодення дорівнювали приблизно -90 м/с на висотах 210...250 км у нічні години. На висоті 350 км значення w протягом доби варіювали від -85 до 30 м/с. У період осіннього рівнодення (рис. 6, б) протягом доби також спостерігався нейтральний вітер, спрямований до полюса. Максимальні значення w реєструвалися вночі на висоті 210 км та становили майже -120 м/с. Зі збільшенням висоти величина швидкості нейтрального вітру зменшувалася та сягала -75 м/с вдень на висоті 300 км.

Зимове та літнє сонцестояння. На рис. 6, в, г наведено добові варіації швидкості еквівалентного нейтрального вітру w і швидкості меридіональної складової нейтрального вітру v_{nx} у періоди літнього та зимового сонцестоянь у 2009 та 2019 рр. У період літнього сонцестояння (рис. 6, в), як і для періодів рівнодень, протягом доби спостерігався нейтральний вітер, спрямований до полюса. Але в діапазоні висот 300...350 км у ранкові години та частково вночі спостерігалася зміна знаку w . Максимальні значення швидкості нейтрального вітру на висоті 210 км сягали -100 м/с вночі та -60 м/с вдень. Зі збільшенням висоти нічні значення w зменшуються приблизно до 30...60 м/с (за модулем). У період зимового сонцестояння (рис. 6, г) протягом доби також спостерігався нейтральний вітер, спрямований до полюса. У діапазоні висот 210...250 км протягом доби швидкість w в середньому сягала приблизно -75 м/с. Також у варіаціях w мав місце квазіхвильовий процес з періодом близько 2 год. Ці хвильові збурення спостерігаються у варіаціях w для обох розглянутих років. На висоті 350 км у ранкові години значення швидкості w змінюють знак, що свідчить про зміну напрямку вітру.

ВИСНОВКИ

Виконано напівемпіричне моделювання просторово-часових варіацій параметрів динамічних та теплових процесів у іоносфері для періодів сонцестоянь та рівнодень у 2009 та 2019 рр. на фазах мінімуму 24-го циклу сонячної активності. Моделювання варіацій параметрів провадилося з використанням експериментальних даних харківського радара некогерентного розсіяння та теоретич-

них співвідношень. Для розрахунку параметрів нейтральної атмосфери було використано емпіричну модель атмосфери NRLMSISE-00.

Для типових геофізичних періодів (весняне та осіннє рівнодення, літнє та зимове сонцестояння) побудовано та проаналізовано добові варіації параметрів динамічних та теплових процесів у іоносферній плазмі на висотах від 210 до 450 км. Розраховано значення швидкості перенесення плазми за рахунок амбіполярної дифузії, щільності повного потоку плазми та потоку заряджених частинок за рахунок амбіполярної дифузії, значення енергії, що підводиться до електронного газу, щільності потоку тепла, яке переноситься електронами з плазмосфери до іоносфери, а також швидкості еквівалентного нейтрального вітру та меридіональної складової швидкості нейтрального вітру.

Результати, отримані в цій роботі, добре узгоджуються з результатами, отриманими раніше [3, 17]. Кількісні та якісні характеристики параметрів та їхні добові варіації є типовими для сезонів, що розглядаються. Виявлено, що для більшості досліджуваних періодів слабкі варіації космічної погоди не призводять до істотних змін у просторово-часових варіаціях параметрів

динамічних та теплових процесів у іоносфері. Просторово-часові варіації параметрів динамічних та теплових процесів (зокрема v_d , Π_d , Π_p та Π_T) у періоди спаду сонячної активності в цілому повністю відповідають сучасним уявленням про фізико-хімічні процеси в іоносфері. На протигагу цим параметрам швидкість еквівалентного нейтрального вітру w значно змінювалася (до 2...2.5 разів) під час слабких збурень космічної погоди навіть при незначному посиленні геомагнітної активності. Причинами таких змін можуть бути посилення горизонтальних термосферних вітрів та проникнення зональних магнітосферних електричних полів у середні широти у періоди рівнодень.

В цілому можна зробити висновок, що екстремальні значення параметрів динамічних та теплових процесів суттєво залежать від сезону та стану космічної погоди.

Отримані результати моделювання можуть використовуватися у фундаментальних дослідженнях сонячно-земних зв'язків та геокосмосу, для розв'язання прикладних задач, пов'язаних з можливістю прогнозування стану космічної погоди, а також для подальшого розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ІОН.

ЛІТЕРАТУРА

1. Брюнелли Б. Е., Намгалдзе А. А. *Физика ионосферы*. М.: Наука, 1988. 528 с.
2. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2003. № 9. С. 57–94.
3. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2008. **14**, № 1. С. 44–56. <https://doi.org/10.15407/knit2008.01.044>.
4. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. *Прогнозирование состояния ионосферы*. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 190 с.
5. Искра Д. А., Колодяжний В. В., Ляшенко М. В. *Разработка региональной модели ионосферы CERIM ІОН в рамках создания службы прогноза космической погоды*. Теоретические и прикладные аспекты радиотехники, приборостроения и компьютерных технологий: Матер. IV Междунар. научно-техн. конф. (20–21 июня 2019 г.). Тернополь: ФОП Паляница В. А., 2019. Сб. тез. С. 15–18.
6. Ляшенко М. В., Пуляев В. А., Черногор Л. Ф. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 5/6. С. 58–68. <https://doi.org/10.15407/knit2006.05.058>.
7. Ляшенко М. В., Складаров И. Б., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период спада солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 2/3. С. 45–58. <https://doi.org/10.15407/knit2006.02.045>.
8. Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности. *Космічна наука і технологія*. 2006. **12**, № 4. С. 56–70. <https://doi.org/10.15407/knit2006.04.056>.

9. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь*. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. 407 с.
10. Banks P. M. Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere. *Ann. Geophys.* 1966. **22**. P. 577—584.
11. Banks P. M. The thermal structure of the ionosphere. *Proc. IEEE*. 1969. **57**, № 3. P. 6—30. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.6959>.
12. Buonsanto M. J., Holt J. M. Measurements of gradients in ionospheric parameters with a new nine-position experiment at Millstone Hill. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1995. **57**. P. 705—717.
13. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting. EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 2—7 May 2010). *Geophys. Res. Abstract*. 2010. **12**. EGU2010-316-2.
14. Dalgarno A., Degges T. C. Electron cooling in the upper atmosphere. *Planet. Space Sci.* 1968. **16**. P. 125—132. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(68\)90049-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(68)90049-4).
15. Ding, Z., Wu, J., Xu, Z., et al. The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements. *Earth Planets Space*. 2018. **70**. P. 87. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0859-8>.
16. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. Kharkiv incoherent scatter facility. *Bull. NTU “KhPI”. Ser. Radiophysics and ionosphere*. 2014. № 47 (1089). P. 28—42. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7.
17. Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. Motion of ionospheric plasma: results of observation above Kharkiv in solar cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2018. **58**, № 4. P. 533—547. <https://doi.org/10.1134/S001679321802007X>.
18. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proc. IEEE*. 1969. **57**, № 4. P. 496—530. <https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7005>.
19. Gordon W. E. Incoherent scatter of radio waves by free electrons with applications to space exploration by Radar. *Proc. IRE*. 1958. **46**. P. 1824—1829.
20. Huang C.-S., C. Foster J., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J. A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network. *J. Geophys. Res.* 2005. **110**. A06303. <https://doi.org/10.1029/2004JA010865>.
21. Liu L., Le H., Wan W., Sulzer M. P., Lei J., Zhang M.-L. An analysis of the scale heights in the lower topside ionosphere based on the Arecibo incoherent scatter radar measurements. *J. Geophys. Res.* 2007. **112**. A06307. <https://doi.org/10.1029/2007JA012250>.
22. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. **107**, № A12. P. 1—16. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>.
23. Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models. *J. Geophys. Res.* 2001. **106** (A7). P. 12803—12819. <https://doi.org/10.1029/2000JA000365>.
24. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae*. 2000. **18**. P. 945—956. <https://doi.org/10.1007/s00585-000-0945-6>.
25. Salah J. E., Evans J., Wand R. N. Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill. *Radio Sci.* 1974. **9** (2). P. 231—238. <https://doi.org/10.1029/RS009i002p00231>.
26. Chunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge, Atmospheric and Space Sci. Ser., 2000. 555 p.
27. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophysicae*. 2004. **22**. P. 453—458. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-453-2004>.
28. Zang S., Holt J. M., Zalucha A. M. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987. *J. Geophys. Res.* 2004. **109** (A11). P. 1—9.

REFERENCES

1. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. (1988). *Ionospheric physics*. Moscow: Nauka, 528 p. [in Russian].
2. Grigorenko Y. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. (2003). Radio studies of processes in the ionosphere associated with the strongest September 25, 1998 geomagnetic storm. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, № 9, 57—94 [in Russian].
3. Dzyubanov D. A., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. (2008). Investigation and modeling of ionospheric plasma parameter variations during minimum period of the 23-th solar activity cycle. *Space Science and Technology*, **14**, № 1, 44—56. doi: 10.15407/knit2008.01.044.
4. Ivanov-Kholodny G. S., Mikhailov A. V. (1980). *Prediction of the State of the Ionosphere*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 190 p. [in Russian].

5. Iskra D. A., Kolodyazhnyi V. V., Lyashenko M. V. (2019). *Development of the CERIM IION regional ionosphere model as part of the creation of the space weather forecast service*. Theoretical and applied aspects of radio engineering, instrument making and computer technologies. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference, June 20–21, 2019: a collection of abstracts. Ternopil: Individual Entrepreneur Palyanytsya V A, 15–18.
6. Lyashenko M. V., Pulyaev V. A., Chernogor L. F. (2006). Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters during rise solar activity period. *Space Science and Technology*, **12**, № 5/6, 58–68. doi: 10.15407/knit2006.05.058.
7. Lyashenko M. V., Sklyarov I. B., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. (2006). Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters on solar activity abatement. *Space Science and Technology*, **12**, № 2/3, 45–58. doi: 10.15407/knit2006.02.045.
8. Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Chernyak Yu. V. (2006). Diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters at maximum solar activity period. *Space Science and Technology*, **12**, № 4, 56–70. doi: 10.15407/knit2006.04.056.
9. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of Geospace Storms*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ., 407 p. [in Russian].
10. Banks P. M. (1966). Charged particle temperatures and electron thermal conductivity in the upper atmosphere. *Ann. Geophys.*, **22**, 577–584
11. Banks P. M. (1969). The thermal structure of the ionosphere. *Proc. IEEE*, **57**, № 3, 6–30. doi.org/10.1109/PROC.1969.6959.
12. Buonsanto M. J., Holt J. M. (1995). Measurements of gradients in ionospheric parameters with a new nine-position experiment at Millstone Hill. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.*, **57**, 705–717.
13. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. (2010). Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) for Space Weather Forecasting. *EGU General Assembly 2010* (Vienna, Austria, 2–7 May 2010). *Geophys. Res. Abstract*, **12**, EGU2010-316-2.
14. Dalgarno A., Degges T. C. (1968). Electron cooling in the upper atmosphere. *Planet. Space Sci.*, **16**, 125–132. doi.org/10.1016/0032-0633(68)90049-4.
15. Ding Z., Wu J., Xu Z., et al. (2018). The Qujing incoherent scatter radar: system description and preliminary measurements. *Earth Planets Space*, **70**, 87. doi.org/10.1186/s40623-018-0859-8.
16. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya., Chernyaev S. V., Kononenko A. F., Kotov D. V., Bogomaz O. V., Iskra D. A. (2014). Kharkiv incoherent scatter facility. *Bull. NTU “KPI”. Ser. Radiophysics and ionosphere*, № 47, (1089), 28–42. http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpiri_2014_47_7.
17. Emel’yanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F., Domnin I. F. (2018). Motion of ionospheric plasma: results of observation above Kharkiv in solar cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy*, **58**, № 4, 533–547. doi.org/10.1134/S001679321802007X.
18. Evans J. V. (1969). Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. *Proc. IEEE*, **57**, № 4, 496–530. doi.org/10.1109/PROC.1969.7005.
19. Gordon W. E. (1958). Incoherent scatter of radio waves by free electrons with applications to space exploration by Radar. *Proc. IRE*, **46**, 1824–1829.
20. Huang C.-S., Foster J. C., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J. (2005). A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network. *J. Geophys. Res.*, **110**, A06303. doi.org/10.1029/2004JA010865.
21. Liu L., Le H., Wan W., Sulzer M. P., Lei J., Zhang M.-L. (2007). An analysis of the scale heights in the lower topside ionosphere based on the Arecibo incoherent scatter radar measurements. *J. Geophys. Res.*, **112**, A06307. doi.org/10.1029/2007JA012250.
22. Picone J. M., Hedin A. E., Drob D. P., Aikin A. C. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.*, **107**, № A12, 1–16. doi.org/10.1029/2002JA009430.
23. Richards P. G. (2001). Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models. *J. Geophys. Res.*, **106**, № A7, 12803–12819. doi.org/10.1029/2000JA000365.
24. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. (2000). Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae*, **18**, 945–956. doi.org/10.1007/s00585-000-0945-6.
25. Salah J. E., Evans J., Wand R. N. (1974). Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill. *Radio Sci.*, **9**, № 2, 231–238. doi.org/10.1029/RS009i002p00231.
26. Schunk R. W., Nagy A. F. (2000). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge, Atmospheric and Space Sci. Ser., 555 p.
27. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. (2004). Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophysicae*, **22**, 453–458. doi.org/10.5194/angeo-22-453-2004.
28. Zang S., Holt J. M., Zalucha A. M. (2004). Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987. *J. Geophys. Res.*, **109**, № A11, 1–9.

Стаття надійшла до редакції 13.07.2022

Після доопрацювання 12.09.2022

Прийнято до друку 13.09.2022

Received 13.07.2022

Revised 12.09.2022

Accepted 13.09.2022

V. V. Kolodyazhnyi^{1,2}, Junior Researcher, Ph.D. student of the Department of Radio Electronics
E-mail: Vyacheslav.Kolodyazhnyi@infiz.khpi.edu.ua

M. V. Lyashenko¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D. in Phys&Math),
Senior Researcher, Scientific Secretary
E-mail: intercosmos80@gmail.com

L. Ya. Emelyanov¹, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D. in Phys&Math),
Senior Researcher, Leading Researcher
E-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com

D. A. Dzyubanov², Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph.D. in Phys&Math),
Senior Researcher, Professor
E-mail: Dmytro.Dziubanov@khpi.edu.ua

¹ Institute of Ionosphere of the National Academy of Sciences
of Ukraine and Ministry for Education and Science of Ukraine
16 Кирпичова Str, Kharkiv, 61002 Ukraine

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»
2 Кирпичова Str., Kharkiv, 61002 Ukraine

MODELING OF SPATIAL-TEMPORAL VARIATIONS OF DYNAMIC AND THERMAL PROCESS PARAMETERS IN GEOSPACE OVER UKRAINE DURING THE MINIMUM OF 24-TH CYCLE OF SOLAR ACTIVITY (2009, 2019)

We have performed the modelling of spatiotemporal variations of parameters of dynamic and thermal processes in ionospheric plasma at the phases of the minimum of the 24-th cycle of solar activity according to the Kharkiv radar of incoherent scattering. The diurnal dependences of parameters of the processes in the ionospheric plasma at altitudes from 210 to 450 km are constructed for typical geophysical periods (vernal and autumn equinoxes, summer and winter solstices). In the paper, the analysis of spatial and temporal variations of parameters of dynamic and thermal processes in the ionosphere is presented.

We determined the value of the plasma transfer velocity due to ambipolar diffusion, the density of the full plasma flux, and the flux of charged particles due to ambipolar diffusion, the value of the energy supplied to the electron gas, the density of the heat flux transferred by electrons from the plasmasphere to the ionosphere, as well as the velocity of the equivalent neutral wind, and the meridional component of the neutral wind velocity.

We found that weak variations in space weather do not lead to significant changes in spatiotemporal variations of the parameters of dynamic and thermal processes in the ionosphere for most of the studied periods. Quantitative and qualitative characteristics of most of these parameters and their diurnal variations were typical for the considered seasons. On the contrary, the velocity of the equivalent neutral wind changed significantly (up to 2—2.5 times) even with a weak increase in geomagnetic activity. The reasons for such changes may be the strengthening of horizontal thermospheric winds and the penetration of zonal magnetospheric electric fields into midlatitudes during the equinoxes.

The obtained results of calculations can be used in basic studies of solar-terrestrial relations and geospace, for the solution of applied problems related to the ability to predict the state of space weather, as well as for further development of the regional ionosphere model CERIM IION.

The object of research: physical processes in the ionospheric plasma.

The subject of research: spatiotemporal dependences of the main parameters of ionospheric plasma, which were obtained using incoherent scattering radar.

Research methods — terrestrial radiophysical method of incoherent scatter of radio waves, statistical analysis of observation results, semi-empirical modelling of parameters of dynamic and thermal processes.

Keywords: ionosphere, ionospheric modelling, physical processes in ionospheric plasma, parameters of dynamic and thermal processes, radiophysical methods of geospace research, solar activity.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.01.036>

УДК 58.031:577.352.4:582.736.3

Є. Л. КОРДЮМ, зав. відділу, д-р біол. наук, проф., чл.-кор. НАН України
E-mail: cellbiol@ukr.net

Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України
вул. Терещенківська 2, Київ, Україна, 01601

ПРОЄКТИ З КОСМІЧНОЇ БІОЛОГІЇ В УКРАЇНІ: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ

Наданий короткий огляд внеску результатів виконання біологічних проєктів у Цільовій комплексній програмі Національної академії наук України з наукових космічних досліджень (2018—2022 рр.) у сучасні напрями світової космічної біології: астробіологія, клітинна та молекулярна біологія, біологія рослин, біологія тварин та гравітаційна біологія.

Ключові слова: астробіологія, біологія рослин, біологія тварин, гравітаційна біологія, клітинна та молекулярна біологія.

У зв'язку із завершенням Цільової комплексної програми з наукових космічних досліджень Національної академії наук України, до якої було включено п'ять проєктів з космічної біології, доцільно визначити місце досліджень українських вчених в світовій науці та майбутні перспективи на фоні інформації щодо відповідних напрямів розвитку цієї галузі науки в космічних країнах світу.

Науки про життя в космосі набули нового значення у зв'язку з планами світової спільноти щодо колонізації Місяця та Марса, побудови житлових поселень для життя та роботи персоналу станцій. Відкритий космос, як добре відомо, є ворожим для всього живого, космонавти живуть і працюють у штучному середовищі, подібному до біосфери Землі, створення та підтримка якого забезпечується фізико-хімічними системами життєзабезпечення. Тривалі експе-

диції у далекий космос і перебування людини на Місяці та Марсі потребують величезної кількості метаболічних ресурсів, тобто води, їжі, кисню, і їх не можна здійснити без високого рівня кругообігу. До того ж, у замкненому просторі кабіни космічного корабля значно збільшується ризик мікробних інфекцій та технічного отруєння. Для рішення цієї проблеми комплементарними ланками фізико-хімічних систем життєзабезпечення пілотованих апаратів і планетарних поселень визначено біорегенеративні системи життєзабезпечення (БСЖ), тобто штучні екосистеми, до складу яких мають входити вищі рослини, дрібні тварини та мікроорганізми для підтримки належної атмосфери, забезпечення належної кількості та якості їжі, питної води, утилізації відходів тощо. Вищі рослини як джерела кисню, істотної маси та оновленої води є ключовими компонентами таких систем. Одержання нових

Цитування: Кордюм Є. Л. Проєкти з космічної біології в Україні: сучасні тенденції. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 1 (140). С. 36—51. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.036>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

фундаментальних знань про механізми адаптації живих систем різного рівня організації до умов космічного польоту, зокрема тривалої дії мікрогравітації, шляхом проведення наземних модельних і космічних експериментів із застосуванням підходів та методів аналізу сучасної клітинної та молекулярної біології, біохімії, генетики, біоінформатики піднімає на вищий ступінь теоретичну основу біомедичного забезпечення космонавтів, розробки технологій БСЖ і прогнозу їхньої надійності у тривалих польотах у далекому космосі, освоєнні Місяця та відвіданні Марса. Особливого значення набувають розробка обладнання та прийомів агротехніки «космічного рослинництва», підбір сільськогосподарських культур для ведення рослинництва на Місяці у закритому ґрунті, штамів грибів і водоростей, а також асортименту рослин, здатних функціонувати як біофільтри для покращування атмосфери та придатних до фітодизайну місячної станції; проведення хімічного та мікробіологічного аналізів місячного ґрунту; використання аналогів місячного ґрунту (силікатні мінерали) для виготовлення субстрату, живлення рослин та консорціуму конкурентних бактерій як пробіотиків для профілактики захворювань рослин [19, 60, 76, 98, 99].

Неможливість здійснення планів людства освоєння далекого космосу без фундаментального та практичного внеску наук про життя в космосі зумовила пріоритетність фундаментальних і прикладних досліджень в галузі цих наук у космічних програмах національних космічних агентств та Європейського космічного агентства. Напрями досліджень в галузі космічної біології є пріоритетними в космічних програмах НАСА (NASA) США, Національних космічних агентств Німеччини (DLR), Італії (ASI), Японії (JAXA), їм приділяється значна увага космічними агентствами Канади (CSA) і Франції (CNES). Широко проводяться в США та Китаї роботи щодо створення демонстраційних моделей з контрольованими умовами для вирощування рослин та аналізу процесу формування штучної екосистеми.

Як приклад наведемо основні напрями програми з космічної біології НАСА (https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/16-05-11_sb_plan.pdf) на 2016—2025 pp.:

1) мікробіологія: дослідження впливу космічного польоту на життєдіяльність всіх класів мікроорганізмів та їхню біологічну активність у кругообігу речовин;

2) клітинна та молекулярна біологія: визначення впливу космічного польоту на живі системи на клітинному та молекулярному рівнях, що проходить через усі наукові дисципліни космічної біології. Використання найсучасніших методів клітинної та молекулярної біології для моніторингу геномних змін мікроорганізмів, рослин, тварин або інших біологічних систем під час космічного польоту;

3) біологія рослин: дослідження росту та фізіології рослин і взаємодії рослин і мікробів в умовах космічного польоту. Розробка біорегенеративних систем життєзабезпечення, протоколів вирощування овочів у космосі та оцінки поживної якості вирощених овочів;

4) дослідження на тваринах і людях для оцінки фізіологічних механізмів кісткової, м'язової, серцево-легеневої, імунної та нервової функцій під час адаптації до космічного польоту;

5) репродуктивна та еволюційна біологія: визначення впливу космічного польоту на процеси розвитку, розмноження та еволюції життя.

Очікується одержання важливої фундаментальної інформації щодо взаємодії генетичних та епігенетичних факторів із навколишнім середовищем для реалізації процесів, залежних від гравітації та впливу цих факторів на наступні покоління. Підкреслюється, що надбання космічної біології в наступні роки матимуть ключове значення для розуміння біологічних ефектів, важливих для досліджень людиною космосу.

Програма НАСА з астробіології шукає відповіді на питання походження, еволюції та поширення життя у Всесвіті, які в тій чи іншій формі задавалися поколіннями, але сьогодні вже при наявності технології для пошуку придатних для життя планет, дослідницьких місій на Марс і Європу, спроб зрозуміти походження життя та планування майбутнього життя за межами Землі. Ці фундаментальні питання та відповідні астробіологічні експерименти, які проводяться на



Рис. 1. Експериментальна система EXPOSE-R2 із BIOMEX на борту МКС. DLR Інститут аерокосмічної медицини

МКС, обговорюються у захопливій монографії J.-P. de Vera “Astrobiology on the International Space Station”, виданій у 2020 р. До цього наряду належить експеримент Європейського космічного агентства BIOMEX (BIOlogy and Mars Experiment) із широкою міжнародною участю (30 інститутів із 12 країн та трьох континентів), проведений на МКС у 2014—2016 рр. До завдань експерименту входило: 1) визначення стійкості та стабільності біомолекул у відкритому космосі та симульованих марсіанських умовах на низькій земній орбіті, 2) ступеня витривалості земних екстремофілів до умов відкритого космосу та 3) виявлення характеру взаємодії між біологічними зразками та мінералами, включаючи земні, аналогічні варіанти Місяця та Марса, в умовах космосу та Марса. Тому зразки BIOMEX склалися з різноманітних пігментів, вторинних метаболітів, компонентів клітинної стінки, лишайників, архей, ціанобактерій, залізобактерій, снігових водоростей, чорних грибів і мохоподібних з альпійських і полярних ареалів існування, які були вбудовані, вирощені та культивовані на суміші аналогів марсіанського та місячного реголітів або інших земних мінералів і потім перенесені у відкритий космос у змодельовані марсіанські умови за допомогою пристрою EXPOSE-R2 [16] (рис. 1).

Очікувалося, що отримані результати дадуть нову інформацію про вплив екстремальних умов навколишнього середовища на стійкість та шанси виживання запропонованих об'єктів під час «природної» подорожі в космосі (згідно з гіпотезою панспермії).

За пропозицією українських вчених (проект «Доведення концепції створення постбіотиків для профілактики розладів здоров'я космонавтів», керівник к.б.н. Н. О. Козирівська, зав. лабораторії Інституту молекулярної біології та генетики Національної академії наук України) список об'єктів вперше був доповнений мультимікробною культурою комбуча (МКК) (чайний гриб, екотип ІМБГ-1), що представляє гармонійне співіснування в солодкому чаї широко поширених у природі осміофільних дріжджів та бактерій [77, 85]. Завданням експерименту було дослідити вплив умов, подібних до марсіанських, на виживання МКК та геномну архітектуру найстійкіших компонентів МКК. Під час 18 місяців поза межами станції та сім місяців усередині зразки сухої плівки МКК, розташовані на незахищеному верхньому рівні, отримали УФ-промені (>200 нм), космічне іонізаційне випромінювання та аноксію. Середній і нижній рівні були захищені від ультрафіолетового опромінення, однак вони підтримувалися в атмосфері та тиску, подібних до марсіанських. Аналогічно приготовлені зразки зберігали в лабораторних умовах як еталонні.

Встановлено, що після експонування на МКС МКК зазнала змін: швидкість росту, утворення плівки на основі целюлози та активність ферментів, особливо у зразках, які піддавалися впливу УФ-випромінювання, подібного до марсіанського, відрізнялися від таких у контрольних зразках та зразках, захищених від УФ-випромінювання, однак основні мікроорганізми МКК були збережені [21, 77]. Показано, що УФ-опромінення на орбіті викликало деградацію ДНК, зміни у складі та структурі клітинних мембран, що супроводжувалося змінами структури позаклітинних мембранних везикул та пригніченням синтезу целюлози. Проте везикули не набували ендотоксичності, цитотоксичності та нейротоксичності [78] і тому, на думку авторів, такі везикули, що походять від непатогенних грам-негативних бактерій, зокрема від культури комбуча, можуть розглядатися як потенційні кандидати у дизайні постбіотиків і застосуванні в космічній медицині [46, 68, 78].

Вперше виявлено значну стабільність бактеріальної целюлози, 90 % якої синтезується бак-

теріями роду *Komagataeibacter*, та експресії генів, пов'язаних з її біосинтезом після тривалого впливу космічних/марсоподібних стресорів [14, 21, 46, 52, 67]. Оскільки виробництво целюлози за допомогою чайного гриба є безвідходним, автори обговорюють його принадність для БСЖ [46, 67].

У зв'язку з уперше одержаними даними щодо підвищеної стійкості культури комбуча до умов відкритого космосу, поєднаних з марсоподібними стресорами, можна згадати стійкість до цих умов лишайників — симбіотичних асоціацій фотоавтотрофних зелених водоростей або ціанобактерій і гетеротрофних грибів, яку було виявлено у космічних експериментах з *Rhizocarpon geographicum* і *Xanthoria elegans*, що колонізують гірські породи, та бродячим лишайником *Aspicilia fruticulosa*, які експонувалися в установці BIOPAN-5 16 та 10 діб [15, 89] та *X. elegans* в установці EXPOSE-E протягом 1.5 року в експерименті «Лишайники і гриби» [7] за межами МКС під впливом інсоляції, УФ-випромінювання, космічного випромінювання, температур і вакуумних умов космосу та умов, аналогічних марсіанським. Таку високу стійкість лишайників до умов відкритого космосу автори пояснюють їхньою симбіотичною природою та захистом клітин водоростей і грибів верхнім пігментованим шаром — корою від повного впливу потужного ультрафіолетового та космічного випромінювання, тобто від умов, які, як було доведено, є смертельними для бактерій та інших мікроорганізмів [26, 27]. Слід згадати, що гіпотезу панспермії було відроджено, коли технологія дала можливість вивчати виживання бактеріальних спор у відкритому космосі. Однак дані щодо загибелі ізольованих спор *B. subtilis* вже через кілька секунд після експозиції у відкритому космосі однозначно спростували початкову гіпотезу панспермії щодо подорожі однієї спори. Але захищені від сонячного ультрафіолетового випромінювання, спори виживали в космосі до шести років, особливо при поміщенні у глину або у штучні метеорити, виготовлені з метеоритного порошку, що свідчить на користь гіпотези літопанспермії [26, 27]. Лишайники виявилися придатними кандидатами для перевірки цієї гіпотези, яка передбачає життєздатний тран-

спорт мікроорганізмів між планетами усередині метеоритів [15]. Хоча тривалість місії в 1.5 року набагато коротша за очікувану тривалість гіпотетичного міжпланетного переміщення, напр. 2.6 млн років, для деяких марсіанських метеоритів представлені результати вказують на те, що *X. elegans* може вижити в космосі довше [7]. Звернуто увагу на надзвичайну стійкість бактерій роду *Deinococcus*: *D. radiodurans* [69], *D. aetherius* [102] та *D. geothermalis* [71], які залишалися життєздатними у висушеному стані протягом 1-2 років в космосі та в умовах, схожих на марсіанські. Автори підкреслюють, що виживання мікроорганізмів у суворих умовах навколишнього середовища значно підвищується, якщо вони експонуються як біоплівка [71]. На думку авторів, переміщення бактерій у міжпланетному просторі можливе у вигляді скупчень як ковчег, що автори назвали «massaranspermia» [32]. В цьому контексті виконавці проекту слушно припускають, що плівка на основі целюлози може служити розумною матрицею-носієм мікробного співтовариства комбуча у позаземних подорожах [67].

Проект «Розроблення підходів нейропротекції при довготривалих космічних місіях» (керівник — д.б.н., проф. Т. О. Борисова, зав. відділу нейрохімії Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України) виконувався у рамках таких наукових напрямів, як астробіологія (дослідження нейротоксичності планетарного пилу), космічна біологія тварин та космічна медицина (дослідження впливу гіпотермії та нейроактивних ліків на нервову передачу у голловому мозку).

Вважається, що частинки планетарного та міжзоряного пилу можуть значно шкодити здоров'ю людини під час довгострокових космічних польотів, місячних та планетарних місій, тому оцінка ризику їхньої токсичності та з'ясування можливих механізмів порушення функціонування мозку у цих умовах є актуальними завданнями сучасної астробіології та космічної медицини. Так було виявлено під час кількох місій «Аполлона», що частинки місячного пилу прилипають до скафандрів, після чого потрапляють у космічний корабель і мають прямий контакт з космонавтами [20]. Встановлено, що ці частин-

ки викликали подразнення очей, дихальної системи та шкіри [20], пошкоджували альвеолярні макрофаги *in vitro* [51]. Тривала наявність аналогів місячного та марсіанського пилу в легенях мишей призводила до хронічного запального ураження [50]. Експресія синтази оксиду азоту у мишачій макрофагальній клітинній лінії також посилювалася аналогом місячного пилу [10], який навіть був більш токсичним, ніж частинки діоксиду титану. Гострий вплив аналогу марсіанського пилу порівнюється із таким кварцового пилу [50]. Оцінка біохімічних та клітинних маркерів токсичності та гістопатологія легень і лімфатичних вузлів у щурів, які протягом чотирьох тижнів піддавалися впливу аерозолів місячного ґрунту, зібраних під час місії «Аполлон-14» показала, що найвищий рівень побічних ефектів становив 6.8 мг/м^3 , розрахунковий NOAEL для людини становив 2.3 мг/м^3 . Показано, що нейротоксичний ефект аналогу марсіанського пилу, збагаченого у різній кількості карбоновими наночастинками, пов'язаний виключно з активністю карбонових наночастинок, а не з дією його неорганічної складової. Вуглець широко поширений у марсіанському пилу і міжзоряному просторі та входить до складу метеоритів. Необхідно відмітити, що поточні стандарти якості повітря Європейської комісії для забруднення повітря твердими частинками (PM) становлять 25 мкг/м^3 для PM з аеродинамічним діаметром нижче 2.5 мкм (PM2.5) та $40 \dots 50 \text{ мкг/м}^3$ для PM10 (EU).

У пошуках ефективних методів аналізу токсичності частинок планетарного пилу без використання біологічних об'єктів з метою розробки стратегії нейропротекції в умовах довготривалих космічних місій виконавцями проекту було досліджено вплив помірної та глибокої гіпотермії на синаптичну нейропередачу у центральній нервовій системі [2, 6, 64, 70, 81].

Показано, що початкова швидкість транспортер-опосередкованого накопичення збуджувального нейромедіатора глутамату та гальмівного нейромедіатора ГАМК у нервових терміналях головного мозку щурів поступово зменшується в умовах помірної та глибокої гіпотермії. Позаклітинний рівень глутамату та ГАМК в нервових терміналях головного мозку щурів незначно

змінюється в умовах помірної та глибокої гіпотермії у порівнянні з нормотермією. Виявлений дисбаланс транспортер-опосередкованого накопичення збуджувальних та гальмівних нейромедіаторів в умовах помірної та глибокої гіпотермії, проте позаклітинний рівень нейромедіаторів залишається майже незмінним, тобто збалансованим [74]. Основним шляхом підвищення позаклітинного рівня нейромедіатора глутамату до нейротоксичного за умов гіпоксії та ішемії є патологічне транспортер-опосередковане вивільнення нейромедіатора глутамату з нервових терміналей головного мозку щурів. Встановлено, що транспортер-опосередковане вивільнення глутамату з нервових терміналей головного мозку щурів поступово зменшується за умов помірної та глибокої гіпотермії [74].

Оскільки зниження вивільнення глутамату з нервових терміналей головного мозку щурів в умовах гіпотермії стимульовано активацією пресинаптичних іонотропних та каїнатних рецепторів, то було знайдено спосіб пом'якшення цього процесу антиепілептичним препаратом леветирацетамом і таким чином зменшення побічних ефектів помірної та глибокої гіпотермії, що можна використовувати в умовах довготривалих космічних місій [5, 48, 73, 82].

Виконавцями також продемонстровано комбінований нейропротекторний ефект гіпотермії та модуляції фізико-хімічних властивостей мембран нервових клітин шляхом зміни їхнього ліпідного складу. Видалення мембранного холестерину посилювало інгібуєчий ефект помірної та глибокої гіпотермії на вивільнення глутамату у препаратах нервових терміналей головного мозку щурів. Таким чином, доведено адитивний нейропротекторний ефект гіпотермії та модуляції фізико-хімічних властивостей мембран нервових клітин шляхом зміни їхнього ліпідного складу, зокрема зниження рівня мембранного холестерину [72–74].

На основі оригінальної методології експрес-аналізу токсичних компонентів навколишнього середовища запропоновано новий метод швидкої оцінки токсичності частинок планетарного пилу без використання біологічних об'єктів (рис. 2).

Здатність частинок впливати на мембранний потенціал, цілісність нервових закінчень і, отже, на ключові характеристики синаптичної передачі пропонується оцінювати за допомогою методу планарного ліпідного подвійного шару шляхом моніторингу провідності штучної мембрани при наявності частинок [3–5, 81]. Як показує аналіз опублікованих даних, результати виконання проекту є істотним внеском у пізнання нейротоксичності місячного та планетарного пилу та розробку стратегії нейропротекції, що базується на комбінації таргетних та неспецифічних підходів модуляції транспорту нейромедіаторів у нервових терміналях головного мозку.

Виконання проекту «Дослідження гравічутливості та гравітропних реакцій мохів в умовах космічного польоту як адаптивного чинника в онтогенезі рослин» (керівник к.б.н. О. В. Лобачевська, зав. відділу екоморфогенезу мохів Інституту екології Карпат Національної академії наук України) та публікація статті “Gravi-sensitivity of mosses and their gravity-dependent ontogenetic adaptations” в журналі *Life* [57] відроджують такого роду дослідження цієї унікальної групи вищих рослин, які достатньо широко проводилися у минулому столітті [33, 87, 88, 90, 91], але дещо занепали сьогодні в силу об’єктивних причин.

Як відомо, питання сприйняття гравітації та механізмів реакцій мікроорганізмів, гравітаксису одноклітинних рухливих організмів і гравітропізму грибів, нижчих і вищих рослин, які ведуть нерухомий спосіб життя, спрямовані на з’ясування механізмів їхньої орієнтації у просторі та перебувають у центрі уваги дослідників, починаючи від історичних експериментів 19-го століття до сьогоденного швидкого розвитку клітинних, молекулярних і біотехнологічних досліджень, як складові фундаментальної проблеми ролі гравітації у функціонуванні біосфери Землі [8, 9]. У цьому сенсі космічний апарат в орбітальному польоті залишається унікальною експериментальною лабораторією для вирішення цих питань. Нагадаємо, що саме умови невагомості в космічному польоті дозволяють створювати за допомогою бортових центрифуг різні величини гравітації, менші за 1 g, що неможливо в полі сили тяжіння на Землі.

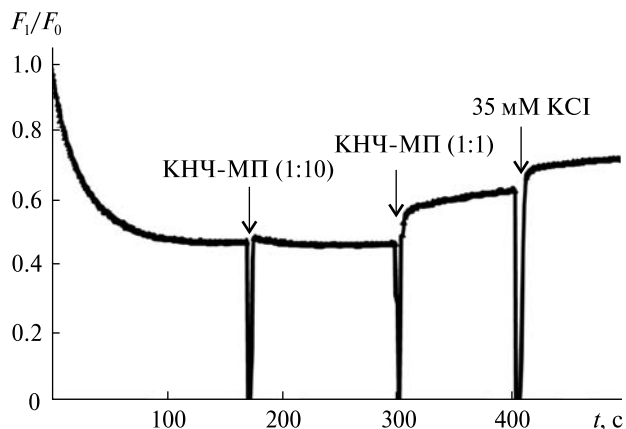


Рис. 2. Вплив аналогу марсіанського пилу, збагаченого карбоновими наночастинками (КНЧ-МП), на мембранний потенціал нервових закінчень. Суспензія нервових закінчень була врівноважена потенціал-чутливим зондом родаміном 6G. Після досягнення стабільного рівня флуоресценції зонда до нервових закінчень послідовно додавали КНЧ-МП (1:10) та КНЧ-МП (1:1) (позначено стрілками). Графік відображає результати чотирьох незалежних експериментів з різними препаратами нервових закінчень. Зниження концентрації карбонових наночастинок у складі пилу призводило до зниження його нейротоксичності [81]

Протонема моху — нитчаста багатоклітинна система, що є ювенільною стадією розвитку моху, росте шляхом подовження та поділу апікальної клітини. Саме апікальна клітина протонеми є унікальним об’єктом для дослідження гравічутливості моху, оскільки гравіперцепція та гравітропний ріст відбуваються в одній клітині. Порівняно з дослідженнями гравічутливості різних видів мохів, кінетики гравітропізму і осідання амілопластів [8, 91] майже відсутні дані щодо особливостей гравіреакцій мохоподібних залежно від специфічних умов місцезростань, екоотопів.

Виконавцями проекту встановлено, що гравітропізми та гравіморфози мохів є видоспецифічними, залежать від взаємодії світла та гравітації та мають адаптивне значення у стресових умовах [54, 56]. Габітус рослин визначається передусім типом галузнення головних і бокових гілок різного порядку. Бокові гілки судинних рослин закладаються під певним кутом, який залежить від поляризаційної дії гравітації, коректується



Рис. 3. а — *Polytrichum arcticum*: гравітропний стелон, верхівка якого інтенсивно галузиться. Протонемні короткі стелони надалі легко відпадають і служать органами вегетативного розмноження, б — *Tortula caucasica*: протонемний стелон з бруньками, які утворилися на апікальній клітині під впливом поляризуючої дії гравітації (1g), в — *T. caucasica*: протонемний стелон з бруньками, які заклалися вздовж стелону після клиностатування, г — *Bryum pseudotriquetrum*: гравічутливі пагони, в основі яких утворилися виводкові бульбочки, д — *Weissia tortilis*: гравічутливі стелони каулонеми з хлоронемними дендритами і фрагмент культури з розгалуженими дендритами. Стрілкою вказано на виводкову бульбочку [49, 55]

ауксином і відомий як гравізалежний кут нахилу (GSA – gravitropic setpoint angle) [17, 24, 86]. Гравіморфози мохів з екстремальних мікроселищ Антарктики (*Polytrichum arcticum*, *Bryum pseudotriquetrum*) і півдня України (*Weissia tortilis*, *Tortula caucasica*) у вигляді розгалужень клітин гравітропної протонеми, дендритів, вегетативного розмноження виводковими тільцями на гравічутливих пагонах, брунькоутворення на апікальних клітинах є спеціалізованими життєвими формами, зумовленими умовами середовища (рис. 3).

Експериментально показано, що просторова орієнтація бокових галузок у досліджених видів мохів залежить від гравітаційного вектора, а локальне місце галуження можна контролювати за участю гравітації. Ріст бокових галузок і кут їхнього нахилу зрівноважується дією сили тяжіння та світла і контролюється ендогенно-автотропним ростом. Ці чинники взаємодіють на різних стадіях онтогенезу мохів і визначають їхню структурну будову і габітус у природних умовах [49]. Визначено коефіцієнт галуження

і кут нахилу латеральних галузок гравітропної протонеми антарктичних видів мохів *P. arcticum* і *B. caespiticium* під впливом інгібіторів транспорту ауксину. Цілковито доведено залежність інтенсивності гравісприйняття і гравітропізму, галуження та росту гаметофіту від полярного розподілу і транспорту ауксину, що забезпечує ефективність модуляції граві- і фототропізму і є основою для морфологічної мінливості гаметофіту у різних екологічних умовах [57]. Звернуто увагу на епігенетичний контроль, зокрема метилювання ДНК, пластичності онтогенезу мохів у процесі адаптації до екстремальних умов довкілля. Вперше визначено, що інгібітор метилювання ДНК 5-азацидин посилює галуження клітин *P. arcticum* і зміни кута нахилу галузок до материнської клітини та ініціює закладання бруньок майже на кожній клітині гравітропного стелону *Physcomitrella patens* [34].

Виконавці проекту суттєво доповнили уявлення відносно вмісту та локалізації УФ-абсорбуювальних сполук фенольної природи (УФ-АС) у бріофітів, які значно звужені порівняно із су-

динними рослинами [18, 63, 106], хоча накопичення УФ-АС є найпоширенішою реакцією рослин Антарктики на дію УФ [29, 97]. Ультрафіолетове опромінення активувало синтез УФ-АС та збільшення вмісту флавоноїдів у гравітропних пагонах і гаметофітній дернині *V. caespitium*. На відміну від судинних рослин, УФ-АС у бріофітів максимально зосереджувалися у клітинній стінці, створюючи ефективний екран від УФ пошкодження клітин [49, 57]. В цілому встановлені авторами проекту закономірності гравіреакцій досліджених видів мохів різних екотопів чітко визначили екологічну роль гравіморфозів в адаптації рослин до умов довкілля в сьогоденних реаліях зміни клімату та посилення антропогенного впливу на біосферу.

Проекти: «Розробка концепції регуляції розвитку та стресостійкості рослин для їхньої адаптації до умов космічних польотів шляхом залучення клітинно-біологічних ресурсів» (керівник — академік НАН України Я. Б. Блюм, директор Інституту харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук України) та «Дослідження функціональних сайтів цитоплазматичної мембрани рослинних клітин в умовах реальної та модельованої мікрогравітації» (керівник — чл.-кор. НАН України Є. Л. Кордом, зав. відділу клітинної біології та анатомії Інституту ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України) належать до напрямів: клітинна та молекулярна біологія та біологія рослин.

За роки досліджень росту та розвитку рослин в умовах реальної мікрогравітації в космічному польоті та модельованої мікрогравітації в наземних експериментах встановлено основні закономірності її дії на організмовому, клітинному та субклітинному рівнях та зроблено відкриття гравічутливості рослинних клітин, не спеціалізованих до сприйняття гравітаційного вектора. Доведено, що квіткові рослини успішно ростуть на орбіті в космічних оранжереях у більш або менш оптимальних умовах щодо температури, вологості, вмісту CO₂ у повітрі, інтенсивності та спрямованості світла, аерації субстрату тощо. Слід зазначити, що схожість високоякісного насіння на орбіті є стовідсотковою. Створено та впроваджено нове обладнання для вирощуван-

ня рослин Advanced Plant Habitat (APH, удосконалене помешкання для рослин) та Veggie (Vegetable Production System) — «космічний сад», в якому успішно вирощуються три види салату (пекінська капуста, гірчиця мізуна, червона капуста) як свіжа їжа до раціону астронавтів та квіти цинії для покращення життя та благополуччя в орбітальній лабораторії, Інкубатор SABL для мікроорганізмів (бактерій, дріжджів, водоростей, грибків, вірусів), малих організмів, клітин тварин і культур тканин, а також багатоцільова платформа Variable-G, яка містить центрифуги для проведення експериментів в різних гравітаційних умовах і на широкому спектрі об'єктів, включаючи культури клітин, дрозофіл, арабідопсис і нематоди [80, 105].

Оскільки квіткові рослини проходять повний цикл онтогенезу від насіння до насіння в умовах мікрогравітації, досить істотні перебудови структурно-функціональної організації рослин, включаючи зміни ультраструктури та навантаження клітинних органел, метаболізму, рівнів АФК і активності антиоксидантної системи, експресії генів і синтезу білків *in vivo* та *in vitro* в умовах реальної та модельованої мікрогравітації в наземних експериментах переважно розглядаються як такі, що сприяють адаптації рослин до дії цього чинника [23, 25, 28, 35, 38, 39, 59, 75, 76, 83, 101].

Завдяки удосконаленню техніки, яка дозволила проводити на борту МКС молекулярно-біологічні дослідження, одержано нові дані щодо експресії генів та синтезу білків в умовах космічного польоту. Як приклад можна навести дослідницьку платформу Wetlab-2 для проведення в режимі реального часу кількісного аналізу експресії генів або швидке виявлення генів-мішеней, які вказують на інфекційне захворювання, клітинний стрес, зміни в клітинному циклі, рості та розвитку та/або генетичні аномалії на борту МКС. Підвищення або зниження експресії під впливом мікрогравітації характерне для більшості досліджених генів, задіяних у широке коло клітинних процесів, зокрема Ca²⁺- та ліпід-сигналінг, біосинтез клітинної стінки, загальний метаболізм, головню вуглеводний та ліпідний, реакціях на стрес, синтез білків, що складають за

образним мисленням [12] частину «головних космічних генів». Найбільш значущими результатами досліджень протеому та транскриптому є отримання доказів органоспецифічних відповідей рослин на дію цього чинника на молекулярному рівні, які піднімають на новий щабель дослідження в галузі космічної біології. На жаль, значно менш уваги приділяється вельми трудомістким дослідженням, спрямованим на з'ясування тригерних механізмів змін метаболізму під впливом мікрогравітації, оскільки метаболічна регуляція генної експресії добре відома.

Виконавцями **проєкту** «Розробка концепції регуляції розвитку та стресостійкості рослин для їхньої адаптації до умов космічних польотів шляхом залучення клітинно-біологічних ресурсів» яскраво підтверджено на молекулярному рівні прогресивну вакуолізацію клітин апексу власне кореня та кореневого чохла під впливом кліностатування, яка була раніше винайдена лише на структурному рівні в умовах реальної та модельованої мікрогравітації та розглядалася як ознака прискорення диференціації та адаптивного старіння клітин.

Перебудови вакуолярного апарату — багатофункціонального компартменту рослинних клітин є нормальними у процесах клітинного росту, диференціації та старіння і супроводжуються зміною рівня і спрямованості клітинного метаболізму. Рослини-автотрофи позбавлені лізосом клітин тварин-гетеротрофів. Вакуолі рослинних клітин містять той же набір гідролітичних ферментів, що і лізосоми, тому також функціонують як літичний компартмент [31, 100]. За допомогою електронної мікроскопії показано, що вакуолізація здійснюється різними шляхами — розширенням ендоплазматичного ретикулу (ЕР), похідних диктіосом, утворенням цитосегресом — ділянок цитоплазми, оточених цистернами агранулярного ЕР з наступною трансформацією у вакуолі, останні набули назву автофагосоми як тип автофагії [11]. Перехід клітин апікальної меристеми кореня до розтягання супроводжується утворенням численних дрібних вакуул, які зливаються, утворюючи велику центральну вакуоль, органили розміщуються у тонкому периферійному шарі гіалоплазми.

Утворення центральної вакуолі свідчить про закінчення дистальної зони розтягання і перехід клітин до швидкого росту в центральній зоні розтягання. Прогресуючу вакуолізацію клітин апексу кореня, тобто збільшення обсягу вакуолей порівняно з контролем, в умовах реальної та модельованої мікрогравітації описано зокрема у *Pisum sativum*, *Brassica rapa*, *Glycine max*, *Beta vulgaris* [13, 36, 37, 42, 44]. За рахунок посиленої активності ЕР посилювалася вакуолізація клітин кореневого чохла, особливо секреторних, у яких кількість слизу зменшувалася внаслідок зниження активності диктіосом. У серії космічних експериментів розтягання клітин апікальної меристеми власне кореня починалося ближче до верхівки кореня, ніж у наземних контролях, що призводило до зменшення зони меристеми. Зниження активності меристеми в орбітальному польоті пригнічувало апікальне домінування на більш ранніх стадіях росту проростків та вело до рясного утворення бічних коренів [61, 62]. Припускається, що інтенсифікація автолітичних процесів у цитоплазмі в умовах реальної та симульованої мікрогравітації пов'язана зі збільшенням продукції етилену, що знижує рівень обміну фосфоліпідів і призводить до зміни проникності мембран і виділення гідролітичного ферменту.

Із використанням флуоресцентних барвників monodansylcadaverine (MDC) та LysoTracker™ Red DND-99 як маркерів лізосомальних ферментів кислої фосфатази та катепсину виконавці проєкту істотно поглибили уявлення щодо прогресивної вакуолізації клітин кореня та її динаміки під впливом модельованої мікрогравітації на структурному рівні [92, 93], та на молекулярному рівні виявлено кореляцію між посиленням вакуолізації та підвищенням експресії генів родини *ATG8*, особливо *ATG8e* і *ATG8i* [92, 103], які кодують відповідні білки автофагосом. Також встановлено закономірності експресії генів білка α -тубуліну та *ATG8*, генів ферментів, що беруть участь в ацетилюванні α -тубуліну, та генів кінезину, які можуть відігравати роль у опосередкуванні процесів аутофагії за участю мікотрубочок. Показано, що посттрансляційне ацетилювання α -тубуліну забезпечує сильнішу взаємодію тубуліну з білком *ATG8* [58, 65, 66].

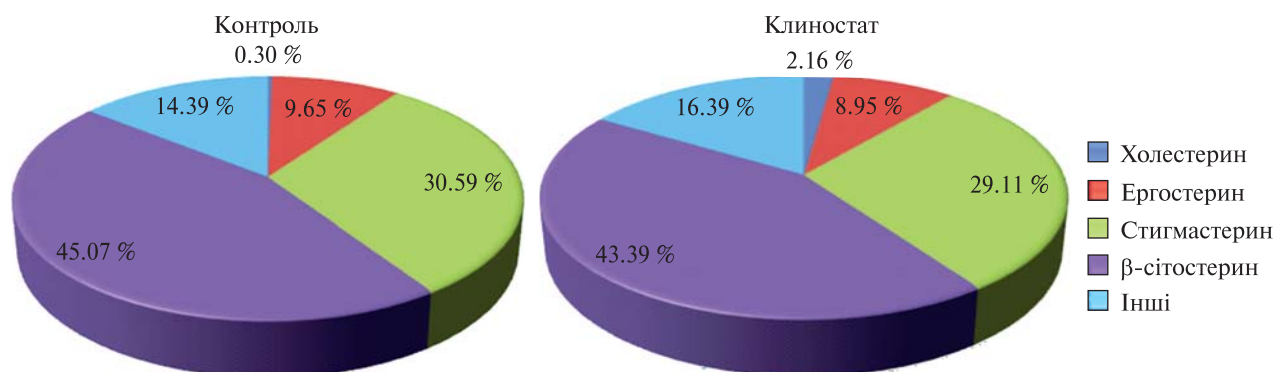


Рис. 4. Схема вмісту стеринів у фракціях рафтів, виділених із цитоплазматичної мембрани коренів шестидобових проростків гороху, вирощених в стаціонарному контролі та умовах клиностатування [40]

Отримані дані автори розглядають з позицій уявлень про автофагію у клітинах дріжджів і савців, визначаючи на цій основі перспективи подальших досліджень механізмів впливу мікрогравітації на ріст і диференціацію рослинних клітин.

Проект «Дослідження функціональних сайтів цитоплазматичної мембрани рослинних клітин в умовах реальної та модельованої мікрогравітації» спрямований на тестування гіпотези щодо тригерної ролі ліпідних рафтів у зміні властивостей цитоплазматичної мембрани під впливом модельованої мікрогравітації і наступних перебудов метаболізму та фізіологічних реакцій клітини. Біологічні мембрани, особливо цитоплазматична, та їхні фізико-хімічні властивості розглядаються як найбільш чутливі індикатори впливу зміненої гравітації на клітину [95, 96]. Незважаючи на ключову роль цитоплазматичної мембрани у функціонуванні клітини, літературні дані в цьому напрямі обмежені. Повідомлялося про зміни вмісту фосфоліпідів, жирних кислот і стеринів та мікрров'язкості цитоплазматичної мембрани, ізольованої із коренів проростків гороху, під впливом клиностатування [45, 79]. Експериментально виявлено безпосередній вплив гравітації на іонні канали та мембрани, що, як припускається, може пояснити деякі біологічні ефекти гравітації [22] та встановлено гравіза-лежність текучості як штучних ліпідних мембран, так і клітинних [94], запропоновано першу модель сенсорної системи гравітації на основі мембранної термодинаміки [25].

В останні десятиліття встановлено гетерогенність біологічних мембран, тобто наявність щільних детергент-стійких мікродоменів, які за сучасними уявленнями є унікальним складом ліпідів і білків, збагачені на холестерин, насичені фосфоліпіди та сфінголіпіди та відіграють вирішальну фізіологічну роль у функціонуванні клітини, модулюючи процеси сигналінгу, мембранний розподіл сигнальних молекул, іонний транспорт та захисні механізми клітини при дії абіотичних і біотичних стресів [30, 47, 53, 84, 104].

Виконавці проекту вперше за допомогою методів електронної мікроскопії та хроматографії встановили наявність ліпідних рафтів у цитоплазматичній мембрані клітин коренів три- і шестидобових проростків гороху, які за структурою та розмірами відповідали характерним особливостям ліпід-білкових мікродоменів цитоплазматичної мембрани інших рослин, та виявили їхню чутливість до модельованої мікрогравітації за такими показниками, як злиття ліпідних рафтів, збільшення вмісту фосфоліпідів і насичених жирних кислот, особливо вмісту холестерину (рис. 4) [41, 43].

Із застосуванням конфокальної мікроскопії також показано збагачення мікродоменів холестерином (ліпофільний барвник філіпін) та підвищену емісію ліпідно-впорядкованих, більш щільних ділянок мембрани зі знизеним вмістом води (ліпофільний зонд лаурдан), що вказує на наявність рафтів [1]. Обґрунтовано уявлення,

що підвищення щільності упаковки білків і ліпідів, тобто жорсткості рафтів під впливом клинотатування відіграє ключову роль у змінах проникності мембран та активності асоційованих з ними ферментів і таким чином відкриває нові підходи до вивчення та розуміння ролі гравічутливості клітинних мембран та їхніх функціональних доменів у реакціях та адаптації рослин до дії мікрогравітації, що забезпечує ріст і розвиток рослин в цих умовах [40].

Певний внесок у напрям «Репродуктивна та еволюційна біологія» зроблений публікацією статті «Plant biology for space exploration — Building on the past, preparing for the future» [39], у якій наголошується необхідність подальших досліджень розвитку генеративних органів рослин, особливо плодів і насіння, у космосі, оскільки знання репродуктивної біології рослин в космічних умовах має вирішальне значення для майбутніх поселень людей на Місяці та Марсі. Виявлення механізмів, за допомогою яких змінена гравітація, посилення ультрафіолетового та іонізаційного випромінювання та інші фактори, пов'язані з космосом, впливають на репродуктивні структури, буде критично важливим для харчування, збереження генетичного різноманіття та надійного насінневого фонду та сільського господарства в цілому далеко від планети Земля.

Огляд матеріалів по результатах проєктів, опублікованих в закордонних престижних журналах Q1/Q2 та українських журналах, які індексуються Scopus і Web Sci. Core Collection, чітко вказує на їхнє визнання світовою науковою спільнотою, що базується на представлених у публікаціях нових фактичних даних та розроблених оригінальних концепціях та гіпотезах з використанням нових методологічних підходів та моделей, спрямованих на вирішення фундаментальних та прикладних проблем космічної біології,

Слід підкреслити, що дослідження в галузі космічної біології в Україні, які проводяться нині та плануються на найближчі роки, враховують світові пріоритети у цій галузі у тих напрямках, де досягнення українських науковців визнані науковою громадськістю та достатньо забезпечені науково-технічним потенціалом:

- 1) роль гравітації у житті рослин (тропізми),
- 2) біологія клітини в умовах мікрогравітації,
- 3) ріст та розвиток рослин в умовах мікрогравітації,
- 4) технології біорегенеративних систем життєзабезпечення та
- 5) астробіологія.

Успішний розвиток космічної біології в Україні завжди робив і, сподіваюсь, робитиме свій внесок у підтримку іміджу України як космічної держави.

REFERENCES

1. Artemenko O. A. (2021). The study of the functional state of lipid rafts in the cytoplasmic membrane of *Pisum sativum* seedlings under clinorotation. *Space Sci. Technol.*, **27**, № 5, 35–46. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.000> [in Ukrainian].
2. Borisova T. (2018). Nervous system injury in response to contact with environmental, engineered and planetary micro- and nano-sized particles. *Front. Physiol.*, **9**, 728. doi: 10.3389/fphys.2018.00728 [in English].
3. Borisova T. (2019). Express assessment of neurotoxicity of particles of planetary and interstellar dust. *Microgravity*, **5**, № 2. <https://doi.org/10.1038/s41526-019-0062-7> [in English].
4. Borisova T. A., Krisanova N. V., Pozdnyakova N. G., et al. (2018). Project: Development of a new method for analysis of planetary dust toxicity aiming on perspective space missions. *Space Sci. Technol.*, **24**, № 6, 69–73. <https://doi.org/10.15407/knit2018.06.069> [in Ukrainian].
5. Borisova T., Pozdnyakova N., Dudarenko M., et al. (2021). GABAA receptor agonist cinazepam and its active metabolite 3-hydroxyphenazepam act differently at the presynaptic site. *Eur. Neuropsychopharmacol.*, **45**, 39–51. doi.org/10.1016/j.euroneuro [in English].
6. Borysov A., Tarasenko A., Krisanova N. (2020). Plastic smoke aerosol: Nano-sized particle distribution, absorption/fluorescent properties, dysregulation of oxidative processes and synaptic transmission in rat brain nerve terminals. *Environ. Pollution*, **263**, Part A, 114502. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114502> [in English].
7. Brandt A., De Vera J., Onofri S. (2015). Viability of the lichen *Xanthoria elegans* and its symbionts after 18 months of space exposure and simulated Mars conditions on the ISS. *IJA.*, **14**, № 3, 411–425. doi:10.1017/S1473550414000214 [in English].

8. Braun M., Böhmer M., Häder D-P., et al. (2018). *Gravitational Biology I: Gravity Sensing and Graviorientation in Microorganisms and Plants* (Springer Briefs in Space Life Sciences). 1st ed., 110 p. [in English].
9. Cannon A., Salmi M., Bushart T. (2015). Changes during gravity perception and response in a single cell. *Methods Mol. Biol.*, 1309, 199—207. doi:10.1007/978-1-4939-2697-8_15 [in English].
10. Chatterjee A., Wang A., Lera M. (2010). Lunar soil simulant uptake produces a concentration-dependent increase in inducible nitric oxide synthase expression in murine RAW 264.7 macrophage cells. *J. Toxicol. Environ. Health*, **73**, № 9, 623—626. doi: 10.1080/15287390903578182 [in English].
11. Chen H., Dong J., Wang T. (2021). Autophagy in plant abiotic stress management. *Int. J. Mol. Sci.*, **15**, 22, 8, 4075. doi: 10.3390/ijms22084075 [in English].
12. Clement J. (2012). *Gene expression microarrays in microgravity research: toward the identification of major space genes*. Innovations in Biotechnology. Ed. E. C. Agbo, 319—346. doi: 10.5772/28693 [in English].
13. Darbelley N. (1988). Effets de la stimulation gravitropique et de la microgravité sur la prolifération et la différenciation cellulaires dans les racines primaires. *Bull. Soc. Bot.*, **135**, 229—250 [in French].
14. de Carvalho S. D., Uetanabaro A. P., Kato R., et al. (2022). The space-exposed kombucha microbial community member *Komagataeibacter oboediens* showed only minor changes in its genome after reactivation on Earth. *Front. Microbiol.*, **13**, 782175. doi: 3389/fmicb.2022.782175 [in English].
15. de la Torre R., Sancho L., Horneck G., et al. (2010). Survival of lichens and bacteria exposed to outer space conditions. Results of the Lithopanspermia experiments. *Icarus*, **208**, № 2, 735—748. DOI:10.1016/j.icarus.2010.03.010 [in English].
16. de Vera J. P., Alawi M., Backhaus T., et al. (2019). Limits of life and the habitability of Mars: The ESA Space Experiment BIOMEX on the ISS. *Astrobiology*, **19**, № 2, 145—157. doi: 10.1089/ast.2018.1897 [in English].
17. Digby J., Firn R. (1995). The gravitropic set-point angle (GSA): the identification of an important developmentally controlled variable governing plant architecture. *Plant Cell Environ.*, **18**, 1434—1440. doi:10.1111/j.1365-3040.1995.tb00205.x [in English].
18. Fabon G., Monforte L., Tomas-Las-Heras R. (2012). Dynamic response of UV-absorbing compounds, quantum yield and the xanthophyll cycle to diel changes in UV-B and photosynthetic radiations in an aquatic liverwort. *J. Plant Physiol.*, **169**, 20—26. doi: 10.1016/j.jplph.2011.08.010 [in English].
19. Ferl R., Kohn J., Denison F. (2015). Spaceflight induces specific alterations in the proteomes of *Arabidopsis*. *Astrobiology*, **15**, 32—56. doi:10.1089/ast.2014.1210 [in English].
20. Gaier J. (2005). The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions. NASA/TM—2005-213610/REV1 [in English].
21. Góes-Neto A., Kukhareno O., Orlovska I. (2021). Shotgun metagenomic analysis of kombucha mutualistic community exposed to Mars-like environment outside the International Space Station. *Environ. Microbiol.*, **23**, № 7, 3727—3742. doi: 10.1111/1462-2920.15405. [in English].
22. Goldermann M., Hanke W. (2001). Ion channel are sensitive to gravity changes. *Microgravity Sci. Technol.*, **13**, 35—38. doi: 10.1007/BF02873330.
23. Halstead T., Dutcher F. (1987). Plants in space, *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **38**, 317—345. doi: 10.1146/annurev.pp.38.060187.001533. [in English].
24. Hangarter R. P. (1997). Gravity, light and plant form. *Plant Cell Environ.*, **20**, № 6, 796—800. doi: 10.1046/j.1365-3040.1997.d01-124 [in English].
25. Hanke W., Florian P., Kohn M., et al. (2019). *Gravitational Biology II: Interaction of Gravity with Cellular Components and Cell Metabolism* (SpringerBriefs in Space Life Sciences) Paperback, 110. doi:10.1007/978-3-030-00596-2 [in English].
26. Horneck G., Stöffler D., Ott S. et al. (2008). Microbial rock inhabitants survive hypervelocity impacts on Mars-like host planets: first phase of lithopanspermia experimentally tested. *Astrobiology*, **8**, № 1, 17—44. doi: 10.1089/ast.2007.0134 [in English].
27. Horneck G., David M., Mancinelli R. (2010). Space Microbiology. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, **74**, № 1, 121—156. doi: 10.1128/MMBR.00016-09 [in English].
28. Hoson T. (2014). Plant growth and morphogenesis under different gravity conditions: relevance to plant life in space. *Life.*, **4**, № 2, 205—216. doi: 10.3390/life4020205 [in English].
29. Iqbal Z., Javed M., Gull S. (2019). Total phenolic contents of two varieties of *Crocus sativus* and their antioxidant activity. *Int. J. Biosci.*, **14**, № 3, 128—132. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/14.3.128-132> [in English].
30. Jaillais Y., Ott T. (2020). The nanoscale organization of the plasma membrane and its importance in signaling: A proteolipid perspective. *Plant Physiol.*, **182**, 1682—696. doi:10.1104/pp.19.01349 [in English].
31. Jiang Y., Yang L., Ferjani A., et al. (2021). Multiple functions of the vacuole in plant growth and fruit quality. *Mol. Horticulture*, **1**, № 4. doi.org/10.1186/s43897-021-00008-7 [in English].

32. Kawaguchi Y., Yang Y., Kawashiri N. (2013). The possible interplanetary transfer of microbes: assessing the viability of *Deinococcus* spp. under the ISS Environmental conditions for performing exposure experiments of microbes in the Tanpopo mission. *Orig. Life Evol. Biosph.*, **43**, № 4-5, 411—418. doi: 10.1007/s11084-013-9346-1 [in English].
33. Kern V., Schwuchow J., Reed D., et al. (2005). Gravitropic moss default to spiral growth on the clinostat and in microgravity during spaceflight. *Planta*, **222**, № 1, 149—157. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1467-3> [in English].
34. Khorkavtsiv Ya. D., Lobachevs'ka O. V., Kyiak N. Ya. (2021). Involvement of DNA methylation in gravimorphogenesis of the mosses *Polytrichum arcticum* and *Physcomitrella patens*. Conference dedicated to the 75th anniversary of the Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, June 17), 203—205 [in Ukrainian].
35. Kittang A., Iversen T., Fossum K., et al. (2014). Exploration of plant growth and development using the European Modular Cultivation System facility on the International Space Station. *Plant Biol.*, **16**, 528—538. doi: 10.1111/plb.12132. Epub 2014 Jan 17 [in English].
36. Klymchuk D., Brown C., Chapman D. (2010). Ultrastructure organization of cells in soybean root tips in microgravity. *J. Gravit. Physiol.*, **6**, 97—98 [in English].
37. Kordyum E. (1994). Effects of altered gravity on plant cell processes: results of recent space and clinostatic experiments. *Adv. Space Res.*, **14**, № 8, 1477—1485. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90388-3](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90388-3) [in English].
38. Kordyum E. (2014). Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *Plant Biol.*, **16**, Suppl. 1, 79—90 [in English].
39. Kordyum E., Hasenstein K. (2021). Plant biology for space exploration — Building on the past, preparing for the future. *Life Sci. Space Res.*, **29**, 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.01.003> [in English].
40. Kordyum E., Artemenko O., Hasenstein K. (2022). Lipid rafts and plant gravisensitivity. *Life.*, **12**, № 11, 1809. <https://doi.org/10.3390/life12111809> [in English].
41. Kordyum E., Bulavin I., Vorobyova T. (2018). Clinorotation impacts the plasmalemma lipid bilayer and its functional domains—rafts in plant cells. *Front. Physiol. Environ. Aviation Space Physiol.*, 314—317. doi: 10.3389/conf.fphys.2018.26.00012 [in English].
42. Kordyum E., Chapman D., Brykov V. (2019). Plant cell development and aging may accelerate in microgravity. *Acta Astronautica*, **157**, 157—161 [in English].
43. Kordyum E. L., Klimenko O. M., Bulavin I. V., et al. (2018). Sensitivity of lipid rafts of plant cells to the influence of modulated microgravity (clinorotation). *Space Sci. Technol.*, **24**, № 4, 48—58. doi: <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.051> [In Ukrainian].
44. Kordyum E., Martin G., Zaslavsky V., et al. (1999). DNA content and differentiation of root apical cells of *Brassica rapa* plants grown in microgravity. *J. Gravit. Physiol.*, **6**, 119—120 [in English].
45. Kordyum E. L., Nedukha O. M., Grakhov V. P., et al. (2015). Investigations of the influence of modulated microgravity on the lipid bilayer of the cytoplasmic membrane of plant cells. *Space Sci. Technol.*, **21**, № 3, 40—47. <https://doi.org/10.15407/knit2015.03.040> [In Ukrainian].
46. Kozyrovska N., Reva O., Podolich O., et al. (2021). To other planets with upgraded millennial kombucha in rhythms of sustainability and health support. *Front. Astron. Space Sci.*, **8**, 182. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.701158> [in English].
47. Kraft M. (2013). Plasma membrane organization and function: moving past lipid rafts. *Mol. Biol. Cell.*, **24**, 2765—2768. doi: 10.1091/mbc.E13-03-0165 [in English].
48. Krisanova N., Pozdnyakova A., Pastukhov M., et al. (2019). Vitamin D3 deficiency in puberty rats causes presynaptic malfunctioning through alterations in exocytotic release and uptake of glutamate/GABA and expression of EAAC-1/GAT-3 transporters. *Food Chem. Toxicol.*, **123**, 142—150. doi: 10.1016/j.fct.2018.10.054 [in English].
49. Kyiak N. Ya., Lobachevs'ka O. V., Khorkavtsiv Ya. D. (2021). Morpho-physiological reactions of gravisensitivity and adaptation to UV-radiation of the moss *Bryum caespitium* Hedw. from Antarctica *Space Sci. Technol.*, **27**, № 5, 47—59. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.047> [in Ukrainian].
50. Lam C. W., Scully R. R., Zhang Y., et al. (2013). Toxicity of lunar dust assessed in inhalation-exposed rats. *Inhal. Toxicol.*, **12**, 661—678. doi: 10.3109/08958378.2013.833660 [in English].
51. Latch J., Hamilton R., Holian A., et al. (2008). Toxicity of lunar and Martian dust simulants to alveolar macrophages isolated from human volunteers. *Inhal. Toxicol.*, **20**, 157—165. doi: 10.1080/08958370701821219 [in English].
52. Lee I., Podolich O., Bertram B. (2022). Metagenome-assembled genomes of *Komagataeibacter* from kombucha exposed to Mars-like conditions reveal the secrets in tolerating extraterrestrial stresses. *J. Microbiol. Biotechnol.*, **32**, № 8, 967—975. doi: <https://doi.org/10.4014/jmb.2204.04009> [in English].
53. Lingwood D., Simons K. (2010). Lipid rafts as a membrane-organizing principle. *Science*, **327**, 46—50. doi: 10.1126/science.1174621 [in English].
54. Lobachevska O., Khorkavtsiv Ya., Kyyak N., et al. (2018). *Adaptive role of gravidependent morphological variability in mosses*. 34th Annual Meeting of the ASGSR. Abstracts. MD USA, Bethesda (October—November, 2018), 148—152 [in English].

55. Lobachevs'ka O. V., Kyiak N. Ya., Khorkavtsiv Ya. D. (2019). Morpho-functional peculiarities of the moss *Weissia tortilis* Spreng. protonemata cells with different gravisensitivity. *Space Sci. Technol.*, **25**, № 2, 60—70. doi: <https://doi.org/10.15407/knit2019.02.060> [In Ukrainian].
56. Lobachevska O., Kyiak N., Kordyum E., et al. (2021). The role of gravimorphoses in moss adaptation to extreme environment. *Ukr. Bot. J.*, **78**, № 1, 69—79. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj78.01.069> [in English].
57. Lobachevska O., Kyiak N., Kordyum E., et al. (2022). Gravi-sensitivity of mosses and their gravity-dependent ontogenetic adaptations. *Life*, **12**, № 11, 1782. <https://doi.org/10.3390/life12111782> [in English].
58. Lytvyn D., Olenieva V., Yemets A., et al. (2018). Histochemical analysis of tissue-specific acetylation of α -tubulin as a response for autophagy development in *Arabidopsis thaliana* induced by different stress factors. *Cytol. Genet.*, **52**, № 4, 245—252. doi:10.3103/S0095452718040 059 [in English].
59. Medina F.-J., Herranz R. (2010). Microgravity environment uncouples cell growth and cell proliferation in root meristematic cells: the mediator role of auxin. *Plant Signal. Behav.*, **5**, 176—178. doi: 10.4161/psb.5.2.10966 [in English].
60. Medina F.-J. (2020). Space explorers need to be space farmers: What we know and what we need to know about plant growth in space. *Mètode Science Studies J. Annu. Rev.*, **11**, 55—62. doi: <https://doi.org/10.7203/metode.11.14606> [in English].
61. Merkys A., Laurinavichius R. (1990). *Plant growth in space*. Fundamentals of Space Biology. Eds M. Asashima, G. M. Malacinski. Berlin: Springer-Verlag, 64—89 [in English].
62. Millar C., Johnson R., Edelman J., et al. (2011). An endogenous growth pattern of roots is revealed in seedlings grown in microgravity. *Astrobiology*, **11**, 787—797. doi: 10.1089/ast.2011.0699 [in English].
63. Newsham K., Robinson, S. (2009). Responses of plants in Polar Regions to UV-B exposure: a meta-analysis. *Global Change Biol.*, **15**, № 11, 2574—2589. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01944.x> [in English].
64. Obolenskaya M., Dotsenko V., Martsenyuk O., et al. (2021). A new insight into mechanisms of interferon alpha neurotoxicity: Expression of GRIN3A subunit of NMDA receptors and NMDA-evoked exocytosis. *Progress Neuro-Psychopharmacol. Biol. Psychiatry*, **110**, 110317. doi:10.1016/j.pnpbp.2021.110317 [in English].
65. Olenieva V., Lytvyn D., Yemets A., et al. (2017). Tubulin acetylation accompanies atophagy development induced by different abiotic stimuli in *Arabidopsis thaliana*. *Cell. Biol. Int.*, **43**, № 9, 1056—1064. doi: 10.1002/cbin.10843 [in English].
66. Olenieva V., Lytvyn D., Yemets A., et al. (2018). Expression of kinesins, involved in the development of autophagy in *Arabidopsis thaliana*, and the role of tubulin acetylation in the interaction of ATG8 protein with microtubules. *Factors Exp. Evol. Organisms*, **22**, 162—168. doi: <https://doi.org/10.7124/FEEO.v22.942> [in Ukrainian].
67. Orlovska I., Podolich O., Kukharenko O., et al. (2021). Bacterial cellulose retains robustness but its synthesis declines after exposure to a Mars-like environment simulated outside the International Space Station. *Astrobiology*, **21**, № 6, 706—717. doi: 10.1089/ast.2020.2332. [in English].
68. Orlovska I., Podolich O., Kukharenko O. et al. (2022). The conceptual approach to the use of postbiotics based on bacterial membrane nanovesicles for prophylaxis of astronauts health disorders. *Space Sci. Technol.*, **28**, № 6. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.000>. [in English].
69. Ott E., Kawaguchi Y., Kölbl D., et al. (2020). Molecular repertoire of *Deinococcus radiodurans* after 1 year of exposure outside the International Space Station within the Tanpopo mission. *Microbiome*, **8**, 150. doi: 10.1186/s40168-020-00927-5 [in English].
70. Paliienko K., Pastukhov A., Babič M., et al. (2020). Transient coating of γ -Fe₂O₃ nanoparticles with glutamate for its delivery to and removal from brain nerve terminals. *Beilstein J. Nanotechnol.*, **11**, 1381—1393. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.122> [in English].
71. Panitz C., Frösler J., Wingender J., et al. (2019). Tolerances of *Deinococcus geothermalis* biofilms and planktonic cells exposed to space and simulated martian conditions in low earth orbit for almost two years. *Astrobiology*, **19**, № 8, 979—994. doi: 10.1089/ast.2018.1913 [in English].
72. Pastukhov A., Borisova T. (2018a). Combined application of glutamate transporter inhibitors and hypothermia discriminates principal constituent processes involved in glutamate homo- and heteroexchange in brain nerve terminals. *Ther. Hypothermia Tem. Manag.*, **8**, № 3, 143—149. doi: 10.1089/ther.2017.0047 [in English].
73. Pastukhov A., Borisova T. (2018b). Levetiracetam-mediated improvement of decreased NMDA-induced glutamate release from nerve terminals during hypothermia. *Brain Res.*, **1699**, 69—78. doi: 10.1016/j.brainres.2018.06.032 [in English].
74. Pastukhov A. O., Krisanova N. V., Pozdnyakova N. G., et al. (2022). Development of neuroprotection approaches for long-term space missions. *Space Sci. Technol.*, **28**, № 6, 52—62. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.052> [in Ukrainian].
75. Paul A., Amalfitano C., Ferl. R. (2012). Plant growth strategies are remodeled by spaceflight. *BMC Plant Biology*, **12**, 232—255. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-232> [in English].
76. Paul A., Elardo S., Ferl R. (2022). Plants grown in Apollo lunar regolith present stress-associated transcriptomes that inform prospects for lunar exploration. *Communications Biol.*, **5**, 1—9, doi:10.1038/s42003-022-03334-8. 5.P [in English]

77. Podolich O., Kukharenko O., Haidak A., et al. (2019). Multimicrobial kombucha culture tolerates Mars-like conditions simulated on low-earth orbit. *Astrobiology*, **19**, № 2, 183–196. doi: 10.1089/ast.2017.1746 [in English].
78. Podolich O., Kukharenko O., Zaets I., et al. (2020). Fitness of outer membrane vesicles from *Komagataeibacter intermedius* is altered under the impact of simulated Mars-like stressors outside the International Space Station. *Front Microbiol.*, **26**, № 11, 1268. doi: 10.3389/fmicb.2020.01268 [in English].
79. Polulyakh Yu., Zhadko S., Klimchuk D. (1989). Plant cell plasma membrane structure and properties under clinostating. *Adv. Space Res.*, **9**, 71–74 [in English].
80. Poulet L., Zeidler C., Bunchek J., et al. (2021). Crew time in a space greenhouse using data from analog missions and Veggie. *Life Sci. Space Res.*, **31**, 101–112. doi: 10.1016/j.lssr.2021.08.002 [in English].
81. Pozdniakova N. H., Pastukhov A. O., Dudarenko M. V., et al. (2018). Enrichment of the inorganic analogue of martian dust with the novel carbon nanoparticles obtained during combustion of carbohydrates and assesment of its neurotoxicity. *Space Sci. Technol.*, **24**, № 2, 60–71. <https://doi.org/10.15407/knit2018.02.060> [in Ukrainian].
82. Pozdnyakova N., Dudarenko M., Borisova T. (2019). Age-dependency of levetiracetam effects on exocytotic GABA release from nerve terminals in the hippocampus and cortex in norm and after perinatal hypoxia. *Cell. Mol. Neurobiology*, **39**, 701–714. doi: 10.1007/s10571-019-00676-6 [in English].
83. Prasad B., Richter R., Vadakedath N., et al. (2020). Exploration of space to achieve scientific breakthroughs. *Biotechnol. Adv.*, **43**, 107572 <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107572> [in English].
84. Rawat N., Singla-Pareek S., Pareek A. (2021). Membrane dynamics during individual and combined abiotic stresses in plants and tools to study the same. *Physiol. Plant.*, **171**, 653–676. doi:10.1111/ppl.13217 [in English].
85. Reva O. N., Zaets I. E., Ovcharenko L. P., et al. (2015). Metabarcoding of the kombucha microbial community grown in different microenvironments. *AMB Express*, **5**, № 1, 35. doi: 10.1186/s13568-015-0124-5 [in English].
86. Roychoudhry S., Bianco M., Kieffer M., et al. (2013). Auxin control gravitropic setpoint angle in higher plant lateral branches. *Curr. Biol.*, **23**, 1497–1504. [in English]
87. Sack F. (1991). Plant gravity sensing. *Int. Rev. Cytol.*, **127**, 193–252. doi: 10.1016/s0074-7696(08)60695-6 [in English].
88. Sack F. (1993). Gravitropism in protonemata of the moss *Ceratodon*. *Bull. Torrey Bot. Club*, **25**, 36 – 44 [in English].
89. Sancho L.G, de la Torre R., Horneck G., et al. (2007). Lichens survive in space: results from the 2005 LICHENS experiment. *Astrobiology*, **7**, № 3, 443–454. doi: 10.1089/ast.2006.0046 [in English].
90. Schwuchow J., Kim D., Sack F. (1995). Caulonemal gravitropism and amyloplast sedimentation in the moss *Funaria*. *Can. J. Bot.*, **73**, 1029–1035. DOI: 10.1139/b95-112 [in English].
91. Schwuchow J., Kern V., White N., et al. (2002). Conservation of the plastid sedimentation zone in all moss genera with known gravitropic protonemata. *J. Plant Growth Regul.*, **21**, 146–155. doi: 10.1007/s003440010048 [in English].
92. Shadrina R. Y., Horyunova I. I., Blume Ya. B., Yemets A. I. (2020). Autophagosome formation and transcriptional activity of ATG8 genes in *Arabidopsis* root cells during the development of autophagy under microgravity conditions. *Reports NAS of Ukraine*, **9**, 77–85. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.09.077> [in Ukrainian].
93. Shadrina R.Y., Yemets A.I., Blume Ya.B. (2019). Development of autophagy as an adaptive response of *Arabidopsis thaliana* plants to microgravity conditions. *Factors Exp. Evolution Organisms*, **25**, 327–332. <https://doi.org/10.7124/FEEO.v25.1186> [in Ukrainian].
94. Sieber M., Hanke W., Kohn F. (2014). Modification of membrane fluidity by gravity. *Open J. Biophysics*, **4**, 105–111. DOI: 10.1139/b95-112 [in English].
95. Sieber M., Kaltenbach S., Hanke W., et al. (2016). Conductance and capacity of plain lipid membranes under conditions of variable gravity. *J. Biomed. Sci. Engineering*, **9**, № 8, 361–366. doi:10.4236/jbise.2016.98031 [in English].
96. Slenska K., Kordyum E. (1995). Gravity, cellular membranes and associated processes: an introduction. *Adv. Space Res.*, **17**, № 6/7, 141–142. doi: 10.1016/0273-1177(95)00626-p [in English].
97. Sroka Z. (2005). Antioxidative and antiradical properties of plant phenolics. *J. Biosci.*, **60**, 833–843. <https://doi.org/10.1515/znc-2005-11-1204> [in English].
98. Wheeler R. (2010). Plants for human life support in space: From Myers to Mars. *Gravit. Space Res.*, **23**, 25–35 [in English].
99. Wheeler R. (2017). Agriculture for space: people and places paving the way. *Open Agriculture*, 14–32. DOI: 10.1515/opag-2017-0002 [in English].
100. Wink M. (1993). The plant vacuole: a multifunctional compartment. *J. Exp. Bot.*, **44**, 231–246 [in English].
101. Wolverton C., Kiss J. (2009). An update on plant space biology. *Gravit. Space Biol.*, **22**, 13–20 [in English].
102. Yamagishi A., Kawaguchi Y., Hashimoto H. (2018). Environmental data and survival data of *Deinococcus aetherius* from the Exposure Facility of the Japan Experimental Module of the International Space Station obtained by the Tanpopo mission. *Astrobiology*, **18**, 1369–1374. Bibcode:2018AsBio..18.1369Y. doi:10.1089/ast.2017.1751 [in English].
103. Yemets A., Shadrina R., Horyunova I., et al. (2020). Development of autophagy in plant under cells under microgravity: The role of microtubules and ATG8 proteins in autophagosome formation. *Space Research in Ukraine*. Kyiv: Academperiodica, 79–84 [in English].

104. Yu M., Cui Y. N., Zhang X., et al. (2020). Organization and dynamics of functional plant membrane microdomains. *Cell. Mol. Life Sci.*, **77**, 275–287. doi:10.1007/s00018-019-03270-7 [in English].
105. Zabel P., Bamseya M., Schubert D., Tajmar M. (2016). Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. *Life Sci. Space Res.*, **10**, 1–16. doi: 10.1016/j.lssr.2016.06.004 [in English].
106. Zhao J., Dixon R. (2013). AMATE transporters facilitate vacuolar uptake of epicatechin 3'-O-glucoside for proanthocyanidin biosynthesis in *Medicago truncatula* and *Arabidopsis*. *Plant Cell*, **21**, 2323–2340. doi: 10.1105/tpc.109.067819 57 [in English].

Стаття надійшла до редакції 12.12.2022

Після доопрацювання 12.12.2022

Прийнято до друку 17.12.2022

Received 12.12.2022

Revised 12.12.2022

Accepted 17.12.2022

E. L. Kordyum, Prof., Dr. Biol. Sci., Corresponding Member of NAS of Ukraine

E-mail: cellbiol@ukr.net

M. G. Kholodny Institute of Botany of the National Academy of Sciences of Ukraine

2 Tereshchenkivska st., Kyiv, 01601 Ukraine

SPACE BIOLOGY PROJECTS IN UKRAINE: NOWADAYS TRENDS

We present a brief overview of the results of the implementation of biological projects conducted in frame of the Target program of the National Academy of Sciences of Ukraine for scientific space research (2018–2022) and their contribution to the current fields of world space biology: astrobiology, cellular and molecular biology, plant biology, animal biology, and gravitational biology.

Keywords: animal biology, astrobiology, cellular and molecular biology, gravitational biology, plant biology.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.01.052>

УДК 539.3: 624.074

К. В. АВРАМОВ¹, зав. відділу надійності та динамічної міцності, д-р техн. наук, проф.

E-mail: kvavramov@gmail.com

Б. В. УСПЕНСЬКИЙ¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

І. І. ДЕРЕВ'ЯНКО², нач. групи, канд. техн. наук

М. О. ДЕГТЯРЬОВ², Генеральний конструктор — Перший заступник Генерального директора, канд. техн. наук

О. Ф. ПОЛІЩУК¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

М. В. ЧЕРНОБРИВКО¹, пров. наук. співроб., д-р техн. наук

E-mail: chernobryvko@ipmach.kharkov.ua

¹ Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України
вул. Пожарського 2/10, Харків, Україна, 61064

² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПЗИТНИХ ТА ТРИШАРОВИХ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ АЕРОКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДАМИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Нанокompозитні та тришарові пластини із стільниковим заповнювачем мають високі характеристики міцності, а елементи конструкцій з таких матеріалів мають малу вагу, тому вони надзвичайно перспективні для аерокосмічної техніки та літакобудування. У статті подано математичну модель циліндричної нанокompозитної функціонально-градієнтної оболонки при її взаємодії з надзвуковим газовим потоком. Для отримання моделі використано метод заданих форм. Отримано систему нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, що описує автоколивання. Для аналізу автоколиваний модель конструкції враховує геометричну нелінійність.

Подано модель автоколиваний тришарової конічної оболонки, що взаємодіє з надзвуковим газовим потоком. Середній шар оболонки є стільниковим заповнювачем, що виготовлений методами адитивних технологій. Для моделювання напруженого стану використано теорію зсуву високого порядку. Напружений стан кожного шару описується п'ятьма координатами: трьома проєкціями переміщень серединної поверхні та двома кутами повороту нормалі до серединної поверхні. У місцях склеювання шарів використовуються граничні умови рівності проєкцій переміщень. Для опису автоколиваний конструкції враховується модель геометрично нелінійного деформування. Внаслідок використання методу нормальних форм отримано нелінійну автономну динамічну систему. Наведено результати чисельного моделювання автоколиваний. Для їхнього розрахунку розв'язується нелінійна крайова задача для системи звичайних диференціальних рівнянь поєднанням методів пристрілки та продовження розв'язування по параметру.

Розглянуто підхід до експериментальних досліджень втомі тришарових пластин із стільниковим заповнювачем. Викладено методикку випробувань на втомі тришарових пластин. Результати випробувань представлено на діаграмах Веллера.

Ключові слова: нанокompозит, функціонально-градієнтний матеріал, оболонка, сандвіч-оболонка, стільниковий заповнювач, адитивні технології, автоколивання.

Цитування: Аврамов К. В., Успенський Б. В., Дерев'янко І. І., Дегтярьов М. О., Поліщук О. Ф., Чернобривко М. В. Динамічні властивості нанокompозитних та тришарових тонкостінних елементів аерокосмічної техніки, виготовлених методами адитивних технологій. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 1 (140). С. 52—64. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.052>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

ВСТУП

Сучасний міжнародний ринок космічних літальних апаратів є надзвичайно конкурентним. Останнім часом багато елементів ракет-носіїв виготовляються з композитних матеріалів. Для підсилення характеристик міцності композиту застосовується метод армування матеріалу матриці нанотрубками. Справа в тому, що механічні характеристики нанотрубок на декілька порядків вищі ніж у сталі [2, 4, 10]. Тому цей матеріал дуже ефективний для армування композитів. Отриманий нанокompозит є міцним та легким, що надзвичайно важливо для ракетної техніки.

В наш час для виготовлення окремих елементів конструкцій в аерокосмічній галузі все більше починають використовуватися адитивні технології. При виготовленні деталей шляхом використання адитивних технологій можливо отримувати всередині виробу порожнисті області, що дозволяє значно полегшити конструкцію. Тонкостінні композитні елементи ракет-носіїв, незважаючи на малу товщину виробу, також виготовляються з використанням адитивних технологій.

Розрахункові методи, що ґрунтуються на результатах експериментальних досліджень, відіграють важливу роль у розвитку теорії нанокompозитів, оскільки вони допомагають зрозуміти поведінку тонкостінних конструкцій із цих матеріалів. Пружні ефективні характеристики нанокompозиту отримані експериментально у роботі [20]. Експериментальні результати у статті порівнюються з даними розрахунку, отриманими методом Морі — Танака. Ефективні механічні характеристики нанокompозиту розраховуються за допомогою 3D-наномасштабного методу репрезентативних об'ємів [16]. Метод отримання визначальних рівнянь композитів з полімерної матриці, посиленої нанотрубками, пропонується у роботі [18]. Результати тестів на розтяг зразків з нанокompозитів розглядаються в роботі [1]. Тут показано, що зі збільшенням кількості нанотрубок у матриці композитного матеріалу, модуль Юнга і границя міцності значно збільшуються. Жорсткість нанокompозитних матеріалів експериментально визначається в роботі [13].

Новизною роботи є побудовані нові математичні моделі та результати дослідження динамічної поведінки тонкостінних конструкцій з нових матеріалів. Серед цих матеріалів — нанокompозити та тришарові композити зі стільниковим заповнювачем, надрукованим за адитивними технологіями.

Запропоновано підхід до експериментального дослідження втомних характеристик тришарових композитів зі стільниковим заповнювачем, отриманим за адитивними технологіями.

МОДЕЛІ ТОНКОСТІННИХ НАНОКОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Тонкостінні конструкції з нанокompозитних матеріалів, що складаються з конічних та циліндричних оболонок, досліджувалися в роботах [3, 5, 7, 19, 22].

Тут ми розглянемо циліндричну оболонку постійної товщини h (рис. 1) та заданої довжини L , що взаємодіє з надзвуковим газовим потоком. Нелінійна динаміка оболонки розглядається в циліндричній системі координат, пов'язаній із серединною поверхнею оболонки. Поздовжня та окружна координати позначаються x та θ відповідно. Поперечна координата позначається z ,

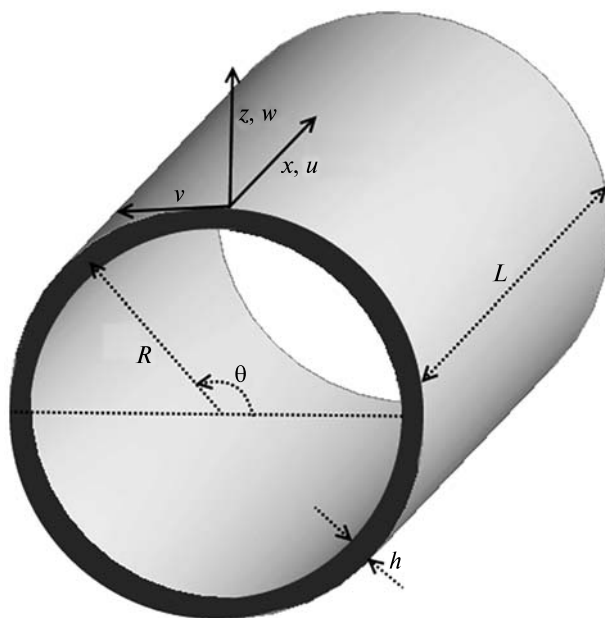


Рис. 1. Ескіз циліндричної оболонки

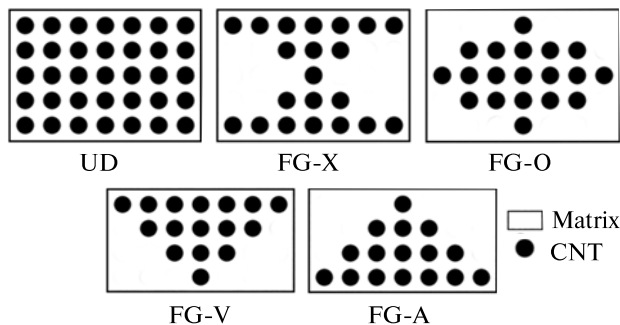


Рис. 2. Типи посилення композиту нанотрубками

вона спрямована назовні оболонки. Динамічна нестійкість циліндричної оболонки при її взаємодії з надзвуковим газовим потоком досліджується числовими методами. Динамічна нестійкість призводить до зростання амплітуд коливань, а внаслідок такого зростання амплітуд виникає геометрично нелінійне деформування конструкції і, як наслідок, виникають автоколивання.

Три проєкції переміщень серединної поверхні позначимо через u, v, w . Приймається, що матеріал конструкції перебуває в області пружності, тоді справедливий закон Гука. Наноккомпозит, що розглядається, є функціонально градієнтним матеріалом, тобто механічні характеристики композиту є функцією поперечної координати z .

Усі нанотрубки, що армують конструкцію, розташовані паралельно між собою. Розглядалися п'ять видів армування наноккомпозиту у поперечному напрямку (рис. 2). Армування типу UD означає випадок рівномірного розміщення нанотрубок у поперечному напрямку оболонки. Інші типи армування нанотрубками у поперечному напрямку позначено як FGV, FGL, FGX і FGO. Частина об'єму, зайнята нанотрубками, позначається через V_{CNT} . Залежність зайнятого нанотрубками об'єму від координати z позначається через $V_{CNT}(z)$. Ці види армування докладно розглянуті у роботі [3].

Механічні характеристики наноккомпозитного матеріалу розраховуються згідно з правилом сумішей [21]:

$$E_{11}(z) = \eta_1 V_{CNT}(z) E_{11}^{CNT} + V_m(z) E^m,$$

$$E_{22}(z) = \frac{\eta_2 E_{22}^{CNT} E^m}{V_{CNT}(z) E^m + V_m(z) E_{22}^{CNT}},$$

$$G_{12}(z) = \frac{\eta_3 G_{12}^{CNT} G^m}{V_{CNT}(z) G^m + V_m(z) G_{12}^{CNT}}, \quad (1)$$

$$\mu_{12}(z) = V_{CNT}(z) \mu_{12}^{CNT} + V_m(z) \mu^m,$$

$$\mu_{21}(z) = \frac{\mu_{12}(z)}{E_{11}(z)} E_{22}(z),$$

$$\rho(z) = V_{CNT}(z) \rho^{CNT} + V_m(z) \rho^m,$$

$$V_m(z) = 1 - V_{CNT}(z),$$

де $E_{11}^{CNT}, E_{22}^{CNT}, G_{12}^{CNT}$ — модулі Юнга та зсуву нанотрубок; μ_{12}^{CNT} — коефіцієнт Пуассона; η_1, η_2, η_3 — параметри ефективності; E^m, G^m — модуль Юнга та зсуву матриці; ρ^{CNT}, ρ^m — щільність матеріалу нанотрубок та матриці відповідно.

Закон Гука для цього композиту

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}(z) & Q_{12}(z) \\ Q_{12}(z) & Q_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{\theta\theta} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta z} = G_{23}(z) \gamma_{\theta z},$$

$$\sigma_{xz} = G_{13}(z) \gamma_{xz},$$

$$\sigma_{x\theta} = G_{12}(z) \gamma_{x\theta},$$

$$Q_{11}(z) = \frac{E_{11}(z)}{1 - \mu_{12} \mu_{21}},$$

$$Q_{22}(z) = \frac{E_{22}(z)}{1 - \mu_{12} \mu_{21}},$$

$$Q_{12}(z) = \frac{\mu_{21}(z) E_{11}(z)}{1 - \mu_{12}(z) \mu_{21}(z)},$$

де $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{\theta\theta}, \gamma_{\theta z}, \gamma_{xz}, \gamma_{x\theta}$ — елементи тензора деформацій; $\sigma_{xz}, \sigma_{\theta z}, \sigma_{xx}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{x\theta}$ — елементи тензора напружень.

Проекції динамічних переміщень точок циліндричної оболонки на відстані z від серединної поверхні на координатні осі x, θ, z позначимо $u_x(x, \theta, t, z), u_\theta(x, \theta, t, z), u_z(x, \theta, t, z)$. Ці компоненти мають вигляд [5, 7]

$$u_x(x, \theta, t, z) = u(x, \theta, t) + z \phi_1(x, \theta, t) + z^2 \psi_1(x, \theta, t) + z^3 \gamma_1(x, \theta, t),$$

$$u_\theta(x, \theta, t, z) = \left(1 + \frac{z}{R}\right) v(x, \theta, t) +$$

$$+ z \phi_2(x, \theta, t) + z^2 \psi_2(x, \theta, t) + z^3 \gamma_2(x, \theta, t), \quad (3)$$

$$u_z(x, \theta, t, z) = w(x, \theta, t),$$

де R — радіус серединної поверхні циліндричної оболонки; u, v, w — проекції перемішень точок серединної поверхні на координатні осі; ϕ_1, ϕ_2 — кути повороту нормалі до серединної поверхні.

Параметри розкладу (3) ψ_1, ψ_2, γ_1 та γ_2 визначаються з граничних умов, що описують рівність нулю компонентів тензора напружень на зовнішній та внутрішній сторонах оболонки.

Потенціальна енергія циліндричної оболонки дорівнює

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-0.5h}^{0.5h} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{\theta\theta} \varepsilon_{\theta\theta} + \sigma_{\theta z} \gamma_{\theta z} + \sigma_{xz} \gamma_{xz} + \sigma_{x\theta} \gamma_{x\theta})(R+z) dz d\theta dx. \quad (4)$$

Кінетичну енергію циліндричної оболонки представимо як

$$T = 0.5 \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-0.5h}^{0.5h} \rho(z) (\dot{u}_x^2 + \dot{u}_\theta^2 + \dot{u}_z^2) \left(1 + \frac{z}{R}\right) dz dx R d\theta, \quad (5)$$

де

$$\dot{u}_x = \frac{\partial u_x}{\partial t}, \quad \dot{u}_\theta = \frac{\partial u_\theta}{\partial t}, \quad \dot{u}_z = \frac{\partial u_z}{\partial t}.$$

Конструкція взаємодіє з надзвуковим газовим потоком, який описується поршневою теорією. Тиск моделюється функцією

$$p = -\frac{\gamma p_\infty M_*^2}{\sqrt{M_*^2 - 1}} \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{M_*^2 - 2}{M_* a_\infty (M_*^2 - 1)} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{w}{2R\sqrt{M_*^2 - 1}} \right], \quad (6)$$

де γ — адіабатичний показник, p_∞ — динамічний тиск, M_* — число Маха, a_∞ — швидкість звуку.

Пять координат оболонки запишемо у вигляді

$$w = \sum_{m=1}^{N_1} [A_m(t) \cos(n\theta) + B_m(t) \sin(n\theta)] \sin(\lambda_m x) + \sum_{m=1}^{N_2} C_m(t) \sin(\lambda_{2m-1} x),$$

$$u = \sum_{m=1}^{N_1} [A_{N_1+m}(t) \cos(n\theta) + B_{N_1+m}(t) \sin(n\theta)] \cos(\lambda_m x) + \sum_{m=1}^{N_2} C_{N_2+m}(t) \cos(\lambda_{2m-1} x),$$

$$v = \sum_{m=1}^{N_1} [A_{2N_1+m}(t) \cos(n\theta) + B_{2N_1+m}(t) \sin(n\theta)] \sin(\lambda_m x), \quad (7)$$

$$\phi_1 = \sum_{m=1}^{N_1} [A_{3N_1+m}(t) \cos(n\theta) + B_{3N_1+m}(t) \sin(n\theta)] \cos(\lambda_m x) + \sum_{m=1}^{N_2} C_{2N_2+m}(t) \cos(\lambda_{2m-1} x),$$

$$\phi_2 = \sum_{m=1}^{N_1} [A_{4N_1+m}(t) \cos(n\theta) + B_{4N_1+m}(t) \sin(n\theta)] \sin(\lambda_m x),$$

де $\mathbf{q} = [A_1, \dots, A_{3N_1}, B_1, \dots] \equiv [q_1, \dots, q_N]$ — узагальнені координати.

Застосовуючи метод заданих форм, розкладання (7) застосовуються до потенціальної та кінетичної енергій системи. В результаті після інтегрування ці енергії є поліноміальними функціями узагальнених координат та узагальнених швидкостей. Використовуючи ці вирази для енергії, отримуємо рівняння Лагранжа руху системи, яке набуває вигляду

$$\sum_{j=1}^{N_i} (m_{ij} \ddot{q}_j + K_{ij} q_j) = \sum_{v=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{j \leq v} \alpha_{vj}^{(i)} q_v q_j + \sum_{v=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{j \leq v} \sum_{h=1}^{h \leq j} \beta_{vjh}^{(i)} q_v q_j q_h + Q_i, \quad (8)$$

де Q_i — узагальнені сили надзвукового газового потоку.

Автоколивання в динамічній системі (8) досліджувалися за допомогою алгоритмів продовження, розглянутих у роботі [9]. Результати такого аналізу буде подано нижче на біфуркаційній діаграмі.

МОДЕЛІ ТРИШАРОВИХ ОБОЛОНОК ІЗ СТЬЛЬНИКОВИМИ НАПОВНЮВАЧАМИ, ВИГОТОВЛЕНИМИ ЗА АДДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Приклад тришарової зрізаної конічної оболонки зображено на рис. 3. Середній шар конічної оболонки є стільниковим наповнювачем. Він виготовлений адитивними FDM-технологіями із ма-

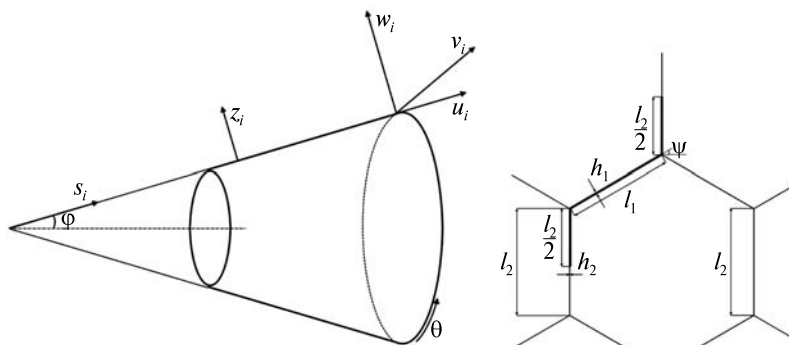


Рис. 3. Тришарова конічна оболонка та стільниковий заповнювач

теріалу ULTEM 9085 [6, 11, 14, 15, 17]. Верхній та нижній шари конічної оболонки виготовлено з вуглепластику. Основні геометричні параметри стільника позначено на рис. 3.

Досліджується динамічна нестійкість та автоколивання тришарової конічної оболонки у надзвуковому газовому потоці. Для опису напруженого стану конструкції задаються три системи координат, пов'язані з серединними поверхнями кожного шару, $(s_i, \theta, z_i), (s_c, \theta, z_c), (s_b, \theta, z_b)$. Тут θ — окружна координата; z_t, z_b, z_c — поперечні координати верхнього, середнього та нижнього шарів; s_t, s_c, s_b — поздовжні координати відповідних прошарків. Три поздовжні осі можна замінити однією: $\xi = s_i - s_i^{(1)}; i = t, b, c$, де $s_t^{(1)}, s_c^{(1)}, s_b^{(1)}$ — значення поздовжніх координат на лівому боці оболонки. Тоді динамічний стан конструкції аналізується у трьох системах координат $(z_i; \xi; \theta); i = t, c, b$. Радіуси кривизни серединних поверхонь шарів позначимо через $R_\theta^{(j)}; R_s^{(j)}; j = t, c, b$, а параметри Ляме позначимо $A_s^{(j)}; A_\theta^{(j)}$.

Стільниковий заповнювач перетворюється на еквівалентне суцільне ортотропне середовище. Закон Гука цього ортотропного середовища представимо так:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{ss}^{(c)} \\ \sigma_{\theta\theta}^{(c)} \\ \sigma_{zz}^{(c)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{ss}^{(c)} \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(c)} \\ \varepsilon_{zz}^{(c)} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\theta z}^{(c)} = C_{44} 2\varepsilon_{\theta z}^{(c)}, \quad \sigma_{sz}^{(c)} = C_{55} 2\varepsilon_{sz}^{(c)}, \quad \sigma_{s\theta}^{(c)} = C_{66} 2\varepsilon_{s\theta}^{(c)},$$

де

$\sigma_{ss}^{(c)}, \sigma_{\theta\theta}^{(c)}, \sigma_{zz}^{(c)}, \sigma_{\theta z}^{(c)}, \sigma_{sz}^{(c)}, \sigma_{s\theta}^{(c)}, \varepsilon_{ss}^{(c)}, \varepsilon_{\theta\theta}^{(c)}, \varepsilon_{zz}^{(c)}, \varepsilon_{\theta z}^{(c)}, \varepsilon_{sz}^{(c)}, \varepsilon_{s\theta}^{(c)}$ — елементи тензорів напружень та деформацій еквівалентного суцільного середовища.

Величини C_{11}, C_{12}, \dots визначаються із скінченно-елементних розрахунків, представлених у роботі [23].

Дві лицьові сторони конічної оболонки виготовлено із вуглепластиків. Вони мають однакові пружні властивості. Закон Гука для цих шарів можна подати у вигляді

$$\begin{bmatrix} \sigma_{ss}^{(j)} \\ \sigma_{\theta\theta}^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{ss}^{(j)} \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(j)} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\sigma_{s\theta}^{(j)} = 2\bar{C}_{33}\varepsilon_{s\theta}^{(j)}, \quad \sigma_{sz}^{(j)} = 2\bar{C}_{44}\varepsilon_{sz}^{(j)}, \quad \sigma_{\theta z}^{(j)} = 2\bar{C}_{55}\varepsilon_{\theta z}^{(j)},$$

$$j = b, t,$$

де

$\sigma_{ss}^{(i)}, \sigma_{\theta\theta}^{(i)}, \sigma_{s\theta}^{(i)}, \sigma_{sz}^{(i)}, \sigma_{\theta z}^{(i)}, \varepsilon_{ss}^{(i)}, \varepsilon_{\theta\theta}^{(i)}, \varepsilon_{s\theta}^{(i)}, \varepsilon_{sz}^{(i)}, \varepsilon_{\theta z}^{(i)}, i = t; b$ — елементи тензорів напружень та деформацій верхньої та нижньої лицьової сторони.

Проекції переміщень верхніх та нижніх шарів

$$u_1^{(i)}; u_2^{(i)}; u_3^{(i)} \quad (i = t, b)$$

мають вигляд

$$u_1^{(i)} = u^{(i)} + z_i \phi_1^{(i)} + z_i^2 \psi_1^{(i)},$$

$$u_2^{(i)} = \left(1 + \frac{z_i}{(s_i^{(1)} + \xi) \operatorname{tg} \varphi} \right) v^{(i)} + z_i \phi_2^{(i)} + z_i^2 \psi_2^{(i)}, \quad (11)$$

$$u_3^{(i)} = w^{(i)}; i = t, b,$$

де $u^{(i)}, v^{(i)}, w^{(i)}$ — проєкції переміщень серединних поверхонь шарів на координатні осі; $\phi_1^{(i)}, \phi_2^{(i)}$ — кути повороту нормалей до серединних поверхонь.

Проєкції переміщень еквівалентного ортотропного шару $u_1^{(c)}, u_2^{(c)}, u_3^{(c)}$ дорівнюють

$$\begin{aligned} u_1^{(c)} &= u^{(c)} + z_c \phi_1^{(c)} + z_c^2 \psi_1^{(c)} + z_c^3 \gamma_1^{(c)}, \\ u_2^{(c)} &= \left(1 + \frac{z_c}{(s_c^{(1)} + \xi) \operatorname{tg} \varphi} \right) v^{(c)} + \\ &\quad + z_c \phi_2^{(c)} + z_c^2 \psi_2^{(c)} + z_c^3 \gamma_2^{(c)}, \\ u_3^{(c)} &= w^{(c)} + z_c w_1^{(c)} + z_c^2 w_2^{(c)}, \end{aligned} \quad (12)$$

де $u^{(c)}, v^{(c)}, w^{(c)}$ — проєкції переміщень точок серединної поверхні еквівалентного ортотропного шару; $\phi_1^{(c)}, \phi_2^{(c)}$ — кути повороту нормалей до серединної поверхні; $\psi_1^{(c)}, \psi_2^{(c)}, \gamma_1^{(c)}, \gamma_2^{(c)}, w_1^{(c)}, w_2^{(c)}$ — невідомі функції, що визначаються з граничних умов.

Для подальшого розв'язування задачі застосовується підхід, викладений вище. Записується потенціальна та кінетична енергії системи. Розклади узагальнених переміщень записуються у вигляді (7). Внаслідок застосування методу заданих форм отримуємо динамічну систему типу (8). Для дослідження автоколивань застосовується метод продовження розв'язків [9].

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКОСТІННИХ НАНОКОМПОЗИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розглянемо результати моделювання автоколивань циліндричної оболонки з нанокompозиту у надзвуковому газовому потоці. Механічні характеристики вуглецевих нанотрубок та композитної матриці приймалися такими:

$$\begin{aligned} E_{11}^{CNT} &= 5.6466 \text{ ТПа}, \quad E_{22}^{CNT} = 7.08 \text{ ТПа}, \\ G_{12}^{CNT} &= 1.9445 \text{ ТПа}, \quad \mu_{12}^{CNT} = 0.175, \\ \rho^{CNT} &= 1400 \text{ кг/м}^3, \quad E^m = 2.5 \text{ ГПа}, \\ \mu^m &= 0.34, \quad \rho^m = 1150 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Геометричні параметри оболонки такі:

$$R = 0.25 \text{ м}, \quad h = 5 \text{ мм}, \quad \frac{h}{R} = 0.02, \quad L = 1 \text{ м}.$$

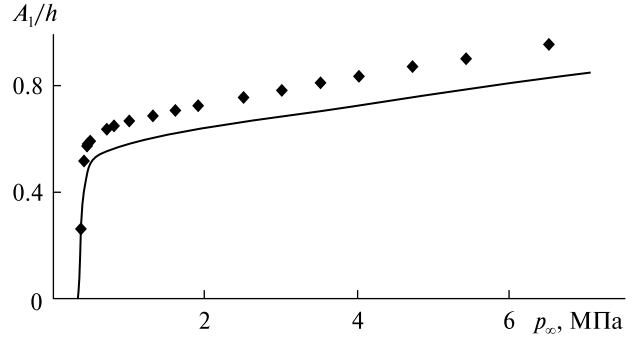


Рис. 4. Біфуркаційна діаграма автоколивань

Параметри динамічної системи (8) визначалися розрахунково. Нелінійна динамічна система досліджувалася шляхом спільного використання методу продовження та методу гармонійного балансу [10]. Отримані результати порівнювалися з результатами прямого числового інтегрування рівнянь (8).

Розглядалася циліндрична оболонка з UD-армуванням нанотрубками та величиною концентрації нанотрубок у матриці $V_{CNT}^* = 0.12$. Величини параметрів оболонки приймалися [3, 21]. Надзвуковий газовий потік визначається такими параметрами: $\gamma = 1.4$; $a_\infty = 213.36$ м/с; $M_\infty = 3$. Параметр n у розкладі (7) приймався $n = 6$. Результати розрахунків узагальнено на біфуркаційній діаграмі.

На рис. 4 представлено залежність амплітуди A_1 автоколивань $q_1(t)$ від динамічного тиску надзвукового потоку p_∞ . Для розрахунку цієї кривої застосовувалося поєднання методів пристрілки та продовження розв'язку [8, 12]. Тривіальний стан рівноваги динамічної системи (8) $q_j \equiv 0$ є стійким при $p_\infty < 0.32$ МПа. Біфуркація Хопфа спостерігається при $p_\infty = 0.32$ МПа. Внаслідок цієї біфуркації тривіальний стан рівноваги втрачає стійкість і народжуються автоколивання. Розмахи цих автоколивань показано суцільною лінією на рис. 4. Вони описують радіальні автоколивання циліндричної оболонки. Зазначимо, що зі збільшенням p_∞ амплітуда автоколивань збільшується. Для верифікації отриманих результатів виконувалося пряме числове інтегрування динамічної системи (8). Результати прямого інтегрування зображено ромбами на

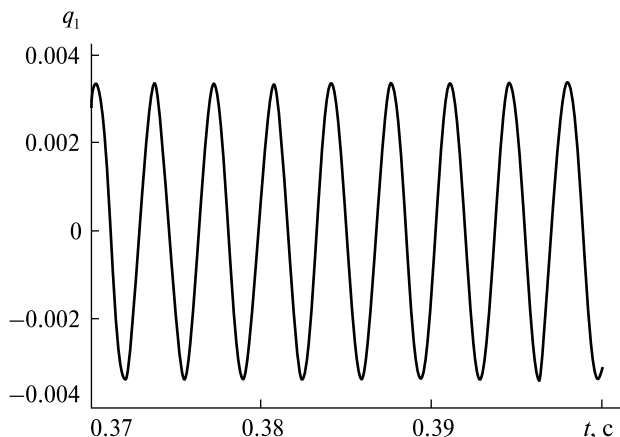


Рис. 5. Періодичні автоколивання конструкції

рис. 4. Отже, результати, отримані двома різними методами, близькі.

На рис. 5 показано періодичні автоколивання конструкції $q_1(t)$ при $p_\infty = 1$ МПа. Як видно, автоколивання є моногармонічними.

ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРИШАРОВИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДАМИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У цьому розділі представлені результати моделювання автоколивань консольної конічної оболонки, які виникають при взаємодії надзвукового потоку з сандвіч-оболонкою при її геометрично нелінійному деформуванні. Параметри надзвукового потоку (6) приймалися такими: $\gamma = 1.4$; $a_\infty = 213.36$ м/с; $\beta = 0$. Нелінійна динамічна система (8), яка описує автоколивання, має 21 ступінь свободи. Вона досліджується числовим методом за допомогою алгоритму, в якому поєднується реалізація методу пристрілки та алгоритм методу продовження рішення. Результати моделювання динамічної поведінки конструкції, що встановилася, приведено на біфуркаційній діаграмі (рис. 6). На діаграмі представлено залежність $\max(q_1/h_c)$ від p_∞ . Стійкий стани, що встановилися, показано суцільною лінією, а нестійкі — пунктирною.

Розглянемо динамічну поведінку конструкції, що показано на рис. 6. При будь-якому значенні p_∞ спостерігається тривіальний стан рівноваги, який описується прямою AB . У точці H спостері-

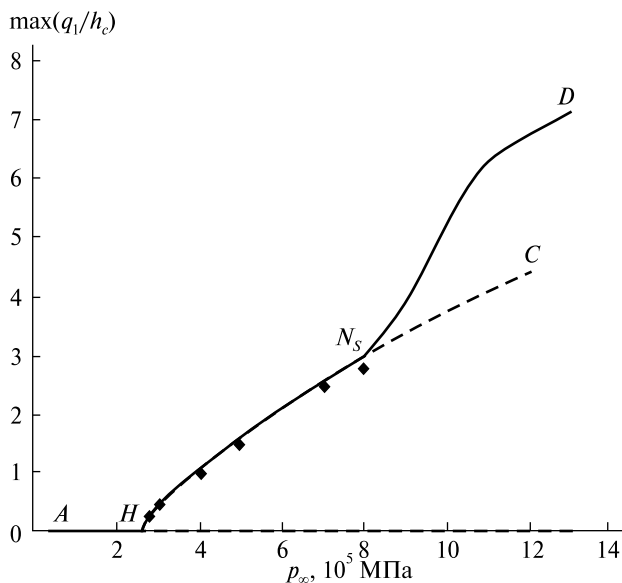


Рис. 6. Біфуркаційна діаграма автоколивань консольної оболонки при $M = 1.5$

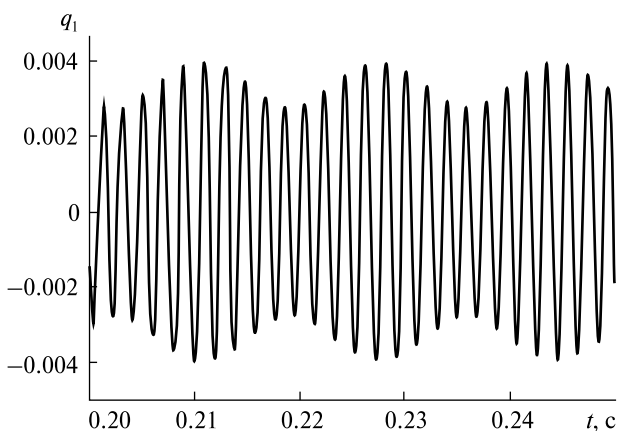


Рис. 7. Квазіперіодичні коливання $q_1(t)$ при тиску $p_\infty = 9 \cdot 10^5$ Па

гається біфуркація Хопфа. Внаслідок цієї біфуркації стійкий стан рівноваги AH перетворюється на нестійку рівновагу HB та відокремлюються стійкі автоколивання, які описуються кривою HN_s . У точці N_s спостерігається біфуркація Неймарка — Сакера. Тоді стійкий граничний цикл стає нестійким, і у точці N_s відокремлюються стійкі квазіперіодичні коливання. Амплітуди таких квазіперіодичних коливань описуються кривою N_sD . Квазіперіодичні коливання при $p_\infty = 9 \cdot 10^5$ Па подано на рис. 7.

МЕТОДОЛОГІЯ ВИПРОБУВАНЬ НА ВТОМУ ТРИШАРОВИХ ПЛАСТИН ІЗ СТІЛЬНИКОВИМ ЗАПОВНЮВАЧЕМ

Досліджувалися тришарові пластини зі стільниковим заповнювачем, виготовленим за адитивними технологіями із полімолочної кислоти (PLA). Верхній та нижній шари пластин виготовлялися із чотирьох поперечних шарів (0/90/0/90) SIGRAPREG C U200.

Технологію виготовлення тришарових пластин для випробувань на втому можна подати так:

- виробництво стільникових заповнювачів з полімолочної кислоти за адитивною технологією FDM,
- виробництво лицьових шарів з вуглепластику,
- склеювання отриманих пластин у тришарову пластину,
- обробка отриманої пластини.

Друк стільникового заповнювача проводився ниткою діаметром 0.2 мм. Параметри друку приведено у табл. 1. Стільникові заповнювачі друкуються за розмірами: 200×180×10 мм.

Вуглепластиковий композит, заснований на препрегу SIGRAPREG C U200-0/NF-E310/30 %, застосовується для двох лицьових сторін тришарової пластини. Товщина одного шару односпрямованого листа 0.1875 мм. Два лицьові шари складаються з чотирьох односпрямованих підшарків з кутами залягання 0°, 90°, 0°, 90°. Перед виготовленням тришарової конструкції вуглепластикові пластини розрізаються на частини розміром 200×200 мм. Склеювання стільникового заповнювача та лицьових сторін проводиться двокомпонентним епоксидним клеєм 3M™ Scotch-Weld™ DP190B/A. Стільниковий заповнювач із приклеєною однією лицьовою сторо-

Таблиця 1. Параметри виготовлення стільникового заповнювача

| Показник | Значення |
|------------------------------|----------|
| Діаметр сопла екструдера, мм | 0.32 |
| Швидкість друку, см/с | 5...7 |
| Середня ширина шару, мм | 0.3 |
| Температура стола, °C | 60 |
| Температура екструдера, °C | 210 |



Рис. 8. Склеювання тришарових пластин (а — стільниковий заповнювач із приклеєною однією стороною, б — тришарова пластинка)

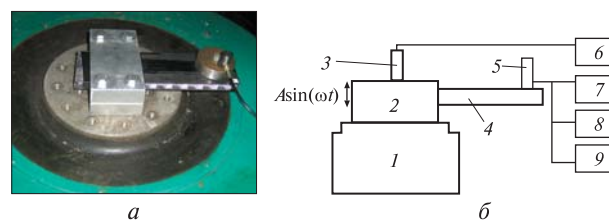


Рис. 9. Установка для випробувань на втому (а — зображення установки, б — принципова схема)



Рис. 10. Пошкоджена тришарова пластинка

ною подано на рис. 8, а. Тришарова стільникова пластинка зображена на рис. 8, б.

Розглянемо методологію втомних випробувань тришарових пластин [23]. Метою цих випробувань є аналіз втому тришарових пластин із стільниковим заповнювачем, виготовленим за адитивними технологіями FDM.

Втомні випробування проводяться з використанням електродинамічного вібростенду (рис. 9). Для проведення втомних випробувань було виготовлено 12 тришарових пластин. Зображення тришарової пластини у вібростенді подано на рис. 9, а. Вібростенд генерує вертикальні гармонійні коливання в широкому діапазоні частот та амплітуд збудження. Коливання вібростенду збуджують коливання тришарової пластини. Для аналізу втому досліджуються вимушені резонансні коливання тришарової пластини.

На рис. 9, б подано принципову схему динамічної установки для випробувань на втому.

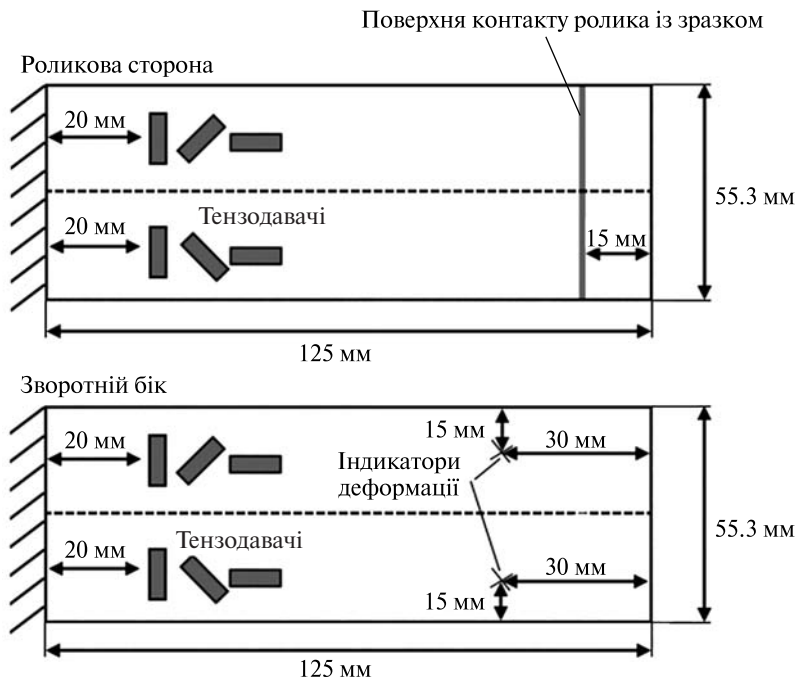


Рис. 11. Геометрія тришарової пластини та розміщення давачів на ній

Вібростенд позначено цифрою 1. Платформа, де закріплюється зразок, позначена цифрою 2. Ця платформа здійснює гармонійні коливання $A\cos(\omega t)$. На платформі розташовується давач для вимірювання віброприскорень, який позначено цифрою 3. Зразок, що випробовується, позначено цифрою 4. Давач, який вимірює віброприскорення кінця пластини, позначено цифрою 5. Лічильник, який фіксує кількість циклів до руйнування тришарової пластини із стільниковим наповнювачем, позначено цифрою 8. Частота коливання вимірюється давачем, що позначений цифрою 9.

Випробування зразків відбувається до моменту руйнування зразка. Число циклів до руйнування зразків фіксується. За результатами експериментів отримано, що всі пластини руйнуються по стільниковому заповнювачу. Як приклад, пластину з тріщиною, яка утворилася в процесі втомних випробувань, подано на рис. 10. Тріщина спостерігається у стільниковому заповнювачі.

Напружений стан тришарових пластин визначався із скінченно-елементних розрахунків. Методику цих розрахунків подано в роботі [23]. За

результатами випробувань на втому дванадцяти пластин побудовано діаграми Веллера.

РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ НА ВТОМУ ТРИШАРОВИХ ПЛАСТИН ІЗ СТІЛЬНИКОВИМ ЗАПОВНЮВАЧЕМ

Геометрію тришарових пластин зображено на рис. 11. Матеріали, з яких виготовлено конструкцію, обговорюються вище. Для дослідження втомного руйнування зразка проводилися його випробування на резонанс при наборі циклів аж до руйнування.

Частотний відгук резонансних коливань подано на рис. 12. Отримано залежність частоти збудження від коливань прискорення вільного кінця пластини.

Значення першої власної частоти згинальних коливань визначається з частотного відгуку. Ці власні частоти для дванадцяти досліджуваних пластин подано в табл. 2. Власні частоти дванадцяти зразків перебувають у частотному діапазоні 109...138 Гц. Отримано, що дисперсія власних частот внаслідок складності конструкції зразка є значною.

Здійснюється скінченно-елементне моделювання власних частот тришарових пластин. Методику цього моделювання докладно розглянуто у статті [23]. Досліджувалася тришарова пластина зі стільниковим заповнювачем. Стільниковий заповнювач розбивався на пластинчасті скінченні елементи. У рамках такої моделі отримано, що перша власна частота дорівнює 124.59 Гц. А перша власна частота цієї ж пластини, отриманої з використанням гомогенізованої моделі стільникового заповнювача, дорівнює 123.89 Гц. Отже, дві моделі дають близькі власні частоти.

У схему втомних випробувань (рис. 9, б) включено віброметр. Він дозволяє досліджувати спектральну щільність коливань вільного кінця тришарової консольної пластини. Спектральну щільність динамічного відгуку дев'ятого зразка подано на рис. 13. За результатами досліджень маємо, що коливання вільного кінця консольної пластини моногармонійні.

Кількість N_f циклів до руйнування зразка та число циклів до зміни першої власної частоти N_c вимірюються під час випробувань на втому. Зміна власної частоти виникає внаслідок утворення дефектів у зразку [23]. Внаслідок утворення дефектів зменшується жорсткість конструкції і, як наслідок, зменшується перша власна частота коливань. Значення таких власних частот наводиться у табл. 2.

Втомне руйнування тришарових пластин, як правило, відбувається у стільниковому заповнювачі. Велика кількість циклів спостерігається до зміни першої частоти. Аналіз поданих у табл. 2 результатів показує, що перша власна частота коливань змінюється незначно: на 2-3 Гц. Виключення становить сьомий зразок, зміна частоти спостерігається на 16.6 Гц. Зміна власної частоти при випробуваннях на втому свідчить про формування дефекту у формі тріщини, вона спостерігається у всіх зразках. На рис. 14 подано

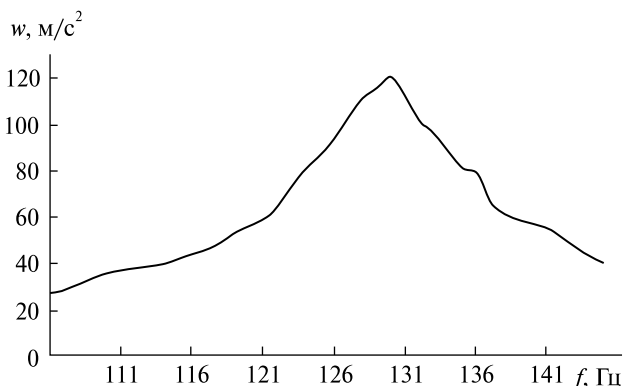


Рис. 12. Частотний відгук коливань пластини

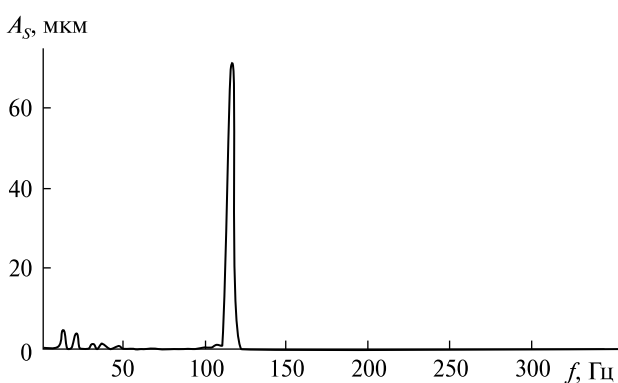


Рис. 13. Спектральна щільність динамічного відгуку тришарової пластини

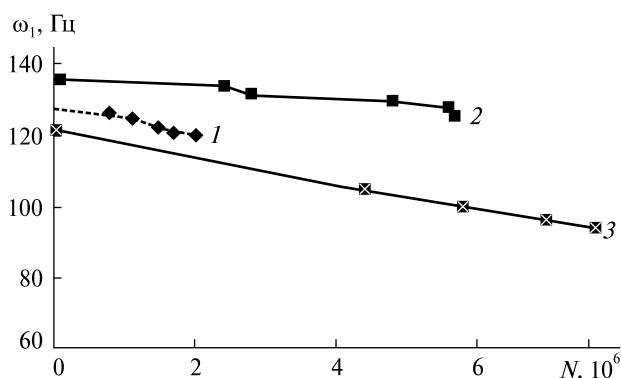


Рис. 14. Залежність першої власної частоти ω_1 від кількості N циклів

Таблиця 2. Перші власні частоти для дванадцяти тришарових пластин

| Номер зразка | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Перша власна частота, Гц | 128 | 138 | 136 | 130 | 125 | 122 | 121.6 | 120 | 109 | 110 | 129 | 133 |
| Перша власна частота після утворення першого дефекту, Гц | 126 | — | 134 | 129 | 123 | 119 | 105.0 | — | 107 | 108 | 126 | 131 |

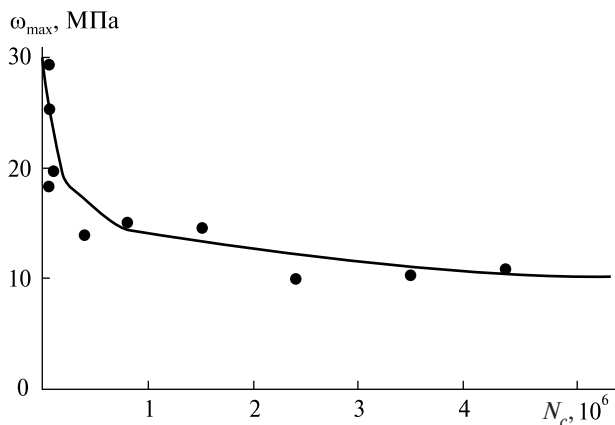


Рис. 15. Діаграма Веллера для тришарової пластини: по осі абсцис — кількість N_c циклів до зміни першої власної частоти

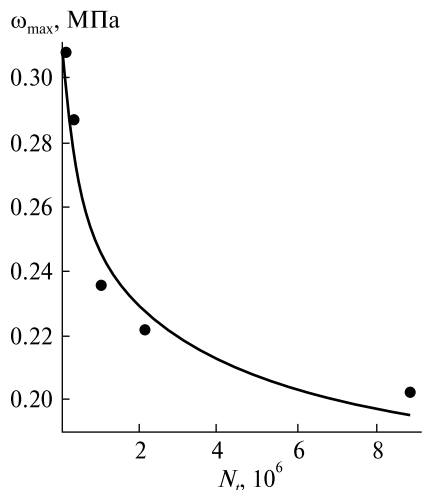


Рис. 16. Діаграма Веллера для тришарової пластини: по осі абсцис — кількість N_r циклів до руйнування зразка

залежність першої власної частоти тришарових пластин із номерами 1, 3 і 7 від кількості циклів. Отже, після першої зміни власної частоти спостерігається її подальша зміна.

Для систематизації результатів зміни першої власної частоти використовувалася діаграма Веллера (рис. 15). На рис. 15 по осі ординат показано еквівалентні напруження, отримані із скінченно-елементних розрахунків, а по осі абсцис — кількість N_c циклів до зміни першої власної частоти. Параметр N_c визначається експериментально. Результати експериментального

аналізу показані точками на рис. 15. Проводилося числове моделювання діаграми Веллера, докладно описане у роботі [23]. Результати числового моделювання показано суцільною лінією на рис. 15. Результати, отримані двома методами, близькі.

Розглянемо діаграму Веллера, де по осі абсцис — кількість циклів до руйнування зразка (рис. 16). По осі ординат вказано величини еквівалентних напружень, отримані з числового моделювання тришарової пластини з гомогенізованою моделлю стільникового заповнювача. По горизонтальній осі подано експериментальне значення кількості циклів до руйнування зразка, результати показано точками.

Для апроксимації діаграми було використано метод найменших квадратів. Діаграму Веллера подаємо такою залежністю:

$$\sigma_{max}^m N = C.$$

Тоді константи m та C приймають значення:

$$m = 9.21, \lg(C) = 55.67.$$

ВИСНОВКИ

У статті стисло представлено цикл досліджень з Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 роки. В результаті виконання роботи розрахунками та експериментально досліджено динамічні властивості тонкостінних елементів ракетної техніки з нанокompозитних матеріалів та тришарових тонкостінних елементів аерокосмічних конструкцій із стільникового заповнювача, надрукований за адитивними технологіями. Такі тонкостінні елементи є міцними та мають малу вагу. Як показано за результатами досліджень, такі конструкції можуть використовуватися в аерокосмічній техніці, літакобудуванні, енергетиці та військовій справі.

Автори вдячні рецензенту за корисні зауваження, які покращили статтю. Результати цих досліджень отримані за фінансуванням Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 роки (розпорядження Президії НАН України від 07.02.2018 р. № 75) та Національного фонду досліджень України (грант 2020.02/128).

REFERENCES

1. Allaoui A., Bai S., Cheng H. M., Bai J. B. (2002). Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite. *Composites Sci. and Technol.*, **62**, 1993—1998.
2. Avramov K. (2018). Longitudinal-flexural self-sustained vibrations of nanotube conveying fluid. *East Eur. J. Phys.*, **5**(2), 13—24.
3. Avramov K., Chernobryvko M., Uspensky B., Seitkazenova K., Myrzaliyev D. (2019). Self-sustained vibrations of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite cylindrical shell in supersonic flow. *Nonlinear Dynamics*, **98**(3), 1853—1876.
4. Avramov K., Kabyzbekova B. (2019). Bifurcations behavior and chaotic self-sustained vibrations of cantilevered nanotube conveying fluid. *Acta Mech.*, **230**, 3235—3258.
5. Avramov K., Myrzaliyev D., Uspensky B., Sakhno N., Seitkazenova K. (2021). Buckling modeling of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite joined spherical-cylindrical-spherical thin-walled structure. *J. Mech. Eng. Sci.*, **235**(22), 6287—6310.
6. Avramov K., Uspensky B. (2022). Nonlinear supersonic flutter of sandwich truncated conical shell with flexible honeycomb core manufactured by fused deposition modeling. *Int. J. Non-linear mechanics*, **143**, 104039.
7. Avramov K., Uspensky B., Sakhno N., Nikonov O. (2021). Transient response of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite conical shell with ring-stiffness under the action of impact loads. *Eur. J. Mech. – A/Solids*, **91**(13):104429.
8. Avramov K. V. (2003). Bifurcations of parametric oscillations of beams with three equilibrium. *Acta Mech.*, **164**, 115—138.
9. Avramov K. V. (2016). Bifurcation behavior of steady vibrations of cantilever plates with geometrical nonlinearities interacting with three-dimensional inviscid potential flow. *J. Vibration and Control*, **22**(5), 1198—1216.
10. Avramov K. V. (2018). Nonlinear vibrations characteristics of single-walled carbon nanotubes via nonlocal elasticity. *Int. J. Nonlinear Mech.*, **117**, 149—160.
11. Avramov K. V., Chernobryvko M. V., Tonkonogenko A. M., Degtyarenko P. G. (2018). Dynamics of solid propellant motor composite casing under impact pressure. *Meccanica*, **53**, 3339—3353.
12. Breslavsky I. D., Strel'nikova E. A., Avramov K. V. (2011) Dynamics of shallow shells with geometrical nonlinearity interacting with fluid, *Computers and Structures*. **89**, 496—506.
13. Ci L., Bai J. B. (2006). The reinforcement role of carbon nanotubes in epoxy composites with different matrix stiffness. *Composites Sci. and Technol.*, **66**, 599—603.
14. Degtyarev M. A., Avramov K. V. (2019). Numerical simulation of the stress-strain state of the rocket pretention module. *Strength of Materials*, **51** (5), 707—714.
15. Degtyarev M. A., Avramov K. V., Akimov D., Kostikov A. (2021). Thermo-mechanical stress-strain state of retention compartment. *J. Aerospace Eng.*, **34**(4): 04021030.
16. Liu Y. J., Chen X. L. (2003) Evaluations of the effective material properties of carbon nanotube-based composites using a nanoscale representative volume element. *Mech. of Mater.*, **35**, 69—81.
17. Martynenko G., Avramov K., Martynenko V., Chernobryvko M., Tonkonozhenko A., Kozharin V. (2021). Computational modeling of warhead transportation. *Defence Technol.*, **17**, 478—494.
18. Odegard G. M., Gates T. S., Wise K. E., Park C., Siochi E. J. (2003). Constitutive modeling of nanotube—reinforced polymer composites. *Composites Sci. and Technol.*, **63**, 1671—1687.
19. Sakhno N., Avramov K., Uspensky B. (2021). Dynamic instability of a compound nanocomposite shell. *Space Sci. & Technol.*, **27**(5), 60—70. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.060>
20. Seidel G. D., Lagoudas D. C. (2006). Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites. *Mech. of Mater.*, **38**, 884—907.
21. Shen H. S. (2009). Nonlinear bending of functionally graded carbon nanotube-reinforced composite plates in thermal environments. *Comp. Struc.*, **91**, 9—19.
22. Uspensky B., Avramov K., Nikonov O., Sakhno N. (2022). Dynamic instability of functionally graded carbon nanotubes-reinforced composite joined conical-cylindrical shell in supersonic flow. *Int. J. Structural Stability and Dynamics*, **22**(7): 2250039.
23. Uspensky B., Derevianko I., Avramov K., Polishchuk O., Salenko A. (2022). Experimental and numerical study on fatigue of sandwich plates with honeycomb core manufactured by fused deposition modeling. *Appl. Composite Mater.*, **29**, 2033—2061.

Стаття надійшла до редакції 07.11.2022

Після доопрацювання 31.12.2022

Прийнято до друку 04.01.2023

Received 07.11.2022

Revised 31.12.2022

Accepted 04.01.2023

*K. V. Avramov*¹, Head of Department, Dr. Sci. in Tech., Professor.

ORCID: 0000-0002-8740-693X

E-mail: kvavramov@gmail.com

*B. V. Uspensky*¹, Senior Researcher, Ph. D. in Tech.

ORCID: 0000-0001-6360-7430

*I. I. Derevyanko*², Team Leader, Ph. D. in Tech.

ORCID: 0000-0002-1477-3173

*M. O. Degtyaryov*², General Designer – First Deputy General Director, Ph. D. in Tech.

*O. F. Polishchuk*¹, Senior Researcher, Ph. D. in Tech.

ORCID: 0000-0003-1266-9847

*M. V. Chernobryvko*¹, Leading Researcher, Dr. Sci. in Tech.

ORCID: 0000-0001-8808-2415

¹ A. N. Pidgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine

2/10 Pozharsky Str., Kharkiv, 61064 Ukraine

² Yangel Yuzhnoye State Design Office

3, Kryvorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

DYNAMIC PROPERTIES OF NANOCOMPOSITE AND THREE-LAYER THIN-WALLED AEROSPACE ELEMENTS MANUFACTURED BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

Nanocomposite and sandwich plates with a honeycomb core are characterized by a high strength-to-mass ratio. Thus, such a solution is very promising for the aerospace and aircraft industry. This paper represents a mathematical model for a nanocomposite functionally gradient cylindrical shell interacting with a supersonic gas flow. To obtain such a model, the predetermined form method is used. An ordinary nonlinear differential equations system is obtained to describe the self-sustained vibrations of the shell. The structure model is developed using nonlinear strain-displacement relationships to analyze self-sustained vibrations.

A model describing self-sustained vibrations of a sandwich conical shell interacting with a supersonic gas flow is obtained. The core layer of the shell is an FDM-manufactured honeycomb. The stress state of the structure is analyzed using the high-order shear deformations theory. Each layer's stress state is described by five coordinates which are the three displacements of the midsurface and two angles of rotation of the normal to the midsurface. At the layers' junctions, the border conditions of displacements' continuity are used. To analyze self-sustained vibrations, the nonlinear strain-displacement relationships are utilized. Using the normal modes technique allows us to obtain a nonlinear autonomous dynamic system. Results of numerical simulations of self-sustained vibrations are provided. They are obtained by solving a nonlinear boundary value problem for the ordinary differential equations system using shooting and continuation techniques.

Experimental investigation of sandwich plates' fatigue with honeycomb core is considered. A method of fatigue testing of sandwich plates is described. The testing results are presented using S-N diagrams.

Keywords: *nanocomposite, functionally gradient material, shell, sandwich-shell, honeycomb core, Fused Deposition Modeling, self-sustained vibrations.*

<https://doi.org/10.15407/knit2023.01.065>
УДК 53.083.98

О. І. ШЕВЧЕНКО¹, в. о. зав. наук.-техн. відділу, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.
А. І. ЩЕНКО², старш. наук. співроб.
М. О. БОНДАРЕНКО³, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

²Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України
вул. Академіка Кржижановського 3, Київ, Україна, 03142

³Черкаський державний технологічний університет
Бульвар Шевченка 460, Черкаси, 18006

ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРЕВАГИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

У роботі наводяться переваги методу атомно-силової мікроскопії (АСМ) як одного з найбільш універсальних та перспективних методів дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки. Із порівняння результатів дослідження нітриду алюмінію (AlN) методами растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та АСМ встановлено, що, не дивлячись на більшу роздільну здатність методу РЕМ, основними його недоліками є неможливість проведення вертикального сканування поверхонь та відсутність можливості дослідження їхніх фізико-механічних властивостей. Встановлено переважні особливості процесу дослідження рельєфу поверхонь методом АСМ, які полягають у можливості високоточного позиціонування вимірювального інструмента (з точністю визначення заданої ділянки — до 40 нм); усунення викривлення отриманого зображення досліджуваної ділянки та автоматичному коригуванні швидкості проведення досліджень. Визначені середні арифметичні значення мікронерівностей поверхонь нітриду алюмінію, отримані методом АСМ, дорівнювали $R_a = 147$ нм, $R_q = 163$ нм для зразків, які не піддавалися впливу екстремального середовища та $R_a = 381$ нм, $R_q = 422$ нм для зразків, які протягом 120...140 год піддавалися дії екстремального середовища, що імітує космічні умови (температура 550 °С, тиск 6.8...7.2 мкбар). Також визначено максимальну пористість у поверхневому шарі (до 1.5 мкм) зразків з нітриду алюмінію, яка становила 3...5.2 %.

Ключові слова: атомно-силова мікроскопія, нітрид алюмінію, матеріали космічної техніки, нанорельєф поверхні.

ВСТУП

Інтенсивний розвиток космічної техніки та досліджень, що відбувається останнім часом, став можливим завдяки активному створенню і застосуванню нових концептуальних підходів та практичних рішень у галузях композиційного матеріалознавства, аерокосмічного машино-

приладобудування, метрології, телекомунікації тощо, безпосередньо пов'язаних з космічними технологіями. У свою чергу, цим забезпечується підвищена увага до космічної тематики як зі сторони пересічних громадян, так і з боку фахових вчених — дослідників космосу, а також інженерів-розробників аерокосмічних пристроїв та

Цитування: Шевченко О. І., Щенко А. І., Бондаренко М. О. Особливості та переваги дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки методом атомно-силової мікроскопії. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 1 (140). С. 65—73. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.065>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

систем. Це пов'язано зі значним підвищенням не лише продуктивності та функціональності компонентної бази космічних пристроїв, але й підвищенням точності й надійності методів та засобів контролю робочих параметрів цих пристроїв, а також контролю зміни геометричних характеристик та функціональних властивостей поверхні матеріалів, які використовуються в екстремальних умовах космічного простору. Як зазначено в роботі [19], саме контроль поверхні матеріалів, які піддаються впливу космічних факторів (наднизьких та надвисоких температур, низького тиску, впливу радіаційного космічного випромінювання тощо) на етапі випробування або ранніх стадіях їхньої експлуатації дозволяє виявити їхні можливі дефекти та брак, що, у свою чергу, мінімізує виникнення аварійних ситуацій при запуску або експлуатації космічної техніки. Останні, на думку фахівців [9, 13, 21], є основною причиною найбільш гучних аварій та катастроф, пов'язаних з дослідженнями космосу.

Методи дослідження параметрів мікрогеометрії та механічних властивостей поверхонь досить різноманітні. Проте спільною рисою цих методів є необхідність вимірювання параметрів у тонкому поверхневому шарі (≈ 10 нм). Це зумовлює високу (в окремих випадках граничну) чутливість вимірювальних систем, що використовуються. Найпопулярнішими на сьогоднішній день є методи мікроскопії. Проте, враховуючи особливості усіх згаданих методів нановимірювань, методи профілометрії, інтерферометрії та оптичної мікроскопії не підходять через низьку роздільну здатність та недостатню точність нанометричних вимірювань, а також ряду артефактів, що докладно розглянуто в роботі [1].

Для проведення високоякісних досліджень стану поверхні рельєфу і фізичних властивостей поверхонь композиційних матеріалів космічної техніки, поряд з більш традиційними методами електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, добре зарекомендували себе методи сканувальної зондової мікроскопії (СЗМ) [1, 4, 20], які, на відміну від традиційних, мають ряд незаперечних переваг (висока точність визначення мікронерівностей поверхні — до одного нано-

метра, чутливість — до 10^{-12} Н, продуктивність (час дослідження зразка обмежується лише обраними режимами сканування і не витрачається на підготовчу та завершальні стадії дослідження), можливість провадити дослідження як твердих неорганічних, так і органічних поверхонь високої в'язкості та пружності, як в умовах газового або повітряного середовища, так і в умовах вакууму, відсутність ефектів «тіні» та аберації, притаманних електронній мікроскопії, а також відсутність спотворень результатів досліджень від впливів потужних електромагнітних полів). Серед таких методів СЗМ вигідно відрізняється метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), на основі якого можуть бути реалізовані методики визначення як геометричних, так і механічних (мікротвердості, зносостійкості, внутрішнього тертя тощо) характеристик поверхонь матеріалів. Водночас, враховуючи компактність обладнання атомно-силових мікроскопів, їхню незалежність від додаткового високоенергетичного обладнання (як для електронних мікроскопів та рентгеноструктурних дифрактометрів), а також відсутність негативного впливу на результати досліджень з боку зовнішніх факторів (невагомість, космічне радіаційне випромінювання тощо), даний метод має перспективи застосування у космосі (наприклад, у дослідженнях на МКС або в умовах інших космічних об'єктів Сонячної системи) [14]. При цьому останні досягнення розробників апаратної і методичної бази методів СЗМ [15, 16] дозволяють проводити за його допомогою ряд унікальних досліджень і випробувань, не обмежуючись механічними характеристиками і топологією поверхні матеріалів. Це відкриває перспективу застосування методів СЗМ для комплексних досліджень поверхонь матеріалів космічної техніки в одному робочому циклі.

Питаннями проведення досліджень матеріалів методами СЗМ займається ряд відомих вітчизняних та закордонних вчених, серед яких слід відмітити В. А. Бикова, Г. Бінніга, Б. Брушана, К. Гербера, В. Л. Карбівського, К. Куейта, В. Л. Миронова, М. М. Рожицького, Х. Ропера, А. І. Свиридзонка, Д. В. Снежка, С. А. Чижика та інших [3, 7, 9, 11, 12].

Проте питання комплексного нанометричного дослідження стану поверхні космічних матеріалів в одному циклі вимірювань в літературних джерелах не висвітлені. З іншого боку, саме комплексне дослідження поверхні викликає ряд труднощів і проблем: швидкий вихід з ладу вимірювального інструмента; неможливість однозначного визначення і позиціонування зонда в зону вимірювань після проведення чергового етапу досліджень або заміни вимірювального інструмента; динамічні зміни вимірюваних властивостей поверхні (особливо для фото-, електро-, біоактивних матеріалів), які тягнуть за собою релаксаційні зміни поверхневого шару матеріалу на нанометричному рівні (тепловий дрейф атомів, механічні та електричні мікродеформації тощо) [22].

Метою роботи є порівняння основних переваг дослідження поверхонь матеріалів космічної техніки методом атомно-силової мікроскопії з результатами дослідження цих поверхонь методом растрової електронної мікроскопії.

ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХОНЬ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

Як основне дослідницьке обладнання в роботі використано атомно-силовий мікроскоп NT-206 (Microtestmachine). Для візуалізації об'єкта при збільшенні до 100 разів використано оптичну камеру «Logitech» виробництва США, поле огляду якої дорівнює $1 \times 0.75 \text{ мм}^2$.

Як об'єкт дослідження використано зразки кераміки з нітриду алюмінію AlN (у кількості шести штук), як такого, що знайшов широке та перспективне використання у різних приладах космічної техніки (наприклад антени з електричним скануванням, активні адаптивні антени, антени з просторовим складанням потужності та інші) [8, 10] завдяки своїй високій теплопровідності, хорошим електроізоляційним властивостям, низькому коефіцієнту теплового розширення при відносно невисокій вартості при можливості збереження працездатності у широкому діапазоні температур. Нітрид алюмінію на сьогодні є найперспективнішим матеріалом відведення тепла від теплонавантажених елементів у ви-

бах космічної техніки [17]. Останнім часом ряд зарубіжних фірм [2], що випускають електронні компоненти, переходять на використання нітриду алюмінію практично у всіх галузях, де традиційно застосовувався оксид берилію.

Дослідження об'єкту виконувалися по робочих гранях зразків у 15 зонах $10 \times 10 \text{ мкм}$ на кожній робочій грані. При цьому для досягнення високої збіжності результатів вимірювань повторні дослідження в кожній із обраних зон провадилися не менше десяти разів.

Як вимірювальний інструмент застосовувалися кремнієві конічні зонди марки CSC-38 (виробник «Micromash», Німеччина) з радіусом вістря 10 нм. Даний зонд найбільш поширений при масовій діагностиці нанорельєфу та механічних характеристик твердих поверхонь. У порівнянні з іншими типами зондів він має такі переваги: висока точність сканування (до 0.2 нм по осі Z та до 10 нм по осі XY); висока чутливість до невеликих перепадів рельєфу поверхні; не руйнує досліджувану поверхню; має широкий діапазон вимірюваних поверхонь, належить до бюджетного класу зондів (середня вартість зонду 15...30 €) [5].

Дослідження на АСМ провадилися у нормальних умовах [18]: температура $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря не більше 80 %, атмосферний тиск $100 \pm 4 \text{ кПа}$, напруга мережі живлення 220 В, частота мережі живлення 50 Гц. Досліджувані об'єкти розміщали на предметному столику АСМ, де здійснювалося їхнє сканування у статичному режимі. При цьому були використані кремнієві зонди «Ultrasharp CSC12» (Mikromasch).

Дослідження стану поверхонь матеріалів (нанорельєфу, пористості, наявності мікродефектів) із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії здійснювалося у послідовності, представленої на рис. 1.

На рис. 2 показано зовнішній вигляд вимірювального комплексу на базі атомно-силового мікроскопа NT-206.

Загалом підготовка зразків та обладнання до процесу досліджень, а також проведення повного циклу досліджень зразка в одній зоні становило 12...18 хв.



Рис. 1. Алгоритм проведення дослідження поверхонь за допомогою АСМ

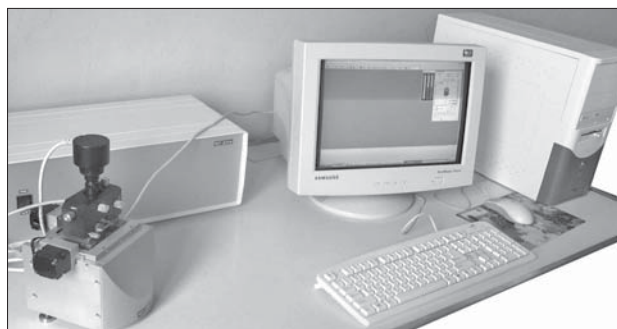


Рис. 2. Атомно-силовий мікроскоп NT-206 в комплексі з системою керування та ПЕОМ

Аналіз результатів сканування поверхонь полягає у дослідженні профілю по обраному напрямку площадки, розподілу висот, кутової гістограми та обробка інформації про геометричні показники досліджуваної поверхні за допомо-

гою програмного продукту Surface Viewer v.6.2 (використовується на АСМ NT-206).

Шляхом удосконалення програмно-апаратного, математичного та методичного забезпечення вимірювальної системи АСМ NT-206, яке було проведене в роботі [6], можна зазначити особливості дослідження рельєфу поверхонь матеріалів на даному пристрої, що визначають його переваги:

- можливість «запам'ятовувати» поточне положення досліджуваної ділянки з максимальною точністю 40 нм з метою повторного повернення системою АСМ вимірювального інструменту на неї;

- урахування дисторсії зображення досліджуваної ділянки, яка виникає через сферичний рух вимірювального інструменту у процесі вимірювань, а також зміщення об'єкта досліджень відносно центра предметного столика;

- автоматичне коригування швидкості досліджень на різних стадіях сканування (підведення зонда до поверхні, визначення «глибини» западини або «висоти» рельєфу поверхні у вимірюваній точці, переїзд сканувальної голівки на наступну ділянку тощо), що дозволяє вирішити взаємовиключні завдання: максимально збільшити швидкість досліджень при дотриманні максимальної точності.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АСМ

В результаті досліджень сканограм розподілу мікронерівностей та поверхневої пористості на поверхні досліджуваних зразків було встановлено, що середнє арифметичне значення мікронерівностей лежить в діапазоні від $R_a = 147$ нм (середньостатистичне значення мікронерівностей $R_q = 163$ нм) для зразків, що не піддавалися впливу екстремального середовища (рис. 3), до $R_a = 381$ нм (середньостатистичне значення мікронерівностей $R_q = 422$ нм) — для зразків, що піддавалися протягом тривалого часу (120...140 год) дії екстремального середовища, що імітує космічні умови (температура 550 °С, тиск 6.8...7.2 мкбар) (рис. 4). Максимальна пористість у поверхневому шарі (до 1.5 мкм) цих зразків з нітриду алюмінію становила відповідно 3...5.2 %.

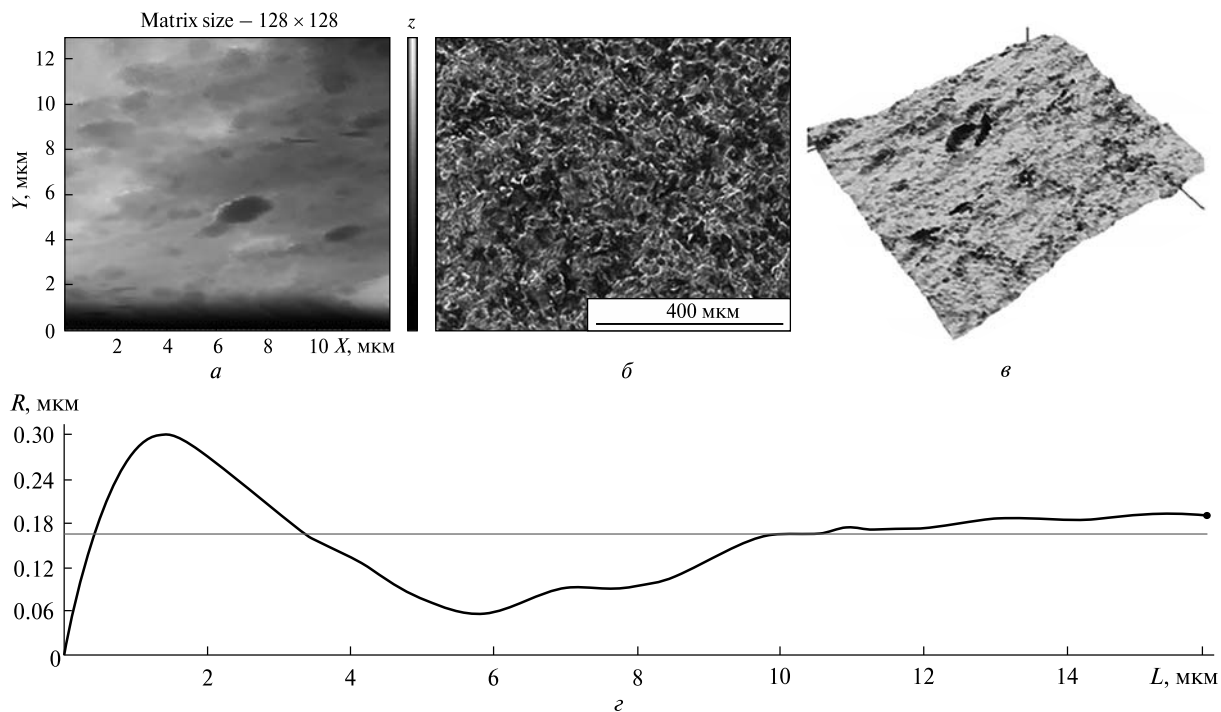


Рис. 3. Зображення ділянки поверхні (13×13 мкм) зразка AlN, що не піддавався умовам екстремального середовища: а — отримане методом АСМ (NT-206), б — методом РЕМ (JSM-6700F), в, г — відновлене 3D-зображення цієї ділянки та її профілограма

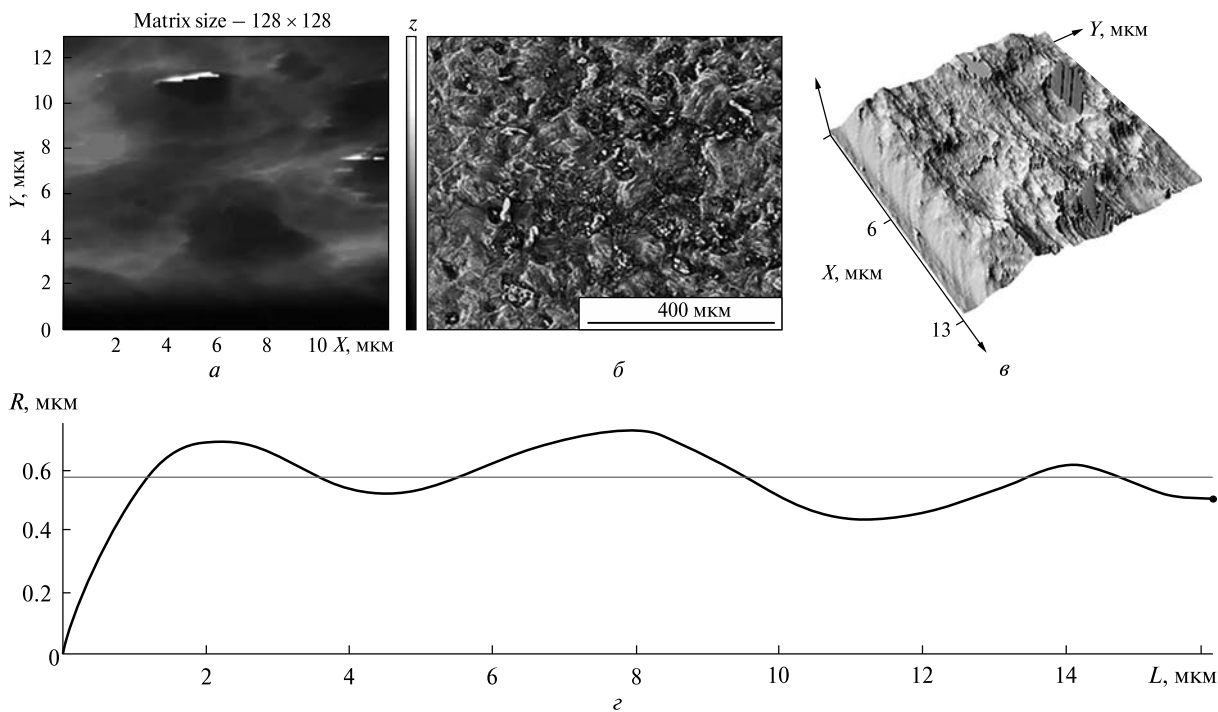


Рис. 4. Те ж для зразка AlN, що протягом тривалого часу піддавався умовам екстремального середовища

Порівняльна оцінка результатів вимірювань нанорельєфу здійснювалася шляхом порівняння отримуваних результатів з результатами, отриманими методом растрової електронної мікроскопії (JEOL JSM-6700F) в Центрі колективного користування українського представництва «Токуо-Воекі» (м. Київ), як найближчого методу діагностування рельєфу поверхонь.

Так, порівнюючи результати, отримані методами АСМ та РЕМ (рис. 3, 4, а, б), в цілому видно ідентичність зовнішнього вигляду поверхні досліджуваних зразків. Проте метод АСМ має ширші можливості, ніж метод РЕМ, а саме: можливість отримання високоточного 3D-зображення досліджуваної поверхні та профілограми її перерізу (рис. 3, 4, в, г).

Контроль точності, надійності та збіжності досліджуваного нанорельєфу методом АСМ здійснювався шляхом сканування поверхні калібрувальної решітки TGZ1 (період решітки — 3 ± 0.05 мкм) в кількості 40 циклів сканувань з подальшим аналізом якості отримуваних результатів.

Отримані результати оцінки надійності та відтворюваності результатів дослідження нанорельєфу поверхонь досліджуваних зразків зведені в табл. 1.

Таким чином, за результатами оцінки точності, надійності та збіжності результатів дослі-

Таблиця 1. Максимальні значення показників надійності та відтворюваності результатів експериментальних досліджень нанорельєфу зразків нітриду алюмінію

| Зразок | Похибка вимірювань, % | Надійність, кількість циклів вимірювання | Похибка відтворюваності результатів, % | Похибка збіжності результатів, % |
|---|-----------------------|--|--|----------------------------------|
| <i>AlN, без впливу екстремального середовища</i> | | | | |
| Зразок 1 | 5 | 46 | 2 | 3 |
| Зразок 2 | 4.8 | 50 | 7 | 6 |
| Зразок 3 | 5.1 | 50 | 4 | 5 |
| <i>AlN, після впливу екстремального середовища протягом 120...140 год</i> | | | | |
| Зразок 4 (120 год) | 7.8 | 53 | 15 | 5 |
| Зразок 5 (130 год) | 8.5 | 48 | 18 | 6 |
| Зразок 6 (140 год) | 8.9 | 49 | 22 | 5 |

дження можна стверджувати про доцільність використання методу АСМ для дослідження стану поверхні. Водночас по результатах оцінок відтворюваності за їхнім порівнянням з результатами, отриманими методом РЕМ, спостерігається суттєве відхилення їхніх значень для зразків, що підлягали впливу екстремального середовища протягом тривалого часу.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті досліджень стану поверхонь зразків AlN, що знайшли активне застосування у виробках космічної техніки, встановлено залежності точності вимірювання рельєфу поверхні (розбіжність відносної похибки вимірювання мікронерівності досліджуваних поверхонь) від часу експлуатації зразків в екстремальних умовах.

Як видно із залежностей, представлених на рис. 5, зі збільшенням часу експлуатації зразків в екстремальних умовах розбіжність відносної похибки вимірювання мікронерівності збільшується від початкового значення (порядку 5 %) до граничного, що максимально відповідає 8.9 % при значенні часу експлуатації 140 год. Така висока розбіжність, на думку авторів, пов'язана з певними обмеженнями точного визначення мікронерівностей поверхні зі збільшенням перепадів її висот, яке відбувається внаслідок хімічного та фізико-механічного руйнування цієї поверхні у процесі її експлуатації в умовах підвищених температур та різких перепадів тиску.

При цьому відхилення точності вимірювання рельєфу поверхні нітриду алюмінію протягом усього часу експлуатації зразків відбувається за законом, близьким до лінійного. Водночас для зразків, досліджених методом РЕМ, закономірність розбіжності відносної похибки вимірювання мікронерівності має вигляд степеневого рівняння і збільшується незначно (з 14.3 до 14.7...15.2 %).

При порівнянні АСМ-зображень поверхонь зразків AlN із зображеннями, отриманими методом РЕМ, на останніх візуально спостерігалася вища якість отримуваних зображень. При цьому більш високоточні та надійні чисельні дані про характеристики поверхні цих зразків були отримані методом АСМ. Це дозволяє стверджувати,

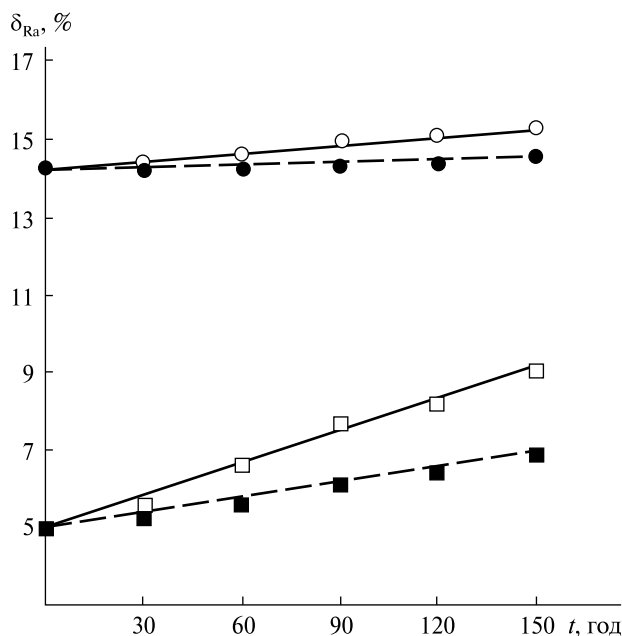


Рис. 5. Залежності точності вимірювання рельєфу поверхні від терміну t експлуатації зразків в екстремальних умовах. Розбіжність відносної похибки вимірювання мікронерівності досліджуваних поверхонь: квадратики — оцінки, отримані методом АСМ; кружечки — методом РЕМ

що для отримання якісних даних, які мають максимальну інформативність про стан поверхні, слід застосовувати комбіноване дослідження з використанням можливостей як методу РЕМ, так і методу АСМ.

ВИСНОВКИ

В результаті порівняння результатів дослідження матеріалів космічної техніки методами РЕМ та АСМ показано, що роздільна здатність методу РЕМ більша, проте вертикальне сканування,

а також дослідження фізико-механічних властивостей поверхонь цим методом неможливе. У зв'язку з цим метод АСМ є найбільш універсальним та перспективним видом мікроскопії, що знайшов широке застосування не лише при дослідженні мікрогеометричних параметрів, але й для визначення механічних характеристик поверхонь як провідників, так і діелектриків.

Встановлено переважні особливості процесу дослідження рельєфу поверхонь матеріалів методом АСМ шляхом удосконалення матеріально-технічної та методичної бази цього методу, і які полягають у можливості високоточного позиціонування вимірювального інструмента (з точністю визначення заданої ділянки до 40 нм); автоматичне коригування швидкості досліджень; усунення викривлення отриманого зображення досліджуваної ділянки тощо.

Досліджено, що середні арифметичні значення мікронерівностей поверхонь нітриду алюмінію, отримані методом АСМ, лежать в діапазоні від $R_a = 147$ нм (середньостатистичне значення мікронерівностей $R_q = 163$ нм) для зразків, що не піддавалися умовам екстремального середовища, до $R_a = 381$ нм (середньостатистичне значення мікронерівностей $R_q = 422$ нм) — для зразків, що піддавалися протягом тривалого часу (120...140 год) дії екстремального середовища, що імітує космічні умови (температура 550 °С, тиск 6.8...7.2 мкбар). Максимальна пористість у поверхневому шарі (до 1.5 мкм) цих зразків з нітриду алюмінію становить 3...5.2 %.

Грунтуючись на отриманих результатах, в подальшому планується продовжити дослідження поверхневих властивостей різноманітних матеріалів космічної техніки методом АСМ.

REFERENCES

1. Antonyuk V. S., Tymchuk H. S., Bondarenko Yu. Yu., et al. (2013). *Microscopy methods and tools*. Kyiv: NTUU «KPI», 336 p. [in Ukrainian].
2. Barbarini E., Villamor A. (2019). The power of electronics. *I-Micronews*. URL: https://www.i-micronews.com/the-power-of-electronics/?utm_source=Zoho_Campaigns&utm_campaign=iMN13Sept2019Asia&utm_medium=email&cn-reloaded=1 (Last accessed: 23.09.2022).
3. Belyanin A. F., Bouilov L. L., Zhirnov V. V., et al. (1999). Application of aluminum nitride films for electronic devices. *Diamond and Related Materials*, **8** (2–5), 369–372.
4. Birdi K. S. (2003). *Scanning probe microscopes. Application in science and technology*. Florida: CRC Press LLC, 328 p. [in English].
5. Bondarenko M. A., Bondarenko J. J., Shelestovskaya S. A. (2011). Research of Influence of the State of Surface of Probes for AFM on Exactness and Quality of the Topograms. *Electronics and Nanotechnology*, 60.
6. Bondarenko M. O., Bondarenko Yu. Yu., Antonyuk V. S. (2015). Prospects of using the atomic force microscopy method to study the condition and physical and mechanical characteristics of the surfaces of precision engineering products. *Bull. Lviv Polytechnic Nat. Univ. Ser.: Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering*, 822, 72–77 [in Ukrainian].
7. Chizhik S. A., Sviridenok A. P., Suslov A. A. (2009). Eyes and hands of nanotechnology. *Sci. innov.*, **3**, 53–55 [in Russian].
8. Ghidini T. (2018). Materials for space exploration and settlement. *Nature Mater.*, **17**, 846–850.
9. Giessibl F. (2003). Advances in Atomic Force Microscopy. *Revs Modern Phys.*, **75** (3), 949–983.
10. Itsenko A. I., Shevchenko A. I., Bogdan G. A. (2019). Controlling the uniformity of the distribution of strength characteristics in aluminum nitride materials based on the results of acoustic measurements. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Ser. tekhnichni nauky.*, **30** (69), 51–55 [in Ukrainian].
11. Jalili N., Laxminarayana K. (2004). A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences. *Mechatronics*, **14**, 907–945.
12. Magonov S. N., Myung-Hwan Whangbo (2008). *Surface analysis with STM and AFM: Experimental and theoretical aspects of image analysis*. Oxford, UK: Wiley, 335 p.
13. Miria M. (2018). NTRS — NASA Technical reports server: Aerospace materials and applications. Finckenor, US: NASA Marshall Space Flight Center Huntsville, 145 p.
14. Nanotechnology in Space With nanosurf atomic force microscope looking for life on Mars as part of Phoenix Mars mission (Jun. 6 2008). URL: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2183> (Last accessed: 23.09.2022).
15. NT-MDT (2021). URL: http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm_cal/products.html (Last accessed: 23.09.2022).
16. Plath A. (2022). Atomic Force Microscopy (AFM) in Scanning electron microscopy (SEM): Innovation combines both technologies in real-time. *BioTrib* (Apr. 28 2022). URL: <https://biotrib.eu/atomic-force-microscopy-afm-in-scanning-electron-microscopy-sem-innovation-combines-both-technologies-in-real-time/> (Last accessed: 23.09.2022).
17. Schonberg W. P. (1992). Aluminum 2219-T87 and 5456-H116: A comparative study of spacecraft wall materials in dual-wall structures under hypervelocity impact. *Acta Astronautica*, **26** (11), 799–812.
18. Skoryna E., Medyanik V., Bondarenko M., et al. (2018). The investigation of the nanoreliefs of optical elements of measuring instruments, which modified by electron-beam microprocessing. *Innovations*, **1**, 30–33.
19. Tachikawa S., Nagano H., Ohnishi A., et al. (2022). Advanced passive thermal control materials and devices for spacecraft: A review. *Int. J. Thermophys.*, **43**, 91.
20. West P. (2013). Introduction to atomic force microscopy: Theory, practice and applications. URL: <http://www.AFMUniversity.org/> (Last accessed: 23.09.2022).
21. Wiesendanger R. (1994). *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*. Cambridge, UK: Univ. Press, 625 p.
22. Zhong F., Changhe H., Danylyuk Yu., Auner G. (2000). Development of an AlN deep UV detector for space application. *MRS Proceedings*, 639 p.

Стаття надійшла до редакції 23.09.2022

Після доопрацювання 09.10.2022

Прийнято до друку 17.10.2022

Received 23.09.2022

Revised 09.10.2022

Accepted 17.10.2022

*O. I. Shevchenko*¹, interim Head of Scientific and Technical Department, Dr. Sci. in Tech., Senior Researcher

*A. I. Itsenko*², Senior Researcher

*M. O. Bondarenko*³, Dr. Sci. in Tech., Professor, Head of Department

¹ Main Astronomical Observatory of National Academy of Sciences of Ukraine

27, Akademik Zabolotny Str., Kyiv, 03143 Ukraine

² I. M. Frantsevich Institute for Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine

3 Krzhizhanovsky Str., Kyiv, 03142 Ukraine

³Cherkasy State Technological University

460 Shevchenko Blvd, Cherkasy, 18006 Ukraine

PECULIARITIES AND ADVANTAGES OF STUDYING THE SURFACES OF SPACE TECHNIQUE MATERIALS BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY

The article presents the advantages of the atomic force microscopy (AFM) method as one of the most versatile and promising methods for studying the surfaces of space engineering materials. A comparison of the results of the study of such materials using the example of aluminum nitride (AlN) by the methods of scanning electron microscopy (SEM) and AFM was carried out. As a result of the comparison, it was established that, despite the higher resolution of the SEM method, its main disadvantages are the impossibility of vertical scanning of surfaces and the lack of an opportunity to study their physical and mechanical properties. The main features of the process of studying the topography of surfaces using the AFM method have been established. They are the possibility of high-precision positioning of the measuring instrument (with the accuracy of determining a given area — up to 40 nm), elimination of distortion of the obtained image of the studied area, and automatic correction of the research speed. The arithmetic mean values of the micro-roughnesses of the aluminum nitride surfaces obtained by the AFM method were determined both for samples that were not exposed to extreme environmental conditions ($R_a = 147$ nm; $R_q = 163$ nm) and samples that were exposed to extreme environmental conditions for a long time (120...140 hours), which simulates space conditions (temperature 550 °C, pressure 6.8...7.2 μ bar) ($R_a = 381$ nm; $R_q = 422$ nm). The maximum porosity in the surface layer (up to 1.5 μ m) of aluminum nitride samples was also determined in the range of 3...5.2%.

Keywords: atomic force microscopy, aluminum nitride, space engineering materials, surface nanorelief.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.01.074>
УДК 629.78.001.2

Ю. О. МІТІКОВ, зав. кафедри двигунобудування, д-р техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-4787-603X

E-mail: mitikov2017@gmail.com

С. О. БІЛОГУРОВ, доцент кафедри двигунобудування, канд. техн. наук, доцент

E-mail: steams@ukr.net

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49010

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ ПЕРШОГО У СВІТІ УКРАЇНСЬКОГО КОСМІЧНОГО КОМПЛЕКСУ «ВЕСЕЛКА»

27 жовтня 1961 року у тодішньому СРСР було здійснено спробу пуску першої у світі космічної ракети-носія (недопрацьованої балістичної ракети) 11К63 (63С1) у комплексі з уніфікованим супутником ДС-1 (Дніпропетровський супутник-1). Одним з найважливіших завдань цього нового космічного комплексу «Веселка» (К11К63) було визначення потенційних можливостей ефективного застосування космічної техніки. Вага ДС-1 становила 141 кг, а фактична спроможність створеного космічного комплексу — запуск штучних супутників Землі на низьку орбіту вагою до 450 кг. Для порівняння, перший американський супутник мав масу 14 кг разом із четвертим ступенем ракети. Супутник ДС-1 пройшов усі необхідні на той час випробування. Він був повністю готовий до роботи в умовах космічного простору, але запуск був невдалим. Перший український супутник ДС-2 був виведений у космос тільки 16 березня 1962 р. З цього моменту Україна як член ООН стала третьою країною у світі (після СРСР та США), яка створила власні носії та супутники.

У статті вперше зроблено спробу комплексного розгляду на історичному тлі феномену створення цього космічного комплексу і наступних запусків уніфікованих штучних супутників Землі (надалі — *всесвітньо відомої серії «Космос»*). Проведено порівняння українського супутника з першими супутниками інших країн. Проаналізовано наукові, технічні, військово-прикладні напрямки розробки космічного комплексу. Описано планування потужну кооперацію установ промисловості, Академії наук СРСР та УРСР, галузевих інститутів, учених Східної Європи, Монголії, Куби (за програмою «Інтеркосмос»). Особливо розглянуто питання підготовки кадрів для ракетно-космічної техніки, які сприяли космічним успіхам. Виправлено деякі неточності, що кочують у поодиноких публікаціях щодо підготовки та запуску українських супутників.

Ключові слова: український космічний комплекс, супутник, академія наук, серія «Космос», видатні особистості: М. К. Янгель, В. М. Ковтуненко, наукова кооперація, підготовка кадрів.

ВСТУП

Якщо XVI столітті філософ-утопіст Сірано де Бержерак, у XIX столітті науковий фантаст Жюль Верн та інші ентузіасти лише мріяли про польо-

ти в космос, можливість життя поза Землею, то на початку XX століття вчені-філософи, наприклад В. І. Вернадський [14], всерйоз зайнялися проблемою космізації наукового знання. А вчені-механіки Костянтин Ціолковський, Макс

Цитування: Мітіков Ю. О., Білогуров С. О. Науково-технічні аспекти створення першого у світі українського космічного комплексу «Веселка». *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 1 (140). С. 74—86. <https://doi.org/10.15407/knit2023.01.074>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Вальє, Есно Пельґрі, Роберт Годдард, Германн Оберт, Юрій Кондратюк та інші науково обґрунтували реальність шляхів виходу за межі земної атмосфери [13, 20]. Вони переконливо довели, що прорив у космос може бути здійснений лише за допомогою реактивного руху, за допомогою ракет. За сьогоднішніми уявленнями космос починається всього за 100 км від поверхні Землі. «Космос насправді лише в годині їзди автомобілем, якби він їздив вертикально» — так кажуть сьогодні американці.

У п'ятдесятих роках минулого століття ситуація з можливістю виходу людства у космос радикально змінилася. Як відомо, перший успішний пуск справжньої ракети «Фау-2» було здійснено у березні 1942 р. У 1943 р. дві «Фау-2» були запущені вертикально. Вони досягли висоти понад 180 км. Формально це космос. Але ні супутника, ні наукових приладів там не було. Уповноважені органи політ зі зрозумілих причин не фіксували [9].

До середини п'ятдесятих років у США та Радянському Союзі з'являлися технічні можливості, які дозволяли здійснити цей сміливий крок. Потужність їхніх балістичних ракет послідовно зростала [16]. Був потрібен тільки могутній поштовх у головах можновладців у напрямку, який був незрозумілий мабуть для 99.9 % людства. Для цього потрібен був максимально освічений фахівець-ракетник, який би знався на сучасних реаліях цієї техніки, мав би чудові організаторські здібності, був упевненим у своїх технічних розрахунках. Він не повинен був боятися насмішок і знущань фахівців та вищого керівництва за божевільні пропозиції. «Який такий космос, кому він потрібний, не було жодних вказівок!..»

І така людина у Радянському Союзі була. Його ім'я, на жаль, відоме лише невеликому колу фахівців ракетної техніки та ентузіастам польотів у космос. Цей першопрохідник — Михайло Клавдійович Тихонравов, ракетник-двигунобудівник з 1932 р., довоєнний начальник С. П. Корольова. Саме він упродовж восьми років «пробивав» ідею запуску штучного супутника Землі, будучи заступником директора науково-дослідного інституту (НДІ-4), зовсім не головного у ракетному відомстві. Випустив ґрунтовний технічний звіт, писав доповідні в АН СРСР, в уряд, до Мі-

ністерства оборони, неодноразово звертався до С. П. Корольова. Останній різко мотивував свою відмову неможливістю відволіктися від військових замовлень [12]. До речі, серед відгуків на доповідні був і такий, де стверджувалось, що вихід у космос можливий лише через сто років.

Ситуація докорінно змінилася, коли радянській розвідці стало відомо про планування запуску першого штучного супутника Землі американцями в рамках оголошеного Міжнародного геофізичного року (з 01.07.57 до 31.12.58). «Запахло» втратою престижу. 30 січня 1956 року виходить постанова Ради міністрів №149-88 «Про роботи зі створення штучного супутника Землі» [16]. Нарешті команда пройшла з самого верху. Усі відомства відразу знайшли доповідні М. К. Тихонравова. Академія наук СРСР терміново отримала завдання розробити науковий супутник на кшталт лабораторії. Доручення, звісно, було зірвано — Академія до цього була не готова. Вона тоді складалася переважно з вірних «синів» КПРС, яскравим представником яких був лжевчений Трохим Лисенко. Слід зазначити, що і зараз Російська академія наук також багато в чому складається з вірних «синів» правлячої партії. Багато хто з них радісно підписав листа на підтримку війни з Україною. Сумно констатувати, що серед підписантів був і випускник фізтеху Дніпропетровського університету, який розпочинав кар'єру в КБ «Південне» і згодом став наступником С. Корольова — академік Ю. Семенов.

У стислі терміни документацію на перший супутник довелося розробляти саме групі М. К. Тихонравова, яка вже мала у цьому напрямі деякі технічні напрацювання. У ситуації, що склалася, всі зацікавлені сторони хвилював вже лише пріоритет. Для підстрахування у справі виготовлення першого супутника на всяк випадок було підключено підприємство ОКБ-586 (згодом КБ «Південне»), яким керував М. К. Янгель (етнічний українець, предки якого були заслани до Сибіру [15]). Воно було створене у Дніпропетровську у квітні 1954 р. і вже встигло зарекомендувати себе новаторським.

Так почалися великі космічні перегони двох держав. Багато в чому, на превеликий жаль, за політичні пріоритети.

Метою статті є узагальнення на історичному тлі науково-технічних аспектів розробки першого в світі суто українського космічного комплексу «Веселка», визначення ролі пріоритетів у проектуванні і якійсї освіти в реалізації проривних технологій.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Відразу зробимо одне застереження. Під першим у світі космічним українським комплексом розуміється тільки те, що він проектувався виключно для запуску супутників. Для жодних боєголовок він не передбачався і не використовувався надалі.

Не дивно, що в описаній вище вкрай політизованій обстановці конструкція першого радянського штучного супутника Землі (ШСЗ) планувалася найпростіша, найшвидша у виробництві. У результаті він був виготовлений у вигляді полірованої кулі (з двох півсфер) діаметром близько 40 см і масою 86.3 кг [2]. Усередині супутника розміщувались передавач, налаштований на одну частоту, вентилятор, що включався від термореле, та акумуляторна батарея, вага якої становила близько 50 кг. Наукових приладів не було. Цікаво відзначити, що під доопрацювання першої міжконтинентальної ракети Р-7 задля виведення супутника на орбіту С. П. Корольов «пробив» свою мрію — самостійне конструкторське бюро з дослідним заводом (близько 10 тис. співробітників) [12]. Це вкотре підкреслює надзвичайну пропагандистську важливість для Радянського уряду бажання бути першим у космосі за будь-яку ціну. До цього С. П. Корольов працював у структурі НДІ-88. Там він проектував і розробляв документацію на першу міжконтинентальну балістичну ракету Р-7 і нічого... Був період, коли ним протягом двох років в НДІ-88 керував М. К. Янгель [15].

Ракета з першим ШСЗ стартувала 4 жовтня 1957 року. Розпочалась космічна ера. Це стало потрясінням для всієї грамотної частини населення земної кулі. Супутник проіснував у космосі до 4 січня 1958 року, здійснивши 1440 обертів навколо Землі. З того часу космос став головним пропагандистським інструментом радянського керівництва. Космос та балет. Все.

І ще, з осені 1957 року, з подачі С. Корольова, підтриманої М. Хрущовим та М. Келдишем, народилася практика нагороджень керівників вченими ступенями гігантськими списками [12]. Ця хибна звичка тривала як мінімум до кінця 1980-х років, і в результаті тисячі дилетантів влізли в радянську науку, розбавили її та сильно послабили [12].

Подальші дослідження напряму, по якому рухалось КБ С. Корольова, показали, що практика розробки одиночних апаратів під те чи інше завдання не перспективна. Насамперед це дорого, а головне — неможливо у стислий термін організувати виробництво великої кількості космічних апаратів різних типів [3]. До того ж потужність РН Р-7 досягала до 7 т корисного навантаження, а потрібні супутники були вагою 200...500 кг.

6 грудня 1957 року американці зробили спробу запуску свого першого супутника «Авангард TV-3» (Vanguard 6.5 in Satellite 1 Test Vehicle 3) масою 1.36 кг [18]. Під час старту стався вибух, місія на очах маси репортерів закінчилася невдачею. Замість наперед розрекламованого фурору інша крайність — ганьба. Це був другий шок поспіль для американської громадськості, пов'язаний із престижем у такій популярній, як виявилось, серед електорату темі, як космос.

Для вирішення завдання національного престижу було спішно підключено німецьку команду Вернера фон Брауна, «батька» «Фау-2». Той не підвів. Перший запущений американський супутник «Експлорер-1» (Explorer-I) мав масу 14 кг разом із четвертим ступенем ракети, від якої він навіть і не відділявся [15]. А навіщо ускладнення? Тільки престиж, точніше, вже тільки відповідь на виклик. Сам супутник важив 8.3 кг, мав на борту лічильник Гейгера — Мюллера та давач метеорних частинок [13, 18]. Саму ракету Вернер фон Браун вкрай цікавим чином зібрав із підручних ступенів наявних ракет, як із конструктора «Лего». Перший ступінь — форсована версія ракети «Редстоун» (Redstone), другий — зв'язка з 11 некерованих снарядів «Сержант» (Sergeant), третій — зв'язка з трьох тих же снарядів, четвертий ступінь — один снаряд. Три верхні ступені розкручувалися на старті для спрощення стабілізації польоту. Пуск відбувся 1 лютого 1958 року

і пройшов успішно [18]. Далі таке «Лего» не використовувалося.

Тут важливо наголосити на такому цікавому факті. Він як ніколи актуальний для української держави сьогодні у розпал війни за незалежність практично без власної ракетної зброї. Запуск супутника в СРСР у жовтні 1957 р. дуже болісно вплинув на керівництво США. Він призвів до перегляду американської системи освіти, результатом якого стало прийняття Конгресом США вже взимку 1958 р. Закону про освіту з метою покращення національної оборони (читай — ракетної техніки). Це перше, найголовніше, що було потрібно зробити. Всього через 100 днів після удару по престижу — запуску радянського супутника. Після перших випусків фахівців за покращеними освітніми програмами і збільшеним фінансуванням за рахунок федерального бюджету американці переконливо лідували і продовжують лідувати во всіх питаннях вивчення і освоєння космосу.

Наприкінці 1950-х років у ОКБ-586 працювали над створенням власного космічного комплексу [8, 16]. Після офіційного підключення до проблеми запуску першого супутника наявні опрацювання можна було перевести на інший рівень. У дніпропетровців вже виходили на фінішну пряму роботи з першої своєї одноступеневої балістичної ракети дальньої дії (БРДД) 8К63 (дальність 2000 км). Ця ракета — друга в СРСР на висококиплячих компонентах палива (перша 8К11, дальність порядку 250 км, — теж М. К. Янгеля). Прогресивно мислячі військові всіляко вітали її появу. Ракетний комплекс замислювався у двох варіантах старту — відкритий наземний та шахтний. Слід зазначити, що цей комплекс 8К63 згодом став основою нового роду військ — ракетних військ стратегічного призначення. І що найважливіше, цей комплекс став наймасштабнішим в історії Радянського Союзу. Цих БРДД було виготовлено 2300 одиниць [16]. Працювали чотири заводи. Відіграли свою роль дешевизна нового комплексу, простота обслуговування, повна автономність польоту БРДД, достатня надійність та точність влучання.

Головне, що М. К. Янгель стосовно космічного комплексу зробив рішучі кроки. Перший —



Рис. 1. В. М. Ковтуненко

організаційне оформлення нового напрямку з ядром із талановитих проєктантів. До нього увійшли В. Ковтуненко, М. Кормильцев, М. Жариков, О. Барашонков, Ю. Сметанін. Пізніше туди додалася низка перспективних молодих спеціалістів — В. І. Талан, В. А. Величкін, П. А. Латайко, А. М. Попель, П. П. Плешаков, Г. П. Ліванов, І. Л. Лось, В. Ф. Руденко, С. С. Кавелін, О. С. Петренко, Г. А. Шаповалова, В. Ф. Зубенко, В. М. Харламов, В. І. Руцкий та багато інших [5]. Незабаром у структурі ОКБ організували достатньо могутній «Комплекс-8» — спеціалізований підрозділ із космічної тематики.

Другий важливий крок — максимально широке підключення інститутів Академії наук до формулювання проблем і апаратури для вивчення космічного середовища. Напрацювань було багато. І вже влітку 1960 р. ЦК КПРС було прийнято постанову «Про план освоєння космічного простору» від 04.06.1960 р. № 587-238, якою був визначений порядок розробки і терміни запуску кораблів-супутників. Багато завдань, зрозумілих сьогодні, раніше були зовсім невивченими проблемами. Наприклад, за пропозицією харків'янина академіка М. П. Барабашова до цього плану було включено вкрай цікаву нову тоді тему фотографування Землі з космічного простору [1].

8 серпня 1960 р. підписано постанову ЦК КПРС та РМ СРСР «Про створення ракети-носія 63С1 на базі бойової ракети Р-12, розроблення та запуск 10 малих ШСЗ» № 867-362сс. У 1965

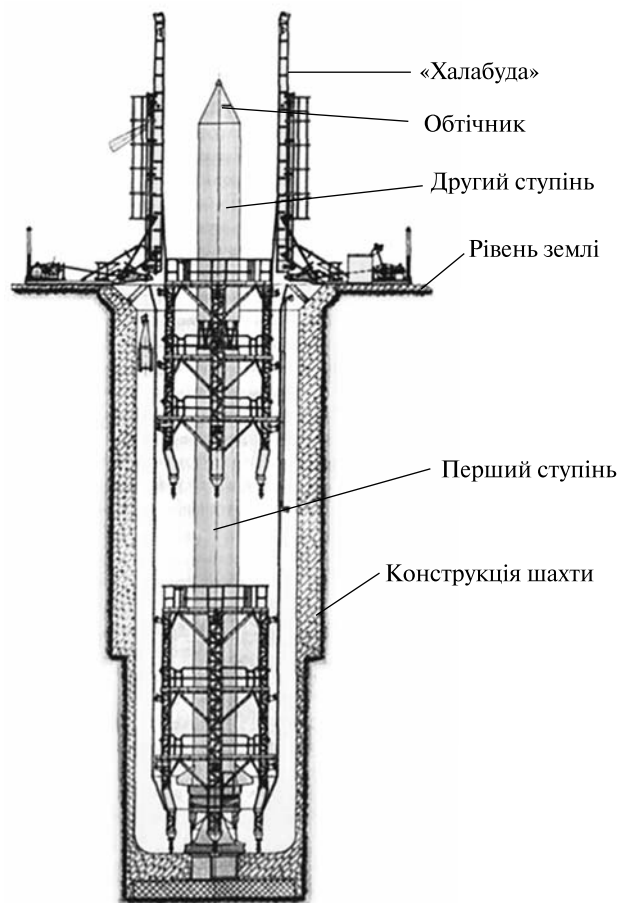


Рис. 2. Схема старту ракети-носія 11К63 (63С1) на першому етапі (з шахти «Маяк-2», Капустин Яр) [16]

році у зв'язку з великим обсягом робіт комплекс 8 перетворено на більш потужну структуру КБ-3. Космічне КБ очолив В'ячеслав Ковтуненко, його заступником з проектування призначено Юрія Сметаніна [3]. Конструкторами керував Анатолій Чигарев.

Конструкторам супутників довелося вирішувати питання, які раніше не стояли не тільки в ракетній техніці, а і в будь-якій іншій — працездатність систем виключно у своєрідних умовах, таких як невагомість, вакуум, радіація, циклічність сонячного нагрівання та ін. Перший результат глибоких опрацювань показав наступне. Необхідна наявність ефективного другого ступеня тандемного розташування для БРДД 8К63. При цьому космічний комплекс мав бути спроектований так, щоб максимально викорис-

тати наявний старт, не ускладнювати його просування (мінімізувати витрати на першому етапі) до реалізації. Для ракети великої довжини (подовження) відкритий старт без спеціальної вежі не підходив. Вітрове навантаження виявлялось закритичним. Це було вирішено на другому етапі, коли новий ракетний комплекс вже всебічно зарекомендував себе. Вперше у практиці Радянського Союзу запланували монтувати другий ступінь прямо у шахтній пусковій установці. Від вітру другий ступінь захищала споруда, яка офіційно отримала українську назву «халабуда» (рис. 2). За такою схемою вже мали відомий досвід роботи американські ракетники. Розробку автономної системи управління для РН 63С1 було доручено провідній організації ОКБ-692 (м. Харків).

Особливо потрібно відмітити, що цей космічний комплекс став першим у світі прикладом конверсії в ракетній техніці. У радянській системі господарювання це було винятком. Саме слово «конверсія» у керівників підприємств за звичай викликало алергію [8].

Як відомо, найдорожчою частиною ракетиносія є її двигун [4]. До того ж і цикл його проектування, відпрацювання та виготовлення є найтривалішим. Відомі двигуни на застосовуваних БРДД 8К63 компонентах палива не забезпечували виведення прогнозованої потрібної маси супутників. Видавати технічне завдання на новий двигун — це затратний за часом захід, пов'язаний із величезним проблемним фінансуванням. Але не було б щастя, та нещастя допомогло. Саме тоді «звільнився» новий двигун РД-119 виробництва КБ В. П. Глушко. З низки причин від нього відмовився С. П. Корольов [16]. Цей двигун був незвичайним внаслідок застосованого перспективного висококиплячого пального — несиметричного диметилгідразину (НДМГ). У поєднанні з рідким киснем він забезпечував рекордний на той час питомий імпульс — 352 с у вакуумі! М. К. Янгель не вагаючись прийняв рішення про використання двигуна РД-119 для другого ступеня свого носія. Одночасно це рішення дозволяло набратися досвіду роботи з новим паливом. Надалі НДМГ став єдиним паливом для бойових рідинних ракет СРСР.

Тут може виникнути питання — Чому М. К. Янгель стільки часу, праці та здоров'я поклав, щоб відмовитися від рідкого кисню на користь азотнокислотного окиснювача, а тут — приймає рідкий кисень на другий ступінь. Але саме у виваженій рішучості долати штампи, в умінні приймати нові факти, розрізняти особливості умов застосування і полягає відмінність талановитого фахівця від ремісника. Для бойової тематики найважливішими характеристиками є максимальний час перебування у повній бойовій готовності, маскування, простота обслуговування тощо. Для космічного напрямку важливими є інші показники — питомий імпульс двигуна, ціна тонни тяги, величина тяги, яку створює одиниця маси двигуна, а сьогодні ще й інтегральна характеристика — ціна виведення кілограма корисного навантаження на опорну орбіту.

Для підвищення ефективності нового космічного комплексу було прийнято низку прогресивних рішень у конструкції другого ступеня. Наведемо тільки два приклади. Це насамперед відмова від важкої традиційної газобалонної системи наддування паливних баків [16]. Реалізовано системи з використанням основних компонентів палива. І ще одна родзинка — гаряче розділення ступенів (найефективніше, але найскладніше в розрахунках серед усіх відомих). Цікаво відзначити, що через 45 років конструктори І. Маска на РН «Фалькон-9» прийняли холодне розділення, суттєво менш ефективне. Через перестрахування. Практично 10 секунд після розділення другий ступінь «Фалькон-9» падає вниз, втрачаючи насилу набрану висоту. Фундамент гарячого поділу ступенів складає точний розрахунок імпульсу після дії тяги двигуна, що вимикається [19]. Цю проблему вирішив І. Морозов, доцент кафедри двигунобудування Дніпровського державного університету, захистивши у 1956 р. дисертацію під грифом «таємно» [11].

Найголовніше у створенні будь-якого космічного комплексу — знаходження стабільного джерела фінансування. Ця проблема як ніколи є актуальною і сьогодні. «По узбіччях моєї дороги в космос лежать руїни з надій інших ентузіастів» — якось так виразився І. Маск. Елементарно не вистачило грошей. Досвід М. К. Янгеля дозво-

ляв зробити одразу правильний вибір — потрібне фінансування тоді могло забезпечити тільки Міністерство оборони. Потрібно було суто наукові питання, спільно напрацьовані з інститутами Академії наук, поєднати з прикладними, зробити привабливими для військових. Наприклад, вивчення щільності навколоземного космічного простору за висотою, його склад — врахування опору при польоті та підвищення точності боєголовок; вивчення поширення радіохвиль в іоносфері — підвищення точності керованості ступенями ракет та супутниками; визначення концентрації іонів у іоносфері — фіксація ядерних вибухів та визначення їхньої потужності; дослідження природи мікрометеоритів — вплив взаємодії мікрометеоритів з поверхнею ступенів ракети, головної частини, космічного апарата тощо [2]. Також було заплановано вирішувати і суто прикладні питання — юстування, перевірка точнісних характеристик станцій дальнього виявлення літаків і ракет, співюстування каналів радіолокаторів точного наведення; визначення потенціалу протиповітряної та протиракетної оборони; ціль для відпрацювання космічних апаратів-перехоплювачів системи протикосмічної оборони; визначення вібраційних перевантажень на космічний апарат під час виведення з шахтної пускової установки та інші.

Серед наукових завдань, які розв'язувалися, слід зазначити такі [16]

- дослідження метеорної речовини на околицях Землі;

- вивчення добових змін щільності та складу атмосфери Землі, визначення кореляції між сонячною активністю та станом атмосфери, реєстрація інтенсивності УФ-випромінювання Сонця; проведення фотометричних досліджень випромінювання зірок та розподілу енергії в УФ- та X-областях спектру;

- визначення складу первинного космічного випромінювання, дослідження потоків заряджених частинок та космічних променів;

- проведення фотометричних досліджень випромінювання зірок в УФ- та X-областях спектру, визначення розподілу енергії у спектрах зірок, типів та варіацій зоряного випромінювання;

- дослідження іоносфери тощо.

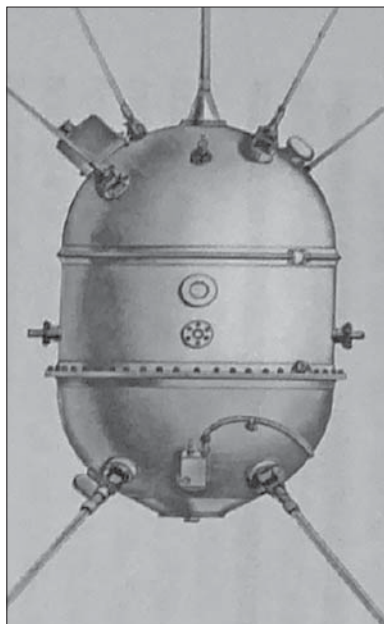


Рис. 3. Зовнішній вигляд супутника ДС-А1 [16]



Рис. 4. Зовнішній вигляд супутника ДС-2 — «Космос-1» [16]

Особливо слід зазначити, що для спрощення та здешевлення супутників їхні конструкції було уніфіковано. Це було нове геніальне слово у супутникобудуванні. Створення уніфікованих апаратів (платформ) дозволило широким фронтом проводити наукові дослідження у навколоземному космічному просторі у результаті різкого скорочення часу розробок і значного здешевлення виробництва штучних супутників Землі (ШСЗ). На перших модифікаціях уніфікованих

платформ було створено та виведено на орбіти 46 наукових космічних апаратів. А всього з 25 космічних апаратів, реалізованих за міжнародною програмою «Інтеркосмос», 22 було розроблено та виготовлено у Дніпропетровську. Пріоритет ОКБ-586 у галузі створення перших у світі уніфікованих платформ ШСЗ закріплено авторським свідоцтвом у 1967 р. [17]. Зараз це рішення відомо під популярною назвою «адаптер».

Перші два пуски нової ракети-носія були заплановані налагоджувальними для всього комплексу. Вони проводились з бойових шахт («Маяк-2») на полігоні Капустин Яр. Головою Держкомісії льотно-конструкторських випробувань РН 11К63 було призначено генерал-полковника В. І. Вознюка, технічним керівником — В. М. Ковтуненка. Перший пуск був здійснений 27 жовтня 1961 р. (ДС-1 — маса 165 кг). Зовнішній вигляд супутника приведено на рис. 3.

Він виявився невдалим. Через вихід з ладу внаслідок віброперевантажень (як показав розгляд причин аварії) одного з давачів швидкості другого ступеня, носій зазнав аварії і впав на Землю. Керівників військової прийомки, які не забезпечили ретельного та всебічного відпрацювання приладу, суворо покарали. Другий пуск виявився також невдалим. Зовсім трохи не хватило швидкості до виходу на орбіту. Не вистачило палива лише на кілька секунд роботи двигуна. Щоправда, супутник передавав важливу інформацію до моменту входу в атмосферу. Помилка виявилася у призначенні дози заправки окиснювача. Це є офіційна версія. Більш точно, були похибки в розрахунку складних явищ під дією могутнього аеродинамічного нагрівання — спухання, прогріву рідкого кисню і його википання при польоті. Далі з процесами розібралися, необхідні поправки було враховано.

І лише третій запуск 16 березня 1962 р. був успішним. З огляду на дві попередні втрати дорогих супутників і назву етапу — відпрацювання РН, супутник на всяк випадок (вже ДС-2) важив всього 47 кг (рис. 4). На борту з приладів була лише багатоканальна когерентна радіостанція «Маяк». Вона випромінювала на частотах 20.003, 20.005, 90.018 та 90.0255 МГц. Але і вона дозволила провести важливі дослідження. Прийом

цих частот спеціально розробленими наземними пристроями дозволив детально вивчати структуру іоносфери та її інтегральні властивості вздовж орбіти, а також на шляху проходження сигналу між точкою спостерегача і випромінювачем. Виявилося, що можна досліджувати часову, широтну і довготривалу мінливість іоносфери, кут рефракції радіохвиль та електронну концентрацію через 1-2 км. Виявлено неоднорідності іоносфери в горизонтальному напрямку, пов'язані зі зміною локального значення електронної концентрації. Подібні дані про структуру іоносфери на той час були відсутні.

Фактично з того моменту Україна як член ООН стала третьою країною у світі (після СРСР та США), яка створила власні носії та супутники [3].

Про цей запуск було оголошено ТАРС. У багатьох публікаціях помилково повідомлялось, що супутник мав назву «Космос-1» (рис. 5). Це не так. Найменування «Космос» дніпропетровські супутники, як і РН, отримали пізніше. Власне ім'я він отримав лише після запуску 4 квітня 1964 року, коли серійний супутник у повідомленні ТАРС було названо «Космос-2». На той момент було вже проведено 27 запусків. Сам перший український супутник проіснував у космосі до 25 травня 1962 року.

Цікаво сьогодні відзначити, що місця цієї історичної події у московській Енциклопедії космонавтики [7] не знайшлося. Сьогодні причини замовчування успіхів українського КБ очевидні. До речі, там не знайшлося місця і польотам двох перших американських астронавтів — Алана Шепарда (Shepard) (5.05.1961 р.) та Вірджіла Гріссона (Grissom) (21.07.1961 р.). Ми вже й тоді, виявляється, були у іншій компанії (рис. 6).

Ракета-носій «Космос» стала першою радянською масовою РН, що виготовлялася серійно. Вона прийнята на озброєння у складі комплексу: ракета-носій, стартовий пристрій та космічний апарат. Запуски здійснювалися з двох полігонів, спочатку з Капустиного Яру, потім з Плесецька. Усього було зроблено 165 пусків, з них 143 успішні. За допомогою РН «Космос» запускали ШСЗ серій «Космос» (з 16.03.1962 р.) та «Інтеркосмос» (з 14.10.1969 р.). Вона експлуатувалася до 18 червня 1977 р. (дата останнього запуску) [16].



Рис. 5. Повідомлення ТАРС у газеті «Правда» про запуск дніпропетровського супутника під псевдо «Наш»

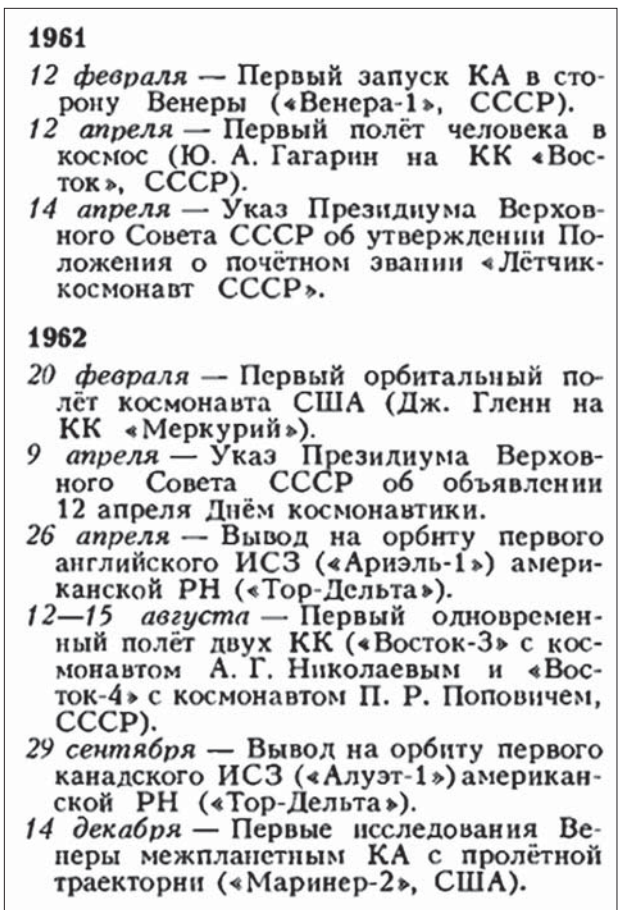


Рис. 6. Копія сторінки з московської Енциклопедії космонавтики [7]

Особливо потрібно зазначити, що за оцінками ряду експертів понад половину «космічних» наукових результатів у той час отримано за допомогою ШСЗ серії «Космос». Апарати розробки КБ С. Корольова, які несли барельєфи вождя світового пролетаріату до Місяця, мало що давали науці. «Корольов працює на ТАРС, а Ян-

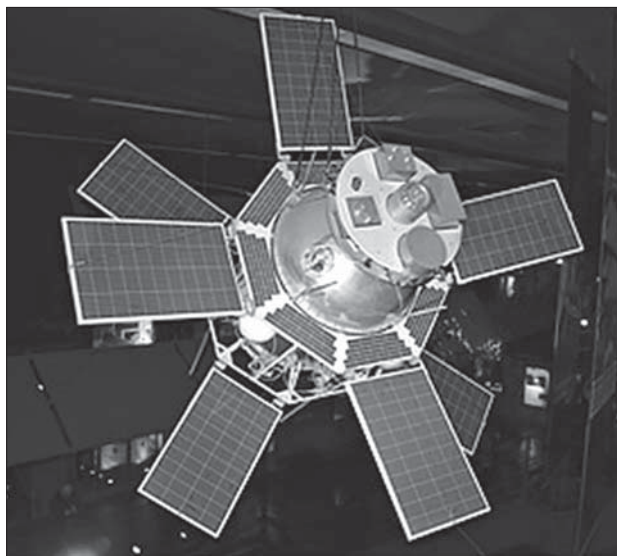


Рис. 7. Зовнішній вигляд супутника «Інтеркосмос-1» (ДС-УЗ-ІК-1) [16]

гель — на нас» — так раніше говорили досвідчені ракетники.

Космічні апарати серії «Інтеркосмос» дещо відрізнялися зовнішнім виглядом та складом наукової апаратури (рис. 6). Однак в їхню основу було покладено ту саму уніфіковану конструкцію. У цій програмі зі своїми розробками брали участь вчені Угорщини, Польщі, Болгарії, Румунії, Монголії, НДР, Чехословаччини, Куби.

Супутники серії «Інтеркосмос» по комплексу наукових завдань можна розбити на три основні групи:

- для іоносферних досліджень,
- вивчення магнітосфери Землі,
- для вивчення Сонця.

Першим космічним апаратом, створеним за програмою «Інтеркосмос», став ДС-УЗ-ІК-1. Він був виведений на орбіту з космодрому Капустин Яр 14 жовтня 1969 р. і отримав назву «Інтеркосмос-1». Як приклад наведемо лише його результати. Експеримент був комплексним: спостереження велися як із космічного апарата, так і із Землі обсерваторіями країн-учасниць. Вперше вдалося виявити поляризацію рентгенівського випромінювання під час сонячних спалахів. З'ясувалося, що на висотах близько 100...120 км кисню у 2-3 рази менше, ніж передбачалося раніше.

Не можна оминати і політичну обстановку того часу і вкрай велике завантаження КБ «Південне» під час розробки космічного комплексу К11К63 [16]. Був період холодної війни, яка в міру накопичення озброєнь стрімко перетворювалася на гарячу фазу. Здавалася на озброєння перша БРДД 8К63 (дальність 2000 км), йшло експериментальне відпрацювання систем БРДД 8К65 (дальність 4500 км), широким фронтом велися роботи зі створення першої міжконтинентальної ракети 8К64 (дальність 13000 км), з побудови першого мобільного комплексу РТ-20П («Залізна діва»). 20 жовтня 1960 р. сталася найбільша катастрофа в історії ракетної техніки. На Байконурі під час підготовки до першого пуску МБР 8К64 стався вибух. Загибло 92 людини, і серед них маршал М. Неделін. У М. К. Янгеля стався перший інфаркт. Розгорілася Карибська криза, в якій помітну роль грали ракети дніпропетровського КБ 8К63, у великій кількості доставлені на Кубу. І в цей час наполегливо велися роботи зі створення першого космічного комплексу К11К63, відповідно до намічених планів.

Виникає природне запитання: як можна було створити такий унікальний космічний комплекс, а також інші шедеври ракетної техніки, у країні, що перебуває за залізною завісою, що не відрізняється високим середнім рівнем освіти (у порівнянні з США, Великобританією, Францією), що не має сучасних технологій, електроніки, матеріалів?

Перша частина відповіді може бути такою. Для досягнення ядерного паритету зі США Радянське керівництво зробило ставку на ракетну техніку. Інших реальних носіїв ядерної зброї у короткій перспективі створити було неможливо. У СРСР не було військових баз навколо США, також не було з'єднань авіаносців із палубними винищувачами супроводу бомбардувальників. Тому авіаційна і військово-морська промисловість та ці роди військ потрапили під суттєве скорочення. Обладнання, що вивільнилося, фахівці, фонди на матеріали перекидалися в ракетну техніку. Тепер про фінансування. М. С. Хрущов вручив М. К. Янгелю підписану чекову книжку. Головний конструктор міг оперативного витратити гроші на виконання урядових про-

грам на власний розсуд. Тоді ще корупції в країні практично не було. Рівень зарплат та інших благ соціалізму (терміни отримання житла працівниками, автомобілі за держціною, путівки на море, обсяги соцкультпобуту та інші) у ракетній техніці були помітно кращі, ніж середні у промисловості. Стипендії на ракетних спеціальностях були також вищими, ніж на інших спеціальностях. Не на 20 чи 30 відсотків, а в 2.5 раза! Цей момент відобразив у своїх спогадах президент України Л. Д. Кучма [10], випускник кафедри двигунобудування Дніпропетровського державного університету (ДДУ). Все перераховане приваблювало абітурієнтів. Конкурс на ракетні спеціальності був величезний. Студентами ставали найкращі випускники шкіл. Серед випускників фізтеху ДДУ 1960 р. кожен четвертий закінчив школу із золотою та срібною медалями. На попередніх випусках цей відсоток був ще вищим. З таких можна виховати підкорювачів Всесвіту та розробників найсучаснішої ракетної зброї.

І ще один важливий момент. Основні спекурси на фізтеху ранніх наборів читали провідні спеціалісти галузі. Лабораторні і практичні заняття проходили безпосередньо в лабораторіях КБ «Південне» і «Південмашу». Були і інші цікаві форми навчання. Академік І. Халатников, канонічний учень Л. Ландау, випускник кафедри фізики ДДУ, згадував, що до них влітку приїжджали провідні професори країни та проводили семінари з основних розділів «своїх» наук. Але згодом усі перелічені відмінності непомітно зникли.

Розглянемо рівень підготовки фахівців на прикладі М. К. Янгеля. Закінчив московський авіаційний інститут із відзнакою. Керував його дипломним проектом «король винищувачів» на той час М. М. Полікарпов. Дошка для креслень (кульман) М. К. Янгеля стояла в робочій кімнаті видатного конструктора [15]. Вони спілкувалися щодня. Справжню освіту дає лише живе спілкування вчителя з учнем, професора зі студентом, — так говорить народна мудрість. Просто напрошується пропозиція — середня пропорція МОН України — 1 викладач на 14 студентів — для таких наукомістких спеціальностей, як ракетна та авіаційна, має виглядати принаймні як 1 на 3-4 студенти, не більше. Це якщо ми хочемо

бути серед лідерів і надалі знову не опинитися без власних ракет у власній армії, маючи колись чудові традиції.

Після закінчення вишу майже відразу М. К. Янгель почав працювати на керівній посаді над проектами перспективних винищувачів. Перед війною рік стажувався в авіаційній промисловості США. На початку війни займався організацією евакуації досвідченого авіаційного заводу, потім там організовував виробництво літаків. Після смерті М. М. Полікарпова працював у КБ Ар. І. Мікояна та В. М. М'ясищева. Відчув різні стилі керівництва. Закінчив Академію авіаційної промисловості, працював у Міністерстві авіаційної промисловості з координації наукової та виробничої діяльності. У зв'язку зі скороченням військової авіації його було переведено до ракетної техніки, стажувався у німецьких ракетників у філії №1 НДІ-88 у містечку Городомля на острові у Селігері. Далі очолював головну ракетну організацію країни НДІ-88. У 43 роки став керувати КБ, яке потім стало називатися «Південним». Такий керівник міг генерувати ідеї сам, розуміти ідеї підлеглих та вести за собою колектив у правильному напрямку. Найвищій підготовці М. К. Янгеля можна лише позаздрити. Технічний прогрес визначають, як відомо, не тисячі сірених інженерів, а одиниці, які блискуче підготовлені і загартовані.

Останній, на момент написання статті, супутник серії «Космос», назву якого продовжує експлуатувати рф, запущений ними 16 жовтня 2022 р., має номер 2560. Супутник суто військовий, його призначення не розкривається. Усього орбітальне супутникове угруповання рф, до якого насамперед входять апарати військового та подвійного призначення, станом на січень 2022 року налічувало 102 космічні апарати.

ВИСНОВКИ

Вперше зроблено спробу комплексного розгляду на історичному і політичному тлі феномену створення першого в світі суто космічного комплексу задля запуску уніфікованих серійних штучних супутників Землі (всесвітньо відомої серії «Космос»). Проаналізовано наукові, технічні, військово-прикладні аспекти розробки

космічного комплексу, висвітлено завдання, які він вирішував.

Перший український (дніпропетровський) супутник запущений своєю ракетою-носієм 16 березня 1962 р.

З цього моменту Україна як член ООН стала третьою країною у світі (після СРСР та США), яка створила власні носії та супутники. Це перший в світі приклад конверсії в ракетній техніці.

Особливо підкреслено найважливіші організаційні та технічні кроки щодо створення нового космічного ракетного комплексу. По-перше, це знаходження Замовника і, відповідно, фінансування в умовах Радянського Союзу в особі лише Міністерства оборони. По-друге, для здешевлення і найшвидшого введення космічного комплексу в експлуатацію максимальне використання вже створених для інших цілей потрібних для нього складових частин — перший ступінь (8К63), що випускався серійно, новий двигун (РД-119) для другого ступеня з перспективним пальним (НДМГ), який замовляв С. П. Корольов, наявний шахтний стартовий комплекс «Двіна» (вперше у Радянському Союзі).

Підкреслено низку перспективних технічних рішень в ракетному комплексі за основними напрямками — уніфіковані супутники, використання основних компонентів палива для наддування паливних баків, високоефективна гаряча система розділення ступенів ракети-носія та інші.

Висвітлено найширший спектр актуальних військово-прикладних та наукових завдань, що

дозволяв вирішувати новий космічний комплекс. Усього було зроблено 165 пусків, з них 143 успішні. Він експлуатувався до 18 червня 1977 р. (дата останнього запуску). Наукова складова дослідження космосу давала дуже важливі результати і настільки розширилася, що було створено кооперацію вчених країн Східної Європи, Куби та Монголії. Вона була оформлена програмою «Інтеркосмос».

Окремо розглянуті питання необхідної підготовки кадрів для ракетно-космічної техніки, які сприяли триумфу у космосі. Після запуску першого супутника СРСР, що стало сильним ударом по престижу США, Конгресом було вжито вичерпних заходів — радикально переглянути навчальні програми в вишах та створено нові за військовими спеціальностями (насамперед — ракетними) в університетах, залучено федеральне потужне фінансування.

Виправлено деякі неточності, що кочують у поодиноких публікаціях на тему українських супутників.

Автори присвячують статтю 70-річчю кафедри двигунобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, її корифеям, і насамперед професорам М. С. Шнякіну, В. А. Махіну, академікам В. В. Пилипенку, В. Ф. Пріснякову, члену-кореспонденту НАН України І. І. Іванову, професорам Л. В. Пронь, В. М. Серебрянському, М. Д. Коваленку, С. П. Фоміну та всім іншим викладачам, які підготували цілу плеяду висококваліфікованих фахівців.

ЛІТЕРАТУРА

1. Балишев М. А., Коваль Ю. Ю. Участь харківської астрономічної обсерваторії та її представників у радянській космічній програмі у 1960-х роках. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 5. С. 86—99.
2. Белий А. *50 лет назад Днепрпетровск завоевал космос*. URL: <https://gorod.dp.ua/news/70866> (дата звернення: 08.10.2022).
3. Гоман О. Г. Вячеслав Михайлович Ковтуненко — выдающийся ученый в области космонавтики. *Техн. механика*. 2011. № 3. С. 7—10.
4. Дегтярев А. В., Кушнарев А. П., Попов Д. А. и др. Ракета космического назначения сверхмалого класса. *Космическая техника. Ракетное вооружение: сб. науч.-техн. ст. ГКБ «Южное»*. 2014. № 1. С. 14—20.
5. Кавелин С. С. Главное дело жизни. *Космічна наука і технологія*. 1996. **2**, № 3-4. С. 102—103.
6. Кавелин С. С. *Метеор — изделие пробы 586. Физтех — люди и судьбы. Без грифа секретно*. Д.: ИМА-пресс, 2004. 434 с.
7. *Космонавтика*. Энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1985. 528 с.
8. Кучма Л. *Украина не Россия*. К.: Время, 2003. 560 с. ISBN 5-94117-075-0
9. Мітіков Ю. Найбільша таємниця радянської ракетної техніки. *Дзеркало тижня*. 22.02.2008. № 7.
10. Митрахов Н. А., Платонов В. П., Тимченко А. Ю. *Ракетчик, ставший Президентом*. Под ред. акад. В. П. Горбулина, А. В. Дегтярева. К.: Спэйс-Информ, 2018. 392 с.
11. Морозов И. И. Приближенный расчет процесса опорожнения газожидкостной емкости. *ИФЖ*. 1956. № 12. С. 45—51.
12. Никифорова Е. СССР не хотел открывать космическую эру. *МП Понедельник*. 08.10.2001.
13. Патон Б. Е., Вавілова І. Б., Негода О. О., Яцків Я. С. Україна в сузір'ї космічних держав світу. *Космічна наука і технологія*. 2001. **7**, № 1. С. 3—92. <https://doi.org/10.15407/knit2001.01.002>
14. Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г. Академік В. І. Вернадський про споконвічність життя у космосі (до 100-річчя праці «Початок і вічність життя»). *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 2. С. 85—92.
15. Платонов В. *ЯНГЕЛЬ. Орбиты жизни*. 2-е изд. Д.: АРТ-ПРЕСС, 2012. 608 с.
16. *Призваны временем. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное»*. Под общ. ред. акад. С. Н. Конюхова. Д.: АРТ-ПРЕСС, 2004. 232 с.
17. Сметанин Ю. Проектанты сторают в небесах. *Зеркало недели*, 13.04.2007. № 14.
18. *Explorer and Early Satellites*. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/explorer/explorer-overview.html (дата звернення: 08.10.2022).
19. Mitkov Yu., Shynkarenko O. A new look at the hot separation of liquid rocket stages. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. and Eng.* 2021. **4**. P. 1—18. DOI 10.1007/s12567-021-00407
20. Ventskovsky O., Vavilova I., Yatskiv Ya. They blazed the trail for the space pioneers. On some little-known Ukrainian names in the history of Astronautics and rocketry. *History of Rocketry and Astronautics. Proceedings of 40 History Symposium IAA (Valencia, Spain, 2006)*. Ed. M. Freeman. *AAS History Ser.* 2012. **37**. P. 88—96.

REFERENCES

1. Balyshv M. A., Koval Yu. Yu. (2021). Participation of the Kharkiv Astronomical Observatory and its representatives in the Soviet space program in the 1960s. *Space Science and Technology*, **27**, № 5, 86—99.
2. Belii A. *50 years ago Dnepropetrovsk conquered space*. URL: <https://gorod.dp.ua/news/70866> (Last accessed: 08.10.2022).
3. Goman O. G. (2011). Vyacheslav Mikhailovich Kovtunencko — an outstanding scientist in the field of astronautics. *Technical mechanics*, № 3, 7—10.
4. Degtyarev A. V., Kushnarev A. P., Popov D. A., et al. (2014). Ultra-small space rocket. *Space technology. Missile weapons. Collection of scientific and technical articles of the Yuzhnoye State Design Bureau*, № 1, 14—20.
5. Kavelin S. S. (1996). The main business of life. *Space Science and Technology*, **2**, № 3-4, 102—103.
6. Kavelin S. S. (2004). *Meteor — sample item 586. People and destiny. Unmarked secret*. D.: IMA-pres, 434 p.
7. *Cosmonautics*. Encyclopedia (1985). M.: Sov. Encyclopedia, 528 p.
8. Kuchma L. (2003). *Ukraine is not Russia*. K.: Vremja, 560 p. ISBN 5-94117-075-0
9. Mitkov Yu. (2008). The biggest secret of Soviet missile technology. *Mirror of the week*, 22.02, № 7.
10. Mitrahov N. A., Platonov V. P., Timchenko A. Ju. (2018). *Rocketeer who became President*. Eds V. P. Gorbulina, A. V. Degtyareva. K.: Spjejs-Inforn, 392 p.
11. Morozov I. I. (1959). Approximate calculation of the process of emptying the gas-liquid container. *IFZh*, № 12, 45—51.
12. Nikiforova E. (2001). The USSR did not want to open the space age. *MP Monday*, 08.10.
13. Paton B. E., Vavilova I. B., Negoda A. A., Yatskiv Ya. S. (2001). Important cornerstones in the cosmic era. *Kosm. nauka tehnol.*, **7**(1), 3—92. <https://doi.org/10.15407/knit2001.01.002>

14. Pylypchuk O. Ya., Strelko O. H. (2021). Academician V. I. Vernadsky about the originality of life in space (To the 100th anniversary of his work “The Beginning and Eternity of Life”). *Space Science and Technology*, **27**, № 2, 85–92.
15. Platonov V. (2012). *YaNGEL. Orbits of life*. 2nd ed. D.: ART-PRESS, 608 p.
16. *Called by time. Rockets and spacecraft of the Design Bureau “Yuzhnoye”* (2004). Ed. S. N. Konyukhov. Dnepropetrovsk: ART-PRESS, 232 p.
17. Smetanin Yu. (2007). Designers burn in the sky. *Mirror of the week*, 13.04. № 14.
18. *Explorer and Early Satellites*. URL: https://www.nasa.gov/mission_pages/explorer/explorer-overview.html (Last accessed: 08.10.2022).
19. Mitikov Yu., Shynkarenko O. (2021). A new look at the hot separation of liquid rocket stages. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. and Eng.*, **4**, 1–18. DOI 10.1007/s12567-021-00407.
20. Ventskovsky O., Vavilova I., Yatskiv Ya. (2012). They blazed the trail for the space pioneers. On some little-known Ukrainian names in the history of Astronautics and rocketry. *History of Rocketry and Astronautics. Proc. 40 History Symp. IAA (Valencia, Spain, 2006)*. Ed. M. Freeman. *AAS History Ser.*, **37**, 88–96.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2022

Після доопрацювання 20.12.2022

Прийнято до друку 20.12.2022

Received 14.11.2022

Revised 20.12.2022

Accepted 20.12.2022

Yu. Mitikov, Dr. Sci. in Tech., assistant professor, Head of the Propulsion Systems Department

ORCID: 0000-0002-4787-603X

E-mail: mitikov2017@gmail.com

S. Bilogurov, Ph.D. in Tech., assistant professor of the Propulsion Systems Department

E-mail: steams@ukr.net

Oles Honchar Dnipro National University

72 Naharin Ave., Dnipro, 49010 Ukraine

SCIENTIFIC-TECHNICAL ASPECTS OF THE WORLD’S FIRST UKRAINIAN SPACE COMPLEX «VESELKA»

On October 27, 1961, the first world’s space launch vehicle (not completed and tested well ballistic missile) 11K63 (63S1) with a satellite was launched. The main goal of the new space complex “Veselka” (“Rainbow”) (K11K63) was to define potential branches for the effective usage of space technologies. The weight of the first Ukrainian satellite DS-1 (Dnipropetrovsk satellite) was 310 lbs. The practical usage of new space complex was the launch of artificial satellites weighing up to 990 lbs into low Earth orbit. For comparison, the weight of the first American satellite was 30 lbs. with the 4th stage of the rocket, without the possibility to detach the last stage. The satellite DS-1 passed all tests necessary for that time. It was completely ready for work in the conditions of outer space. But ... the first Ukrainian satellite to go into space was DS-2, launched on March 16, 1962, in the 3rd launch attempt.

For the first time, an attempt was made to analyze the phenomenon of creating the world’s first space complex and launching serial satellites of the Earth (hereinafter – the well-known series “Cosmos”) against the historical background. The scientific, technical, and military-applied aspects of the development of the space complex were analyzed. The role of the powerful industrial cooperation from the very beginning planned by Academies of Sciences, branch institutes, and scientists of Eastern Europe, France, Sweden, and India (the “Intercosmos” program) for the development of the complex was described. The issues of staff training for the rocket and space industry are particularly underlined as a key factor of success in space. Some inaccuracies regarding the history of Ukrainian satellites were noted and fixed, which are often found in some publications on this topic.

Keywords: Ukrainian space complex, satellite, Academies of Sciences, “Cosmos”, M. K. Yangel, scientific cooperation, personnel training.

НОТАТКИ НА СТОРІНКАХ КНИГИ Е. І. КУЗНЕЦОВА «ТРИДЦЯТЬ РОКІВ НА ОРБІТІ»

Подано огляд книги «Тридцять років на орбіті» Е. І. Кузнєцова, присвяченій 30-річчю Державного космічного агентства України. Книга містить опис успішних проєктів космічної галузі України, нових космічних апаратів, ракет-носіїв і двигунних систем, як і статистику пусків ракет-носіїв, створених українськими підприємствами. Окремі розділи присвячено польоту Л. Каденюка у складі екіпажу місії STS-87, міжнародному співробітництву та діяльності організацій, які підпорядковуються Державному космічному агентству України.

Ключові слова: космічні дослідження, видатні особистості, Державне космічне агентство України.

24 лютого 2022 року — день початку віроломної військової агресії Російської Федерації проти України — змінив наш звичний уклад життя, змістив мирні акценти соціально-економічної діяльності на оборонні та відбудову військово-промислового комплексу, пришвидшив пошуки нових орієнтирів міжнародної співпраці та допомоги для нашої Перемоги і післявоєнного відновлення України. Непомітним для широкого кола громадськості пройшов у 2022 році ювілей Державного космічного агентства України (ДКА України¹), створеного з набуттям незалежності України — 29 лютого 1992 року.

З нагоди 30-річного ювілею ДКА України Едуард Іванович Кузнєцов, багаторічний заступник і радник Генерального директора ДКА України, нині — голова Громадської ради ДКА України, підготував науково-популярну книгу «Тридцять років на орбіті»². Книга відбиває основні віхи

«складного шляху, який було подолано за ці роки, які перепони керівництво і колектив агентства вимушені були долати в перші роки формування нашої держави і які досягнення вписано в історію незалежної України» [10]. Автор книги як безпосередній учасник всіх подій ділиться з читачами, як «крок за кроком проходило становлення України як сучасної космічної держави і працівники агентства, як справжні державники, робили все для того, щоб авторитет нашої країни міцнішав на міжнародній арені, а фахівці та підприємства галузі в умовах жорсткої конкуренції активно і наполегливо проривалися на світовий ринок космічних послуг» [10, С. 4].

Пройдемося коротко сторінками книги Е. І. Кузнєцова, які промовисто й інформативно відзеркалюють 30-річний шлях космічної галузі в Україні. Хронологія, занотована автором, надає можливість повернутися в часі до успішних проєктів космічних програм України та згадати інші книги, написані учасниками тих подій.

Ініціатива створення ДКА України належить академікові НАН України Ярославу Степановичу Яцківу, тоді голові Комісії космічних досліджень АН УРСР. До ініціативної групи входили представники академічних установ і керівники підприємств космічної галузі. Активна робота групи розпочалася одразу після проголошення незалежності України. Вже 7 листопада 1991 р. члени групи звернулися до президента Акаде-

¹ 29 лютого 1992 року створено Національне космічне агентство України. У грудні 2010 року Національне космічне агентство України перейменовано в Державне космічне агентство України.

² Кузнєцов Е. І. Тридцять років на орбіті. До 30-річчя утворення Державного космічного агентства України. Науково-популярне видання. Київ: ТОВ «Спейс-інформ», 2023, 124 с. (Редагування — О. Василенко, М. Мітрахов. Макетування та верстка — С. Вавілов). Видання здійснено за підтримки Української асоціації високотехнологічних підприємств та організацій «Космос», голова ради асоціації В. В. Васильєв.



мії наук України, академіка Бориса Євгеновича Патона з пропозиціями про підготовку міждержавних угод з космічної діяльності, концепцію української програми космічних досліджень та створення державного органу управління космічною галуззю [3, 14, 15]. 13 грудня 1991 р. відбулося засідання Президії Академії наук на тему «Про космічні дослідження СРСР і України», 30 січня 1992 року — зустріч членів ініціативної групи і Б. Є. Патона з Президентом України Леонідом Кравчуком, 29 лютого 1992 року був підписаний Указ «Про створення Національного космічного агентства України», і 9 березня 1992 року Генеральним директором було призначено Володимира Павловича Горбуліна [10, С. 7].

Під керівництвом В. П. Горбуліна було розгорнуто діяльність ДКА України, окреслено сфери діяльності і відповідальності агентства як державного органу управління, започатковано організаційні принципи, структуру і кадрову політику, визначено підприємства космічної галузі України, які увійшли у підпорядкування агентства. Важливою частиною роботи ДКА України в ті роки стало «забезпечення можливостей міжнародного співробітництва, підписання угод, в першу чергу з провідними космічними країнами: Індією, США, РФ, КНР, щоб відкрити ринки цих

країн для вітчизняних підприємств» [1, 10, С. 10]. 25 травня 1993 року Постановою Кабінету Міністрів України було затверджено першу Державну космічну програму України. Варто нагадати, що ініціатором її підготовки та співавтором був генерал-майор Анатолій Павлович Завалишин [5], заступник начальника космодрому Байконур (1986—1988), перший президент Федерації космонавтики України (1991—2001), а робота над розробкою програми тривала в стінах Головної астрономічної обсерваторії АН України. До першої Державної космічної програми України було «відібрано проекти, які забезпечували створення національної системи дистанційного зондування Землі «Січ» із запуском першого супутника «Січ-1» вітчизняною ракетою-носієм «Циклон-3» під юрисдикцією України, розробку технологій і створення вітчизняного телекомунікаційного супутника «Либідь», підготовку космонавта для здійснення наукових експериментів під час космічного польоту, пошук можливостей незалежного виходу в космічний простір (АКРК «Світязь»), підготовку експериментів щодо дослідження поверхні та атмосфери Марса, створення гіперзвукового авіаційно-космічного літального апарата, підготовку міжнародних угод про співпрацю з провідними космічними державами» [10, С. 9]. Сьогодні, через 30 років після цієї знакової події, очевидним є здобутки перших кроків космічної галузі України і те, з якими труднощами зіткнулося і Космічне агентство, і установи-виконавці при здійсненні проектів, частину з яких і досі не вдалося завершити з політичних і економічних обставин.

Запуск першого українського супутника «Січ-1», запланований у першій державній космічній програмі, довів «до світової спільноти, що Україна може відігравати суттєву роль на світовому космічному ринку. Тобто це було не тільки науково-технічне, а й політичне завдання. Виготовлені в Україні раніше і виведені на орбіти понад 400 космічних апаратів зараховувалися в загальний підсумок досягнень Радянського Союзу. В КБ «Південне» в складі КБ-3 (керівник — член-кореспондент НАН України Володимир Йосипович Драновський — ІВ) було створено нове проектне відділення для розробки і створення космічних систем, космічних і спеціальних комплексів,

космічних апаратів і наземних комплексів керування. В космічній програмі цей апарат отримав назву «Січ-1» (Слава і Честь). Ключовими елементами комплексу наукової апаратури супутника були радіолокатор бокового огляду (РЛБО) та сканувальний радіометр РМ-08. Головною організацією цих ключових приладів був Інститут радіоелектроніки НАН України, а розробником і виробником блоку керування і обробки сигналів РЛБО і РМ-08 було СКТБ Морського гідрофізичного інституту АН України» [12; 10, С. 63—65]. Запуском КА «Січ-1» 31 серпня 1995 року з космодрому Плесецьк (Російська Федерація) ракетою-носієм «Циклон-3» було вирішене питання створення в Україні вітчизняної інфраструктури засобів керування космічними апаратами, прийому, обробки і поширення інформації для користувачів. Супутник «Січ-1» пропрацював на орбіті 8 років 4 місяці і 15 днів (при гарантійному терміні 6 місяців). Роботи з ним були припинені 15 січня 2004 року» [10, С. 63—65].

У лютому 1995 року на посаду Генерального директора ДКА України було призначено Олександра Олександровича Негоду. Десятирічний період його керівництва агентством став визначальним у формуванні ракетно-космічної галузі України. У 1996—1998 роках під егідою агентства запрацювали Національний центр управління та випробувань космічних засобів в Євпаторії (від 2014 року, після анексії Криму Російською Федерацією, — у Києві), Центр аерокосмічної освіти молоді в Дніпрі, створено Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України та Міжнародний центр космічного права Інституту держави і права ім. В. М. Корецького НАН України; відбувалася передача підприємств, інститутів і військових частин з Міністерства оборони України, які займалися ракетно-космічною тематикою, під управління ДКА України [10, С. 12—13]. Відмова від розробки та створення ракетно-космічної техніки військового призначення обернулася, як пише Е. І. Кузнецов, «кардинальними зменшеннями замовлень, значними втратами у фінансуванні та необхідністю перебудувати в короткі терміни всю свою діяльність» підприємствами космічної галузі. Для подолання наслідків такої конверсії і підтримки установ аерокосмічної промисловості

України було втілено 80 проєктів, зокрема 55 за участі фахівців ДКБ «Південне» при фінансовій підтримці Українського науково-технологічного центру [10, С. 11].

Унаслідок такої масштабної організаційної діяльності наприкінці 1990-х — початку 2000-х років в Україні було сформовано ракетно-космічну галузь. На той час у цій галузі працювало понад 60 тисяч працівників і 3500 військовослужбовців. ДКА України було надано статус спеціально уповноваженого центрального органу виконавчої влади. Державну космічну програму затверджено Верховною Радою України як Закон України. Утворено представництва генерального замовника, запроваджено галузеві відзнаки, сформовано космічне право України [8, 9]. У березні 2000 року Верховна Рада прийняла Закон України «Про державну підтримку космічної діяльності», сформовано Раду молодих фахівців галузі, Всеукраїнську громадську організацію «Аерокосмічне товариство України» (2002 р.), яку очолив льотчик-космонавт Віталій Михайлович Жолобов [10, С. 13—16].

Найвидатнішою подією того часу в історії України стала участь першого українського космонавта Леоніда Каденюка у польоті на американському космічному кораблі багаторазового використання «Колумбія» місії STS-87, яка тривала від 19 листопада до 5 грудня 1997 року [6]. На орбіті Л. К. Каденюк провів 10 наукових експериментів з космічної ботаніки, під час яких вивчав вплив мікрогравітації на розвиток рослин у космосі, та провів освітню програму, якою були охоплені близько 40 тисяч школярів в Україні та у США. Ці експерименти повторювали на землі його дублер Ярослав Пустовий та школярі, учасники освітньої програми в обох країнах. Ще у 1995 році згідно з домовленостями між Президентом України Леонідом Кучмою та Президентом США Вільямом Клінтоном та попереднім контактам між В. П. Горбуліним і директором НАСА Даніелем Голдніним розпочалася робота з підготовки українського космонавта для участі в одній із місій Space Shuttle. Керівником цього проєкту було призначено Е. І. Кузнецова, наукові експерименти готували академічні і університетські колективи під керівництвом

академіка АН України Костянтина Меркурійовича Ситника та члена-кореспондента АН України Єлизавети Львівни Кордюм [5], освітню програму «Вчителі та учні досліджують рослини в космосі» готувала Мала академія наук, керівниками освітньої програми з боку України були доктор фіз.-мат наук О. П. Федоров і канд. біол. наук В. І. Назаренко [5, 10, С. 33—45].

На початку 2000-х років Україна затвердилась на світовому ринку космічних послуг як знана космічна держава [2, 12]. В Україні організуються міжнародні конференції, семінари, створюються сучасні спільні підприємства, зокрема «Космотрас» для експлуатації конверсійної ракети SS-18 («Сатана») під назвою «Дніпро» (країни-засновники Україна, РФ, Казахстан), перший пуск якої відбувся 21 квітня 1999 р. «Враховуючи технічні характеристики, закладені при розробці ракети, постійні роботи з її модернізації, а також зміни в конструкції та системах керування, пов'язані з її конверсією для використання в проєкті «Дніпро», ця ракета стала універсальним засобом для здійснення кластерних пусків. Всього з квітня 1999 року за програмою «Дніпро» було здійснено 22 пуски, запущено на орбіти понад 70 космічних апаратів. Для забезпечення контролю старту ракет-носіїв і виходу космічних апаратів на орбіти фахівцями КБ «Південне» та Науково-дослідного інституту радіовимірювань (м. Харків) було обладнано виносний вимірювальний пункт контролю і спостереження, який розташовувався в Султанаті Оман» [10, С. 53—55; 11, 13].

Флагмани космічної галузі України — КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля, генеральний конструктор-генеральний директор академік НАН України Станіслав Миколайович Конюхов, і ВО «Південмаш» ім. О. М. Макарова, генеральний директор Юрій Сергійович Алексєєв, — беруть участь у міжнародних проєктах, зокрема із запусків низькоорбітальних супутників групи «ГлобалСтар» [10, С. 68—69] і запроваджують нові програми [4, 11—13]. Найвідоміша серед таких міжнародних програм — «Морський Старт» (країни-засновники США, РФ, Україна і Норвегія) з використанням нової ракети-носія «Зеніт-3SL». Керівником програми «Морський старт» з боку України було призначено головно-

го конструктора ракетно-космічного напрямку КБ «Південне» Команова Володимира Геннадійовича. Перший пуск РН «Зеніт-3SL» з морської платформи «Одісей» відбувся 28 березня 1999 р., всього здійснено 36 пусків РН «Зеніт-3SL» [4, 10, С. 47—51]. «З метою підвищення ефективності та окупності проєкту «Морський старт» засновники спільного підприємства на зустрічі, яка відбулася 26 липня 2002 року, підтримали ініціативу КБ «Південне» і вирішили модернізувати РН «Зеніт» для старту з суходолу, використовуючи стартовий комплекс на космодромі Байконур. Для взаємодії з компанією «Морський старт» була утворена нова компанія «Міжнародні космічні послуги». В цьому проєкті використовувалася двоступенева РН «Зеніт-2SLB», тріступенева РН «Зеніт-3SLB», тріступенева РН «Зеніт-3SLBФ». Всього з 2007 року за програмою «Наземний старт» було здійснено 11 пусків» [4, 10, С. 52]. Водночас в Україні розпочалася робота з підключення наукових колективів і підприємств космічної галузі до проведення експериментів на Міжнародній космічній станції (МКС) і створення Українського модуля на Російському сегменті МКС [16]. У жовтні 2003 року підписано Угоду між Україною і Бразилією про будівництво стартового майданчика для нової РН «Циклон-4» на космодромі Алкантара поблизу екватора з метою забезпечення України незалежного виходу в космос [10, С. 17—20, 56—60]. Україна набула членства в КОСПАР.

У 2005 році на посаду Генерального директора ДКА України призначається Ю. С. Алексєєв. Серед важливих міжнародних проєктів — Українсько-Європейський проєкт ТВІНІГ: «Прискорення Українсько-Європейського співробітництва в космічній сфері» (2008—2010), учасниками якого були Україна, Франція, Німеччина, а керівниками — Е. І. Кузнецов від України і Андре Мусін-Пушкін (Франція) від країн ЄС [10, С. 23]. Підписані Угода між Україною і Європейським Союзом «Про співробітництво щодо цивільної глобальної навігаційної супутникової системи Галілео» (ЄС ратифікував цю Угоду 8.10.2013 р.) і Угода між Урядом України та Європейським космічним агентством про співробітництво у використанні космічного простору у

мирних цілях. Створюється спільна робоча група «Україна — ЄС» зі співробітництва в космічній сфері (керівники Е. І. Кузнецов та Х. Бішофф). «У 2007 році на замовлення Єгипту КБ «Південне» та ВО «Південмаш» за участю підприємств української кооперації створили і здійснили запуск (17 квітня 2007 року) КА «ЄгиптСат-1» та побудували станцію управління та прийому супутникової інформації з КА біля м. Александрії (Єгипет)» [10, С. 68—69]. КА «ЄгиптСат-1» дистанційного зондування Землі пропрацював на орбіті більш ніж три роки.

Рік перебування (2009—2010 рр.) на посаді Генерального директора ДКА України Олександра Олександровича Зінченка ознаменувався Угодою з канадською компанією МДА щодо створення Національної супутникової системи зв'язку та запуску «багатостраждального» телекомунікаційного супутника «Либідь» [10, С. 26, 71].

З поверненням Ю. С. Алексєєва в 2011 році до керівництва ДКА України активізувалося будівництво космодрому Алкантара в Бразилії. «В червні 2012 року, у квітні 2013 року, у вересні 2014 року з України було відправлено до Бразилії технологічне обладнання для наземного комплексу «Циклон-4». Але в 2015 році Бразилія з політичних причин в односторонньому порядку вирішила припинити співробітництво. «Досвід взаємовідносин, отриманий в рамках міжнародного проекту «Циклон-4», а також великий науково-технічний доробок в створенні новітньої ракетно-космічної техніки дозволяють сьогодні українській стороні спрямувати зусилля на пошук більш надійних партнерів і нових місць розташування космічного ракетного комплексу» [10, С. 59].

17 серпня 2011 року з пускової бази «Ясний» (Оренбурзька область, Російська Федерація) було здійснено пуск ракети-носія «Дніпро», яка вивела на навколосезну орбіту супутник «Січ-2». Запуск космічного апарата було присвячено 100-річчю від дня народження М. К. Янгеля. На супутнику було встановлено апаратуру для дистанційного зондування Землі в оптичному і середньому інфрачервоному діапазонах та комплекс наукової апаратури «Потенціал» виробництва Львівського центру Інституту кос-

мічних досліджень НАНУ—ДКАУ. Паралельно з КА «Січ-2» було виведено на орбіти шість малих супутників на замовлення Туреччини, Нігерії, Італії, США. Після успішної роботи протягом 15 місяців в грудні 2012 року зв'язок з КА обірвався через втрату електропостачання [10, С. 70].

Тоді саме «Європейське космічне агентство поставило завдання створення легкої ракети-носія для запуску невеликих, малих і мікросупутників. Інтегратором всіх пропозицій було визначено Італійське космічне агентство. В тендері на виготовлення двигуна для останнього четвертого ступеня нової ракети-носія, яка отримала назву «Вега», перемогли українські підприємства. Маршовий двигун РД-843 для верхнього ступеня ракети, розроблений КБ «Південне» та виготовлений на ВО «Південмаш», виявився найбільш ефективним і протягом 10 років успішно працює в цьому проєкті. Особливість цього двигуна полягає в тому, що він може вмикатися до 5 разів, завдяки чому забезпечується розведення супутників на різні орбіти» [10, С. 62]. 13 лютого 2012 року з космодрому Куру у Французькій Гвіані відбувся перший пуск РН «Вега» (всього здійснено 20 пусків). Посилилася інституційна спроможність ДКА України в реалізації європейських космічних програм у сфері супутникової навігації EGNOS — GALILEO та дистанційного зондування Землі GMES (2013—2014) за проєктом ТВІНІНГ-2. Тим самим, як зазначає Е. І. Кузнецов, створювалися всі умови для входження України асоційованим членом Європейського космічного агентства [10, С. 27].

Успішним для України став міжнародний проєкт КБ «Південне» та ВО «Південмаш» з компанією «Orbital-ATK» (США) зі створення РН «Антарес», а саме розробки та виготовлення основної конструкції першого ступеня цієї ракети. «Перший ступінь — рідинний, на компонентах палива кисень — гас, з двома маршовими двигунами. Головний обтічник виготовлений із композиційних матеріалів. Головна конструкція першого ступеня та частина наземного обладнання розроблена в КБ «Південне», виготовлена на ВО «Південмаш» в кооперації з підприємствами «Хартрон-АРКОС», «Київприлад», «Хартрон-ЮКОМ», «ЧеЗаРа», «РА-ПД» та іншими. Від часу першого пуску 23 квітня 2013 року до лютого 2022 року здійснено 16 пусків

РН «Антарес» для доставки вантажів до МКС» [10, С. 61].

«Революцією на світовому ринку із запусків мікросупутників можна вважати кластерний запуск РН «Дніпро» в червні 2014 року 33 космічних апаратів на замовлення 17 країн світу. Це був на той час своєрідний світовий рекорд. У складі цього угруповання був перший український наносупутник «Політан-1», виготовлений студентами НТУУ «Київський політехнічний інститут» [10, С. 28].

У 2014—2021 роках, після звільнення Ю. С. Алексеєва з посади голови ДКА України, змінилося шість керівників агентства³: О. С. Уруський (2015 р.), Д. А. Сабадош (2015—2016 рр.), Ю. М. Радченко (2016—2017 рр.), П. П. Дегтяренко (2017—2019 рр.), В. В. Усов (2020 р.), В. В. Тафтай (2021—2022 рр.). Було реалізовано п'яту Державну космічну програму (2013—2017 рр.) і досі не прийнято шосту Державну космічну програму, яка з приходом кожного нового голови ДКА України зазнавала чергових змін. «Аналіз діяльності ДКА, підприємств ракетно-космічної галузі за минулі роки свідчить про те, що ця галузь є стратегічною, найбільш сучасною, високотехнологічною та інноваційною сферою вітчизняної економіки, яка забезпечує підтримку її оборонної та економічної безпеки. Проте хаотична зміна керівників агентства після 2010 року, після люстрації професіоналів, негативно відбилася на діяльності ДКА і галузі в цілому. Окремі керівники не звернули увагу на необхідність розвитку внутрішнього ринку, а втрата ринку країн СНД призвела до катастрофічного скорочення замовлень, розвалу кооперації, порушення ритмічності роботи підприємств галузі, зривів контрактів, фінансових проблем, втрати кваліфікованих кадрів, відтоку з підприємств і навчальних закладів молоді» [10, С. 99].

Варто додати до цих висновків Е. І. Кузнецова, що в ті часи падіння фінансування космічної галузі вагомим стрижнем підтримки роботи колективів, які працювали над новими проектами, стали Цільові комплексні програми НАН України з наукових космічних досліджень (2013—2017 рр., 2018—2022 рр.), керівник ака-

демік НАН України Я. С. Яцків. Серед таких нових проєктів з виготовлення корисного наукового навантаження фахівцями ДКБ «Південне» — «Іоносат-Мікро» і «Аерозоль-UA», ініційовані в Інституті космічних досліджень НАНУ — ДКАУ і Головній астрономічній обсерваторії НАН України відповідно. Зі свого боку, ДКБ «Південне» за ініціативи генерального директора академіка НАН України Олександра Вікторовича Дегтярева запропонувало координативний план, згідно з яким реалізуються спільні дослідження з установами НАН України на підтримку нових технологічних розробок і впроваджень на цьому підприємстві, керівники спільної програми від НАН України академік НАН України А. Г. Наумовець (до 2020 р.) і академік НАН України В. П. Горбулін. Вагому складову успішного розвитку космічних досліджень забезпечує науково-практичний журнал «Космічна наука і технологія», створений у 1995 році НАН України і ДКА України (головний редактор академік НАН України Б. Є. Патон (1995—2018 рр.), від 2018 року — академік НАН України Я. С. Яцків). Упродовж своєї діяльності журнал, що індексується в WoS і Scopus, надає можливість науковцям і фахівцям ракетно-космічної галузі представляти міжнародній спільноті результати своїх розробок і дисертаційних робіт [17].

В останні роки було прийнято декілька важливих організаційних рішень щодо подальшого розвитку космічних досліджень в Україні. У 2018 році розпочалося будівництво нового космодрому у Новій Шотландії (Канада) для пусків модернізованої РН «Циклон-4М» — української двоступеневої РН середнього класу [10, С. 59]. У жовтні 2019 року увійшов у дію Закон України «Про внесення змін до деяких Законів України щодо державного регулювання космічної діяльності», згідно з яким надано дозвіл для суб'єктів всіх форм власності займатися космічною діяльністю. 7 вересня 2020 року прийнято Постанову Кабінету Міністрів України «Деякі питання Міністерства з питань стратегічних галузей промисловості України», згідно з якою ДКА України та галузь в цілому підпорядковуються цьому міністерству. 10 грудня 2020 року Україна при-

³ На початок 2023 року — сім керівників агентства

єдналася до міжнародної програми «Артеміда» з освоєння Місяця.

Окремі розділи книги Е. І. Кузнецова присвячено питанням модернізації виробничої бази для створення космічних апаратів і двигунобудування в ДКБ «Південне» і ВО «Південмаш» [10, С. 73—75]; діяльності ДНВП «Об'єднання Комунар» [10, С. 76—77] і ПАТ «Хартрон» [10, С. 78—79] у створенні систем керування для космічних апаратів, ракет-носіїв, орбітальних станцій; ракетно-космічного приладобудування на таких підприємствах, як ВО «Київприлад» [10, С. 81], НВК «Курс» [10, С. 82—83], КПСП «Арсенал» [10, С. 84—85]; програмі утилізації та виробництву твердого ракетного палива на НВО «Павлоградський хімічний завод» [10, С. 93—95]. Ці та інші підприємства увійшли до Української асоціації високотехнологічних підприємств та організацій «Космос», утвореної 1 серпня 2018 року, — неприбуткового добровільного об'єднання підприємств, організацій, установ і товариств усіх форм власності та відомчого підпорядкування, які здійснюють, мають намір здійснювати або підтримують космічну діяльність [10, С. 30]. Автор книги в енциклопедичному стилі характеризує масштабну діяльність Національного центру управління та випробувань космічних засобів, який фактично став першим підрозділом військово-космічних сил України [10, С. 86—92]; питання використання інноваційних технологій в інших галузях економіки та під час виробництва товарів для населення [10, С. 96—99]; проблеми та успіхи формування космічного світогляду у молоді на прикладі Національного центру аерокосмічної освіти молоді та Українського молодіжного аерокосмічного об'єднання «Сузір'я» [10, С. 96—99].

Книга містить декілька інформативних додатків щодо статистики і хронології пусків з космодромів світу ракет-носіїв українського розроблення та виробництва у період незалежності України [10, С. 109—115], космічних апаратів українського розроблення та виробництва, які були виведені на навколосеземні орбіти у період незалежності України [10, С. 116—117], керівного складу ДКА України [10, С. 118—122]. За 30 років здійснено 132 пуски ракет українсько-

го виробництва з 6 космодромів світу. В космос було запущено понад 300 КА (з них 31 КА українського виробництва) на замовлення 40 країн світу. Питома вага цих пусків на світовому ринку складала в середньому від 6 до 9 %, а в окремі роки цей показник сягав 13 %. Близько 65 % всіх стикувань космічних кораблів на орбіті забезпечувалося апаратурою ПАТ НВК «Курс» (директор В. О. Репко) і ПрАТ «Елміз (директори О. І. Бочкарьов, М. М. Шумило) — за ці роки було виготовлено 164 комплекти навігаційних комплексів. За Державними космічними програмами ці показники такі: першої (1993—1997 роки) було здійснено 32 пуски вітчизняних та виготовлених за участю України ракет-носіїв (РН) та виготовлено 17 космічних апаратів (КА), за час другої (1998—2002 рр.) — 23 РН і 4 КА, за час третьої (2003—2007 рр.) — 28 РН і 5 КА, за час четвертої (2008—2012 рр.) — 27 РН і 1 КА, за час п'ятої (2013—2017 рр.) — 27 РН [10, С. 29; додатки 1 і 2]. Ці показники свідчать, що *«ракетно-космічна галузь, незважаючи на хронічне недофінансування космічних програм (фінансування на рівні 35 %), відсутність державних замовлень на створення ракетно-космічної техніки протягом всього часу, була бюджетотворювальною та експортоспроможною. Експорт космічної продукції майже вдвічі перевищував імпорт комплектуючих»* [10, С. 30].

Наприкінці книги Е. І. Кузнецов зазначає: *«30 років діяльності Державного космічного агентства України — центрального органу виконавчої влади — це вагомі результати і набутий досвід роботи на міжнародних ринках в конкурентній боротьбі та в співпраці з потужними світовими космічними фірмами. Це переконаність у вірному виборі шляху розвитку сучасної та провідної галузі економіки країни. Це вміння в екстремальних умовах фінансування забезпечувати реалізацію космічної політики держави. Це впевненість у кращому майбутньому вітчизняної аерокосмічної освіти, космічної науки і ракетно-космічної промисловості»* [10, С. 108]. Всього надія і впевненість у майбутньому розвитку космічної галузі й те, що Україна здобуде членство в Європейському космічному агентстві, а за підтримки НАСА здійснить проекти українських підпри-

емств і наукових установ у програмі з освоєння Місяця «Артеміда» та направить українського астронавта в складі екіпажів-розбудовників перших поселень землян на Місяці. Всі ці плани здійсняться разом з єдиною сьогодні вірою у перемогу України у війні з Росією, — тільки пере-

мога забезпечить нам життя під мирним небом.
Слава Україні!

Від імені членів редколегії
І. Вавилова, доктор фіз.-мат. наук, професор,
член-кореспондент НАН України

ЛІТЕРАТУРА

1. Горбулін В. П. *Мій шлях у задзеркалля. Не лише дорожні нотатки*. Київ: Брайт Букс, 2019. 266 с.
2. Горбулін В. П., Шевцов А. І., Шеховцов В. С. Міжнародний космічний ринок послуг: місце і перспективи України. *Космічна наука і технологія*. 2000. 6, № 1. С. 64—71. <https://doi.org/10.15407/knit2000.01.064>
3. Горбулін В. П., Яцків Я. С. Б. Є. Патон і розвиток космічної науки та технології. *Космічна наука і технологія*. 2018. 24, № 5. С. 43—52. <https://doi.org/10.15407/knit2018.05.043>
4. Дегтярєв А. В. *Призвані временем. От противостояния к международному сотрудничеству*. Днепропетровск: Арт-Пресс, 2009.
5. Завалишин А. П. *Сквозь пространство и время: записки ветерана космодрома Байконур*. Сост. Б. В. Журахович, А. П. Завалишин. Днепропетровск: Дніпрокнига, 1997. 346 с.
6. Каденюк Л. *Місія — Космос*. Київ: ТОВ «Новий друк», 2017. 516 с.
7. Кордюм Є. Л., Чепмен Д. К. *Рослини в космосі*. Київ: Академперіодика, 2007. 215 с.
8. *Космічне право України: Зб. нормативно-правових актів та міжнар. документів*. Ред.: О. О. Негода, Ю. С. Шемшученко. Упоряд.: О. В. Беглий, А. І. Дмитрієв. Київ: Ін-Юре, 1998. 216 с.
9. *Космічне право України: Зб. нац. і міжнар. правових актів*. Упоряд.: І. П. Андрушко, О. В. Беглий. Відп. ред. Н. Р. Малишева, Ю. С. Шемшученко. 3-те вид., переробл. та допов. Київ: Юрінком Інтер, 2001. 352 с.
10. Кузнецов Е. І. *Тридцять років на орбіті. До 30-річчя утворення Державного космічного агентства України*. Київ: Спејс-Інформ, 2022. 124 с.
11. *Національна академія наук України. Історія ракетно-космічної науки і техніки України*. Відп. ред. В. П. Горбулін, наук. ред. Ю. О. Храмов. Київ: Фенікс, 2021. 456 с.
12. Патон Б. Є., Вавилова І. Б., Негода О. О., Яцків Я. С. *Україна в сузір'ї космічних держав світу*. Київ: ВАІТЕ, 2001. 94 с.
13. *Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное»*. Под общей ред. С. Н. Конюхова. Днепропетровск: ООО «КолорГраф», 2001.
14. Яцків Я. С. *Наукові будні. Справа «Космос UA»*. Ч. 2. 1991—1997. Київ: Академперіодика, 2011. 186 с.
15. Яцків Я. С. З історії космічних досліджень в Україні. 1. Виконання космічних досліджень станом на 1991 р. *Космічна наука і технологія*. 2022. 28, № 4. С. 78—88. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.078>
17. Paton B. E., Negoda A. A., Yatskiv Ya. S., et al. Ukrainian Scientific Research and Technological Experiments proposed for the International Space Station. *Kosm. Nauka Tehnol.* 2000. 6, № 4, P. 1—152. <https://doi.org/10.15407/knit2000.04.001>
17. Vavilova I. B., Zievako V. S., Pakuliak L. K., Potapovych L. P. “Space Science and Technology” journal: Statistics and Scientometrics for 1995—2020. *Space Sci. & Technol.* 2020. 26, № 6. P. 94—103. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.094>

REFERENCES

1. Gorbulin V. P. (2019). *My way through the looking glass. Not just travel notes*. Kyiv: Bright Books.
2. Gorbulin V. P., Shevtsov A. I., Shekhovtsov V. S. (2000). International space service market: place and future prospects of Ukraine. *Kosm. Nauka & Tehnol.*, 6, № 1, 64—71. <https://doi.org/10.15407/knit2000.01.064>
3. Gorbulin V. P., Yatskiv Y. S. (2018). B. E. Paton and the development of space science and technology. *Space Sci. & Technol.* 24, № 5, 43—52. <https://doi.org/10.15407/knit2018.05.043>
4. Degtyarev A. V. (2009). *Called by time. From opposition to international cooperation*. Dnipropetrovsk: Art-Press.
5. Zavalishin A. P. (1997). *Through space and time: notes of a veteran of the Baikonur cosmodrome*. Comp. B. V. Zhurahovich, A. P. Zavalishyn. Dnipropetrovsk: Dniproknyga.
6. Kadeniuk L. (2017). *Mission — Cosmos*. Kyiv: Novy druk LLC.
7. Kordyum E. L., Chapman D. K. (2007). *Plants in space*. Kyiv: Akadempriodyka.

8. *Space law of Ukraine. Collection of normative legal acts and international documents* (1998). Ed.: O. O. Negoda, Yu. S. Shemshuchenko. Compilers: O. V. Beglii, A. I. Dmitriev. Kyiv: In-Yure.
9. *Space Law of Ukraine: Collection of National and international legal acts* (2001). Arrange I. P. Andrushko, O. V. Runaway. Ans. eds N. R. Malysheva, Yu. S. Shemshuchenko. 3rd ed., revised and added. Kyiv: Yurinkom Inter.
10. Kuznetsov E. I. (2022). *Thirty years in orbit. To the 30th anniversary of the establishment of the State Space Agency of Ukraine*. Kyiv: Space-Inform.
11. *National Academy of Sciences of Ukraine. History of rocket and space science and technology of Ukraine* (2021). Eds V. P. Gorbunin, Yu. O. Khramov. Kyiv: Phoenix.
12. Paton B. E., Vavilova I. B., Negoda A. A., Yatskiv Ya. S. (2001). Important Cornerstones in the Cosmic Era. *Kosm. nauka tehnol.*, 7, № 1, 2—92. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2001.01.002>
13. *Missiles and spacecraft of the Yuzhnoye Design Bureau* (2001). Eds S. N. Konyukhov. Dnipropetrovsk: KolorGraf LLC.
14. Yatskiv Ya. S. (2011). *Scientific weekdays. The “Cosmos UA” case. Part 2. 1991—1997*. Kyiv: Akadempriodyka.
15. Yatskiv Ya. S. (2022). From the history of space research in Ukraine. 1. The performance of space research as of 1991. *Space Sci. & Technol.*, 28, № 4, 78—88. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.078>
16. Paton B. E., Negoda A. A., Yatskiv Ya. S., et al. (2000). Ukrainian Scientific Research and Technological Experiments proposed for the International Space Station. *Kosm. Nauka Tehnol.*, 6, № 4, 1—152. <https://doi.org/10.15407/knit2000.04.001>
17. Vavilova I. B., Zievako V. S., Pakuliak L. K., Potapovych L. P. (2020). «Space Science and Technology» journal: Statistics and Scientometrics for 1995—2020. *Space Sci. & Technol.*, 26, № 6, 94—103. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.094>

Стаття надійшла до редакції 27.02.2023

Після доопрацювання 06.03.2023

Прийнято до друку 06.03.2023

Received 27.02.2023

Revised 06.03.2023

Accepted 06.03.2023

NOTES ON THE PAGES OF THE BOOK “THIRTY YEARS IN ORBIT” BY E. I. KUZNETSOV

A review of the book “Thirty Years in Orbit” by E. I. Kuznetsov dedicated to the 30th anniversary of the State Space Agency of Ukraine is presented. The book contains a description of successful projects of the space industry of Ukraine, new space vehicles, space rockets and propulsion systems, as well as statistics of launches of the rockets developed by Ukrainian enterprises. Separate chapters of the book are devoted to the flight of L. Kadenyuk as a member of the crew of the STS-87 mission, international cooperation, and activities of organizations subordinated to the State Space Agency of Ukraine.

Keywords: space research, outstanding personalities, State Space Agency of Ukraine.

ПАМ'ЯТКА ДЛЯ АВТОРІВ

ЖУРНАЛ «КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ» є визнаним науково-практичним загальноакадемічним виданням в Україні, що висвітлює найширші аспекти космічної діяльності у державі та за кордоном. Журнал розрахований на фахівців у галузі космічної науки і техніки, на тих, хто займається використанням космічних технологій в різних галузях народного господарства, а також на закордонних читачів, які бажають ознайомитися з досягненнями космічної галузі України. У журналі публікуються оглядові та оригінальні статті з різних розділів космічної науки, техніки та технології: історичні, соціальні та організаційні аспекти проблеми дослідження космосу; космічні носії та апарати; системи керування космічними носіями та апаратами; космічний зв'язок та інформаційні системи; дослідження Землі з космосу; космічна фізика (навколоземний космічний простір); космічна астрономія та астрофізика; хімічні, фізичні та біологічні процеси в космосі; космічні конструкції, споруди та матеріали, а також різні повідомлення, звіти та рекламні матеріали.

Авторами та читачами журналу є видні діячі та спеціалісти космічної промисловості, вчені-теоретики та практики, що працюють у галузях космічної фізики, хімії, астрономії, матеріалознавства, машинобудування, навігації, біології тощо. Журнал корисний для науковців, інженерів, аспірантів та студентів вишів, його включено до переліку наукових фахових видань, у яких можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт з фізико-математичних та технічних наук. Редколегія спрямовує зусилля на підвищення рівня висвітлення результатів робіт українських вчених і конструкторів ракетно-космічної техніки у світових наукометричних базах.

Журнал виходить 6 разів на рік. З поточним номером чи архівом за минулі роки, а також правилами оформлення рукописів можна ознайомитись на сайті space-scitechjournal.org.ua

Кожен рукопис рецензується відомими фахівцями відповідної галузі. На основі висновків рецензентів редколегії робить висновок про можливість публікації.

При подачі рукопису автор надсилає у редакцію дві тверді копії оригіналу, електронні копії, направлення на бланку установи та Ліцензійну угоду (бланк угоди є на сайті) на адресу:

вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України

Редакція КНІТ

Рукописи подаються українською або англійською мовою, кожен рукопис супроводжується резюме (українською та англійською мовами, не менш як 1800 знаків кожне). Послідовність подачі матеріалу така:

- Номер УДК
- Ініціали та прізвища авторів, скорочено їхні наукові звання та посади
- Установи, де працюють автори
- Електронні адреси всіх авторів, якщо є
- Назва рукопису
- Резюме мовою рукопису
- Ключові слова мовою рукопису
- Текст рукопису
- Список літератури, упорядкований у алфавітному порядку
- References (див. сайт)
- Резюме англійською мовою. Резюме повинне містити: список авторів, список установ з адресами, де вони працюють, назву рукопису, текст резюме, ключові слова.

Вимоги до набору тесту, формул, таблиць, рисунків та іншого ілюстративного матеріалу є загальноприйнятими та типовими для наукових журналів. Більш детально з принципами оформлення рукопису можна познайомитись на сайті журналу space-scitechjournal.org.ua

Редакція

e-mails: reda@mao.kiev.ua

kfnt-knit@ukr.net

Телефон: 380 44 526 47 63

Факс: 380 44 526 21 47