



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ

Том 27
5(132)
2021

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

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

ЗМІСТ

Космічна енергетика і двигуни

Andriievskiy M. V., Mitikov Y. O. Approach to solution of tank with hydrogen peroxide pressurization by its decomposition products 3

Дослідження Землі з космосу

Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. 11

Космічна й атмосферна фізика

Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на процеси в атмосфері та іоносфері 19

Науки про життя в космосі

Артеменко О. А. Дослідження функціонального стану ліпідних рафтів в цитоплазматичній мембрані проростків *Pisum sativum* при дії клинотатування . . . 35

Кияк Н. Я., Лобачевська О. В., Хоркавців Я. Д. Морфологічні реакції гравічутливості та адаптації до УФ-опромінення моху *Bryum caespitium* Hedw. з Антарктики 47

CONTENTS

Space Energy, Power and Propulsion

Andriievskiy M. V., Mitikov Y. O. Approach to solution of tank with hydrogen peroxide pressurization by its decomposition products 3

Study of the Earth from Space

Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. 11

Space and Atmospheric Physics

Zakharov I. G., Chernogor L. F. The global seismic activity influence on processes in atmosphere and ionosphere. 19

Space Life Sciences

Artemenko O. A. The study of the functional state of lipid rafts in the cytoplasmic membrane of *Pisum sativum* seedlings under clinorotation 35

Kyyak N., Lobachevska O., Khorkavtsiv Y. Morphophysiological reactions of gravisensitivity and adaptation to UV irradiation of the moss *Bryum caespitium* Hedw. from Antarctica 47

Космічні матеріали та технології

Сахно Н. Г., Аврамов К. В., Успенський Б. В. Динамічна втрата стійкості складеної нанокompозитної оболонки 60

Моніторинг космічного простору і космічне сміття

Alpatov A. P., Changqing Wang, Zakrzhevskii A. E. Feed-forward control of total retrieval of the space tether from vertical position 71

Історія космічних досліджень

Балишев М. А., Коваль Ю. Ю. Участь Харківської астрономічної обсерваторії та її представників у радянській космічній програмі у 1960-х роках. 86

До 80-річчя академіка НАН України ІЛЬЧЕНКА Михайла Юхимовича 100

Space Materials and Technologies

Sakhno N. H., Avramov K. V., Uspensky B. V. Dynamic instability of a compound nanocomposite shell. 60

Space Environment Monitoring and Space Debris

Alpatov A. P., Changqing Wang, Zakrzhevskii A. E. Feed-forward control of total retrieval of the space tether from vertical position 71

History of Space Research

Balyshev M. A., Koval Yu. Yu. Participation of Kharkiv Astronomical Observatory and its representatives in the Soviet space program in 1960 86

To the 80th birthday of Academician Mykhailo ILCHENKO 100

На першій сторінці обкладинки — Форми власних коливань тонкостінної оболонкової конструкції (див. статтю Сахно Н. Г. та ін., С. 60—70)

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-scitechnjournal.org.ua

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

Підписано до друку 02.11.2021. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.
Ум. друк. арк. 10,5. Обл.-вид. арк. 11,03. Тираж 100 прим. Зам. № 6486.

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/knit2021.05.003>
UDC 629.7.036.001.2(082)

M. V. ANDRIIEVSKIY^{1,2}, Postgraduate student, head of Propulsion Systems Department of Ukrainian branch

E-mail: andrievsky.ukraine@gmail.com

Y. O. MITIKOV², Department Chair, Doctor of Science, Assistant Professor

E-mail: mitikov2017@gmail.com

¹ Skyrora Ltd, Edinburgh, UK

² Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarina Ave., Dnipro, 49010 Ukraine

THE PROBLEM OF THE TANK PRESSURIZATION WITH HYDROGEN PEROXIDE AND THE APPROACH TO ITS SOLUTION USING PRODUCTS OF ITS DECOMPOSITION

Aim. To find and confirm the possibility of hydrogen peroxide tank pressurization using high-temperature pressurization gas (~1100 K) with a high percentage of steam (up to 70 %) without its losses.

Research methods. Mathematical modeling of pressurization system parameters with the theory of mass transfer and thermodynamic of variable mass bodies have been used.

Results. The conducted research allowed us to find and confirm the possibility of using a new pressurization method with additional sources of heat and elaborate recommendations for its appliance during pressurization time.

Scientific novelty. The main processes have been determined, which prevent implementation of the efficient high-temperature pressurization system of the tank with the hydrogen peroxide using peroxide decomposition products. The main obstacle is the volume condensation of vapor in the free volume of the tank when heat exchange processes with boundary surfaces take place. For the first time, by means of theoretical calculations, the expediency and rationality of using the additional sources of heat such as high-temperature combustion product of solid-fuel gas generator based on sodium azide have been proved. Using of this additional source for the first 30 seconds of engine operation has been proved.

Practical value. Methodology of pressurization system parameters' calculation was supplemented with discovered thermodynamic relation, which allowed us to calculate the amount of vapor and take some measures to eliminate the condensation. Results of the research allowed the designation of the pressurization system for the highly concentrated hydrogen peroxide tank with a high value of length to diameter relation with its high-temperature decomposition products.

Keywords: high-test peroxide, pressurization system, condensation of the vapor, decomposition products, high temperature pressurization gas, saturated steam pressure.

Generalia praecedunt, specialia sequuntur

INTRODUCTION

Nowadays, the world's most popular satellite segment in terms of mass is only a few tens of kilograms. Medium-class launch vehicles (LV) may deliver tens and hundreds of such satellites into orbit per launch

[16]. However, very often, it leads to the sacrifice of the orbit accuracy of each satellite. Moreover, logistical issues take place. Therefore, it is not surprising that today the interest in the ultra-light LV class has significantly increased. This particular LV class suits the best for the launching of satellites individually or in small homogeneous groups. However, the price for

Цитування: Andriievskiy M. V., Mitikov Y. O. Approach to solution of tank with hydrogen peroxide pressurization by its decomposition products. *Space Science and Technology*. 2021. 27, № 5 (132). С. 3—10. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.003>

delivery of one kilogram of payload into orbit by ultralight LV is significantly higher [4].

In order to eliminate this significant drawback, the most innovative decisions should be applied during the design process of such a launch vehicle. Also, all Cold War period technical stereotypes when some countries for different political reasons tried to reach space at any price should be abandoned.

THE AIM OF THE REASERCH

The purpose of this research is to find and confirm the simplest pressurizing method of tanks with hydrogen peroxide by its high-temperature decomposition products.

The tasks of the research are the following:

- Determination of reasons, which cause condensation of the vapor in the free volume of the tank during its pressurization with decomposition products of high-tense peroxide;
- Confirmation of the thermodynamic relation, which allows the exclusion of volume condensation of the vapor in the free volume of the tank;
- Confirmation of the way to provide conditions when found thermodynamic relation is fulfilled.

Methods of thermodynamic of variable mass bodies, heat exchange theory, and iteration calculation methods were used

LITERATURE REVIEW

It is believed that liquid oxygen (LOX) is the cheapest oxidizer. The fact of the matter is that it is true only for the factory manufacturing price. LOX attractiveness reduces if all additional systems which are necessary to make its usage possible are considered.

It is a well-known fact that the liquid-propellant rocket engine and helium pressurization systems are the most expensive parts of the launch vehicle [4]. That is why the design process of these LV systems should be the most careful and attentive.

It is not surprising that, nowadays, a significant increase of interest in the operation of rocket systems that run on widespread environmentally friendly storable propellants has been detected [1]. The most interesting propellant in this regard is highly concentrated hydrogen peroxide — kerosene or highly concentrated hydrogen peroxide — alcohol [15]. Currently, a number of companies are already developing

an ultralight class launch vehicle based on the indicated propellant (Taimyr, Adler, Skyrora). Moreover, the European Space Agency has announced a tender for the development of a thruster that would run on hydrogen peroxide [5].

Until today, helium pressurization systems (PS) have found the most widespread use in the world for pressurizing propellant tanks. The reason for it is that no special research is necessary for them. Since 1966 after tragic failures of liquid-propellant missiles in the USA, the governments have chosen solid-propellant missiles as a main course of development. The financing of liquid-propellant propulsion systems almost had been ceased. In the Soviet Union, on the contrary, liquid-propellant missiles were chosen as a main course of development and, as a result, the famous missile R-36M, which is also known as “Satan”, was created. Gas-stored systems were not applied for the last two generations of Soviet missiles, which significantly simplified the design of the propulsion system and reduced the dry weight of the missile.

Further, due to the widespread use of helium PS, the impression of their reliability can be formed. However, this is far from the case [11]. Failures and accidents with the loss of payload due to the fault of helium systems over the past seven years in the world have occurred much more often than due to the failure of a much more complicated rocket engine.

Article [9] is devoted to the research of fragment acceleration modeling during the burst of the pressurized tank. Article [7] presents the modeling of mass and heat transfer during the pressurization of the tank with liquid hydrogen. Comparison between helium and evaporated hydrogen have been done.

Particular issues of the use of helium for pressurization have been considered in the technical (patent) literature. The process of gas pressure drops in a tank with an oxidizer which takes place after its prelaunch pressurization with helium, was studied in the article [8]. The article [17] is devoted to mathematical modeling of phase transitions in the system “cryogenic liquid-free volume of a tank with helium”. It is shown that the phase transition (boiling) has an insignificant effect on the pressure in the tank. The research [6] considers different conditions of hot helium entering into the free volume of the tank.

The conclusion was made that axial gas injection is more preferable to the commonly used radial injection. The failure factor of the system was determined (decrease of pressure in the tank).

It seems that the simplest way to a tank with hydrogen peroxide pressurization is by using its hot decomposition product. This idea seems to be the most obvious, but huge issues appear, such as the presence of steam (up to 70 % of mass) [3]. Due to thermodynamic expansion work pdV , heat exchange with the tank structure and propellant surface temperature of any hot pressurization gas drop immediately. Most of the water vapor condenses on relatively cold boundary surfaces. In this case, overheating of the aluminum supporting the upper bottom of the oxidizer tank may occur.

This is exactly what happened during the first in the world development of the first stage pressurization system for the RD-214 oxidizer tank which was powering the first stage of the Cosmos launch vehicle [12]. This pressurization system used the decomposition product of hydrogen peroxide. The issue with the upper bottom of the tank was solved by upgrading its design. A thin-walled steel false bottom was installed equidistantly to the main bottom with a minimum gap.

MATHEMATICAL MODELING AND ITS CONSEQUENCES

In accordance with the canons of thermodynamics, it is necessary to maintain the average mass temperature of the pressurization gas higher than the temperature of vaporous water pressure in the free volume of the tank. In other words, the partial pressure of water vapor in the free volume of the tank during operation of the liquid-propellant engine should be less than the pressure of saturated water vapor at the mass average temperature of the pressurization gas in the tank.

In our opinion, to achieve indicated state of the thermodynamic parameters in the tank, there are two simple ways [13]. The first way is to organize high-temperature prelaunch pressurization. The second way is to sustain pressure at the beginning of the propulsion system operation by means of additional high-temperature pressurization gas separately or in combination with decomposed hydrogen peroxide.

As an additional heat source, the most widespread sodium azide solid gas-generator was considered, which would generate almost pure nitrogen ($\geq 98\%$ N_2) [14]. It is commonly used to inflate car airbags. Taking into account that no coolant is necessary for our purpose, this gas-generator is getting simpler. The combustion temperature of sodium azide with Fe_2O_3 as an oxidizer is about 1550 K and with WO_3 is about 1750 K. The pressure-fed propulsion system will be considered as the most complicated case (tank pressure is between 45 and 50 bar).

Mathematical simulation of internal tank processes was used as a basic one. It is based on the thermodynamics of variable mass. This simulation method allows determining pressure change in the tank depending on the mass flow rate of pressurization gas and change of the free volume [10]:

$$\frac{dp}{d\tau} = \frac{k-1}{V} \left[\dot{Q}_\Sigma + \sum_{i=1}^n I_i m_i - I_1 m_l - \frac{k_{av}}{k_{av}-1} p \dot{V} + \frac{\dot{k} V p}{(k_{av}-1)^2} \right];$$

m_i and I_i — mass and enthalpy of the gases used for pressurization; m_l and I_l — mass and enthalpy of gas leakage. This term is relevant if the safety valve is triggered; p — current pressure in the tank; $\dot{V}$ — the volume flow rate of propellant; k_{av} — average heat capacity ratio of the pressurization gas may be determined as:

$$k_{av} = \frac{\sum m_i k_i}{\sum m_i},$$

$\dot{Q}_\Sigma$ — total heat flow from the gas, which may be determined as:

$$\dot{Q}_\Sigma = \dot{Q}_p + \dot{Q}_w + \dot{Q}_{con},$$

$\dot{Q}_p$ — heat flow from pressurization gas to the propellant; $\dot{Q}_w$ — heat flow from gas to the tank structure; $\dot{Q}_{con}$ — heat flow from volume condensation of the steam.

Heat losses to the boundary surfaces are determined from the dependences of stationary natural convection. These are generally accepted assumptions today.

In our case, when tank pressurization with decomposition product of hydrogen peroxide with 70 % of steam is being considered, the exact evaluation of the

heat flow from the condensation process is the most relevant.

In order to make calculations possible, two fundamental assumptions were made:

1. All energy that is released during the condensation process heats pressurization gas in the free volume of the tank.

2. As soon as the pressure of saturated water vapor at the average temperature of the gas in the tank becomes higher than its partial pressure, the condensation process stops.

In this case, heat flow from the condensation process may be determined as the product of specific heat of condensation to the mass of condensed steam:

$$\dot{Q}_{con} = r(t) \cdot \dot{m}.$$

Taking into account the second assumption, the mass of condensed steam is an excessive mass in comparison with its boundary permissible mass, which may be determined as:

$$m_{con} = M_{H_2O_i} - \frac{p_s(T)V}{R_{H_2O}T},$$

$M_{H_2O_i} = M_{H_2O_{i-1}} + \dot{m}_{H_2O}$ is the amount of steam in the tank on the previous evaluation step; $\dot{m}_{H_2O}$ — the mass flow rate of steam for pressurization; $p_s(T)$ — saturated steam pressure, which is a function of temperature; V — current free volume in the tank; R_{H_2O} — the gas constant of water vapor; T — the temperature of the pressurization gas in the tank.

It's evident that the condensation process has a negative role in the pressurization process. Firstly, this is a direct loss of pressurization gas which leads to the necessity of pressurization gas flow rate increase.

Secondly, the temperature of the upper layer of the propellant increases which causes an increase in saturated vapor pressure. Also, the necessity of the tank

pressure increase appears in order to provide stable operation of the pumps.

Let's consider both ways of heat energy supply in a more detailed way:

- hot prelaunch pressurization;
- using of high-temperature solid-fuel gas-generator, which would pressurize the propellant tank in the initial moment. In this case, the task may be formulated as an optimization of the pre-launch pressurization temperature or operation time, the mass flow rate, and combustion temperature of the solid-fuel gas-generator, which would be sufficient to meet the necessary condition.

Let's consider a pressurization case when the propellant tank of a pressure-fed propulsion system is pressurized by means of a hydrogen peroxide decomposition product. The input data for mathematical simulation are presented in Table 1.

In this case, pre-launch pressurization is provided by nitrogen with ambient temperature, which is the simplest way. Analysis of the results of the mathematical simulation, which are presented in Figures 1 and 2, prove that the condensation process causes significant pressure drop at the initial moment of propulsion system operation. Based on these results, a conclusion can be made that the condensation process stops as soon as saturated steam pressure becomes lower than its partial pressure at the average gas temperature.

Let's conduct mathematical modeling of the case when pre-launch pressurization is performed using hot gas. It will help to increase the temperature inside the tank higher than the condensation temperature. Input data for the mathematical simulation is presented in Table 2. The results of mathematical modeling are presented in Figures 3 and 4.

Table 1. Calculation of pressurization system with cold pre-launch pressurization

Pressure after pre-launch pressurization, Pa	45·10 ⁵
Temperature after pre-launch pressurization, K	310
The mass flow rate of gas for pre-launch pressurization, kg·s ⁻¹	0.22
Initial gas volume in the tank, l	80
Diameter of the tank, mm	750
The volume flow rate of propellant, s ⁻¹	8.36
Propellant temperature, K	293

Table 2. Calculation of pressurization system with hot pre-launch pressurization

Pressure after pre-launch pressurization, Pa	45·10 ⁵
Temperature after pre-launch pressurization, K	500
The mass flow rate of gas for pre-launch pressurization, kg·s ⁻¹	0.22
Initial gas volume in the tank, l	80
Diameter of the tank, mm	750
The volume flow rate of propellant, s ⁻¹	8.36
Propellant temperature, K	293

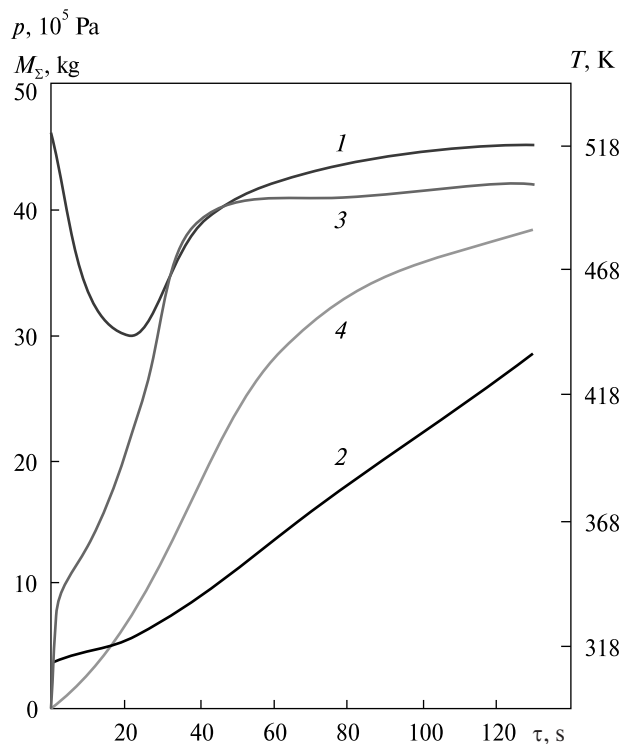


Fig. 1. Main parameters in the tank in case of pressurization with decomposed H_2O_2 and pre-launch pressurization with cold nitrogen: 1 — tank pressure, 2 — total mass of the gas in the tank, 3 — gas temperature on the tank, 4 — temperature of the dome

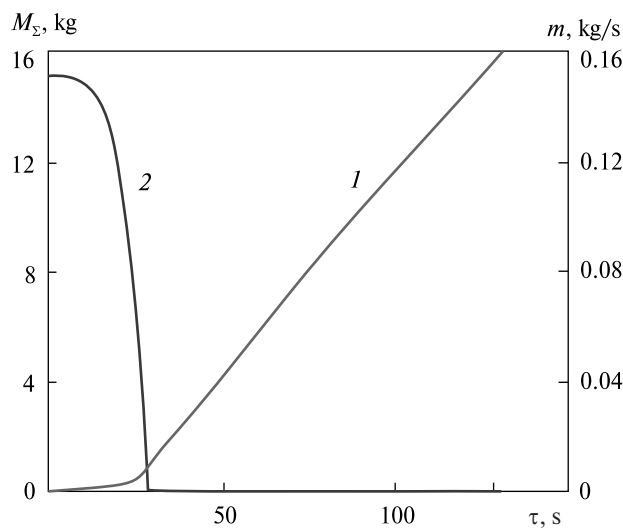


Fig. 2. Pressurization gas losses due to condensation and increase of steam mass in the tank: 1 — mass of the pressurization gas, 2 — loss of pressurization gas due to condensation

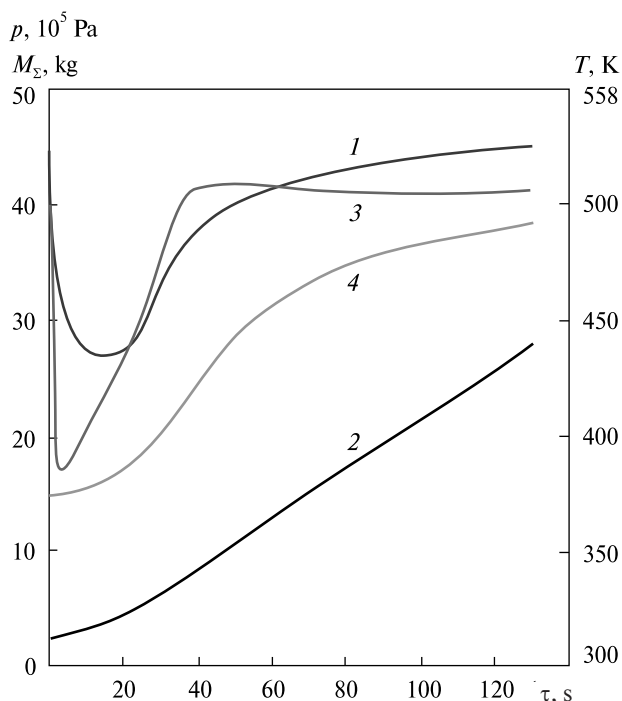


Fig. 3. Main parameters in the tank in case of pressurization with decomposed H_2O_2 and hot pre-launch pressurization: 1 — tank pressure, 2 — total mass of the gas in the tank, 3 — gas temperature on the tank, 4 — temperature of the dome

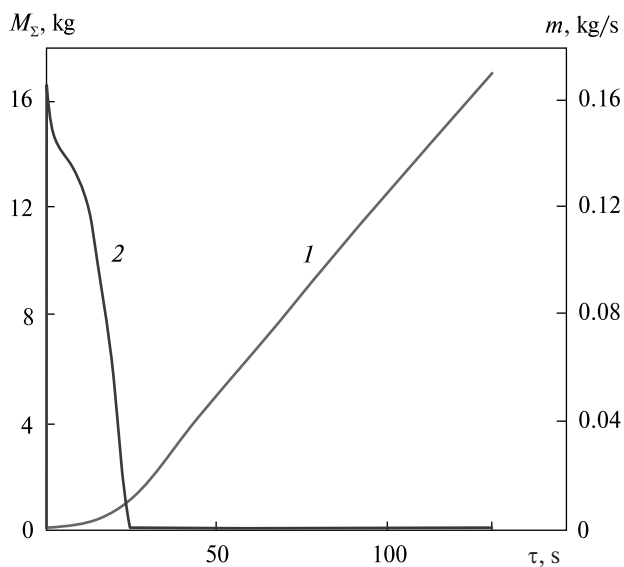


Fig. 4. Pressurization gas losses due to condensation and increase of steam mass in the tank: 1 — mass of the pressurization gas, 2 — loss of pressurization gas due to condensation

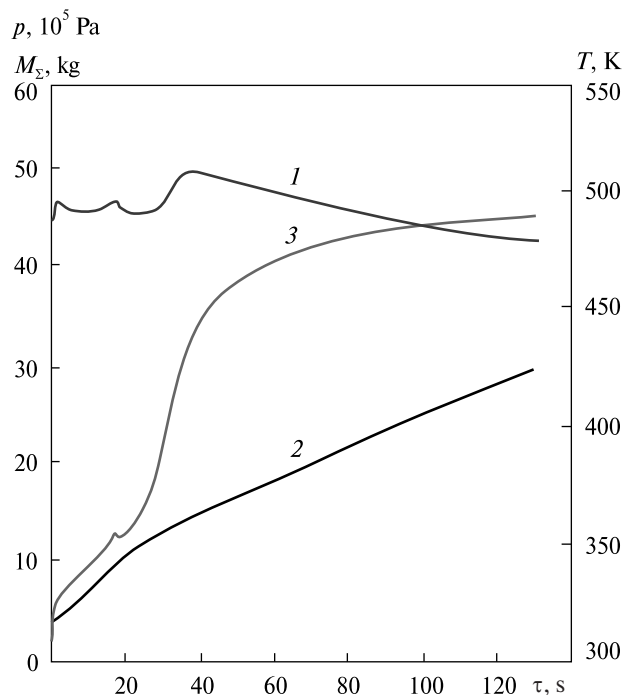


Fig. 5. Main parameters in the tank in case of hybrid pressurization system: 1 — tank pressure, 2 — total mass of the gas in the tank, 3 — gas temperature on the tank

Table 3. Input data for hybrid pressurization system

Pressure after pre-launch pressurization, bar	45
Temperature after pre-launch pressurization, K	310
The mass flow rate of gas for pre-launch pressurization, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.18
Initial gas volume in the tank, l	80
Diameter of the tank, mm	750
The volume flow rate of propellant, s^{-1}	8.36
Propellant temperature, K	293

Mathematical modeling shows that hot pre-launch pressurization does not solve the issue of pressurization gas loss due to condensation. It is explained by the condensation of the steam on the fuel surface (the propellant level is close to the pressurization gas inlet). This circumstance gives the idea of hybrid pressurization system development when the tank will be pressurized by a solid-fuel gas-generator at the beginning of propulsion system operation. It will allow choosing the operational time of gas-generator, the

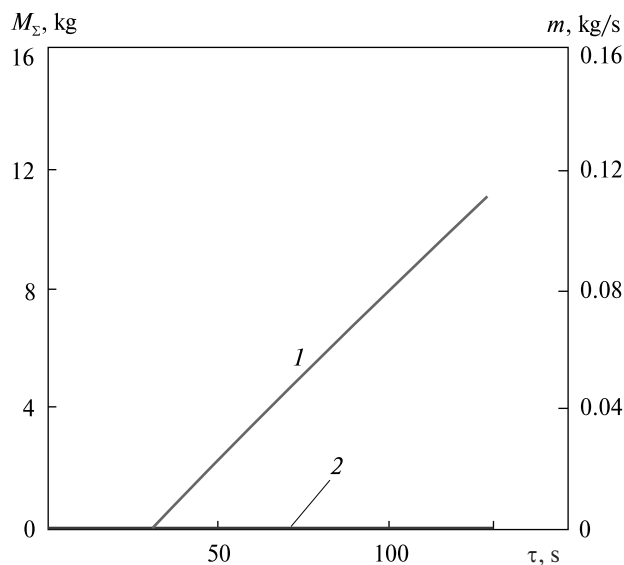


Fig. 6. Pressurization gas losses due to condensation and increase of steam mass in the tank: 1 — mass of the pressurization gas, 2 — loss of pressurization gas due to condensation

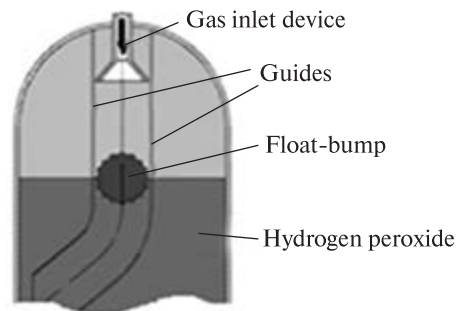


Fig. 7. Gas inlet device with float-bump

mass flow rate, and combustion temperature, which would sustain tank pressure until the propellant level is far from the pressurization gas inlet.

Mathematical simulation of hybrid pressurization system has been conducted. The gas-generator with sodium azide fuel will sustain pressure during the first 30 seconds of operation. It will allow us to achieve the average temperature in the tank, which would exceed the temperature of saturated water vapor. In this case, the process of volume steam condensation will

be eliminated. In Figure 5, data of the pressurization process with no condensation of steam is presented.

It must be admitted that sustaining pressure within the required range using a solid-fuel gas-generator with a constant mass flow rate is rather difficult. In order to increase the accuracy of pressure sustaining, two gas-generators are applied. The first one is with constant consumption of fuel, which is equal to 0.35 kg/s, and the second one is with a profiled charge, the flow rate of which varies smoothly from 0.3 to 0.23 kg/s.

In Figure 5, diagrams of the tank pressure, the average temperature, and the mass of pressurization gas are presented. In Figure 6, diagrams of steam mass in the tank and losses due to condensation are shown. Input data for mathematical simulation are presented in Table 3.

The analysis of the mathematical modeling shows that the issue of steam condensation may be successfully resolved. To do this, the tank pressure during the first 20–30 seconds of propulsion system operation should be sustained by the hot dry nitrogen. After that, the main pressurization system with decomposed hydrogen peroxide may start its operation. To prevent the condensation of steam on the cold pro-

pellant surface, the special inlet device with descending float-bump may be applied [2]. An example of such a device is presented in Figure 7.

CONCLUSION

Thermodynamic relation was found, which in relation to the pressurization process allows one to exclude the condensation of the vapor in the free volume of the tank. Both ways of heat energy supply, which allow keeping this thermodynamic relation fulfilled, have been proven.

The most complicated pressurization case of the pressure-fed propulsion system has been considered. Analysis of the conducted mathematical modeling allows us to make a conclusion that the issue of the tank with hydrogen peroxide pressurization by its decomposition products may be resolved in a way when no condensation process takes place.

It may be achieved by means of additional support of the pressurization system which would sustain the pressure with hot dry nitrogen (the combustion product of sodium azide fuel) during the first 20–30 seconds of propulsion system operation. The suggested system may be improved by means of hot pre-launch pressurization.

REFERENCES

1. Andriievskiy M., Mitikov Y., Shamrovskiy D. (2017). Organization peculiarities of combustion chamber cooling of the rocket engine which runs on hydrogen peroxide. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 5, 60–64 [in Russian].
2. A. s. 190290 SSSR, MKI F02k 11/00, B64D 37/24. Device for pressurizing the tank with hot gas. Yu. A. Mitikov, V. A. Moiseiko, L. A. Ostashev. No. 2216292/23; declared 03.09.83; opubl. 09.05.83 [in Russian].
3. Belyaev N. M. (1976). *Pressurization systems of the rockets' tanks*. Moscow: Mashinostroenie, 336 p. [in Russian].
4. Degtyarev A. V., Kushnarev A. P., Popov D. A. (2014). Small space launch vehicle. *Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoe vooruzhenie*, No. 1, 14–20 [in Russian].
5. de Selding P. B. (2016). SSTL Developing Non-toxic Thruster ahead of Possible European Hydrazine. *Spacenews*.
6. Hermesen R., Zandbergen B. *Pressurization system for a cryogenic propellant tank in a pressure-fed high-altitude rocket*. 7th European conference for aeronautics and aerospace sciences (EUCASS).
7. Jiachao Li, Guozhu Liang. (2019). *Simulation of mass and heat transfer in liquid hydrogen tank during pressurization*. Beijing: Beihang University, School of Astronautic.
8. Kim K. H., Ko H. J., Kim K., Jung, Y. S., Oh, S. H., Cho, K. J. (2012). Transient thermal analysis of a cryogenic oxidizer tank in the liquid rocket propulsion system during the prelaunch helium gas pressurization. *J. Eng. Thermophys.*, No. 21(1), 1–15.
9. Manning T. A., Lawrence S. L. (2017). *Fragment Acceleration Modeling for Pressurized Tank Burst*. California: NASA Ames Research Center, Moffett Field.
10. Mitikov Y. (2015). Mathematical modeling of super cold pressurization system parameters for tank with kerosene. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 5, 42–46 [in Russian].
11. Mitikov Y., Andriievskiy M. (2013). Modeling of the parameters of the oxygen pressurization system of a tank with kerosene. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 1, 84–89 [in Russian].

12. Mitikov Yu. A., Antonov V. A., Voloshin M. L., Logvinenko A. I. (2012). Ways of the reliability and safety of missile systems operation improvement. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 3(90), 30–36 [in Russian].
13. Patent of Ukraine No. 121267. IPC B64D 37/18, F02k 9/50. Mitikov Yu. O., Andrievsky M. V. How to pressurize the tank with storable oxidizer. No. a201806567 from 11.06.2018, opubl. 27.04.2020, Bul. 8.
14. Smirnov L. A., Silin V. S. (1993). *Gunpowder, mixed solid fuels, pyrotechnic products and explosives for peaceful purposes*. Ed. V. A. Zheltova. Moscow: TsNIINTIKP.
15. Ventura M., Mullens P. (1999). The Use of Hydrogen Peroxide for Propulsion and Power. *AIAA*. 2880.
16. Voit S. N., Serbin V. V., Mitikov Yu. A., Prisyazhny V. I., et al. (2018). *History and commercialization of aerospace industry*. Dnepr. Dominanta print, 88 p. [in Russian].
17. Wang L., Li Y., Li C., Zhao Z. (2013). CFD investigation of thermal and pressurization performance in LH2 tank during discharge. *Cryogenics*, No. 57, 63–73.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2021

Після доопрацювання 15.09.2021

Прийнято до друку 11.10.2021

Received 10.02.2021

Revised 15.09.2021

Accepted 11.10.2021

М. В. Андрієвський^{1,2}, аспірант, нач. відділу двигунобудування українського філіалу

E-mail: andrievsky.ukraine@gmail.com

Ю. О. Мітиков², зав. кафедри, д-р техн. наук, доцент

E-mail: mitikov2017@gmail.com

¹ Skyrota Ltd, Единбург, Великобританія

² Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49010

ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ НАДДУВАННЯ БАКІВ З ПЕРЕКИСОМ ВОДНЮ ПРОДУКТАМИ ЙОГО РОЗКЛАДУ

Мета роботи — знаходження та обґрунтування способу використання високотемпературного робочого тіла (~1100 K) з великим вмістом водяної пари (до 70 %) без втрат робочого тіла наддування для паливного бака великої довжини з висококонцентрованим перекисом водню.

Методика. Для досліджень використовувався метод математичного моделювання параметрів системи наддування з використанням теорії масопереносу і термодинаміки тіл змінної маси.

Результати. Проведені дослідження дозволили знайти і обґрунтувати спосіб наддування баку з використанням додаткових джерел тепла і виробити рекомендації щодо часу їхнього використання.

Наукова новизна. Визначено основні процеси, які заважають впровадженню високоефективного способу наддування бака з висококонцентрованим перекисом водню продуктами її розкладу. У першу чергу це об'ємна конденсація водяної пари в баку після виконання термодинамічної роботи витискання палива і теплообмінних процесів з граничними поверхнями. Вперше розрахунково-теоретичним шляхом доведено доцільність і раціональність використання додаткових джерел тепла на прикладі високотемпературних продуктів згоряння твердопаливного газогенератора на основі азиду натрію. Обґрунтовано час використання цього тепла — перші 30 с роботи двигунної установки в умовах роботи першого ступеня ракети-носія.

Практичне значення. Базову методику розрахунку параметрів систем наддування доповнено термодинамічним співвідношенням, яке дозволяє розрахувати величину об'ємної конденсації і вжити відповідних заходів для її усунення. Отримані результати дозволяють спроектувати систему наддування бака великої довжини з висококонцентрованим перекисом водню продуктами її розкладання.

Ключові слова: висококонцентрований перекис водню, система наддування, конденсація парів, продукти розкладання, високотемпературне робоче тіло, тиск насичених парів.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011>
UDC 504.064.2:528.88.04

O. D. FEDOROVSKY, Head of Department, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr.Sci. in Phys.&Math., Professor., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Winner of State Awards in Science and Technology of Ukraine (2005)
E-mail: adfedorovsky@ukr.net

A. V. KHYZHNIAK, Scientific Secretary, Researcher., Ph.D. in Tech.
E-mail: avskolovska@gmail.com

O. V. TOMCHENKO, Researcher., Ph.D. in Tech.
E-mail: olhatomch@gmail.com

State institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth
of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine”
55-B, O. Gonchar Str., Kyiv, 01054 Ukraine

ASSESSMENT OF THE AQUATIC ENVIRONMENT QUALITY OF THE URBAN WATER BODIES BY METHODS OF SYSTEM ANALYSIS BASED ON INTEGRATING REMOTE SENSING DATA

The work presents the comprehensive methodology for assessment of the state of the urban aquatic environment such as Lakes Opechen, Verbne, and Redkyne in Kyiv using the methods of system analysis. The methodology includes structural-textural analysis of the satellite images and the method based on statistical criteria. The spectral-texture analysis of the satellite images was used to get input information for remote assessment of reservoirs as index images: Normalized Difference Pond Index (NDPI), Normalized Difference Turbidity Index (NDTI), and Normalized Difference Algae Index (NDAI) computed from the Sentinel-2. The surface temperature distribution was estimated from the Landsat 8. The method based on statistical criteria is used for a detailed assessment of the aquatic environment using the obtained indexed images and the corresponding cartographic representation of the water quality. The probabilistic and statistical approaches were used to present the statistical criterion for recognizing classes of objects based on the results of measuring their informative features. These approaches are used to solve optimization problems in statistical theories of identification and recognition. This method allowed the cartographic representing of the change in the water quality and aquatic ecosystem in accordance with the reference areas of the state of the reservoir in 2017.

Keywords: water quality, aquatic environment, methods of system analysis, remote sensing, spectral indices, NDTI, NDAI, NDPI, temperature map.

INTRODUCTION

Knowledge of the functioning mechanisms of aquatic ecosystems is a basis for solving many practical problems related to improving the productivity of water bodies, water quality, and the implementation of water protection measures in fishing areas. The short-

age of water resources leads to the fact that the ability of reservoirs to restore is approaching a critical level and, at the same time, reduces the biological diversity of the aquatic environment. Today, most aquatic ecosystems are exposed to anthropogenic impacts. Frequently this impact is complex, multifactorial,

Цитування: Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. *Space Science and Technology*. 2021. 27, № 5 (132). С. 11—18. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011>

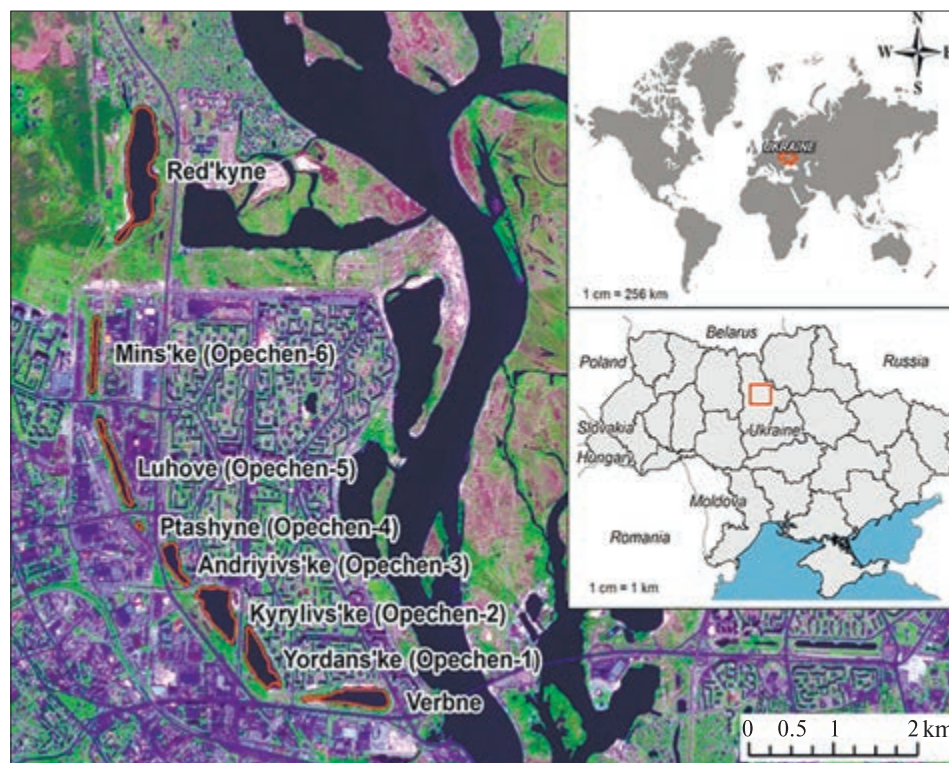


Fig. 1. The study area in the Sentinel-2 space image

and includes both local pollution and global climate change. All of this leads to a deterioration of the aquatic environment quality and worsens the conditions for the development of flora and fauna. There are many approaches to assess the ecological condition of water bodies and the quality of the aquatic environment. The essence of these approaches is either to establish environmental standards of water quality or to establish the level of negative impact on water bodies by certain pollutants.

The use of methods for Earth Observation (EO) has been proved to give far better coverage both in spatial and temporal scale for evaluation of in-water constituents in the water bodies. Since urban lakes are shallow, information about the surface layer, as achieved with EO methods, reflects the entire water column, whereas, in the case of deeper lakes, the surface layer is not representative for the deeper layers [7]. The purpose of the work was to present the methodology of integrated assessment of urban water bodies using the methods of systems analysis [5]. Approximation of the proposed methodology is presented

at actual sites in Kyiv (Ukraine). For research, we have chosen reservoirs that are typical representatives of urban reservoirs, where recreational areas are equipped, there are spontaneous unorganized beaches, there is fairly intensive amateur fishing; most of the lakesides are residential. All of them are subject to anthropogenic impact, which determines the structural features of hydroecosystems and water quality in them. The study of surface water quality by remote sensing methods will cover the system of lakes Opechen and reservoirs of Lake Verbne, Redkyne in Kyiv, which are different not only in hydromorphological, hydrological parameters but also water quality, primarily for contaminated water from the surface.

The lakes Redkyne, lakes of the Opechen system, and lake Verbne arose on the site of the former right-bank branch of the Dnieper river — Pochayna river. These water bodies were used as sand quarries in 1970—1973 and deepened to 15 m. Most of them are connected by pipelines and formed the Opechen lakes system (Fig. 1).

This system of lakes accumulates rain, melt, and groundwater runoff from the north-western part of the city and lowers the groundwater level in the surrounding area [2].

MATERIALS

To assess the spatial structure of the biotic and abiotic components of Kyiv Lakes, we used data from remote sensing of the Earth from the Sentinel-2 satellite for the following dates in 2017 (as close as possible to the dates of ground observations): 03.04, 03.05, 05.06, 20.07, 11.08, and 18.10. We used the Landsat 8 satellite for the calculation of water surface temperature maps for the following dates 02.04, 04.05, 05.06, 23.07, 17.08, and 25.09.

METHODS

1. Methods of remote sensing data processing. The main indicators of remote sensing of the lakes are the integral values of the following index images: *NDPI* (Normalized Difference Pond Index), *NDTI* (Normalized Difference Turbidity Index), and *NDAI* (Normalized Difference Algae Index). These indicators were obtained based on decoding and analysis of space images from the Sentinel-2 satellite and surface temperature distribution data from the Landsat 8 satellite for different months of 2017.

Normalized Difference Pond Index (NDPI) identifies stagnant water when vegetation is present, which can more accurately account for shallow water bodies difficult to see in other water indexes that focus on clear water or turbid water with little vegetation that may dominate deeper flooded areas [4].

$$NDPI = \frac{I_{SWIR} - I_G}{I_{SWIR} + I_G},$$

where I_G and I_{SWIR} stand for the spectral reflectance measurements acquired in the green (visible) and short wave infrared regions, respectively.

Normalized Difference Turbidity Index (NDTI) is determined by the relationship between suspended sediments and negative radiation [4])

$$NDTI = \frac{I_R - I_G}{I_R + I_G},$$

where I_R and I_G stand for the spectral reflectance measurements acquired in the red (visible) and green regions, respectively.

Normalized Difference Algae Index (NDAI) detects the presence of the process of algae overgrowing of the reservoir and its stage of development [4]

$$NDAI = \frac{I_G + 2I_{NIR} - I_B - I_R}{I_G + 2I_{NIR} + I_B + I_R} + 0.5,$$

where I_B , I_G , I_R , I_{NIR} stand for the spectral reflectance measurements acquired in the blue, green, red (visible), and near-infrared regions.

Temperature maps of the reservoir's surfaces. The study of the surface temperature of the water mirror for the identification of patterns of changes in the state of the reservoir depending on the temperature change.

Determination of the Earth's surface emissivity distribution using remote sensing data is performed by processing images of the visible and near-infrared range, in particular, by establishing the relationship between emissivity and the *NDVI* index distribution [6].

Thus, the spectrum of radiation of the body and its radiant capacity can determine its temperature. Determining the temperature of the surface is the main task of remote sensing data processing in the long-wavelength region of the infrared spectrum. For this, the inverse Planck's law for the "gray body" through the expression for the spectral density of the radiation flux is used (Tang and Li, 2014):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L_s} + 1 \right)},$$

where L_s — spectral radiance from the Earth's surface, estimated from calibrated and atmospherically corrected satellite longwave infrared data; $\varepsilon(\lambda)$ — spectral emissivity; $c_1 = 2hc^2 = 1.191 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ and $c_2 = hc/k = 1.439 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ — first and second Planck's constant; λ — radiation wavelength. For large homogenous areas, like water surfaces, the common table-value can be used (water emissivity is ≈ 0.985).

2. Methods of system analysis. To assess the condition of water bodies within urban areas, the methodology is built on a method based on statistical analysis [3]. This method comes down to the fact that it is possible to quantify the state taking into account various criteria and to model their impact, and the

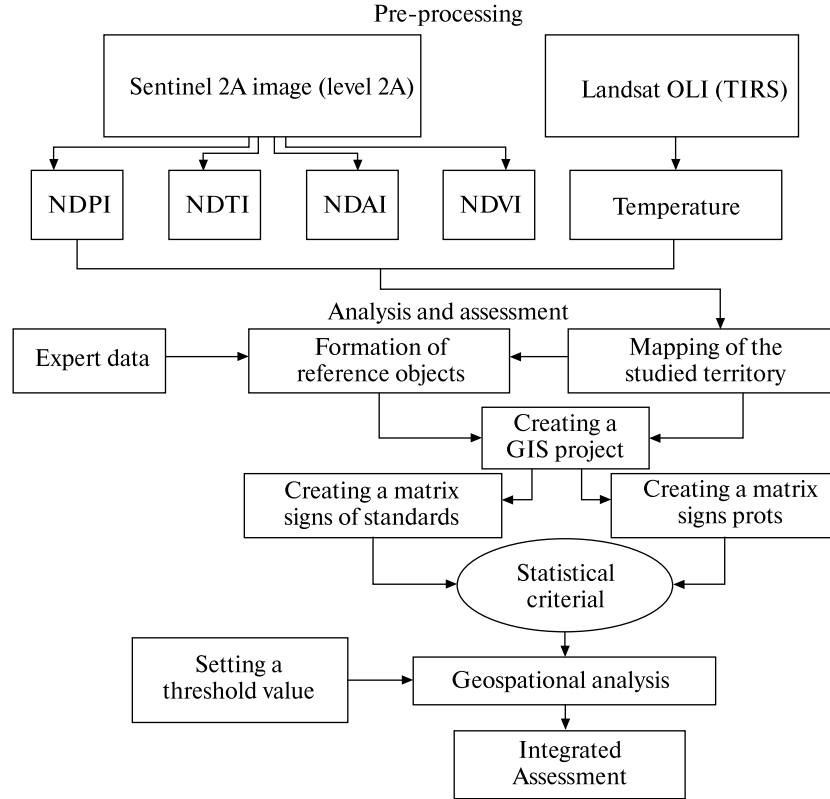


Fig. 2. Flowchart of pre-processing and combined processing of methods based on statistical criteria.

results are obtained in the form of a map in relative units or brightness gradations. Figure 2 shows the stages of pre-processing procedures, which include the proposed methodology.

Probabilistic and statistical methods used to solve optimization problems, statistical theories of identification, recognition, and number theory are applied in [1] for the representation of the heuristic criterion of object classes' determination by the results of measuring their informational features. The calculation of the heuristic criterion (1) involves previously entered informative features of each standard class and automatic calculation of the probability ratio of the belonging of the studied object to the standard classes:

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L_s} + 1 \right)}, \quad (1)$$

where

$$p_q(\bar{X}) = \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{K/2} \prod_{k=1}^K \exp \left[-\frac{(L_k - L_{q,k})^2}{2\sigma_{q,k}} \right] \cdot \frac{1}{\sigma_{q,k}}$$

— multidimensional distribution density;

$$L_{q,k} = \frac{1}{N_q} \sum_{n=1}^{N_q} L_{q,k,n}$$

— average value of spectral brightness;

$$\sigma_{q,k} = \pm \sqrt{\frac{1}{N_q - 1} \sum_{n=1}^{N_q} (\xi_{q,k,n} - D_{q,k,n})^2}$$

— average dispersion value; Q — the number of classes of objects to be identified, q — the current number (index) of a particular class of objects, K — number of informative features used, k — the current number of a specific informative feature, L — the result of a particular measurement of an informative feature

(vector of dimension K with coordinates $L_1, \dots, L_k$), N_q — the sample size for the random variable $L_{q,k}$, n — current value.

RESULTS AND DISCUSSION

We visually compared the distribution of index images for 8 research objects for the same period — August 2017 — to rank their condition in the subsequent position of assessing the quality of the aquatic environment. *NDPI* indexed images have been found to help detect low water flow, which creates the conditions for the development of higher aquatic vegetation in shallow water. In the considered lakes, the highest index *NDPI* in August 2017 was typical for the lakes: Minske, Luhove, Yordanske, and Verbne. This is due to the high proportion of shallow water by dint of the morphometric features of reservoirs. The average values of *NDPI* indicators for each reservoir were able to reflect the seasonal course of changes in the overgrowth of higher aquatic vegetation and the probability of low water flow in the studied reservoirs.

According to *NDTI* on the presence of suspended solids in the lakes considered, the least turbid in 2017 is Lake Redkyne. It is explained by several factors: geographically, the lake is located first in the cascade of lakes studied, so it does not accumulate those substances that are in other lakes. The lake is surrounded by a green zone, which is a kind of barrier to the entry of pollutants into the water body. Based on average value of *NDTI* for each water body, it shows seasonal course of turbidity change in the studied reservoirs and, in the spring and early summer, several peaks in the turbidity of lakes. It is attributed to spring floods, i.e., the growth of sediment and runoff due to melting snow cover and the wear of various chemical compounds in the reservoirs. In the late spring-early summer season, it is usually the extinction of some groups of algae (diatoms), more intense destruction processes, and more intense development of other groups of phytoplankton, which, apparently, causes an increase in turbidity. In summer, due to evaporation, the concentration of suspended solids in the water increases slightly, and their number increases due to rainfall, which causes an increment of turbidity due to suspended solids from groundwater.

NDAI maps help to identify the presence of algae in the water, similar to *NDPI*. But in contrast to

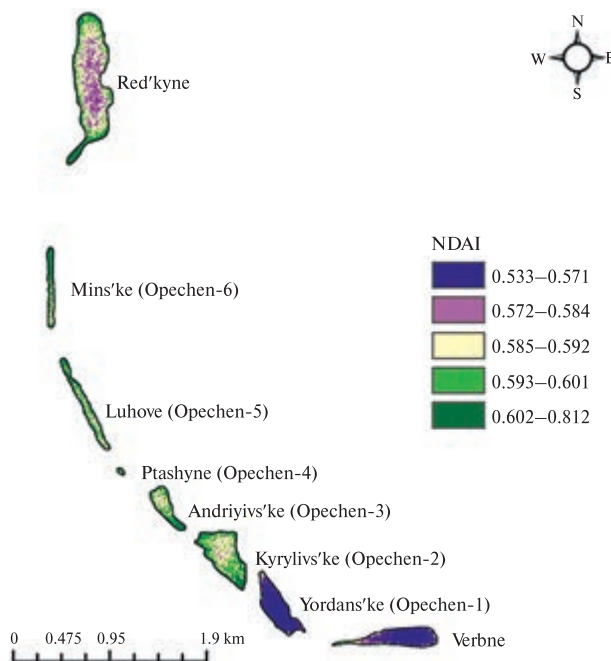


Fig. 3. Distribution of *NDAI* values in the lakes of Kyiv as of August 11, 2017.

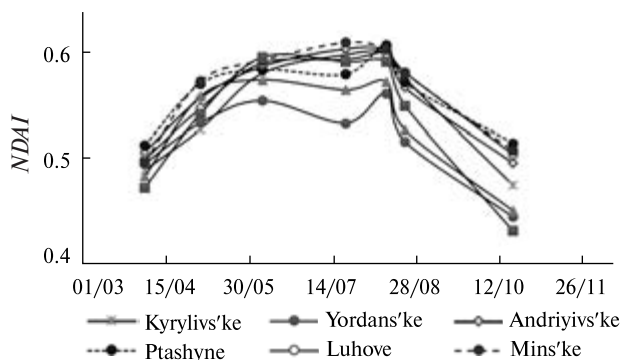


Fig. 4. Seasonal course of change of *NDAI* and presence of microscopic algae in lakes of Kyiv in 2017

NDPI, *NDAI* is more sensitive to microscopic aquatic vegetation. It was found that from the considered lakes, the least eutrophicated in 2017 were Yordanske and Verbne because these lakes are located lowest in the cascade, and therefore, the concentration of nutrients in the water was highest due to runoff (Fig. 3).

Based on the *NDAI* value for each reservoir, the seasonal course of eutrophication is reflected in the studied reservoirs (Fig. 4), and in spring and autumn

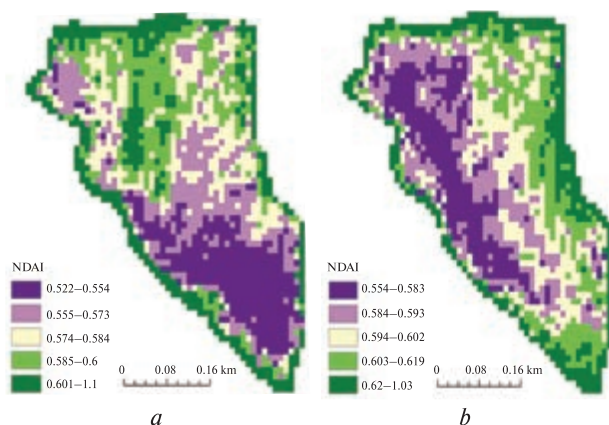


Fig. 5. Distribution of values of the algae Index (*NDAI*) of Lake Kyrylivske: *a* — 05.06.2017, *b* — 20.07.2017

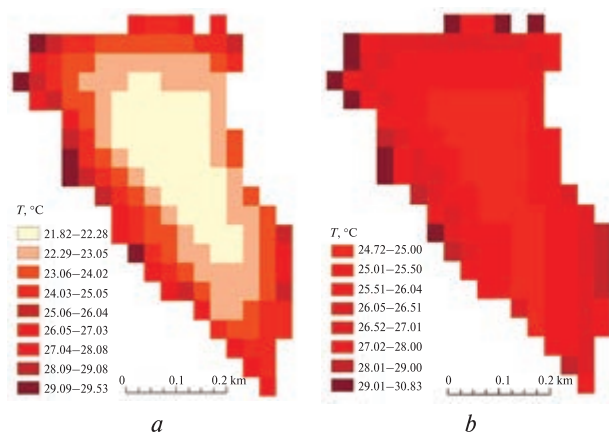


Fig. 6. Distribution of values of the surface temperature of Lake Kyrylivske: *a* — 05.06.2017, *b* — 20.07.2017

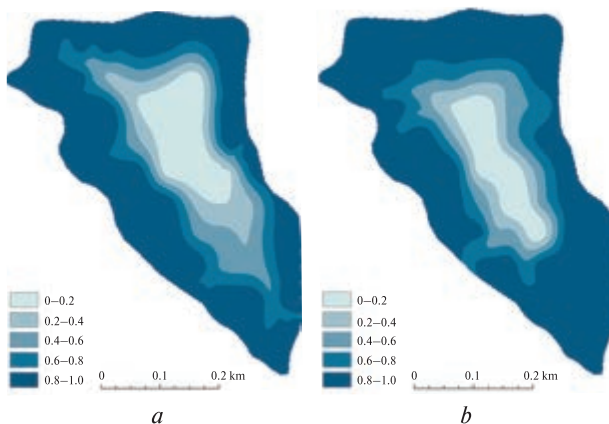


Fig. 7. Maps of the results of a detailed ecological assessment of the state of the aquatic environment of Lake Kyrylivske: *a* — 05.06.2017, *b* — 20.07.2017

the state of the lakes is characterized by the lowest values of the algae index. It increases with increasing temperature in the summer, hence, in the summer tendency of increasing the microscopic algae with the increase of temperature of air and, accordingly, water.

The developed method was implemented to assess the ecological status of one of the studied lakes in Kyiv, namely — Kyrylivske Lake. Located in the center of the cascade, it allows in some way to obtain averaged data for all lakes of the cascade. Table presents the average values of the lake in 2017 for all indices, as well as temperature indicators.

Figures 5 show how uneven the distribution of indexed images and water surface temperature can be on different dates, which is primarily due to different weather conditions. The distribution of water surface temperature values on the lakes of Kyiv in 2017 is given in Fig. 6.

The final stage of the comprehensive assessment was the application of the method based on statistical criteria. To obtain the values of all types of features at single points on the selected study area, we applied a grid with areas of 50×50 m, and each area was assigned the average values of pixel brightness in a separate channel and the values of the input data. For the correct operation of the program based on expert data and ground statistical information, areas-standards were allocated, 5 standards of each type of water quality.

Further, based on the obtained data, matrices of informative features for the studied plots and reference plots were created. This process involves the formation of feature values in the form of spreadsheets,

Average values of index indicators for Lake Kyrylivske in 2017

Data	<i>NDAI</i>	<i>NDPI</i>	<i>NDTI</i>	<i>t</i> , °C
03.04.2017	0.489	−0.586	−0.166	15.61
03.05.2017	0.527	−0.48	−0.203	21.38
05.06.2017	0.579	−0.427	−0.189	24.76
20.06.2017	0.597	−0.576	−0.209	27.24
11.08.2017	0.599	−0.543	−0.202	28.76
21.08.2017	0.574	−0.621	−0.214	18.35
18.10.2017	0.475	−0.724	−0.207	16.55

in each row of which there are the results of measurements of all types of remote information, and the columns provide feature values for each of the 80 sections. All data were translated into .txt format, and the probability values (1) of the ratio of the values of the informative features of each studied object to the values of the informative features of each reference object present in the space image were calculated.

This stage of work was automated in a software package, specially created based on the statistical criteria, which provides a priori input of informative features of all standards and automatic calculation of probability values of belonging of each studied object to all present objects-standards, which allows getting more efficiency and reliability in the recognition and classification of images of objects in space images. Next, the threshold value of the probability that the values of the informative features of each studied object belong to the values of the informative features of each reference object present in the satellite image is obtained. The final product of this process is to determine the class of studied objects by the maximum value of the probability of their relationship to a specific object-standard, the appropriate class, and create a map that characterizes the state of the lake for the study period (Fig. 7). In Fig. 7, we see that depending on the month of research and the increase in temperature of the reservoir, the ecological condition of the lake changes in direct proportion. That is, the warmer month, the lower the quality of the aquatic environment. Also, it is seen from the obtained results that the farther from the shoreline and with the increasing depth of the lake, the more the

water quality improves. Therefore, from the obtained results, we can conclude that the proposed methodology works adequately and can be further used to assess the ecological status of the aquatic environment of other objects.

CONCLUSIONS

With the growing awareness of water pollution control and the desire to maintain lakes at high levels of quality, it is expected that the approach described in this work will be a useful tool in assessing water quality. The advantages of remote sensing to assess water quality in lakes are next: the ability to collect data from hard-to-reach areas; measurable indicators which help to obtain quantitative and qualitative data that complement expensive and slow data collection on the ground; the ability to obtain archived data for the period of operation of satellites. The application of the statistical criterion method allowed the cartographic representation of the change in the quality of the aquatic environment based on the union of indexed images of the *NDPI* lake index, *NDTI* turbidity index, *NDAI* algae index, temperature maps according to reference areas of the reservoir.

The algorithm of the methodology presented here will provide objective, reliable, and operative information to urban ecological services and decision-makers. In addition, it could be easily integrated into informational systems for smart city support as well. Further research will involve refinement of indices, integration of terrestrial and remote data, and detailed assessment of the impact of the surrounding areas on water bodies.

REFERENCES

1. Arkhipov A. I., Glazunov N. M., Khyzhniak A. V. (2018). Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybern. and Syst. Anal.*, **54**, No. 1, 94–98. doi:10.1007/s10559-018-0010-7.
2. Batoh S. V. (2017). *The ecohydrological characteristics of Kyiv water bodies*. Qualifying scientific work on the rights of manuscript: Doctoral dissertation. Kyiv [in Ukrainian].
3. Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V., Porushkevych A. Yu. (2017). Application of the remote sensing in environmental management as the interdisciplinary approach. *Cent. Eur. Res. J.*, **3**, No. 1, 34–42.
4. Lacaux J.-P., Tourre Y. M., Vignolle C., Ndione J.-A., Lafaye M. (2001). Classification of Ponds from High-Spatial Resolution Remote Sensing: Application to Rift Valley Fever Epidemics in Senegal. *Remote Sens. Environ.*, 66–74.
5. Method for remote assessment of ecological condition and water quality of inland waters. Reference publication “Prospective scientific and technical developments of the National Academy of Sciences of Ukraine”. Issue “Ecology and Environmental Protection”. Kyiv: Akadempriodika, 32, 2017 [in Ukrainian].
6. Piestova I., Lubskiy M., Svideniuk M., Golubov S., Sedlacek P. (2018). Satellite Imagery Resolution Enhancement for Urban Area Thermal Micromapping. *Cent. Eur. Res. J.*, **4**, No. 1, 35–39.
7. Protasov A. A., Barinova S. S., Novoselova T. N., Buseva Zh. F., Tomchenko O. V., Sylaiieva A. A., Lubskiy N. S., Semchenchenko V. P., Sysova E. A. (2019). The heterogeneity of the abiotic and biotic components of techno-ecosystems: view from space and from the Earth. *Eur. Scientific J. Jan. edition* **15**, No. 3, 423–448. doi:10.19044/esj.2019.v15n3p423.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2021

Received 21.05.2021

Після доопрацювання 21.05.2021

Revised 21.05.2021

Прийнято до друку 30.08.2021

Accepted 30.08.2021

О. Д. Федоровський, зав. відділу, член-кореспондент НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф., заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки (2005 р.)

А. В. Хижняк, учений секретар, наук. співроб., канд. техн. наук

О. В. Томченко, наук. співроб., канд. техн. наук

Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України»
вул. О. Гончара 55-б, Київ 54, Україна, 01601

ОЦІНКА ЯКОСТІ ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА МІСЬКИХ ВОДОЙМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСУВАННЯ ДАНИХ ДЗЗ

Представлено методологію комплексної оцінки стану міського водного середовища на прикладі системи озер Опечень та водойм-кар'єрів озер Вербне і Редькіне у м. Києві з використанням методів системного аналізу. Методологія включає структурно-текстурний аналіз космічних знімків та наступну їхню інтерпретацію на основі методу статистичного критерію. Спектрально-текстурний аналіз космічних знімків застосовано для отримання вхідної інформації дистанційної оцінки водойм, такої як зображень індексу озерності, каламутності та альгоіндексу, отриманих з супутника «Сентінель-2», та даних розподілу температури поверхні з супутника «Ландсат-8». Для детальної оцінки якості водного середовища на основі отриманих індексованих зображень та відповідного картографічного представлення якості водного середовища застосовано метод на основі статистичного критерію. Для представлення статистичного критерію розпізнавання класів об'єктів за результатами вимірювання їхніх інформативних ознак застосовуються імовірнісні і статистичні підходи, які використовуються для розв'язування завдань оптимізації у статистичних теоріях ідентифікації і розпізнавання. Цей метод дозволив картографічно представити зміну якості водного середовища відповідно до еталонних ділянок стану водойми у 2017 р.

Ключові слова: якість води, оцінка якості водного середовища, методи системного аналізу, ДЗЗ, спектральні індекси, *NDTI*, *NDAI*, *NDPI*, температурна карта.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.019>
УДК 550.34:550.510.533

І. Г. ЗАХАРОВ, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук
E-mail: giz-zig@ukr.net

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф.
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Майдан Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ВПЛИВ ГЛОБАЛЬНОЇ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА ПРОЦЕСИ В АТМОСФЕРІ ТА ІОНОСФЕРІ

В останні десятиліття сформувалися уявлення про землетруси (ЗТ) як про прояв фінальної стадії загальнопланетарного неперервного самоорганізованого тектонічного процесу з періодами накопичення та релаксації тектонічних напруг. Однак в науковій літературі, як і раніше, представлено дослідження відгуку атмосферних і іоносферних процесів на окремі сильні ЗТ. У цій роботі вперше розглянуто взаємозв'язок процесів у літосфері, тропосфері та іоносфері з урахуванням нових уявлень про сейсмічний процес як глобальне явище і на фоні процесів, зумовлених космічною погодою. Використано як загальнопланетарні дані (ЗТ, повний електронний вміст ПЕВ іоносфери), так і локальні дані (атмосферний тиск, критична частота шару F2 іоносфери) для широко рознесених пунктів спостережень у західній та східній півкулях. Для підвищення надійності статистичних результатів використано щоденні дані за 2007—2015 роки з чотирьох незалежних банків. Встановлено стійкі ефекти глобальної сейсмічної активності (ГСА) у розглянутих показниках. Так, критична частота шару F2 при різкому посиленні ГСА збільшується на 0.4...0.5 МГц. Цей ефект доволі стійкий і проявляється майже одночасно на іоносферних станціях східної та західної півкуль, а також у планетарних значеннях ПЕВ. При цьому в іоносферних варіаціях, як і раніше, простежується вплив як тропосфери (особливо при низькому рівні сонячної активності), так і космічної погоди, характеристики якої у 75 % випадків також показують зв'язок з ГСА. Отже, космічна погода часто, але не завжди може виступати тригером ЗТ. В цілому у західній півкулі мінімум атмосферного тиску настає раніше, ніж у східному, що призводить до помітного збільшення різниці тисків між півкулями на 10 мм рт. ст., що вказує на зв'язок глобальної сейсмічності та глобальної атмосферної циркуляції. Встановлені ефекти ГСА, як правило, мають характер не локального короточасного сплеску, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива), тобто вплив літосфери на розташовані вище шари є неперервним і носить циклічний характер, зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів. Найімовірніше, одночасно реалізуються кілька різних зв'язків між геосферами, частково синхронізованих змінами космічної погоди, які вимагають нових фізичних механізмів для їхнього пояснення.

Ключові слова: сейсмічна активність, тропосферні та іоносферні збурення, метод накладених епох.

ВСТУП

В останні роки відбувається активне вивчення впливу землетрусів (ЗТ), включаючи їхні передвісники, на атмосферу і іоносферу [35, 43]. Розглядаються дві основні групи моделей зв'язку літосфера — атмосфера — іоносфера [36].

1. Передбачається, що в атмосфері над областю ЗТ збуджуються і поширюються акустико-гравітаційні хвилі. На іоносферних висотах вони викликають збурення електричного поля і зміни концентрації заряджених частинок.

2. Передбачається, що іоносферні збурення є наслідком модифікацій електричних полів і

Цитування: Захаров І. Г., Чорногор Л. Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на процеси в атмосфері й іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5 (132). С. 19—34. <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.019>

струмів, які викликані електричними процесами в літосфері або у приземній атмосфері.

Характерні просторові масштаби збурень іоносфери напередодні і після ЗТ становлять від 200...300 до кількох тисяч кілометрів, а характерні часові масштаби — від кількох хвилин до кількох діб. Зважаючи на значні відмінності масштабів збурень можна припустити, що літосферно-іоносферні зв'язки зумовлені кількома фізичними механізмами.

Для вивчення літосферно-іоносферних зв'язків широко використовуються навігаційні супутники, що дозволяють контролювати іоносферні процеси в глобальному масштабі [34].

Зазначені вище дослідження мають загальну особливість: у них розглядається відгук атмосфери і іоносфери на окремі сильні ЗТ [33, 39, 41, 46]. Разом з тим вже досить давно сформувалися уявлення про ЗТ як про прояв («вершину айсберга») глобального неперервного самоорганізованого тектонічного процесу з періодами накопичення і релаксації тектонічних напружень [4, 8, 11, 22, 23, 25, 40]. Найбільш важливими видаються такі властивості глобальної сейсмічної активності (ГСА) [4].

1. Періодичність: найбільш сильні ЗТ часто мають тенденцію групуватися в епохи, протягом яких вони практично одночасно спостерігаються на всій поверхні Землі і рідко відбуваються в інтервалах часу між ними.

2. Групування ЗТ за величиною їхньої сейсмічної енергії, що призводить до статистично достовірного відхилення від закону повторюваності ЗТ. Ця закономірність може бути наслідком надійно встановленого ієрархічно упорядкованого блокового характеру геофізичного середовища [15]: через те що енергія ЗТ пропорційна об'єму, охопленому деформаціями, наявність переважних магнітуд свідчить про переважання блоків певних розмірів. Дана властивість вказує також на те, що літосфера має виражені нелінійні, а також фрактальні властивості.

3. Глобальність сейсмічності тісно пов'язана з глобальним характером процесів у мантиї. Механізмом такого зв'язку виступає взаємний рух тектонічних плит, що призводить до створення зон субдукції — основних осередків ЗТ.

4. Вплив (переважно глобального характеру) на ЗТ земних і космічних процесів: процесів у атмосфері [17, 30], варіацій обертання планети і нутації її полюса [28, 40], факторів космічної погоди [7, 31, 38, 44], місячних припливів [19, 42].

Ці впливи носять складний характер і не завжди підтверджуються іншими дослідниками (про вплив сонячної активності на ЗТ див., наприклад, роботу [37]). Показано [21], що однією з причин неоднозначності результатів у цій області є методологічні неточності досліджень, коли залишається без уваги неоднорідність рядів даних, зумовлена зміною з часом точності і принципів вимірювань різних параметрів природних систем.

Таким чином, сукупність землетрусів, або ГСА, що розглядаються у просторі і часі з урахуванням взаємодії між їхніми осередками, можуть інтерпретуватися як цілком певний фізичний процес [4].

Можна припустити, що глобальний характер сейсмічної активності може зумовити деякі перебудови в атмосфері, іоносфері і магнітосфері також глобального масштабу, зокрема в сейсмічно спокійних регіонах. Для їхньої реєстрації необхідно використовувати досить довгі ряди даних, отриманих одночасно в декількох рознесених пунктах спостережень, щоб відрізнити їх від локальних збурень (поширюється хвиля або локальна аномалія електричних полів), джерелом яких є окремі осередки ЗТ.

Така постановка задачі виправдана також тим, що у світі сучасних уявлень Земля і її внутрішні та зовнішні оболонки (система Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера: ЗАІМ) утворюють єдину відкриту нелінійну динамічну ієрархічну систему, в якій взаємодія між підсистемами можлива, зокрема, за рахунок енергетично слабких (тригерних) механізмів [12, 14, 29].

З огляду на можливий вплив різних зовнішніх факторів як на сейсмічність (див. п. 4 вище), так і на інші геосфери, не можна виключити можливості встановлення квазісинхронних варіацій параметрів у різних геосферах, зокрема при відсутності прямих причинно-наслідкових зв'язків [48].

Мета роботи — пошук взаємозв'язків у системі ЗАІМ у планетарному масштабі при зміні ГСА.

Нова постановка задачі вимагає певних змін у методології досліджень у порівнянні з звичайно використовуваними. Як правило, аналіз зв'язків літосфера — атмосфера — іоносфера виконують для окремих досить потужних сейсмічних подій без урахування процесів у попередній період. Зокрема, при статистичних дослідженнях беруть до уваги всі ЗТ з магнітудою вище заданої, зазвичай магнітуди від 5 і вище [31]. Очевидно, що з точки зору тектоніки сильний ЗТ після тривалого відносно спокійного періоду і такий же ЗТ після серії інших сильних ЗТ може відповідати істотно різним умовам в літосфері. У першому випадку можна допустити тривале накопичення тектонічних напруг планетарного масштабу, що переривається різким їхнім зниженням і подальшою перебудовою, у другому випадку ЗТ відбувається після вже завершеної перебудови системи тектонічних напруг.

Таким чином, однотипні ситуації в системі ЗАІМ, необхідні для статистичного аналізу, можуть відповідати, перш за все, ізольованим явищам ГСА, що розвиваються на значних часових інтервалах один від одного. Звичайно ж, не можна виключити наявності тривалих циклів ГСА та відповідних їм тривалих періодів підготовки, однак у першому наближенні така умова є виправданою для вирішення поставленого завдання.

БАЗА ДАНИХ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Беручи до уваги, що очікувані ефекти ГСА можуть мати невелику амплітуду і проявлятися на тлі більш значних варіацій іншої природи, в роботі використані чотири бази даних (БД), для кожної з яких розрахунки проведено незалежно. Бази даних охоплюють такі періоди спостережень:

БД1 — 01.04.2007 р. — 31.12.2008 р.,

БД2 — 01.12.2010 р. — 31.12.2011 р.,

БД3 — 14.09.2012 р. — 15.02.2014 р.,

БД4 — 01.01.2015 р. — 31.12.2015 р.

Використано такі щоденні дані.

Космічна погода. Сонячна активність (СА): щільність потоку радіовипромінювання Сонця $F_{10.7}$; геомагнітна активність (ГМА): індекс A_p .

Іоносфера. Критична частота шару F2 (f_oF_2) іоносферних станцій у східній і західній пів-

кулях: Прухоніце (50.0° N; 14.6° E), Хабаровськ (48.5° N; 135.1° E) Москва (55.5° N; 37.3° E), Мілстон Хілл (42.6° N; 288.5° E), Боулдер (40.1° N; 254.8° E) в 00 і 04 (нічні умови), 12 і 16 год LT (денні умови за місцевим часом). Зазвичай використовують дані для 00 і 12 LT; в нашому дослідженні додатково використано дані для 04 і 16 LT, які завдяки інерційності іоносферних процесів краще відображають типові денні та нічні умови в іоносфері, а також дозволяють повніше оцінити мінливість іоносфери протягом дня або ночі. Через пропуски у вимірах або у міжнародних електронних базах даних, для кожної БД використовувалася частина даних, по можливості для західної і східної півкуль одночасно.

Повний електронний вміст іоносфери (ПЕВ), усереднений по земній кулі — тільки БД4.

Тропосфера. Приземний атмосферний тиск P у пунктах спостережень Харків, Москва, Прага, Мілстон Хілл, Боулдер (у безпосередній близькості до пунктів спостереження іоносфери), а також дані для широтного (Москва, Караганда, Хабаровськ, Боулдер) та довготного (Тіксі, Хабаровськ, Ухань, Дарвін) ланцюжків метеорологічних станцій для більш повної оцінки глобальних ефектів.

Літосфера. Кількість ЗТ (N_{eq}) на земній кулі для декількох інтервалів магнітуд, починаючи з $M=4$, і максимальна за добу магнітуда ЗТ (M_{max}) як індикатори ГСА.

Дані взяті з таких сайтів: космічна погода — <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices>; іоносфера — ulcar.uml.edu/DIDBase, <http://sec.noaa.gov/Data>, і <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>; атмосферний тиск — www.gismeteo.ru, ЗТ — <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.

Розрахунки проведено методом накладених епох (МНЕ) з перевіркою достовірності результатів розрахунків і використанням критерію Фрідмана [3]. За нульові дати вибиралися дні різкого збільшення M_{max} і N_{eq} після тривалого періоду відносного сейсмічного затишшя, що перевищує час появи передвісників згідно з роботою [6]:

$$\Delta T = 10^{0.26M - 3.50} \text{ років}$$

Розрахунки проведено на проміжку часу від -20 до +10 діб, — фактично від одного сейсміч-

но активного періоду до наступного. Кількість подій (випадків різкого збільшення ГСА) становила: БД1 — 10, БД2 — 13, БД3 — 12, БД4 — 9, всього розглянуто 44 події.

Критерій Фрідмана є непараметричним аналогом однофакторного дисперсійного аналізу для повторних вимірювань. Він дозволяє перевіряти гіпотези про подібність більше двох повторних груп вимірювань в умовах невизначеності апіорних передумов про нормальність розподілів і однорідності дисперсій. Статистикою критерію є сума квадратів сум рангів, яка має теоретичний розподіл χ^2 . У нашому випадку, завдяки ранжируванню, критерій дозволяє оцінювати схожість тільки часових змін досліджуваних параметрів поблизу різкої зміни ГСА незалежно від їхніх абсолютних значень, які можуть бути зумовлені іншими факторами. Алгоритм розрахунку критерію Фрідмана у методі МНЕ наведено, зокрема, в роботі [9].

Результати для кожної БД приймалися до розгляду при рівні значущості $p < 0.1$, додатково надійність (повторюваність) результатів визначалася зіставленням результатів розрахунків для незалежних БД. Для наочності на графіках вибірково (для найбільш важливих моментів часу) приведено також стандартну помилку середнього σ .

РЕЗУЛЬТАТИ

Через те що БД1 найбільш повна, розглянемо спочатку відповідний їй період. Зміни максимальної магнітуди та кількості ЗТ з різними магнітудами (вибірково) показані на рис. 1. Видно, що досліджувані інтервали, крім активного періоду після нульової дати, охоплюють спокійний період до нульової дати і період менш істотного попереднього посилення ГСА (від -20 до -14 діб). Максимальна магнітуда і кількість ЗТ з $M > 4.2$ (на рис. 1 як приклад наведено число ЗТ з $M > 5.1$) зменшуються аж до різкого збільшення числа ЗТ в нульовий день. Кількість слабших ЗТ незначно збільшується аж до головного поштовху, потім також поступово зменшується. Таким чином, зміни в часі кількості слабких ЗТ мають особливості, які будуть розглянуті нижче.

Зміни критичної частоти області F2 f_oF2 на станції Прухоніце (рис. 2), не дивлячись на по-

різаність кривої, демонструють два максимуми, віднесених до періодів підвищеної ГСА поблизу -15 -х і 0 -х діб, після яких величина f_oF2 поступово зменшується. Беручи до уваги істотну залежність стану іоносфери від космічної погоди, на рис. 2 приведено також зміни індексів СА і ГМА. Зміни СА невеликі та статистично недостовірні: згідно з даними [10] відповідні зміни іонізаційного УФ-випромінювання Сонця можна оцінити в 2–3 %. Рівень ГМА також був низьким: максимальне значення індексу A_p за всі розглянуті періоди тільки у двох випадках далеко від нульової дати ледь перевищило рівень $A_p = 27$ ($K_p = 4$), який зазвичай розглядають як граничний між суббурними і збуреними умовами. Проте середні зміни A_p , отримані МНЕ, характеризуються локальним максимумом поблизу нульової дати, при цьому відмінність максимального і мінімального значень A_p є достовірною ($p < 0.1$). Як наслідок, незважаючи на малу величину стрибка f_oF2 (не більше ніж 0.5 МГц), пояснити їхніми змінами СА і ГМА неможливо.

Зміни атмосферного тиску P поблизу Прухоніце (пункт спостереження Прага) також демонструють два локальних екстремуми: напередодні посилення ГСА починається зменшення P , яке дещо випереджає стрибок f_oF2 в іоносферних даних. Вражає стійкість цього явища: зменшення P спостерігалось напередодні всіх 10 розглянутих випадків різкого зростання ГСА (рівень значущості результату становить $p < 0.02$), при наявності деяких додаткових особливостей, які ілюструє рис. 3. На рисунку зміни P (розподілених на 3–4 випадки) розділені за рівнем ГСА (максимальної за день магнітуду ЗТ $M_{\max}$ на земній кулі). Рисунок демонструє зниження P за 5...7 діб до різкої зміни рівня ГСА. Однотипна зміна P зберігається до 3...5 діб після нульової дати при наявності стійкого зміщення (показано штриховими лініями на рис. 3) максимумів і мінімумів P на більш ранні доби у міру збільшення $M_{\max}$. Через те що ЗТ відбувалися у різних частинах земної кулі, наявність таких особливостей є важливим аргументом на користь наявності глобальних ефектів сейсмічної активності.

Зміни f_oF2 на станції Мілстон Хілл (рис. 4) також демонструють два очевидних максиму-

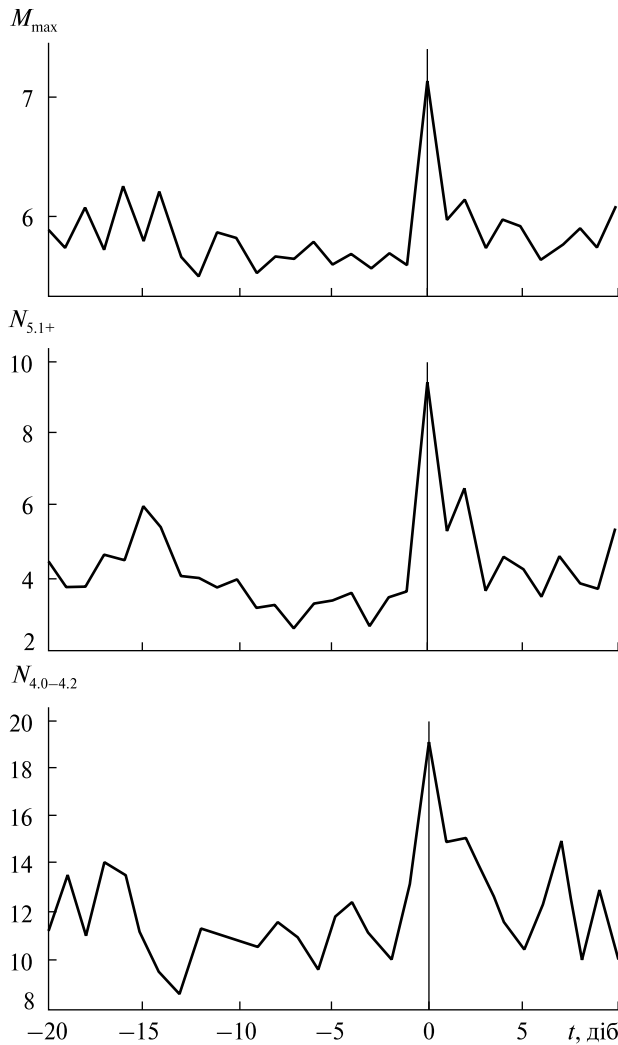


Рис. 1. Середні зміни максимальної магнітуди $M_{\max}$ і кількості землетрусів N_{eq} з $M > 5.1$ і $4.0 \leq M \leq 4.2$ (зверху вниз) для десяти обраних періодів різкого посилення глобальної сейсмічної активності (БД1)

ми, що відповідають періодам підвищеної ГСА, при цьому випередження відносно нульового дня більш очевидне. Незважаючи на порізаність кривих, видно, що зміни f_oF2 на протилежних частинах земної кулі подібні, і в обох випадках не йдуть за змінами СА і ГМА. Основна відмінність даних двох іоносферних станцій полягає у більш ранньому зростанні f_oF2 напередодні нульової дати у Мілстон Хілл, яке змінилося швидким зменшенням f_oF2 , коли значення f_oF2 у Прухоніце ще залишалися високими. Можливо, деяку

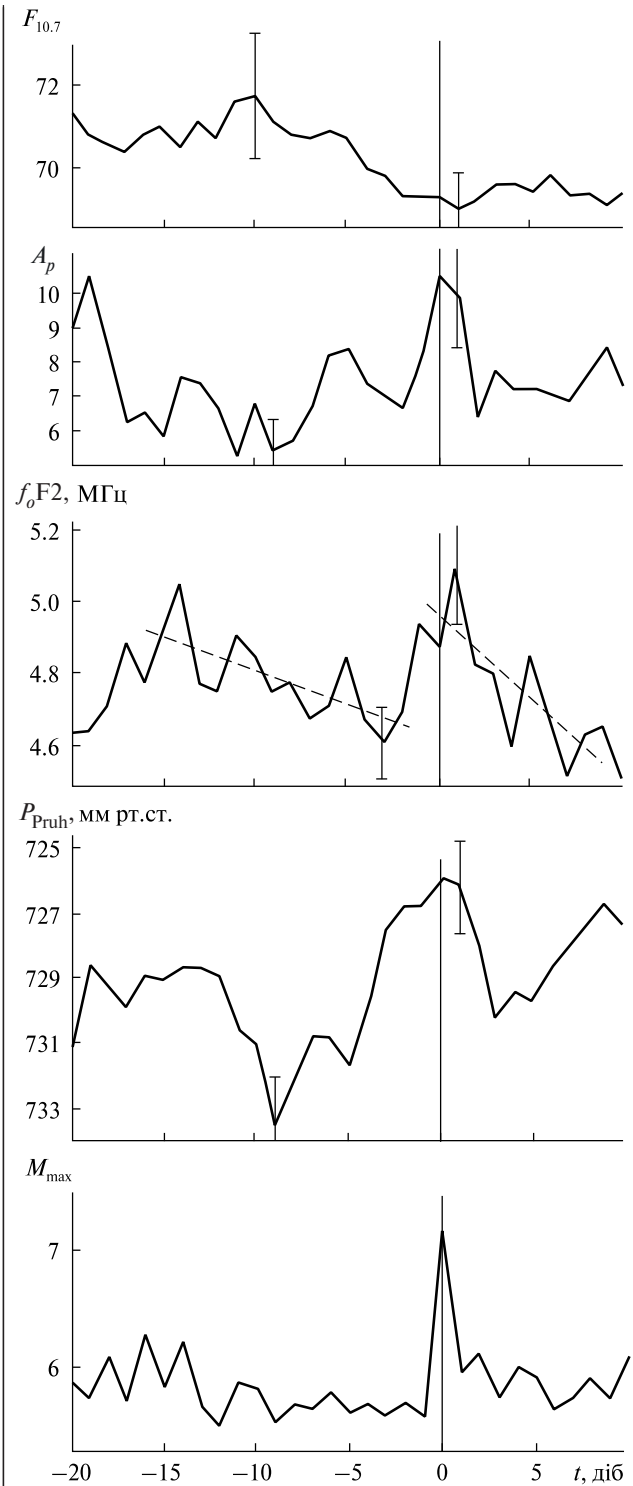


Рис. 2. Варіації f_oF2 на ст. Прухоніце при різкій зміні глобальної сейсмічної активності. Показано фактори впливу на іоносферу «зверху» і «знизу»

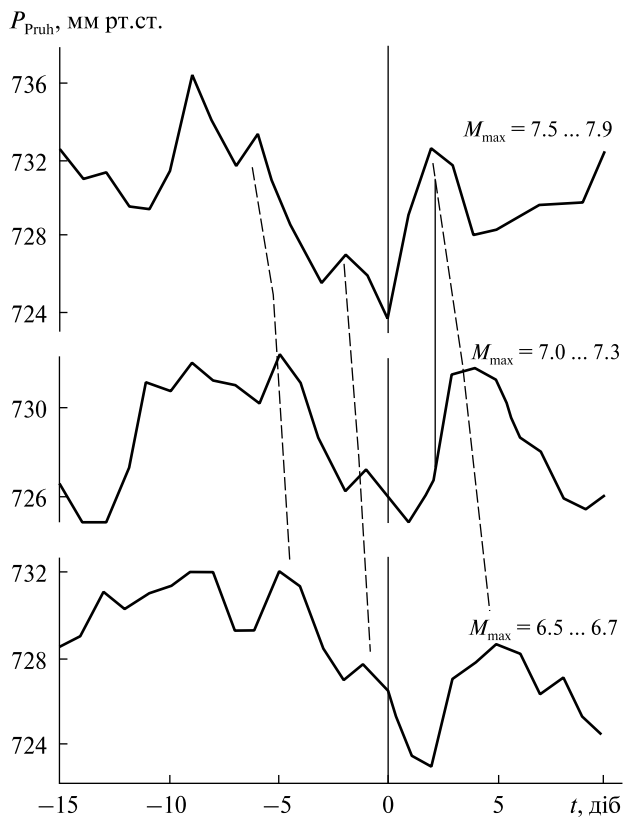


Рис. 3. Варіації атмосферного тиску поблизу ст. Прухоніце (метеорологічна станція Прага) при різних рівнях глобальної сейсмічної активності

роль могли відіграти і зміни ГМА за умови, що у Прухоніце краще проявилася позитивна фаза іоносферної бурі, у Мілстон Хілл — негативна. Однак потрібно враховувати, що рівень ГМА був низьким не тільки в середньому, але і для всіх окремих періодів: поблизу нульової дати максимальне значення $A_p = 21$, що відповідає суббурним умовам.

Середні зміни атмосферного тиску P у Мілстон Хілл (рис. 4) також мають два локальних екстремуми (зокрема, є слабка тенденція до зміщення положення максимуму в залежності від магнітуди ЗТ). Однак положення максимумів P у Мілстон Хілл і Прухоніце помітно різняться, так що різниця середніх тисків (умовно приймемо її за різницю тисків у східній і західній півкулях) напередодні посилення ГМА потерпала стрибок на 10 мм рт. ст. Такі зміни тиску могли бути зумовлені потоками повітря між півкулями,

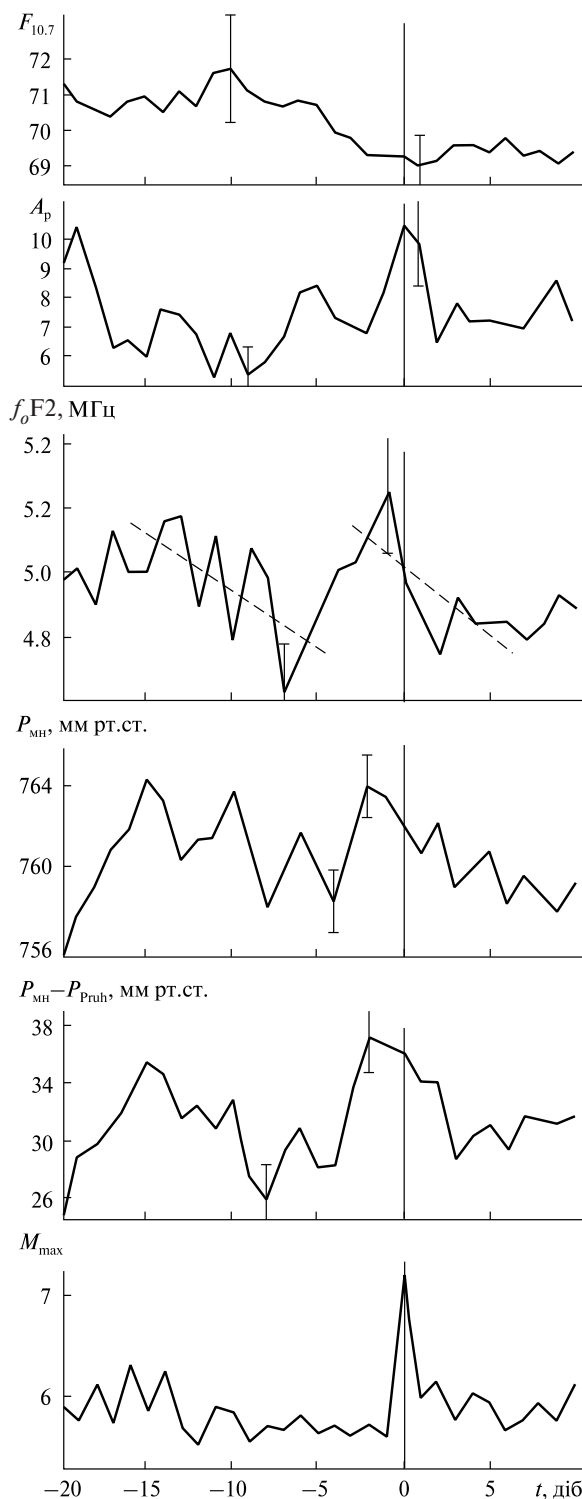


Рис. 4. Варіації f_oF2 на ст. Мілстон Хілл. Показані фактори впливу на іоносферу «знизу», а також різниця середніх значень тиску між півкулями

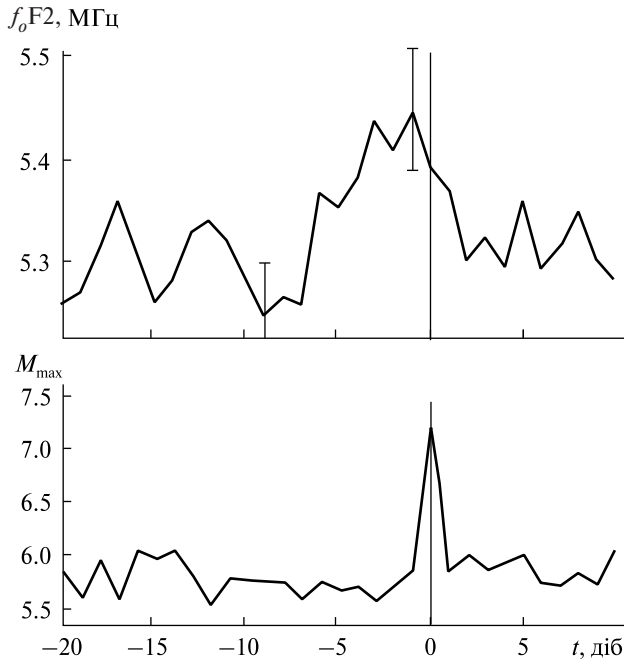


Рис. 5. Середні зміни f_oF2 (БД1-БД4) при різкій зміні глобальної сейсмічної активності, сумарна кількість $N = 79$

які вже давно розглядають як один з тригерів ЗТ у певному сейсмоактивному регіоні [1, 7], проте в даному випадку ми розглядаємо пункти спостережень, розташовані далеко від сейсмоактивних регіонів, і тому пов'язуємо цей ефект з ГСА. Звичайно ж, значення приземного тиску в двох пунктах спостережень не дають повної картини зміни тиску на земній кулі і не дозволяють зробити однозначних висновків, однак можна припустити, що глобальна атмосферна циркуляція і ГСА пов'язані між собою. Одним з механізмів їхнього зв'язку може бути нерівномірність обертання Землі.

Відмітимо також ще одну особливість отриманих результатів: встановлені зміни атмосферних і іоносферних параметрів часто мають вигляд не локальних сплесків поблизу різкого зростання ГСА, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива — див. штрихові лінії на рис. 2 і 4). Можливу природу таких змін буде розглянуто в обговоренні.

За даними за 2011—2015 рр. (БД2 — БД4), максимум критичної частоти f_oF2 шару F2 поблизу

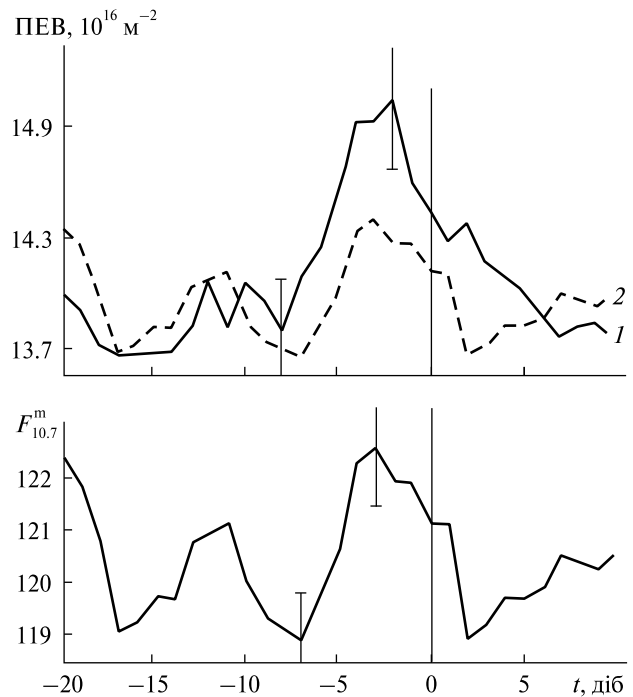


Рис. 6. Середні зміни глобального повного електронного вмісту (2015 р.) і модифікованого індексу при різкій зміні глобальної сейсмічної активності: 1 — експериментальні значення повного електронного вмісту, 2 — розрахункові значення повного електронного вмісту за умови, що він залежить тільки від сонячної активності

нульової дати виявляється у всіх БД. Середні зміни f_oF2 для всіх рядів даних і усіх розглянутих станцій показано на рис. 5.

За даними 2015 р., для якого використовувалися також глобальні карти ПЕВ, обчислено середні по земній кулі зміни ПЕВ поблизу різкого збільшення ГСА (рис. 6). Такі дані якнайкраще підходять для оцінки можливих глобальних ефектів у системі ЗАІМ. Видно, що напередодні нульової дати спостерігається значне збільшення ПЕВ (крива 1), яке помітно перевищує зміни, які могли бути викликані СА (крива 2). Для більшої наочності як оцінку СА на рис. 6 представлено модифікований індекс $F^m_{10.7}$ з урахуванням моделі УФ-випромінювання [10], пропорційний потоку. Відзначимо також схожість змін ПЕВ і середніх змін f_oF2 (рис. 5 і 6).

Як впливає з рис. 2 і 4, варіації f_oF2 також узгоджуються зі змінами приземного атмосфер-

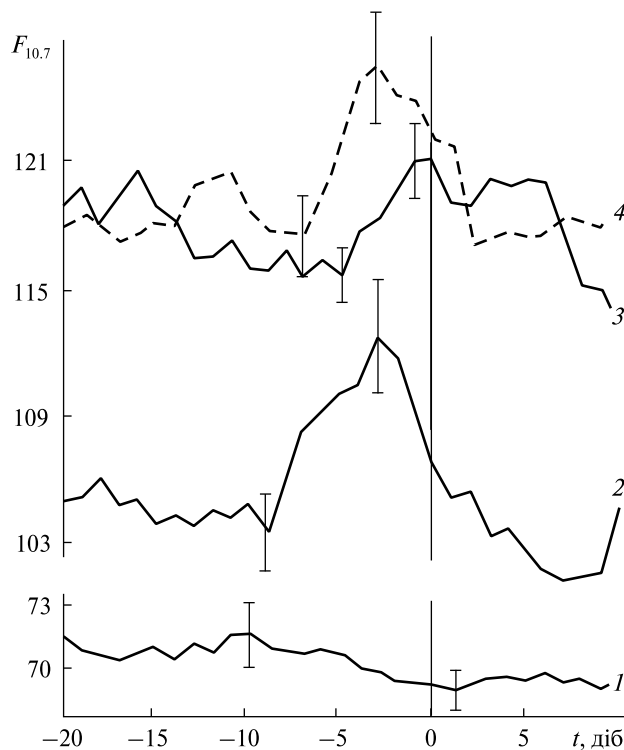


Рис. 7. Зміни сонячної активності (індекс $F_{10.7}$) за всі розглянуті періоди: 1 — БД4, 2 — БД3, 3 — БД2, 4 — БД1

ного тиску P на тій же станції, що є підтвердженням раніше отриманих результатів [48]. Цей зв'язок більш очевидний у мінімумі СА, і виявляється лише як тенденція на тлі сильніших варіацій СА і ГМА поблизу максимуму 11-річного сонячного циклу.

Зміни СА за даними БД2 — БД4 характеризуються стійким максимумом поблизу різкого зростання ГСА, тоді як за даними БД1 (поблизу мінімуму 11-річного циклу СА) вони були незначні (рис. 7). Таким чином, у більшості випадків посилення ГСА припадають на періоди підвищеного рівня СА. Однак якщо розглядати окремі активні періоди, то лише 60...75 % розглянутих підсилень ГСА узгоджувалися зі збільшенням СА і забезпечували узгодженість часових варіацій цих величин в середньому. Отже, зміни СА не можуть виступати тригером всіх без винятку ЗТ. Якщо не проводити строгий відбір даних за наявністю перед посиленням ГСА тривалого спокійного періоду, то прогностична роль СА, мабуть, буде ще меншою.

Зміни ГМА характеризуються невеликим максимумом поблизу нульової дати (див. приклад на рис. 2), за винятком 2015 р. (БД4), що є вказівкою на реальність цього явища (див. також [18]). Беручи до уваги невелику величину ефекту, а також деяке зміщення положення максимуму по відношенню до нульового дня в окремих БД, можна припустити, що даний ефект зумовлений наявністю чинника, що впливає як на ГСА, так і на ГМА. Таким фактором можуть бути варіації параметрів сонячного вітру. З одного боку, вони безпосередньо впливають на рівень ГМА, з іншого боку, по ланцюжку сонячний вітер — модуляція галактичних космічних променів — хмарність — циркуляція атмосфери — зміна тиску на земну поверхню під дією рухомих повітряних мас — ініціація підготовлених землетрусів [45] можуть вплинути на ГСА.

Таким чином, у періоди різкого збільшення ГСА спостерігаються зміни атмосферних, іоносферних, геомагнітних і сонячних даних. Істотно, що ефекти ГСА в атмосфері та іоносфері зафіксовано по всіх чотирьох БД, для космічної погоди наявність характерних змін встановлено за даними трьох з чотирьох БД: збільшення СА поблизу нульової дати не зафіксоване у БД1, а збільшення ГМА — у БД4. Для приземного атмосферного тиску зазначений зв'язок, мабуть, найбільш стійкий, для іоносферних параметрів — трохи менше, для сонячних і геомагнітних даних така відповідність спостерігається не завжди.

Як і слід було очікувати, для іоносфери зв'язок з процесами у тропосфері та літосфері більш очевидний у мінімумі 11-річного циклу СА, тоді як при високому рівні СА вплив «знизу» менш помітний.

Важливо відзначити, що ефекти ГСА отримано у сейсмічно спокійних регіонах і незалежно від місця, де відбувалися найбільш сильні ЗТ, тобто зазначені ефекти дійсно мали глобальний характер.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Беручи до уваги, що зв'язок ГСА з процесами в атмосфері та іоносфері раніше розглядався у невеликій кількості робіт, в цьому обговоренні

ми будемо звертати увагу на стійкість і характер зв'язків, зокрема на наявність безперервних пилкоподібних змін атмосферних та іоносферних показників. Тому при викладі результатів і обговоренні будемо максимально повно зіставляти між собою результати обробки даних незалежних БД, а також залучати отримані раніше результати.

З розглянутих атмосферних та іоносферних параметрів варіації приземного тиску P , мабуть, демонструють найбільш стійкі закономірності при посиленні ГСА. Так, для ЗТ в 2011 р. локальний мінімум тиску був зафіксований як на середньоширотному (Москва, Караганда, Хабаровськ, Боулдер), так і довготному (Тіксі, Хабаровськ, Ухань, Дарвін) ланцюжках станцій. Найбільш виразним мінімум P був у Хабаровську, найменш виразним — у Боулдері. У періоди посилення ГСА в 2013 р. зміни P на ст. Боулдер практично повторювали зміни P на ст. Мілстон Хілл в 2008 р. (рис. 8). Таким чином, мінімум P напередодні ЗТ — досить стабільне явище, що охоплює великі території. У західній півкулі (точніше, на середніх широтах північної півкулі, які ми розглядали) цей мінімум виражений найменше або зміщується на більш ранні дні, так що безпосередньо перед ЗТ спостерігається максимум тиску, збільшуючи різницю тисків між західною і східною півкулями.

Очевидно, що дані окремих станцій не дають повної картини глобальної атмосферної циркуляції, проте повторюваність ситуації в різні роки вказує на реальність впливу переміщення повітряних мас на ініціацію підготовлених ЗТ у глобальному масштабі.

Для іоносферних параметрів зв'язок зі змінами ГСА також досить стійкий, але на тлі більш значних варіацій іншої природи. Основні відмінності результатів для окремих іоносферних станцій стосуються певної різниці часу появи локального максимуму поблизу нульової дати в західній і східній півкулях, що можна пов'язати як з особливостями прояву іоносферних збурень на різних геомагнітних широтах, так і впливом на іоносферу процесів у тропосфері, де максимумами P також не збігаються. І дані іоносферних станцій, і тим більше дані про планетарний ПЕВ,

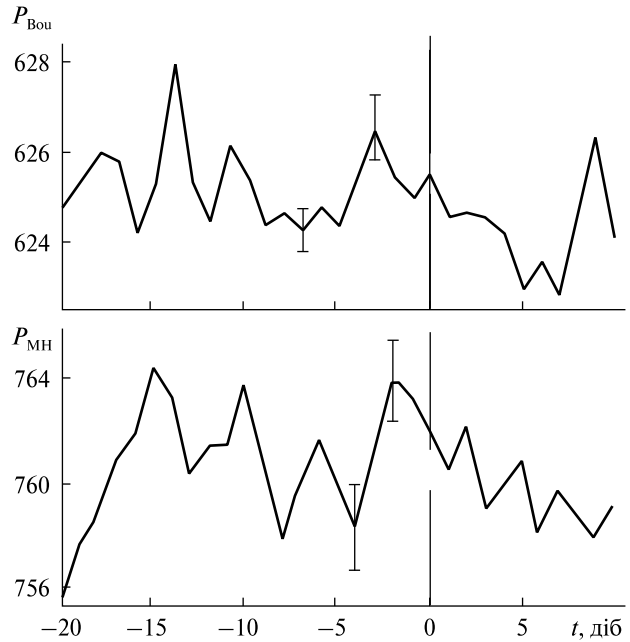


Рис. 8. Порівняння середніх змін приземного атмосферного тиску P на станціях Боулдер (БД3) і Мілстон Хілл (БД1) при різкій зміні глобальної сейсмічної активності

вказують на те, що цей ефект носить глобальний характер і вимагає для свого пояснення інших механізмів, ніж ті, що розглядаються у багатьох роботах [35, 36, 43].

Отримані результати підтверджують важливу роль СА як одного з тригерів землетрусів, проте зміни СА не можуть виступати тригером всіх без винятку землетрусів.

Беручи до уваги наявність зв'язків також між більшістю розглянутих параметрів, можна констатувати часту (хоча і часткову — з урахуванням амплітуди ефектів) синхронізацію процесів у системі ЗАІМ, у якій кожна з підсистем може виступати як джерелом, так і наслідком збурень, що є характерним для нелінійних систем [20]. Безумовно, важливу роль синхронізатора процесів у різних геосферах відіграють зміни космічної погоди, здатні впливати на кожен з підсистем.

У багатьох роботах, в яких встановлено певні зв'язки сейсмічної активності (як правило, для конкретного регіону) з явищами в земній атмосфері або в геокосмосі, часто пропонується методика прогнозу ЗТ на основі встановлених зв'язків [2]. В даному випадку також показано

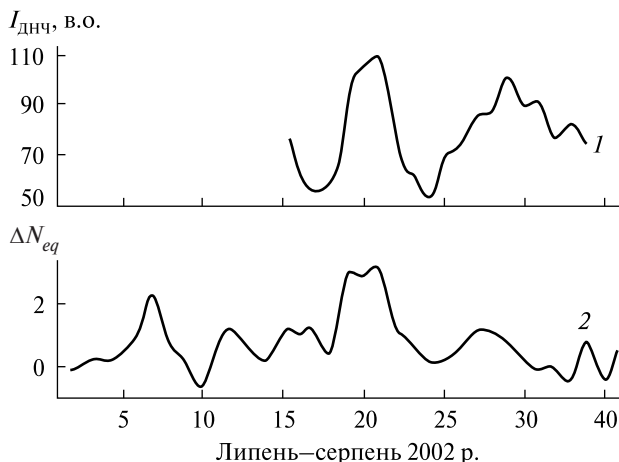


Рис. 9. Зміни інтенсивності ДНЧ-випромінювання (1) і різниці між кількістю слабких і сильних регіональних землетрусів (2) за вимірюваннями у Кримському сейсмічному регіоні [26]

зв'язки, які ми вважаємо реальними і такими, що заслуговують надалі фізичної інтерпретації. Водночас поки що немає достатніх підстав для їхнього використання у прогнозуванні ЗТ, бо ці зв'язки, як правило, проявляються лише в середньому, тоді як для окремих подій їхні індивідуальні особливості можуть виявитися домінуючими (див. розглянутий вище приклад для зв'язку СА і ЗТ). Беручи до уваги нестійкість поведінки нелінійних систем, проблема прогнозу ЗТ видається ще складнішою [23].

При прогнозі регіональної сейсмічної активності за спостереженнями в цьому ж регіоні необхідно також враховувати, що частина виявлених ефектів буде зумовлена сейсмічними подіями глобального масштабу. Для поділу регіонального і планетарного ефектів необхідно використовувати одночасні спостереження як у регіоні, для якого передбачається складати прогноз, так і у сейсмічно спокійному регіоні для контролю глобальних процесів. Раніше необхідність такого підходу було обґрунтовано в роботах [26, 27] на основі порівняння регіональних і глобальних ефектів у варіаціях ДНЧ-випромінювання. В роботі [22] також запропоновано враховувати роль глобальних ефектів при прогнозі регіональної сейсмічної активності. Таким чином, очевидним стає завдання створення глобальної системи

прогнозування сейсмічної активності з єдиним центром обробки і аналізу інформації, що надходить оперативного.

Незважаючи на недостатні підстави для безпосередньої розробки методики прогнозу, отримані результати мають практичну цінність, бо вказують на можливість інших, при цьому майже неперервних (в тому числі тригерних) механізмів взаємодії геосфер в системі ЗАІМ, здатних забезпечити як відносно короткочасні (тижні — місяці), так і кліматичні зміни на тривалих інтервалах часу (роки — десятиліття).

Для того щоб отримати уявлення про фізичні процеси, відповідальні за варіації ГСА та зумовлених нею ефектів, звернемося до результатів дослідження варіацій природного ДНЧ-випромінювання на границі «земля — повітря» у періоди підготовки та реалізації ЗТ, через те що вони тісно пов'язані з напружено-тектонічним станом гірських порід [24]. Як випливає з більшості досліджень, сильні ЗТ відбуваються на спаді або після зменшення інтенсивності ДНЧ-випромінювання, часто при наявності додаткових сплесків поблизу моменту головного поштовху, зумовлені активними процесами в осередку ЗТ. Наші раніше проведені дослідження дозволяють конкретизувати зазначену закономірність.

Раніше [26] для Кримського сейсмічного регіону було отримано, що інтенсивність ДНЧ-випромінювання в діапазоні частот 2.5...50 кГц пропорційна слабким ЗТ (в цьому випадку з магнітудою $M < 3.6$). По відношенню до всього обсягу потенційного сейсмічного осередку слабкі ЗТ забезпечують розтріскування відносно дрібних блоків земної кори, при цьому тектонічні напруги в сейсмічному регіоні продовжують збільшуватися. Навпаки, більш сильні ЗТ за рахунок утворення магістральних розривів призводять до зниження напруги в сейсмічному регіоні і, відповідно, до зменшення інтенсивності ДНЧ-випромінювання. Відповідність між ЗТ і інтенсивністю ДНЧ-випромінювання стає ще більш точною при використанні різниці кількості сильних і слабких ЗТ, що можна розглядати як оцінку остаточних напружень, що відображаються варіаціями ДНЧ-випромінювання (рис. 9).

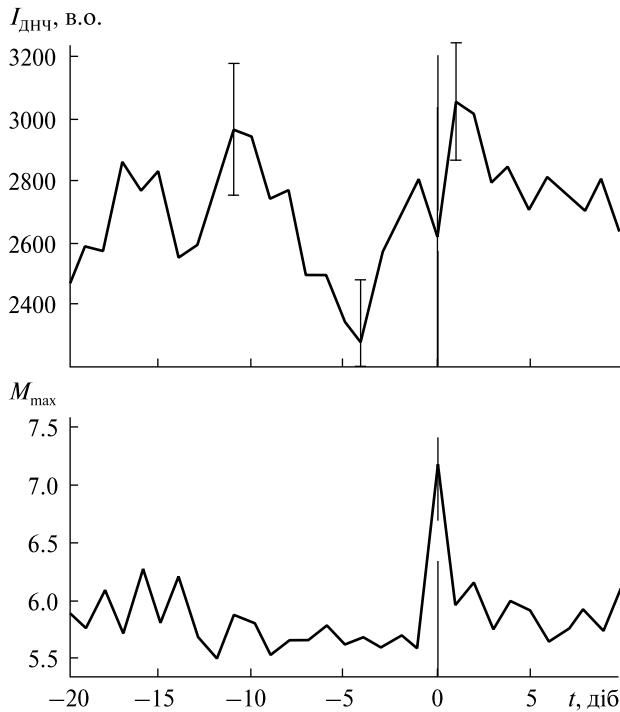


Рис. 10. Середні зміни інтенсивності ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська обл.) при різкій зміні глобальної сейсмічної активності [47]

Пізніше для кількох часових інтервалів були отримані варіації ДНЧ-випромінювання в сейсмічно спокійному регіоні (Харківська область, Україна: 49.7° N; 36.2° E), які можна пов'язати або з конкретними сильними ЗТ на відстані тисяч кілометрів від місця спостережень, або з варіаціями ГСА. Зокрема, для періоду часу, який практично збігається з періодом БДІ (див. вище), отримано [47], що посиленню ГСА передував глибокий мінімум ДНЧ-випромінювання (–4-й день на рис. 10), що в цілому узгоджується з отриманими раніше результатами. Можна виділити також декілька максимумів: поблизу –10-ї доби (узгоджується з очікуваним часом появи короткострокових електромагнітних передвісників [6]), –1-ї доби (оперативний передвісник), 1-2-й день після нульового дня (прояв афтершокової активності), а також в інтервалі від –17-ї до –15-ї доби (найімовірніше, пов'язаний з попереднім збільшенням ГСА, добре помітним на нижньому графіку рис. 10). Всі максимуми, крім

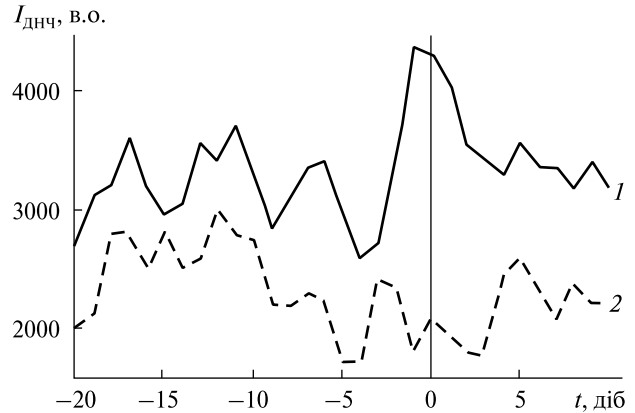


Рис. 11. Приклад зміни інтенсивності ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська обл.) при різних значеннях максимальної магнітуди землетрусів [47]: 1 – $M_{\max} = 6.5$ (13.06.2007), 2 – $M_{\max} = 7.8$ (12.05.2008)

оперативного передвісника, достовірні ($p < 0.1$). Незважаючи на невелику амплітуду оперативного провісника, його також можна вважати реальним, бо він зафіксований перед усіма розглянутими посиленнями ГСА, при цьому його положення закономірно зміщується на більш ранню добу (від 0-х до 3-х) у міру збільшення максимальної магнітуди ЗТ $M_{\max}$ від 6.4 до 7.8, при цьому його амплітуда зменшується. Як приклад на рис. 11 показано зміни ДНЧ-випромінювання для двох періодів з істотно різними значеннями $M_{\max}$.

Відзначимо добре помітний циклічний пилкоподібний характер змін інтенсивності ДНЧ-випромінювання, показаних на рис. 10 і 11 (при наявності особливостей, пов'язаних з проявом передвісників), зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів [13]. Таким чином, зазначений в розділі «Результати» пилкоподібний характер змін атмосферних і іоносферних показників виявляється тісно пов'язаним з характером тектонічних процесів. Оскільки всі ефекти зареєстровано в сейсмічно спокійних регіонах, мова йде про глобальні процеси.

Розглянемо можливий механізм появи глобальних ефектів у атмосфері та іоносфері при зміні ГСА. Добре відома [12, 32] роль виходу на поверхню радону та інших газів у області підготовки і реалізації землетрусу. Відомо також, що

цей процес носить глобальний характер [5, 16]. Важливою особливістю процесу глибинної дегазації є його нерівномірність як у часі, так і у просторі. Істотно, що основний потік глибинних відновлених газів розвантажується в рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, тобто поза прямою залежністю від локалізації та магнітуди землетрусів. Можна очікувати, що ці та інші процеси можуть призводити до змін провідності нижніх шарів тропосфери і глобального електричного кола у планетарному масштабі, викликаючи вторинні ефекти [12].

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз з використанням чотирьох незалежних баз щоденних даних показує обґрунтованість такого поняття, як глобальна сейсмічна активність і його зв'язок з процесами у верхніх геосферах. Встановлено збільшення критичної частоти шару F2 при різкому посиленні ГСА після тривалого спокійного періоду. Незважаючи на невелику амплітуду (не більше 0.5 МГц), ефект досить стійкий і проявляється майже одночасно на іоносферних станціях, розташованих у східній і західній півкулях, а також у планетарних значеннях ПЕВ. При цьому в іоносферних варіаціях, як і раніше, простежується вплив як тропосфери (особливо при низькому рівні СА), так і космічної погоди, характеристики якої у 75 % випадків також показують зв'язок з ГСА. Отже, космічна погода часто, але не завжди може виступати тригером ЗТ після тривалого періоду відносного сейсмічного затишшя. Найімовірніше, одночасно реалізується кілька різних зв'язків між геосферами, частково синхронізованих змінами космічної погоди.

2. Встановлено появу мінімуму приземного атмосферного тиску напередодні посилення ГСА, положення якого трохи зміщується на

більш ранні дні перед сильнішими ЗТ. В цілому в західній півкулі для досліджених періодів мінімум тиску настає раніше, ніж у східній, що призводить до помітного збільшення різниці тисків між півкулями на 10 мм рт. ст. Отримані результати можна розглядати як свідчення зв'язку глобальної сейсмічності та глобальної атмосферної циркуляції.

3. Отримані ефекти землетрусів у тропосферних та іоносферних показниках, як правило, мають характер не локального сплеску на деякому фоновому рівні, а стрибка з подальшим поступовим спаданням (чи збільшенням) показника до наступного активного періоду (пилкоподібна крива), тобто вплив літосфери на розташовані вище шари є неперервним і носить циклічний характер, зумовлений, ймовірно, циклічним характером тектонічних процесів.

4. Можливим механізмом появи глобальних ефектів у атмосфері та іоносфері при зміні ГСА запропоновано розглядати вихід радону та інших газів на поверхню. Цей процес є глобальним і нерівномірним у часі, а основний потік глибинних газів вивільнюється в рифтових зонах серединно-океанічних хребтів, поза прямою залежністю від локалізації і магнітуди землетрусів.

Роботу Л. Ф. Чорногора виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера», робота Захарова І. Г. і Чорногора Л. Ф. також частково підтримувалася в рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (відповідно державні номери 0119U002538, 0121U109881 і 0121U109882). Автори висловлюють подяку А. М. Цимбалу за надані дані про повний електронний вміст.

ЛІТЕРАТУРА

1. Боков В. Н. Изменчивость атмосферной циркуляции — инициатор сильных землетрясений. *Изв. РГО РАН*. 2003. **135**, № 6. С. 54—65.
2. Боярчук К. А., Карелин А. В., Пулинец С. А., Тertyшников А. В., Узунов Д. П., Юдин И. А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера. *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. № 3 (68). С. 21—31.
3. Браунли К. А. *Статистическая теория и методология в науке и технике*. Москва: Наука, 1977. 245 с.
4. Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель сейсмического процесса. *Тихоокеанская геология*. 1998. **17**, № 6. С. 95—103.
5. Войтов Г. И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. Теоретические и региональные проблемы геодинимики. *Тр. Геол. ин-та РАН*. 1999. **515**. С. 242—251.
6. Гнедышев М. Н., Оль А. И. О методике некоторых гелиобиологических исследований. *Пробл. космич. биологии*. 1982. **43**. С. 216—219.
7. Гордиец Б. Ф., Марков М. Н., Шелепин Л. А. *Солнечная активность и Земля*. Москва: Знание, 1980. 64 с.
8. Горькавый Н. Н., Трапезников Ю. А., Фридман А. М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли. *Докл. РАН. Геофизика*. 1994. **338**, № 4. С. 525—527.
9. Добровольский И. П. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. М.: Наука, 1991. 224 с.
10. Казачевская Т. В., Нусинов А. А. Прогностическая модель коротковолнового ультрафиолетового излучения Солнца. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1986. **15**, № 2. С. 593—596.
11. Летников Ф. А. *Синергетика геологических систем*. Новосибирск: Наука, 1992. 230 с.
12. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера, инициируемых ионизацией. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. **55**, № 4. С. 540—558.
13. Пущаровский Ю. М. *Глобальные проблемы общей тектоники*. Москва: Науч. мир, 2001. 520 с.
14. Рузмайкин А. Климат как игра случая. *Успехи физ. наук*. 2014. **184**, № 3. С. 297—311.
15. Садовский М. А., Писаренко В. Ф. *Сейсмический процесс в блоковой среде*. М.: Наука, 1991. 96 с.
16. Сывороткин В. Л. *Глубинная дегазация и глобальные катастрофы*. Москва: Геоинформмарк, 2002. 250 с.
17. Сытинский А. Д. О связи землетрясений с солнечной активностью. *Физика Земли*. 1989. № 2. С. 13—30.
18. Тertyшников А. В. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофиз. исслед.* 2013. **3**. С. 63—70.
19. Хомутов С. Ю. Исследование зависимости глобальной сейсмичности от положения Луны. *Геология и геофизика*. 1995. **36**, № 4. С. 88—102.
20. Черногор Л. Ф. *О нелинейности в природе и науке: Монография*. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
21. Шестопалов И. П., Харин Е. П. Изменчивость во времени связей сейсмичности Земли с циклами солнечной активности разной длительности. *Геофиз. журн.* 2006. **28**, № 4. С. 59—70.
22. Широков В. А. *Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996—2000 гг. с магнитудой M = 6—7.8 по комплексу сейсмологических и геофизических данных*. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 95—116.
23. Шуман В. Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы. *Геофиз. журн.* 2015. **37**, № 2. С. 38—55.
24. *Электромагнитные предвестники землетрясений*. Ред. М. А. Садовский. Москва: Наука, 1982. 88 с.
25. Bak P. *How nature works: The science of self-organized criticality*. New York: Springer-Verlag, 1996. 212 p.
26. Bogdanov Yu. A., Zakharov I. G., Tyrnov O. F., Hayakawa M. Electromagnetic effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July–August 2002. *J. Atmosph. Electricity*. 2003. **23**, № 2. P. 57—67.
27. Bogdanov, Yu. A., Zakharov I. G. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity. *Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos*. St. Petersburg, Petrodvorets, 2006. P. 357—360.
28. Chao B. F., Gross R. S. Changes in Earth's rotational energy induced by earthquakes. *Geophys. Int.* 1995. **122**. P. 776—783.
29. Chernogor L. F. The Earth — atmosphere — geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.* 2011. **32**, № 11. P. 3199—3218.
30. Costain J. K., Bollinger G. A. Correlations between streamflow and intraplate seismicity in the central Virginia, U.S.A., seismic zone: evidence for possible climatic controls. *Tectonophysics*. 1991. **186**, № 1–2. P. 193—214.
31. Gulyaeva T. Association of Seismic Activity with Solar Cycle and Geomagnetic Activity. *Develop. in Earth Sci.* 2014. **2**. P. 14—19.
32. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. *Sensors*. 2007. **7**, № 7. P. 1141—1158. doi:10.3390/s7071141

33. Jhuang H. K., Ho Y. Y., Kakinami Y., Liu J. Y., Oyama K.-I., Parrot M., Hattori K., Nishihashi M., Zhang D. Seismo-ionospheric anomalies of the GPS-TEC appear before the 12 May 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake. *Int. J. Remote Sens.* 2010. **31**. P. 3579—3587.
34. Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth—Sci. Revs.* 2015. **147**. P. 54—64.
35. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Y., Lizunov G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. Earth.* 2009. **34**, № 6—7. P. 485—495. doi:10.1016/j.pce.2008.07.014.
36. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V. On recent physical models of lithosphere—atmosphere—ionosphere coupling before earthquakes. *Natural Hazard and Earth System Sciences.* 2007. 0000:0001.12. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/796d/9cf121303f56f665cebba41df7427996cb8d.pdf> (Last accessed 17.02.2020).
37. Love J. J., Thomas J. N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 2013. **40**. P. 1165—1170. doi:10.1002/grl.50211.
38. Odintsova S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. and Chem. Earth.* 2006. **31**. P. 88—93.
39. Parrot M., Li M. DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.* 2015. **355**. P. 18—25.
40. Sasorova E., Levin B. The relationship of the global seismic activity with variations in the angular velocity of the Earth's rotation for 1720—2014 years. *Proc. EGU General Assembly*, 2016. **18**, EGU2016—1687.
41. Sharma G., Champatiray P. K., Mohanty S., Kannaujiya S. Ionospheric TEC modelling for earthquakes precursors from GNSS data. *Quaternary Int.* 2017. **462**. P. 65—74.
42. Shirley J. H. Lunar periodicity in great earthquakes, 1950—1965. *Gerlands Beitr. Geophys.* 1986. **95**, № 6. P. 509—515.
43. Tanimoto T., Heki K., Artru-Lambin J. Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. *Treatise on Geophysics.* 2015. **4**. P. 421—443.
44. Tavares M., Azevedo A. Influences of solar cycles on earthquakes. *Natural Sci.* 2011. **3**. P. 436—443. doi:10.4236/ns.2011.36060.
45. Veretenenko S. V., Ogurtsov M. G. Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. *Geomagnetism and aeronomy.* 2015. **55**, № 4. P. 442—449.
46. Yao Y. B., Chen P., Zhang S., Chen J. J., Yan F., Peng W. F. Analysis of pre-earthquake ionospheric anomalies before the global $M = 7.0+$ earthquakes in 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2012. **12**. P. 575—585.
47. Zakharov I. G. *The Influence of Global Seismic Activity on Variations in VLF Emissions and Infrasound in a Seismically Quiet Area.* Proc. of the XVIIth Int. Conf.: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine, 2018. N13800, 5 p. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801826> (Last accessed 17.02.2020).
48. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2018. **58**, № 3. P. 430—437.

REFERENCES

1. Bokov V. N. (2003). Variability of atmospheric circulation as initiator of strong earthquakes. *Bull. of the Rus. Geograph. Soc.*, **135** (6), 54—65 [In Russian].
2. Boyarchuk K. A., Karelin A. V., Pulinet S. A., Tertyshnikov A. V., Uzunov D. P., Yudin I. A. (2012). A unified concept for detecting signs of impending strong earthquake in the framework of integrated system of lithosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere. *Cosmonautics and Rocket Sci.*, **3** (68), 21—31 [In Russian].
3. Brownlee K. A. (1977). *Statistical theory and methodology in science and Engineering.* Moscow: Nauka [In Russian].
4. Vikulin A. V., Ivanishin A. G. (1998). Rotational model of seismic process. *Pacific geology*, **17**(6), 95—103 [In Russian].
5. Voitov G. I. (1999). On the cold degassing of methane into the troposphere of the Earth. Theoretical and regional problems of geodynamics. *Proc. of Geol. In-te of RAS*. Is. 515. Moscow: Nauka, 242—251 [In Russian].
6. Gnedyshev M. N., Ol A. I. (1982). On the methodology of some heliobiological studies. *Probl. Space Biology*, **43**, 216—219 [In Russian].
7. Gordiets B. F., Markov M. N., Shelepin L. A. (1980). *Solar activity and the Earth.* Moscow: Znanie [In Russian].
8. Gorkavy N. N., Trapeznikov Yu. A., Fridman A. M. (1994). On the global component of the seismic process and its relationship with observed features of the Earth's rotation. *Reports of the Academy of Sciences. Geophysics*, **338**(40), 525—527 [In Russian].
9. Dobrovolsky I. P. (1991). *Theory of tectonic earthquake preparation.* Moscow: Nauka [In Russian].
10. Kazachevskaya T. V., Nusinov A. A. (1986). Prognostic model of short-wave ultraviolet radiation of the Sun. *Geomagnetism and aeronomy*, **15**(2), 593—596 [In Russian].
11. Letnikov F. A. (1992). *Synergetics of geological systems.* Novosibirsk: Science [In Russian].

12. Pulinets S. A., Uzunov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. (2015). Physical basis for the generation of short-term earthquake precursors. A complex model of geophysical processes in the lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere, initiated by ionization. *Geomagnetism and Aeronomy*, **55**(4), 521–538 [In Russian].
13. Pushcharovsky Yu. M. (2001). *General problems of global tectonics*. Moscow: Nauchnyj mir [In Russian].
14. Ruzmaikin A. (2014). Climate as a game of chance. *Adv. in Phys. Sci.*, **184**(3), 297–311 [In Russian].
15. Sadovsky M. A., Pisarenko V. F. (1991). *Seismic process in a block environment*. Moscow: Nauka [In Russian].
16. Syvorotkin V. L. (2002). *Deep degassing and global disasters*. Moscow: Geoinformmark [In Russian].
17. Tertyshnikov A. V. (2013). Assessment of practical significance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. *Heliogeophys. Res.*, **3**, 63–70 [In Russian].
18. Sytinsky A. D. (1989). On the relationship of earthquakes with solar activity. *Phys. Earth*, **2**, 13–30 [In Russian].
19. Khomutov S. Yu. (1995). Investigation of dependence of global seismicity on of moon position. *Geology and Geophys.*, **36**(4), 88–102 [In Russian].
20. Chernogor L. F. (2008). *On nonlinearity in nature and science*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv Nat. Univ. Publ. [In Russian].
21. Shestopalov I. P., Kharin E. P. (2006). Time variability of the Earth's seismicity relationships with solar activity cycles of different durations. *Geophys. J.*, **28**(4), 59–70 [In Russian].
22. Shirokov V. A. (2001). Experience of short-term forecast of time, place and strength of Kamchatka earthquakes in 1996–2000 with magnitude $M = 6–7.8$ for a complex of seismological and geophysical data. *Geodynamics and volcanism of the Kuril-Kamchatka island-arc system*. Petropavlovsk-Kamchatsky: In-te of volcan. geology and geochem. of the RAS, 95–116 [In Russian].
23. Shuman V. N. (2015). Nonlinear dynamics, seismicity and aerospace sounding systems. *Geophys. J.*, **37**(2), 38–55 [In Russian].
24. Sadovsky M. A. (Ed.) (1982). *Electromagnetic earthquake precursors*. Moscow: Nauka [In Russian].
25. Bak P. (1996). *How nature works: The science of self-organized criticality*. New York: Springer-Verlag.
26. Bogdanov Yu. A., Zakharov I. G., Tyrnov O. F., Hayakawa M. (2003). Electromagnetic effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July–August 2002. *J. Atmosph. Electricity*, **23**(2), 57–67.
27. Bogdanov Yu. A., Zakharov I. G. (2006). *Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity*. Proc. of the 6th Int. Conf.: Problem of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets, 357–360.
28. Chao B. F., Gross R. S. (1995). Changes in Earth's rotational energy induced by earthquakes. *Geophys. Int.*, **122**, 776–783.
29. Chernogor L. F. (2011). The Earth – atmosphere – geospace system: main properties and processes. *Int. J. Rem. Sens.*, **32**(11), 3199–3218.
30. Costain J. K., Bollinger G. A. (1991). Correlations between streamflow and intraplate seismicity in the central Virginia, U.S.A., seismic zone: evidence for possible climatic controls. *Tectonophysics*, **186**(1–2), 193–214.
31. Gulyaeva T. (2014). Association of Seismic Activity with Solar Cycle and Geomagnetic Activity. *Development in Earth Sci.*, **2**, 14–19.
32. Hayakawa M. (2007). VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes. *Sensors*, **7** (7), 1141–1158. doi:10.3390/s7071141.
33. Jhuang H. K., Ho Y. Y., Kakinami Y., Liu J. Y., Oyama K.-I., Parrot M., Hattori K., Nishihashi M., Zhang D. (2010). Seismo-ionospheric anomalies of the GPS-TEC appear before the 12 May 2008 magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake. *Int. J. Remote Sens.*, **31**, 3579–3587.
34. Jin S., Occhipinti G., Jin R. (2015). GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth-Sci. Revs.*, **147**, 54–64.
35. Korepanov V., Hayakawa M., Yampolski Yu., Lizunov G. (2009). AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Phys. and Chem. of the Earth*, **34**(6–7), 485–495. doi:10.1016/j.pce.2008.07.014.
36. Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V. (2007). On recent physical models of lithosphere – atmosphere – ionosphere coupling before earthquakes. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 0000:0001.12. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/796d/9cf121303f56f665cebba41df7427996cb8d.pdf> (Last accessed 17.02.2020).
37. Love J. J., Thomas J. N. (2013). Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1165–1170. doi:10.1002/grl.50211.
38. Odintsova S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. (2006). Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. and Chem. Earth*, **31**, 88–93.
39. Parrot M., Li M. (2015). DEMETER Results related to seismic activity. *Radio Sci. Bul.*, **355**, 18–25.
40. Sasorova E., Levin B. (2016). The relationship of the global seismic activity with variations in the angular velocity of the Earth's rotation for 1720–2014 years. *Proc. EGU General Assembly*, 18, EGU2016–1687.
41. Sharma G., Champatiray P. K., Mohanty S., Kannaujiya S. (2017). Ionospheric TEC modelling for earthquakes precursors from GNSS data. *Quatern. Internat.*, **462**, 65–74.

42. Shirley J. H. (1986). Lunar periodicity in great earthquakes, 1950–1965. *Gerlands Beitr. Geophys.*, **95** (6), 509–515.
43. Yao Y. B., Chen P., Zhang S., Chen J. J., Yan F., Peng W. F. (2012). Analysis of pre-earthquake ionospheric anomalies before the global $M = 7.0+$ earthquakes in 2010. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **12**, 575–585.
44. Tanimoto T., Heki K., Artru-Lambin J. (2015). Interaction of Solid Earth, Atmosphere, and Ionosphere. *Treatise on Geophysics*, Oxford: Elsevier, **4**, 421–443.
45. Tavares M., Azevedo A. (2011). Influences of solar cycles on earthquakes. *Natural Sci.*, **3**, 436–443. doi:10.4236/ns.2011.36060.
46. Veretenenko S. V., Ogurtsov M. G. (2015). Nature of long-term correlation between cloud state and variations in galactic cosmic rays flux. *Geomagnetism and aeronomy*, **55**(4), 442–449.
47. Zakharov I. G. (2018). *The Influence of Global Seismic Activity on Variations in VLF Emissions and Infrasound in a Seismically Quiet Area*. Proc. of the XVIIth Int. Conf.: Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine. N 13800, 5 p.
48. Zakharov I. G., Chernogor L. F. (2018). Ionosphere as an Indicator of Processes in the Geospace, Troposphere, and Lithosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, **58**(3), 430–437.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2020

Після доопрацювання 21.05.2020

Прийнято до друку 16.01.2021

Received 17.02.2020

Revised 21.05.2020

Accepted 16.01.2021

I. G. Zakharov, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

E-mail: giz-zig@ukr.net

L. F. Chernogor, Dr.Sci. in Phys.&Math., Professor

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

V. N. Karazin National University

4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

THE GLOBAL SEISMIC ACTIVITY INFLUENCE ON PROCESSES IN ATMOSPHERE AND IONOSPHERE

In recent decades, ideas about earthquakes (EQ) have been formed as a final stage of a planetary continuous self-organizing tectonic process with periods of accumulation and relaxation of tectonic stresses. However, the scientific literature still presents studies of the response of atmospheric and ionospheric processes to individual strong EQs. In this paper, for the first time, the relationship between processes in the lithosphere, troposphere, and ionosphere is considered, taking into account new ideas about the seismic process as a global phenomenon and on the background of processes caused by space weather. Both planetary data (EQ, total electron content (TEC) of the ionosphere) and data (atmospheric pressure, critical frequency of the F2 layer of the ionosphere) of widely spaced observation points in the western and eastern hemispheres were used. To increase the reliability of statistical results, 4 independent databases of daily data for 2007–2015 were used. Stable effects of global seismic activity (GSA) in the considered parameters are established. Thus, the critical frequency of the F2 region with a sharp increase in the GSA increases by 0.4–0.5 MHz. This effect is quite stable and manifests itself almost simultaneously at ionospheric stations of the eastern and western hemispheres, as well as in planetary TEC values.

At the same time, in the ionospheric variations, as before, the influence of both the troposphere (especially at a low level of solar activity) and space weather is traced, the characteristics of which in 75 % of cases also show an association with GSA. Therefore, space weather often but not always can act as a trigger on the EQs. In general, in the western hemisphere, the minimum atmospheric pressure occurs earlier than in the eastern, which leads to a noticeable increase in the pressure difference between the hemispheres by 10 mm Hg, that indicates on the relationship of global seismicity and global atmospheric circulation. The established GSA effects, as a rule, have the character of not a local short-term burst, but a jump followed by a gradual decrease (increase) of the index until the next active period (saw-toothed curve), i.e., the influence of the lithosphere on the overlying layers is continuous and is cyclical in nature, probably due to the cyclical nature of tectonic processes. Most likely, several different couplings between geospheres are realized at the same time, partially synchronized by changes in space weather, which requires new physical mechanisms to explain them.

Keywords: seismic activity, tropospheric and ionospheric disturbances, superposed epoch method.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.035>
УДК 577.115.7:542.816:58:52-423

О. А. АРТЕМЕНКО

старш. наук. співроб., канд. біол. наук
ORCID: 0000-0002-7544-7996
E-mail: oartemenko66@gmail.com

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ЛІПІДНИХ РАФТІВ В ЦИТОПЛАЗМАТИЧНІЙ МЕМБРАНІ ПРОРОСТКІВ *PISUM SATIVUM* ПРИ ДІЇ КЛИНОСТАТУВАННЯ

Результати цитологічних, біохімічних і молекулярно-біологічних досліджень яскраво демонструють суттєвий вплив мікрогравітації на основні процеси розвитку рослин, розкриваючи механізми, які лежать в основі реакцій рослин на дію мікрогравітації та забезпечують пристосування рослин до дії цього чинника. Ключова роль у функціонуванні клітини належить цитоплазматичній мембрані (ЦМ); насамперед за своїми якостями та функціями вона може відігравати важливу роль в адаптації рослин до мікрогравітації. Проте дані щодо впливу зміненої гравітації на фізико-хімічні властивості ЦМ обмежені. Останнім часом багато уваги дослідників приділяється вивченню функціональних мікродомів ліпідного бішару із специфічною локалізацією та вмістом ліпідів і білків — ліпідних рафтів. Їх визначають як динамічну нанорозмірну збагачену стеролом та сфінголіпідами впорядковану асоціацію специфічних білків, в якій метастабільний стан спокою може бути активований об'єднанням специфічних ліпід-ліпідних, білково-ліпідних та білок-білкових взаємодій. З'являється все більше експериментальних даних, які підтверджують їхню участь у таких життєво важливих процесах, як ендоцитоз, апоптоз, інтерналізація токсинів, бактерій, вірусів тощо, а також їхню важливу роль у захисних механізмах клітини при різних стресових впливах. В даній роботі для підтвердження наявності в ЦМ ліпідних рафтів, збагачених холестерином і сфінголіпідами, а також впливу повільного горизонтального клінонестативування на функціональний стан мембрани та рухливість її доменів, використовували флуоресцентний маркер стеринів філіпін і флуоресцентний зонд лаурдан. Отримані нами результати стосовно збільшення генералізованої поляризації в умовах клінонестативування корелюють з даними, отриманими у попередніх дослідженнях і вказують на чутливість ЦМ до більш тривалої дії клінонестативування.

Ключові слова: цитоплазматична мембрана, рослини, ліпідні рафти, клінонестативування, холестерин, сфінголіпіди, генералізована поляризація.

Фундаментальні дослідження можливостей адаптації рослин до умов космічного польоту, що мають безпосереднє прикладне значення для розробки технологій космічного рослинництва у біореєнеративних системах життєзабезпечення в тривалих космічних польотах, в останні роки

піднялися на новий рівень завдяки удосконаленню методів клітинної та молекулярної біології. Це дозволило виявляти вплив мікрогравітації на експресію та локалізацію генів, склад та вміст білків. Результати цитологічних, біохімічних і молекулярно-біологічних досліджень яскраво

Цитування: Артеменко О. А. Дослідження функціонального стану ліпідних рафтів в цитоплазматичній мембрані проростків *Pisum sativum* при дії клінонестативування. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5 (132). С. 35—46. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.035>



Рис. 1. Структурні особливості двох доменів мембрани. Колірне кодування ліпідних компонентів: зелений колір використовується для насичених ліпідів (фаза L_o (формується рафтами)), червоний — для поліненасичених (фаза L_d). Стрілкою помічено холестерин (сірого кольору) [15]

демонструють суттєвий вплив мікрогравітації на ключові процеси розвитку рослин, розкриваючи в той же час механізми, які лежать в основі реакцій рослин на дію мікрогравітації та забезпечують пристосування рослин до дії цього чинника. Наприклад, змінюється експресія значної кількості генів, задіяних у широкому колі клітинних процесів, зокрема у відповідях на стрес, передачі сигналів, зокрема при участі іонів кальцію, синтезі білків, загальному метаболізмі, білків, зв'язаних з хлорофілом *a/b* тощо [29]. Сучасна методологія молекулярно-біологічних досліджень відкриває нові горизонти у розумінні гравічутливості та гравізалежності структурно-функціональної організації та адаптивних стратегій рослин до мікрогравітації. Біологічні мембрани, насамперед цитоплазматична мембрана, за своїми якостями та функціями можуть відігравати важливу роль в адаптації рослин до мікрогравітації.

Незважаючи на ключову роль цитоплазматичної мембрани у функціонуванні клітини, літературні дані щодо впливу зміненої гравітації на її фізико-хімічні властивості обмежені. Останнім часом багато уваги дослідників приділяється вивченню функціональних мікродоменів ліпідного бішару із специфічною локалізацією та вмістом ліпідів і білків, які дістали назву «ліпідних рафтів» [19, 24, 22]. Рафти є щільно упакованими доменами цитоплазматичної мембрани, збагаченими на холестерин, сфінголіпіди, насичені фосфоліпіди [15]. Будучи відносно нерозчинним в навколишніх ліпідах, рафт є досить гете-

рогенною та нестабільною структурою розміром від 50 до 200 нм. Вбудовування специфічних мембранних білків у ліпідний рафт призводить до його стабілізації, а подальше зв'язування лігандів з рецепторами або глікосфінголіпідами, що локалізовані в таких рафтах, призводить до їхнього злиття і запускає передачу внутрішньоклітинного сигналу. Такі домени стабільні, здатні існувати тривалий час і переміщуються у мембрані як одне ціле. Вони відрізняються від основної частини мембрани як за білковим і ліпідним складом, так і за функціями, які вони виконують [16]. Крім специфічного ліпідного складу ці мембранні домени характеризуються й певним білковим профілем. У рафтах плазматичних мембран рослин ідентифіковано АТФази Р- і V-типів, протеїнкінази, мономірні та гетеромірні білки, аквапорини та ін. [8, 15]. Останнім часом цікавість до рафтів викликана тим, що з'являється все більше експериментальних даних, які підтверджують їхню участь в таких життєво важливих процесах, як внутрішньоклітинна передача сигналів, ендоцитоз, апоптоз, сортування білків, інтерналізація токсинів, бактерій, вірусів тощо [14]. Плаваючи на поверхні ліпідного біслою, рафти можуть взаємодіяти один з одним, регулюючи проведення сигналу ззовні всередину клітини. Відповіді при цьому можуть бути найрізноманітніші: від активації клітинного поділу до апоптозу [3]. Високий вміст стеринів вважається особливістю рафтів. Холестерин утворює структури, які надають еукаріотичним мембранам міцність і особливу функціональну гетерогенність [15, 30]. Дослідами щодо дії на рослини холодного стресу, посухи, засолення доведено важливу роль ліпідних рафтів у захисних механізмах клітини при різних стресових впливах [4].

Вважається, що рафти формують рідко впорядковану (L_o) фазу на поверхні мембранного бішару, яка оточена рідко неупорядкованою (L_d) фазою з ненасичених гліцерофосфоліпідів (рис. 1). Рідко впорядковану фазу можна вважати синонімом рафтів і ліпідних доменів у мембрані. Вона відрізняється досить високою впорядкованістю ліпідних «хвостів», а значить і більшою товщиною ліпідних доменів, які її складають, і меншою пло-

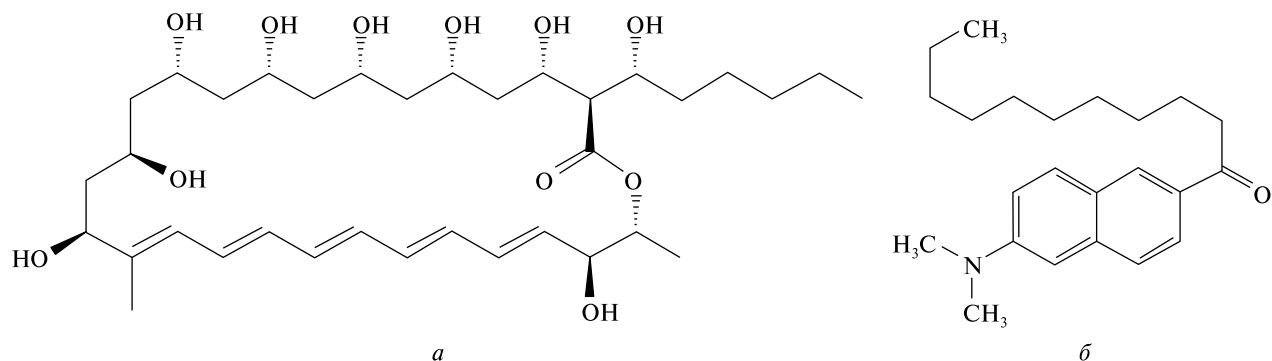


Рис. 2. Структура молекули філіпіну (а) та лаурдану (б)

щею, що припадає на одну молекулу ліпиду. При цьому L_o -фаза має високу латеральну рухливість за рахунок малого розміру рафтів у мембрані, що розташовує її приблизно між рідиною і твердою фазою, так звана «мезофаза».

Оскільки ЦМ відіграє важливу роль в адаптації рослин, нами було розпочато дослідження рафтів під дією клиностатування із застосуванням методу конфокальної мікроскопії і специфічних барвників. У подібних дослідженнях використовуються ліпофільні мембранні барвники та зонди, які або вбудовуються між рафтами і рештою мембрани, або змінюють свої флуоресцентні властивості залежно від фази мембрани. Прикладом таких барвників можуть бути філіпін та лаурдан (рис. 2).

Для обґрунтування наявності у мембрані ліпідних рафтів використовували флуоресцентний маркер стеринів — філіпін (вперше був виділений з актиноміцету *Streptomyces filipinensis*, знайденого в ґрунті на Філіпінах, чим й обумовлена його назва) (рис. 2, а). На даний час встановлено, що цей полієновий антибіотик, який має власну флуоресценцію з максимумом люмінесценції при 482 нм ($\lambda_{збл} = 340$ нм) і який взаємодіє зі стеринвмісними ділянками мембран клітин, може бути використаний як зонд на наявність та гетерогенність розподілу стеринів у біологічних мембранах [9, 18]. Не проникаючи у клітину, він зв'язується з холестерином і порушує його функціонування. Секвестрація (зв'язування з відокремлюванням від решти мембранних структур) холестерину за допомогою філіпіну дозволяє

спостерігати за змінами передачі сигналів при флуктуаціях рівня холестерину у мембрані [28].

Лаурдан — це флуоресцентний зонд, на даний час широко використовується в експериментах з вивчення особливостей структури мембран (рис. 2, б). Він здатний змішувати свої емісійні спектри залежно від розчинника або параметрів навколишнього середовища, таких як полярність, гідратація, в'язкість і т. д. [1]. Ця здатність лаурдану використовується при вивченні ліпідного бішару мембран. Таким чином, за інтенсивністю емісії лаурдану в різних частинах спектру можна розрахувати величину генералізованої поляризації (ГП), яка відображує фазовий стан мембрани. Це екологічно чутливий барвник, який демонструє червоне зміщення емісії (50 нм) у спектрі флуоресценції з полярними розчинниками в рідкій неупорядкованій фазі фосфоліпідів, оскільки мембрани піддаються фазовим переходам з гелю до рідини через зміни вмісту води в ліпідному бішарі [6, 23, 25]. У мембрані така переорієнтація молекул води є залежним від часу процесом, що призводить до повільного (в наносекундному масштабі часу) зсуву у спектрі випромінювання у напрямку довгих хвиль (до червоного краю). Наявність і рухливість молекул води в різних глибинах мембрани залежить від порядку і рухливості молекул ліпідів у мембрані. Цю різницю вмісту води в цитоплазматичній мембрані можна візуалізувати. Завдяки своїй молекулярній архітектурі флуоресцентний нафталіновий фрагмент демонструє дипольний момент між 2-диметиламіно і 6-карбонільними

залишками. При збудженні дипольний момент збільшується і викликає переорієнтацію навколишніх диполів розчинника. Енергія, необхідна для переорієнтації, зменшує енергію збудженого стану лаурдану і спектр випромінювання зонду постійно зміщується до червоного краю [1]. Отже, червоне зміщення спектра випромінювання спостерігається у полярних розчинниках, тобто коли молекули води довкола реорганізуються, тоді як у неполярних розчинниках, таких як щільно упакована L_o -фаза зі зменшеним вмістом води, емісія зміщена до синього краю. Хибні, зеленого кольору зображення на малюнках відображають ліпідні впорядковані ділянки, тоді як червоні області відображають полярні, ліпідно-невпорядковані ділянки цитоплазматичної мембрани з вищим вмістом води. Для кількісної оцінки певних зсувів у спектральній поведінці лаурдану потрібно розрахувати загальні значення генералізованої поляризації (ГП) [24].

Оскільки фаза L_o характеризується вищим рівнем упаковки ліпідів порівняно з фазою L_d , вона також набагато менш гідратована (тобто менш полярна) і більш в'язка, тож сольватохромні (ті, що змінюють свій колір у відповідь на полярність навколишнього середовища) давачі можуть розрізнити ці фази [11, 17]. Генералізована (або узагальнена) поляризація клітин, мічених лаурданом, містить корисну інформацію про плинність та полярність мембран. Висока ГП зазвичай асоціюється з низькою плинністю, низькою полярністю або високим вмістом холестерину у мембранах, а низька ГП — навпаки. Таким чином, за інтенсивністю емісії лаурдану в різних частинах спектру можна розрахувати величину ГП, яка відображає фазовий стан мембрани, з використанням рівняння, адаптованого з робіт [10, 21]:

$$GP = \frac{I_{435} - I_{580}}{I_{435} + I_{580}}, \quad (1)$$

де I_{435} і I_{580} — середня інтенсивність випромінювання на цих довжинах хвиль.

Оскільки проникнення води корелює з пакуванням ліпідів і плинністю мембран [26], спектр випромінювання лаурдану у межах одного фосфоліпідного бішару центрується при $\lambda = 490...$

580 нм, коли ліпіди перебувають в неупорядкованій фазі, і зміщується до синього краю ($\lambda \approx 440$ нм), коли ліпіди перебувають у більш упакованій фазі. Функція ГП дає математично зручний і кількісний спосіб вимірювання зсуву випромінювання. Значення ГП є безрозмірним і відображає переважний стан порядку ліпідів у ліпідних бішарах.

МАТЕРІАЛ ТА УМОВИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Експерименти поводити з проростками гороху (*Pisum sativum* L.) сорту Альфа. Сухе насіння стерилізували у водному розчині білизни, ретельно промивали проточною водою й викладали на мокрий фільтрувальний папір на 12—14 годин. Потім насінини, що проклюнулися, завертали в трубочки з фільтрувального паперу, орієнтуючи зародковим коренем донизу. Трубочки з таким насінням розташовували в склянках, шість склянок ставили на горизонтальний клиностат (2 об/хв), ще шість склянок — поряд з клиностатом (стаціонарний контроль). Проростки росли в темноті при температурі 21 °С. Для досліджень використовували 3- та 6-добові проростки.

Для якісної оцінки змін концентрації холестерину в мембранах використовували філіпін, який вибірково зв'язується з холестерином мембрани і його флуоресценція є індикатором концентрації холестерину. Дослідні і контрольні варіанти проростків гороху (апикальна меристема і початок зони розтягу) були подрібнені лезом на льоду і відцентрифуговані 15 хв в режимі 600 об/хв у розчині 1 % цукрози, з наступною інкубацією філіпіном протягом 40 хв. Свічення препаратів спостерігали за допомогою конфокального мікроскопа при довжині хвилі 430 нм.

Фазовий стан цитоплазматичної мембрани визначали за допомогою конфокального мікроскопа і ліпофільного зонду лаурдан при кімнатній температурі. Готували 5мМ стоковий розчин лаурдану в DMSO. Корені проростків гороху відмивали в PBS (рН 7.3), гомогенізували, потім стабілізували в 1М сахарозі і центрифугували 15 хв в режимі 600 об/хв gpg. Відбирали надосад і інкубували в темряві 40 хв в розчині лаурдану в робочій концентрації 10 мкМ [31].

Для розрахунку ГП-значень цитоплазматичної мембрани клітин ДЗР коренів 3- та 6-до-

бових проростків гороху в контролі та в умовах клиностатування, використовували метод, описаний в роботах [7, 20].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В дослідженнях Є. Л. Кордюм та ін. [13] вперше було встановлено підвищення рівня холестерину в рафтах гороху в умовах клиностатування, що відбувається на фоні нормальної мікрів'язкості самої мембрани та призводить до збільшення жорсткості рафтів. Припускається, що флуктуації у внутрішньоклітинному вмісті іонів кальцію та перебудови організації цитоскелету в умовах реальної та модельованої мікрогравітації зумовлені змінами рівня холестерину та вмісту сфінгомієліну у рафтах цитоплазматичної мембрани.

В результаті наших досліджень було показано, що на третю добу в контролі (рис. 3, *a*) цитоплазматична мембрана набувала характерного блакитного філіпінзалежного кольору по периметру всієї клітини, тоді як в умовах клиностатування (рис. 4, *a*) маркування філіпіном набувало вигляд пунктирної лінії, що може свідчити про нерівномірний розподіл в ній холестерину. Розмір та локалізація зафарбованих філіпіном ділянок в контролі також відрізнялися від таких в умовах клиностатування і були значно вищими.

Після дослідження 6-добових проростків гороху виявилось, що в контролі цитоплазматична мембрана маркувалася філіпіном пунктирною лінією блакитного кольору (рис. 3, *б*), відбулися зміни в розмірі та локалізації зафарбованих ділянок — вони стали тонші і розташовувались рідше. Тобто відбулося розрідження мічених філіпіном ділянок, а також зменшилася інтенсивність флуоресценції філіпіну, а значить і вміст холестерину. Натомість при клиностатуванні (рис. 4, *б*) спостерігалось зближення зафарбованих філіпіном ділянок мембрани і, як наслідок, інтенсифікація флуоресцентного світлення цитоплазматичної мембрани. Тобто, в умовах тривалішого клиностатування відбувається збільшення вмісту стеринзбагачених мембранних структур на одиницю площі, а в контролі навпаки — зменшення. Трафік стеринзбагачених доменів при клиностатуванні характеризується високою рухливістю, а в умовах контролю —

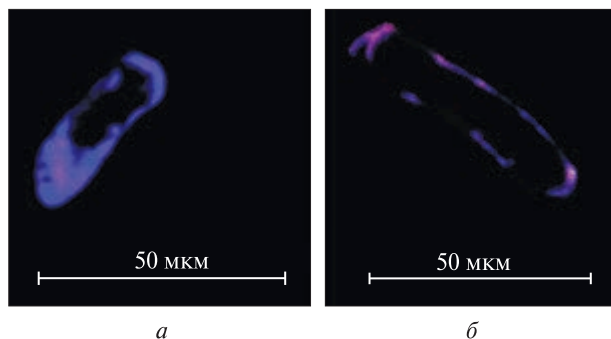


Рис. 3. Клітини дистальної зони розтягу коренів проростків гороху після обробки філіпіном в контролі: *a* — три доби, *б* — шість діб

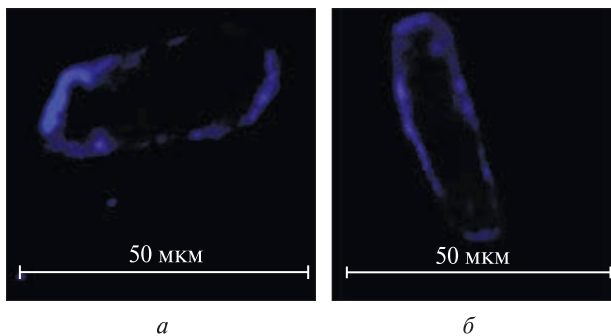


Рис. 4. Те ж в умовах клиностатування

низькою. Холестерин надає мембрані жорсткості, займаючи вільний простір між гідрофобними хвостами ліпідів і не дозволяючи їм вигинатися. Тому мембрани з невеликим вмістом холестерину більш гнучкі, а з більшим — жорсткі і крихкі. Крім того, холестерин слугує «стопором» для переміщення полярних молекул з клітини в клітину.

Отже, в умовах повільного горизонтального клиностатування на шосту добу експерименту відбувається збільшення вмісту стеринзбагачених мембранних структур, зокрема холестерину. Завдяки використанню філіпіну, флуоресценція якого є індикатором концентрації холестерину у мембрані, спостерігалось «зближення» рафтів між собою в суцільний пласт по периметру цитоплазматичної мембрани. Таке підвищення рівня холестерину в рафтах гороху в умовах клиностатування призводить до збільшення їхньої жорсткості, що збігається з попередньо отриманими

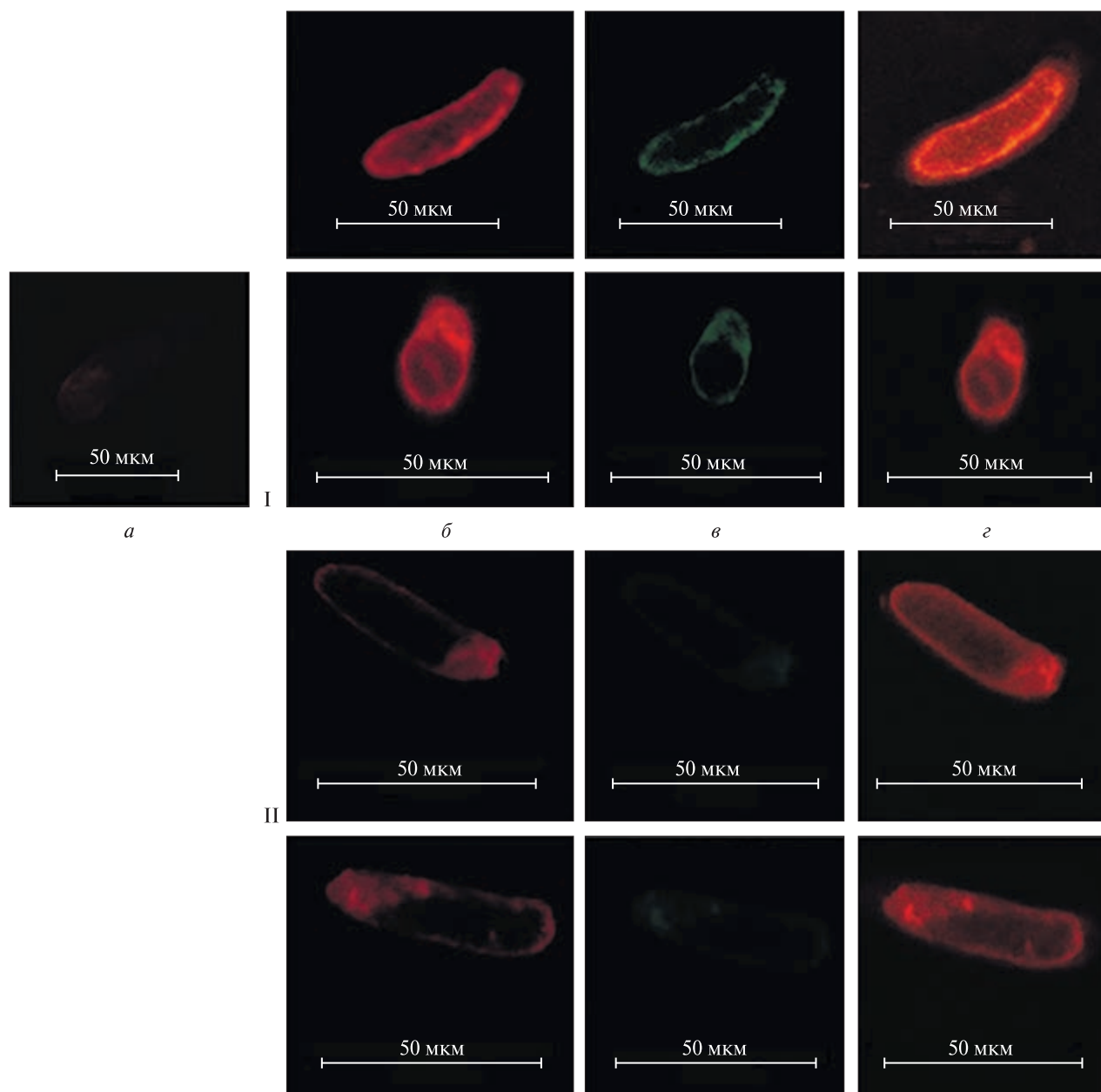


Рис. 5. Клітини дистальної зони розтягу 3-добових проростків гороху після обробки лаурданом: I — контроль, II — клиноштатування. *a* — негативний контроль, *б* — зміщений до червоного краю спектр випромінювання лаурдану вказує на полярні фази з вищим вмістом води, *в* — зміщений до синього краю спектра випромінювання (зелений, хибний колір) вказує на неполярні фази, в яких міститься менше води, *г* — об'єднане зображення

даними досліджень функціональних сайтів цитоплазматичної мембрани рослинних клітин в умовах реальної та модельованої мікрогравітації. Саме через такий складний стеріновий профіль цитоплазматична мембрана рослин менш чутли-

ва до дії теплового шоку та інших стресів порівняно з тваринними клітинами [5].

На рис. 5 і 6 представлено результати дослідження фосфоліпідів цитоплазматичної мембрани 3- та 6-добових проростків гороху в контролі

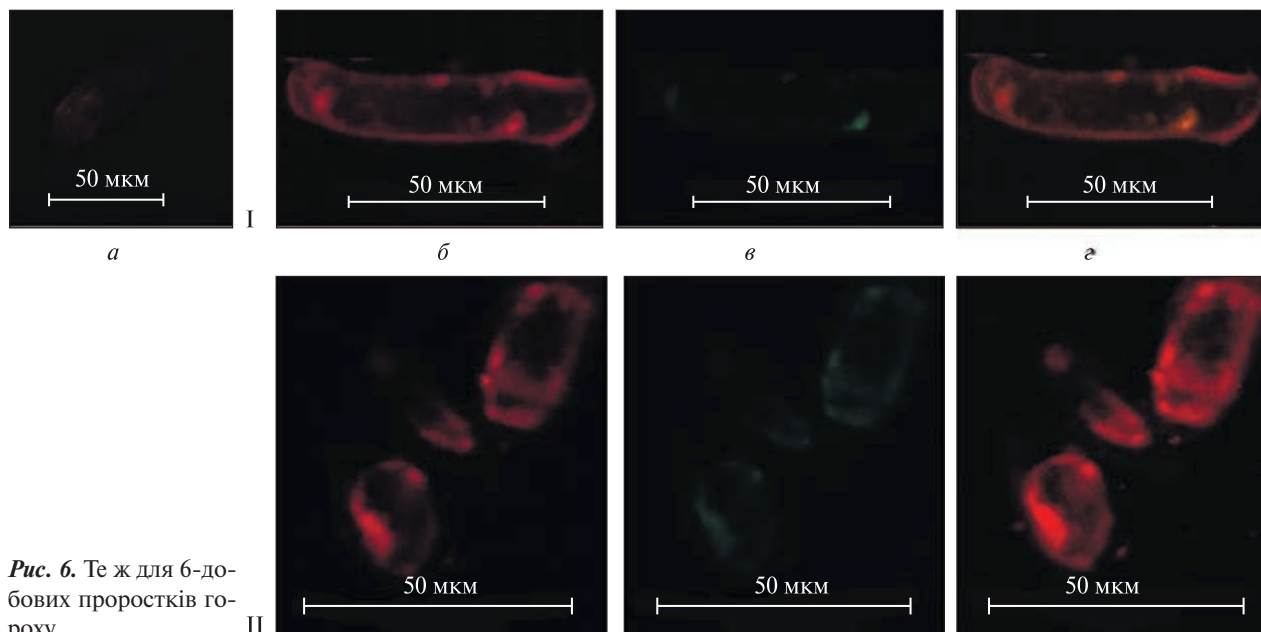


Рис. 6. Те ж для 6-добових проростків гороху

та при клиноостатуванні з використанням флуоресцентного зонду лаурдан.

Спектр випромінювання, зміщений у червоний бік, вказує на полярні фази з вищим вмістом води, тоді як спектр, зміщений до синього краю (тут і надалі: зелений, хибний колір), вказує на неполярні фази, в яких вміст води менший. Так, на третю добу (рис. 5) в контролі спостерігається збільшена кількість ділянок цитоплазматичної мембрани з вищим вмістом води, тоді як в умовах клиноостатування зміщення спектра випромінювання зонду в червоний колір відбувається менш інтенсивно. Підвищена емісія ліпідно-впорядкованих ділянок мембрани (зеленого кольору) зі зменшеним вмістом води, що вказує на наявність рафтів, помітна в контролі, тоді як в умовах клиноостатування її рівень значно нижчий. На шосту добу експерименту (рис. 6) в контролі майже не спостерігалось суттєвих змін динаміки полярних фаз ділянок плазматичної мембрани, тоді як неполярні візуально зменшилися. В умовах же клиноостатування, навпаки, зміщення спектра випромінювання відбувалося до зеленого кольору, тоді як червоні області з вищим вмістом води майже не змінилися. Отже, використання флуоресцентного зонду лаурдану дозволило відстежити зміни фазового стану цитоплазматичної мембрани

при дії клиноостатування. Було помічено підвищену емісію ліпідно-впорядкованих, щільніших ділянок мембрани зі зменшеним вмістом води, що вказує на наявність рафтів. Проте інтенсивність флуоресценції лаурдану сама по собі не є інформативною для упаковки ліпідів, замість цього вимірюють флуктуацію ГП, тому що саме спектроскопічні параметри свідчать про локальну упаковку мембрани. Якщо ГП не змінюється, хоча молекули можуть дифундувати в об'ємі збудження, вважається, що немає жодної різниці в упаковці ліпідів.

Отже, застосування флуоресцентного зонду лаурдану дозволило відстежити зміни фазового стану цитоплазматичної мембрани при дії клиноостатування, які також відбулися через шість діб експерименту. Було помічено підвищену емісію ліпідно-впорядкованих, щільніших ділянок мембрани зі зменшеним вмістом води, що вказує на наявність рафтів. Оскільки ліпідні рафти збагачені на сфінголіпіди (їхній вміст в цитоплазматичній мембрані рослин може перевищувати 40 % [2]), отримані нами результати узгоджуються з даними, отриманими у попередніх дослідженнях.

Наступним етапом роботи було визначення інтенсивності емісії лаурдану в різних частинах

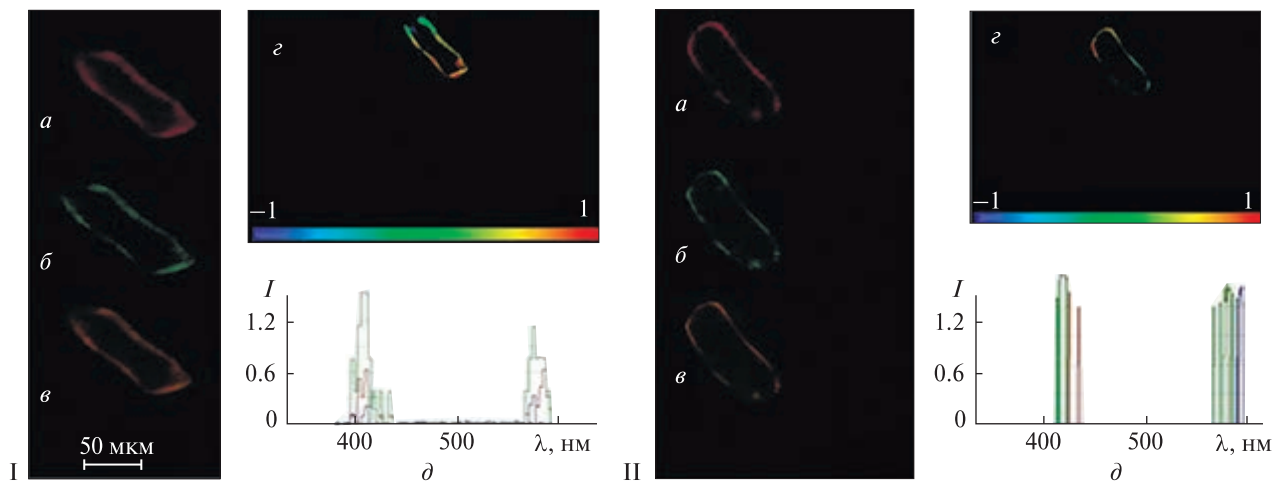


Рис. 7. Клітини дистальної зони розтягу 3-добових проростків гороху після обробки лаурданом. I — контроль, II — клиностатування. *a* — зміщений до червоного кольору спектр випромінювання лаурдану вказує на полярні фази з вищим вмістом води, *б* — зміщений до синього кольору спектр випромінювання (зелений, хибний колір) вказує на неполярні фази, в яких міститься менше води, *в* — об'єднане зображення; *z* — розподіл ліпідів, спектральна полоса показує значення ГП з зображень: червоний колір вказує на високі значення ГП, синій — на низькі; *д* — інтенсивність флуоресценції лаурдану

спектру для розрахунку величини генералізованої поляризації, яка відображує фазовий стан мембрани. Відомо, що величина ГП може приймати значення від -1 до $+1$. Ця величина для рідких областей мембрани варіює приблизно від -1 до 0.25 , а для впорядкованих доменів мембрани — від 0.25 до 1 [7].

В даній роботі ми використовували метод, описаний в роботі [20], для розрахунку ГП-значень цитоплазматичної мембрани клітин ДЗР коренів 3- та 6-добових проростків гороху в контролі та в умовах клиностатування. Псевдоколірні зображення (так звані HSB (відтінок — насиченість — яскравість)) були створені шляхом множення значень ГП на значення інтенсивності в кожному пікселі [32]. На цих зображеннях значення ГП вказані за допомогою колірної інформації, мінімальне значення ГП встановлене на -1 (синє зображення), а максимальне — на $+1$ (червоне зображення).

На рис. 7 і 8 представлено результати дослідження фосфоліпідів цитоплазматичної мембрани 3- та 6-добових проростків гороху в контролі та при клиностатуванні з використанням флуоресцентного зонду лаурдану.

Оскільки спектр випромінювання, зміщений до червоного краю, вказує на полярні фази з вищим вмістом води, видно, що на третю добу (рис. 7, I: *a—в*) в контролі спостерігається збільшена кількість ділянок цитоплазматичної мембрани з вищим вмістом води, тоді як в умовах клиностатування зміщення спектру випромінювання зонду до червоного краю відбувається менш інтенсивно (рис. 7, II: *a—в*). Підвищена емісія ліпідно-впорядкованих ділянок мембрани (зеленого кольору) зі зменшеним вмістом води, що вказує на наявність рафтів, помітна в контролі, тоді як в умовах клиностатування її рівень значно вищий. На основі отриманих зображень проводили розрахунок значень ГП з використанням формули (1). Значення ГП для цитоплазматичної мембрани 3-добових клітин коренів етиологованих проростків варіювало у межах норми і становило приблизно $+0.04$ в контролі і $+0.04$ при клиностатуванні, що свідчить про її рідинність.

На шосту добу експерименту в контролі (рис. 8, I: *a—в*) майже не спостерігалось суттєвих змін в динаміці полярних фаз ділянок плазматичної мембрани, тоді як неполярні візуально

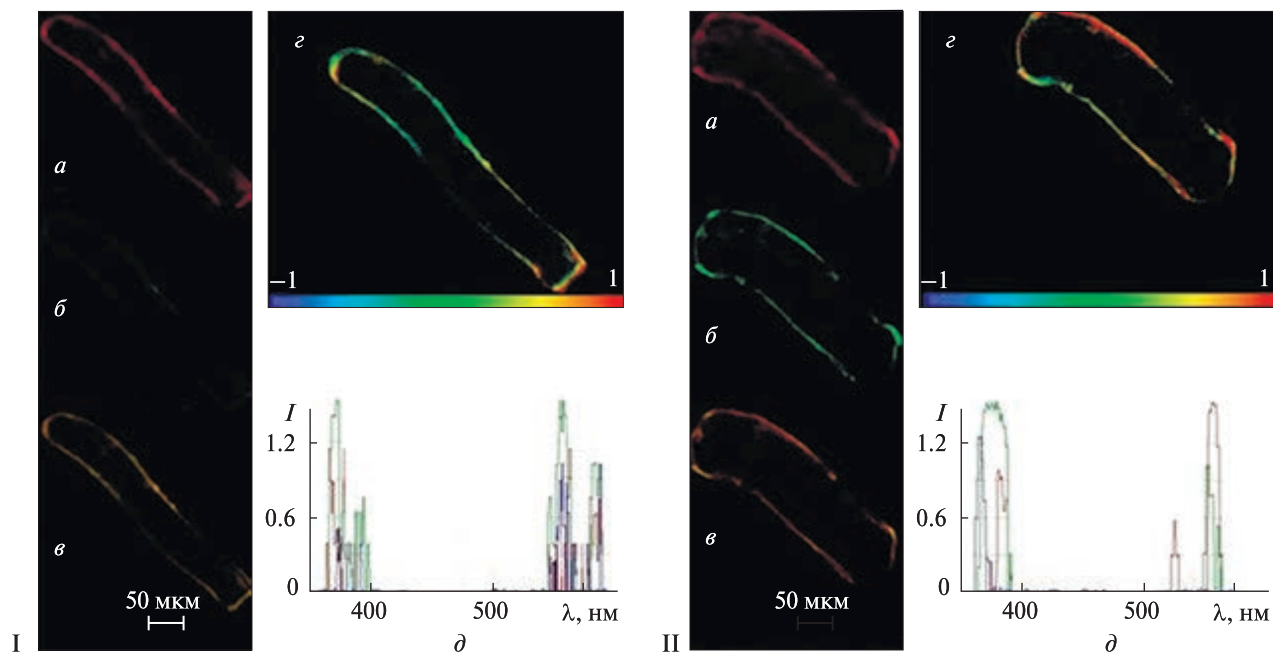


Рис. 8. Те ж для 6-добових проростків гороху

зменшилися. В умовах же клиностатування, навпаки, зміщення спектра випромінювання відбувалося до зеленого кольору (рис. 8, II: а—в), тоді як червоні області з вищим вмістом води майже не змінилися. Значення ГП для цитоплазматичної мембрани 6-добових клітин коренів етиологованих проростків варіювало у межах норми і складало приблизно -0.04 в контролі і $+0.5$ при клиностатуванні, що свідчить про наявність у цитоплазматичній мембрані клітин коренів клиностатованих проростків впорядкованих (щільних) доменів. Було проаналізовано по двадцять коренів кожного варіанту, і всі вони показали подібність зображень у межах певного варіанту. Також спостерігався асиметричний розподіл значень ГП цитоплазматичної мембрани в різних частинах клітини, тому для порівняння брали середнє значення ГП для кожного варіанту.

Отже, фазовий перехід з рідкої неупорядкованої фази до щільно впорядкованої спостерігався за збільшенням значень ГП лаурдану в цитоплазматичній мембрані коренів проростків гороху з $+0.04$ до $+0.5$ на шосту добу в умовах клиностатування. В контролі не спостерігалось

суттєвих змін значень ГП, їхня варіабельність була у межах рідкої неупорядкованої фази від -0.04 до $+0.04$, що свідчить про відсутність зміненого фазового стану мембрани на цих строках експерименту. Таким чином, можна зробити висновок, що під впливом клиностатування через шість діб збільшуються фракції щільно організованих доменів з низьким вмістом води (рафти), про що свідчить збільшення значень ГП.

ВИСНОВКИ

Аналіз літературних джерел і отриманих нами даних відкриває нові підходи до розв'язку фундаментальної проблеми біології, особливо космічної та гравітаційної біології — гравічутливості життєво важливих процесів функціонування клітин [12]. Одержано нові докази, що асоціація із рафтами може бути вирішальним фактором у визначенні активності інтегральних білків, регуляції іонних каналів, у першу чергу механочутливих, зв'язку мембрани із цитоскелетом. Вперше проведене нами вивчення складу ліпідів і стеринів рафтів цитоплазматичної мембрани коренів проростків гороху показало, що вони за своєю структурою та складом відповідають ха-

рактерним особливостям ліпід-білкових мікро-доменів інших рослин і чутливі до дії модельованої мікрогравітації.

Попередньо отримані нами дані щодо підвищення рівня холестерину в рафтах гороху в умовах клиностагування, що відбувається на фоні нормальної мікров'язкості самої мембрани та призводить до збільшення жорсткості рафтів, підтверджуються завдяки використанню філіпіну, флуоресценція якого є індикатором концентрації холестерину у мембрані. На шосту добу експерименту спостерігалось «зближення» рафтів між собою в суцільний пласт по периметру цитоплазматичної мембрани. Саме через такий складний стеринний профіль рослинні плазматичні мембрани менш чутливі до дії теплового шоку та інших стресів у порівнянні з тваринними клітинами [2]. Зміни фазового стану цитоплазматичної мембрани при дії клиностагування, визначені після застосування флуоресцентного зонду лаурдану, відбулися також через

шість діб експерименту. Було помічено підвищену емісію ліпідно-впорядкованих, щільніших ділянок мембрани зі зменшеним вмістом води, що вказує на наявність рафтів. Отримані нами результати стосовно збільшення ГП в умовах клиностагування на цих строках корелюють з даними, отриманими у попередніх дослідженнях і вказують на чутливість ЦМ до більш тривалої дії клиностагування. Порівняння і аналіз результатів проведених нами експериментів свідчить про те, що рідкокристалічні структури дуже чутливі до змін умов навколишнього середовища, і це визначає динамічність ліпідних бішарів мембрани — вони змінюють свою структуру при різноманітних, навіть незначних змінах зовнішніх умов. Для нормального функціонування мембрана має бути в рідкокристалічному стані, тому при будь-яких змінах середовища відбувається адаптаційна зміна хімічного складу мембрани, що забезпечує зменшення передумов для фазового переходу.

REFERENCES

1. Allen J. A., Halverson-Tamboli R. A., Rasenick M. M. (2007). Lipid raft microdomains and neurotransmitter signaling. *Nature reviews. Neuroscience*, **8** (2), 128—140. doi:10.1038/nrn2059 [in English].
2. Beck J. G., Mathieu D., Loudet C., Buchoux S., Dufourc E. J. (2007). Plant sterols in “rafts”: a better way to regulate membrane thermal shocks. *FASEB J.*, **21**(8), 1714-23. doi: 10.1096/fj.06-7809com [in English].
3. Brown D.A., London E. (2000). Structure and function of sphingolipid- and cholesterol-rich membrane rafts. *J. Biol. Chem.*, **275** (23), 17221-4. doi: 10.1074/jbc.R000005200 [in English].
4. Chen Y., Qin J., Cai J., Chen Z. W. (2009). Cold Induces Micro- and Nano-Scale Reorganization of Lipid Raft Markers at Mounds of T-Cell Membrane Fluctuations. Published: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005386> [in English].
5. Dietrich C., Bagatolli L. A., Volovyk Z. N., Thompson N. L., Levi M., Jacobson K., Gratton E. (2001). Lipid rafts reconstituted in model membranes. *Biophys. J.*, **80**, 1417—1428. doi: 10.1016/S0006-3495(01)76114-0 [in English].
6. Gaus K., Gratton E., Kable E. P., Jones A. S., Gelissen I., Kritharides L., Jessup W. (2003). Visualizing lipid structure and raft domains in living cells with two-photon microscopy. *PNAS*, **100**, 15554—15559. doi: 10.1073/pnas.2534386100 [in English].
7. Gaus K., Le Lay S., Balasubramanian N., Schwartz M. A. (2006). Integrin-mediated adhesion regulates membrane order. *J. Cell. Biol.*, **174**(5), 725—734. doi:10.1083/jcb.200603034 [in English].
8. Hancock J.F. (2006). Lipid rafts: Contentious only from simplistic standpoints. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, **7**, 456—462 [in English].
9. Harmaza Y. V. (2008). Cholesterol and Zn-induced membrane changes. *Science and innovation*, **9**, 40—42 [in Russian].
10. Harris F. M., Best K. B., Bell J. D. (2002). Use of laurdan fluorescence intensity and polarization to distinguish between changes in membrane fluidity and phospholipid order. *Biochim. Biophys. Acta.*, **1565**(1), 123—128. doi: 10.1016/s0005-2736(02)00514-x. PMID: 12225860 [in English].
11. Klymchenko A. S., Kreder R. (2014). Fluorescent Probes for Lipid Rafts: From Model Membranes to Living Cells. *Chemistry & Biology*, **21**(1), 97—113 [in English].
12. Kordyum E. L. (2014). Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *J. Plant Biology*, **16** (1), 79—90 [in English].

13. Kordyum E. L., Klymenko O. M., Bulavin I. V., Zhupanov I. V., Vorobyova T. V., Ruelland E. (2018). Lipid rafts in plant cells are sensitive to the influence of simulated microgravity (clinorotation). *Space Science and Technology*, **24** (4), 48–58. <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.051> [in Russian].
14. Lefebvre B., Furt F., Hartmann M. A., Michaelson L. V., Carde J. P., Sargueil-Boiron F., Rossignol M. (2007). Characterization of lipid rafts from *Medicago truncatula* root plasma membranes: a proteomic study reveals the presence of a raft-associated redox system. *Plant Physiol.*, **144**, 402–418 [in English].
15. Lingwood D., Simons K. (2010). Lipid rafts as a membrane-organizing principle. *Science*, **327** (5961), 46–50. doi: 10.1126/science.1174621 [in English].
16. London E., Brown D. A. (2000). Insolubility of lipids in triton X-100: physical origin and relationship to sphingolipid/cholesterol membrane domains (rafts). *Biochim. Biophys. Acta*, **1508** (1-2), 182-95. doi: 10.1016/s0304-4157(00)00007-1 [in English].
17. M'Baye G., Mély Y., Duportail G., Klymchenko A. S. (2008). Liquid ordered and gel phases of lipid bilayers: fluorescent probes reveal close fluidity but different hydration. *Biophys. J.*, **95**, 1217–1225 [in English].
18. Mongrand S., Morel J., Laroche J., Claverol S., Carde J. P., Hartmann M. A., Bonneau M., Simon-Plas F., Lessire R., Bessoule J. J. (2004). Lipid rafts in higher plant cells. *The J. Biolog. Chemistry*, **279** (35), 36277–36286. doi: 10.1074/jbc.M403440200 [in English].
19. Nickels J. D., Smith M. D., Alsop R. J., Himbert S., Yahya A., Cordner D., Zolnierczuk P., Stanley C. B., Katsaras J., Cheng X., Rheinstädter M. C. (2019). Lipid Rafts: Buffers of Cell Membrane Physical Properties. *J. Phys. Chem. B.*, **123**(9), 2050–2056. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b12126 [in English].
20. Owen D. M., Rentero C., Magenau A., Abu-Siniyeh A., Gaus K. (2011). Quantitative imaging of membrane lipid order in cells and organisms. *Nat. Protoc.*, **7**(1), 24–35. doi: 10.1038/nprot.2011.419 [in English].
21. Parasassi T., De Stasio G., d'Ubaldo A., Gratton E. (1990). Phase fluctuation in phospholipid membranes revealed by Laurdan fluorescence. *Biophys. J.*, **57**(6), 1179–1186. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(90\)82637-0](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(90)82637-0) [in English].
22. Parasassi T., Gratton E., Yu W., Wilson P., Levi M. (1997). Two photon fluorescence microscopy of LAURDAN generalized polarization domains in model and natural membranes. *Biophys. J.*, **72**, 2413–2429. doi: 10.1016/S0006-3495(97)78887-8 [in English].
23. Parasassi T., Krasnowska E. K., Bagatolli L., Gratton E. (1998). Laurdan and prodan as polarity-sensitive fluorescent membrane probes. *J. Fluoresc.*, **8** (4), 365–373. doi: 10.1023/A:1020528716621 [in English].
24. Risselada H. J., Marrink S. J. (2008). The molecular face of lipid rafts in model membranes. *PNAS*, **105** (45), 17367–17372. doi: 10.1073/pnas.0807527105 [in English].
25. Sanchez S. A., Tricerri M. A., Gunther G., Gratton E. (2007). Laurdan generalized polarization: from cuvette to microscope. *Modern Research and Educational Topics in Microscopy (Formatex)*. 2, 1007–1014 [in English].
26. Sanchez S. A., Tricerri M. A., Gratton E. (2012). Laurdan GP fluctuations. *PNAS*, **109** (19), 7314–7319. doi: 10.1073/pnas.1118288109 [in English].
27. Sezgin E., Levental I., Mayor S., Eggeling C. (2017). The mystery of membrane organization: composition, regulation and roles of lipid rafts. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, **18**, 361–374. <https://doi.org/10.1038/nrm.2017.16> [in English].
28. Shevyreva T. A. (2008). Vesicular transport of PIP-aquaporins in a plant cell under osmotic stress. *Phd dissertation abstract*. Moscow: IPP [in Russian].
29. Simons K., Gerl M. (2010). Revitalizing membrane rafts: new tools and insights. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.*, **11**, 688–699. <https://doi.org/10.1038/nrm2977> [in English].
30. Vesnina L. (2013). Lipid rafts: the role in the regulation of the functional state of cell membranes. *Actual problems of modern medicine*, **13** (2), 5–10 [in Russian].
31. Wheeler G., Tyler K. M. (2011). Widefield microscopy for live imaging of lipid domains and membrane dynamics. *Biochim. Biophys. Acta*, **1808** (3), 634–641. doi: 10.1016/j.bbamem.2010.11.017 [in English].
32. Zhao X., Zhang X., Qu Y., Li R., Baluška F., Wan Y. (2015). Mapping of membrane lipid order in root apex zones of *Arabidopsis thaliana*. *Front. Plant Sci.*, **6**, 1151. doi: 10.3389/fpls.2015.01151 [in English].

Стаття надійшла до редакції 01.02.2021
 Після доопрацювання 01.02.2021
 Прийнято до друку 30.08.2021

Received 01.02.2021
 Revised 01.02.2021
 Accepted 30.08.2021

O. A. Artemenko

Senior Researcher, Ph.D. in Biol.

ORCID: 0000-0002-7544-7996

E-mail: oartemenko66@gmail.com

M. G. Kholodny Institute of botany, NAS of Ukraine

2, Tereshchenkivska Str., Kyiv, 01601 Ukraine

THE STUDY OF THE FUNCTIONAL STATE OF LIPID RAFTS IN THE CYTOPLASMIC MEMBRANE OF *PISUM SATIVUM* SEEDLINGS UNDER CLINOROTATION

The results of cytological, biochemical, and molecular biological studies clearly demonstrate the significant influence of microgravity on the main processes of plant development, revealing the mechanisms which underlie the reactions of plant responses to microgravity and ensure their adaptation to this factor. The key role in cell function belongs to the cytoplasmic membrane (CM). First of all, by its qualities and functions, it can play an important role in the adaptation of plants to microgravity. However, data about the effect of altered gravity on the physicochemical properties of CM are limited. Recently, much attention has been paid to the study of functional microdomains of the lipid bilayer that have a specific localization and content of lipids and proteins - lipid rafts. They are defined as a dynamic nanosized, sterol- and sphingolipid-enriched ordered association of specific proteins, in which a metastable resting state can be activated by a combination of specific lipid-lipid, protein-lipid, and protein-protein interactions. There are more and more experimental data that confirm their participation in such live processes as endocytosis, apoptosis, internalization of toxins, bacteria, viruses, etc., as well as their important role in the protective mechanisms of the cell under different stressors. In this work, a fluorescent marker of sterols — filipin and a fluorescent probe laurdan were used to confirm the presence of cholesterol and sphingolipid-enriched lipid ranges in CM. Our results regarding the increase in generalized polarization in the clinorotation conditions correlate with the data obtained in previous studies and indicate the sensitivity of the CM to a longer action of the clinorotation.

Keywords: cytoplasmic membrane, plants, lipid rafts, clinorotation, cholesterol, sphingolipids, generalized polarization.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.047>

УДК 580.7:581.44 (477)

Н. Я. КИЯК, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

E-mail: kyuyak_n@i.ua

О. В. ЛОБАЧЕВСЬКА, зав. відділу, канд. біол. наук, старш. наук. співроб.

Я. Д. ХОРКАВЦІВ, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

Інститут екології Карпат Національної академії наук України

вул. Козельницька 4, Львів, Україна, 790026

МОРФОФІЗІОЛОГІЧНІ РЕАКЦІЇ ГРАВІЧУТЛИВОСТІ ТА АДАПТАЦІЇ ДО УФ-ОПРОМІНЕННЯ МОХУ *BRYUM CAESPITICIMUM* HEDW. З АНТАРКТИКИ

У роботі вивчали адаптивні фізіологічні реакції моху *Bryum caespiticism* Hedw. з Антарктики на дію УФ-опромінення та гравіморфози як фактор адаптивної пластичності, пов'язаної з умовами середовища. Контролем були рослини *B. caespiticism*, зібрані у Природному заповіднику «Розточчя» (Львівська обл.). У дослідженнях використовували лабораторну культуру, яку вирощували у контрольованих умовах у фітотроні. Пагони опромінювали УФ-променями, генерованими ультрафіолетовою лампою OSRAM інтенсивністю 4 кВт/м², що спричиняла 50 % пригнічення регенерації рослин (ЕД₅₀). Фізіологічні показники визначали через 24 год після УФ-опромінення.

Аналізували вплив гравітації на морфологічну форму гаметофітної дернини *B. caespiticism* та взаємодію світла і гравітації у граві/фототропізмі, як прояв адаптивності гравіморфозів. Одним із завдань було дослідити формування гравіморфозів як результат ініціації процесів галузження клітин і закладання бруньок гаметофорів й оцінити їхню роль у життєвому циклі *B. caespiticism* в екстремальних умовах. Для цього визначали коефіцієнт галузження гравітропної протонеми, кут нахилу галузок та розвиток бруньок залежно від взаємодії фото/гравітропізму під впливом червоного і синього світла та дію ультрафіолету на гравічутливість.

Досліджено вплив фізіологічно активного червоного і синього світла на активність галузження та закладання бруньок на гравітропній протонемі антарктичного виду моху *B. caespiticism*. Встановлено, що червоне світло переважно інгібувало гравіперцепцію і гравітропний ріст клітин протонеми, унаслідок чого змінилася реакція на дію гравітації, однак ініціювало високу активність галузження і, відповідно, іншу морфологічну форму дернини. Після дії синього світла спостерігали інтенсивне закладання бруньок і формування гаметофорів. Отже, гравітаційна сила сприяла морфологічній мінливості та зміні функціональної активності клітин на ювенільній протонемній стадії розвитку, що має важливе значення для виживання моху в екстремальних умовах середовища. Після УФ-опромінення гравічутливість протонеми *B. caespiticism* зменшилася, проте унаслідок стійкості антарктичного зразка моху до тривалої дії УФ-променів гравітропний ріст хоча й був сповільнений, але не заблокований повністю, як у рослин з Львівської обл.

Визначали дію ультрафіолету на антиоксидантну активність, вміст розчинної (вакуолярної) та зв'язаної у клітинній стінці фракцій УФ-абсорбуювальних компонентів фенольної природи, вміст флавоноїдів і спектрів їхнього поглинання та кількість каротиноїдів й антоціанів у пагонах *B. caespiticism*. У рослинах *B. caespiticism* з Антарктики антиоксидантна активність була в 1.5 рази вищою, ніж у львівській популяції, що підтверджує високий рівень захисту від окиснювального пошкодження. Виявлено, що опромінення активує синтез УФ-абсорбуювальних фенольних сполук. У пагонах *B. caespiticism* з Антарктики встановлено більший вміст фенолів, порівняно зі зразками з Львівської області, та суттєве їхнє підвищення під впливом УФ-опромінення. Визначено вищий вміст УФ-абсорбуювальних сполук, зв'язаних з клітинною стінкою, порівня-

Цитування: Кияк Н. Я., Лобачевська О. В., Хоркавців Я. Д. Морфофізіологічні реакції гравічутливості та адаптації до УФ-опромінення моху *Bryum caespiticism* Hedw. з Антарктики. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5 (132). С. 47—59. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.047>

но з концентрацією розчинних (вакуолярних) фенольних сполук, як у рослинах з Антарктики, так і у зразках з Львівської області, що свідчить про їхню участь у механізмах захисту клітин від УФ-опромінення.

Показано, що УФ-опромінення індукувало збільшення вмісту флавоноїдів у пагонах обох зразків *B. caespiticius*, однак для рослин з Антарктики концентрація флавоноїдів після дії стресора була в 1.7 разів вищою, ніж у рослин з Львівської області. За спектрами поглинання флавоноїдів визначено флавоноли рутин і кверцетин та флавоон лютеолін в обидвох зразках *B. caespiticius*, які забезпечують ефективне поглинання УФ-променів. Вищий вміст антоціанів і каротиноїдів у пагонах моху з Антарктики як у контролі, так і після впливу УФ-опромінення сприяє захисту від пошкодження та формуванню адаптивного потенціалу.

Ключові слова: гравітаційні ростові реакції, УФ-опромінення, феноли, флавоноїди, антиоксидантна активність, мохи, Антарктика.

ВСТУП

Мікрогравітація та УФ-опромінення — це найважливіші стресові чинники, які впливають на живі організми в умовах відкритого космосу. Тому дослідження, спрямовані на вивчення природи стійкості рослин до їхнього впливу, необхідні для розуміння процесів пристосування до абіотичних стресів та розроблення стратегії виживання в космосі [14, 20—22, 42]. Рослини з екстремальних кліматичних умов найбільш придатні для таких досліджень [15, 34, 38].

Для вивчення природних механізмів адаптації рослин до УФ-опромінення унікальним середовищем є Антарктика. Стійкість мохоподібних Антарктики до дії абіотичних стресових факторів можна назвати унікальною, оскільки в екстремальних кліматичних умовах Антарктики бріофіти становлять 40 % флори. Морфологічна і функціональна структура мохів є зручним об'єктом для досліджень природи адаптивних захисних реакцій, стійкості до низьких температур, ультрафіолету, короткого вегетаційного періоду й особливостей фотосинтетичної активності [8, 24, 33, 41]. Мохи адаптувалися до широкого діапазону освітлення, ростуть як при високому рівні інсоляції (близько 100 ккал/см² на рік, майже як на екваторі), так і на дні глибоководних антарктичних озер (наприклад, рослини *Plagiothecium orthocarpum* Mitten.) [34, 38].

Одним із основних стресових чинників екосистеми Антарктики є ультрафіолетове опромінення. Підвищений рівень ультрафіолетової радіації як результат виснаження стратосферного озонового прошарку (100...137 Добсонів) спричинює пошкодження рослин, хоча у багатьох антарктичних видів унаслідок тривалої дії фактора еволюційно сформувалися механізми захисту від

впливу ультрафіолету, які пом'якшують або нівелюють його ефект [4].

У здатності мохів пристосовуватися до умов мікросередовища значна роль належить гравітації. Завдячуючи силі тяжіння збільшуються варіації гравіморфогенезу і рівень фенотипної пластичності гаметофіту [19, 26]. Приуроченість мохів до стресових кліматичних умов є результатом розмаху морфологічних властивостей, зокрема щільності дернини, густоти пагонів, облісненості стебел, особливостей вегетативного розмноження.

Ультрафіолетове опромінення індукує у клітинах «окиснювальний стрес», до якого чутливі, зокрема, ліпіди мембранних структур і хлорофіл у тилакоїдах хлоропластів. Запобігають цьому пошкодженню УФ-абсорбуючі сполуки фенольної природи (УФ-АС). Накопичення УФ-АС є найпоширенішою реакцією судинних рослин Антарктики на вплив ультрафіолету [30]. Не завжди є пряма залежність між накопиченням УФ-АС та толерантністю до УФ-опромінення, але доведеним є той факт, що вони можуть суттєво зменшити проникнення ультрафіолету у клітину, екрануючи його промені, а також забезпечити захист від вільнорадикальних реакцій, індукованих УФ-опроміненням. Цю роль виконують флавоноїди, що функціонують як УФ-поглинальні молекули і антиоксиданти [40]. Основний механізм фотопротекторної функції флавоноїдів забезпечується високою поглинальною здатністю в УФ-спектрі та легкою електронною й енергетичною передачею [12]. Вміст та локалізація УФ-абсорбуючих сполук фенольної природи значно менше вивчені у бріофітів, порівняно з судинними рослинами. Відомо, що УФ-АС судинних рослин локалізовані у трихо-

мах й епікутикулярному воску листкових пластинок, у цитозолі, хлоропластах, ядрі, вакуолях, клітинній стінці, ендоплазматичному ретикулімі [43]. У клітинах мохів ці сполуки виявлені у клітинній стінці та вакуолях [13, 31].

Одним із завдань дослідження було визначити гравіморфози антарктичного моху *Bryum caespitium* Hedw. як результат ініціації процесів галуження клітин протонеми й закладання бруньок гаметофорів під впливом світла і гравітації та з'ясувати їхнє адаптивне значення у життєвому циклі *B. caespitium* в екстремальних умовах Антарктики. Важливою частиною роботи було дослідження впливу УФ-опромінення на вміст розчинної (вакуолярної) та зв'язаної у клітинній стінці фракцій УФ-абсорбуючих компонентів фенольної природи, кількість флавоноїдів і спектри їхнього поглинання та концентрації світлозахисних пігментів (антоціанів і каротиноїдів) у пагонах моху *B. caespitium* з Антарктики.

ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом досліджень був мох *Bryum caespitium*, зразки якого відбирали у прибережній Антарктиці (24-та Українська антарктична експедиція 2019 р.). Для порівняльних досліджень рослини *B. caespitium* збирали в Природному заповіднику «Розточчя» (Львівська обл.).

Протонему антарктичного виду *Bryum caespitium* отримували регенерацією пагонів на 0.75 % агаризованому середовищі Кнопа II та вирощували протягом двох-трьох тижнів у фітотроні в контрольованих умовах освітлення $70 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, при температурі $20 \dots 22^\circ \text{C}$ і відносній вологості $85 \dots 90 \%$. Препарувальною голкою знімали клубки протонеми, а також окремі пагони і переносили їх у чашки Петрі на агаризоване середовище Кнопа з 0.2 %-ю глюкозою. Для гравістимуляції чашки ставили вертикально у темряву і через 7...10 днів отримували гравітропну вторинну протонему, яка була об'єктом досліджень. Порівнювали гравічутливість листостеблових пагонів *B. caespitium* обох зразків до УФ-випромінювання. Пагони опромінювали УФ-променями, генерованими ультрафіолетовою лампою OSRAM з інтенсивністю 4 кВт/м^2 , що спричиняла 50 % пригнічення реге-

нерації рослин (ЕД_{50}). Для визначення кутів гравітропного згину чашки повертали під кутом 90° до площини поверхні і через 18 год вимірювали кут нахилу латеральних гілук щодо головного столона.

Монохроматичне світло отримували від двох джерел світла: ртутної лампи СВД-120А і 100 Вт лампи розжарення. Зі світлового потоку ртутної лампи за допомогою світлофільтра СС-5 отримали освітлення $\lambda = 450 \text{ нм}$. Світло $\lambda = 660 \text{ нм}$ виділяли із світлового потоку лампи розжарення за допомогою інтерференційного світлофільтра КС-10. Інтенсивність червоного і синього світла вирівнювали до $5.0 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, нейтрального до $15.0 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ за допомогою спектрорадіометра Li-Cor Li-1800 (USA). Гравітропну протонему *B. caespitium* насвітлювали 4 год світлом, переносили чашки у темряву, а через 24 год визначали коефіцієнт галуження і кут нахилу гілук та сліdkували за процесом формування бруньок. Контролем була негравістимульована протонема, яку аналізували аналогічно.

Вміст фізіолого-біохімічних показників у пагонах *B. caespitium* визначали через 24 год після впливу УФ-опромінення. Антиоксидантну активність оцінювали у реакції рослинного екстракту з розчином радикалу — 1.1-дифеніл-2-пікридигідразилом (DPPH) за методом В. Бранд-Вільямса [6]. Оптичну густину суміші визначали на спектрофотометрі «Specord 210 Plus» ($\lambda = 517 \text{ нм}$). Антиоксидантну активність виражали як відсоток інгібування DPPH і на основі розрахованих відсотків інгібування будували графік залежності величин інгібування забарвлення DPPH від концентрації екстракту. За графіком визначали концентрацію екстракту, котра спричиняла 50 % інгібування забарвлення вільного радикалу (ЕК_{50}). Як позитивний контроль використовували водний розчин аскорбінової кислоти у діапазоні концентрацій $0.025 \dots 1.000 \text{ мг/мл}$.

Для отримання фракції розчинних фенолів $50 \dots 100 \text{ мг}$ рослинного матеріалу екстрагували у метанолі протягом 1 год при кімнатній температурі у темряві, потім центрифугували (12000 об/хв , 15 хв) [36]. Супернатант використовували для спектрофотометричного аналізу вмісту розчинних фенолів, а осад — для отри-

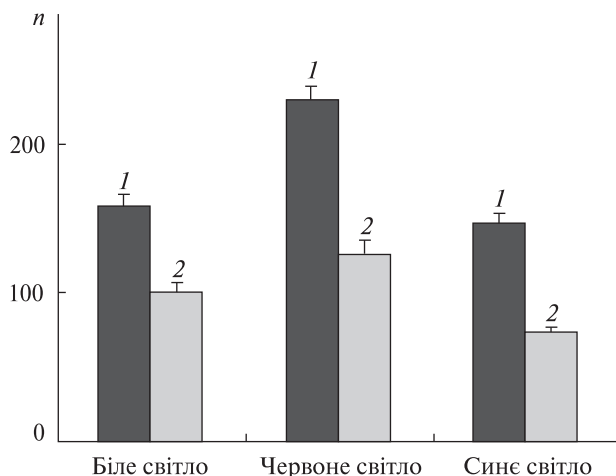


Рис. 1. Галуження клітин протонеми *Bryum caespitium* після гравістимуляції і освітлення: 1 — гравітропна протонема, 2 — контроль

Таблиця 1. Кількість n гілук гравітропної протонеми *Bryum caespitium*, що утворилися на 10 гравітропних столонах і продовжували рости під кутами $\theta = 90^\circ$ та $40...50^\circ$ після 4-год освітлення різним світлом

Варіанти освітлення	Кількість гілук n		
	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 40...50^\circ$	
Біле світло	105.0 ± 0.8	52.0 ± 1.8	
Червоне світло	151.0 ± 2.8	75.0 ± 2.1	
Синє світло	94.0 ± 2.3	57.0 ± 1.9	

мання фракції фенолів, зв'язаних з клітинною стінкою [37].

Вміст фенолів визначали на спектрофотометрі «Specord 210 Plus» при довжині хвилі $\lambda = 765$ нм із використанням реактиву Фоліна — Деніса та калібрувальної залежності за хлорогеновою кислотою [2].

Вміст флавоноїдів визначали спектрофотометрично за реакцією з хлоридом алюмінію при $\lambda = 420$ нм і калібрувальною залежністю за рутином [32]. Спектри поглинання комплексів флавоноїдів з хлоридом алюмінію із екстрактів рослин *B. caespitium* оцінювали на спектрофо-

тометрі «Specord 210 Plus» в діапазоні $\lambda = 400...700$ нм [32].

Визначення вмісту антоціанів здійснювали спектрофотометрично за модифікованим методом А. Бегса і С. Велмана [31]. Наважку рослинного матеріалу гомогенізували в 1 %-му спиртовому розчині соляної кислоти та витримували на водяній бані при $40...45^\circ\text{C}$ протягом 20 хв. Отриманий гомогенат центрифугували, вимірювали оптичну густину фільтрату на довжині хвилі $\lambda = 530$ нм. Вміст каротиноїдів визначали у 80 %-му ацетоні за методом Д. Арнона [3]. Оптичну густину екстракту вимірювали на спектрофотометрі «Specord 210 Plus» за довжини хвилі 470 нм. Вміст пігментів виражали в мг/г сухої маси.

Отримані дані опрацьовували методами статистичного аналізу з використанням пакету програмного забезпечення Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

1. Гравічутливість і гравіморфози антарктичного зразка моху *Bryum caespitium*. У кліматичних умовах Антарктики для мохів адаптивним резервом є гравітропні реакції, оскільки завдяки силі тяжіння збільшуються варіації гравіморфогенезу і рівень фенотипної пластичності гаметофіту [25]. Морфологічна форма мохів визначається передусім способом галуження та кутом нахилу латеральних гілок і гілок з бруньками відносно вектора гравітаційної сили. Одним із енергетичних джерел для ініціації гравіморфогенезу є світло.

Проаналізовано вплив фізіологічно активного червоного і синього світла на активність галуження та закладання бруньок на гравітропній протонемі антарктичного зразка моху *B. caespitium*. Слід звернути увагу на характер галуження клітин гравітропної протонеми, зокрема кут, під яким гілочки закладалися на головному столоні (табл. 1). Після освітлення червоним світлом протонеми *B. caespitium* більшість гілук закладалися і продовжували тривалий час рости під кутом 90° , інші (їх було менше) росли гравітропно. Таким чином, червоне світло переважно блокувало гравіперцепцію і гравітропний ріст клітин протонеми, унаслідок чого змінилися морфологічна реакція на дію гравітації і форма галуження дернини.

Відомо, що низькі інтенсивності синього і червоного освітлення модулювали гравітропний кут, величина якого є результатом взаємодії між граві- і фототропізмом [19]. Для *B. caespitium* встановлено, що червоне світло ініціювало закладання галузок та високу активність галушення клітин гравітропної протонеми, порівняно із синім і білим освітленням та негравістимульованою протонемою контролю (рис. 1).

Це підтверджує взаємодію світла і гравітації та її значення для морфологічної диференціації фенотипу гаметофіту. Відновлення гравітропного росту відбувалося повільно, і тривалішу гальмівну дію на гравітропізм мало синє світло. Однак синє світло було стимулятором закладання бруньок на гравітропній протонемі *B. caespitium* (рис. 2, а). Після червоного освітлення клітини інтенсивніше галузилися, а бруньок було небагато (рис. 2, б).

Відомо, що послідовність чергування червоного та синього освітлення активує закладання бруньок, хоча чіткого роз'яснення, як гравітація впливає на такий процес, немає [9]. Слід вважати, що тригером галушення гравітропної протонеми і утворення на ній бруньок було світло, а гравітація діяла як синергічний фактор завдяки поляризаційному ефекту. Відзначимо, що синє світло індукувало утворення на стеблі і в основі молодих бруньок ризоїдних стонів, що росли позитивно гравітропно, тобто освітлення синім світлом ініціювало просторову переорієнтацію гравітропізму (рис. 3, а, б).

Отже, гравітаційна сила сприяла морфологічній мінливості та зміні функціональної активності клітин протонеми, що виконує винятково важливу роль у життєвому циклі моху. Фенотип галушення гравітропних стонів, просторова орієнтація підземної протонеми у природних екстремальних умовах Антарктики — це засіб доступу до світла, джерел живлення і води та взаємодії з ґрунтовою біотою.

Прийомуванням до короткого вегетаційного періоду Антарктики є формування на верхівці гравітропних стонів *B. caespitium* пучка коротких стонів, які розпадалися на окремі 2-3-клітинні фрагменти і проростали (рис. 3, б). Фрагментація як одна з форм асексуально-

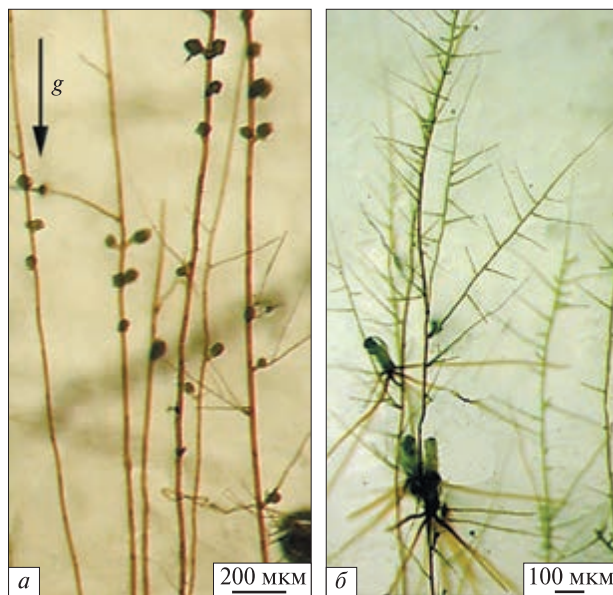


Рис. 2. Утворення бруньок та галушення клітин протонеми *Bryum caespitium* під впливом синього (а) та червоного (б) світла

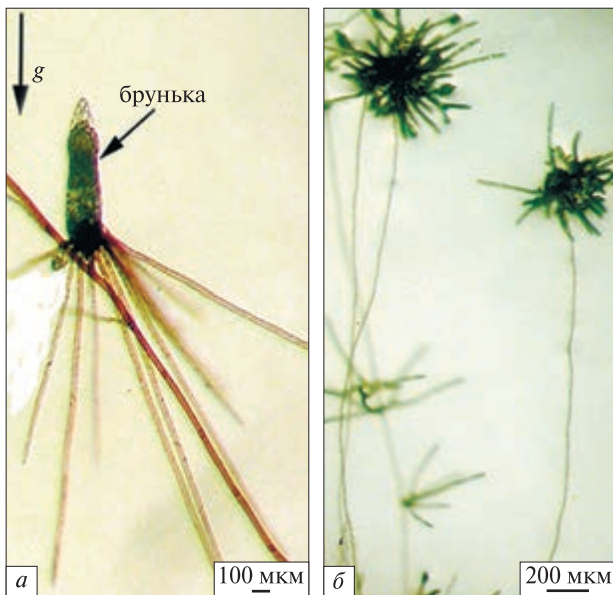


Рис. 3. Гравітропна протонема *B. caespitium*: а — після освітлення синім світлом в основі бруньки ризоїди росли позитивно гравітропно, б — на верхівці стону утворилися пучки розгалуженої протонеми

го розмноження дає можливість одній рослині моху утворити генетично ідентичне потомство і швидко колонізувати значну територію. Надалі на латеральних галузках *B. caespiticism* закладалися бруньки, з яких розвивалися гравічутливі гаметофори, що теж сприяло пластичності виду і швидшому розростанню мохової дернини. Лише гравітропні столони і гаметофори, що росли над субстратом, могли енергетично забезпечити швидке вегетативне поновлення під час короткого весняного періоду. Так, у пазухах листків на гаметофорах антарктичного зразка *Bryum pseudotriquetrum*, а не на протонемі, як у екоморфи зі Львова, закладалися виводкові бульбочки [25]. Набуття компетенції до брунькотворення на верхівці гравітропного столону [9], а також чітко виражена гравічутливість гаметофорів мохів з Антарктики є морфогенетичним проявом гравіморфозів залежно від умов середовища. Такі гравізалежні процеси як активація галузження та кути, під якими закладалися бокові галузки на протонемі, ініціювали зміну морфологічної структури мохової дернини *B. caespiticism*. Мінливість орієнтації росту столонів і гравічутливість гаметофорів сприяли формуванню потужнішої дернини з підвищеною здатністю до тривалого утримання вологи та високою фотосинтетичною продуктивністю.

Ефект УФ-опромінення з інтенсивністю 4 кВт/м² на гравічутливість столонів був неоднаковий: в апікальних клітинах протонемі львівського зразка *B. caespiticism* відзначено втрату гравічутливості, очевидно, внаслідок незворотних деструктивних змін, а для столонів

антарктичного зразка зафіксовано зменшення кута гравітропного згину щонайменше удвічі — до 10.3° (табл. 2). Тобто, рослини з Антарктики толерантніші до ультрафіолетового опромінення і завдяки цьому зберегли чутливість до гравітаційної сили.

2. Адаптивні фізіологічні реакції моху *Bryum caespiticism* на дію УФ-опромінення. Проаналізовано фізіологічні показники захисту від УФ-опромінення. Відомо, що для бріофітів властивий високий антиоксидантний потенціал завдяки низькомолекулярним антиоксидантам (флавоноїдам, фенольним сполукам, аскорбату, глутатіону), які у значних концентраціях містяться в їхніх клітинах [11]. Це є важливою фізіологічною адаптивною реакцією мохів у несприятливих умовах середовища. Такі антиоксиданти мають особливе значення в умовах температурного та осмотичного стресів, після впливу важких металів та УФ-опромінення [10]. У зв'язку з цим доцільно було проаналізувати антиоксидантну активність (АА) рослинних екстрактів зразків моху з екстремальних умов Антарктики та порівняти з реакцією рослин з помірних широт, наприклад з Львівської області. Порівнювали ефективні концентрації екстрактів (ЕК₅₀), котрі спричиняли 50 % інгібування радикалу. Що нижчим є показник ЕК₅₀, то вищою є антиоксидантна активність рослин. Як позитивний контроль використовували аскорбінову кислоту (ЕК₅₀ аскорбінової кислоти 0.06 мг/мл). У рослинах *B. caespiticism* з Антарктики визначено майже у 1.5 раза вищу АА (ЕК₅₀ = 3.65 мг/мл) порівняно з рослинами з львівської популяції (ЕК₅₀ = 5.04 мг/мл) (рис. 4). УФ-опромінення індукувало збільшення антиоксидантної активності у рослинах з Антарктики до 2.86 мг/мл, що свідчило про їхній вищий антиоксидантний статус, порівняно з рослинами із Львівської обл.

Для обґрунтування відмінностей АА між досліджуваними зразками *B. caespiticism* було проаналізовано вміст фенольних сполук (ФС), завдяки яким формується стійкість рослин до впливу ультрафіолету. Відомо, що ФС протидіють окиснювальному стресу, оскільки здатні функціонувати як скавенджери вільних радикалів і активних форм кисню, підтримують

Таблиця 2. Вплив УФ-опромінення на кут гравітропного згину вторинної протонемі моху *Bryum caespiticism* із Антарктики та Львівської області

Варіанти досліджу	Кут гравітропного згину
<i>Рослини з Львівської області</i>	
Контроль (без опромінення)	22.5±2.8°
УФ-опромінення	—
<i>Рослини з Антарктики</i>	
Контроль (без опромінення)	24.6±2.2°
УФ-опромінення	10.3±0.8°

внутрішнє середовище клітин у відновленому стані та позитивно впливають на активність антиоксидантних ферментів [28]. Індукція синтезу ФС відбувається у відповідь на вплив УФ-випромінювання та високої інтенсивності освітлення [16].

У пагонах обидвох зразків *B. caespitium* зафіксовано неоднакові показники вмісту ФС: у зразках з Антарктики в умовах контролю встановлено суттєво більший вміст фенолів, а після УФ-опромінення їхня кількість підвищувалася ще на 35 %, забезпечуючи поглинання шкідливого для рослин ультрафіолетового опромінення (табл. 3). Рослини львівського зразка мали в 1.6 раза менший вміст фенольних сполук у контролі і незначне їхнє підвищення в умовах стресу. Тобто, для рослин *B. caespitium* з Антарктики властивий більший конститутивний пул фенольних сполук, порівняно з рослинами середніх широт.

За вмістом розчинної (вакуолярної) та нерозчинної (зв'язаної у клітинній стінці) фракцій фенольних сполук в обох зразках моху *B. caespitium* визначено в 1.5...1.8 разів вищу концентрацію УФ-абсорбувальних фенольних сполук, локалізованих у клітинній стінці. Після УФ-опромінення їхній вміст також підвищувався більшою мірою, ніж розчинних УФ-АС (табл. 3).

Подібні результати були отримані у дослідях з іншими видами мохів. Наприклад, у мохів з Антарктики *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. та *Grimmia antarctici* var. *percompacta* E.B. Bartram вміст УФ-АС, зв'язаних з клітинною стінкою,

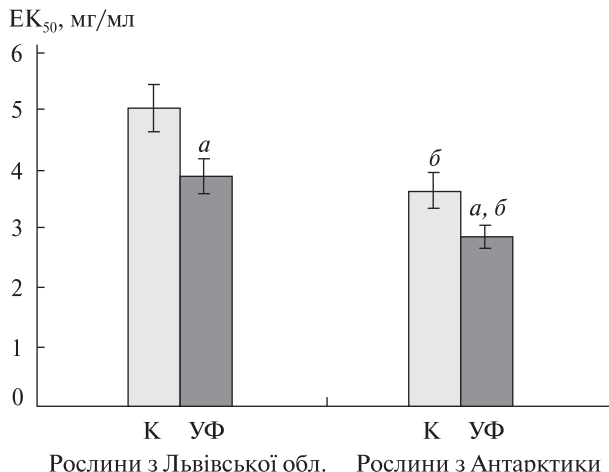


Рис. 4. Антиоксидантна активність рослин *Bryum caespitium* з Антарктики та Львівської області під впливом УФ-опромінення (*a* — різниця статистично достовірна (рівень значущості $P < 0.05$) опромінених рослин (УФ) порівняно з контрольними (К); *б* — різниця статистично достовірна ($P < 0.05$) порівняно з рослинами з Львівської обл.)

був майже у дев'ять разів більший, ніж вміст розчинних (вакуолярних) УФ-АС [7]. У печіночника *Jungermannia exsertifolia* Stephani вміст нерозчинних УФ-АС майже у 2.5 раза перевищував вміст розчинних фенольних сполук [13]. Суттєве переважання вмісту зв'язаних з клітинною стінкою УФ-абсорбувальних сполук було виявлено у субарктичних видів *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. та *Polytrichum juniperinum* Hedw., у *Bryum pseudotriquetrum* (Hedw.) P. Gaertn., B. Mey.

Таблиця 3. Вміст УФ-абсорбувальних фенольних сполук у пагонах моху *Bryum caespitium* з Антарктики та Львівської області (мг/г сухої маси)

Варіанти досліджу	Вміст розчинних УФ-АС, мг/г	Вміст зв'язаних УФ-АС, мг/г	Сумарний вміст УФ-АС
<i>Рослини з Львівської області</i>			
Контроль (без опромінення)	1.06±0.18	1.48±0.22	2.54±0.35
УФ-опромінення	1.25±0.22	2.11±0.33 ^a	3.36±0.42 ^a
<i>Рослини з Антарктики</i>			
Контроль (без опромінення)	1.52±0.16	2.56±0.31	4.08±0.52 ^{a, б}
УФ-опромінення	1.81±0.25	4.05±0.43 ^{a, б}	5.86±0.61 ^{a, б}

Примітка: ^a — різниця статистично достовірна порівняно з контролем (рівень значущості $P < 0.05$); ^б — різниця статистично достовірна порівняно з рослинами з Львівської області ($P < 0.05$)

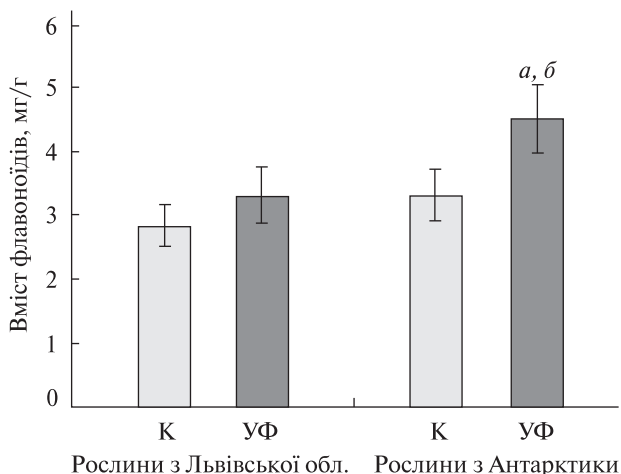


Рис. 5. Вплив УФ-опромінення на вміст флавоноїдів у пагонах моху *Bryum caespitium* з Антарктики та Львівської обл. (a, б – різниця статистично достовірна (рівень значущості $P < 0.05$) порівняно із контролем та зразками з Львівської обл.)

& Scherb. і *Fontinalis antipyretica* Hedw., у восьми видів сфагнових мохів з Норвегії [39]. Тому можна вважати, що УФ-абсорбуючі фенольні сполуки клітинної стінки відіграють ключову роль у захисті клітин від УФ-опромінення.

Після УФ-опромінення в обох зразках моху підвищувався вміст УФ-АС, що свідчило про індукований характер адаптивної відповіді. Це можна пояснити особливостями метаболізму фенольних сполук. Серед фенольних сполук основну роль у поглинанні УФ-променів виконують флавоноїди. Саме вони функціонують у рослинних клітинах як індукібельні протектори [10]. Про це свідчать значні зміни вмісту флавоноїдів у рослинах в умовах підвищених рівнів озону або ультрафіолету. Відомо, що УФ-опромінення активує синтез фенілаланіну та індукує швидке і скоординоване підвищення активності ферментів фенілпропанового шляху біосинтезу, що сприяє утворенню «сонцезахисного щита» з флавоноїдів [16]. Аналізуючи вміст флавоноїдів, виявлено в 1.2 раза більший їхній вміст у рослинах з Антарктики, а УФ-опромінення індукувало їхній синтез як у пагонах *B. caespitium* з Антарктики, так і у пагонах моху львівської популяції. Однак для рослин антарктичного зраз-

ка визначено в 1.7 раза вищі концентрації флавоноїдів після УФ-опромінення, ніж у рослин *B. caespitium* з Львівської області (рис. 5).

Флавоноїди представляють велику групу поліфенольних сполук, до яких належать флавоноли (кверцетин, рутин, морін, кемпферол), флаволи (лютеолін, апігенін), флаванони (гесперетин), флаваноли (катехін, епікатехін) та антоціани. Щоби встановити, які флавоноїди відіграють основну роль у захисті від УФ-опромінення, було проаналізовано спектри поглинання екстрактів флавоноїдів у розчині хлориду алюмінію. Як видно на рис. 6, спектри поглинання обидвох зразків *B. caespitium* подібні. Виявлено максимуми поглинання в ділянці $\lambda = 420\ldots440$ нм, 470 нм та 670 нм.

Варто відзначити, що взаємодія екстракту флавоноїдів з хлоридом алюмінію призводить до батохромного зміщення максимумів поглинання вихідних реагентів на 66...67 нм [32]. Враховуючи це, перший максимум спектру поглинання, очевидно, відповідає флавонолам рутину та кверцетину, оскільки їхні піки поглинання лежать в ділянці спектру 356 нм та 370 нм відповідно, а їхніх комплексів з AlCl_3 — 422 нм та 437 нм. Вважають, що ці флавоноли є найбільш ефективними відновниками супероксидного радикала серед флавоноїдів [17].

Другий максимум поглинання може відповідати флавону лютеоліну, для якого характерні піки на $\lambda = 405\ldots420$ нм, а з урахуванням зміщення комплексу з хлоридом алюмінію на $\lambda = 470$ нм. Пік у довгохвильовій області спектру може відповідати антоціанам. Антоціани, які нагромаджуються у багатьох рослинах після УФ-опромінення, слабше поглинають в УФ-ділянці спектру, порівняно з флавонолами чи флавонами, хоча позитивну кореляцію між їхнім загальним вмістом і зниженням чутливості до УФ-опромінення встановлено у різних дослідженнях [5].

Вважають, що антоціани беруть участь у захисті мембран тилакоїдів в умовах УФ-опромінення, виконуючи функцію оптичного фільтру, який захищає електрон-транспортний ланцюг від високоенергетичних квантів [15]. Їхні антиоксидантні властивості зумовлені високою до-

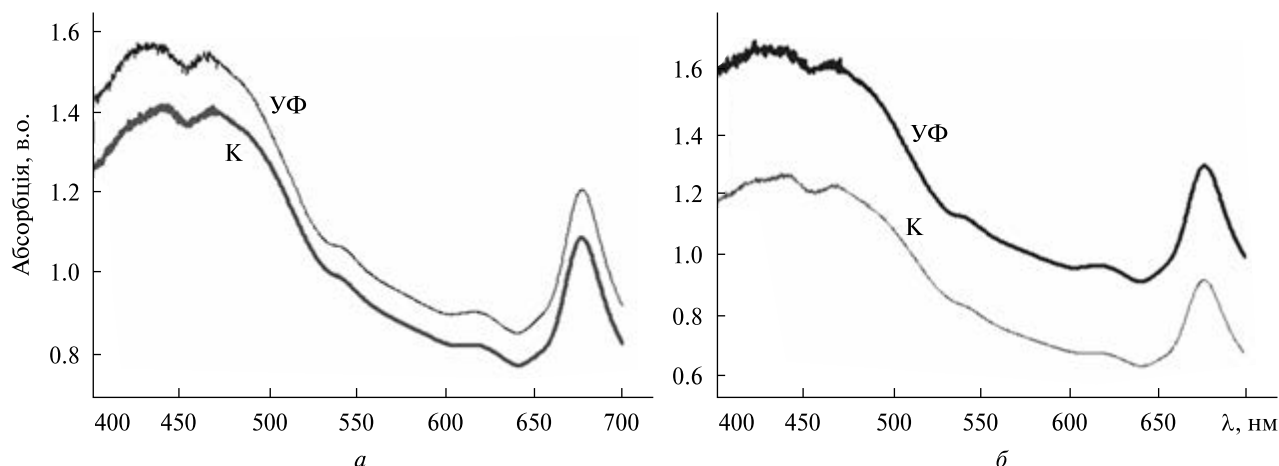


Рис. 6. Спектри поглинання комплексів флавоноїдів з хлоридом алюмінію із екстрактів рослин *Bryum caespitium*: а — зразок з Львівської обл., б — зразок з Антарктики (К — контроль, УФ — після УФ-опромінення)

норною активністю і здатністю стабілізувати та делокалізувати неспарений електрон, що припиняє ланцюгові вільнорадикальні реакції [1]. Показано, що концентрації антоціанів під впливом ультрафіолету збільшувалися у пагонах обох зразків моху, однак показники у *B. caespitium* з Антарктики були вищими як у контролі, так і після УФ-опромінення, що є свідченням їхнього вищого адаптивного потенціалу (табл. 4).

Слід звернути увагу на мінливість вмісту каротиноїдів у пагонах *B. caespitium*, оскільки у складі фотосистем ці пігменти не лише виконують роль додаткових світлозбиральних пігментів, а й захищають молекули хлорофілу від фотоокиснення в умовах високої інсоляції та УФ-опромінення [15].

Для рослин *B. caespitium* з Антарктики визначено вищі показники вмісту каротиноїдів, а після УФ-опромінення у пагонах рослин з Антарктики вміст пігментів істотно збільшувався, порівняно з рослинами львівського зразка, що також є показником нижчої чутливості антарктичного зразка моху до ультрафіолету.

На підставі результатів проведених досліджень можна стверджувати, що підвищені захисні функції гаметофіту моху з різних локалітетів зумовлені конститутивними механізмами стійкості, однак фактори середовища, зокрема Антарктики, сприяли більшій фізіологічній

пластичності та резистентності *B. caespitium*. У локалітетах Антарктики з високим рівнем УФ-опромінення бріофіти є домінантами серед вищих рослин завдяки адаптивним морфологічним процесам [14]. Показано, що в умовах високої інсоляції (альпійські і субальпійські пояси, полярні регіони) мохи мають вищі пороги чутливості до надлишку освітлення, ніж ті, що ростуть при низьких інтенсивностях світла [30, 35]. Стійкість до сонячного опромінення зумов-

Таблиця 4. Вміст антоціанів та каротиноїдів у пагонах *Bryum caespitium* з Антарктики та Львівської області (мг/г сухої маси)

Варіанти дослідів	Вміст антоціанів, мг/г	Вміст каротиноїдів, мг/г
<i>Рослини з Львівської області</i>		
Контроль (без опромінення)	2.23±0.19	0.21±0.02
УФ-опромінення	2.91±0.22 ^а	0.27±0.03
<i>Рослини з Антарктики</i>		
Контроль (без опромінення)	3.87±0.42	0.28±0.01
УФ-опромінення	4.56±0.26 ^{а, б}	0.36±0.02 ^{а, б}

Примітка: ^а — різниця статистично достовірна порівняно з контролем (рівень значущості $P < 0.05$); ^б — різниця статистично достовірна порівняно із рослинами з Львівської області ($P < 0.05$)

лена як морфологічною пластичністю гаметофіту мохів, так і ефективністю функціонування репараційних систем, зокрема систем захисту від окиснювальної деструкції [27].

Визначено, що антиоксидантна активність гаметофіту *B. caespiticism* з Антарктики вища, ніж для львівської популяції моху. Під впливом УФ-опромінення рівень антиоксидантної активності популяції моху з Антарктики підвищувався істотніше, що свідчить про ефективніші захисні механізми, пов'язані з вищим пулом антиоксидантів. Однак і для рослин *B. caespiticism* із Львівської області властиве збільшення антиоксидантної активності після УФ-опромінення, а отже, й стимуляція захисних механізмів.

Характерною особливістю мохів є високий вміст фенольних сполук, які мають визначальне значення для формування стресостійкості рослин [18]. Забарвлення клітинних стінок каулономних столонів та пагонів досліджуваних видів мохів у червоно-коричневий колір здебільшого зумовлене фенольними сполуками, які екранують життєво важливі клітинні структури від пошкоджень, мають фотозахисну дію, підвищуючи у такий спосіб стійкість рослин до ультрафіолету. Важливими компонентами антиоксидантної системи захисту мохів є флавоноїди. Більший вміст флавоноїдів у зразках моху *B. caespiticism* з Антарктики, порівняно з рослинами середніх широт, свідчить про їхню важливу участь у системах захисту та життєдіяльності рослин у стресових умовах УФ-опромінення.

Результати досліджень свідчать про підвищену стійкість мохів з Антарктики до УФ-опромінення, яка формувалася у процесі тривалої адаптації рослин до екстремальних умов і забезпечується високим рівнем антиоксидантної активності та нагромадженням УФ-абсорбуючих фенольних сполук.

ВИСНОВКИ

Здатність мохів до прояву гравіморфозів розвинулася під впливом критичних умов природного середовища Антарктики унаслідок змін морфологічних процесів і стала передумовою їхньої життєздатності, поширення та домінування у регіоні.

Короткотривале освітлення червоним і синім світлом гравістимульованої у темряві протонеми *Bryum caespiticism* ініціювало утворення граві/фотоморфозів унаслідок активації галуження клітин протонеми та поляризаційної дії гравітації у процесах формування кута гравітропного згину та розвитку бруньок гаметофітів.

Ультрафіолетове опромінення активувало синтез УФ-абсорбуючих фенольних сполук у гаметофітній дернині моху *Bryum caespiticism*. Вміст УФ-абсорбуючих сполук, зв'язаних з клітинною стінкою, був істотно більшим, ніж розчинних (вакуолярних) фенольних сполук у зразках моху з Антарктики і Львівської області, що вказує на їхню специфічну роль у захисті клітин від УФ-опромінення.

На підставі аналізу спектрів поглинання флавоноїдів рослин *Bryum caespiticism* з Антарктики та Львівської області визначені флавоноли рутин та кварцетин і флавонол лютеолін, які забезпечують ефективний захист клітин від УФ-опромінення.

Підвищення концентрації антоціанів і каротиноїдів після УФ-опромінення пагонів *B. caespiticism* з Антарктики свідчить про захисну функцію пігментів від ультрафіолетового пошкодження.

Роботу виконано у рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

Автори висловлюють подяку учасникам 24-ї Української антарктичної експедиції 2019 р. за збір біологічного матеріалу.

REFERENCES

1. Ahmad P., Jaleel C. A., Salem M. A., Nabi G., Sharma S. (2010). Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Crit. Revs Biotechnology*, **30**, № 3, 161—175. DOI: 10.3109/07388550903524243 [in English].
2. Anahita A., Asmah R., Fauziah O. (2015). Evaluation of total phenolic content, total antioxidant activity, and antioxidant vitamin composition of pomegranate seed and juice. *Int. Food Res. J.*, **22**, 1212—1217. <https://doi.org/10.4172/2327-5146.1000164> [in English].
3. Arnon D. (1949). Copper enzymes isolated chloroplasts, polyphenoloxidase in *Betula vulgaris*. *Plant Physiology*, **194**, № 24, 1—15 [in English].
4. Bjorn L. O., Callaghan T. V., Gehrke C. (1998). The problem of ozone depletion in northern Europe. *Ambio*, **27**, 275—279 [in English].
5. Bobo-Garcha G., Davidov-Pardo G., Arroqui, C. (2015). Intra-laboratory validation of microplate methods for total phenolic content and antioxidant activity on polyphenolic extracts, and comparison with conventional spectrophotometric methods. *J. Sci. Food Agric.*, **95**, № 1, 204—209. DOI: 10.1002/jsfa.6706 [in English].
6. Brand-Williams W., Cuvelier M. E., Berset C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology*, **28**, № 1, 25—30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5) [in English].
7. Clarke L. J., Robinson S. A. (2008). Cell wall-bound ultraviolet-screening compounds explain the high ultraviolet tolerance of the Antarctic moss, *Ceratodon purpureus*. *New Phytologist*, **179**, 776—783. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02499.x> [in English].
8. Cruz de Carvalho R., Catalá M., Branquinho C., Marques da Silva J., Barreno E. (2017). Dehydration rate determines the degree of membrane damage and desiccation tolerance in bryophytes. *Physiol. plant.*, **159**, № 3. 277—289. <https://doi.org/10.1111/ppl.12511> [in English].
9. Demkiv O. T., Khorkavtsiv Y. D., Kyryak N. Y., Kit N. A. (2005). Influence of gravity on photomorphogenesis of protonema *Pottia intermedia* (Turn.) Furnr., Pottiales. *Ukr. bot. J.*, **62**, № 3, 329—337 [in Ukrainian].
10. Dmytriiev O. P., Poliakovskiy S. O. (2007). UV-B radiation and plants. *Bull. Kharkiv Nat. Agrarian Univ. Biology ser.*, **1**, № 10, 7—23. [in Ukrainian].
11. Dey A., De J. N. (2012). Antioxidative potential of bryophytes: Stress tolerance and commercial perspectives: A Review. *Pharmacologia*, **3**, 151—159. DOI: 10.5567/pharmacologia.2012.151.159 [in English].
12. Dixon R. A., Paiva N. L. (1995). Stress-Induced Phenylpropanoid Metabolism. *Plant Cell.*, **7**, 1085—1097 [in English].
13. Fabon G., Monforte L., Tomas-Las-Heras R., Nicez-Olivera E., Martinez-Abaigar J. (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 Physiology*, **169**, 20—26. DOI: 10.1016/j.jplph.2011.08.010 [in English].
14. Glime J. M. (2006). Bryophyte ecology. Vol. 1. Physiological ecology. URL: <https://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology/> (Last accessed 15.06.2021) [in English].
15. Hollozy F. (2002). Effects of ultraviolet radiation on plant cells. *Micron.*, **33**, 179—197. DOI: 10.1016/S0968-4328(01)00011-7 [in English].
16. Iqbal Z., Javed M., Gull S., Mahmood M. H.-R., Hai Z. (2019). Total phenolic contents of two varieties of *Crocus sativus* and their antioxidant activity. *Int. J. Biosciences*, **14**, № 3, 128—132. <http://dx.doi.org/10.12692/ijb/14.3.128-132> [in English].
17. Jansen M. A. K., Urban O. (2019). *Plant Responses to UV-B Radiation*. New York: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0027966> [in English].
18. Jovanovic S. V. (1994). Flavonoids as antioxidants. *J. Amer. Chem. Soc.*, **116**, № 11, 4846—4851. <https://doi.org/10.1021/ja00090a032> [in English].
19. Khorkavtsiv Y. D., Kordyum E. L., Lobachevska O. V., Kyryak N. Y., Kit N. A. (2015). Branching of *Ceratodon purpureus* protonemata effected under altered gravity conditions. *Ukr. bot. J.*, **72**, № 6, 588—595. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/ukrbotj72.06.588> [in Ukrainian].
20. Kordyum E., Borisova T., Krisanova N., Pozdnyakova N., Shevchenko G., Kozeko L., Romanchuk S., Lobachevska O., Charkavtsiv Ya., Kyryak N., Zaimenko N., Ivanytska B., Brykov V., Mischenko L. (2021). Space biology: results and prospects. *Space Res. in Ukraine. 2018–2020*. Kyiv: Akademperiodyka [in English].
21. 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].
22. Kyryak N. Y., Khorkavtsiv Y. D. (2016). Estimation of the oxidative stress in moss *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. depending on the influence of gravity. *Space Sci. and Technol.*, **22**, № 4, 58—66. <https://doi.org/10.15407/knit2016.04.058> [in Ukrainian].
23. Kyryak N. Y., Lobachevska O. V., Rabyk I. V., Kyryak V. H. (2020). Role of the bryophytes in substrate revitalization on a post-technogenic salinized territory. *Biosystems Diversity*, **28**, № 4, 419—425. DOI: <https://doi.org/10.15421/012054> [in English].

24. Lobachevska O., Kyjak N., Khorkavtsiv O., Dovgalyuk A., Kit N., Klyuchivska O., Cove D. (2005). Influence of metabolic stress on the inheritance of cell determination in the moss. *Pottia intermedia*. *Cell Biology Int.*, 29, № 3, 181—186. <https://doi.org/10.1016/j.cellbi.2005.02.001> [in English].
25. Lobachevska O. V., Kyjak N. Y., Kordyum E. L., Khorkavtsiv Y. D. (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].
26. Lobachevska O. V., Kyjak N. Y., Rabyk I. V. (2019). Ecological and physiological peculiarities of bryophytes on a post-technogenic salinized territory. *Biosystems Diversity*, 27, № 4, 342—348. <https://doi.org/10.15421/011945> [in English].
27. Medina R., Liu Y., Li-Song W., Shuiliang G., Hylander K., Goffinet B. (2015). DNA based revised geographic circumscription of species of *Physcomitrella* (*Funariaceae*): *P. patens* new to East Asia and *P. magdalenae* new to East Africa. *Bryologist*, 118, № 1, 22—31. <http://dx.doi.org/10.1639/0007-2745-118.1.022> [in English].
28. Michalak A. (2010). Phenolic Compounds and Their Antioxidant Activity in Plants Growing under Heavy Metal Stress. *Polish J. Environmental Studies*, 15, 523—530 [in English].
29. Newsham K. K. (2010). The biology and ecology of the liverwort *Cephaloziella varians* in Antarctica. *Antarct. Sci.*, 22, 131—143. DOI: 10.1017/S0954102009990630 [in English].
30. Newsham K. K., Robinson S. A. (2009). Responses of plants in Polar Regions to UV-B exposure: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 15, № 11, 2574—2589. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01944.x> [in English].
31. Nikolaichuk V. I., Belchhazi V. Y., Bilyk P. P. (2000). Special workshop on plant physiology and biochemistry. Uzhhorod [in Ukrainian].
32. Pękal A., Pyrzynska K. (2014). Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay. *Food Analytical Methods*, 7, 1776—1782. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x> [in English].
33. Pizarro M., Rodrigo A., Contreras H., Köhler G., Zúñiga E. (2019). Desiccation tolerance in the Antarctic moss *Sanionia uncinata*. *Biological Res.*, 52, № 46, 1—11. <https://doi.org/10.1186/s40659-019-0251-6> [in English].
34. Robinson S. A., Wasley J., Tobin A. K. (2003). Living on the edge — plants and global change in continental and maritime Antarctica. *Global Change Biology*, 9, № 12, 1681—1717. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00693.x> [in English].
35. Robinson S. A., Waterman M. J. (2014). Sunsafe bryophytes: Photoprotection from excess and damaging solar radiation. *Photosynthesis in Bryophytes and Early Land Plants. Advances in Photosynthesis and Respiration (Including Bioenergy and Related Processes)*. Eds D. Hanson, S. Rice. Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6988-5_7 [in English].
36. Schnitzler J. P., Jungblut T. P., Heller W., Koerlein M., Hutzler P., Heinzmann U., Schmelzer E., Ernst D., Langebartels C., Sandermann H. (1996). Tissue localization of UV-B-screening pigments and of chalcone synthase mRNA in needles of *Scots pine* seedlings. *New Phytol.*, 132, 247—258. [in English].
37. Semerdjieva S. I., Phoenix G. K., Hares D., Gwynn J. D., Callaghan T. V., Sheeld E. (2003). Surface morphology, leaf and cuticle thickness of four dwarf shrubs from a subArctic heath following long-term exposure to enhanced levels of UV-B. *Physiol. plant.*, 117, 289—294 [in English].
38. Smith R. I. (2005). The bryophyte flora of geothermal habitats on Deception Island, Antarctica. *J. Hattori Botanical Laboratory*, 46, 233—248 [in English].
39. Soriano G., Fabón G., Monforte L., Séneca A., Söderström L., Martinez-Abaigar J., Núñez-Olivera E. (2013). Ultraviolet absorption capacity of sphagnum species from norwegian peatlands. *Boletín de la Sociedad Española de Briología*, 40, 1—10. URL: <https://www.researchgate.net/publication/259460785> [in English].
40. Sroka Z. (2005). Antioxidative and antiradical properties of plant phenolics. *J. Biosciences*, 60, 833—843. DOI: <https://doi.org/10.1515/znc-2005-11-1204> [in English].
41. Stark L. R. (2017). Ecology of desiccation tolerance in bryophytes: A conceptual framework and methodology. *The Bryologist*, 120, № 2, 130—165. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-120.2.130> [in English].
42. Zabel P., Bamsey 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].
43. Zhao J., Dixon, R. A. (2013). MATE 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 [in English].

Стаття надійшла до редакції 15.06.2021
 Після доопрацювання 15.06.2021
 Прийнято до друку 30.08.2021

Received 15.06.2021
 Revised 15.06.2021
 Accepted 30.08.2021

N. Kyyak, Senior Researcher, Cand. Sci. in Biol.

E-mail: kyyak_n@i.ua

O. Lobachevska, Head of Department, Senior Researcher, Cand. Sci. in Biol.

Y. Khorkavtsiv, Senior Researcher, Cand. Sci. in Biol.

Institute of Ecology of the Carpathian of National Academy of Sciences of Ukraine

4, Kozelnyska Str., Lviv, 79026 Ukraine

MORPHO-PHYSIOLOGICAL REACTIONS OF GRAVISENSITIVITY AND ADAPTATION TO UV IRRADIATION OF THE MOSS *BRYUM CAESPITICUM* HEDW. FROM ANTARCTICA

The adaptive physiological reactions of the moss *Bryum caespitium* Hedw. from Antarctica to the influence of UV radiation and gravimorphoses as a factor of adaptive plasticity, associated with environmental conditions, were studied. As a control, *B. caespitium* plants were collected in the Nature Reserve "Roztochchia" (Lviv region). In investigations, we used a sterile laboratory culture of mosses grown under controlled conditions in a phytotron. Moss shoots were irradiated with UV rays generated by an ultraviolet lamp OSRAM with an intensity of 4 kW/m², which caused 50 % inhibition of plant regeneration (ED₅₀). Physiological parameters were determined 24 h after exposure to UV radiation.

The influence of gravity on the morphological form of *B. caespitium* gametophyte turf and the interaction of light and gravity in gravi-/phototropism as a manifestation of gravimorphoses adaptability were analyzed. One of the objectives was to investigate the formation of gravimorphoses as a result of the initiation of cells' branching processes and the formation of gametophore buds and to evaluate their role in the life cycle of *B. caespitium* under extreme conditions. For this, we determined the branching coefficient of the gravitropic protonema, the inclination angle of the branches and the buds' development depending on the interaction of photo- and gravitropism, under the influence of red and blue light, and the effect of UV on gravisensitivity.

The influence of physiologically active red and blue light on the branching activity and bud formation on the gravitropic protonema of the Antarctic moss *B. caespitium* was investigated. It was found that red light mainly inhibited graviperception and gravitropic growth of protonemata cells, resulting in a change of the response to gravity, but initiated high branching activity and, accordingly, another morphological form of turf. After the influence of the blue light, intensive bud formation and gametophore development were observed. Thus, gravitation promoted morphological variability and changes in the functional activity of cells at the juvenile stage of the protonemata development, which is important for the survival of the moss under extreme environmental conditions. After UV irradiation the gravisensitivity of the *B. caespitium* protonemata decreased. However, due to the resistance of the moss sample from Antarctica to the prolonged influence of UV rays, gravitropic growth was not completely blocked, as in plants from the Lviv region.

The effect of the ultraviolet irradiation on the antioxidant activity, the content of soluble (vacuolar) and cell wall-bound fractions of UV-absorbing phenolic components, flavonoids content and their absorption spectra, as well as the amount of carotenoids and anthocyanins in *B. caespitium* shoots, were determined. It was established that *B. caespitium* plants from Antarctica have 1.5 times higher antioxidant activity compared to plants from the Lviv region, which confirms the high level of protection against oxidative damage. UV irradiation activates the synthesis of UV-absorbing phenolic compounds in mosses. The shoots of *B. caespitium* from Antarctica defined a higher content of phenols compared to samples from the Lviv region and their significant increase under the influence of UV radiation. The content of UV-absorbing compounds bound with the cell wall was higher than the concentration of soluble phenolic compounds, both in plants from Antarctica and in samples from the Lviv region, which indicates their participation in the mechanisms of cells protection from UV radiation. It was shown that the influence of UV irradiation induced an increase of flavonoids' content in the shoots of both samples of *B. caespitium*, but for plants from Antarctica, the concentration of flavonoids after stress was 1.7 times higher than in plants from the Lviv region. The absorption spectra of flavonoids revealed flavonolsrutin and quercetin and flavonoluteolin in both samples of *B. caespitium*, which provide effective cells absorption of UV rays. The higher content of anthocyanins and carotenoids in moss shoots from Antarctica both in the control sample and after the exposure to UV radiation promote the protection against damage and formation of the adaptive potential.

Keywords: gravi-dependent growth reactions, UV irradiation, phenols, flavonoids, antioxidant activity, mosses, Antarctica.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.060>

УДК 539.3+624.074

Н. Г. САХНО, пров. інженер відділу, аспірант Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

ORCID: 0000-0003-4179-5316

К. В. АВРАМОВ, зав. відділу, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-8740-693X

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

ORCID: 0000-0001-6360-7430

E-mail: Uspensky.kubes@gmail.com

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України

Харків, вул. Пожарського 2/10, Україна, 61064

ДИНАМІЧНА ВТРАТА СТІЙКОСТІ СКЛАДЕНОЇ НАНОКОМПОЗИТНОЇ ОБОЛОНКИ

Досліджено вільні коливання та динамічну втрату стійкості функціонально-градієнтної композитної складеної конічно-циліндричної оболонки з матеріалу, посиленого вуглецевими нанотрубками, у надзвуковому газовому потоці. Розглянуто нанокompозитні матеріали з лінійним розподілом об'ємної частки нанотрубок по товщині. Для оцінки механічних характеристик нанокompозиту застосовано розширене правило змішування. Для моделювання деформування оболонки використано теорію деформацій зсуву високого порядку. Для отримання рівнянь руху конструкції застосовано метод заданих форм та метод Релея — Рітца. Для аналізу динаміки складеної оболонки запропоновано використовувати базисні функції, які автоматично задовольняють умови неперервності переміщень на стику циліндричної та конічної оболонок. Для моделювання впливу надзвукового газового потоку на оболонку використано поршневу теорію.

Розглянуто приклад аналізу динаміки нанокompозитної конічно-циліндричної оболонки під дією надзвукового потоку. Результати аналізу її власних коливань методом Релея — Рітца демонструють високу збіжність з власними частотами оболонки, отриманими методом скінченних елементів. При цьому метод скінченних елементів можна застосовувати лише до оболонки з матеріалу з постійним розподілом нанотрубок по товщині. Досліджено залежність власних частот коливань складеної оболонки від співвідношення довжини конічної та циліндричної частин. Досліджено залежність критичного тиску надзвукового потоку від чисел Маха та виду армування вуглецевими нанотрубками. Оболонки з концентрацією нанотрубок переважно поблизу зовнішньої та внутрішньої поверхонь характеризуються більшими значеннями власних частот та критичного тиску, ніж оболонки з рівномірним розподілом нанотрубок або такі, в яких максимальна концентрація нанотрубок досягається всередині оболонки.

Ключові слова: нанокompозит, динамічна втрата стійкості, складена оболонка, функціонально-градієнтний матеріал, вільні коливання, вуглецеві нанотрубки.

ВСТУП

Стрімкий прогрес технологій та науки призвів до появи нових функціонально-градієнтних матеріалів, посилених вуглецевими нанотрубками

(ВНТ). Оскільки механічні характеристики ВНТ вищі за характеристики сталі на кілька порядків, вони є вдалим вибором для армування композиту. Конструкції з наноармованих (нанокompозитних) матеріалів є легкими та міцними, тому

Цитування: Сахно Н. Г., Аврамов К. В., Успенський Б. В. Динамічна втрата стійкості складеної нанокompозитної оболонки. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5 (132). С. 60—70. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.060>

такі матеріали є перспективними для аерокосмічної, енергетичної, машинобудівної галузей.

Проблемі оцінки механічних характеристик nanoармованих матеріалів присвячено низку досліджень. У роботі [15] досліджено механічні характеристики нанокompозитів методом скінченних елементів. Для перевірки результатів використано розширене правило змішування. У роботі [21] побудовано модель еквівалентного континууму, в якій механічні властивості оцінюються за допомогою силових констант, що описують міжатомні взаємодії у молекулярній моделі. У роботі [25] обчислено ефективні пружні властивості нанотрубок за допомогою методів мікромеханіки. Ці властивості використано у методі Морі — Танака для обчислення ефективних пружних властивостей нанокompозиту.

Динаміку нанокompозитних циліндрів, армованих ВНТ, під впливом ударного навантаження розглянуто в роботі [20], проведено аналіз вільних коливань та поширення хвиль у конструкції. Статику та динаміку циліндричних оболонок з nanoармованого матеріалу розглянуто в роботі [29]. Аналіз лінійних коливань nanoармованих пластин наведено у роботі [11]. Вільні коливання пологих оболонок подвійної кривизни з функціонально градієнтного композиту з включеннями графенових нанопластинок розглянуто в дослідженні [28]. Математичну модель шарнірно опертої пологої оболонки подвійної кривизни побудовано за допомогою принципу Гамільтона та теорії зсуву високого порядку.

Серію робіт присвячено аналізу динамічної втрати стійкості нанокompозитних оболонок в надзвуковому газовому потоці. Ці задачі є важливими для галузі аерокосмічної техніки, в якій проблеми створення легких та міцних конструкцій є надзвичайно актуальними. У роботі [14] досліджено втрату стійкості функціонально-градієнтної панелі, проведено аналіз впливу типу армування ВНТ на стійкість. У роботі [16] використано метод скінченних елементів для аналізу стійкості та вільних коливань функціонально-градієнтних нанокompозитних панелей. Багато досліджень присвячено аналізу флатера нанокompозитних оболонок у взаємодії з над-

звуковим потоком [7]. Для опису динаміки таких конструкцій застосовуються теорії зсуву високого порядку. Флатер нанокompозитних циліндричних оболонок розглянуто в роботі [30]. У роботі [2] досліджено флатер функціонально градієнтних нанокompозитних балок, панелей, циліндричних та конічних оболонок. У роботі [4] запропоновано метод аналізу флатера нанокompозитних циліндричних оболонок.

Складені оболонки часто застосовуються в аерокосмічній техніці та машинобудуванні. Тому моделюванню поведінки таких конструкцій присвячено низку досліджень. У роботі [9] описано експериментальне дослідження вільних коливань складеної конічно-циліндричної оболонки. Коливання складеної оболонкової конструкції досліджено методом скінченних елементів у роботі [13]. У роботі [10] досліджено вільні коливання тонкостінної конструкції з циліндричними та конічними оболонками. Авторами використано статистичні ряди для моделювання переміщень оболонки. Напіваналітичний метод скінченних елементів використано для аналізу вільних коливань складеної конічно-циліндричної оболонки в роботі [26]. У роботі [5] отримано характеристики вільних коливань конічно-циліндричної оболонки.

Нижче ми пропонуємо новий підхід до аналізу вільних коливань та динамічної втрати стійкості складеної функціонально-градієнтної нанокompозитної конічно-циліндричної оболонки. Аналіз вільних коливань базується на методі Релея — Рітца. Розв'язок задачі розшукується у спеціальній формі, яка точно задовольняє умови неперервності переміщень на стику циліндра та конуса.

Динамічна втрата стійкості нанокompозитної оболонки обумовлена її взаємодією з надзвуковим газовим потоком. Для дослідження динамічної втрати стійкості використовується метод заданих форм. Динаміка конструкції розкладається за власними формами вільних коливань. Показано, що динамічна втрата стійкості виникає внаслідок біфуркації Хоффа [8] положення рівноваги конструкції. Досліджено вплив типу nanoармування на характеристики динамічної втрати стійкості системою.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ

Розглядається складена конічно-циліндрична оболонка постійної товщини h (рис. 1) з функціонально-градієнтного композиту, армованого ВНТ. Серединна поверхня оболонки має пов'язану з нею криволінійну систему координат x, ϕ (рис. 1), де x — повздожжня координата; ϕ — окружна координата. Перпендикулярно до серединної поверхні у зовнішньому напрямку розташовано вісь z ($z \in [-h/2, h/2]$).

Переміщення точок оболонки вважаються малими порівняно з її товщиною, тому зв'язок між деформаціями та переміщеннями описується лінійною моделлю. Оскільки оболонка є функціонально-градієнтною та композитною, використовується теорія зсуву високого порядку.

Розглядаються наноармовані матеріали, в яких ВНТ розташовано у повздожньому на-

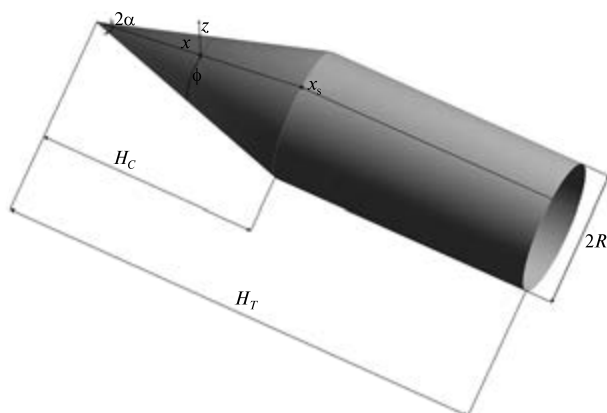


Рис. 1. Ескіз складеної оболонкової конструкції

Таблиця 1. Залежність $V_{CNT}(z)$ для різних типів наноармування

Тип армування	Об'ємна частка ВНТ
UD-CNT	$V_{CNT}(z) \equiv V_{CNT}^*$
FGX-CNT	$V_{CNT}(z) = \frac{4 z }{h} V_{CNT}^*$
FGO-CNT	$V_{CNT}(z) = 2\left(1 - \frac{2 z }{h}\right) V_{CNT}^*$

прямку оболонки, а їхній розподіл є лінійним [18]. В даній роботі розглядаються три типи армування: UD, FGX, FGO, для кожного з яких об'ємна частка ВНТ $V_{CNT}(z)$ залежить від координати z за законами, які наведено у табл. 1. Константа V_{CNT}^* у табл. 1 відповідає сумарній об'ємній частці ВНТ у композиті.

Механічні властивості наноармованого матеріалу можна розрахувати за допомогою правила змішування, докладно описаного в роботах [4, 18]. При цьому механічні характеристики матеріалу нерівномірно розподілені по товщині оболонки, що призводить до утворення функціонально-градієнтної конструкції. Тип наноармування значно впливає на динамічні властивості конструкції.

Метод, описаний в роботі, легко можна розширити для аналізу оболонок з інших наноармованих матеріалів.

Нанокompозитний матеріал є ортотропним, і закон Гука для нього має вигляд

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{\phi\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{12} & Q_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{\phi\phi} \end{bmatrix},$$

$$\sigma_{\phi z} = G_{\phi z}(z) \varepsilon_{\phi z}, \sigma_{xz} = G_{xz}(z) \varepsilon_{xz}, \sigma_{x\phi} = G_{x\phi}(z) \varepsilon_{x\phi}, \quad (1)$$

де $\sigma_{xx}, \sigma_{\phi\phi}, \sigma_{\phi z}, \sigma_{xz}, \sigma_{x\phi}$ — поздовжнє, кругове напруження і напруження зсуву; $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{\phi\phi}, \varepsilon_{\phi z}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{x\phi}$ — відповідні деформації;

$$Q_{11}(z) = \beta E_{xx}(z), \quad Q_{22}(z) = \beta E_{\phi\phi}(z),$$

$$Q_{12}(z) = \mu_{\phi x}(z) \beta E_{xx}(z) = \mu_{x\phi}(z) \beta E_{\phi\phi}(z),$$

$$\mu_{\phi x}(z) = \frac{\mu_{x\phi}(z) E_{\phi\phi}(z)}{E_{xx}(z)},$$

$E_{xx}, E_{\phi\phi}$ — модулі Юнга; $G_{x\phi}, G_{xz}, G_{\phi z}, \mu_{x\phi}$ — модулі зсуву та коефіцієнт Пуассона наноармованого матеріалу.

Тонкостінна оболонкова конструкція взаємодіє з надзвуковим газовим потоком, який рухається паралельно осі симетрії конструкції, внаслідок чого виникає динамічна втрата стійкості конструкції. Модель цієї взаємодії буде розглянуто нижче.

ПОТЕНЦІАЛЬНА ТА КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЇ ТОНКОСТІННОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Для дослідження динаміки оболонки під дією навантаження слід отримати загальні співвідношення її деформування. Радіус кривизни серединної поверхні тонкостінної конструкції в окружному напрямку (рис. 1) позначимо R_ϕ , а параметр Ляме — A_ϕ . Вони залежать від повздовжньої координати x . Для конструкції з одинарною кривизною радіус кривизни та параметр Ляме вздовж твірної лінії дорівнюють $R_x = \infty$, $A_x = 1$.

Стикування циліндричної оболонки відбувається при $x = x_s = H_C / \cos \alpha$. Геометричні параметри оболонки визначаються співвідношеннями

$$R_\phi = \begin{cases} x \tan \alpha & x < x_s, \\ R & x \geq x_s, \end{cases} \quad A_\phi = \begin{cases} x \sin \alpha & x < x_s, \\ R & x \geq x_s, \end{cases} \quad (2)$$

$$R_x = \infty, A_x = 1.$$

Відповідно до роботи [1] зв'язок між деформаціями та переміщеннями тонкостінної конструкції мають вигляд

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, \\ \varepsilon_{\phi\phi} &= \frac{1}{1+z/R_\phi} \left(\frac{1}{A_\phi} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{u_x}{A_\phi} \frac{\partial A_\phi}{\partial x} + \frac{u_z}{R_\phi} \right), \\ \varepsilon_{x\phi} &= \frac{\partial u_\phi}{\partial x} + \frac{1}{1+z/R_\phi} \left(\frac{1}{A_\phi} \frac{\partial u_x}{\partial \phi} - \frac{u_\phi}{A_\phi} \frac{\partial A_\phi}{\partial x} \right), \\ \varepsilon_{xz} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \\ \varepsilon_{\phi z} &= \frac{\partial u_\phi}{\partial z} + \frac{1}{1+z/R_\phi} \left(\frac{1}{A_\phi} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} - \frac{u_\phi}{R_\phi} \right) = \\ &= \frac{\partial u_\phi}{\partial z} + \frac{R_\phi}{R_\phi + z} \left(\frac{1}{A_\phi} \frac{\partial u_z}{\partial \phi} - \frac{u_\phi}{R_\phi} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Для опису переміщень тонкостінної конструкції використовується теорія зсуву високого порядку у роботах [22, 23]:

$$\begin{aligned} u_x(x, \phi, t, z) &= u + z\psi_x + z^2\theta_x + z^3\gamma_x, \\ u_\phi(x, \phi, t, z) &= \left(1 + \frac{z}{R_\phi} \right) v + z\psi_\phi + z^2\theta_\phi + z^3\gamma_\phi, \\ u_z(x, \phi, t, z) &= w, \end{aligned} \quad (4)$$

де u, v, w — проєкції переміщень точок серединної поверхні на координатні осі x, ϕ, z ; ψ_x, ψ_ϕ — кути обертання нормалі до серединної поверхні відносно осей ϕ та x відповідно; $\theta_x, \gamma_x, \theta_\phi, \gamma_\phi$ — невідомі вирази, які можна знайти з граничних умов

$$\varepsilon_{xz}|_{z=\pm h/2} = 0, \quad \varepsilon_{\phi z}|_{z=\pm h/2} = 0. \quad (5)$$

Підстановка виразів (3) та (4) у (5) дозволяє отримати систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно $\theta_x, \gamma_x, \theta_\phi, \gamma_\phi$, розв'язання якої дозволяє отримати означені функції.

Підстановка (4) в (3) дозволяє розділити змінні x, ϕ, t та z у виразах для деформацій оболонки, отримавши наступні представлення:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \varepsilon_{xx}^{(0)} + z\varepsilon_{xx}^{(1)} + z^2\varepsilon_{xx}^{(2)} + z^3\varepsilon_{xx}^{(3)}, \\ \varepsilon_{\phi\phi} &= \varepsilon_{\phi\phi}^{(0)} + z\varepsilon_{\phi\phi}^{(1)} + z^2\varepsilon_{\phi\phi}^{(2)} + z^3\varepsilon_{\phi\phi}^{(3)}, \\ \varepsilon_{x\phi} &= \varepsilon_{x\phi}^{(0)} + z\varepsilon_{x\phi}^{(1)} + z^2\varepsilon_{x\phi}^{(2)} + z^3\varepsilon_{x\phi}^{(3)}, \\ \varepsilon_{xz} &= \varepsilon_{xz}^{(0)} + z\varepsilon_{xz}^{(1)} + z^2\varepsilon_{xz}^{(2)} + z^3\varepsilon_{xz}^{(3)}, \\ \varepsilon_{\phi z} &= \varepsilon_{\phi z}^{(0)} + z\varepsilon_{\phi z}^{(1)} + z^2\varepsilon_{\phi z}^{(2)} + z^3\varepsilon_{\phi z}^{(3)}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\varepsilon_{xx}^{(i)}, \varepsilon_{\phi\phi}^{(i)}, \varepsilon_{x\phi}^{(i)}, \varepsilon_{xz}^{(i)}, \varepsilon_{\phi z}^{(i)}, i = 0, \dots, 3$ — диференціальні вирази відносно $u, v, w, \psi_x, \psi_\phi$.

Кінетична енергія конструкції обчислюється наступним чином:

$$T = 0.5 \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-0.5h}^{0.5h} \rho(z) (\dot{u}_x^2 + \dot{u}_y^2 + \dot{u}_z^2) \left(1 + \frac{z}{R_\phi(x)} \right) dz d\phi dx. \quad (7)$$

де $\rho(z)$ — питома маса матеріалу оболонки; $L = H_C / \cos \alpha + H_T - H_C$ — довжина твірної всієї конструкції. Параметри H_T, H_C, α наведено на рис. 1.

Підстановка розкладень (4) в кінетичну енергію (10) дозволяє провести інтегрування за змінною z та перейти до подвійного інтегралу замість потрібного:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^L (r_0 T_0 + r_1 T_1 + \dots + r_5 T_5) d\phi dx, \quad (8)$$

де

$$r_i = \int_{-0.5h}^{0.5h} z^i \rho(z) dz,$$

$T_i (i = 0, \dots, 5)$ — квадратичні форми відносно $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{\psi}_x, \dot{\psi}_\phi$.

Потенціальна енергія оболонки обчислюється таким чином:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-0.5h}^{0.5h} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{\phi\phi} \varepsilon_{\phi\phi} + \sigma_{\phi z} \varepsilon_{\phi z} + \sigma_{xz} \varepsilon_{xz} + \sigma_{x\phi} \varepsilon_{x\phi}) \left(1 + \frac{z}{R_\phi} \right) dz d\phi A_\phi dx. \quad (9)$$

З урахуванням (1) потенціальна енергія дорівнюватиме

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{-0.5h}^{0.5h} (Q_{11} \varepsilon_{xx}^2 + 2Q_{12} \varepsilon_{\phi\phi} \varepsilon_{xx} + Q_{22} \varepsilon_{\phi\phi}^2 + G_{23} \varepsilon_{\phi z}^2 + G_{13} \varepsilon_{xz}^2 + G_{12} \varepsilon_{x\phi}^2) \left(1 + \frac{z}{R_\phi} \right) dz d\phi A_\phi dx. \quad (10)$$

Завдяки представленням (6) у виразі (10) змінну z можна виділити та виконати інтегрування за цією змінною. Вираз для потенціальної енергії набуває вигляду

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} \sum_{i=0}^5 \Pi_i d\phi A_\phi dx, \quad (11)$$

де Π_i — квадратичні вирази відносно u , v , w , ψ_x , ψ_ϕ .

ЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Дослідження руху оболонки у взаємодії з газовим потоком провадиться методом заданих форм. При цьому її рух розкладається за формами вільних коливань, тому їхній аналіз є важливою задачею для дослідження динамічної втрати стійкості конструкції.

Для визначеності будемо розглядати конструкцію, яку консольно закріплено на колі $x = L$. Точку оболонки $x = 0$ будемо вважати вільною. Граничні умови при цьому мають вигляд:

$$u(L, \phi, t) = v(L, \phi, t) = w(L, \phi, t) = \psi_x(L, \phi, t) = \psi_\phi(L, \phi, t) = 0. \quad (12)$$

Умови неперервності переміщень на колі точки стикування конуса та циліндра мають вигляд

$$\begin{aligned} u(x_s - 0, \phi, t) &= u(x_s + 0, \phi, t) \cos \alpha + w(x_s + 0, \phi, t) \sin \alpha, \\ w(x_s - 0, \phi, t) &= -u(x_s + 0, \phi, t) \sin \alpha + w(x_s + 0, \phi, t) \cos \alpha, \\ \psi_\phi(x_s - 0, \phi, t) &= \psi_\phi(x_s + 0, \phi, t). \end{aligned} \quad (13)$$

Значення $x = x_s - 0$ відповідає колу серединної поверхні конуса нескінченно близько до стику оболонок. Значення $x = x_s + 0$ відповідає розрізу циліндра нескінченно близько до стику оболонок.

Для розв'язання задачі аналізу вільних коливань оболонки розділимо змінні x , ϕ , t шляхом обрання представлення переміщень $u(x, \phi, t)$, $v(x, \phi, t)$, $w(x, \phi, t)$, $\psi_x(x, \phi, t)$, $\psi_\phi(x, \phi, t)$:

$$\begin{aligned} u(x, \phi, t) &= \tilde{u}(x) \cos(n\phi) \cos(\omega t), \\ v(x, \phi, t) &= \tilde{v}(x) \sin(n\phi) \cos(\omega t), \\ w(x, \phi, t) &= \tilde{w}(x) \cos(n\phi) \cos(\omega t), \\ \psi_x(x, \phi, t) &= \tilde{\psi}_x(x) \cos(n\phi) \cos(\omega t), \\ \psi_\phi(x, \phi, t) &= \tilde{\psi}_\phi(x) \sin(n\phi) \cos(\omega t), \end{aligned} \quad (14)$$

де n — кількість хвиль по окружній координаті; ω — частота власних коливань; функції $\tilde{u}(x)$, $\tilde{v}(x)$, $\tilde{w}(x)$, $\tilde{\psi}_x(x)$, $\tilde{\psi}_\phi(x)$ обираються таким чином, щоб задовольнити умови (13):

$$\begin{aligned} \tilde{u}(x) &= \begin{cases} U(x) \cos \alpha + W(x) \sin \alpha & x < x_s, \\ U(x) & x \geq x_s, \end{cases} \\ \tilde{w}(x) &= \begin{cases} -U(x) \sin \alpha + W(x) \cos \alpha & x < x_s, \\ U(x) & x \geq x_s, \end{cases} \\ \tilde{v}(x) &= V(x), \quad \tilde{\psi}_x(x) = X(x), \\ \tilde{\psi}_\phi(x) &= \begin{cases} \Phi(x) & x < x_s, \\ \Phi(x) \cos \alpha & x \geq x_s. \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

У свою чергу функції $U(x)$, $W(x)$, $V(x)$, $X(x)$, $\Phi(x)$ розшукуються у формі розкладень з невідомими коефіцієнтами за заданими базисними функціями $P_i(x)$:

$$\begin{aligned} U(x) &= \sum_{i=1}^{N_U} A_i P_i(x), \quad V(x) = \sum_{i=1}^{N_V} A_{i+N_U} P_i(x), \\ W(x) &= \sum_{i=1}^{N_W} A_{i+N_U+N_V} P_i(x), \\ X(x) &= \sum_{i=1}^{N_X} A_{i+N_U+N_V+N_W} P_i(x), \\ \Phi(x) &= \sum_{i=1}^{N_\Phi} A_{i+N_U+N_V+N_W+N_X} P_i(x), \end{aligned} \quad (16)$$

де базисні функції $P_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots$) задовольняють граничні умови (12): $P_i(L) = 0$, $\mathbf{A} = [A_1, \dots$,

A_{N_Σ}], $N_\Sigma = N_U + N_V + N_W + N_X + N_\Phi$ — невідомі параметри.

Аналіз вільних коливань тонкостінної конструкції можна виконати методом Релея — Рітца [6, 24, 27]. Рух оболонки визначається мінімумом функціоналу дії:

$$\int_0^{2\pi/\omega} (T - \Pi) dt \rightarrow \min. \quad (17)$$

Використання розкладень (14)—(16) у виразах (10), (8) дозволяє провести інтегрування та записати кінетичну та потенціальну енергії у вигляді

$$\begin{aligned} T &= \omega^2 \sin^2(\omega t) \tilde{T}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma}), \\ \Pi &= \omega^2 \cos^2(\omega t) \tilde{\Pi}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma}), \end{aligned} \quad (18)$$

де $\tilde{T}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma})$, $\tilde{\Pi}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma})$ — квадратичні форми параметрів $A_1, \dots, A_{N_\Sigma}$. Таким чином, задачу мінімізації функціоналу дії (17) зведено до задачі мінімізації квадратичної форми відносно цих параметрів:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi/\omega} (T - \Pi) dt &= \frac{\pi}{\omega} [\tilde{\Pi}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma}) - \\ &- \omega^2 \tilde{T}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma})] \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (19)$$

Функціонал дії є мінімальним, якщо виконуються співвідношення

$$\frac{\partial}{\partial A_i} [\tilde{\Pi}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma}) - \omega^2 \tilde{T}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma})] = 0, \quad (20)$$

$$i = 1, \dots, N_\Sigma.$$

Рівняння (20) є еквівалентними проблемі власних значень:

$$[\mathbf{C} - \omega^2 \mathbf{M}] \mathbf{A} = 0, \quad (21)$$

де $\mathbf{C}$ — матриця жорсткості; $\mathbf{M}$ — матриця мас, які відповідають матрицям Гессе функцій $\tilde{\Pi}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma})$ та $\tilde{T}(A_1, \dots, A_{N_\Sigma})$. Власні значення цієї задачі відповідають квадратам кругових частот коливань оболонки, а власні вектори — формам коливань.

ДИНАМІЧНА СИСТЕМА ЗІ СКІНЧЕННОЮ КІЛЬКІСТЮ СТУПЕНІВ СВОБОДИ

Для аналізу динамічної втрати стійкості конструкцією побудуємо лінійну динамічну систему зі скінченною кількістю ступенів свободи, яка описує рух оболонки. Її конструювання

здійснюється методом заданих форм [19]. Коливання конструкції розкладаються за формами власних коливань $\tilde{u}_j(x)$, $\tilde{v}_j(x)$, $\tilde{w}_j(x)$, $\tilde{\psi}_{x,j}(x)$, $\tilde{\psi}_{\phi,j}(x)$, $j = 1, 2, \dots$, які знаходяться з рівняння (21) та визначаються співвідношеннями (15), (16). Переміщення та кути повороту нормалі подаються у вигляді

$$\begin{aligned} u(x, \phi, t) &= \\ &= \sum_{j=1}^{L_U} \tilde{u}_j(x) [q_j(t) \cos(n\phi) + q_{j+L_U}(t) \sin(n\phi)], \\ v(x, \phi, t) &= \\ &= \sum_{j=1}^{L_V} \tilde{v}_j(x) [q_{j+2L_U}(t) \cos(n\phi) + q_{j+L_V+2L_U}(t) \sin(n\phi)], \\ w(x, \phi, t) &= \sum_{j=1}^{L_W} \tilde{w}_j(x) [q_{j+2L_V+2L_U}(t) \cos(n\phi) + \\ &+ q_{j+L_W+2L_V+2L_U}(t) \sin(n\phi)], \\ \psi_x(x, \phi, t) &= \sum_{j=1}^{L_X} \tilde{\psi}_{x,j}(x) [q_{j+2L_W+2L_V+2L_U}(t) \cos(n\phi) + \\ &+ q_{j+L_X+2L_W+2L_V+2L_U}(t) \sin(n\phi)], \\ \psi_\phi(x, \phi, t) &= \\ &= \sum_{j=1}^{L_\Phi} \tilde{\psi}_{\phi,j}(x) [q_{j+2L_X+2L_W+2L_V+2L_U}(t) \cos(n\phi) + \\ &+ q_{j+L_\Phi+2L_X+2L_W+2L_V+2L_U}(t) \sin(n\phi)], \end{aligned} \quad (22)$$

де $L_* = L_\Phi + 2L_X + 2L_W + 2L_V + 2L_U$ — кількість ступенів свободи конструкції; $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_{L_*}]$ — вектор узагальнених координат конструкції; n — кількість хвиль по окружній координаті. Для аналізу динамічної втрати стійкості оболонкою в розкладах (22) враховуються зв'язані форми коливань [4].

Підстановка (22) у вирази для потенціальної та кінетичної енергій (11), (8) та здійснення необхідного інтегрування дозволяє представити потенціальну енергію як квадратичну форму узагальнених координат $q_1, \dots, q_{L_*}$, а кінетичну — як квадратичну форму узагальнених швидкостей $\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_{L_*}$.

Надзвуковий потік, який рухається паралельно осі симетрії конструкції, описується поршне-

вою теорією [3, 12, 17]:

$$p = -\frac{\gamma p_{\infty} M_{\star}^2}{\sqrt{M_{\star}^2 - 1}} \times \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{M_{\star}^2 - 2}{M_{\star} a_{\infty} (M_{\star}^2 - 1)} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{w}{2A_{\phi} \sqrt{M_{\star}^2 - 1}} \right), \quad (23)$$

де p — тиск газу, який діє на тонкостінну конструкцію, γ — адіабатична експонента, p_{∞} — статичний тиск вільного потоку, $M_{\star}$ — число Маха, a_{∞} — швидкість звуку вільного потоку.

Віртуальна робота тиску (23) дорівнює

$$\delta A = -\frac{\gamma p_{\infty} M_{\star}^2}{\sqrt{M_{\star}^2 - 1}} \int_0^L \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{M_{\star}^2 - 2}{M_{\star} a_{\infty} (M_{\star}^2 - 1)} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{w}{2A_{\phi} \sqrt{M_{\star}^2 - 1}} \right) \delta w dx R_{\phi} d\phi, \quad (24)$$

де δw — варіація радіального переміщення. З урахуванням (22) узагальнені сили $\mathbf{Q} = [Q_1, \dots, Q_{L_{\star}}]^T$ можна тривіально вивести з виразу (24) як лінійні функції узагальнених координат та узагальнених швидкостей:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{q} + \mathbf{H} \dot{\mathbf{q}}, \quad (25)$$

де $\mathbf{\Lambda}$, $\mathbf{H}$ — матриці розмірностей $L_{\star} \times L_{\star}$.

Рівняння руху оболонки в газовому потоці можна отримати у формі рівнянь Лагранжа II типу. Використовуючи вирази для потенціальної та кінетичної енергій та вектор узагальнених сил (25), рівняння руху можна записати у формі

$$\mathbf{M}^{(f)} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}^{(f)} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{q} + \mathbf{H} \dot{\mathbf{q}}, \quad (26)$$

де $\mathbf{M}^{(f)}$ та $\mathbf{C}^{(f)}$ — матриці мас та жорсткостей конструкції.

Властивості стану рівноваги $\mathbf{q} = \mathbf{0}$ динамічної системи (26) та властивості стану рівноваги тонкостінної конструкції (рис. 1) в надзвуковому газовому потоці є однаковими. Нестійкість стану рівноваги системи (26) характеризує динамічну втрату стійкості тонкостінною конструкцією. Для дослідження останньої дослідимо стійкість стану рівноваги системи (26). Для цього система (26) представляється у формі задачі Коші. Введемо вектор узагальнених швидкостей $\mathbf{g} = \dot{\mathbf{q}}$.

Система (26) відносно координат $[\mathbf{q}, \mathbf{g}]$ набуває вигляду задачі Коші:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ \tilde{\mathbf{\Lambda}} & \tilde{\mathbf{H}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

де

$$\tilde{\mathbf{\Lambda}} = \mathbf{M}^{(f)-1} (\mathbf{\Lambda} - \mathbf{C}^{(f)}), \quad \tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{M}^{(f)-1} \mathbf{H},$$

$\mathbf{E}$ — одинична матриця.

Аналіз стійкості тривіального положення рівноваги системи (27) зводиться до розв'язання задачі пошуку власних значень λ матриці

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ \tilde{\mathbf{\Lambda}} & \tilde{\mathbf{H}} \end{bmatrix}.$$

Власні значення відповідають характеристичним показникам системи (34), за знаком дійсної частини яких можна судити про стійкість положення рівноваги.

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЛІНІЙНИХ КОЛИВАНЬ

Коливання тонкостінної оболонкової конструкції, зображеної на рис. 1, досліджувались при таких значеннях її параметрів:

$$H_T = 10.10 \text{ м}, H_C = 4.04 \text{ м}, R = 1.2 \text{ м}, \quad (28)$$

$$\alpha = 16.53^\circ, h = 5 \text{ мм}.$$

Оболонку виготовлено з нанокомпозитного матеріалу з полімерною матрицею PmPV, яку армовано одношаровими ВНТ, орієнтованими вздовж твірної лінії оболонки. Об'ємна частка ВНТ становить $V_{CNT} = 0.28$. Характеристики нанокомпозитного матеріалу такі [18]:

$$E_{xx}(z) = 7.91 \cdot 10^{11} V_{CNT}(z) + 2.50 \cdot 10^9,$$

$$E_{\phi\phi}(z) = \frac{1.585 \cdot 10^{10}}{4(1 - V_{CNT}(z))},$$

$$G_{x\phi}(z) = G_{xz}(z) = G_{\phi z}(z) = \frac{1.11 \cdot 10^9}{1.07(1 - V_{CNT}(z))},$$

$$\mu_{x\phi}(z) = -0.17 V_{CNT}(z) + 0.34,$$

$$\rho(z) = 250.00 V_{CNT}(z) + 1150.00.$$

Розрахунок вільних коливань методом Релея — Рітца було здійснено за допомогою тригонометричних базисних функцій у розкладенні

(16), які задовольняють граничні умови (12):

$$P_i(x) = \cos\left(\frac{(2i-1)\pi}{L}x\right), i = 1, 2, \dots$$

Аналіз збіжності перших 30 власних частот коливань оболонки свідчить, що доцільною кількістю базисних функцій (16) є $N_U = N_V = N_W = N_X = N_\Phi = 35$. Порівняння деяких з цих частот з результатами скінченно-елементного моделювання в середовищі ANSYS наведено в табл. 2. Тут i — номер частоти, n — кількість хвиль у окружному напрямку на відповідній формі, ω_i — результати розрахунку власних частот методом Релея — Рітца; графа ω_p , ANSYS — результати модального аналізу методом скінченних елементів, δ — відносна похибка результатів за методом Релея — Рітца у порівнянні з методом скінченних елементів. З даних табл. 2 видно, що запропонований метод дозволяє точно оцінити власні частоти коливань складеної оболонки. Перша частота коливань оболонки відповідає значенню $n = 6$.

На рис. 2 показано дві власні форми коливань оболонки, що відповідають значенням $n = 6$, які розраховано методом скінченних елементів. Видно еволюцію власних форм коливань. Обидві форми (рис. 2, а та б) локалізовані в циліндричній частині оболонки та відповідають власним формам оболонки 1, 10 в загальному переліку. Конічна частина конструкції є жорсткішою, ніж циліндрична, тому їй відповідають власні форми з більшою власною частотою.

Власні частоти та форми коливань було розраховано для трьох видів наноармування: UD, FGX, FGO (табл. 1). Було досліджено власні

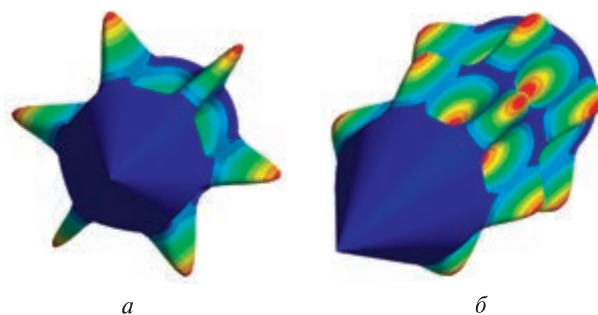


Рис. 2. Форми власних коливань конструкції з $n=6$ хвилями в окружному напрямку, що відповідають номерам власних частот: а — 1, б — 10

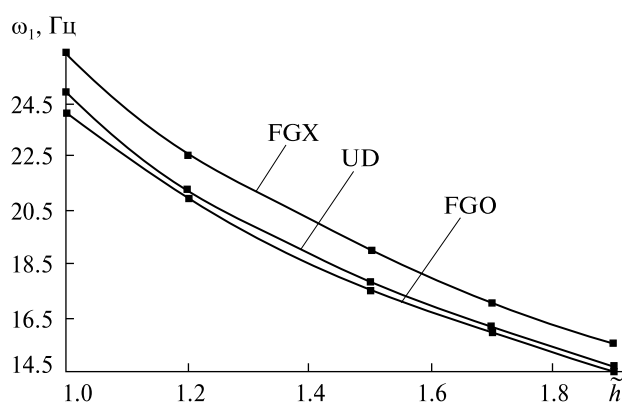


Рис. 3. Залежність першої власної частоти від $\tilde{h}$ для різних типів наноармування

коливання для різних значень співвідношення висоти циліндричної та конічної оболонок $\tilde{h} = (H_T - H_C) / H_C$. Результати розрахунку першої власної частоти для різних видів армування ВНТ наведено на рис. 3. При проведенні розрахунків довжина конуса H_C та кут α були фіксовані ($H_C = 4.04$ м, $\alpha = 16.53^\circ$), а довжина циліндра $H_T - H_C$ варіювалась. З цих залежностей видно, що перша власна частота зменшується при підвищенні висоти циліндричної частини при фіксованих розмірах конічної. Аналогічні залежності спостерігаються для інших власних частот. Найбільші власні частоти спостерігаються при використанні FGX-армування, а найменші — при FGO-наноармуванні.

АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ

Дослідимо динамічну втрату стійкості складеною оболонковою конструкцією, яку розгляну-

Таблиця 2. Порівняння частот вільних коливань конструкції з результатами скінченно-елементного аналізу

i	n	ω_p , Гц	ω_p , Гц ANSYS	δ
1	6	17.787	17.582	0.01
4	4	20.764	20.362	0.019
7	9	28.360	28.719	0.012
10	6	31.603	31.064	0.017
13	2	35.655	34.014	0.048
16	10	38.037	38.499	0.012
19	11	41.174	42.186	0.023

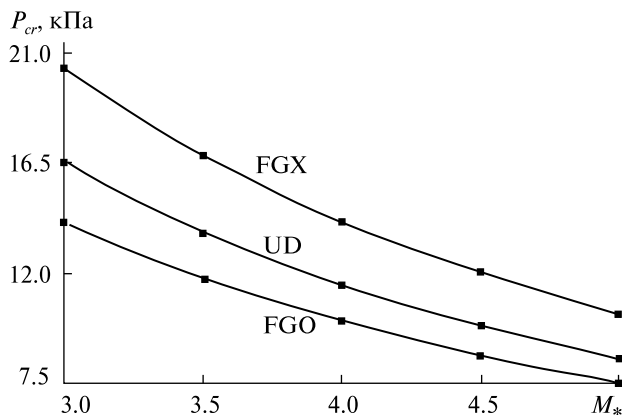


Рис. 4. Залежність критичного тиску від числа Маха для різних видів наноармування

Таблиця 3. Значення критичного тиску для складеної нанокомпозитної оболонки

M_*	Тип нанокомпозиту					
	UD		FGX		FGO	
	n	p_{cr} , кПа	n	p_{cr} , кПа	n	p_{cr} , кПа
3	14	16.552	13	20.343	16	14.038
3.5	14	13.606	13	16.772	16	11.739
4	15	11.516	14	14.122	15	10.049
4.5	15	9.893	14	12.132	16	8.613
5	13	8.456	12	10.297	16	7.516

то у попередньому розділі при її взаємодії з надзвуковим газовим потоком. В розкладенні (22) використано власні форми коливань, які отримано раніше. Всі розкладення (22) включають однакове число взаємодіючих форм $L_U = L_V = L_W = L_X = L_\Phi$.

Для дослідження втрати стійкості досліджується залежність характеристичних показників λ від параметрів потоку p_∞ , M_* та розшукується така комбінація параметрів, при якій відбувається зміна стійкого тривіального стану рівноваги системи (27) на нестійкий. Така зміна відбувається в точці біфуркації Хопфа, коли спостерігається пара комплексно-сполучених характеристичних показників з нульовою дійсною частиною: $\lambda_{1,2} = \pm i\Omega$, де i — уявна одиниця. Параметри надзвукового потоку в точці біфуркації називаються критичними.

Критичне значення тиску p_∞ позначається p_{cr} . Для його визначення проводився пошук $\hat{p}_{crn} = p_\infty$, $\exists \lambda_k, \lambda_l: \text{Re}(\lambda_k) = 0$, $\lambda_l = -\lambda_k$, $n = 2 \dots 30$. Після того як для всіх значень n з заданого діапазону буде визначено критичний тиск $\hat{p}_{crn}$, величина p_{cr} визначається як $p_{cr} = \min(\hat{p}_{crn})$. Ця процедура проводиться для різних значень числа Маха.

Результати аналізу динамічної втрати стійкості наведено в табл. 3 для різних типів наноармування. Слід зазначити, що кількість хвиль за окружною координатою, при яких відбувається втрата стійкості, є досить високим — від 12 до 16. Таким чином, при аналізі складених оболонок необхідно проводити розрахунки для широкого діапазону параметру n .

На рис. 4 наведено залежності $p_{cr}(M_*)$ для різних типів наноармування. Найбільше значення критичного тиску є характерним для FGX-наноармування, тоді як FGO-композитна оболонка втрачає стійкість при найменшому значенні тиску. При цьому тип наноармування має великий вплив на значення критичного тиску (до 1.5 разів). Аналогічна залежність між типом наноармування та власними частотами є значно менш вираженою. Крім того, критичний тиск дуже зменшується при підвищенні швидкості потоку: при підвищенні числа Маха з 3 до 5 він зменшується майже удвічі.

ВИСНОВКИ

Запропоновано математичну модель динамічної поведінки складеної оболонкової конструкції з функціонально-градієнтного нанокомпозитного матеріалу в надзвуковому газовому потоці на базі теорії зсуву високого порядку. Для отримання рівнянь руху використано метод заданих форм, при якому рух системи розкладається за формами вільних коливань конструкції. Для отримання форм вільних коливань складеної конструкції використано метод Релея — Рітца з новою системою кускових базисних функцій.

Динамічна втрата стійкості конструкції відбувається внаслідок біфуркації Хопфа, для пошуку якої розраховано характеристичні показники.

Проведено порівняння результатів розрахунку методом Релея — Рітца з власними частотами та формами, які отримано МСЕ.

Для розглянутих параметрів виявлено незначну залежність власних частот від типу нанокompозиту.

Проведений аналіз динамічної втрати стійкості дозволяє стверджувати, що критичний тиск великою мірою залежить від типу наноармування матеріалу. Зокрема раціональний вибір

такого нанокompозиту може запобігти виникненню автоколивань в конструкції, які є наслідком втрати нею стійкості. Значення критичного тиску залежить від швидкості потоку.

Це дослідження частково фінансувалося Національним фондом досліджень України (грант 2020.02/128).

REFERENCES

1. Amabili M. (2015). Non-linearities in rotation and thickness deformation in a new third-order thickness deformation theory for static and dynamic analysis of isotropic and laminated doubly curved shells. *Int. J. Non-Linear Mechanics*, **69**, 109—128 [in English].
2. Asadi H. (2018). Numerical simulation of the fluid-solid interaction for CNT reinforced functionally graded cylindrical shells in thermal environments. *Acta Astronaut.*, **138**, 214—224 [in English].
3. Avramov K. V., Chernobryvko M. V., Kazachenko O., Batutina T. J. (2016). Dynamic instability of parabolic shells in supersonic gas stream. *Meccanica*, **51**, 939—950 [in English].
4. Avramov K V., Chernobryvko M., Uspensky B., Seitkazenova K. K., Myrzaliyev D. (2019). Self-sustained vibrations of functionally graded carbon nanotubes-reinforced composite cylindrical shells in supersonic flow. *Nonlinear Dynamics*, **98** (3), 1853—1876 [in English].
5. Caresta M., Kessissoglou N. (2010). Free vibrational characteristics of isotropic coupled cylindrical—conical shells. *J. Sound and Vib.*, **329** (6), 733—751 [in English].
6. Chernobryvko M. V., Avramov K. V., Romanenko V. N., Batutina T. J., Tonkonogenko A. M. (2014). Free linear vibrations of parabolic shells. *Meccanica*, **49** (8), 14—21 [in English].
7. Chwał M., Muc A. (2019). Buckling and free vibrations of nanoplates-comparison of nonlocal strain and stress approaches. *Appl. Sci.*, **9**, 1409 [in English].
8. Hoff N. J. (1951). The dynamics of the buckling of elastic columns. *Proc. of the Soc. for Exper. Stress analysis*, **9** (1), 68—74 [in English].
9. Hu W. C. L., Raney J. P. (1965). Experimental and analytical study of vibrations of joined shells. *AIAA J.*, **5**(5), 976—980 [in English].
10. Irie T., Yamada G., Myramoto Y. (1984). Free vibration of joined conical—cylindrical shells. *J. Sound and Vib.*, **95**(1), 31—39 [in English].
11. García-Macías E., Rodríguez-Tembleque L., Sáez A. (2018). Bending and free vibration analysis of functionally graded graphene vs. carbon nanotube reinforced composite plates. *Composite Struct.*, **186**, 123—138 [in English].
12. Krumhaar Hans (1963). The accuracy of linear piston theory when applied to cylindrical shells. *AIAA J.*, **1** (6), 1448—1449 [in English].
13. Lashkari M., Weingarten V. I. (1973). Vibrations of segmented shells. *Exp. Mech.*, **13**(3), 120—125 [in English].
14. Lei Z. X., Zhang L. W., Liew K. W. (2016). Buckling analysis of CNT reinforced functionally graded laminated composite plates. *Composite Struct.*, **152**, 62—73 [in English].
15. Liu Y. J., Chen X. L. (2003). Evaluations of the effective material properties of carbon nanotube-based composites using a nanoscale representative volume element. *Mechanics of Materials*, **35**, 69—81 [in English].
16. Mehar K., Panda S. K., Mahapatra T. R. (2017). Theoretical and experimental investigation of vibration characteristic of carbon nanotube reinforced polymer composite structure. *Int. J. mech. Sci.*, **133**, 319—329 [in English].
17. Mehri M., Asadi H., Kouchakzadeh M. A. (2017). Computationally efficient model for flow-induced instability of CNT reinforced functionally graded truncated conical curved panels subjected to axial compression. *Comput. Methods Appl. Mech. Energ.*, **318**, 957—980 [in English].
18. Mehri M., Asadi H.; Wang Q. (2016). On dynamic instability of a pressurized functionally graded carbon nanotube reinforced truncated conical shell subjected to yawed supersonic airflow. *Composite Struct.*, **153**, 938—951 [in English].
19. Meirovitch L. (1998). *Elements of vibration analysis*. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 560 p [in English].
20. Moradi-Dastjerdi R., Foroutan M., Pourasghar A. (2013). Dynamic analysis of functionally graded nanocomposite cylinders reinforced by carbon nanotube by a mesh-free method. *Materials and Design*, **44**, 256—266 [in English].
21. Odegard G. M., Gates T. S., Wise K. E., Park C., Siochi E. J. (2003). Constitutive modeling of nanotube-reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, **63**, 1671—1687 [in English].

22. Reddy J. N. (1984). A simple higher-order theory for laminated composite plates. *ASME J. Applied Mechanics*, **51**, 745–752 [in English].
23. Reddy J. N. (1984). A refined nonlinear theory of plates with transverse shear deformation. *Int. J. Solids and Structures*, **20** (9/10), 881–896 [in English].
24. Ritz W. (1909). Über eine Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik. *J. für die reine und angewandte Mathematik*. Bd 135, Heft 1, 61 S. [in Deutsch].
25. Seidel G. D., Lagoudas D. C. (2006). Micromechanical analysis of the effective elastic properties of carbon nanotube reinforced composites. *Mechanics of Materials*, **38**, 884–907 [in English].
26. Sivadas K. R., Ganesan N. (1990). Free vibration of cantilever conical shells with variable thickness. *Comput. Struct.*, **36**(3), 559–566 [in English].
27. Strutt J. W. (Rayleigh) The theory of sound. 2nd edition. London and New York, McMillan and Co, (1894) V. 1, 480 p.; (1896) V. 2, 504 p. [in English].
28. Wang A., Chen H., Hao Y., Zhang W. (2018). Vibration and bending behavior of functionally graded nanocomposite doubly-curved shallow shells reinforced by graphene nanoplatelets. *Results in Phys.*, **9**, 550–559 [in English].
29. Zhang L. W., Lei Z. X., Liew K. M., Yu J. L. (2014). Static and dynamic of carbon nanotube reinforced functionally graded cylindrical panels. *Composite Struct.*, **111**, 205–212 [in English].
30. Zhang L. W., Song Z. G., Liew K. M. (2017). Modeling aerothermoelastic properties and active flutter control of nanocomposite cylindrical shells in supersonic airflow under thermal environments. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **325**, 416–433 [in English].

Стаття надійшла до редакції 09.11.2020

Після доопрацювання 30.09.2021

Прийнято до друку 11.10.2021

Received 09.11.2020

Revised 30.09.2021

Accepted 11.10.2021

N. H. Sakhno, Postgraduate student at the National Technical University

«Kharkiv Polytechnical Institute», Leading Engineer

ORCID: 0000-0003-4179-5316

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

ORCID: 0000-0002-8740-693X

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

ORCID: 0000-0001-6360-7430

E-mail: Uspensky.kubes@gmail.com

A. Pidhorneyi Institute of Mechanical Engineering Problems of the NAS of Ukraine

2/10 Pozharsky Str., Kharkiv, 61064 Ukraine

DYNAMIC INSTABILITY OF A COMPOUND NANOCOMPOSITE SHELL

Free oscillations and dynamic instability due to supersonic airflow pressure are investigated in a functional-gradient compound composite conical-cylindrical shell made of a carbon nanotubes-reinforced material. Nanocomposite materials with a linear distribution of the volumetric fraction of nanotubes over the thickness are considered. Extended mixture rule is used to estimate nanocomposite's mechanical characteristics. A high-order shear deformation theory is used to represent the shell deformation. The assumed-mode technique, along with a Rayleigh-Ritz method, is applied to obtain the equations of the structure motion. To analyze the compound structure dynamics, a new system of piecewise basic functions is suggested. The pressure of a supersonic flow on the shell is obtained by using the piston theory.

An example of the dynamic analysis of a nanocomposite conical-cylindrical shell in the supersonic gas flow is considered. The results of its modal analysis using the Rayleigh-Ritz technique are close to the natural frequencies of the shell obtained by finite element analysis. In this case, finite element analysis can only be used for shells made of material with a uniform distribution of nanotubes over the thickness. The dependence of the natural frequencies of a compound shell on the ratio of the lengths of the conical and cylindrical parts is studied. The dependence of the critical pressure of a supersonic flow on the Mach numbers and the type of carbon nanotubes reinforcement is investigated. Shells with a concentration of nanotubes predominantly near the outer and inner surfaces are characterized by higher values of natural frequencies and critical pressure than the shells with a uniform distribution of nanotubes or with a predominant concentration of nanotubes inside the shell.

Keywords: joined conical-cylindrical shell in supersonic flow, functionally graded carbon nanotubes-reinforced composite, dynamic instability, assumed-mode method.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.071>

UDC 629.78

A. P. ALPATOV¹, Dr. Sci. in Tech., Corresponding member of the NAS of Ukraine, Professor

<https://orcid.org/0000-0003-4411-2250>

E-mail: aalpatov@ukr.net

CHANGQING WANG², Professor

<https://orcid.org/0000-0002-1358-7731>,

E-mail: wangcq@nwpu.edu.cn

A. E. ZAKRZHEVSKII³, Dr. Sci. in Tech., Professor

<https://orcid.org/0000-0003-2106-2086>

E-mail: alex.e.zakr@gmail.com

¹ Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine
15, Leshko-Popelya Str., Dnipro, 49005 Ukraine

² Northwestern Polytechnical University
127, YouyiXilu, Xi'an 710072 Shaanxi, P. R. China

³ Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine
40, Glushkov Ave., build. 4/1, Kyiv 187, 03680 Ukraine

FEED-FORWARD CONTROL OF TOTAL RETRIEVAL OF THE SPACE TETHER FROM VERTICAL POSITION

This paper presents the results of studies of the feasibility of total and safe retrieval of a space tether of two bodies connected by an elastic, massless cable. The purpose of the research is to build up the control for the mode of the total and safe retrieval of the tether, which is one of the basic modes of its functioning. It allowed the development of the feed-forward control of the tether length or tension that provides demanded change of the angular momentum of the tether under the effect of the gravitational torque. The novelty of the research results consists also in the novel approach to the control of underactuated mechanical systems, which have the number of the control channels less than their degrees of freedom. Here the constraints on the tether angular motion relative to the pitch axis are introduced. They reduce the number of the system degrees of freedom and allow realizing the necessary mode of motion. For this control, only the remaining degree of freedom is used. The numerical simulation of the effect of the mode parameters on the tether motion is carried out for the tether in the chosen ranges of the parameters. The numerical example demonstrates the simplicity of the application of the method in practice. Plots illustrate the analysis of the results.

Keywords: elastic space tether, underactuated mechanical system, retrieval, feed-forward control.

Annex Nomenclature

c_i ($i = 0, \dots, 7$)	= coefficients of power series
EF	= cable longitudinal rigidity
$e_{ri}(j)$ ($i = 1, 2; j = 1, 2, 3$)	= directing cosines of the position vectors of point masses in the orbital frame of reference
$\mathbf{K}^C(t)$	= vector of angular momentum about mass center C
$K_3^C(t)$	= projection of angular momentum on Cz^{or} axis

Цитування: Alpatov A. P., Changqing Wang, Zakrzhevskii A. E. Feed-forward control of total retrieval of the space tether from vertical position. *Space Science and Technology*. 2021. **27**, № 5 (132). С. 71—85. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.071>

L, L_0, L_f	= current, initial, and interim distance between end point masses
$m_i (i = 1, 2)$	= masses of end bodies
$\mathbf{m}^C(t)$	= vector of external moment
$M_g(t)$	= gravitation torque magnitude
$\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$	= position vectors of the point masses relative to point C
$r(t)$	= position vectors magnitude
$r_p(t)$	= program law of $r(t)$ change
$r_{pe}(t)$	= program law of $r(t)$ change with correction for elasticity
T	= force of cable tension
T_f	= time of increasing value of pitch angle to $\vartheta = \pi / 4$
T_r	= total time of retrieval
t	= time
$S(t)$	= speed of change of length $L(t)$
$x_i^{or}, y_i^{or}, z_i^{or} (i = 1, 2)$	= projections of $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ on orbital frame
$\Delta r(t)$	= correction of program law $r_p(t)$ for elasticity of cable
ϑ	= pitch angle
ω^{or}	= angular velocity of orbital tether motion

1. INTRODUCTION

Space tethered systems (STS) attract the extensive attention of a researcher due to their potential applications for space technologies. The volume of publications devoted to the research of various modes of motion of the STS is very large. A comprehensive analysis of potential STS applications is presented in [6, 11]. Problems of deployment and retrieval of a tether of two space bodies take a special place among the problems that are connected with the STS dynamics. A considerable volume of publications is devoted to these problems. They differ by the accepted mechanical model of the tether and the character of the control of tether putting into the final state. An in-depth review of research in this area contains in publications [4, 15–17, 19, 26, 27, 32–34]. Nevertheless, we will dwell here on some issues additionally.

The vertical STS configuration is stable in the orbital frame of reference in the case of the constant length of the cable. Theoretically, it is true for the spherical Earth. One can assume that, within engineering accuracy, this hypothesis is valid [28]. The configuration of the tether aligned to the local vertical loses the stability with the change of its length

according to the theorem of the angular momentum change [12]. The requirement that the tether should be on the local vertical during the mode of transformation could be reached only at the expense of enhancement of the control system. The fulfillment of this requirement is not often necessary from the point of view of the practice.

The modes of deployment and retrieval are the basic modes of functioning of space tethers, which are needed for practice. Usually, in publications, researchers have considered simultaneously both modes. However, it must be taken in mind that each mode has its specifics.

A number of authors consider the free deployment at the initial stage [25]. In this case, after initial pushing away of a subsatellite from a mother spacecraft, the tether is deployed practically without resistance under the action of forces of the gravity gradient. As a result, after braking of the tether at the end of the deployment, the tether enters the mode of libratory (pendulous) oscillations in the orbital plane about a vertical equilibrium position. Finally, the tether settles down because of internal damping in the viscoelastic cable in a position along the local vertical. This process lasts very long, and methods of its speeding-

up have been developed. In [3], the pendulous oscillations are described, which arise with the primary deployment of a tether with a visco-elastic cable, and are damped by parametric pulling up the cable near the point of return of pendulous oscillations and deploying it again in the vicinity of the local vertical. This is the inverse process of parametric excitation of a pendulum. The linear feedback control helps to reach the final equilibrium more effectively as soon as the amplitude of pendulum oscillations becomes sufficiently small.

A controlled tension of a cable at the first stage of the deployment is considered in [4]. The description and analysis of various ways of the deployment of orbital tether systems with control of the deployment speed are described in [6, 10, 11, 13].

All scenarios of deployment of orbital tether systems with the control of the deployment speed have one common shortcoming. This is because, with such a control, it is impossible to execute damping of longitudinal oscillations of the tether, which arise due to its flexibility. Increasing the intensity of longitudinal oscillations can lead the tether to the loss of the tension. That, in turn, can result in the loss of control of its deployment or retrieval.

There are known ways of deployment of the orbital tether systems that provide the deployment of a cable with the regulation of its tension force. The basic advantage of these ways of deployment is the capability of direct damping of longitudinal oscillations of the tether during its deployment. A variety of different control strategies of such ways of deployment and devices for their realization are described in [16, 17, 19]. The time-optimal control problem for a simple system with a massless cable is solved in [24]. As a result, a bang-bang control law is found for the cable tension. It allows moving the subsatellite from a position of relative equilibrium along the local vertical to the same configuration at a significant distance from the mother spacecraft without essential deviation of the subsatellite from the local vertical and with a constantly taut cable. A deficiency of this method is the complexity of the practical realization of the tether tension regulation when the tension force is very small.

In the paper [4], a comprehensive investigation of the controlled deployment comparing six various scenarios is described. Based on the method of mul-

tiple shooting, the optimal controllers for the creation of a control force for the STS deployment and retrieval are developed in [23, 24]. The controller for the STS motion in the orbital plane is offered in [29], which shows a high computing efficiency. The paper [31] also compared the various functions of cost for the STS optimal control in the in-plane case. This research has been expanded later to the STS librations' control in elliptical orbits via tracing periodic trajectories of the libration [30].

The so-called "exponential" deployment is one of the most discussed deployment scenarios. This deployment has been adopted by many authors, starting with Eades [9]. As a rule, the exponential deployment is considered by the authors as an additional stage for the initial deployment. Such a deployment is discussed in detail in [6, 18] and in many other publications. It is defined in [6] as the deployment with a velocity that is proportional to the length of the deployed tether. For a circular orbit, the authors consider the law of time variation of the deployed tether length r in the form $r = r_0 \exp(-3/4 \omega t \sin 2\vartheta)$, where r_0 is the initial tether length, t is time, ω is the orbital angular velocity, ϑ is the tether pitch angle. The exponential deployment is defined in [18] as the deployment for which the deployed length is a function that grows exponentially with time from a certain value r_0 , which cannot be zero. The planar motion of a dumbbell shape with the exponential control of the length has been investigated in [14]. It was found that the tether can be deployed without rotation. When using the exponential law, the velocity of the tether's deployment reaches the maximum value at the end of deployment that leads to a jerk and increase in tension force. It can generate considerable longitudinal oscillations of the tether. Alternatives to the methods discussed here are the methods, which have been developed by Banerjee in Refs. [1, 2, 8].

The mechanical models of tethers in the plane of a circular orbit with the massless cable have only one control channel that may be used for change of the tether length. However, the number of its degrees of freedom equals two. The second degree of freedom corresponds to the tether rotational motion about the pitch axis. At such a statement of the problem, one can consider the tether as an underactuated mechanical system, in which the number of degrees of freedom is more than that of the control channels.

Ignoring this feature of the tether mechanical model with the massless cable led to a lack of the solution acceptable for the practice of deployment of a tether in the vertical position for a long time.

Control of underactuated systems is always a challenging problem. There is a series of studies where the problem of the build-up of controllers for such systems is considered. Here it is possible to note the publications [20] where the control is optimized, [21] in which an input shaping scheme to generate the control signal is offered, [22] where a partial feedback linearization method is used, and others. As regards the research of space tethers within the framework of the theory of underactuated mechanical systems, the authors may note the publication [27] where the tether is considered as an underactuated system. In this publication, the energy approach for controller development is used. Based on the analysis of the dynamics, an ingenious virtual signal is designed, and a control scheme is proposed using the system passivity. With the addressed virtual signal, the coupling behavior between the controllable tether length and uncontrollable in-plane angle is enhanced. Under the scheme, the uncontrollable in-plane angle can be controlled by using the coupled tether length.

One may avoid the difficulties of realization of the scenarios and complexities of the control laws for modes of deployment/retrieval of a tether in a circular orbit, described in [33], if to impose the additional constraints on the system reducing the number of its degrees of freedom. At this, the system ceases to be underactuated one, and the problem of creating the feed-forward control becomes essentially simpler. The constraints' structure should correspond to the parameters of the investigated mode. Its structure must consist of the suitable association of the pitch angle with time. It will be shown below how it works.

To avoid the shortcoming related to control of the speed of a cable or its tension, we will also show how to build up the laws of the cable's length control.

The total retrieval of a tether during one stage is of essential interest for practice. At that time, there should not be dangerous situations when the cable can be reeled on a spacecraft structure. Besides, if there is a safe possibility to carry out the total retrieval of a tether as fast as possible, it can be made without the attraction of the theory of optimum control. For this,

the restriction on a tether motion on the pitch angle should provide such trajectories of the end bodies for which velocity of decrease of the angular momentum of the tether will be maximal feasible. Further, we will show how it works.

2. MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM

Let us distinguish two basic types of tethers. The tethers consisting of space bodies with essentially different masses can be referred to the first type. For example, a small probe deployed from a large spacecraft. Tethers of two bodies having similar or equal masses can be referred to the second type.

Without loss of generality of the problem formulation, one can choose two equal point masses connected by an elastic massless cable as the tether mechanical model. The neglect of the sizes of the end bodies is well-grounded here because motion modes in which the cable can be reeled on the end bodies are not considered here. The neglect of the cable mass with respect to masses of the end bodies is quite substantiated for tethers with non-electroconductive cable made of modern light materials. This problem has been depicted in several publications, in particular in [12]. The authors have convincingly shown that the motion of tethers with the massive cable described by the differential equations in partial derivatives coincides with the motion of the tether with the massless cable. One may consider also that the center of gravity and mass center of a tether are matched. For example, these points are apart about 1 m when the length of a vertically located tether is equal to 5 km. This distance decreases at the rotation of the tether around the pitch axis. This distance is equal to zero rigorously when the pitch angle is equal to $\pi/2$. Thus, one can consider that the mass center of the tether is in a circular orbit.

Let us introduce the right-handed orbital frame of reference $Cx^{or}y^{or}z^{or}$ [5] for the convenience of a further description of the tether dynamics. In this coordinate frame, the Cx^{or} axis points from the Earth's center along the position vector of the mass center of the tether at its orbital motion, the Cz^{or} axis is normal to the orbital plane, and the Cy^{or} axis supplements this orthogonal triad. Note that the Cx^{or} and Cy^{or} axes correspond to the motion in the orbital plane, and the Cz^{or} axis corresponds to the motion out of this plane.

Let us choose the central Newtonian field of forces as the model of the gravity field. The position vectors $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ of the point masses relative to the point C can be defined by their projections in the orbital coordinate frame:

$$\mathbf{r}_1 = \{x_1^{or}, y_1^{or}, z_1^{or}\}, \quad \mathbf{r}_2 = \{x_2^{or}, y_2^{or}, z_2^{or}\}.$$

Let us choose these projections together with their time derivatives in the orbital reference frame as the phase variables of the problems. Then one can define the pitch angle as $\vartheta = \arctan 2(x_1^{or}, y_1^{or})$, where the index «1» determines the upper body in the initial instant of time. Figure 1 shows the mechanical model of the tether with two equal masses in the orbital frame of reference.

Now, one can describe the dynamic model of the system in the view by Hill-Clohessy-Wiltshire (HCW) [7] equations (1), which govern the motion of end point masses relative to the mass center of the tether. Following the traditional derivation, assuming the orbit eccentricity equal to zero, and taking into account the tether tension, the HCW equations can be written as follows:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = & \left\{ 2\omega^{or} \frac{dy_i^{or}}{dt} + 3(\omega^{or})^2 x_i^{or} - Te_{ri}(1)/m_i - \right. \\ & \left. - 2\omega^{or} \frac{dx_i^{or}}{dt} - Te_{ri}(2)/m_i - \right. \\ & \left. - (\omega^{or})^2 z_i^{or} - Te_{ri}(3)/m_i \right\}, \quad (i=1,2). \end{aligned} \quad (1)$$

Here $e_{ri}(1), e_{ri}(2), e_{ri}(3)$ ($i=1,2$) are the directing cosines of the position vectors of point masses in the orbital frame of reference; m_i ($i=1,2$) are the masses of the end bodies; T is the force of the cable tension; ω^{or} is the angular rate of motion in the circular orbit. For numerical simulation, using this system of twelve differential equations of the first order, one should know the expression for the force of tension T at each instant of time. It will be shown below how to find this force.

3. SCENARIO OF THE TETHER RETRIEVAL

Let us consider further the problem of the total retrieval of the tether of two bodies with the massless elastic cable aligned to the local vertical at the be-

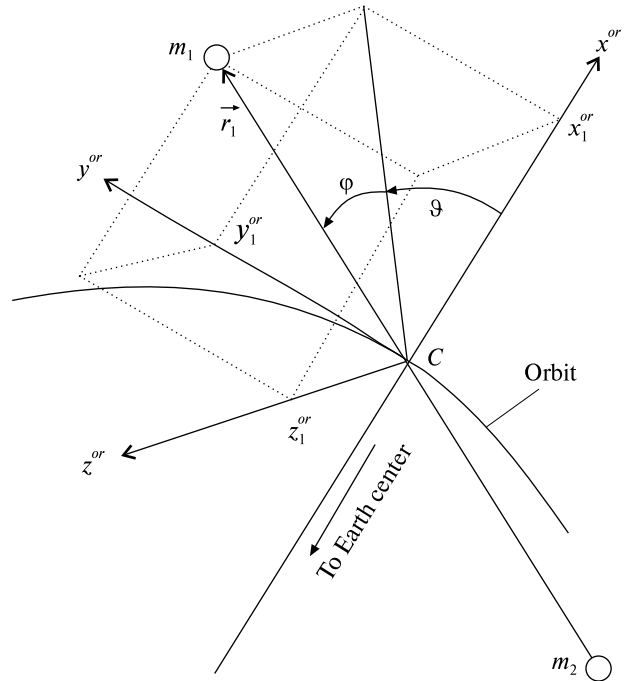


Fig. 1. Mechanical model of tether

ginning. Now, it is necessary to construct the expression for the constraints applied to the directly uncontrollable variable, which is the pitch angle ϑ . Let us consider the tether length (distance between the centers of the end bodies taking into account elastic deformations) as its control variable. From the physical point of view, the required control should ensure decrease of the angular momentum of the retrieved tether relative to the Cz^{or} axis

$$K_3^C(t) = 2mr^2 \left(\omega^{or} + \frac{d\vartheta}{dt} \right)$$

practically to zero. The theorem on change of the angular momentum in the integral form looks like [12]

$$\mathbf{K}^C(t) = \mathbf{K}^C(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{m}^C(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Expression for the gravitational torque, which determines the angular motion of the tether in the considered case, can be written as

$$\mathbf{m}^C(t) = \left[0, 0, -3mr^2 \left(\omega^{or} + \frac{d\vartheta}{dt} \right)^2 \sin 2\vartheta \right]. \quad (3)$$

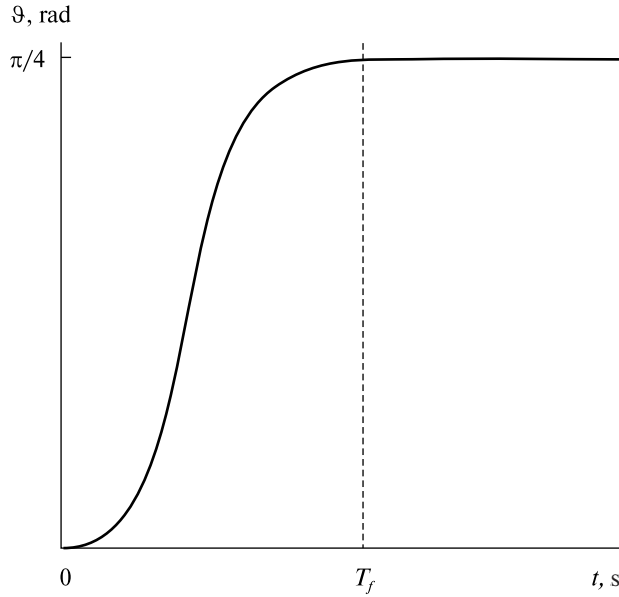


Fig. 2. Crude time history of pitch angle

Obviously that the gravitational torque is maximal at $\vartheta = \pi/4$ at any values r , ω^{or} , and $\frac{d\vartheta}{dt}$. Therefore, for the fastest retrieval of the tether, it is logical to choose such a mode of change of the pitch angle, at which the tether appears inclined under angle $\vartheta = \pi/4$ as fast as possible, and the pitch angle remains constant to the end of retrieval. Such a position of the tether also prevents the cable winding on the spacecraft-carrier or rotation of the tether of two bodies of a similar mass at the end of the mode. Let the pitch angle appear on the indicated constant value at $t = T_f$, where t is time in seconds, read out from the beginning of the retrieval mode. Let us consider further the conditions with which the time history of the pitch angle should satisfy, taking into account the previously mentioned information.

As the tether is motionless with regard to the local vertical at the initial instant of time, and the pitch angle becomes constant at the instant of time T_f , the following conditions should be satisfied:

$$\vartheta(0) = 0, \quad \vartheta(T_f) = \pi/4, \quad (4)$$

$$\left. \frac{d\vartheta}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{d\vartheta}{dt} \right|_{t=T_f} = 0. \quad (5)$$

Now, one can imagine the time history of the pitch angle $\vartheta(t)$ crude, as Fig. 2 shows.

Actually, determined part of the $\vartheta(t)$ law is that its part, for which $t \leq T_f$. The following additional conditions should be satisfied at retrieval of the tether from the initial length L_0 to its length L_f at the instant of time T_f :

$$L(0) = L_0, \quad L(T_f) = L_f. \quad (6)$$

The first of these conditions is fulfilled in advance; the second one may be used further for the determination of the unknown in advance instant of time T_f . Its value will allow choosing the suitable solution of the problem from the manifold of solutions obtained for various T_f values.

One more condition follows from the requirement of constancy of the tether length at the initial instant of time:

$$\left. \frac{dL}{dt} \right|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

The occurrence of jumps of the cable tension is inadmissible both at the terminal instant of the maneuver and throughout all maneuver duration as they can lead to the disappearance of the cable tension. The adopted mechanical model will be inadequate in such a case. The absence of tension jumps at the initial instant of time is reached when the following condition is met:

$$\left. \frac{d^2L}{dt^2} \right|_{t=0} = 0. \quad (8)$$

This condition follows directly from the equation of motion of the tether along the cable in the spherical co-ordinates [14] (the case of motion in the orbital plane), which one can write in the symbols adopted here as follows:

$$\frac{d^2L}{dt^2} = L \left[\left(\frac{d\vartheta}{dt} + \omega^{or} \right)^2 + 3(\omega^{or})^2 \cos^2 \vartheta - (\omega^{or})^2 \right] - 2 \frac{T}{m}. \quad (9)$$

Really, under the conditions (4), (5)

$$\frac{d^2L}{dt^2} = L \left[3(\omega^{or})^2 - 2 \frac{T}{m} \right] = 0. \quad (10)$$

Now it is necessary to build up such a control law of the tether length $L(t)$, which allows to solve the

problem in view and completely to retrieve the tether “from rest into rest”. To obtain the necessary control law, one can use the theorem on the change of the tether angular momentum. The more simple way is using the equation of the pitch angular motion for a tether of a variable length. Following [14], one can write the equation of the angular motion of the tether in the orbital plane in the following form:

$$\frac{d^2\vartheta}{dt^2} + 2\left(\frac{d\vartheta}{dt} + \omega^{or}\right)\frac{dL}{dt} / L + 3(\omega^{or})^2 \sin\vartheta \cos\vartheta = 0. \quad (11)$$

After elementary transformations of the equation (11), one can obtain the ordinary differential equation of the first order with the corresponding initial condition:

$$\frac{dL}{dt} = -L \frac{3(\omega^{or})^2 \sin 2\vartheta + 2d^2\vartheta/dt^2}{4(\omega^{or} + d\vartheta/dt)}, \quad L(0) = L_0. \quad (12)$$

When the law $\vartheta(t)$ is known, the solution of the Cauchy problem (12) has the following form:

$$L(t) = L_0 \exp \left[- \int_0^{T_f} \left(\frac{3(\omega^{or})^2 \sin(2\vartheta(\tau)) + 2d^2\vartheta(\tau)/d\tau^2}{4(\omega^{or} + d\vartheta(\tau)/d\tau)} \right) d\tau \right]. \quad (13)$$

Using the equation (12) and conditions (4) and (7), one can obtain one more constraint for the pitch angle:

$$\left. \frac{d^2\vartheta}{dt^2} \right|_{t=0} = 0. \quad (14)$$

As the pitch angle becomes constant on the range of time $t \geq T_f$, and all its time derivatives vanish, it is possible to consider that the following conditions are satisfied

$$\left. \frac{d^2\vartheta}{dt^2} \right|_{t=T_f} = 0, \quad \left. \frac{d^3\vartheta}{dt^3} \right|_{t=T_f} = 0. \quad (15)$$

At last, after time differentiation of the equation (12) using already found constraints for $\vartheta(t)$, the following constraint may be added:

$$\left. \frac{d^3\vartheta}{dt^3} \right|_{t=0} = 0. \quad (16)$$

Thus, one can use eight conditions (4), (5), (14), (15), and (16) for the construction of the program law $\vartheta(t)$.

One can obtain various laws $L(t)$ of change of the tether length setting various values of the parameter T_f .

Then one law may be selected from this manifold of solutions, which corresponds to the set final length of the tether, does not lead to loss of the cable tension during retrieval and meets other introduced requirements.

Necessary law $\vartheta(t)$ may be presented in the form of any finite functional series, and its factors can be found from the above established eight conditions. For example, by analogy with work [33], let us compose the law $\vartheta(t)$ in the form of the power series of seventh degree:

$$\vartheta(t) = \sum_{i=0}^7 c_i \left(\frac{t}{T_f} \right)^i. \quad (17)$$

Then using eight conditions (4), (5), (14), (15), and (16), one can obtain the system of linear algebraic equations of eight order WRT c_i ($i = 0, 1, \dots, 7$), which have the unique solution in the case under consideration. This solution is:

$$\begin{aligned} c_0 &= 0; \quad c_1 = 0; \quad c_2 = 0; \quad c_3 = 0; \\ c_4 &= 35\pi / (4T_f^4); \quad c_5 = -21\pi / T_f^5; \\ c_6 &= 35\pi / (2T_f^6); \quad c_7 = -5\pi / T_f^7. \end{aligned} \quad (18)$$

The law $L(t)$ obtained according to the expression (13) depends on the law $\vartheta(t)$, which, in turn, depends on the instant of time T_f of increasing the pitch angle to a constant value, duration of the retrieval mode, and the orbital radius. It is essential to note that the obtained law $L(t)$ is always unique under the given form of function and constraints because of the uniqueness of the solution (18).

Hereby, the following contributions of the main problem, which is solved, were made to the development of the scenario of the total tether retrieval:

- the new approach is offered to control build-up for the underactuated mechanical systems, reducing the number of their degrees of freedom and simplifying build-up of the law of control;
- the law of control of tether length is offered and built up;
- the constraints on the tether motion about the pitch axis are formulated, which allow us to make the retrieval mode safe and comprehensible to practice;
- the original trajectory of motion of the tether bodies is offered whose main path segment is located on a straight line (in the orbital basis), inclined at the pitch angle $\pi/4$.

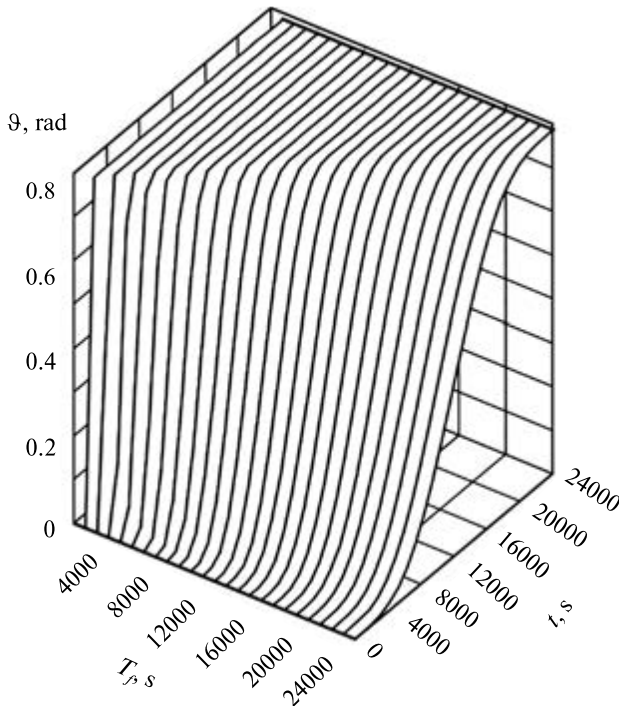


Fig. 3. Pitch angle vs. time and parameter T_f

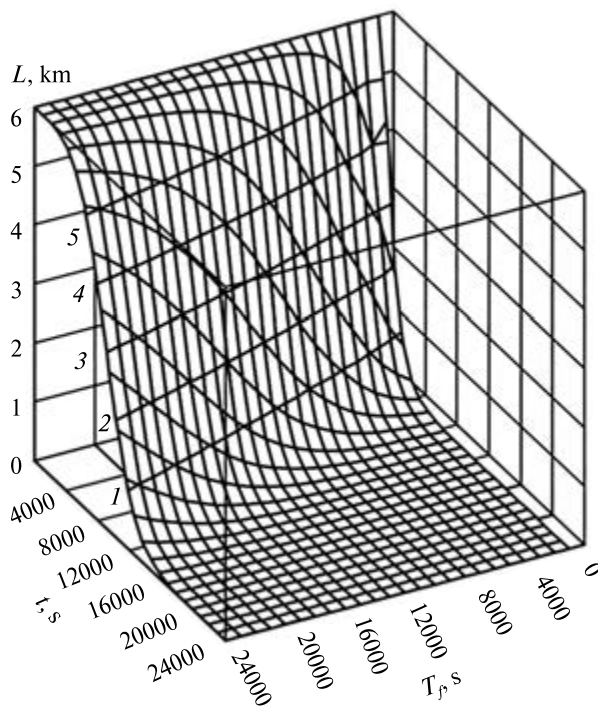


Fig. 4. Length of tether vs. time and parameter T_f

- the simple algorithm of the build-up of the control law is stated.

4. NUMERICAL RESEARCH

Let us consider now the practical realization of the proposed method of construction of the feed-forward control for the retrieval mode of a tether, which at the mode beginning is aligned to the local vertical. Let us choose the following values of the tether parameters for the simulation:

Let us show further how to find the law $L(t)$, which solves the problem in view.

Figure 3 shows how the law $\vartheta(t)$ calculated according to the formula (17) depends on various values of the parameter T_f . Each line in this plot corresponds to the separate value of the parameter T_f . The plot shows that the form of the curve $\vartheta(t)$ varies slightly with T_f change, being extended only along the time axis. In order to estimate the acceptability of this or that law of the program motion, it is necessary to build up the program law of the time history of the tether length $L(t)$. One can obtain this law solving the Cauchy problem (12) for a number of values T_f at known law $\vartheta(t)$. As a result, one can obtain the relations shown in Fig. 4. This Figure shows that the length to which the tether may be retrieved at the instant of time $t = T_f$, decreases when the parameter T_f increases. So, at $T_f = 1000$ s, the tether may be retrieved to 4481.01 m, at $T_f = 2000$ s — to 2985.75 m, whereas at $T_f = 24000$ s the tether may be retrieved to 0.12 m.

Nevertheless, the gravitational torque acting on the tether at $t > T_f$ becomes the maximum possible, and the tether retrieval occurs with the maximum possible speed.

As a result, it appears that the faster the tether will be inclined to value the pitch angle equal to $\pi/4$, the faster the tether will be retrieved completely. Figure 4

Table 1. Tether parameters

Parameter	Value
Masses of the end bodies are identical	10 kg
Initial length of the tether	6000 m
Longitudinal rigidity of the cable	5000 N
Orbital radius	7000 km

also shows that the shape of the control function $L(t)$ becomes smoother with T_f increase. The isolines on the surface $L = L(T_f, t)$ are marked according to lengths of the retrieved tether from one to five km. The analysis of these isolines shows that one can retrieve the tether to the set length at different values of the parameter T_f , however the less this parameter, the less time required for retrieval.

The dependence of the final length of the tether in meters after the end of the retrieval on the value of the parameter T_f and duration of the retrieval process is shown in Fig. 5. Isolines from one to four meters are also put here. They confirm the conclusion based on the analysis of isolines in Fig. 4.

The speed of change of the length $L(t)$ vs. the parameter T_f value and duration of the mode of retrieval is shown in Fig. 6. Here one may see that the speed $V(t)$ at the chosen parameters of the tether can be sign-variable when the end body trajectory goes into the line $\vartheta(t) = \pi/4$ at small values of the parameter T_f . It complicates the program control law essentially as there are time intervals in which the length of the tether temporarily increases. The control becomes complicated, but the results of several last trajectories practically do not differ. Thus, the increase in the parameter T_f can be alternative to the control law complication. The areas like the one shown in the right forward corner in Fig. 6 are of little use for the construction of the programmed control for the mode of the tether retrieval.

The behavior of trajectories of the tether end bodies at the duration of the retrieval $T_r = 24000$ s and various values of the parameter T_f is shown in Fig. 7. The trajectories of the upper end body of the symmetric tether are shown here in the orbital frame. One can see in this plot how the shape of the trajectory changes when the parameter T_f increases. The trajectory of the end body becomes more complex with T_f growth, and there are time intervals where the length of the tether increases temporarily. The control becomes more complex at that, but results of retrieval along a few last trajectories practically do not differ. Hence, one can draw the conclusion that the alternative to the control law complication is the increase of the maneuver duration.

This trajectory becomes either very difficult for realization because of the necessity of switching the

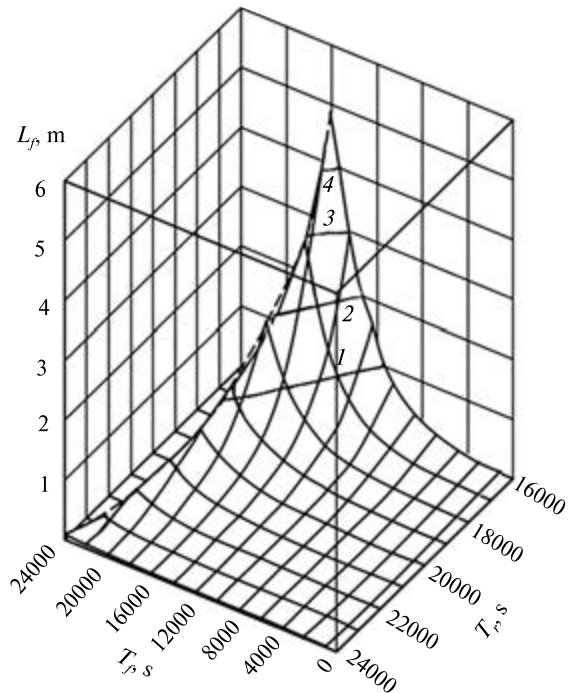


Fig. 5. Final length of tether vs. duration of retrieval T_r and parameter T_f

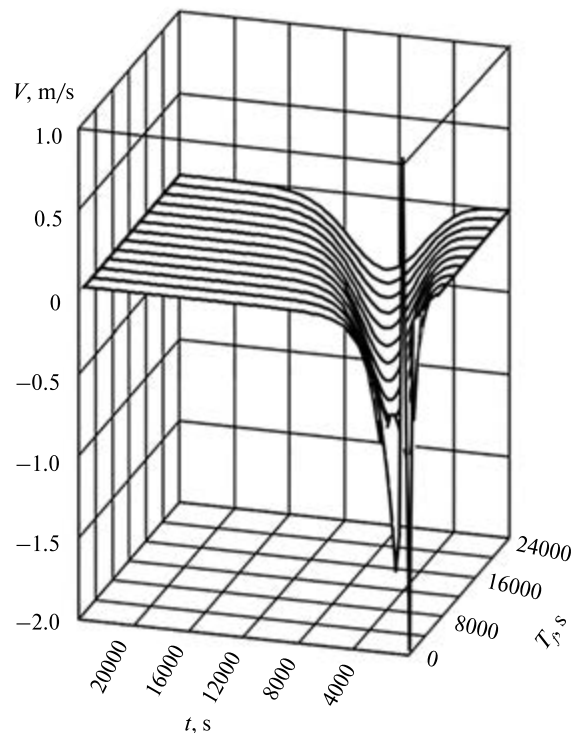


Fig. 6. Speed of change of tether length vs. time t and parameter T_f

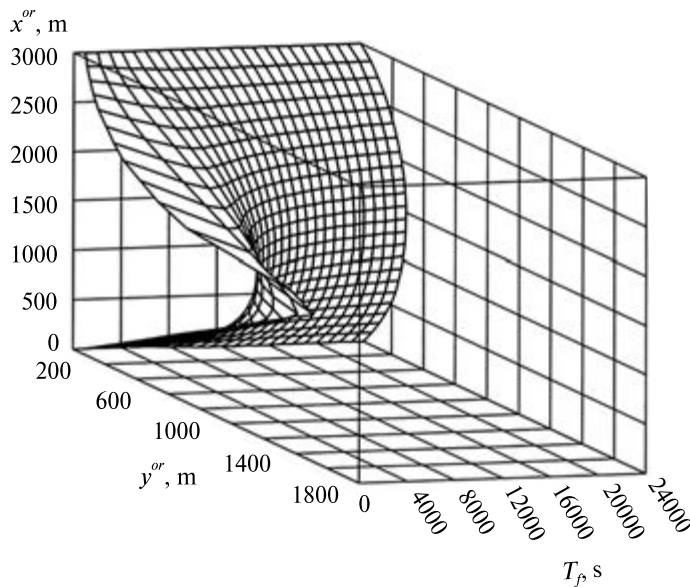


Fig. 7. Trajectories of end bodies at the duration of retrieval $T_r = 24000$ s and various values of the parameter T_f

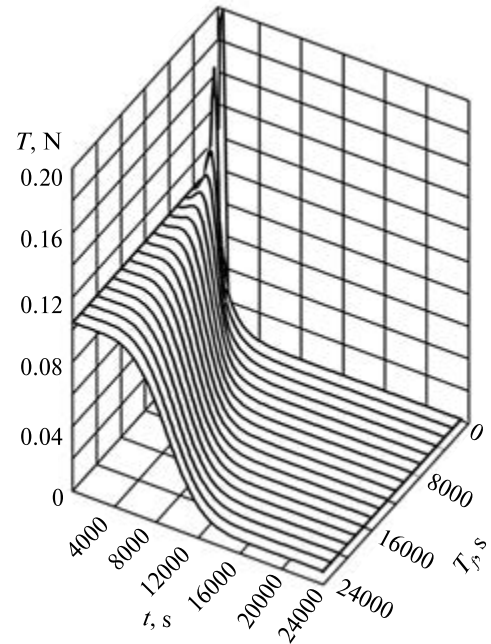


Fig. 8. Tension force vs. time t and parameter T_f

speed sign or not realized at values of the parameter T_f smaller than 1500 s. The trajectory of the end body becomes smoother when T_f increases more than 1500 s. Thus, as it has been told, the increase of duration of the maneuver can be the alternative to the control law complication.

An indispensable condition of the realizability of the maneuver of the tether under consideration is the tension of the cable during the entire time of its retrieval. One can find the dependence of the tension force in the cable on time using Eq. (9) when the law of change of the tether length $L(t)$ is known.

The dependence of the tension force in the cable on time is shown in Fig. 8 at various values of the parameter T_f . At $t = 0$, the force of tension is determined from the condition (10). The cable tension is increased at the beginning of the process of retrieval because of overcoming forces of inertia of the end bodies. Naturally, the intensity of this increase is determined by the value of the parameter T_f — the less this parameter, the faster the tether tilts, and, hence, the faster its length decreases. Thus, the behavior of the tension force of the cable becomes essentially more complex in those ranges of the parameter T_f

values, where there are time intervals, at which the cable is extended. Thus, the tension decreases at first, when the cable is let out, and then sharply increases when the cable starts to shorten over again. The curve $T(t)$ shown in the foreground corresponds to the force of the cable tension during retrieval when the parameter T_f is equal to 24000 s.

Let us consider further the tether behavior at its total retrieval.

If one chooses the co-ordinates of the end bodies and their first time derivatives in the orbital frame of reference as phase variables of the problem, one can introduce the program force of tension $T(t)$ into the model as the control, which can be calculated on each step of integration, using the equation (9). Program values $L(t)$ can be obtained on each step of integration of the Cauchy problem for equations (12). The first time derivative of $L(t)$ can be determined from (12) after substitution there the expressions for $\mathcal{Q}(t)$ and its time derivatives. As a result, one can obtain the expression for tension force $T(t)$, which can be used at numerical integration of the Cauchy problem for HCW equations with help of the computing program written in the FORTRAN. The HCW equa-

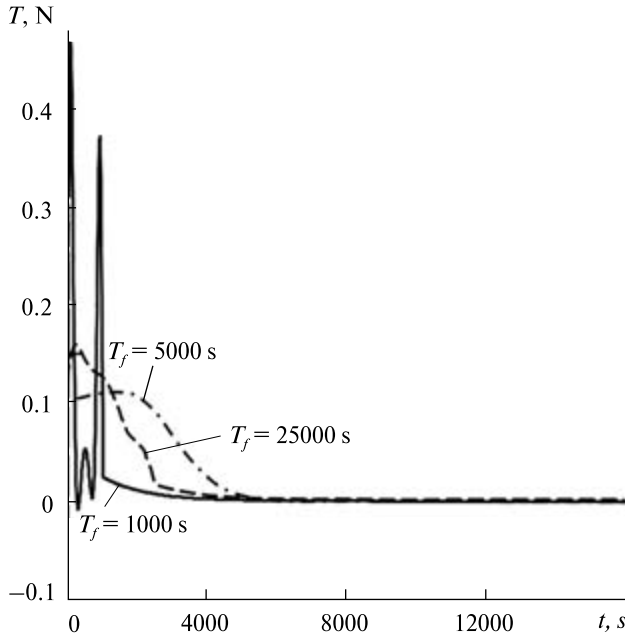


Fig. 9. Tension force $T(t)$ vs. parameter T_f and time t at duration $T_r = 16000$ s

tions and Eq. (12) were programmed for the numerical solution with a Runge — Kutta integration routine of fifth order with a constant step of integration equal to 0.1 s. Using steps of integration 0.2 s and 0.05 s has resulted in the divergence of $L(T_r)$ values about 2—3 mm.

The behavior of the tension force $T(t)$ for three various values of the parameter T_f is shown in Fig. 9 for the case when the duration of retrieval $T_r = 16000$ s. Here one may see that for $T_f = 1000$ s at the time interval close to the initial instant (from $t = 260$ s to $t = 320$ s), the tether tension becomes negative, indicating the inadequacy of the adopted model of the tether for such a value of the parameter T_f and all its smaller values. (Calculations have shown that already at $T_f = 1030$ s, such intervals in the case under consideration are absent). The time history of change of the tension force $T(t)$ resulted in the plots for two other values of the parameter T_f (they are shown by dotted and stroke-dotted curves) has smooth enough character and indicates adequacy of the adopted mechanical model.

The time history of the distance $L(t)$ between the end bodies and the speed of change of this distance $S(t)$ is shown in Fig. 10 also for three various values

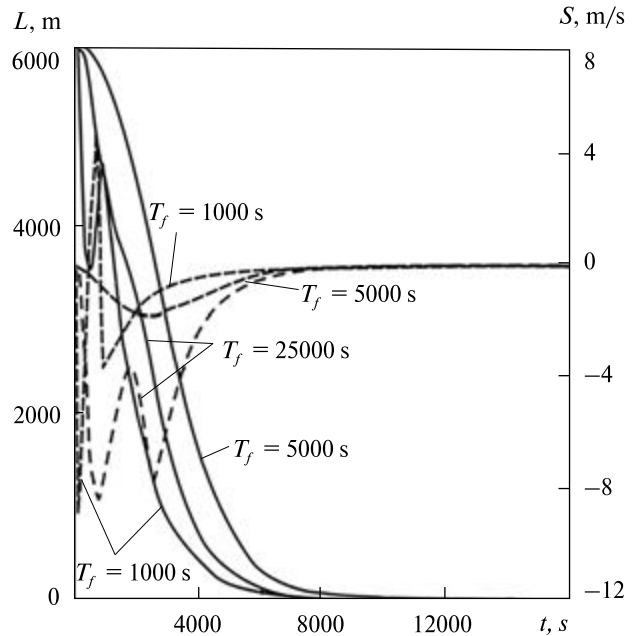


Fig. 10. Tether length $L(t)$ and speed of its change $S(t)$ vs. time t

of the parameter T_f at the duration of the retrieval $T_r = 16000$ s. The curves $L(t)$ are shown by solid lines, curves $S(t)$ — by dotted ones. One may see here how the time histories of these values essentially vary as far as the parameter T_f increases. The occurrence of the range of time where the speed $S(t) > 0$ is visible at $T_f = 1030$ s, i.e., the cable is unreeled here. Such ranges are absent at $T_f = 2500$ s, the curve $L(t)$ has a smooth shape, though the curve $S(t)$ is difficult enough for the realization. The maximum value of the speed of winding of the cable does not surpass 4 m/s. Both curves become smooth at $T_f = 5000$ s. The maximal speed of winding of the cable does not surpass 1.63 m/s. Thus, a choice of the value of the parameter T_f proper for realization of the programmed control is defined by requirements to the duration of the mode and by the parameters of the system realizing the control law. Figure 11 shows the trajectories of the tether end bodies in the orbital frame for three different values of the parameter T_f , which defines the instant of entry of the trajectory on a straight line $x^{or} = y^{or}$. The trajectories differ in the shape and complexity of realization, as described in the comments to Fig. 9. The fastest retrieval occurs along the trajectory, which reaches the line $x^{or} = y^{or}$ at $T_f = 1030$ s.

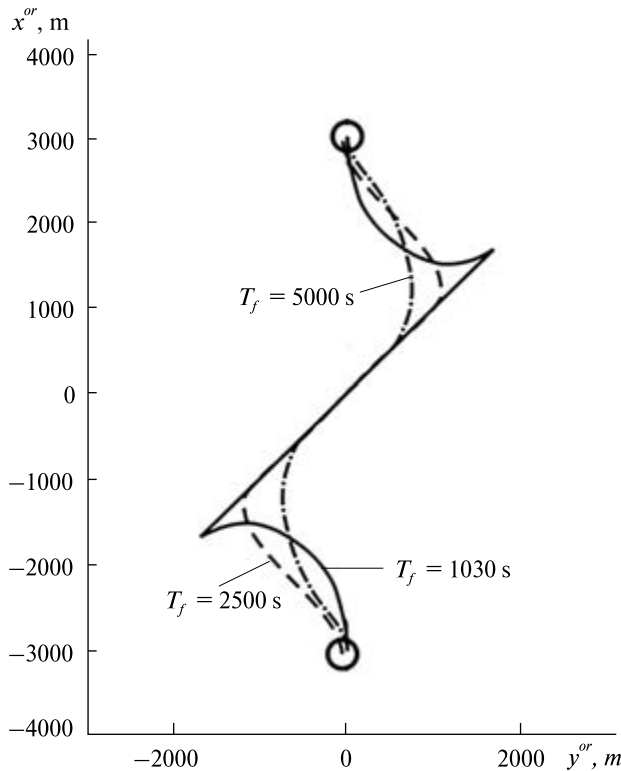


Fig. 11. Trajectories of end bodies in orbital frame

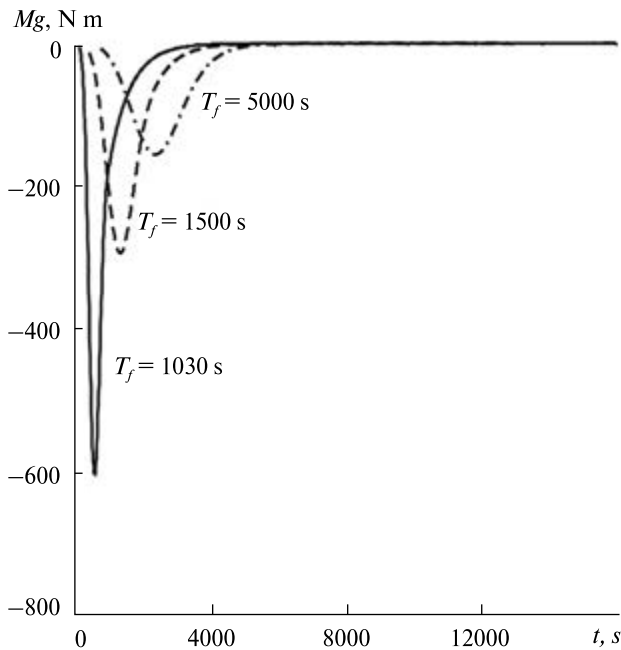


Fig. 12. Time history of gravitational torque

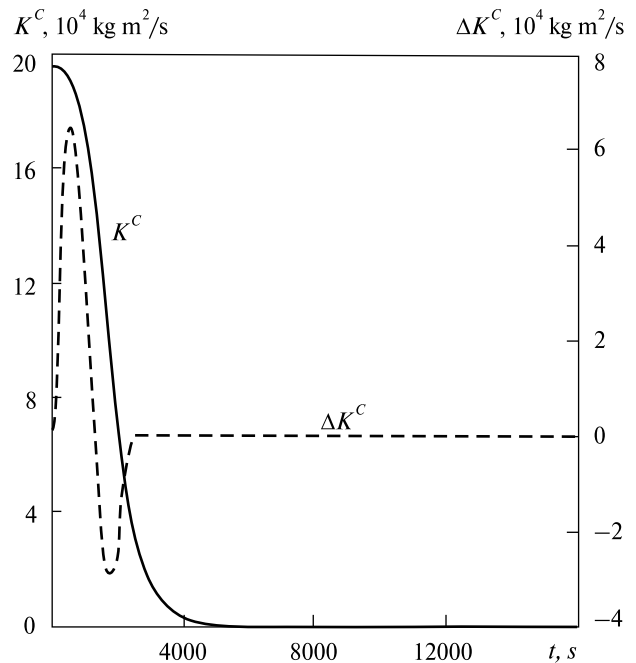


Fig. 13. Magnitude of angular momentum vector of tether and errors of integration

Figure 12 shows the time history of the gravitational torque acting on the tether in the mode of retrieval (see Eq. (3)) for different values of the parameter T_f .

These plots illustrate the fact that the earlier the pitch angle ϑ becomes equal to $\pi/4$, the more rapidly the angular momentum of the tether decreases, and, hence, the more promptly the tether retrieves. Really, the areas of the curves $M_g(t)$, which correspond to the integral in the right part of the Eq. (2), are equal numerically to the total tether angular momentum just before the beginning of retrieval. At time integration, $M_g(t)$ grows the more rapidly, the less value of the parameter T_f for the trajectory.

The stepwise refinement has been introduced into the computing program for taking into consideration the elasticity of the cable when calculating the tension force. Really, the distance from point C to the end body for the flexible cable is:

$$r(t) = r_p(t) + \Delta r(t).$$

Here, $r_p(t)$ is the program law of $r(t)$ change. In turn, $\Delta r(t) = T r_p / EF$ is the cable elongation according to Hook's law. Therefore, the quasistatic character of the retrieval mode has been taken into

account at calculation T , and the updating has been introduced into the calculation of the program law $r_{pe}(t) = r_p(t) - \Delta r(t)$. The value of $\Delta r(t)$ calculated at the previous step of integration was used as its current value. The step of integration is equal to 0.1 s.

The numerical integration of the Cauchy problem was performed under the monitoring of compliance of the output with the theorem on the change of the tether angular momentum. The magnitude of the angular momentum vector was calculated in two ways. The current values of the phase variables of the initial value problem (1) were used for its evaluation in the first case. In the second one, it was calculated on the basis of the theorem on the change of the tether angular momentum (Eq. (2)). Computational results are shown in Fig. 13. Here the magnitude of the angular momentum vector, calculated using the phase variables values, is shown by the solid line, difference of its evaluation using (2) is shown by the dotted line. Obviously, such errors of evaluations are negligible for practice.

5. CONCLUSIONS

Summing up, it is possible to say that the new approach to the solution of the problem of total and safe retrieval of the vertically aligned elastic space tether of two bodies in a circular orbit is advanced, theoretically proved, and checked up numerically here. This approach is based on the program control of the tether length with the use of the gravitational torque for the tether pitch angle control. From the physical point of view, the purposeful change of the angular momentum of the tether is proposed at the expense of its interaction with the gravitational field, allowing satisfying a lot of additional requirements to the quality of the dynamic processes in the elastic space system. From the point of view of the control theory,

the new approach to the control construction is advanced for the underactuated mechanical systems, which have the number of the control channels less than that of the degrees of freedom. Here it is offered to impose constraints on the system motion about the pitch axis, which allows realizing the set mode of motion at control only of the remaining degree of freedom reducing the number of the degrees of freedom of the system. The character of the constraints for the admissible law of change of the pitch angle with time is defined by the requirements shown to the executed mode of formation of the programmed control. These requirements allow retrieving of the tether of two bodies without excitation of longitudinal oscillations because the obtained control law is very smooth vs. time and does not contain features, which can call such oscillations. The led example of the application of the stated approach to the case of retrieval of the particular tether demonstrates the simplicity of use of this method in practice.

Acknowledgements

This research has been supported by “The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.3102017JC06002)” and “Key Technology R&D Program of Shaanxi (2017KW-ZD-04)”.

Conflict of interest Statement

We declare that we have no financial and personal relationships with other people or organizations that can inappropriately influence the work. There is no professional or other personal interest of any nature or kind in any product, service and/or company that could be construed as influencing the position presented in, or the review of the work. On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

REFERENCES

1. Banerjee A. K., Kane T. R. (1982). Tether deployment dynamics. *J. Astronaut. Sci.*, **30**, 347—366.
2. Banerjee A. K., Kane T. R. (1984). Tethered satellite retrieval with thruster augmented control. *JGCD*, No.7, 45—50.
3. Barkow B. (2003). Controlled deployment of a tethered satellite system. *Proc. in Appl. Math. and Mech.*, **2**, 224—225. <https://doi.org/10.1002/pamm.200310097>
4. Barkow B., Steindl A., Troger H., Wiedermann G. (2003). Various methods of controlling the deployment of a tethered satellite. *J. Vibration and Control.*, **9**, 187—208.
5. Beletsky V. V. (1966). *Motion of an artificial satellite about a center of mass*. Jerusalem: Israel Programm for Scientific Translations.
6. Beletsky V. V., Levin E. M. (1993). *Dynamics of space tether systems*. San Diego: Univelt.
7. Clohessy W. H., Wiltshire R. S. (1960). Terminal guidance system for satellite rendezvous. *JGCD*, **27**, 653—658.
8. Davis W. R., Banerjee A. K. (1990). Yo-yo rate control of a tethered satellite using angle measurement. *JGCD*, **13**, 370—374.
9. Eades J. B. Jr., Wolf H. (1972). Tethered Body Problems and Relative Motion Orbit Determination. *Analytical Mechanics Associates Contract NASA-CR- 132780: Final Report*. NASA.
10. Levin E. M. (1983). On deployment of lengthy tether in orbit. *Kosmicheskie issledovanija*, **21**, 678—688 [In Russian].
11. Levin E. M. (2007). *Dynamic Analysis of Space Tether Missions*. San Diego: Univelt.
12. Lur'e A. I. (2002). *Analytical Mechanics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-45677-3>.
13. Modi V. J., Misra A. K. (1978). Deployment dynamics of tethered satellite systems. *AIAA Paper*, 1—10.
14. Padgett D. A., Mazzoleni A. P. (2007). Analysis and design for nospin tethered satellite retrieval. *JGCD*, **30**, 1516—1519. <https://doi.org/10.2514/1.25390>
15. Patent of UA 99303 U Int. Cl. B 64 G 1/34(2006/01). Zakrzhevskii A. E., Tkachenko Ya. V., Alpatov A. P. (2015). Method of deployment of a space bodies tether with alignment to the local vertical.
16. Patent of US Int. Cl. B 64 G 1/00, US Cl. Swet C. J. (1970). Method for deployment and stabilizing orbiting structures, 244—1.
17. Patent of US Int. Cl. B. 64 G 1/100, US Cl. 244/167; 244/161. Rupp C. C., Kissel R. R. (1978). Tetherline system for orbiting satellites.
18. Pelaez J. (1995). On the dynamics of the deployment of a tether from an orbiter. 2. Exponential deployment. *Acta astronautica*, **36**, 313—335.
19. Rupp C. C., Laue J. H. (1978). Shuttle/tethered satellite system. *J. Astronaut Sci.*, **26**, 1—17.
20. Sakawa Y., Shindo Y. (1982). Optimal control of container cranes. *Automatica*, **18**, 257—266.
21. Singhose W., Kim D., Kenison M. (2008). Input shaping control of doublependulum bridge crane oscillations. *J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **130**, 1—7.
22. Spong M. (1994). Partial feedback linearization of underactuated mechanical systems. *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Munich, Germany, 314—321.
23. Steindl A., Steiner W., Troger H. (2005). Optimal control of retrieval of a tethered subsatellite. *Solid Mechanics and its Applications*, **122**, 441—450. https://doi.org/10.1007/1-4020-3268-4_41
24. Steindl A., Troger H. (2003). Optimal control of deployment of a tethered subsatellite. *Nonlinear Dynamics*, **31**, 257—274. <https://doi.org/10.1023/A:1022956002484>
25. Steiner W., Steindl A., Troger H. (1995). Center manifold approach to the control of a tethered satellite system. *Appl. Math. and Comput.*, **70**, 315—327. [https://doi.org/10.1016/0096-3003\(94\)00111-G](https://doi.org/10.1016/0096-3003(94)00111-G).
26. Wang C. Q., Fu L. C., Zabolotnov Y. M., et al. (2019). Matrix decomposition based control for space tether system with incomplete state feedback. *J. Beijing Univ. Aeronautics and Astronautics*, **45**, 902—911 [In Chinese].
27. Wang C., Li G., Zhu Z. H., Aijun L. (2016). Mass ratio of electrodynamic tether to spacecraft on deorbit stability and efficiency. *JGCD*, **39**, 2192—2198.
28. Wiedermann G., Schagerl M., Steindl A., Troger H. (1999). Computation of Force Controlled Deployment and Retrieval of a Tethered Satellite System by the Finite Element Method. *Proceedings of ECCM'99*. Ed. W. Wunderlich, 410—429.
29. Williams P. (2004). Application of pseudospectral methods for receding horizon control. *JGCD*, **27**, 310—314. <https://doi.org/10.2514/1.5118>
30. Williams P. (2006). Libration control of tethered satellites in elliptical orbits. *JSR*, No. 3, 476—479. <https://doi.org/10.2514/1.17499>
31. Williams P., Trivailo P. (2005). On the optimal deployment and retrieval of tethered satellites. *The 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Tucson, 10. 10—13 July,
32. Xing-wang G., Ai-jun L., Yang-yang G., Chang-qing W., et al. (2018). Fractional order attitude stability control for sub-satellite of tethered satellite system during deployment. *Appl. Math. Modelling*, **62**, 272—286.

33. Zakrzhevskii A. E. (2016). Method of deployment of a space tethered system aligned to the local vertical. *J. of Astronaut Sci.*, **63**, 221–236. [https://doi.org/ 10.1007/s40295-016-0087-z](https://doi.org/10.1007/s40295-016-0087-z)
34. Zhang F., Huang P. (2019). A novel underactuated control scheme for deployment/ retrieval of space tethered system. *Non-linear Dynamics*, **95**, 3465–3476.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2020
Після доопрацювання 24.11.2020
Прийнято до друку 30.08.2021

Received 24.11.2020
Revised 24.11.2020
Accepted 30.08.2021

А. П. Алпатов¹, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, проф.

<https://orcid.org/0000-0003-4411-2250>

E-mail: aalpatov@ukr.net

Ван Чанцин², проф.

[https://orcid.org/ 0000-0002-1358-7731](https://orcid.org/0000-0002-1358-7731)

E-mail: wangcq@nwpu.edu.cn

О. Є. Закржевський³, д-р техн. наук, проф.

<https://orcid.org/0000-0003-2106-2086>

E-mail: alex.e.zakr@gmail.com

¹ Інститут технічної механіки Національної академії наук України

і Державного космічного агентства України

вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

² Північно-західний університет 1

127 YouyiXilu, Xi'an 710072 Shaanxi, Китай

³ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

і Державного космічного агентства України

Просп. Академіка Глушкова 40, к. 4/1, Київ, Україна, 03187

ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ ПОВНИМ ЗГОРТАННЯМ КОСМІЧНОЇ ЗВ'ЯЗКИ З ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕННЯ

Представлено результати досліджень повного та безпечного згортання космічної зв'язки двох тіл, з'єднаних пружним невагомим тросом. Мета дослідження полягає у побудові програмного керування для режиму повного та безпечного згортання зв'язки, який є одним з основних режимів її функціонування. Це дозволяє створити закон керування довжиною або натягом зв'язки, який забезпечує необхідну зміну кінетичного моменту зв'язки під дією гравітаційного моменту. Новизна результатів дослідження полягає також у новому підході до керування малоприводними механічними системами, у яких кількість каналів керування менша за кількість ступенів свободи. Введено обмеження на кутовий рух зв'язки щодо осі тангажу. Вони скорочують кількість ступенів свободи системи та дозволяють реалізувати необхідний спосіб руху. Для такого керування використовується тільки ступінь свободи, що залишається. Чисельне моделювання впливу параметрів режиму на динаміку зв'язки виконано для обраних діапазонів параметрів. Чисельний приклад демонструє простоту застосування методу на практиці.

Ключові слова: пружна космічна зв'язка, малоприводна механічна система, згортання, програмне керування.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.05.086>

УДК 52: 523.4+535.2

М. А. БАЛИШЕВ¹, директор, канд. істор. наук

E-mail: m.a.balyshev@gmail.com

Ю. Ю. КОВАЛЬ², аспірантка

E-mail: k.yuliia19@gmail.com

¹Центральний державний науково-технічний архів України

вул. Москалівська 139, Харків, Україна, 61157

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова 2, Харків, Україна, 61002

УЧАСТЬ ХАРКІВСЬКОЇ АСТРОНОМІЧНОЇ ОБСЕРВАТОРІЇ ТА ЇЇ ПРЕДСТАВНИКІВ У РАДЯНСЬКІЙ КОСМІЧНІЙ ПРОГРАМІ У 1960-Х РОКАХ

Стаття присвячена дослідженню документальних фактів до історії астрономії періоду 60-х років XX ст. Її метою є відображення подій, пов'язаних із участю Харківської астрономічної обсерваторії у радянській космічній програмі у визначений період. Розглянуто хронологію залучення харківських астрономів до програм із розробки та функціонування об'єктів «В-67», «Е-7», «Е-8», «Л-3», «М-69»; створення штучного місяцедому; опрацювання фотографічних матеріалів, отриманих космічними апаратами «Lunar orbiter 2», «Ranger 7», «Surveyor 1», «Луна-9», «Луна-12», «Луна-13» та «Зонд-3». Проаналізовано напрями наукової роботи астрономічної обсерваторії ХДУ імені О. М. Горького за темами «Алтай», «Атлас», «Люкс» та ін.

З'ясовано основні завдання, які Харківська астрономічна обсерваторія виконувала у 1960-х рр., пов'язані із проведенням фотометричних досліджень низки деталей зворотного боку Місяця; вивченням фізико-механічних та хімічних властивостей місячних ґрунтів та їхніх оптичних властивостей; здійсненням фотометричного аналізу визначених ділянок місячної поверхні; виконанням фотометричних розрахунків, необхідних для розробки систем орієнтації автоматичних міжпланетних станцій; з'ясуванням питань освітленості від місячної поверхні.

Ретроінформаційні ресурси, які вперше були залучені до розгляду, дозволили відтворити хронологічну послідовність при викладенні подій, пов'язаних із участю університетської обсерваторії у розробці та функціонуванні космічних об'єктів у визначений період; конкретизувати доробок харківських астрономів у радянську програму з освоєння космосу; уточнити деякі маловідомі факти.

Ключові слова: Місяць, планетологія, фотометричні дослідження, Харківська астрономічна обсерваторія, радянська космічна програма, місяцедом, планетохід.

ВСТУП

У 2021 р. відзначається низка ювілейних дат стосовно подій, які понад півстоліття тому ознаменували початок нового етапу у розвитку астрономічної науки: зародження експериментальної

астрономії, перш за все — у галузі дослідження Місяця та планет. 1960-ми датуються перші віхи в історії освоєння космічного простору: 60 років тому здійснено перший пілотований політ у космічний простір (вихід на навколосеземну орбіту

Цитування: 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 (132). С. 86—99. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.086>

апарата «Восток-1»); 55 років з моменту запуску автоматичної міжпланетної станції «Луна-10», яка стала першим штучним супутником Місяця; 50 років тому АМС «Луна-19» було успішно виведено на місячну орбіту для дослідження космічного простору і Місяця, а на навколоземній орбіті з'явилася перша у світі пілотована орбітальна станція «Салют-1»; роком раніше — АМС «Луна-17» доставила на місячну поверхню самхідний апарат «Луноход-1» [29].

До радянської космічної програми 1960-х років було залучено багато підприємств і наукових установ СРСР. Значний різноаспектний внесок в освоєння космічного простору та розвиток космічної науки і техніки зробили українські науковці [41—43, 45, 49, 50, 52—54, 56]. Проведений історіографічний аналіз свідчить про те, що тема участі Харківської астрономічної обсерваторії (ХАО) в освоєнні космічного простору не була предметом окремих історико-наукових досліджень. Зазначимо, що починаючи з 1959 р. ХАО брала безпосередню участь у вирішенні завдань, пов'язаних із розробкою космічних апаратів, виконуючи спеціальні фотометричні дослідження Місяця, Марса і Венери. Даний факт у першу чергу пояснюється всебічною закритістю робіт, більшість з яких здійснювалося за грифами обмеження доступу — «таємно» та «цілком таємно».

Участь Харківської астрономічної обсерваторії у космічних проєктах цього періоду відбувалася під безпосереднім керівництвом академіка М. П. Барабашова (1894—1971), який започаткував у Харкові наукову школу планетознавства і сприяв піднесенню університетської обсерваторії на рівень центру планетних досліджень у СРСР. Основними об'єктами дослідження наукової школи М. П. Барабашова були Місяць, планети та Сонце; методами — фотографічна фотометрія, спектрофотометрія та колориметрія поверхні цих тіл [1, с. 176]. Окремі аспекти формування та напрями діяльності наукової школи планетознавства висвітлено у публікаціях, присвячених дослідженню наукових біографій низки харківських астрономів [1, 4, 38, 40, 51].

У тому ж 1959 р. спільно з Головною астрономічною обсерваторією в Пулкові та Астрономічним інститутом імені П. К. Штернберга

ХАО долучилася до робіт із обробки перших фотографій зворотного боку Місяця, отриманих міжпланетною станцією «Луна-3». Потім харківські астрономи взяли участь у продовженні цих робіт, опрацьовуючи фотографії, отримані АМС «Зонд-3» у 1965 р. (були зафіксовані області зворотного боку Місяця, не охоплені АМС «Луна-3»). Академік М. П. Барабашов (разом із учнями) взяв участь у створенні «Атласу зворотного боку Місяця» як один із редакторів видання [3].

У 1967 р. астрономічна обсерваторія ХДУ імені О. М. Горького, єдина на той час серед радянських університетських обсерваторій, була задіяна у роботах зі створення об'єкта «Л-3» (місячно-посадкова пілотована програма).

Тому *метою статті* є узагальнення результатів історико-наукового дослідження щодо участі Харківської астрономічної обсерваторії у радянській космічній програмі у 1960-х роках.

Для вирішення конкретно-проблемних завдань у роботі використано спеціальні методи — історико-хронологічний, ретроспективний та методи джерелознавчого аналізу. Джерельну базу дослідження склали матеріали з фондів Державного архіву Харківської області [19—24].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Тема досліджень Місяця завжди займала особливе місце у діяльності астрономічної обсерваторії Харківського університету і до започаткування наукової школи планетознавства [37, 39]. На початку 1950-х рр. у цьому напрямі харківськими астрономами було підготовлено низку надважливих праць. Зокрема, учениця академіка М. П. Барабашова В. О. Федорець (Єзерська) виконала ґрунтовну роботу з фотографічної фотометрії місячної поверхні (1952) [31], обробивши власноруч отримані фотографії 176 ділянок поверхні Місяця. Цей каталог отримав значну роль у визначенні режимів зйомки Місяця першими космічними апаратами. Академік М. П. Барабашов видав фундаментальну працю «Дослідження фізичних умов на Місяці і планетах» (1952), яка на той час стала найбільшим внеском у розвиток галузі планетології [6].

Упродовж 1958—1959 рр. на Харківській астрономічній обсерваторії проводилися систе-



Рис. 1. Фото М. П. Барабашова

матичні спектрофотометричні спостереження кратерів місячної поверхні: В. І. Єзерський вивчав наявність активних процесів, зокрема кратера Альфонс (оскільки на його спектрограмі, отриманій у листопаді 1958 р., було виявлено аномальне світіння газового типу у районі його центральної гірки) [12]; а спільно з А. Т. Чекирдою він виконав комплексне дослідження оптичних і теплових властивостей зразків гірських порід з метою виявлення можливого складу зовнішнього покриву Місяця; тоді харківські астрономи дійшли висновку, що найімовірніше місячна поверхня вкрита роздробленими туфоподібними пористими гірськими породами, а на деяких ділянках — грубозернистим вулканічним попелом [17]. З метою підтвердження отриманих результатів (за задумом академіка М. П. Ба-

рабашова) В. І. Гаража в обсерваторії побудував індикатриси розсіювання світла місячної поверхні [11].

Також у цей період акад. М. П. Барабашовим та В. І. Єзерським були проведені фотометричні дослідження окремих деталей складу місячної поверхні у різних ділянках спектра за фотографіями, отриманими у трьох різних положеннях поляроїда у межах теми дослідження поляризації Місяця. Отримані дані вказували на те, що максимум поляризації для більшості деталей Місяця припадає на синю область спектра [15].

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. Держкомітет Ради Міністрів СРСР з оборонної техніки затвердив план заходів зі створення так званого об'єкта «Е-7» (супутник Місяця), згідно з яким ХАО була головним виконавцем програми з астрономічних досліджень. За пропозицією академіка М. П. Барабашова до цього плану було включено тему з фотографування Землі з космічного простору [19, арк. 19—20].

Також ХАО проводила роботи з визначення експозиції при фотографуванні Марса з борту АМС шляхом її розрахунку, а також експериментального визначення експозиції (фотографування гірських порід (туфи), близьких за відбивною здатністю до поверхні Марса) [19, арк. 2—5].

У цьому напрямку у Харківській астрономічній обсерваторії проводився комплекс робіт: з метою отримання фізичних характеристик атмосфери і поверхні Марса учень акад. М. П. Барабашова І. К. Коваль здійснював обробку матеріалів і спостережень протистояння Марса у 1956 та 1958 рр.

За підсумками спостережень 1958 р. на підставі вивчення контрасту «материк — море» були отримані свідчення відмінності законів відбиття для цих областей. З метою виведення оптичних властивостей атмосфери Марса акад. М. П. Барабашов та В. І. Єзерський провадили фотометричні вимірювання спектрограм планети, отримані у цьому ж році на Кримській астрофізичній обсерваторії [15, 24, арк. 81, 27]; під авторством

М. П. Барабашова та І. К. Ковалю вийшла друком монографія-каталог «Фотографічна фотометрія Марса зі світлофільтрами під час великого протистояння у 1956 р.» (1959) [17].

У 1962 р. Харківська астрономічна обсерваторія отримала завдання від Астроради АН СРСР та Московського інституту електромеханіки та автоматики (п/с 5798) щодо визначення світлових і геометричних параметрів Місяця у зв'язку із розробкою системи навігації об'єкта, призначеного для посадки на Місяць. Зокрема, необхідно було визначити: величину освітленості на об'єктиві приладу, встановленого на об'єкті, при візуванні освітлених країв Місяця; величину повної освітленості від Місяця, дані про спектральний склад випромінювання Місяця у діапазоні 0.38...0.70 мкм.

Додамо, що у подальшому дані, отримані ХАО, були використані при проєктуванні апаратури, яка забезпечувала стеження за краєм Місяця у діапазоні селенографічних широт від $+50^\circ$ до -50° при фазі Місяця $90^\circ \pm 15^\circ$ [20, арк. 20—21].

Через декілька років (1966) обсерваторія продовжила цю роботу, оскільки виникла необхідність отримання додаткових даних щодо величин освітленості, створюваних краєм диску Місяця у точках, які відповідають селенографічній широті до $\pm 60^\circ$. Проведені харківськими астрономами фотометричні вимірювання змін яскравості уздовж лімба показали наявність систематичного зменшення яскравості при великих значеннях широт та великих фазових кутах [21, арк. 21].

Відповідно до постанови ВПК Ради Міністрів СРСР № 237 від 11.11.1965 р. Харківська астрономічна обсерваторія долучилася до виконання окремих завдань за темами «Атлас» та «Глобус», пов'язаних із проведенням фотометричних досліджень різних деталей зворотного боку Місяця (понад 200 позицій), які виконувалися на замовлення Астрономічного інституту імені П. К. Штейнберга. Зокрема, харківськими астрономами опрацьовувалися фотографічні матеріали, отримані АМС «Зонд-3»; ці дані увійшли до другого тому «Атласу зворотного боку Місяця» (1967) [21, арк. 12—18].

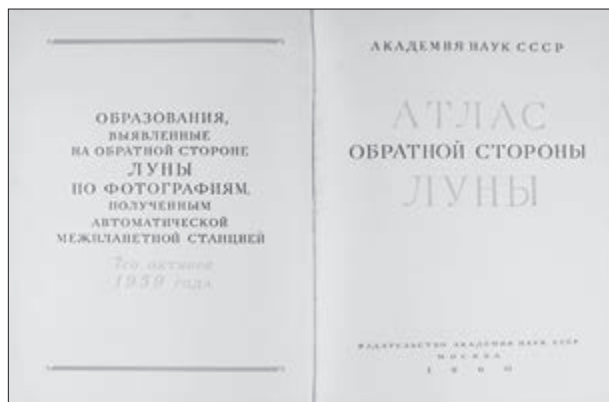


Рис. 2. Фрагмент книги «Атлас обратной стороны Луны» (1960), виданої під редакцією М. П. Барабашова, О. О. Михайлова, Ю. Н. Липського

Також у зв'язку із запуском АМС «Луна-10» навесні 1966 р. [28, с. 194] за пропозицією Астроради АН СРСР ХАО вносить рекомендації до експериментальної наукової програми об'єкта «Е-7» (фотометрія екваторіальної зони Місяця з великою роздільністю, радіометрія місячної поверхні з великою роздільністю та ін.) з метою отримання додаткових даних щодо підготовки об'єкта «Л-3» [21, арк. 25—29].

Відповідно до п. 9 «Плану-графіку створення головного блоку «Л-3», його комплектуючих систем, агрегатів та апаратури», розробленого на виконання постанови ЦК КПРС та Ради Міністрів СРСР «Про роботи з дослідження Місяця та космічного простору» від 04.08.1964 р. № 655-268, на ХАО (серед інших організацій-виконавців) було покладено «дослідження місячного ґрунту з метою видавання даних, необхідних для посадки, а також розробки скафандрів, засобів переміщення та проникнення до поверхневих шарів Місяця» [21, арк. 32—33]. Зокрема, харківські астрономи працювали над розробкою робочих гіпотез щодо з'ясування фізико-механічних та хімічних властивостей місячних ґрунтів та дослідженнями їхніх оптичних властивостей з метою оцінювання ґрунтових умов на Місяці (за допомогою як наземних засобів, так і апаратури АМС).

У жовтні 1966 р. у Харкові відбулася конференція Комісії з фізики планет Астроради АН СРСР «Координація наземних та позаатмосферних спостережень Місяця, Марса та Вене-

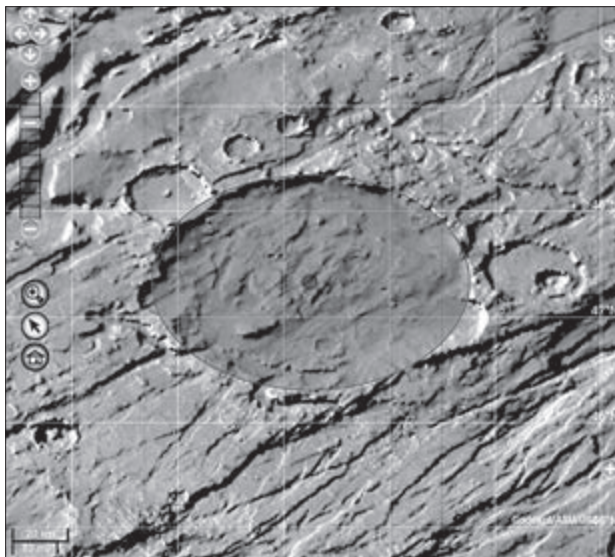


Рис. 3. Метеоритний кратер Барабашова на Марсі

ри», яка проходила під головуванням академіка М. П. Барабашова. Поряд із відкритими засіданнями було проведено закриті, на яких обговорювалися важливі рішення з питань освоєння космосу (у них взяли участь 77 фахівців з понад 40 установ) [21, арк. 30]. Згідно з рішенням закритого засідання конференції для здійснення експерименту зі всебічного астрофізичного дослідження Землі з космічного простору головною було визначено астрономічну обсерваторію ХДУ імені О. М. Горького [21, арк. 41].

На початку 1967 р. відповідно до запиту ОКБ Хімкінського машинобудівного заводу імені С. А. Лавочкина (п/с 7544) ХАО розпочала дослідження з ймовірної наявності у зоні довгот -40° ... -65° і широт $\pm 10^{\circ}$ кратерів із крутизною схилу понад 20° для забезпечення роботи об'єкта «Е-8». Зокрема, астрономи опрацювали фотографії, отримані космічним апаратом «Ranger 7», який сфотографував із великою роздільною здатністю ділянку моря (визначена зона також була «морською»), на яких було видно розподіл і величини крутизни схилів кратерів розміром у 5...10 метрів [22, арк. 1–2].

Крім того, для вирішення цих завдань з Інституту геохімії та аналітичної хімії імені В. І. Вернадського АН СРСР до Харкова було передано

комплект фотодокументів, отриманих космічними апаратами «Surveyor 1» та «Lunar orbiter 2» [22, арк. 6].

У цей же час Міжвідомчою науково-технічною радою з космічних досліджень готувався зведений тритомний проспект «Наукові дослідження космічного простору і небесних тіл сонячної системи на 1967–1971 рр.». Академік М. П. Барабашов запропонував ввести до наукової проблематики розділ «Селенофізика», присвячений дослідженню фізичних властивостей місячної поверхні (оптичних, люмінесцентних, радіометричних, радіоастрономічних та ін.). Крім того, харківські астрономи запропонували враховувати пропозицію М. П. Барабашова під час визначення завдань з дослідження Марса і Венери, включивши до розгляду вивчення супутників Марса, дослідження Сатурна та його кілець, а також порівняльне вивчення Землі як планети (отримання інтегральних фазових функцій).

Наполягаючи, що експерименти, які здійснюються за допомогою космічних апаратів, повинні тісно координуватися із наземними астрофізичними спостереженнями, харківські астрономи також запропонували: вивчати неоднорідності фізико-механічних властивостей окремих ділянок Місяця з великою роздільною здатністю; при дослідженні Венери з близьких відстаней — виконувати фотографування з роздільністю у 1...2 км в ультрафіолетовій та видимій частинах спектру; при дослідженні Марса за допомогою космічних апаратів — передбачити експеримент з вивчення інтегральної фазової функції у різних ділянках спектру у найбільш повному інтервалі кута фази [22, арк. 15–16].

Відповідно до постанови ЦК КПРС та Ради Міністрів СРСР «Про хід робіт зі створення ракетно-космічних комплексів УР-500К-Л1 та Н1 — Л-3» від 04.02.1967 р. № 115-46 Інститут космічних досліджень АН СРСР був визначений як головна організація з вивчення поверхні Місяця з метою забезпечення об'єктів «Л-3». Зважаючи на це, в ІКД АН СРСР було розроблено технічне завдання з визначення фотометричних характеристик місячної поверхні в екваторіальній зоні.

Згідно з цим завданням Харківська астрономічна обсерваторія виконувала роботи за темою

«Алтай» (частина загального завдання з дослідження геоморфологічних умов можливих районів висадки місячної експедиції, картографування визначених майданчиків, окремих деталей та їхній геологічний опис, а також забезпечення вихідними даними проектування об'єктів комплексів «Л1 — Л-3» та «Е-8»).

Основними напрямками цієї роботи стали: 1) вивчення фотометричних властивостей «морських» ділянок екваторіальної зони місячної поверхні як можливих районів посадки об'єкта «Л-3»; 2) вирішення деяких світлотехнічних завдань щодо розподілу яскравості на місячній поверхні при спостереженні безпосередньо на ній при різних умовах (різні значення кута падіння, кута відбиття і різниці азимутів падаючих та відбитих променів), пов'язаних із посадкою на Місяць космічного апарата та переміщенням пересувних засобів; 3) фотометричні вимірювання лабораторних зразків, які мають фотометричні властивості, подібні до фотометричних властивостей місячної поверхні, з метою уточнення структури мікрорельєфу поверхні Місяця [22, арк. 17].

Одночасно харківські астрономи працювали за «темою № 433» — виконання фотометричних розрахунків, необхідних для розробки систем орієнтації автоматичних міжпланетних станцій [22, арк. 90].

Зважаючи на важливість поставлених завдань, у червні 1967 р. Міністерство вищої та середньої спеціальної освіти УРСР дозволило ХДУ імені О. М. Горького застосовувати надурочні роботи та акордну систему оплати праці для інженерно-технічних працівників ХАО (дев'ять співробітників), зайнятих на виконанні робіт з дослідження фізико-хімічних і механічних властивостей місячної поверхні, мікрорельєфу поверхні та створення аналога місячного ґрунту для забезпечення робіт по комплексу «Л-3» [22, арк. 24].

Наприкінці червня 1967 р. ХАО отримало попередні результати фотометрії деяких майданчиків місячних «морів» біля екватора (досліджувалися 20 ділянок) та підготувало «Рекомендації з відбору майданчиків» для посадки об'єкта «Л-3». Загальний висновок астрономів: найкращими майданчиками, з точки зору фотометричних даних, є вісім ділянок в Океані Бур (одна з них —

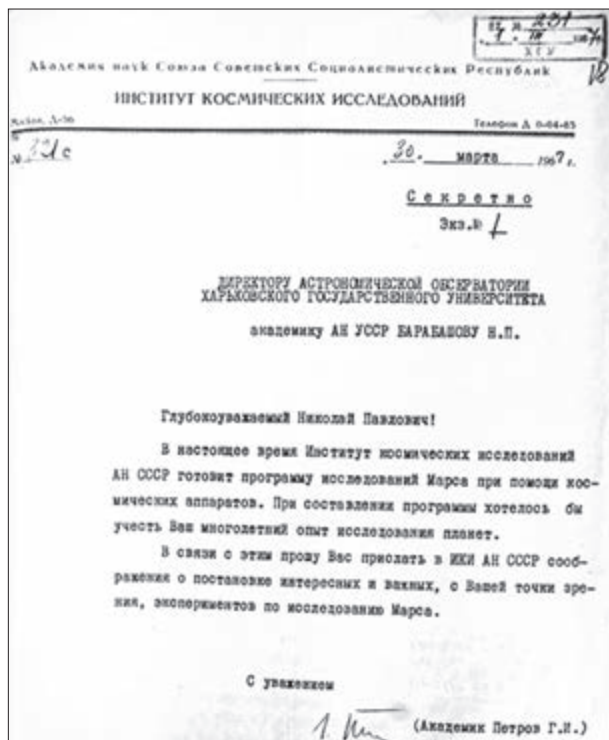


Рис. 4. Лист Інституту космічних досліджень до Харківської астрономічної обсерваторії (1967). [Державний архів Харківської області. 1968., Ф. Р-2792. Оп. 6. Спр. 259. Арк. 18]

безпосередньо біля місця посадки американського космічного апарата «Surveyor 1», яку той здійснив влітку 1966 р.) [22, арк. 30—31].

Влітку 1967 р. до Харківської астрономічної обсерваторії звернувся головний конструктор філії № 1 Московського інституту електромеханіки та автоматики (п/с 5728) В. Л. Морачевський щодо з'ясування параметрів повної освітленості від Місяця та її можливого розкиду на приборах об'єкта, призначеного для посадки на його поверхню [22, арк. 28].

У цей же час на виконання запиту Міжвідомчої науково-технічної ради з космічних досліджень при АН СРСР з метою забезпечення орієнтації об'єкта «В-67» (АМС «Венера-4») на ХАО були виконані роботи щодо з'ясування розподілу яскравості по диску Венери біля лінії термінатора для визначеного положення АМС та досліджено залежність подовження «рогів» серпу Венери від її фази [22, арк. 37].

У листопаді 1967 р. харківські астрономи взяли участь у роботі закритого симпозіуму, присвяченого результатам та інтерпретації досліджень, проведених за допомогою АМС «Венера-4» (відбувся у Москві, організований Міжвідомчою науково-технічною радою з космічних досліджень АН СРСР), на якому представили загальну доповідь на тему «Основні результати фотометричних досліджень Венери на Харківській астрономічній обсерваторії» [22, арк. 69—70].

На початку 1968 р., продовжуючи науково-дослідну роботу із забезпечення об'єкта «Л-3», харківські астрономи запросили у НДІ «Приладобудування» (п/с Г-4149) матеріали, отримані АМС «Луна-9», «Луна-12», «Луна-13» і «Зонд-3» (повні комплекти негативів фотографій місячної поверхні, а також дані про умови та обставини фотографування) [23, арк. 1].

За запитом ЦКБ експериментального машинобудування (п/с В-2572) обсерваторія підготувала «Методику інженерного розрахунку абсолютних величин яскравості різних ділянок поверхні Місяця у залежності від висоти Сонця, азимута спостереження, кута лінії візування щодо місцевої вертикалі, форми деталей рельєфу та ін.» [23, арк. 2].

У 1968 р. науково-дослідницька робота ХАО з дослідження поверхні Місяця зосередилася на виконанні теми «Алтай» (фотометричний аналіз визначених ділянок місячної поверхні) за договором між ХДУ імені О. М. Горького та Інститутом геохімії та аналітичної хімії імені В. І. Вернадського АН СРСР та роботами за темою «Люкс» (з'ясування деяких питань освітленості від місячної поверхні) за договором між ХДУ імені О. М. Горького та Московським інститутом електромеханіки та автоматики (п/с 5728) [23, арк. 24].

Наприкінці січня 1968 р. у Харкові відбулася нарада щодо плану фотометричного вивчення Місяця на поточний рік, у якій взяли участь представники ХДУ імені О. М. Горького, ІКД АН СРСР, Інституту геохімії та аналітичної хімії імені В. І. Вернадського АН СРСР, ЦКБ експериментального машинобудування (п/с В-2572), Московського інституту електромеханіки та автоматики (п/с 5728), Хімікинського машинобу-

дівного заводу імені С. А. Лавочкина (п/с 7544), НДІ приладобудування (п/с Г-4149). Обговорювалися питання, пов'язані із поточними потребами виробничих організацій у частині вихідних даних для проектування та випробування космічної апаратури та макетування місячної поверхні; були узгоджені наукові фотометричні завдання щодо забезпечення робіт за комплексами «Л-3» та «Е-8» [23, арк. 6—9].

На виконання рішень цієї наради в ХАО підготували звіт щодо розподілу яскравості уздовж фотометричних перетинів кратерів та сформува-ли вимоги для створення фотометричного аналога місячної поверхні [23, арк. 17].

У березні 1968 р. Міжвідомчою науково-технічною радою з космічних досліджень при АН СРСР Харківській астрономічній обсерваторії було поставлено завдання щодо виконання розрахунку спектральної яскравості та контрастності деталей Марса у видимій ділянці спектра для фаз від 0 до 90° для створення технічного завдання з фотографування планети під час її обльоту АМС [23, арк. 20].

За темою «Алтай» обсерваторією були отримані дані про розподіл яскравості у кратерах при різних умовах освітленості та виконані спостереження, необхідні для вирішення питань щодо розрізнення кратерів під час посадки об'єкта «Л-3»; проведені фотометричні дослідження майданчиків, сфотографованих космічними апаратами; надані додаткові рекомендації щодо визначення ділянок для їхнього подальшого вивчення з метою вибору посадкового майданчика для об'єкта «Л-3» [23, арк. 23].

Під керівництвом академіка М. П. Барабашова у Харківському фізико-технічному інституті досліджувались зміни відбивних властивостей фотометричних аналогів місячної поверхні під дією протонного опромінення (експеримент з бомбардування протонами зразків, які імітують місячний ґрунт) [1, с. 170, 5 с. 17]. Згідно з отриманими даними було встановлено, що опромінення істотно впливає на властивості матеріалів та обов'язково має враховуватися при інтерпретації фотометричних даних щодо Місяця.

За темою «Люкс» обсерваторією було виконано розрахунок освітленості від частин місячно-

го диску при різних фазах і відстанях від Місяця [23, арк. 24].

У квітні 1968 р. у Київському інституті інженерів цивільної авіації на запрошення ІКД АН СРСР представники ХАО взяли участь у нараді за темою «Алтай», присвяченій обговоренню проекту створення штучного місяцедрому (представники ІКД АН СРСР представили оптику, технічне завдання та план місцевості). Спільно з фахівцями КБ-16 та Київського інституту інженерів цивільної авіації був розроблений макет місяцедрому розміром 3×4 м. Оптична система мала можливість обертання у трьох площинах, імітуючи космічний апарат на Місяці [23, арк. 64].

Таким чином, продовжуючи роботи у межах забезпечення функціонування об'єкта «Е-8», Харківська астрономічна обсерваторія долучилася до створення штучного полігону, який імітував оптичні властивості місячної поверхні та мав застосовуватися для випробування шасі місяцеходів та навчання їхніх екіпажів.

Під час обговорення питань про мікроструктуру, рельєф та відбивну здатність матеріалів для виготовлення тренувального стенда, особлива увага була приділена питанню щодо паралельності пучка джерела освітлення. Представники ХАО висловили низку зауважень, які були враховані у рішенні наради, зокрема про те, що відбивна здатність матеріалів не повинна перевищувати 30 %, мікрорельєф мав забезпечувати місячну індикатрису розсіювання, а паралельність світлового пучка не мала перевищувати 5° [23, арк. 66].

На підставі отриманих харківськими астрономами даних влітку 1968 р. в Криму під Сімферополем на базі «Наземного вимірювального пункту № 10» було облаштовано пункт керування місяцеходом та створено штучний місяцедром (площею в один гектар). Його поверхня, вкрита черепашником шаром до 20 см, була пофарбована у сіро-чорний колір. Вважалося, що черепашник за пористістю та щільністю відповідає встановленим властивостям місячного ґрунту [5, с. 17].

Водночас на замовлення Державного оптичного інституту імені С. І. Вавилова в Харківській

астрономічній обсерваторії були виконані розрахунки спектрофотометричних характеристик Венери в області спектру 0.3...0.8 мкм. Зокрема, спектрофотометричні дані при різних фазах планети були необхідні для проектування оптико-електронної апаратури астронавігації космічних апаратів для виконання спостережень з далеких та близьких відстаней від її поверхні [23, арк. 67].

На підставі рішення фотографічної комісії Міжвідомчої науково-технічної ради з космічних досліджень при АН СРСР харківські астрономи підготували матеріали про яскравість поверхні Марса для фотографування його поверхні за допомогою космічного апарата серії «М-69» (як відомо, обидві АМС програми «Марс-1969» були зруйновані під час запусків) [23, арк. 70—75].

Наприкінці 1960-х Харківська астрономічна обсерваторія також брала участь у виконанні науково-дослідних робіт з проблем освоєння космосу за темами: «Площадне вивчення фізичних властивостей поверхні Місяця», «Вивчення процесів формування Місяця», «Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунту і порід Місяця» у частині, пов'язаній зі створенням аналогів місячної поверхні та їхнім дослідженням фотометричними, спектрофотометричними та поляриметричними методами.

Додамо, що пізніше, у другій половині 1980-х рр., харківські астрономи взяли участь у створенні інженерних моделей атмосфери комети Галлея (проект «Вега») [26], обробці фотографій Фобоса за даними КА «Фобос-2», а також моделюванні спектральних властивостей [2, 25, 30, 34].

У 1988 р. розпочалася підготовка до місячного проекту «ІЛ». Передбачалося створення полярного супутника, який з ініціативи харківських астрономів (Ю. Г. Шкуратов, Ю. В. Корнієнко) мав збирати прецизійну спектральну інформацію про відбивну здатність Місяця у широкому діапазоні (від 0.2 до 2.5 мкм) за допомогою вимірювача світлових потоків «Янус» [32, 35]. Цей проект не був реалізований у зв'язку із розпадом СРСР.

Наприкінці ХХ ст. та на початку ХХІ ст. харківські астрономи також неодноразово виходили з пропозиціями щодо започаткування нових космічних досліджень Місяця [33, 36, 44, 46—48, 54, с. 65—66].

ВИСНОВКИ

Таким чином, ми реконструювали основні віхи, що відбивають процес участі Харківської астрономічної обсерваторії та її представників у престижних космічних проектах СРСР у 60-ті роки ХХ ст. та у подальшому періоді, зокрема у програмах із розробки та функціонування об'єктів «В-67», «Е-7», «Е-8», «Л-3», «М-69», створенні штучного місяцедруму, участі у наукових темах «Алтай», «Атлас», «Люкс» та ін.

Можна констатувати, що харківські астрономи у тій чи іншій мірі брали участь у підготовці усіх радянських космічних місій до Місяця, Марса та Венери, а також до обробки та інтерпретації отриманих результатів. Публікації та

архівні документи, які вперше були залучені до розгляду, дозволили відтворити хронологічну послідовність розвитку подій, пов'язаних із участю ХАО у розробці космічних об'єктів у визначений період, конкретизувати доробок харківських астрономів у радянську програму з освоєння космосу, довести (або уточнити) деякі маловідомі факти.

Передбачається, що матеріали історико-наукового дослідження щодо участі Харківської астрономічної обсерваторії у радянській космічній програмі у 1960-х роках будуть використані у науково-дослідних роботах, присвячених історії астрономії у Харкові у ХХ ст. та дослідженню наукової біографії академіка М. П. Барабашова.

ЛІТЕРАТУРА

1. *200 лет астрономии в Харьковском университете*. Под. ред. проф. Ю. Г. Шкуратова. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. 632 с.
2. Аванесов Г. А., Бонев Б. И., Кемпе Ф., Базилевский А. Т., Бойчева В., Вайде Г. Г., Громатиков П., Даксбери Т., Данц М., Димитров Д., Жуков Б. С., Зиман Я. Л., Колев В., Костенко В. И., Котцов В. А., Красавцев В. М., Краси́ков В. А., Крумов А., Кузьмин А. А., Лосев К. Д., Люмме К., Мельманн Д., Мерчи С., Мишев Д. Н., Муйнонен К., Муравьев В. М., Мюррей Б., Нойманн В., Пауль Л., Пессель В., Петков Д., Петухова И., Ребель Б., Симеонов С., Смит Б., Тотев А., Узунов Ю., Федотов В. П., Халманн Д., Хед Дж., Хейфец В. Н., Цапфе Г., Чиков К. Н., Шкуратов Ю. Г. Телевизионные съемки Фобоса: первые результаты. *Письма в Астрон. журн.* 1990. **16**, № 4. С. 378—388.
3. *Атлас обратной стороны Луны*. Под ред. Н. П. Барабашова, А. А. Михайлова, Ю. Н. Липского. Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. 147 с.
4. Балишев М. А. Історико-біографічне дослідження життя та творчості українського астрофізика професора Мстислава Сергійовича Саврона (1902—1943). *Наука та наукознавство*. 2020. № 2. С. 96—124.
5. Балышев М. А., Ларин А. А. Участие харьковских астрономов под руководством Н. П. Барабашова в подготовке лунной экспедиции. *Матеріали ХІІ наукових читань «Дніпровська орбіта — 2017»*. Дніпро, 2017. С. 13—18.
6. Барабашов Н. П. *Исследование физических условий на Луне и планетах*. Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1952. 272 с.
7. Барабашов Н. П., Акимов Л. А. О микрорельефе поверхностей, имитирующих лунную. *Вестник Харьков. гос. ун-та*. 1969. № 34. Вып. 4. С. 17—30.
8. Барабашов Н. П., Акимов Л. А., Лупишко Д. Ф. О свойствах рельефа лунной поверхности в окрестности станции Луна-13. *Вестник Харьков. гос. ун-та*. 1969. № 34. Вып. 4. С. 12—16.
9. Барабашов Н. П., Езерская В. А., Езерский В. И. О цветовых контрастах лунной поверхности. *Астрон. журн.* 1959. **36**, № 3. С. 496—502.
10. Барабашов Н. П., Езерская В. А., Езерский В. И. Фотографическая фотометрия некоторых участков Моря Облаков и Моря Познанного. *Вестник Харьков. гос. ун-та*. 1965. № 8. Вып. 2. С. 12—25.
11. Барабашов Н. П., Езерский В. И. Индикатрисы отражения отдельных участков лунной поверхности. *Изв. комиссии по физике планет*. 1960. Вып. 2. С. 65—72.
12. Барабашов Н. П., Езерский В. И. О различии микрорельефа отдельных участков лунной поверхности. *Вестник Харьков. гос. ун-та*. 1965. № 4. Вып. 1. С. 22—42.
13. Барабашов Н. П., Езерский В. И. Спектрофотометрические наблюдения лунных кратеров. *Изв. комиссии по физике планет*. 1961. Вып. 3. С. 50—55.
14. Барабашов Н. П., Езерский В. И. Фотометрические исследования микрорельефа лунной поверхности. *Ученые записки Харьков. гос. ун-та*. 1962. **122**. С. 5—78.

15. Барабашов Н. П., Коваль И. К. Некоторые результаты исследования контрастов на Марсе. *Астрон. журн.* 1960. 37, № 2. С. 301—305.
16. Барабашов Н. П., Коваль И. К. Опыт фотографической спектрополяриметрии Луны. *Изв. комиссии по физике планет.* 1959. Вып. 1. С. 55—58.
17. Барабашов Н. П., Коваль И. К. *Фотографическая фотометрия Марса со светофильтрами во время великого противостояния в 1956 г.* Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1959. 531 с.
18. Барабашов Н. П., Чекирда А. Т. О горных породах, наиболее соответствующих тем, которые входят в состав лунной поверхности. *Астрон. журн.* 1959. 36, № 5. С. 851—855.
19. Державний архів Харківської області. 1960. Ф. Р-2792. Оп.6. Спр. 173. 32 арк..
20. Державний архів Харківської області. 1962. Ф. Р-2792. Оп.6. Спр. 203. 25 арк.
21. Державний архів Харківської області. 1966. Ф. Р-2792. Оп.6. Спр. 248. 77 арк.
22. Державний архів Харківської області. 1967. Ф. Р-2792. Оп.6. Спр. 259. 92 арк.
23. Державний архів Харківської області. 1968. Ф. Р-2792. Оп.6. Спр. 270. 95 арк.
24. Державний архів Харківської області. 1959. Ф. Р-2792. Оп.7. Спр. 1676. 83 арк.
25. Жуков В. С., Шкуратов Ю. Г., Креславский М. А., Станкевич Д. Г., Старухина Л. В., Базилевский А. Т., Опанасенко Н. В., Чурюмов К. И., Люмме К., Пелтониemi И., Ирвин У., Мюррей Б., Хенкенхорфф К., Даксбери Т. Фотометрические характеристики Фобоса и их интерпретация. Гл. 10. Телевизионные исследования Фобоса. Под ред. Г. А. Аванесова и др. Москва: Наука, 1994. С. 80—94.
26. Карягин В. П., Шкуратов Ю. Г., Тишковец В. П. Прогноз физических характеристик кометы Галлея. *Вестник Харьков. гос. ун-та. Методы астрономических наблюдений. Солнечная система.* 1985. № 278. С. 56—65.
27. Коваль И. К. О степени гладкости материков и морей Марса. *Изв. комиссии по физике планет.* 1959. Вып. 1. С. 83—92.
28. Місячна одіссея. Під ред. Я. С. Яцківа. Київ: Академперіодика, 2007. 241 с.
29. Патон Б. Є., Вавилова І. Б., Негода О. О., Яцків Я. С. Важливі віхи космічної ери. *Космічна наука і технологія.* 2001. 7, № 1. С. 1—92.
30. Старухина Л. В., Шкуратов Ю. Г. О составе поверхности Фобоса. *Астрон. вестник.* 1997. 31, № 5. С. 427—433.
31. Федорец (Езерская) В. А. Фотографическая фотометрия лунной поверхности. *Ученые записки Харьков. гос. ун-та.* 1952. 42. С. 49—172.
32. Шкуратов Ю. Г., Бондаренко Н. В., Качанов А. С. Задачи лунного полярного спутника после КА «Клементина». *Космічна наука і технологія.* 1998. 4, № 1. С. 46—53.
33. Шкуратов Ю. Г., Коноваленко О. О., Захаренко В. В., Станіславський О. О., Баннікова О. Ю., Кайдаш В. Г., Станкевич Д. Г., Корохін В. В., Ваврів Д. М., Галушко В. Г., Єрін С. М., Бубнов І. М., Токарський П. Л., Ульянов О. М., Степкін С. В., Литвиненко Л. Н., Яцків Я. С., Вайдін Г., Зарка Ф., Рукер Х. О. Українська місія на Місяць: цілі та корисне навантаження. *Космічна наука і технологія.* 2018. 24, № 1. С. 3—30.
34. Шкуратов Ю. Г., Стадникова Н. П., Ярмоленко С. Н. Моделирование спектральной зависимости альbedo Фобоса и Деймоса. *Астрон. журн.* 1986. 63. Вып. 6. С. 1183—1188.
35. Шкуратов Ю. Г., Станкевич Д. Г., Корниенко Ю. В., Качанов А. С., Сербин В. И. Предложения по проведению экспериментов «Янус» на лунном полярном спутнике. *Космічна наука і технологія.* 1996. 2, № 1-2. С. 24—30.
36. Aleksandrov Yu. V. Perturbed motion of the artificial satellite of the Moon in the project «UkrSelena». *Space Science and Technology.* 2009. 15, № 1. P. 5—8.
37. Artemenko T. G., Balyshv M. A., Vavilova I. B. The Struve dynasty in the history of astronomy in Ukraine. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2009. 25, № 3. P. 153—167.
38. Balyshv M. A. Historical and biographical research of life and scientific activity of Boris Semeikin (1900—1938). *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2018. 34, № 2. P. 98—101.
39. Balyshv M. A. Ludwig von Struve (1858—1920): Development of Positional Astronomy at the Kharkiv Astronomical Observatory. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* 2021. 37, № 5. P. 269—272.
40. Balyshv M., Vavilova I. To the Personalities of the Ukrainian Astronomy: Scientific Work of Kostyantyn Savchenko. *Odessa Astron. Pubs.* 2020. 33. P. 5—9.
41. Kislyuk V. S. Moon: from probe to landfill. Project of the Russian Lunar Research Program. *Space Science and Technology.* 2007. 13, № 4. P. 94—95.
42. Kislyuk V. S. Space exploration of the Moon: current status and prospects (review). *Space Science and Technology.* 2013. 19, № 3. P. 5—20.
43. Kislyuk V. S., Shkuratov Yu. G., Yatskiv Ya. S. Exploration of the Moon from space: tasks, potentialities, and prospects of the Ukrainian science and engineering. *Space Science and Technology.* 1996. 2, № 1. P. 3—15.

44. Konovalenko O. O. and 59 colleagues. The Founder of the Decameter Radio Astronomy in Ukraine Academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 Years Old: History of Creation and Development of the National Experimental Base for the Last Half Century. *Russian Radio Physics and Radio Astronomy*. 2021. **26**. P. 5—73.
45. Savchuk V. S., Kushlakova N. M., Vavilova I. B. Nikolai Kibalchich in the history of world rocket-space technics: discussion questions of domestic and world historiography. *Space Science and Technology*. 2019. **25**, № 6. P. 70—83.
46. Shkuratov Yu. G., Kislyuk V. S., Lytvynenko L. M., Yatskiv Ya. S. Model of the Moon 2004 for the «UkrSelene» project. *Space Science and Technology*. 2004. **10**, № 2. P. 3—51.
47. Shkuratov Yu. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkina S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Ya. S., Videen G., Zarka P., Rucker H. O. A twofold mission to the Moon: Objectives and payloads. *Acta Astronautica*. 2019. **154**. P. 214—226.
48. Shkuratov Yu. G., Lytvynenko L. M., Shulga V. M., Yatskiv Ya. S., Vidmachenko A. P., Kislyuk V. S. Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the Moon. *Adv. in Space Res.* 2003. **31**, № 11. P. 2341—2345.
49. Vavilova I. B. History of Ukrainian culture and science in astronomical toponymy. *Innovation in Astronomy Education*. Eds J. M. Pasachoff, R. M. Ros, N. Pasachoff. Cambridge: Univ. Press, 2008. 321 p.
50. Vavilova I. B. Scientific Astronomical School by Professor Volodymyr Tsesevich on the physics of variable stars. *Odessa Astron. Publs*. 2017. **30**. P. 256—262.
51. Vavilova I. B., Artemenko T. G., Pakuliak L. K. Biographical index «Astronomers of Ukraine» at the UkrVO portal. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*. 2014. **30**, № 1. P. 46—52.
52. 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 Series*. 2012. Vol. 37. P. 88—96.
53. Vidmachenko A. P., Kazantseva L. V., Morozhenko O. V., Choliy V. Ya., Nevodovsky P. V. Astronomical observations and monitoring surveys of the Earth from the surface or from the Moon's orbit and their ground support. *Space Science and Technology*. 2019. **25**, № 5. P. 25—75.
54. Yatskiv Ya. S., Vavilova I. B., Romanets O. A., Savchuk V. S. Some little-known facts and events from the history of gravitational wave research in Ukraine. *Space Science and Technology*. 2017. **23**, № 3. P. 64—72.
55. Yatskiv Ya. S., Vidmachenko A. P., Morozhenko A. V., Sosonkin M. G., Ivanov Y. S., Syniavskiy I. I. Spectropolarimetric device for overatmospheric investigations of solar System bodies. *Space Science and Technology*. 2008. **14**, № 2. P. 56—67.
56. Zavalishin A. P., Datsenko A. V. Yu. V. Kondratyuk (O. G. Sharpei) — the founder of cosmonautics. *Space Science and Technology*. 1997. **3**, № 1. P. 3—64.

REFERENCES

1. Shkuratov Y. G. (Ed.) (2008). *200 years of astronomy at Kharkiv University*. Kharkiv: Kharkiv National University, 632 p. [in Russian].
2. Avanesov G. A., Bonev B. I., Kempe, F., Bazilevsky, A.T., Boycheva V., Weide G.-G., Gromatiko, P., Duxbur, T., Danz T., Dimitrov D., Zhukov B.S., Ziman Ya. L., Kolev V., Kostenko V. I., Kottsov V. A., Krasavtsev V. M., Krasikov V. A., Krumov A., Kuzmin A. A., Losev K. D., Lumme K., Mohlmann D., Murchie S., Mushev D. N., Muinonen K., Muraviev V. M., Myrray B., Neumann W., Paul L., Possel W., Petkov D., Petukhova O., Rebel B., Simeonov S., Smith B., Totev A., Uzunov Yu., Fedotov V. P., Halmann D., Head J., Heifets V. N., Zapfe H., Chikov K. N., Shkuratov Yu. G. (1990). Television observations of Phobos: first results. *Astron. Lett.*, **16** (4), 378—388 [in Russian].
3. Barabashov N. P., Mikhailov A. A., Lipskiy Yu. N. (ed.) (1960). *Atlas of the of the moon's far side*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960. 147 p. [in Russian].
4. Balyshv M. A. (2020). The life and scientific work of professor Mstislav Sergiyovych Sawron (1902—1943). The Ukrainian astrophysicist: A historical and biographical study. *Science and Science of Science*, **2**, 96—124 [in Ukrainian].
5. Balyshv M. A., Larin A. A. (2017). Participation of Kharkov astronomers under the leadership of N. P. Barabashov in the preparation of the Lunar expedition. *Materials of the XII scientific conference «Dniprovska Orbita — 2017»*. Dnipro, 13—18 [in Russian].
6. Barabashov N. P. (1952). *Investigation of physical conditions on the Moon and planets*. Kharkov: Kharkov State University Publishing House, 272 p. [in Russian].
7. Barabashov N. P., Akimov L. A. (1969). On the microrelief of surfaces imitating the lunar surface. *Bull. Kharkov State University*, **34** (4), 17—30 [in Russian].
8. Barabashov N. P., Akimov L. A., Lupishko D. F. (1969). On the properties of the lunar surface relief in the vicinity of the «Luna-13» station. *Bull. Kharkov State University*, **34** (4), 12—16 [in Russian].

9. Barabashov N. P., Ezerskaya V. A., Ezersky V. I. (1959). About color contrasts of the lunar surface. *Astron. J.*, **36** (3), 496—502 [in Russian].
10. Barabashov N. P., Ezerskaya V. A., Ezerskiy V. I. (1965). Photographic photometry of some parts of the Sea of Clouds and the Sea of the Posed. *Bull. Kharkov State University*, **8** (2), 12—25 [in Russian].
11. Barabashov N. P., Ezerskiy V. I. (1960). Reflection indicatrices of individual sections of the lunar surface. *Proceedings of the Commission on Planetary Physics*, **2**, 65—72 [in Russian].
12. Barabashov N. P., Ezerskiy V. I. (1965). On the difference in the microrelief of individual sections of the lunar surface. *Bull. Kharkov State University*, **4** (1), 22—42 [in Russian].
13. Barabashov N. P., Ezerskiy V. I. (1961). Spectrophotometric observations of lunar craters. *Proceedings of the Commission on Planetary Physics*, **3**, 50—55 [in Russian].
14. Barabashov N. P., Ezerskiy V. I. (1962). Photometric studies of the lunar surface microrelief. *Scientific notes of Kharkov State University*, **122**, 5—78 [in Russian].
15. Barabashov N. P., Koval I. K. (1960). Some results of the study of contrasts on Mars. *Astron. J.*, **37** (2), 301—305 [in Russian].
16. Barabashov, N. P., Koval, I. K. (1959). Experience of photographic spectropolarimetry of the Moon. *Proceedings of the Commission on Planetary Physics*, **1**, 55—58 [in Russian].
17. Barabashov N. P., Koval I. K. (1959). *Photographic photometry of Mars with light filters during the great opposition in 1956*. Kharkov: Kharkov State University Publishing House, 531 pp. [in Russian].
18. Barabashov N. P., Chekirda A. T. (1959). About the rocks, the most appropriate to those that are part of the lunar surface. *Astron. J.*, **36** (5), 851—855 [in Russian].
19. State Archives of Kharkiv Region (1960). F. R-2792. In. 6. Ref. 173. 32 p. [in Russian].
20. State Archives of Kharkiv Region (1962). F. R-2792. In. 6. C. 203. 25 p. [in Russian].
21. State Archives of Kharkiv Region (1966). F. R-2792. In. 6. C. 248. 77 p. [in Russian].
22. State Archives of Kharkiv Region (1967). F. R-2792. In. 6. C. 259. 92 p. [in Russian].
23. State Archives of Kharkiv Region (1968). F. R-2792. In. 6. C. 270. 95 p. [in Russian].
24. State Archives of Kharkiv Region (1959). F. R-2792. In. 7. C. 1676. 83 p. [in Russian].
25. Zhukov V. S., Shkuratov Yu. G., Kreslavsky M. A., Stankevich D. G., Starukhina L. V., Bazilevsky A. T., Opanasenko N. V., Churyumov K. I., Lumme K., Peltoniemi I., Irwin W., Murray B., Henckenhoff K., Daxberi T. (1994). *Photometric characteristics of Phobos and their interpretation. Chapter 10. Television studies of Phobos*. Ed. G. A. Avanesov and others. Moscow: Nauka, 80—94 [in Russian].
26. Karyagin V. P., Shkuratov Yu. G., Tishkovets V. P. (1985). Forecast of physical characteristics of Halley's comet. *Bull. Kharkov State University. Methods of astronomical observations. Solar system*, **278**, 56—65 [in Russian].
27. Koval I. K. (1959). On the degree of smoothness of the continents and seas of Mars. *Proceedings of the Commission on Planetary Physics*, **1**, 83—92 [in Russian].
28. Yatskiy Ya. S. (ed.) (2007). *Monthly Odyssey*. Kiev: Akademperiodika [in Ukrainian].
29. Paton B. E., Vavilova I. B., Negoda A. A., Yatskiy Ya. S. (2001). Important Cornerstones in the Cosmic Era. *Space Science and Technology*, **7** (1), 2—92. [in Ukrainian].
30. Starukhina L. V., Shkuratov Yu. G. (1997). On the composition of the Phobos surface. *Astron. Bull.*, **31** (5), 427—433 [in Russian].
31. Fedorets (Ezerskaya) V. A. (1952). Photographic photometry of the lunar surface. *Scientific notes of Kharkov State University*, **42**, 49—172 [in Russian].
32. Shkuratov Yu. G., Bondarenko N. V., Kachanov A. S. (1998). Problems of the lunar polar satellite after the «Klementina» spacecraft. *Space Science and Technology*, **4** (1), 46—53 [in Russian].
33. Shkuratov Yu. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkin S. V., Lytvynenko L. M., Yatskiy Ya. S., Videen G., Zarka P., Rucker H. O. (2018). Ukrainian mission to the Moon: how to and with what. *Space Science and Technology*, **24** (1), 3—30 [in Ukrainian].
34. Shkuratov Yu. G., Stadnikova N. P., Yarmolenko S. N. (1986). Modeling of the spectral dependence of the albedo of Phobos and Deimos. *Astron. J.*, **63** (6), 1183—1188 30 [in Russian].
35. Shkuratov Yu. G., Stankevich D. G., Kornienko Yu. V., Kachanov A. S., Serbin V. I. (1996). Proposals for the experiments «Janus» on the lunar polar satellite. *Space Science and Technology*, **2** (1-2), 24—30 [in Russian].
36. Aleksandrov Yu. V. (2009). Perturbed motion of the artificial satellite of the Moon in the project «UkrSelenia». *Space Science and Technology*, **15** (1). 5—8 [in Russian].
37. Artemenko T. G., Balyshev M. A., Vavilova I. B. (2009). The Struve dynasty in the history of astronomy in Ukraine. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **25** (3), 153—167.

38. Balyshev M. A. (2018). Historical and biographical research of life and scientific activity of Boris Semeykin (1900—1938). *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (2), 98—101.
39. Balyshev M. A. (2021). Ludwig von Struve (1858—1920): Development of Positional Astronomy at the Kharkiv Astronomical Observatory. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **37** (5), 269—272.
40. Balyshev M., Vavilova I. (2020). To the Personalities of the Ukrainian Astronomy: Scientific Work of Kostyantyn Savchenko. *Odessa Astron. Publs*, **33**, 5—9.
41. Kislyuk V. S. (2007). Moon: from probe to landfill. Project of the Russian Lunar Research Program. *Space Science and Technology*, **13** (4), 94—95 [in Ukrainian].
42. Kislyuk V. S. (2013). Space exploration of the Moon: current status and prospects (review). *Space Science and Technology*, **19** (3), 5—20 [in Ukrainian].
43. Kislyuk V. S., Shkuratov Yu. G., Yatskiv Ya. S. (1996). Exploration of the Moon from space: tasks, potentialities, and prospects of the Ukrainian science and engineering. *Space Science and Technology*, **2** (1), 3—15 [in Ukrainian].
44. Konovalenko O. O. and 59 colleagues (2021). The Founder of the Decameter Radio Astronomy in Ukraine Academician of NAS of Ukraine Semen Yakovych Braude is 110 Years Old: History of Creation and Development of the National Experimental Base for the Last Half Century. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **26**, 5—73 [in Ukrainian].
45. Savchuk V. S., Kushlakova N. M., Vavilova I. B. (2019). Nikolai Kibalchich in the history of world rocket-space technics: discussion questions of domestic and world historiography. *Space Science and Technology*, **25** (6), 70—83.
46. Shkuratov Yu. G., Kislyuk V. S., Lytvynenko L. M., Yatskiv Ya. S. (2004). Model of the Moon 2004 for the «UkrSelene» project. *Space Science and Technology*, **10** (2), 3—51 [in Russian].
47. Shkuratov Yu. G., Konovalenko A. A., Zakharenko V. V., Stanislavsky A. A., Bannikova E. Y., Kaydash V. G., Stankevich D. G., Korokhin V. V., Vavriv D. M., Galushko V. G., Yerin S. N., Bubnov I. N., Tokarsky P. L., Ulyanov O. M., Stepkina S. V., Lytvynenko L. N., Yatskiv Ya. S., Videen G., Zarka P., Rucker H. O. (2019). A twofold mission to the Moon: Objectives and payloads. *Acta Astronautica*, **154**, 214—226.
48. Shkuratov Yu. G., Lytvynenko L. M., Shulga V. M., Yatskiv Ya. S., Vidmachenko A. P., Kislyuk V. S. (2003). Objectives of a prospective Ukrainian orbiter mission to the Moon. *Adv. in Space Res.*, **31** (11), 2341—2345.
49. Vavilova I. B. (2008). History of Ukrainian culture and science in astronomical toponymy. *Innovation in Astronomy Education*. Ed. J. M. Pasachoff, R. M. Ros, N. Pasachoff. Cambridge: Univ. Press.
50. Vavilova I. B. (2017). Scientific Astronomical School by Professor Volodymyr Tsesevich on the physics of variable stars. *Odessa Astron. Publs*, **30**, 256—262.
51. Vavilova I. B., Artemenko T. G., Pakuliak L. K. (2014). Biographical index «Astronomers of Ukraine» at the UkrVO portal. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **30** (1), 46—52.
52. 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, Proceedings of 40 History Symposium IAA* (Valencia, Spain, 2006). Ed. M. Freeman. *AAS History Series*, **37**, 88—96.
53. Vidmachenko A. P., Kazantseva L. V., Morozhenko O. V., Choliy V. Ya., Nevodovsky P. V. (2019). Astronomical observations and monitoring surveys of the Earth from the surface or from the Moon's orbit and their ground support. *Space Science and Technology*, **25** (5), 25—75 [in Ukrainian].
54. Yatskiv Ya. S., Vavilova I. B., Romanets O. A., Savchuk V. S. (2017). Some little-known facts and events from the history of gravitational wave research in Ukraine. *Space Science and Technology*, **23** (3), 64—72.
55. Yatskiv Ya. S., Vidmachenko A. P., Morozhenko A. V., Sosonkin M. G., Ivanov Y. S., Syniavskiy I. I. (2008). Spectropolarimetric device for overatmospheric investigations of solar System bodies. *Space Science and Technology*, **14** (2), 56—67 [in Russian].
56. Zavalishin A. P., Datsenko A. V. (1997). Yu. V. Kondratyuk (O. G. Shargei) — the founder of cosmonautics. *Space Science and Technology*, **3** (1), 3—64 [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції 08.10.2021
 Після доопрацювання 01.11.2021
 Прийнято до друку 08.11.2021

Received 08.10.2021
 Revised 01.11.2021
 Accepted 08.11.2021

*M. A. Balyshev*¹, Director, Ph.D. in Hist.

E-mail: m.a.balyshev@gmail.com

*Yu. Yu. Koval*², Postgradual Student

E-mail: k.yuliia19@gmail.com

¹ Central State Scientific and Technical Archive of Ukraine

139, Moskalivska Str., Kharkiv, 61157 Ukraine

² National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

2, Kyrypchova str., Kharkiv, 61002 Ukraine

PARTICIPATION OF KHARKIV ASTRONOMICAL OBSERVATORY AND ITS REPRESENTATIVES IN THE SOVIET SPACE PROGRAM IN 1960

The article is devoted to the studying of documentary facts on the history of astronomy of the 1960s. Its purpose is to highlight the events related to the participation of the Kharkiv astronomical observatory in the Soviet space program in a certain period. The chronology of involvement of Kharkiv astronomers in programs on development and functioning of objects «V-67», «E-7», «E-8», «L-3», «M-69», creation of artificial Lunodrome, processing of photographic materials, that were obtained by spacecraft «Lunar orbiter 2», «Ranger 7», «Surveyor 1», «Luna-9», «Luna-12», «Luna-13», and «Zond-3» are considered. The directions of scientific research in projects «Altai», «Atlas», «Luks», and others of the Astronomical observatory of O. M. Gorky Kharkiv State University are analyzed.

The main tasks that the Kharkiv astronomical observatory carried out in the 1960s were found next: photometric studies of details on the reverse side of the Moon; study of the physical, mechanical, and chemical properties of the lunar soil and its optical properties; photometric analysis of certain areas of the lunar surface; photometric calculations necessary for the design of orientation systems of automatic interplanetary stations; study of the luminosity of the lunar surface.

The retro-information resources, which were firstly involved into consideration, provided a chronological sequence of events related to the participation of the University observatory in the development and functioning of artificial space objects during the given period. These resources helped to specify the achievements of Kharkiv astronomers in the Soviet program of space exploration and to prove (or clarify) some little-known facts.

Keywords: Moon, planetology, photometric research, Kharkiv astronomical observatory, Soviet space program, Lunodrome, spacecraft, Moon rover.

Про відзначення 80-ліття з дня народження видатного вченого та організатора науки директора Інституту телекомунікаційних систем НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» ІЛЬЧЕНКА МИХАЙЛА ЮХИМОВИЧА



13 вересня 2021 р. виповнилося 80 років від дня народження автора та члена редколегії «Космічна наука і технологія» Михайла Юхимовича Ільченка.

Головний редактор журналу Я. С. Яцків вітав ювіляра з цією знаковою датою та взяв участь у роботі Круглого столу «Досвід наукової школи «Мікрохвильові та цифрові телекомунікації»».

Окрім загальноновизнаних здобутків наукової школи М. Ю. Ільченка особливе значення має ініціатива групи фахівців Державного політехнічного музею при НТУ КПІ під керівництвом М. Ю. Ільченка про започаткування багатотомного видання «Видатні конструктори України». Вже видано вісім томів цієї унікальної серії.

(За матеріалами книги «Академік Михайло Ільченко: 60 років разом з КПІ»)

Запрошуємо Вас до участі у роботі Круглого столу Досвід наукової школи «Мікрохвильові та цифрові телекомунікації» 28 вересня 2021 року Зала Адміністративної ради за адресою: м. Київ, пр-т Перемоги, 37 корп. 6-а М «Політехнічний інститут»	Програма 28 вересня 2021 р. <u>15.00 – 17.00</u> Беруть участь у засіданні: академіки НАН України Яцив Ярослав Степанович, Хміч Олександр Миколайович, Петров Вічеслав Васильович, Голова Правління ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Корольова Проценко В'ячеслав Олександрович, Історик, доктор фізико-математичних наук професор Шендеровський Василь Андрійович	<i>І. Вступне слово</i> <i>Ільченко Михайло Юхимович, академік НАН України, керівник наукової школи, директор Інституту телекомунікаційних систем (ІТС), голова Вченої ради КПІ ім. Ігоря Сікорського. Представлення ювілейної книги «60 років разом з КПІ».</i> <i>II. Виступи</i> <i>1. Урівський Леонід Олександрович, д.т.н., проф., керівник освітньої програми ІТС Наукова школа ІТС: від телематикос до інфокомунікацій.</i> <i>2. Наритник Теодор Миколайович, к.т.н., професор ІТС Діалектика та тергерцові технології – важливі віхи в розвитку мікрохвильових телекомунікацій.</i> <i>3. Живков Олександр Петрович, к.т.н., доцент ІТС Моделювання резонансних квантових ефектів мікрохвильовими метаматеріальними структурами.</i> <i>4. Капшник Сергій Володимирович, к.т.н., доцент ІТС Супутникова система Інтернету речей на базі архітектури розподіленого супутника.</i> <i>5. Кравчук Сергій Олександрович, д.т.н., професор, зав. каф. телекомунікацій ІТС Інформаційно-телекомунікаційні системи з використанням мікрохвильових технологій та спеціалізованих програмних засобів.</i>
--	--	--