

Викладено результати оригінальних досліджень із питань релятивістської астрофізики та космології, астрофізики високих енергій, фізики Сонця та малих тіл Сонячної системи, астрометрії, небесної механіки, фізики верхньої атмосфери.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів старших курсів, які спеціалізуються в галузі астрономії.

The Bulletin includes results of original investigations within relativistic astrophysics and cosmology, high energy astrophysics, Solar physics and small bodies of the Solar System, astrometry, stellar mechanics, physics of the upper atmosphere.

It is intended for scientists, post-graduate students and student-astronomers.

<b>ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР</b>	<b>В. М. Івченко, д-р фіз.-мат. наук, проф.</b>
<b>РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ</b>	<b>В. М. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук (заст. голов. ред.); А. М. Мозгова, канд. фіз.-мат. наук (відп. ред.); Б. І. Гнатик, д-р фіз.-мат. наук; М. Ю. Гордовський, канд. фіз.-мат. наук; В. І. Жданов, д-р фіз.-мат. наук; В. В. Клецонок, канд. фіз.-мат. наук; Р. І. Костик, д-р фіз.-мат. наук; В. Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук; Г. П. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук; С. Л. Парновський, д-р фіз.-мат. наук; А. Дель Пополо, проф.; І. В. Лук'яник, канд. фіз.-мат. наук</b>
<b>Адреса редколегії</b>	<b>Астрономічна обсерваторія; вул. Обсерваторна, 3, м. Київ, 04053, Україна; ☎ (38044) 486 26 91, (38044) 486 09 06, e-mail: visnyk.astronomiya@knu.ua</b>
<b>Затверджено</b>	<b>Вченою радою Астрономічної обсерваторії 23.12.22 (протокол № 8)</b>
<b>Включено</b>	<b>до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), Наказ Міністерства освіти і науки України № 1188 від 24.09.20</b>
<b>Зареєстровано</b>	<b>Міністерством інформації України. Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 20329-101129 від 25.07.2013</b>
<b>Засновник та видавець</b>	<b>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02</b>
<b>Адреса видавця</b>	<b>б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна; ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28</b>

# **BULLETIN of**

## **TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV**

ISSN 1728-273x

**ASTRONOMY**

**2(66)/2022**

**Established in 1958**

The Bulletin includes results of original investigations within relativistic astrophysics and cosmology, high energy astrophysics, Solar physics and small bodies of the Solar System, astrometry, stellar mechanics, physics of the upper atmosphere.

It is intended for scientists, post-graduate students and student-astronomers.

Викладено результати оригінальних досліджень із питань релятивістської астрофізики та космології, астрофізики високих енергій, фізики Сонця та малих тіл Сонячної системи, астрометрії, небесної механіки, фізики верхньої атмосфери.

Для наукових працівників, аспірантів, студентів старших курсів, які спеціалізуються в галузі астрономії.

<b>EDITOR-IN-CHIEF</b>	<b>V. M. Ivchenko, Dr Hab., Prof.</b>
<b>EDITORIAL BOARD</b>	<b>V. M. Efimenko, PhD (Associate Editor in Chief); A. M. Mozgova, PhD (Executive Editor); M. Yu. Gordovsky, PhD; B. I. Hnatyk, Dr Hab.; V. V. Kleschonok, PhD; R. I. Kostyk, Dr Hab.; V. G. Lozytsky, Dr Hab.; G. P. Milinevsky, Dr Hab.; S. L. Parnovsky, Dr Hab.; A. Del Popolo, Prof.; I. V. Luk'yanyk, PhD; V. I. Zhdanov, Dr Hab.</b>
<b>Address</b>	<b>Astronomical Observatory; 3, Observatorna str., Kiev, 04053, Ukraine; ☎ (38044) 486 26 91, (38044) 486 09 06, e-mail: visnyk.astronomiya@knu.ua</b>
<b>Approved by the</b>	<b>Academic Council of Astronomical Observatory 23.12.22 (protocol № 8)</b>
<b>Accreditation</b>	<b>The journal is included in the "List of Scientific Professional Editions of Ukraine" (Category B), Decree of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 1188 issued on 24.09.2020</b>
<b>Certified by the</b>	<b>Ministry of Information of Ukraine. State registration certificate KB № 20329-101129 issued on 25.07.2013</b>
<b>Founded and published by</b>	<b>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University" State Certificate № 1103 issued on 31.10.2002</b>
<b>Address:</b>	<b>14, Taras Shevchenka Blvd., Kiev, 01601, Ukraine ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; Fax 239 31 28</b>

<b>Штанов Ю.</b> Космічні нейтрино від розпаду скалярона як темної матерії .....	5
<b>Клещонок В.</b> Метод опрацювання синхронних спостережень покриттів зір астероїдом із кількох пунктів .....	8
<b>Лозицька Н., Лозицький В.</b> Метод відношення ліній – можливий інструмент для надійнішого прогнозування сонячних спалахів .....	12
<b>Петренко Б., Козак Л., Кронберг Е., Баллаї І.</b> Апробація хвильового дисперсійного аналізу за допомогою багатосупутникових методів .....	20
<b>Мозгова А., Голубасв О.</b> Метеорна База даних за спостереженнями у 2019–2021 роках із використанням автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна .....	26
<b>Громов М., Яковкін І., Лозицький В.</b> Особливості магнітного поля у лімбовому сонячному спалаху 12 липня 2012 року на висоті близько 40 мегаметрів .....	36
<b>Клещонок В., Карбовський В., Буромський М., Лашко М., Єфіменко В.</b> Модернізація астрономічного комплексу спостережної станції Лісники .....	42
<b>Єфіменко В.</b> Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка у 2022 році .....	49
<b>Іванчук Віктор Гнатович</b> Некролог .....	53

---

## CONTENTS

---

<b>Shtanov Yu.</b> Cosmic neutrino from the decay of the scalaron dark matter.....	5
<b>Kleshchonok V.</b> Method of processing synchronous observations of star occultation by an asteroid from several points .....	8
<b>Lozitska N., Lozitsky V.</b> The line ratio method as a possible tool for more reliable forecasting solar flashes.....	12
<b>Petrenko B., Kozak L., Kronberg E., Ballai I.</b> Approbation of wave dispersion analysis using multispacecraft methods .....	20
<b>Mozgova A., Golubaev A.</b> The meteor Database of observations in 2019–2021 with the automatical video and spectral meteor patrol of V. N. Karazin Kharkiv National University .....	26
<b>Gromov M., Yakovkin I., Lozitsky V.</b> Magnetic field peculiarities in limb solar flare of 12 July 2012 on heigh about 40 megameters .....	36
<b>Kleshchonok V., Karbovsky V., Buromsky M., Lashko M., Efimenko V.</b> Modernization of astronomical complex of observational station Lisnyky.....	42
<b>Efimenko V.</b> Astronomical observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv in 2022.....	49
<b>Ivanchuk Viktor Hnatovich</b> Necrologue .....	53

## COSMIC NEUTRINO FROM THE DECAY OF THE SCALARON DARK MATTER

*The scalaron dark matter in  $F(R)$  gravity theory can decay into pairs of massive neutrino. We calculate the corresponding decay width and the current neutrino abundance and spectrum in the universe. The obtained neutrino flux turns out to be very small compared to the solar neutrino flux at Earth at similar energies.*

**Keywords:** modified gravity, dark matter, neutrino.

**Introduction.** The metric  $F(R)$  gravity model is described by the Lagrangian

$$L_s = \frac{M^2}{3} \left( -2\Lambda + R + \frac{R^2}{6m^2} + \dots \right) = \frac{M^2}{3} F(R), \quad (1)$$

where  $M = 3 \times 10^{18}$  GeV is the reduced Planck mass,  $\Lambda$  is the cosmological constant, and  $R$  is the scalar curvature. The constant  $m$  becomes the mass of the new degree of freedom – the scalaron. The scalaron can be a dark-matter candidate if its mass lies in the range [1–4]

$$4.4 \text{ meV} \leq m \leq 1.2 \text{ MeV}. \quad (2)$$

The upper bound is obtained from the consideration of production of electron-positron pairs in the Galactic Centre [1, 2], while the lower bound is caused by the scalaron excitation during the electroweak phase transition [3, 4]. Minimal coupling of the matter fields to  $F(R)$  gravity generates universal couplings of the scalaron to all massive particles, including neutrinos. If the scalaron is sufficiently light, then it can decay only to photons and to light neutrinos. Scalaron decays into a pair of photons were under consideration, e.g., in [1–4], with the resulting lifetime

$$\tau_{\phi \rightarrow \gamma\gamma} \sim \frac{10^2 M^2}{\alpha^2 m^3} \sim 10^{38} \left( \frac{\text{eV}}{m} \right)^3 \text{ yr}, \quad (3)$$

where  $\alpha \approx 1/137$  is the electromagnetic coupling constant.

According to modern experiments, at least two of the light neutrinos are massive, with the direct experimental upper bound on the mass  $m_\nu < 0.8$  eV [5]. Indirect cosmological bounds are even more stringent:  $\sum m_\nu < 0.12$  eV [6]. On the other hand, results on neutrino oscillations [7] give a lower bound on one of the massive light neutrinos  $m_\nu > 0.05$  eV. If the scalaron dark matter is heavier than neutrino, it can decay into a neutrino-antineutrino pair. In this paper, we calculate the decay lifetime and the resulting cosmological abundance and spectrum of neutrinos from such decays.

**The scalaron coupling to neutrinos and decay rate.** As shown in detail in [3, 4], the scalaron interacts universally with the fields of the Standard Model through its mixing with the Higgs boson. In particular the scalaron is coupled to neutrino with a small Yukawa coupling  $\lambda = m_\nu/M$  in accordance with the scalaron universal interaction with fermions (see [4]). The scalaron in the neighbourhood of the minimum of its potential is described by a massive scalar  $\phi$ . Neutrinos (light as well as heavy) in most of the neutrino extensions of the Standard Model are of Majorana type. Therefore, we can consider the scalaron-neutrino coupling in the form

$$L_{\text{int}} = -\frac{\lambda}{2} \bar{\psi} \psi, \quad \lambda = \frac{m_\nu}{M}. \quad (4)$$

Coupling (4) in the first order gives the total decay width into a neutrino pair:

$$\Gamma = \frac{\lambda^2}{16\pi} \sqrt{m^2 - (2m_\nu)^2}. \quad (5)$$

For  $2m_\nu \ll m$ , this results in the lifetime with respect to such decays

$$\tau_{\phi \rightarrow \nu\bar{\nu}} \approx \frac{16\pi M^2}{mm_\nu^2} \sim 10^{40} \left( \frac{\text{eV}}{m} \right) \left( \frac{\text{meV}}{m_\nu} \right)^2 \text{ yr}. \quad (6)$$

This should be compared with (3). Given the upper bound on the neutrino mass  $m_\nu < 0.8$  eV, one can observe that decays into photons will dominate for all reasonable masses of the scalaron.

**Spectrum of cosmological neutrinos.** Let us now calculate the current spectrum of neutrinos that were radiated by the scalaron through all the history of the expanding universe. Let  $f(p)dp$  be the comoving number density of the produced neutrinos with comoving absolute momentum  $p$  in the interval  $dp$ . After neutrino with comoving momentum  $p$  are produced, this quantity remains to be constant in the homogeneous universe. During neutrino production, the quantum states with momenta  $p$  are populated according to the cosmological redshift. As the scale factor  $a$  of the universe expansion increases by  $\Delta a$ , the comoving momentum interval  $\Delta p = p \Delta a/a$  becomes filled with particles, where  $p$  is the momentum in resonance with the oscillating scalaron. We, therefore, have

$$f(p) \Delta p = f(p) p \frac{\Delta a}{a}. \quad (7)$$

Dividing this by the corresponding time interval  $\Delta t$  and denoting by  $H$  the Hubble parameter, we then have

$$\frac{dn_\nu}{dt} = f(p) pH = 2\Gamma n_\phi. \quad (8)$$

Here,  $n_\nu$  is the total comoving number density of neutrinos, and  $n_\phi$  is the comoving number density of the scalaron particles, which is constant in time if their decays are neglected. This gives us the spectral distribution

$$f(p) = \frac{2\Gamma n_\phi}{H_p p}, \tag{9}$$

where  $H_p$  is the Hubble parameter at the time when neutrino with comoving momentum  $p$  is in resonance with the scalaron, i.e., when its energy  $E(p/a) = m/2$  (we set the present scale factor  $a_0 = 1$ ). From this last condition, we obtain

$$a^2 = \frac{p^2}{m^2/4 - m_\nu^2}, \quad 1+z = \frac{1}{a} = \frac{\sqrt{m^2/4 - m_\nu^2}}{p}, \tag{10}$$

where  $z$  is the cosmological redshift.

At the late time of the universe evolution, we have, approximately,

$$H = H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}, \tag{11}$$

where Omegas denote the standard cosmological density parameters for matter density and cosmological constant. Substituting everything into (9), we obtain

$$f(p) = \frac{2\Gamma n_\phi}{p H_0 \sqrt{\Omega_m (m^2/4 - m_\nu^2)^{3/2} / p^3 + \Omega_\Lambda}} = \frac{\lambda^2 \rho_\phi \sqrt{1 - (2m_\nu/m)^2}}{8\pi p H_0 \sqrt{\Omega_m (m/2p)^3 (1 - (2m_\nu/m)^2)^{3/2} + \Omega_\Lambda}}, \tag{12}$$

where  $\rho_\phi$  is the comoving energy density of the scalaron (equal to its current energy density).

For a reasonable simplicity, we will assume in what follows that  $2m_\nu \ll m$ . In this case, expression (12) simplifies to

$$f(p) = \frac{\lambda^2 \rho_\phi}{8\pi p H_0 \sqrt{\Omega_m (m/2p)^3 + \Omega_\Lambda}}. \tag{13}$$

Since the integral over  $p$  is convergent at the low- $p$  end, the total number density of neutrino can be estimated as

$$n_\nu \approx \frac{\lambda^2 \rho_\phi}{8\pi H_0} \int \frac{dp}{p \sqrt{\Omega_m (m/2p)^3 + \Omega_\Lambda}} = \frac{\lambda^2 \rho_\phi}{8\pi H_0} \int \frac{dx}{x \sqrt{\Omega_m / x^3 + \Omega_\Lambda}}. \tag{14}$$

Using the relation  $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$ , we obtain

$$n_\nu = \frac{\lambda^2 \rho_\phi}{8\pi H_0} \times \frac{2 \operatorname{arsinh} \sqrt{1/\Omega_m - 1}}{3\sqrt{1 - \Omega_m}}. \tag{15}$$

The second factor in this expression is approximately equal to unity for the established value of  $\Omega_m \approx 0.29$  [6]. We further have

$$\rho_\phi = 2M^2 H_0^2 \Omega_\phi, \tag{16}$$

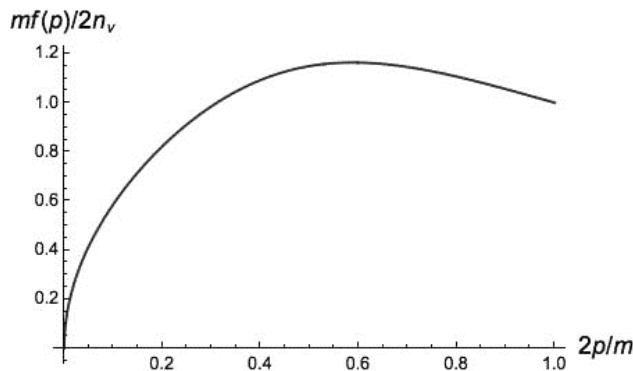
hence

$$n_\nu \approx \frac{\lambda^2}{4\pi} M^2 H_0 \Omega_\phi = \frac{1}{4\pi} m_\nu^2 H_0 \Omega_\phi = 10^{-27} \left( \frac{m_\nu}{\text{meV}} \right)^2 \text{ cm}^{-3}, \tag{17}$$

where we have substituted the established values [6] for the  $\Lambda$ CDM model parameters  $H_0 \approx 70$  km/s Mpc and  $\Omega_\phi \approx 0.24$  (which is the dark-matter density parameter in our case). The spectral density (13) can then be written as

$$f(p) \approx \frac{n_\nu}{p \sqrt{\Omega_m (m/2p)^3 + 1 - \Omega_m}}, \tag{18}$$

with  $n_\nu$  given by (17). This completes the determination of the spectral density of cosmological neutrinos obtained from the scalaron decays. The normalised spectral distribution  $mf(p)/2n_\nu$  for  $\Omega_m \approx 0.29$  is presented in Fig. 1.



**Fig. 1.** Normalised spectral distribution  $mf(p)/2n_\nu$  given by (18) for  $\Omega_m \approx 0.29$

**Discussion.** We have calculated the total decay width (5) of the scalaron of mass  $m$  into a pair of Majorana neutrinos with mass  $m_\nu$ . For typical realistic values of these parameters, this decay width is smaller compared to that of scalaron decay into a pair of photons, so that the corresponding lifetime (6) is larger than (3). If the scalaron forms all of dark matter in the universe, neutrinos are emitted continuously and their resulting spectral distribution is given by (12)–(18). The spectrum is broadly distributed between  $p = 0$  and  $p \approx m/2$  with peak around  $p \approx 0.3m$  (see Fig. 1). The flux of neutrinos produced by the scalaron dark matter will be given by

$$cf(p_{\max}) \approx \frac{2cn_\nu}{m} \approx 10^{-16} \left( \frac{\text{eV}}{m} \right) \left( \frac{m_\nu}{\text{meV}} \right)^2 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{eV}^{-1}. \quad (19)$$

For comparison, typical solar neutrino fluxes at Earth in the range from eV to MeV are of the order  $1\text{--}10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{eV}^{-1}$  [8]. Since the scalaron mass in this scenario is limited by (2), we are dealing with relatively low-energy neutrinos with a small flux, hard to be detectable in the nearest future. The issue of neutrino emission from virialised dark-matter halos requires separate investigation, but the smallness of the decay width (5) will also result in low intensity of the neutrino emission line.

**Acknowledgment.** This research was funded by the Taras Shevchenko National University of Kyiv under project 22BF023-01.

#### References

1. Cembranos J. A. R. Dark matter from  $R^2$  gravity / J. A. R. Cembranos // Phys. Rev. Lett. – 2009. – V. 102, Id. 141301.
2. Cembranos J. A. R. Modified gravity and dark matter / J. A. R. Cembranos // J. Phys. Conf. Ser. – 2016. – V. 718, Id. 032004.
3. Shtanov Yu. Light scalaron as dark matter / Yu. Shtanov // Phys. Lett. B – 2021. – V. 820, Id. 136469.
4. Shtanov Yu. Initial conditions for the scalaron dark matter / Yu. Shtanov // J. Cosmol. Astropart. Phys. – 2022. – V. 10, Id. 079.
5. The KATRIN Collaboration. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity / The KATRIN Collaboration // Nature Physics – 2022. – V. 18, pp. 160–166.
6. The Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters / Astron. Astrophys. – 2020. – V. 641, Id. A6.
7. de Salas P. F. Status of neutrino oscillations 2018:  $3\sigma$  hint for normal mass ordering and improved CP sensitivity / P. F. de Salas, D. V. Forero, C. A. Ternes, M. Tórtola, J. W. F. Valle // Phys. Lett. B – 2018. – V. 782, pp. 633–640.
8. Vitagliano E. Grand unified neutrino spectrum at Earth: Sources and spectral components / E. Vitagliano, I. Tamborra, G. Raffelt // Rev. Mod. Phys. – 2020. – V. 92. – No. 4, Id. 045006.

Надійшла до редколегії 31.10.22

Ю. Штанов, д-р фіз.-мат. наук

Інститут теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна,  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

### КОСМІЧНІ НЕЙТРИНО ВІД РОЗПАДУ СКАЛЯРОНА ЯК ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

*Темна матерія у вигляді скалярона  $F(R)$  гравітації може розпадатись на пари масивних нейтрино. Ми обчислюємо відповідну ширину розпаду та сучасну кількість і спектр таких нейтрино у Всесвіті. Отриманий потік нейтрино виявляється дуже малим порівняно з потоком сонячних нейтрино біля Землі на тих самих енергіях.*

**Ключові слова:** модифікована гравітація, темна матерія, нейтрино.

## МЕТОД ОПРАЦЮВАННЯ СИНХРОННИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОКРИТТІВ ЗІР АСТЕРОЇДОМ ІЗ КІЛЬКОХ ПУНКТІВ

*Розмір і форма астероїда належать до основних його характеристик. Серед багатьох методів отримання цих параметрів може бути використаний метод спостереження покриттів зір астероїдами завдяки можливості залучення великої кількості спостерігачів – аматорів астрономії. Запропоновано новий метод зведення спостережень покриттів із віддалених пунктів, які отримують результати незалежно. Такий метод планується використовувати для проведення спостережень об'єднанням спостерігачів покриттів в Україні.*

*Ключові слова: астероїди, покриття зір.*

**Вступ.** Розмір і форма астероїда належать до основних його характеристик. Без знання цих величин неможливо визначити густину й альbedo астероїдів. Усі ці параметри необхідні для вивчення розподілу речовин у Сонячній системі. А це у свою чергу потрібно для розуміння фундаментальних процесів утворення й еволюції Сонячної системи. Існує кілька методів визначення діаметрів астероїдів. Історично першим масовим методом визначення діаметрів астероїдів був фотометричний метод, який за умови прийняття значення альbedo давав можливість оцінити ефективний діаметр астероїда, наприклад [9]. Але у цьому разі виникає можливість неправильно вибрати альbedo, що призведе до систематичної похибки в оцінюванні діаметрів. Інший спосіб реалізовано у проєкті Near Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer (NEOWISE) [6, 7]. У цьому проєкті використовують комбіновані оцінки блиску у видимій і середній інфрачервоній ділянках спектра. Це дає можливість незалежного оцінювання альbedo астероїдів і, як наслідок, підвищує точність оцінки розмірів. Проте точність залежить від прийнятої моделі, яка визначає альbedo астероїда. Найбільш точним і повним методом є вимірювання параметрів астероїдів за допомогою космічних місії. Вони відомі, це – Near-Earth Asteroid Rendezvous, Giotto, Galileo, Deep Space, Deep Impact, Hyabusa, Dawn, Stardust, Rosetta, та DART [8]. Але космічні місії надзвичайно дорогі проєкти та дозволяють охопити незначну кількість астероїдів. Для великих астероїдів використовують метод зображень із високим кутовим розділенням (high-angular-resolution imaging) на телескопах VLT та КЕСК [11]. Усього таким чином встановлено розміри та форму 42 астероїдів. Ще один спосіб вимірювання діаметрів астероїдів – за допомогою інтерферометра. Такий інструмент був створений на базі чотирьох 8,2-метрових телескопів, які перебувають на невеликій відстані між ними [5]. Він має назву Very Large Telescope Interferometer-Midinfrared Interferometric Instrument (VLTI-MIDI). Але через унікальність цього інструмента він зрідка використовується для визначення діаметрів, хоча було кілька вдалих визначень діаметра і форми астероїдів.

З іншого боку є прямий спосіб визначення діаметрів і форми астероїдів, який не потребує унікальних інструментів і може бути використаний навіть на невеликих телескопах [10]. Для цього треба спостерігати покриття зір астероїдом. Фіксуючи тривалість покриття і знаючи за ефемеридами швидкість астероїда, можна легко порахувати хорду (або частину діаметра астероїда), через яку проходить видимий шлях зір. Навіть одиничні спостереження покриттів, тобто визначення однієї хорди, можуть бути корисними при вдалому розташуванні спостерігача в зоні проходження тіні астероїда [1]. Але найцікавішими є спостереження покриттів із кількох пунктів. У такому випадку ми маємо набір хорд на різних відстанях від центра астероїда. Указані дані допомагають не тільки уточнити діаметр, але їх можна використати для встановлення форми астероїдів. В Україні розпочато роботи зі створення мережі спостерігачів покриттів, яка об'єднує кілька аматорів і професійних астрономів із Києва й Одеси [2]. У такому разі стає дуже актуальним питання про службу часу, яка повинна мати відповідну точність для зведення незалежних віддалених спостережень в єдину систему. Для вирішення цього питання була розроблена й активно впроваджується серед спостерігачів служба часу на GPS-приймачі [3, 4]. У цій роботі запропоновано метод зведення віддалених спостережень покриттів зір для визначення розмірів і форми астероїдів.

**Алгоритм зведення спостережень в одну систему.** Алгоритм побудовано на використанні ефемерид, в яких розраховано трек астероїда на поверхні Землі. Такі ефемериди можна знайти за адресою <https://asteroidoccultation.com>. У них наведено координати точок, через які проходить центр тіні астероїда, і відповідні моменти часу. Для точки, яка розміщена на цьому треку, необхідно обчислити момент, який відповідає найменшій відстані від положення проєкції центра астероїда (максимальній фазі покриття). Від цього моменту треба відрахувати моменти покриття і відкриття зірки. Фрагмент із подібних ефемерид наведено в таблиці. У ній записано координати точки максимальної фази покриття: довгота і широта у градусах, мінутах і секундах, Всесвітній час, який відповідає цим координатам, висота й азимут зір у градусах на цей момент, а також висота Сонця у градусах. Зрозуміло, що бажано проводити спостереження, коли закінчуються астрономічні сутінки (або ще не почалися), тобто Сонце має висоту менше ніж  $-17^\circ$ . Далі в таблиці вказано довготи, де проходять межі тіні астероїда, з урахуванням попередніх оцінок розмірів астероїда. Оскільки параметри руху астероїда і його розміри відомі з деякими похибками, то наступні дані таблиці показують можливі межі зміщення границь тіні за рахунок цих похибок.

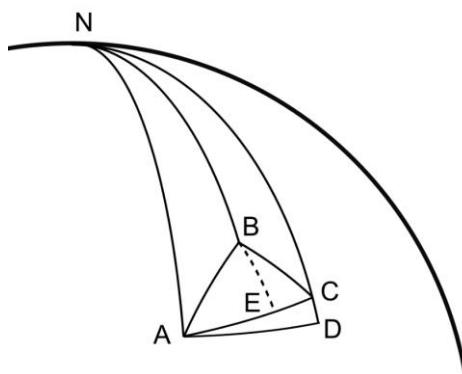
Таблиця

Фрагмент ефемериди покриття зір UCAC4 595-015044 астероїдом 845 Naema 30 жовтня 2022 р.

Centre			Star	Star	Sun	Path Limits		Error Limits	
E. Longitude	Latitude	U.T.	Alt	Az	Alt	Limit 1	Limit 2	Limit 3	Limit 4
						Latitude	Latitude	Latitude	Latitude
49°00'00"	46°51'43"	0 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 12.6 <sup>s</sup>	62°	240°	-25°	47°15'46"	46°27'48"	47°41'10"	46°02'49"
48°00'00"	47°32'19"	0 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 24.6 <sup>s</sup>	62°	237°	-26°	47°56'17"	47°08'29"	48°21'36"	46°43'34"
47°00'00"	48°12'07"	0 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 36.4 <sup>s</sup>	63°	235°	-26°	48°36'00"	47°48'21"	49°01'13"	47°23'32"
46°00'00"	48°51'06"	0 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 48.1 <sup>s</sup>	63°	232°	-27°	49°14'54"	48°27'26"	49°40'01"	48°02'42"
45°00'00"	49°29'16"	0 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 59.6 <sup>s</sup>	63°	230°	-27°	49°52'58"	49°05'42"	50°18'00"	48°41'04"



Розглянемо траєкторію руху максимальної фази покриття по поверхні Землі і положення пункту спостереження відносно цієї траєкторії. Обставини покриття показано на рисунку. Точки  $A$  і  $C$  – найближчі точки ефемеридного треку астероїда до пункту спостережень  $B$ .  $BE$  – відстань від точки спостережень до треку. Геоцентричні координати цих точок відповідно  $(\varphi_A, \lambda_A)$ ,  $(\varphi_B, \lambda_B)$ ,  $(\varphi_C, \lambda_C)$ .



**Рис.** До обчислень максимальної фази покриття для пункту спостереження (точка  $B$ ):  $AC$  – відрізок ефемеридного треку астероїда;  $BE$  – відстань від точки спостережень до треку;  $CD$  – різниця широт точок  $A$  і  $C$ ;  $N$  – північний полюс

Очевидно, що  $NA = \pi/2 - \varphi_A$ ,  $NB = \pi/2 - \varphi_B$ ,  $NC = \pi/2 - \varphi_C$ ,  $AD = \lambda_C - \lambda_A$ ,  $CD = \varphi_C - \varphi_A$ . На малих відстанях на поверхні Землі можна не враховувати різницю радіусів для відповідних точок рисунка. Тоді, використовуючи формули сферичної тригонометрії, для трикутника  $ABC$  можна записати таке:

$$\begin{aligned} \cos AB &= \sin \varphi_A \cdot \sin \varphi_B + \cos \varphi_A \cdot \cos \varphi_B \cdot \cos(\lambda_B - \lambda_A), \\ \cos BC &= \sin \varphi_C \cdot \sin \varphi_B + \cos \varphi_C \cdot \cos \varphi_B \cdot \cos(\lambda_C - \lambda_B). \end{aligned}$$

З прямокутного трикутника  $ACD$

$$\cos AC = \cos(\varphi_C - \varphi_A) \cdot \cos(\lambda_C - \lambda_A).$$

Кут  $BAC$  можна знайти із співвідношення

$$\cos \angle BAC = \frac{\cos BC - \cos AC \cdot \cos AB}{\sin AC \cdot \sin AB}.$$

З прямокутного трикутника  $ABE$

$$\begin{aligned} \sin BE &= \sin AB \cdot \sin \angle BAC, \\ \sin AE &= \frac{\sin AB \cdot \cos \angle BAC}{\cos BE}, \\ \sin \angle ABE &= \frac{\sin AE}{\sin AB}. \end{aligned}$$

Різницю довгот можна знайти за формулою

$$\tan(\lambda_E - \lambda_A) = \tan(\lambda_C - \lambda_A) \cdot \frac{\tan AE}{\tan AC}.$$

Далі інтерполяцією за ефемеридними даними можемо визначити момент часу найбільшої фази покриття і широту  $\varphi_E$ . Врахуємо еліптичність Землі, яка приводить до того, що радіус для даного пункту спостереження може відрізнятися від середнього. Тоді прямокутні геоцентричні координати точок спостереження розраховують за формулами

$$x = \frac{R_e \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin \varphi)^2}}, \quad y = \frac{R_e \cdot \cos \varphi \cdot \sin \lambda}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin \varphi)^2}}, \quad z = \frac{R_e \cdot (1 - e^2) \cdot \sin \lambda}{\sqrt{1 - (e \cdot \sin \varphi)^2}}.$$

де  $R_e$  – екваторіальний радіус Землі,  $e$  – перший ексцентриситет еліпсоїда. Він визначається як

$$e = \sqrt{\frac{R_e^2 - R_n^2}{R_e^2}},$$

де  $R_n$  – полярний радіус Землі.

Довжина відрізка  $s$ , який з'єднує точки  $B$  і  $E$ , буде таким:

$$s = \sqrt{(x_B - x_E)^2 + (y_B - y_E)^2 + (z_B - z_E)^2}.$$

Остаточну відстань хорди  $d$ , яку отримують із тривалості покриття, від центра астероїда обчислюємо так:

$$d = s \cdot \cos(A_0 - A_E) \cdot \cos Z_0,$$

де  $A_0$  і  $Z_0$  – азимут і зенітна відстань астероїда в момент покриття,  $A_E$  – азимут напрямку на точку  $E$ , який знаходимо за формулами

$$\sin \angle ABN = \frac{\cos \varphi_A \cdot \sin(\lambda_B - \lambda_A)}{\sin AB},$$

$$A_E = 2\pi - \angle ABN - \angle ABE.$$

Маючи кілька хорд та їхні відстані від центра астероїда для різних пунктів спостереження, ми можемо відновити форму проєкції астероїда на Землю для вказаного покриття. Завдання цього алгоритму полягало у знаходженні відстані  $d$  даного пункту спостережень від траєкторії центра астероїда для того, щоб будувати залежність розміру хорди астероїда від відстані до його центра. Для повного зведення треба враховувати моменти початку і кінця покриття відносно моменту максимальної фази, яку знаходять інтерполяцією за довжиною сторони  $AE$  відомих моментів часу, коли центр тіні перебуває в точках  $A$  і  $C$ .

**Висновок.** Запропоновано метод визначення відстані до центра тіні пункту спостереження покриття зорі астероїдом і моменту максимальної фази, який необхідний для зведення багатьох результатів спостережень із багатьох пунктів в одну систему. Така процедура потрібна для уточнення розмірів і форми проєкції астероїда.

#### Список використаних джерел

- Kleshchonok V. V. Observation of stellar occultations by asteroid (259) Alethea and comet 21P/Jacobini-Zinner / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky, and M. V. Lashko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2021. – Vol. 37, No. 1. – P. 41–51.
- Kleshchonok V. V. Star occultation by small bodies of the Solar system: current state of observations in Ukraine / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky et al. // *Space Sci. & Technol.*, 2022. – V.28(5). – P. 56–65.
- Kleshchonok V. V. Observations of stars occultations by the Moon with the "Spalakh" television system / V. V. Kleshchonok, M. I. Buromsky // *Кинематика і фізика небесних тел.* – 2005. – Т. 21, № 5-додаток. – С. 405–408.
- Kleshchonok V. V. The Kyiv electronic database of television observations of star occultations by the moon/ V. V. Kleshchonok, N. I. Buromskii, I. V. Khat'ko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 2008. – Vol. 24, Iss. 2. – P. 114–118.
- Li J.-Y. Measuring the sizes, shapes, surface features and rotations of Solar System objects with interferometry. / J.-Y. Li, M. J. Kuchner, R. J. Allen, S. S. Sheppard // *Icarus*, 2011. – V. 211, iss. 2. – P. 1007–1021.
- Mainzer A. Preliminary results from NEOWISE: an enhancement to the wide-field infrared survey explorer for solar system science/ A. Mainzer, J. Bauer, T. Grav, et al. // *The Astrophysical Journal.* – 2011. – V. 731, iss. 1. – Id. 53. – 13 pp.
- Masiero, J. R. Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5 / J. R. Masiero, A. K. Mainzer, J. M. Bauer et al. // *The Planetary Science Journal*, 2020. – V. 1, iss. 1. – Id.5. – 10 pp.
- Nakano R. NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART): Mutual Orbital Period Change Due to Reshaping in the Near-Earth Binary Asteroid System (65803) Didymos / R. Nakano, M. Hirabayashi, H. F. Agrusa, et al. // *The Planetary Science Journal*, 2022. – V. 3, iss. 7. – Id.148. – 16 pp.
- Stokes G. H. Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR) / G. H. Stokes, J. B. Evans, H. E. M. Vigg, et al. // *Icarus.* – 2000. – V. 148, iss. 1. – P. 21–28.
- Tanga P. Asteroid occultations today and tomorrow: toward the GAIA era. / P. Tanga, M. Delbo // *Astron. and Astrophys.*, 2007. – V. 474. – P.1015–1022.
- Vernazza P. VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids: Final results and synthesis / P. Vernazza, M. Ferrais, L. Jorda et al. // *Astron. and Astrophys.*, 2021. – V. 654, id.A56.

#### References

- Kleshchonok V. V. Observation of stellar occultations by asteroid (259) Alethea and comet 21P/Jacobini-Zinner / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky, and M. V. Lashko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2021. – Vol. 37, No. 1. – P. 41–51.
- Kleshchonok V. V. Star occultation by small bodies of the Solar system: current state of observations in Ukraine / V. V. Kleshchonok, V. L. Karbovsky, M. I. Buromsky et al. // *Space Sci. & Technol.*, 2022. – V.28(5). – P. 56–65.
- Kleshchonok V. V. Observations of stars occultations by the Moon with the "Spalakh" television system / V. V. Kleshchonok, M. I. Buromsky // *Кинематика і фізика небесних тел.* – 2005. – Т. 21, № 5-supplement. – С. 405–408.
- Kleshchonok V. V. The Kyiv electronic database of television observations of star occultations by the moon/ V. V. Kleshchonok, N. I. Buromskii, I. V. Khat'ko // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 2008. – Vol. 24, Iss. 2. – P. 114–118.
- Li J.-Y. Measuring the sizes, shapes, surface features and rotations of Solar System objects with interferometry. / J.-Y. Li, M. J. Kuchner, R. J. Allen, S. S. Sheppard // *Icarus*, 2011. – V. 211, iss. 2. – P. 1007–1021.
- Mainzer A. Preliminary results from NEOWISE: an enhancement to the wide-field infrared survey explorer for solar system science/ A. Mainzer, J. Bauer, T. Grav, et al. // *The Astrophysical Journal.* – 2011. – V. 731, iss. 1. – Id. 53. – 13 pp.
- Masiero, J. R. Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5 / J. R. Masiero, A. K. Mainzer, J. M. Bauer et al. // *The Planetary Science Journal*, 2020. – V. 1, iss. 1. – Id.5. – 10 pp.
- Nakano R. NASA's Double Asteroid Redirection Test (DART): Mutual Orbital Period Change Due to Reshaping in the Near-Earth Binary Asteroid System (65803) Didymos / R. Nakano, M. Hirabayashi, H. F. Agrusa, et al. // *The Planetary Science Journal*, 2022. – V. 3, iss. 7. – Id.148. – 16 pp.
- Stokes G. H. Lincoln Near-Earth Asteroid Program (LINEAR) / G. H. Stokes, J. B. Evans, H. E. M. Vigg, et al. // *Icarus.* – 2000. – V. 148, iss. 1. – P. 21–28.
- Tanga P. Asteroid occultations today and tomorrow: toward the GAIA era. / P. Tanga, M. Delbo // *Astron. and Astrophys.*, 2007. – V. 474. – P.1015–1022.
- Vernazza P. VLT/SPHERE imaging survey of the largest main-belt asteroids: Final results and synthesis / P. Vernazza, M. Ferrais, L. Jorda et al. // *Astron. and Astrophys.*, 2021. – V. 654, id.A56.

Надійшла до редколегії 31.10.22

V. Kleshchonok, PhD  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### **METHOD OF PROCESSING SYNCHRONOUS OBSERVATIONS OF STAR OCCULTATION BY AN ASTEROID FROM SEVERAL POINTS**

*The size and shape of the asteroid belongs to its main characteristics. Knowledge of these quantities is necessary to determine the density and albedo of asteroids, as well as to understand the fundamental processes of formation and evolution of the solar system. The most popular method for determining these values for asteroids is the photometric method. However, the accuracy of its determination depends on the asteroid heating model used. There are direct methods for determining the shape - measurements using space missions and ground-based interferometers using the largest telescopes. Such methods give accurate results, but are not applicable for mass determinations. The method of observing the occultations of stars by asteroids is available to a wide range of observers, including amateur astronomers. A community of observers is being formed in Ukraine, who plan to start regular observations of these phenomena. When processing such observations, you need to know the exact position of individual observers and have a detailed occultation ephemeris, which can be found at <https://asteroidoccultation.com>. It is also necessary to have a good time service, which will allow determining the moments of the beginning and end of the occultation with sufficient accuracy. Detailed ephemeris provides information about the trajectory of the shadow on the Earth's surface, indicating the exact time the shadow was in the given coordinates. The ephemeris also contains information about the horizontal coordinates of the star for the center of the shadow at the same time points. The ephemeris also gives the coordinates of the edges of the shadow and their errors, which include the errors of the predetermined asteroid diameter and the errors of the parameters of the asteroid's orbit. The article provides a method for calculating the distance from the observation point to the trajectory of the shadow and a method for calculating the moment of time of the maximum occultation phase for a given observation point. It is possible to combine all independent observations into a single system to determine the diameter and shape of the asteroid knowing these values. This method is planned to be used for processing observations of the Ukrainian community of observers of occultations of stars by asteroids.*

*Keywords: asteroids, star occultations.*

## МЕТОД ВІДНОШЕННЯ ЛІНІЙ – МОЖЛИВИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ НАДІЙНІШОГО ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ СПАЛАХІВ

*Наведено вже опубліковані й нові спостережні дані, які вказують на те, що в областях сонячних спалахів є суттєва відмінність субтелескопічної структури магнітного поля, яка відсутня за межами спалахів. Зокрема, магнітні поля по лініях FeI 6301.5 і FeI 6302.5 Å, виміряні у спалахах за межами тіней сонячних плям, мають інверсне співвідношення  $V_{\text{obs}}(6301.5) < V_{\text{obs}}(6302.5)$ , тоді як без спалахів спостерігається переважно  $V_{\text{obs}}(6301.5) > V_{\text{obs}}(6302.5)$ . Аргументовано висновок, що у спалахах це пов'язано з тим, що там на фотосферному рівні справджується просторово нероздільний контакт силових трубок із "кілогаусовими" полями і фонового поля, які мають протилежні магнітні полярності. Прямі спостережні вказівки на особливо сильні поля протилежної полярності знайдено у далеких крилах лінії FeI 6173.3 Å. Нові унікальні спостережні дані, які стосуються ділянки сейсмічного джерела у винятково потужному сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2/4B, свідчать про те, що вказане вище інверсне співвідношення напруженостей є найсуттєвішим саме в зоні цього джерела. Запропоновано нову ідею щодо надійнішого прогнозування сонячних спалахів, яка зводиться до того, що нову актуальну інформацію для прогнозування слід отримувати з моніторингу спостережних даних у лініях FeI 6301.5 і FeI 6302.5 Å.*

**Ключові слова:** Сонце, сонячна активність, сонячні спалахи, магнітні поля, метод відношення ліній, прогнозування сонячних спалахів.

**Вступ.** Метод відношення ліній, що запропонований Яном Стенфло 1973 р. [19], призначений для вимірювання локальних магнітних полів у просторово нероздільних структурах сонячної фотосфери. Його суть зведена до того, що фактичні напруженості магнітного поля  $V_{\text{true}}$  у таких структурах (дуже тонких силових трубках, названих fluxtubes) можна оцінити на основі порівняння вимірених напруженостей  $V_{\text{obs}}$  у двох спеціально підібраних магніточутливих лініях. Такі лінії повинні мати однакову температурну чутливість і однакову силу осцилятора, але суттєво різні фактори Ланде. Це означає, що такі лінії мають формуватись на однаковій висоті в атмосфері Сонця і змінюватись однаковим чином у випадку переходу до областей на Сонці з іншою температурою. Формально такі лінії можна розглядати як одну і ту саму магніточутливу лінію, що має два різні значення (моди) фактора Ланде  $g$ . У цьому разі, теоретично, вимірювання по лінії з меншим фактором Ланде мають краще відповідати режиму слабкого магнітного поля, коли сигнал магнітографа [1] строго пропорційний реальному зєсманівському розщепленню  $\Delta\lambda_n$ . Однак для тієї лінії, що має більший фактор Ланде, відхилення від вказаної пропорційності має бути суттєвішим, якщо фактичні магнітні поля на Сонці настільки сильні, що зєсманівське розщеплення  $\Delta\lambda_n$  є близьким до спектральної ширини лінії  $\Delta\lambda_{1/2}$  або ж навіть більше за неї. Це відхилення від пропорційності називають "насиченням" сигналу магнітографа; воно спостерігається у сонячних плямах за напруженостей магнітного поля, що перевищують 1000 Гс. Фізична причина цього ефекту дуже проста: у сильних магнітних полях зєсманівські сигма-компоненти розщеплюються настільки сильно, що частково виходять за межі щільної фотометра магнітографа, який реєструє величину сигналу поляризації внаслідок ефекту Зєсмана. Якщо на Сонці існують дуже тонкі просторово нероздільні силові трубки з такими ж сильними полями, як у сонячних плямах, то тоді порівняння вимірених напруженостей  $V_{\text{obs}}$  у двох вказаних лініях має давати такий результат: лінія з більшим фактором Ланде повинна давати менше вимірне поле, ніж лінія з меншим фактором Ланде. Ця відмінність пояснюється більшою втратою сигналу магнітографа для лінії з більшим фактором Ланде. Ефект "насичення" має бути тим більшим, чим більшою є справжня напруженість  $V_{\text{true}}$  магнітного поля у просторово нероздільних (субтелескопічних) силових трубках. Якщо порівняти виміряні напруженості  $V_{\text{obs}}$  у лініях з різними факторами Ланде, на основі модельних розрахунків можна оцінити дійсні напруженості у субтелескопічних силових трубках. Аналогічна можливість наявна і тоді, коли величини  $V_{\text{obs}}$  знайдено не з магнітографічних вимірювань, а з спектрально-поляризаційних, які дають змогу оцінити дійсну напруженість магнітного поля за величиною каліброваної амплітуди параметра Стокса  $V$  або ж за зміщенням "центрів ваги" профілів  $I \pm V$  [13].

На практиці виявляється, що результати інтерпретації методом відношення ліній неоднозначні, оскільки доводиться використовувати принаймні двокомпонентну модель магнітного поля, яка має багато вільних параметрів [16]. Зокрема, це такі параметри, як напруженість і полярність магнітного поля у силових трубках і фоновому полі, боковий профіль напруженості у силових трубках, орієнтація силових ліній відносно променя зору в межах вхідної апертури інструмента, фактор заповнення силових трубок, спектроскопічні параметри профілів ліній у зазначених структурах, а також відносні променеві швидкості. Однак залежність від фактора заповнення зникає, якщо припустити, що у проміжках між силовими трубками (тобто у "фоні") магнітне поле дорівнює нулю, але тоді ще залишається суттєва залежність від інших параметрів моделі. Саме таке припущення (про нульовий вклад фонового поля) використав Стенфло [19] для оцінювання дійсних напруженостей у силових трубках спокійних областей на Сонці. Були порівняні виміряні напруженості у двох спектральних лініях першого мультиплету заліза, FeI 5247.1 і 5250.2 Å, які мають дуже близькі висоти формування і температурні чутливості, але різні фактори Ланде, 2.0 і 3.0 відповідно. У припущенні, що боковий профіль напруженості є прямокутним, отримано напруженість  $B = 1100$  Гс, а за умови, що там гаусподібний профіль (приблизно такий, як у сонячних плямах) –  $B = 2300$  Гс. Пізніше Вієр [20] застосував подібний метод для інших спектральних ліній і лише прямокутний профіль напруженості. Таким чином отримано дійсні напруженості  $V_{\text{true}}$  в діапазоні 1500–2200 Гс, причому приблизно однакові для яскравих точок у спектральній лінії K Call,  $H_{\alpha}$  факелів і пор. У роботі [9] показано, що якщо для спостережень Вієра [20] використати непрямокутний профіль напруженості, то дійсні напруженості зростають у 1,5–5 раз, наближаючись до 10 кГс.

Пізніше в роботах [14, 15] враховано вклад фоновому поля  $B_{\text{фон}}$ , а також оцінено дійсні форми бокового профілю поля у силових трубках, з урахуванням даних про відношення каліброваних сигналів магнітографа у трьох різних ділянках профілів ліній FeI 5247.1 і 5250.2 Å. Справжні напруженості у силових трубках спокійних областей знайдено в межах 1500–2200 Гс при боковому профілі поля, подібному до спостереженого у сонячних порах. Також встановлено, що у припущенні чисто поздовжнього магнітного поля виникає така проста залежність:  $B_{\text{фон}} \approx 1000 f$ , де  $f$  – фактор заповнення. Зокрема, якщо  $f = 1$  (тобто силові трубки змикаються своїми стінками), то тоді  $B_{\text{фон}} \approx 1000$  Гс – це результат, який уявляється цілком логічним.

У цілому ж, інтерпретація вимірювань методом відношення ліній і нині перебуває практично у тому ж стані, в якому вона залишена у двох останніх роботах. Очевидно, у більшості дослідників домінує уявлення, що все більше за вхідною апертурою сонячні інструменти ось-ось дозволять безпосередньо розділити найдрібніші силові трубки і прямим методом визначити там напруженості й інші характеристики. Зокрема, найбільший на сьогодні 4-метровий сонячний телескоп має дифракційну межу на рівні 20–25 км, однак найдрібніші силові трубки, напевно, ще тонші, і мають діаметр у межах 10–70 км [18] чи 15–20 км [2]. Навіть, якщо фактичне просторове розділення стане рівним діаметру силових трубок, то все одно залишиться проблема внутрішньої структури цих трубок, зокрема форми бокового профілю поля – того параметра, про який йшлося вище. Для розв'язання цієї проблеми прямим методом необхідне ще вище просторове розділення.

Незважаючи на неоднозначність методу відношення ліній, він може дати в окремих випадках важливу інформацію про субтелескопічні структури і фонове поле – можливо, саме ту, якої не вистачає під час використання інших методів. Відомо, що прогнозування точного часу і місця виникнення сонячних спалахів на Сонці (особливо потужних) є нині нерозв'язаною проблемою. Роботами, виконаними у Кримській астрофізичній обсерваторії під керівництвом академіка А. Б. Северного, показано, що сонячні спалахи виникають переважно у складних групах сонячних плям, з високими горизонтальними градієнтами магнітного поля, при тісному контакті протилежних магнітних полярностей, а також у місцях раптової появи нового магнітного потоку [17]. Однак деякі сонячні спалахи виникають і у дуже простих групах сонячних плям.

Наприклад, сильний сонячний спалах 3 липня 2021 р. бала X1.5 виник у нумерованій активній області, яка мала лише одну невелику сонячну пляму (<https://spaceweather.com>). Ця пляма існувала менше доби. Аналогічний випадок був 29 листопада 2020 р., коли спалах бала M4.4 виник за лімба в активній області NOAA 2970; при виході цієї області з-за лімба в ній виявилась лише одна невелика сонячна пляма. Оскільки цей спалах виник за лімба, то його потужність могла бути значно вищою і відповідати, можливо, класу X. А найсильніший на сьогодні спалах 25-го циклу бала X2.2 відмічено 20 квітня 2022 р. у групі плям NOAA 2992, яка за три дні до спалаху, 17.04.2022 р., складалася також з однієї невеликої сонячної плями. У наступні три дні площа групи збільшилась, але ненабагато. Це своєрідні сюрпризи 25-го циклу – сильні спалахи поблизу одиночних плям. Указане свідчить про те, що під час прогнозування сонячних спалахів не враховують якусь важливу характеристику магнітного поля – можливо, саме про субтелескопічну структуру магнітного поля.

Метою представленої роботи є аналіз із цього погляду відповідних спостережних даних – як уже опублікованих, так і нових, ще не опублікованих.

**Опубліковані дані.** Перші важливі дані з указаної проблеми були отримані також у Кримській астрофізичній обсерваторії і опубліковані у тому ж 1973 р. [4]. Під час порівняння магнітографічних вимірювань магнітного поля по різних спектральних лініях виявилось, що результати залежать від магнітної чутливості ліній. На рис. 1 цей результат подано разом із деякими іншими даними, опублікованими в роботі [13].

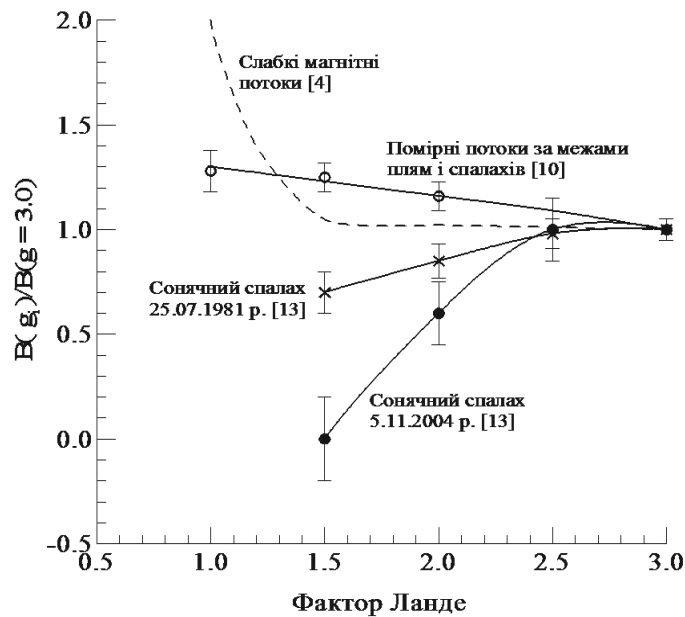
З рис. 1 видно, що для слабких магнітних полів ( $B_{\parallel} < 100\text{--}200$  Гс) виміряні напруженості приблизно однакові у певному діапазоні значень фактора Ланде (1,5–3,0), але потім різко зростають при зменшенні магнітної чутливості ліній. Зауважимо, що цей результат не суперечить вимірюванням Стенфлю [19] по лініях FeI 5247.1 і 5250.2 Å, оскільки наведено на рисунку штрихова крива дає дуже усереднений хід спостереженої залежності для випадку слабких магнітних полів. Щодо помірних за силою магнітних полів ( $B_{\parallel} \approx 500$  Гс), то тут відмічають повільне і монотонне зростання виміряного поля при зменшенні фактора Ланде. Обидва випадки є цілком очікуваними для двокomпонентної структури магнітного поля, що містить субтелескопічні силові трубки з "кілогаусовими" полями і слабше "фонове" магнітне поле тієї ж магнітної полярності [9].

Дуже цікавими щодо вказаного є дані про сонячні спалахи, для яких зафіксовано протилежний ефект: зменшення відносної напруженості  $B(g)/B(g=3.0)$  у разі зменшення фактора Ланде. У роботі [13] зазначено, що це також можливо за наявності "кілогаусових" магнітних полів і слабшого фоновому поля, але у таких двох випадках. По-перше, це може бути тоді, коли в силових трубках магнітна полярність протилежна полярності фоновому поля. По-друге, таке може бачити й у випадку, коли полярності є скрізь однаковими, але у силових трубках спостерігаються емісійні прояви ефекту Зеємана. Щоб зробити вибір між цими двома випадками, слід порівняти дані вимірювань по спектральних лініях із низькою температурною чутливістю, в яких не спостерігаються емісійні прояви ефекту Зеємана [8]. Такими лініями можна вважати дві лінії 816-го мультитплету заліза, FeI 6301.5 і 6302.5 Å, в яких фактори Ланде рівні 1.67 і 2.49, відповідно, а потенціали збудження нижнього терму становлять 3.65 і 3.69 еВ, тобто є відносно високими.

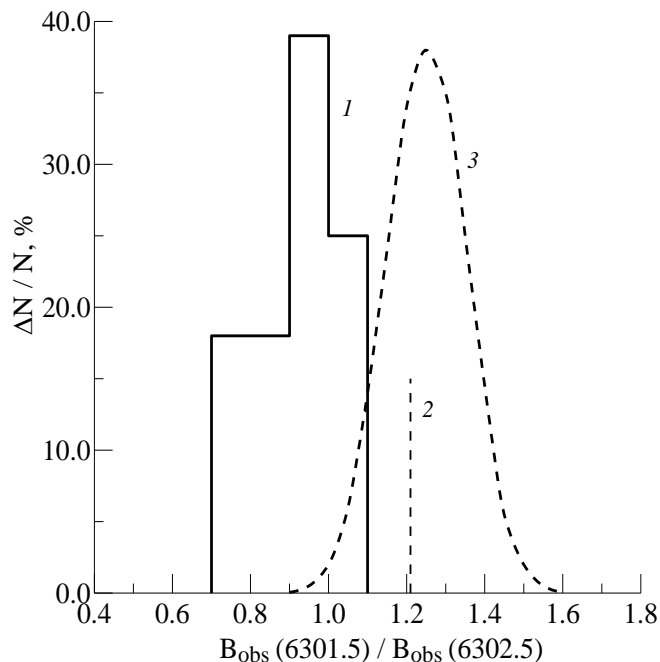
Ці лінії, подібно до ліній FeI 5247.1 і 5250.2 Å, також зручні для діагностики маломасштабних магнітних полів методом відношення ліній, хоча слід відмітити, що у них висоти формування відрізняються більше, ніж у FeI 5247.1 і 5250.2 Å. Теоретично, при однорідному магнітному полі повинна виконуватись рівність  $B_{\text{obs}}(6302.5) \approx B_{\text{obs}}(6301.5)$ . Аналогічний результат можна очікувати і при неоднорідному (у картинній площині) магнітному полі, величина якого, однак, не перевищує 1000 Гс. Якщо ж виявляється будь-яка достовірна відмінність у полях по вказаній парі ліній, то це може бути ознакою присутності сильних ( $> 1000$  Гс) субтелескопічних магнітних полів.

На рис. 2 зображено попередню статистику [12] відношення  $B_{\text{obs}}(6301.5)/B_{\text{obs}}(6302.5)$  по трьох сонячних спалахах, які спостерігалися з аналізатором колової поляризації на ГСТ АО КНУ у такі дати: 25.07.1981, 29.03.2001 і 29.07.2002; їхні бали були 2N, X1.7/1B і M4.7/2N, відповідно. Видно, що розподіл відношення  $B_{\text{obs}}(6301.5)/B_{\text{obs}}(6302.5)$  для спалахів у цілому зсунуто в область менших значень ( $< 1$ ), ніж аналогічний розподіл для неспалахових облас-

тей. Звідси доходимо висновку, що у місцях сонячних спалахів не тільки існували маломасштабні силові трубки з "кілогаусовими" полями, але й також, що магнітна полярність таких трубок була протилежною до полярності навколишнього фонового поля.



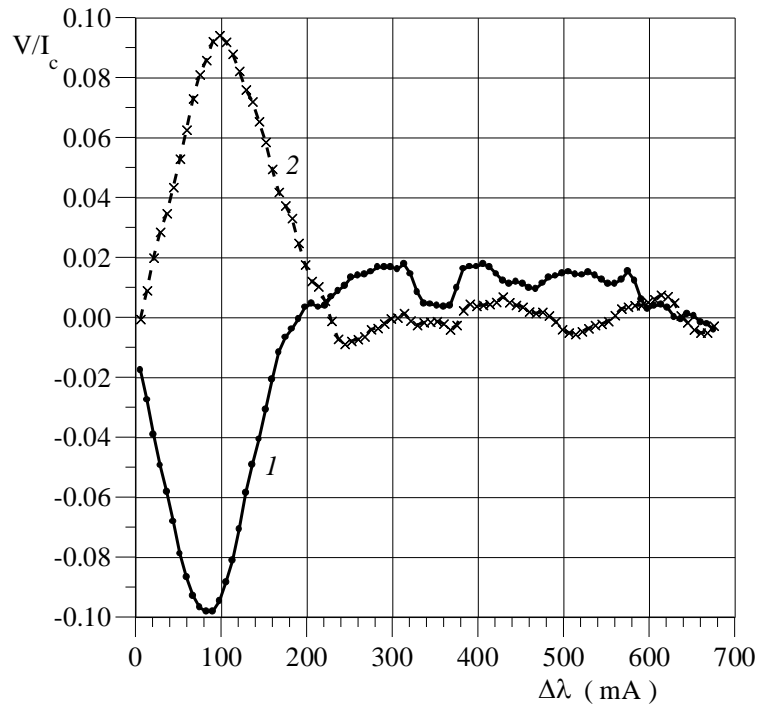
**Рис. 1.** Порівняння відносних напруженостей магнітного поля  $B(g)/B(g=3.0)$  для слабких поздовжніх полів ( $B_{\parallel} < 100\text{--}200$  Гс) за межами спалахів [4], для помірних за величиною полів ( $B_{\parallel} \approx 500$  Гс) також за межами сонячних спалахів [10], а також для двох сонячних спалахів балів 2N (25.07.1981) та M4.1/1B (5.11.2004) [13]



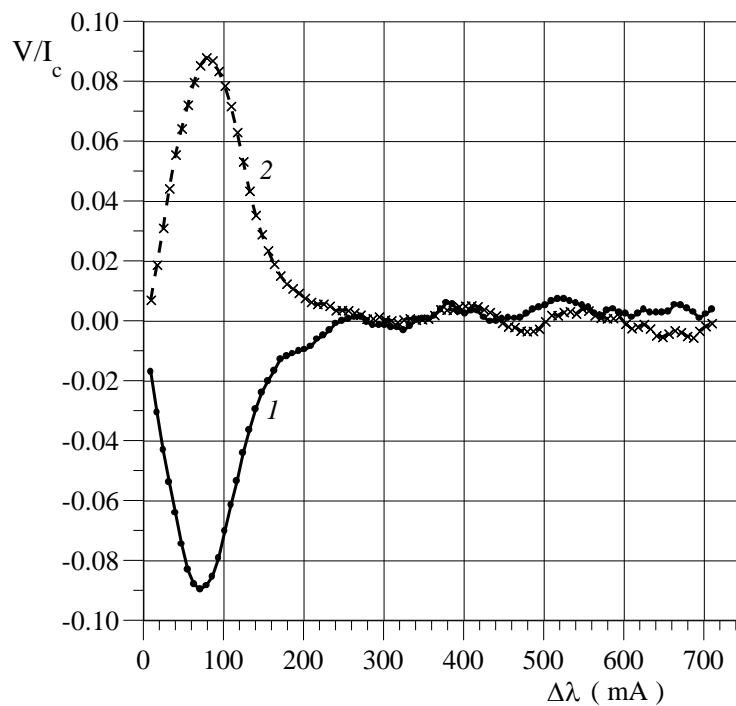
**Рис. 2.** Статистика відношення  $V_{obs}(6301.5)/V_{obs}(6302.5)$  згідно з [12] для досліджених сонячних спалахів (гістограма 1,  $N = 12$ ) порівняно з даними для області фотосфери за межами плям і спалахів 2 (вимірювання авторів статті [12]), а також для міжсіткових мережних магнітних полів 3 [3]. Видно, що для спалахів маємо відношення  $V_{obs}(6301.5)/V_{obs}(6302.5)$  у межах 0.7–1.1, тоді як для інших місць на Сонці – у цілому вищі значення

У роботі [12] знайдено пряму вказівку на те, що наведена на рис. 2 відмінність розподілів справді пов'язана з магнітними полями протилежної полярності, притому значно сильнішими, ніж 1000 Гс. Це встановлено на основі детального вивчення далеких крил лінії FeI 6173.3 Å ( $g = 2.5$ ), яка має "чисті" неблендовані крила в межах  $\pm 700$  мА. Виявилось, що якщо порівняти "синє" і "червоне" крила цієї лінії у параметрі Стокса V, то для випадку, коли  $V_{obs}(6301.5)/V_{obs}(6302.5) < 1$ , маємо протилежну за знаком циркулярну поляризацію у широкому інтервалі віддалей

від центра, до 600 мА (рис. 3). З рисунка видно, що локальні максимуми цієї поляризації в основному повторюються (за абсолютною величиною) в обох крилах лінії, як і має бути при ефекті Зеемана. Подібний ефект значно слабший або взагалі відсутній, якщо  $V_{obs}(6301.5)/B_{obs}(6302.5) \approx 1$  (рис. 4). Із цих даних випливає не тільки протилежний знак магнітної полярності у різних компонентах магнітного поля, але й те, що локальні напруженості в місцях сонячних спалахів можуть досягати дуже високих значень, до 5.6–12 кГс [12].



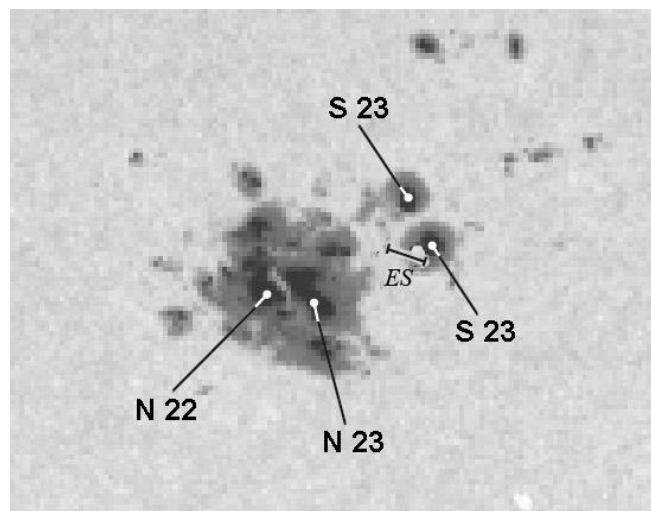
**Рис. 3.** Порівняння розподілу параметра Стокса  $V$  для обох крил лінії Fe I 6173.3 Å в момент 10:41:30 спалаху 29 липня 2002 р., коли спостерігалось  $B_{obs}(6301.5)/B_{obs}(6302.5) = 0.73$ . Профіль 1 відповідає "фіолетовому" крилу лінії, 2 – "червоному" [12]



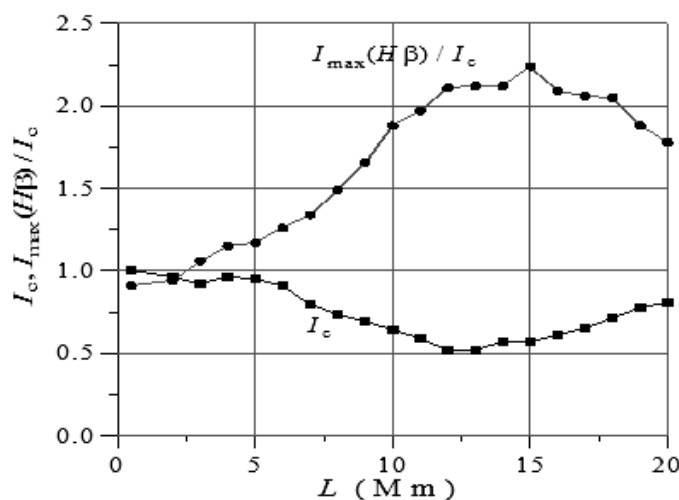
**Рис. 4.** Те саме, що і на рис. 3, але для спалаху 25.07.1981, 12:58 UT і співвідношенні виміряних полів  $B_{obs}(6301.5)/B_{obs}(6301.5) = 0.97$  [12]

**Нові дані.** Додатково досліджено винятково потужний сонячний спалах 28 жовтня 2003 р. бала X17.2 / 4В, який виник у суперактивній області NOAA 0486. За критерієм пікової потужності рентгенівського випромінювання, яке реєструється детекторами GOES з 1976 р., цей спалах є одним з найпотужніших – він займає у списку таких спалахів третю позицію. Цей спалах спостерігався Н. Й. Лозицькою і В. Г. Лозицьким на ешельному спектрографі ГСТ АО КНУ [7]. Попередні результати вказаного дослідження опубліковано в роботі [11]; у цій же роботі наведено деякі результати дослідження цього спалаху іншими авторами. Цікавою особливістю такого спалаху є те, що в ньому існували три сейсмічні джерела [5, 21].

Для фотографування спектрів цього спалаху в ортогональних циркулярних поляризаціях вибирали найяскравіші його місця. Одне з таких місць фотографування спектрів, унаслідок щасливого збігу обставин, виявилось дотичним до сейсмічного джерела S2/S3 згідно з даними робіт [5, 21]. Це показано на рис. 5, на якому інтервалом *ES* відмічено положення вхідної щілини спектрографа АО КНУ, а світлим кружечком – розташування сейсмічного джерела. На рис. 6 показано розподіл інтенсивності  $I_c$  у спектральному континуумі вздовж напрямку вхідної щілини спектрографа, а також розподіл у тому ж напрямку максимальної інтенсивності в ядрі лінії  $H_\beta$ , віднесеної до інтенсивності найближчого спектрального континууму. Сейсмічному джерелу тут відповідають значення абсциси в інтервалі  $L = 12-20$  Мм; видно, що у цьому місці інтенсивність у континуумі знижена не більш ніж у 2 рази, що є типовим для північної сонячних плям. Щодо інтенсивності емісії в  $H_\beta$ , то відповідне значення  $I_{\max}(H_\beta)/I_c = 1.8-2.2$  вказує на дуже потужний сонячний спалах, яких на сьогодні зареєстровано лише кілька (див. посилання в роботі [11]).



**Рис. 5.** Вигляд активної області NOAA 0486 у спектральному континуумі згідно з даними SOHO. Положення сейсмічного джерела S2/S3 [5, 21] у північній плямі показано світлим кружечком, інтервалом *ES* – положення вхідної щілини спектрографа ГСТ АО КНУ. Також наведено результати вимірювань магнітного поля у плямах (у сотнях гаусів) і їхні магнітні полярності, виконані в лінії FeI 5250.2

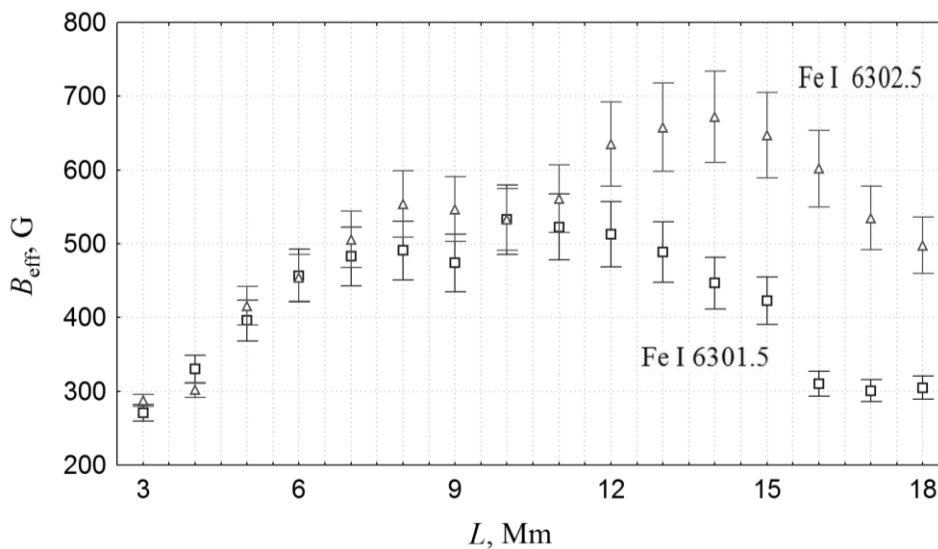


**Рис. 6.** Розподіл уздовж напрямку вхідної щілини спектрографа таких параметрів:  
 $I_c$  – інтенсивності у спектральному континуумі поблизу лінії  $H_\beta$ ;  
 $I_{\max}(H_\beta)/I_c$  – максимальної інтенсивності в ядрі лінії  $H_\beta$ , віднесеної до інтенсивності найближчого спектрального континууму (сейсмічне джерело S2/S3 відповідає  $L \approx 10-20$  Мм, де спостерігалась найяскравіша емісія спалаху)



Зауважимо, що сейсмічні джерела є найменш вивченим явищем, що супроводжує виділення енергії сонячних спалахів. Вони спостерігаються на доплерограмах фотосфери Сонця у вигляді збурень, які концентрично поширюються від якогось джерела. Такі хвилі спостерігалися у приблизно 50 % сонячних спалахів, причому деякі такі спалахи мали кілька сейсмічних джерел. Фізично – це акустичні хвилі, які рухаються не по поверхні, а в надрах Сонця (звідси й назва – сейсмічні). Вони відбиваються через температурний градієнт і досягають поверхні з більшою швидкістю. Швидкість сейсмічних хвиль, видимих на поверхні, зростає з віддаленням від джерела енергії. Деякі параметри: типовий час життя становить 1–3 хв, імпульс –  $10^{24}$  г·см/с. Локалізація джерела – фотосфера, на висотах 30–100 км. Можливі джерела енергії – магнітні поля, пучки електронів і протонів [5, 6]. Враховуючи ці обставини, дуже важливо і цікаво вивчити магнітні поля в області сейсмічного джерела саме за фотосферними лініями.

Як видно з рис. 7, найбільша відмінність магнітних полів по лініях Fe I 6301.5 і 6302.5 Å виявлена саме у сейсмічному джерелі спалаху, тоді як за його межами магнітні поля по цих лініях добре співпадають між собою. Ці дані в цілому узгоджуються з наведеними вище на рис. 2, але вони унікальні у тому відношенні, що стосується розташування сейсмічного джерела. Як відомо авторам статті, у науковій літературі немає аналогів цьому результату. Крім того, згідно рис. 7 відношення  $B_{\text{eff}}(6302.5) / B_{\text{eff}}(6301.5) \approx 2$  для  $L = 16\text{--}17$  Мм, що на рис. 2 відповідає деякому екстремальному значенню, яке виходить за межі розподілу для сонячних спалахів менших балів. Таким чином, отримані дані підтверджують, що в області сейсмічного джерела існувало деяке аномальне збурення магнітного поля, очевидно, з тісним контактом магнітних полів протилежних полярностей. По суті, це могло створювати фізичні умови для магнітного пересполучення силових ліній вже на фотосферному рівні, хоча, на думку Косовічева [5], ймовірна причина виникнення самого явища сейсмічного джерела – удар по фотосфері пучків протонів з більш високих шарів атмосфери, де і відбувається в дійсності магнітне пересполучення під час спалахів.



**Рис. 7.** Розподіл уздовж напрямку вхідної щілини спектрографа ефективного магнітного поля  $B_{\text{eff}}$ , виміряного в лініях Fe I 6301.5 і Fe I 6302.5 Å. Можна бачити, що суттєва відмінність магнітних полів по цих лініях спостерігалась для  $L = 12\text{--}20$ , де саме і було сейсмічне джерело у спалаху

Отже, як показано вище, одночасні вимірювання магнітних полів у лініях Fe I 6301.5 та Fe I 6302.5 Å можуть дати цінну інформацію про субтелескопічну структуру магнітного поля в області сонячних спалахів. З погляду прогнозування спалахів, важливо встановити, де і коли виникає на Сонці ситуація за межами тіней сонячних плям, коли виміряне магнітне поле по лінії Fe I 6302.5 є більшим, ніж по лінії Fe I 6301.5 Å. Про це можна дізнатися не тільки на основі спектрально-поляризаційних вимірювань, аналогічних описаним вище, але і за допомогою, наприклад, орбітального магнітографа обсерваторії Hinode, який вимірює магнітні поля у 10 різних спектральних лініях, включаючи лінії Fe I 6301.5 та Fe I 6302.5 Å. Для цього, очевидно, необхідно проводити регулярний моніторинг активних областей у двох указаних спектральних лініях. Можна сподіватися, що саме такі вимірювання дозволять отримати ту діагностично важливу інформацію, яка необхідна для надійнішого прогнозування часу і місця виникнення сонячних спалахів.

**Висновки.** На основі розгляду спостережних даних аргументовано висновок про те, що прогнозування сонячних спалахів можна покращити завдяки врахуванню нового параметра, який знаходять із порівняння виміряних магнітних полів у лініях Fe I 6301.5 і Fe I 6302.5 Å. Відповідний критерій є дуже простим: у місцях сонячних спалахів за межами тіней сонячних плям має спостерігатись таке інверсне співвідношення виміряних напруженостей:  $B_{\text{obs}}(6301.5) < B_{\text{obs}}(6302.5)$ , тоді як за межами спалахів спостерігається переважно  $B_{\text{obs}}(6301.5) > B_{\text{obs}}(6302.5)$ . Очевидно, у спалахах це пов'язано з тим, що там на фотосферному рівні відбувається просторово нероздільний контакт силових трубок із "кілогаусовими" полями і фонового поля, які мають протилежні магнітні полярності. Прямі спостережні вказівки на особливо сильні поля протилежної полярності у спалахах знайдено у далеких крилах лінії Fe I 6173.3 Å. Нові унікальні спостережні дані, які стосуються області сейсмічного джерела у винятково потужному сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р. бала X17.2/4В, свідчать про те, що вказане вище інверсне співвідношення напруженостей є найсуттєвішим саме в області цього джерела. Запропоновано нову ідею щодо надійнішого прогно-

зування сонячних спалахів, яка зводиться до того, що нову актуальну інформацію для прогнозування слід отримувати з моніторингу спостережних даних у лініях FeI 6301.5 і FeI 6302.5 Å.

### Подяка

Автори вдячні невідомому рецензенту за слушні зауваження, які були враховані під час доопрацювання статті. Це дослідження профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 22БФ023-03.

### Список використаних джерел

1. Babcock H. W. The solar magnetograph // *Astrophys. J.* – 1953. – Vol. 118. – P. 387–396.
2. Botygina O., Gordovskyy M., Lozitsky V. Investigation of spatially unresolved magnetic field outside sunspots using Hinode/SOT observations // *Proc. of the Intern. Astronomical Union.* – 2017. – Vol. 325. – P. 59–62.
3. Cerdena D., Almeida J. S., Kneer F. Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 407. – P. 741–757.
4. Gopasyuk S. I., Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T. The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // *Solar Phys.* – 1973. – Vol. 31., No. 2. – P. 307–316.
5. Kosovichev A., 2015, Sunquakes: Helioseismic response to solar flares, in: V. Tong & R. Garcia (Eds.), *Extraterrestrial Seismology* (pp. 306–322), Cambridge: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107300668.025
6. Kosovichev A. G. The cause of sunquakes: electrons or protons? // *Bulletin of the American Astronomical Society.* – 2007. – Vol. 39. – p. 215.
7. Курочка Е. В., Курочка Л. Н., Лоцицкий В. Г., Лоцицкая Н. И., Остапенко В. А., Полупан П. Н. Романчук П. Р., Россада В. М. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // *Вестник Киев. ун-та. Астрономия.* – 1980. – Вып. 22. – С. 48–56.
8. Лоцицкая Н. И., Лоцицкий В. Г. Существуют ли "магнитные транзиенты" в солнечных вспышках? // *Письма в Астрон. ж-л.* – 1982. – Т. 8., № 8. – С. 500–505.
9. Лоцицкий В. Г. О калибровке магнитографических измерений с учетом пространственно неразрешимых неоднородностей // *Physica Solariter., Potsdam.* – 1980. – No. 14. – P. 88–94.
10. Лоцицкий В. Г. Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце // *дис. д-ра ф.-м. наук: 01.03.03* – Киев, 2003. – 299 с.
11. Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Tarashchuk V. P. Profiles of spectral lines, magnetic fields and thermodynamical conditions in X17.2/4B solar flare of October 28, 2003 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2018. – Vol. 477., Iss. 2. – P. 2796–2803.
12. Лоцицкий В. Г., Лоцицкий В. В. Спектрально-поляризационні вимірювання магнітних полів у сонячних спалахах методом відношення ліній // *Вісник Київський ун-т ім. Т. Шевченка. Астрономія.* 2005. – Vol. 41 – 42. – P. 7–12.
13. Lozitsky V. G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // *J. Astrophys. Astron.* – 2008. – Vol. 29. – P. 387–404.
14. Лоцицкий В. Г., Цап Т. Т. Эмпирическая модель мелкомасштабного магнитного элемента спокойной области Солнца // *Кинематика и физика небес. тел.* – 1989. – Т. 5, № 1. – С. 50–58).
15. Рачковский Д. Н., Цап Т. Т. Изучение магнитных полей методом отношения измеренных напряженностей в линиях вне активных областей // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.* – 1985. – Т. 71. – С. 79–87).
16. Rachkovsky D. N., Tsap T. T., Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods. *J. Astrophys. Astron.* – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.
17. Северный А. Б. Некоторые проблемы физики Солнца. – М.: Наука, 1988. – 224 с.
18. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun // *Astronomy & Astrophysics.* – 2011. – Vol. 529., id.A42, 20 pp.
19. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Physics.* – 1973. – Vol. 32., No 1. – P. 41–63.
20. Wiehr E. A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions // *Astron. and Astrophys.* – 1978. – Vol. 69., No 2. – P. 279–284.
21. Zharkova V. V., Zharkov S. I. On the origin of three seismic sources in the proton-rich flare of 2003 October 28 // *The Astrophys. Journ.* – 2007. – Vol. 664., Issue 1, P. 573–585.

### References

1. Babcock H. W. The solar magnetograph // *Astrophys. J.* – 1953. – Vol. 118. – P. 387–396.
2. Botygina O., Gordovskyy M., Lozitsky V. Investigation of spatially unresolved magnetic field outside sunspots using Hinode/SOT observations // *Proc. of the Intern. Astronomical Union.* – 2017. – Vol. 325. – P. 59–62.
3. Cerdena D., Almeida J. S., Kneer F. Inter-network magnetic fields observed with sub-arcsec resolution // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 407. – P. 741–757.
4. Gopasyuk S. I., Kotov V. A., Severny A. B., Tsap T. T. The comparison of the magnetographic magnetic field measured in different spectral lines // *Solar Phys.* – 1973. – Vol. 31., No. 2. – P. 307–316.
5. Kosovichev A., 2015, Sunquakes: Helioseismic response to solar flares, in: V. Tong & R. Garcia (Eds.), *Extraterrestrial Seismology* (pp. 306–322), Cambridge: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107300668.025
6. Kosovichev A. G. The cause of sunquakes: electrons or protons? // *Bulletin of the American Astronomical Society.* – 2007. – Vol. 39. – p. 215.
7. Kurochka V. V., Kurochka L. N., Lozitsky V. G., Lozitska N. I. et al. Horizontal solar telescope of Astronomical Observatory of Kyiv University // *Vestnik Kiev. Univ. Astronomija.* – 1980. – Vol. 22. – P. 48–56.
8. Lozitska N. I., Lozitsky V. G. Do 'magnetic transients' exist in solar flares? // *Pis'ma v Astron. Journ.* – 1982. – Vol. 8., No.8. P. 500–505.
9. Lozitsky V. G. On calibration of magnetographic measurements taking into account the spatially unresolved inhomogeneities // *Physica Solariter., Potsdam.* – 1980. – No. 14. – P. 88–94.
10. Lozitsky V. G. Strong magnetic fields in small-scale structures and flares on the Sun // *Dr Sci Dissertation: 01.03.03.* Kiev. 2003. – 299 p.
11. Lozitsky V. G., Baranovsky E. A., Lozitska N. I., Tarashchuk V. P. Profiles of spectral lines, magnetic fields and thermodynamical conditions in X17.2/4B solar flare of October 28, 2003 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* – 2018. – Vol. 477., Iss. 2. – P. 2796–2803.
12. Lozitsky V. G., Lozitsky V. V. Spectral-polarized measurements of magnetic fields in solar flares using 'line ratio' method // *Visnyk of Kyiv Univ. of T. Shevchenko. Astronomija.* – 2005. – Vol. 41-42. – P. 7–12.
13. Lozitsky V. G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // *J. Astrophys. Astron.* – 2008. – Vol. 29. – P. 387–404.
14. Lozitsky V. G., Tsap T. T. Empirical model of small-scale magnetic element of a quiet region of the Sun // *Kinematika I Fizika Nebesnykh Tel.* – 1989. – Vol. 5., No. 1. – P. 50–58.
15. Rachkovsky D. N., Tsap T. T. Study of magnetic fields using a method of measured strength ratio in lines outside active regions // *Izvestiya of Krim. Astrofiz. Observatory.* – 1985. – Vol. 71. – P. 79–87.
16. Rachkovsky D. N., Tsap T. T., Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics outside sunspots: comparison of different methods. *J. Astrophys. Astron.* – 2005. – Vol. 26. – P. 435–445.
17. Severny A. B. Some problem of solar physics. – Moscow: Nauka, 1988. – 224 p.
18. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun // *Astronomy & Astrophysics.* – 2011. – Vol. 529., id.A42, 20 pp.
19. Stenflo J. O. Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Physics.* – 1973. – Vol. 32., No 1. – P. 41–63.
20. Wiehr E. A unique magnetic field range for non-spot solar magnetic regions // *Astron. and Astrophys.* – 1978. – Vol. 69., No 2. – P. 279–284.
21. Zharkova V. V., Zharkov S. I. On the origin of three seismic sources in the proton-rich flare of 2003 October 28 // *The Astrophys. Journ.* – 2007. – Vol. 664., Issue 1, P. 573–585.

Надійшла до редколегії 19.11.22

N. Lozitska, PhD,  
V. Lozitsky, Dr Hab.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### THE LINE RATIO METHOD AS A POSSIBLE TOOL FOR MORE RELIABLE FORECASTING SOLAR FLASHES

*Already published and new observational data are given, which indicate that in the regions of solar flares there is a significant difference in the sub-telescopic structure of the magnetic field, which is absent in non-flare regions. In particular, the magnetic fields by the FeI 6301.5 and FeI 6302.5 Å lines measured in flares outside sunspot umbra have an inverse ratio of  $B_{\text{obs}}(6301.5) < B_{\text{obs}}(6302.5)$ , while without flares it is mostly  $B_{\text{obs}}(6301.5) > B_{\text{obs}}(6302.5)$ . The conclusion is argued that in flares this is due to the fact that at the photospheric level there is a spatially unresolved contact of flux tubes with "kilogauss" fields and the weaker background field, which have opposite magnetic polarities. Direct observational indications of particularly strong fields of opposite polarity are found in the far wings of the FeI 6173.3 Å line. New unique observational data relating to the region of the seismic source in the exceptionally powerful solar flare of October 28, 2003 of X17.2/4B class indicate that the above inverse line ratio is most significant precisely in the region of this source. A new idea for more reliable forecasting of solar flares is proposed, which boils down to the fact that new relevant information for forecasting should be obtained from monitoring observational data in the FeI 6301.5 and FeI 6302.5 Å lines.*

*Keywords: Sun, solar activity, solar flares, magnetic fields, line ratio method, forecast of solar flares.*

УДК 551.510; 533.93

Б. Петренко, асп.  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,  
Л. Козак, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,  
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, Україна,  
Е. Кронберг, канд. фіз.-мат. наук  
Мюнхенський університет, Мюнхен, Німеччина,  
І. Баллаї, канд. фіз.-мат. наук  
Школа математики та статистики Шеффілдського університету, Велика Британія

## АПРОБАЦІЯ ХВИЛЬОВОГО ДИСПЕРСІЙНОГО АНАЛІЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ БАГАТОСУПУТНИКОВИХ МЕТОДІВ

*Детально проаналізовано методи хвильового аналізу часових рядів, а саме: двоапаратна фазова різниця, beat-former фільтрація, k-фільтрація, MSR (Multi-point Signal Resonator)-техніка. Ці багатосупутникові методи дозволяють отримувати сукупність максимумів потужності хвиль із різними просторовими масштабами за їх однакової частоти, що є суттєвою перевагою над односупутниковим підходом, оскільки в космічній плазмі може існувати значна кількість хвильових мод на одній частоті. Виконано програмну реалізацію вказаних методів з їхньою успішною апробацією на штучних даних. Продемонстровано ефективність кожного методу до виявлення максимумів у спектрах потужностей магнітного поля.*

**Ключові слова:** дисперсійний аналіз, багатосупутниковий метод, фазова різниця, beat-former фільтрація, k-фільтрація, MSR-техніка.

**Вступ.** Багатосупутникові вимірювання дозволяють проводити дослідження хвильової активності й турбулентності в космічній плазмі, розділяючи частотні та просторові градієнти [7, 10]. Важливим інструментом для виявлення хвильових мод у турбулентному середовищі є експериментальна побудова дисперсійної картини, яка відображає залежність частоти від її просторового аналога, яким є хвильовий вектор. Тому розклад таких збурень плазми за частотою та просторовому діапазону відіграє найважливішу роль у виявленні гілок дисперсійних рівнянь. Для отримання дисперсійних співвідношень використовують проєкційні методи, k-фільтрацію [3, 8], алгоритм MUSIC (MUltiple Signal Classification) [7], MSR (Multi-point Signal Resonator)-техніку [6], метод фазової різниці [1, 2], хвильову зйомку [11].

**Багатосупутникові методи.** Метод фазової різниці [1, 2] використовують для скалярних часових рядів, отриманих із даних вимірювань двох космічних апаратів (КА). Будується на основі комбінації неперервних вейвлет-перетворень Морле, що дозволяє знаходити декілька коливних мод на фіксованій частоті з їхньою потужністю, а передусім, відмовитися від припущень про плоский фронт хвиль і мализну амплітуди хвильових пакетів [4].

Для двох скалярних часових рядів  $b_1 = b_1(t)$ ,  $b_2 = b_2(t)$  обчислюється перетворення Фур'є  $b_1(\omega)$ ,  $b_2(\omega)$  та спільний частотно-хвильовий спектр  $S_{b_1 b_2}(k, \omega)$  з різницею фаз  $\varphi_{b_1 b_2}(\omega)$ :

$$S_{b_1 b_2}(\omega) = \langle b_2(\omega) b_1^*(\omega) \rangle = |S_{b_1 b_2}(\omega)| e^{j\varphi_{b_1 b_2}(\omega)}.$$

Ця інформація дозволяє знайти спроектований хвильовий вектор  $\vec{k}_p$  на напрямок  $\vec{d}$ , який сполучає два КА:

$$\vec{k}_p \vec{d} = \varphi_{b_1 b_2}(\omega).$$

Використовуючи різницю фаз  $\varphi_{b_1 b_2}(\omega)$  та  $\vec{k}_{pi}$  для кожного  $i$ -го субінтервалу, розраховують локальний спільний частотно-хвильовий спектр, або вейвлетний крос-спектр:

$$S(k_p, \omega) = \frac{1}{2} \sum_i (b_1(\omega) b_1^*(\omega) + b_2(\omega) b_2^*(\omega)) \delta(k_{pi}(\omega) - k_p).$$

У роботі програмно реалізовано вейвлетний крос-спектральний метод, на вхід якого подають часові ряди скалярної величини з вимірювань двох космічних апаратів. Результатом методу є функція, що залежить від двох незалежних змінних – частоти та проєкції хвильового вектора на напрямок сполучення між апаратами. Ця функція є потужністю збурень. Її обчислення є простішим і швидшим у двоточковому підході порівняно з використанням методів k-фільтрації. Недоліком залишається лише обмеженість визначення напрямку  $\vec{k}$  його проєкцією. Проте використання даних із 4-х КА дозволяє відмовитися від цього обмеження, попарно застосовуючи метод.

Широкого застосування набули багатосупутникові (багатоточкові, мультиапаратні) методи аналізу у геофізичній галузі, у першу чергу так званий метод k-фільтрації [3]. У галузі фізики космічної плазми він знайшов застосування для магнітометричних даних із ферозондового FGM та індукційного STAFF магнітометрів, електричного поля з інструменту EFW місії Cluster [9]. На відміну від попередніх методів, за допомогою k-фільтрації на виході отримують спектр потужності  $P = P(\omega, \vec{k})$  у чотиривимірному просторі частоти та хвильового вектора  $(\omega, k_x, k_y, k_z)$ .

Це дозволяє отримувати сукупність максимумів енергії хвиль за однакової частоти. Для всіх багатосупутникових методів інформація про масштаби хвиль і флуктуацій втрачається на масштабах, що менші відстані між КА через ефект аліасингу.

Першим етапом є вибір одночасного інтервалу даних (позначимо скалярну і векторну величини як  $b$  та  $\vec{b}$ , відповідно) з однаковими часовими відліками для всіх сенсорів (для нашого випадку – КА), кількість яких становить  $L$ .

Кожен КА у фіксований момент часу має координати  $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_L$ . Для всіх часових рядів виконується перетворення Фур'є і формується вектор станів  $\vec{S}(\omega)$  [7, 8]:

$$\vec{S}(\omega) = \begin{pmatrix} b(\omega, \vec{r}_1) \\ b(\omega, \vec{r}_2) \\ \vdots \\ b(\omega, \vec{r}_L) \end{pmatrix}$$

для скалярної величини,

$$\vec{S}(\omega) = \begin{pmatrix} \vec{b}(\omega, \vec{r}_1) \\ \vec{b}(\omega, \vec{r}_2) \\ \vdots \\ \vec{b}(\omega, \vec{r}_L) \end{pmatrix}$$

для векторної величини.

З добутку вектора станів на самого себе з ермітовим транспонуванням формується симетрична крос-спектральна матриця  $\hat{R}(\omega)$ , яка має розмірність  $L \times L$  для скалярної,  $3L \times 3L$  для векторної величини:

$$\hat{R}(\omega) = \langle \vec{S}(\omega) \vec{S}(\omega)^H \rangle.$$

Положення сенсорів входить у так званий вектор наведення  $\vec{h}$  або матрицю наведення  $\hat{H}(\vec{k})$ , де закладається функціональна залежність від  $\vec{k}$ :

$$\vec{h}(\vec{k}) = \begin{pmatrix} \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_1) \\ \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_2) \\ \vdots \\ \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_L) \end{pmatrix}$$

для скалярного підходу,

$$\hat{H}(\vec{k}) = \begin{pmatrix} \hat{E} \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_1) \\ \hat{E} \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_2) \\ \vdots \\ \hat{E} \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_L) \end{pmatrix}$$

для векторного підходу (тут  $\hat{E}$  – одинична матриця  $3 \times 3$ ).

Багатоточкові методи, які використовують указані матриці й вектори, розділено на проєкційні та на ті, що застосовують власні значення.

Серед проєкційних методів найпростішим є обчислення проєкційно-просторового фільтрування (англ. beamforming). Потужність хвиль така:

$$P_{BF}(\omega, \vec{k}) = \vec{h}^H(\vec{k}) \hat{R}(\omega) \vec{h}(\vec{k}).$$

Але оскільки максимум такого спектра є дуже широким, використовують чутливішу проєкцію Капона [3]:

$$P_C(\omega, \vec{k}) = \left[ \vec{h}^H(\vec{k}) \hat{R}^{-1}(\omega) \vec{h}(\vec{k}) \right]^{-1}.$$

Розширення методу Капона на векторні часові ряди називають  $k$ -фільтрацією, результатом якої є матриця потужності:

$$\hat{P}_{KF}(\omega, \vec{k}) = \left[ \hat{H}^H(\vec{k}) \hat{R}^{-1}(\omega) \hat{H}(\vec{k}) \right]^{-1}.$$

Інший підхід до знаходження спектра базується на інформації з власних чисел і власних векторів матриці крос-спектральної потужності  $\hat{R}(\omega)$ .

Швидким методом для обчислення дисперсійних співвідношень є метод хвильової зйомки [11], який одразу дає функціональну залежність  $\vec{k}(\omega)$ . Специфіка інших методів, заснованих на задачі на власні числа, полягає у формуванні додаткових матриць  $\hat{F}$  та  $\hat{M}$ , які складаються відповідно з вектор-стовпців власних векторів і діагональних елементів, утворених із власних чисел  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_L$  [5, 8]:

$$F = [\vec{e}_1, \vec{e}_2, \dots, \vec{e}_L],$$

$$\hat{M}^{-n} = \text{diag} \left( \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_L \end{pmatrix}^{-n}, \begin{pmatrix} \lambda_2 \\ \lambda_L \end{pmatrix}^{-n}, \dots, \begin{pmatrix} \lambda_L \\ \lambda_L \end{pmatrix}^{-n} \right).$$

Техніка MSR має суттєві дві переваги над попередніми методами, а саме: у виявленні хвиль із близькими довжинами хвиль та у зменшенні фонових шумів. Спектр потужності за методом MSR (зазвичай,  $n$  покладають рівним 2):

$$P_{MSR}(\omega, \vec{k}) = \frac{1}{P_{EM_0}} P_{EM}(\omega, \vec{k}) P_{KF}(\omega, \vec{k}) =$$

$$= \frac{1}{P_{EM_0}} \frac{1}{\hat{h}^+(\vec{k}) \hat{F}(\omega) \hat{M}^{-n} \hat{F}^+(\omega) \hat{h}(\vec{k})} \frac{1}{\hat{h}^+(\vec{k}) \hat{R}^{-1}(\omega) \hat{h}(\vec{k})}$$

для скалярної величини,

$$\hat{P}_{MSR}(\omega, \vec{k}) = \frac{1}{P_{EM_0}} \hat{P}_{EM}(\omega, \vec{k}) \hat{P}_{KF}(\omega, \vec{k}) =$$

$$= \frac{1}{P_{EM_0}} \left[ \hat{H}^H(\vec{k}) \hat{F}(\omega) \hat{M}^{-n} \hat{F}^+(\omega) \hat{H}(\vec{k}) \right]^{-1} \left[ \hat{H}^H(\vec{k}) \hat{R}^{-1}(\omega) \hat{H}(\vec{k}) \right]^{-1}$$

для векторної величини.

Слід матриці потужності  $\text{tr}(\hat{P}(\omega, \vec{k}))$  є загальною потужністю. Тут  $P_{EM_0}$  визначає нормування спектра від спектра  $P_{EM}$  алгоритму MUSIC (MULTIPLE SIGNAL CLASSIFICATION):

$$P_{EM_0} = \max(P_{EM}).$$

Похибка в обчисленні спектра  $P(\omega, \vec{k})$  пов'язана з неточностями у часовій синхронізації між продуктами даних окремих часових рядів, що вносить додатковий фазовий зсув у спектр, а також із неточностями визначення взаємного розташування КА.

**Результати.** Усі методи були імплементовані у вигляді програмного пакету на мові IDL (Interactive Data Language) та асоційовані з окремими IDL-процедурами, які використовують спільний глобальний указівник на завантажені з файлів дані. Графічне представлення результатів також виконувалося засобами IDL. Апробація методів відбувалася на штучних згенерованих даних. Проведено генерацію штучних багатосупутникових даних із наперед заданими просторово-часовими характеристиками. Конфігурація КА являє собою правильний тетраедр, що рухається в заданому напрямку зі швидкістю  $0.0002 R_E/c$  зі сторонами в  $1.0 R_E$  (тут  $R_E = 6371$  км – радіус Землі). Часовий ряд змодельовано для кожного із чотирьох КА, розташованих у точках із радіус-векторами  $\vec{r}_\sigma$ , таким чином:

$$\vec{b}_\sigma = \vec{b}_0 + \vec{b}_1 \cos(\vec{k}_1 \vec{r}_\sigma - \omega_1 t) + \vec{b}_2 \cos(\vec{k}_2 \vec{r}_\sigma - \omega_2 t + \varphi_2) + \vec{\eta}_\sigma.$$

Тут  $b_0$  – фонове значення,  $b_{1,2}$  – амплітуди,  $\vec{k}_{1,2}$  – хвильові вектори збурення,  $\omega_{1,2}$  – частоти для першої та другої гармоніки відповідно,  $\varphi_2$  – фаза другої гармоніки,  $\vec{\eta}_\sigma$  позначає нормально розподілений шум із відносно малою амплітудою.

Напрямок одиничного орта хвильового вектора задають вручну як вхідні параметри. Хвильові вектори збурень обрано так, що вони мають різні абсолютні значення, але однаковий напрямок:  $\vec{k}_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \vec{k}$  та  $\vec{k}_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} \vec{k}$ . Довжини

хвиль установлено такі:  $\lambda_1 = 0,1\pi R_E$ ,  $\lambda_2 = \pi R_E$ , а отже  $|\vec{k}_1| = 0,00314$  рад/км,  $|\vec{k}_2| = 0,00031$  рад/км. Частоти  $\omega_{1,2}$  можна пов'язати з хвильовими числами  $k_{1,2}$  за допомогою наперед заданого дисперсійного співвідношення. Нехай це буде звичайна альвенівська мода:

$$\omega_{1,2} = v_A k_{1,2},$$

де  $v_A$  – альвенівська швидкість. Її значення встановлено  $v_A = 0,1 R_E / c = 637$  км/с. Звідси частоти мають числові значення  $\omega_1 = 2,00$  рад/с (0,31 Гц),  $\omega_2 = 0,2$  рад/с (0,031 Гц).

Амплітуди векторного поля (середнє значення, гармоніки) мають такі значення:  $b_0 = 10$  нТл,  $b_1 = 1$  нТл,  $b_2 = 1$  нТл,  $\varphi_2 = 0,5$ ,  $\vec{\eta}_\sigma = -0,05 \dots 0,05 \vec{b}_0$ . Кількість вимірів складає 1000 з дискретністю 0,1 с. Графік змодельованих даних зображено на рис. 1.

Метод фазової різниці апробовано на штучно згенерованих багатосупутникових даних для обраної пари КА. Чітко відслідковуються два піки на частотах 0,031 Гц та 0,31 Гц (рис. 2). Установлено відповідні значення спроектованого хвильового вектора  $k_p$ . Бінування частот тут є логарифмічним (рівні інтервали частот у логарифмічному масштабі по осі  $y$ ), що є наслідком вибору частот для побудови неперервного вейвлет-перетворення. Під час трансформації частот через доплерівське зміщення є доцільнішим використання лінійного бінування.

Виконано програмну реалізацію та успішне тестування таких проєкційних багатосупутникових методів із визначення дисперсійних властивостей: beam-former,  $k$ -фільтрація, MSR. Виявлено, що чутливість методів із виявлення максимумів потужності зростає від першого до третього; ширини максимумів зменшуються; різниці між максимальним і мінімальним значеннями збільшуються; 1,5 порядки для beam-former, 5 порядків для  $k$ -фільтрації, 8 порядків для MSR (рис. 3). На рис. 3 зображено результати для другої гармоніки. Збільшення гостроти максимуму також притаманне першій гармоніці. Частота 0,032 Гц є близькою, але не точною до вхідної частоти 0,031 Гц. Це пов'язано із широкими відносними інтервалами частот із вейвлет-перетворення на низьких частотах.

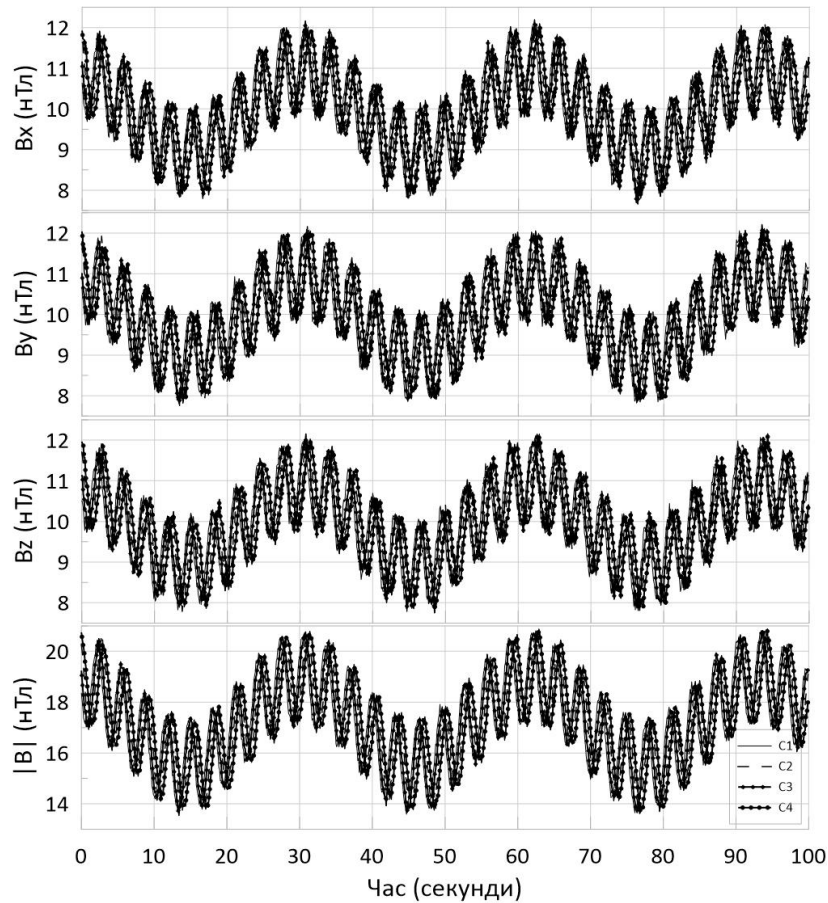


Рис 1. Штучно згенеровані багатосупутникові дані магнітного поля (згори вниз:  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ,  $|B|$ ), кожний тип лінії позначає часовий ряд для окремого КА

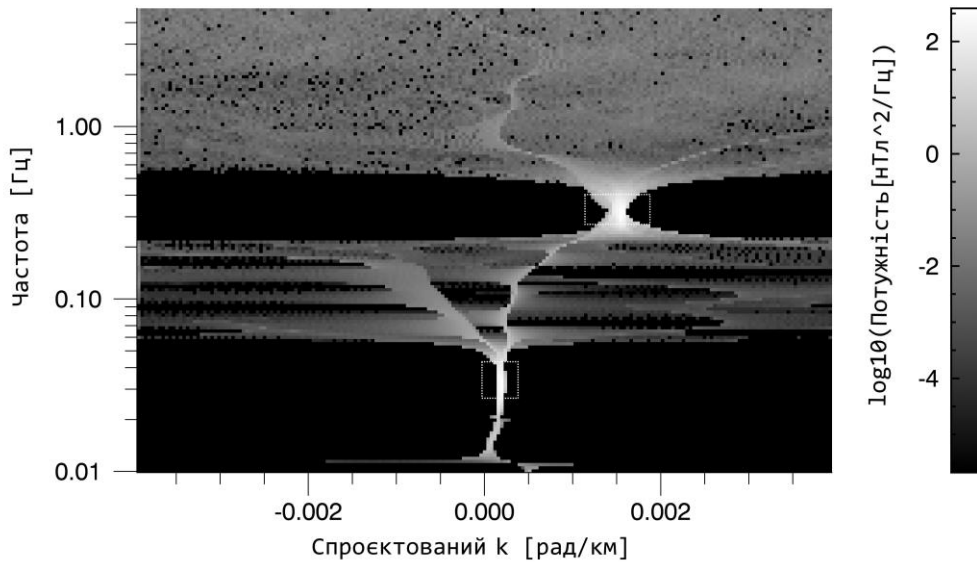


Рис 2. Спектр потужності за методом фазової різниці ( $L = 2$ ). Максимуми, що відповідають частотам першої та другої гармонік, виділено пунктирним прямокутником

**Висновок.** Багатосупутникові методи двоапаратної фазової різниці, beam-former фільтрації,  $k$ -фільтрації, MSR-техніки імплементовані як програмне забезпечення й апробовані на штучно згенерованих даних із наперед заданими просторово-часовими характеристиками. Продемонстровано ефективність кожного методу до виявлення максимумів у спектрах потужностей магнітного поля. Для проєкційних методів beam-former,  $k$ -фільтрації, MSR-техніки виявлено, що чутливість методів зростає від першого до третього.

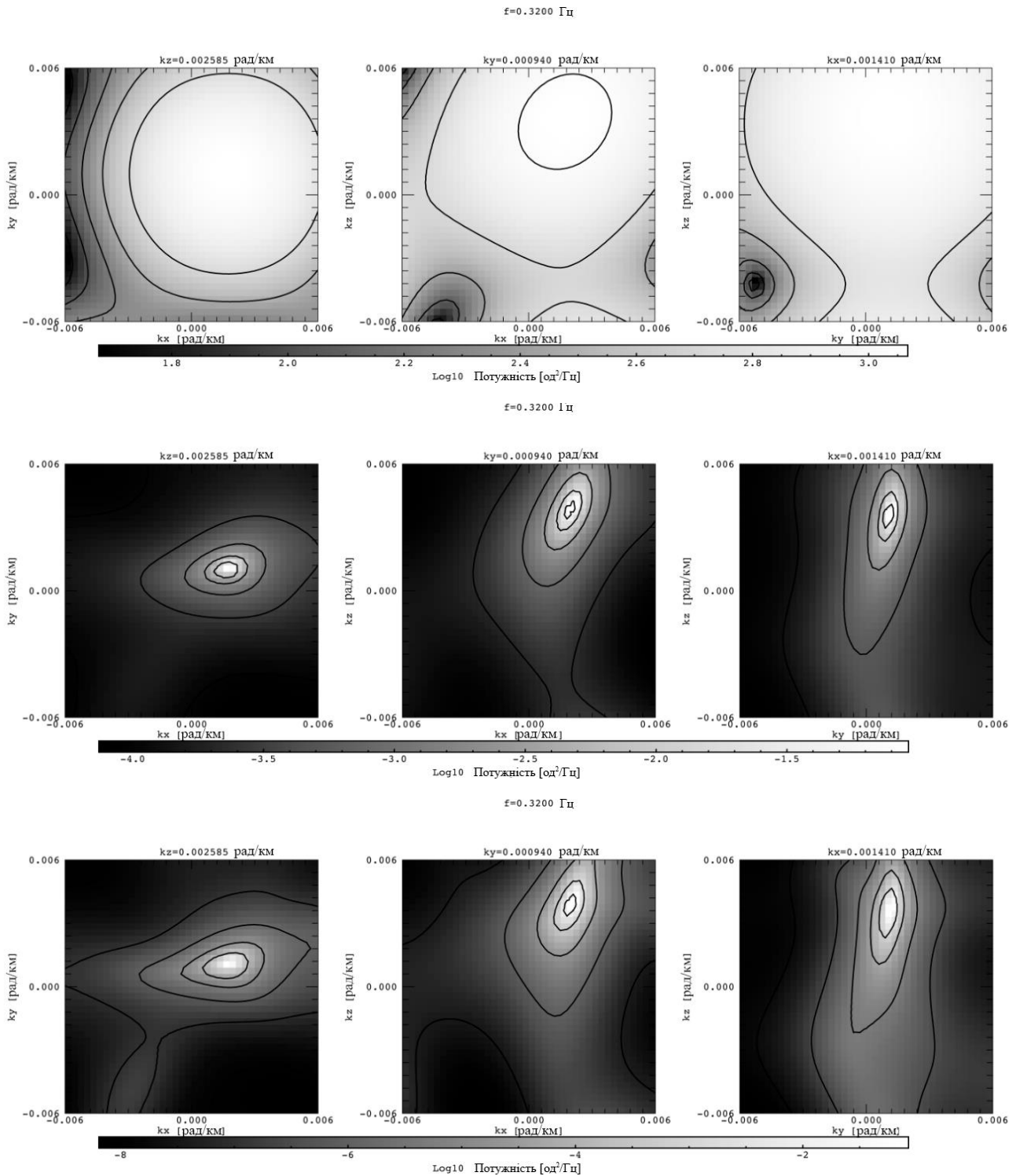


Рис 3. Спектр потужності за методами beamforming,  $k$ -фільтрації, MSR для 4-х КА ( $L = 4$ ) для частоти 0,032 Гц

**Подяка.** Роботу виконано в межах теми БФ/30-2021 і підтримано грантами Volkswagen Foundation (VW-Stiftung) № 97742, Royal Society International Exchanges Scheme 2021 IES\R1\211177.

**Список використаних джерел**

1. Balikhin M. A. et al. Experimental determination of the dispersion of waves observed upstream of a quasi-perpendicular shock //Geophysical research letters. – 1997. – Т. 24. – № 7. – С. 787–790.
2. Beall J. M., Kim Y. C., Powers E. J. Estimation of wavenumber and frequency spectra using fixed probe pairs //Journal of Applied Physics. – 1982. – Т. 53. – №. 6. – С. 3933–3940.
3. Capon J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis //Proceedings of the IEEE. – 1969. – Т. 57. – №. 8. – С. 1408–1418.
4. Dudok de Wit T. et al. Methods for characterising microphysical processes in plasmas //Space Science Reviews. – 2013. – Т. 178. – №. 2. – С. 665–693.
5. Kozak L. V. et al. Processes in the current disruption region: From turbulence to dispersion relation //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2021. – Т. 126. – №. 1. – С. e2020JA028404.



6. Narita Y., Glassmeier K. H., Motschmann U. High-resolution wave number spectrum using multi-point measurements in space—the Multi-point Signal Resonator (MSR) technique //Annales geophysicae. – Copernicus GmbH, 2011. – Т. 29. – № 2. – С. 351–360.
7. Narita Y. Plasma turbulence in the solar system. – Springer Science & Business Media, 2012.
8. Pincon J. L., Motschmann U. Multi-spacecraft filtering: General framework //Analysis methods for multi-spacecraft data, ISSI Sci. Rep. SR-001. Bern: ISSI. – 1998. – С. 65–78.
9. Sahraoui F. et al. ULF wave identification in the magnetosheath: The k-filtering technique applied to Cluster II data //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2003. – Т. 108. – № A9.
10. Song P., Russell C. T. Time series data analyses in space physics //Space Science Reviews. – 1999. – Т. 87. – № 3. – С. 387–463.
11. Vogt J., Narita Y., Constantinescu O. D. The wave surveyor technique for fast plasma wave detection in multi-spacecraft data // Annales Geophysicae. – Copernicus GmbH, 2008. – Т. 26. – № 7. – С. 1699–1710.

Надійшла до редколегії 24.11.22

**B. Petrenko, PhD Student**

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

**L. Kozak, PhD**

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

Space Research Institute of the NASU and the SSAU, Kyiv, Ukraine,

**E. Kronberg, PhD**

Geophysics Department of Earth and Environmental Sciences University of Munich, Munich, Germany,

**I. Ballai, PhD**

School of Mathematics & Statistics at the University of Sheffield, UK

### **APPROBATION OF WAVE DISPERSION ANALYSIS USING MULTISPACECRAFT METHODS**

*Methods of wave analysis of time series are analyzed in detail, namely: two-spacecraft phase difference, beamforming, k-filtering, MSR (Multi-point Signal Resonator) technique. These multispacecraft methods allow to obtain a set of wave power peaks with different spatial scales at the same frequency, which is a significant advantage over the single-spacecraft approach due to existence a significant number of wave modes at the same frequency in space plasmas. The software implementation of these methods with their successful testing on artificial data is executed. The effectiveness of each method for detecting maxima in the power spectra of the magnetic field is demonstrated.*

*Keywords: dispersion analysis, multispacecraft method, phase difference, beamforming, k-filtration, MSR technique.*

УДК 523.682.2, 523.683, 523.68-36, 681.785.55

А. Мозгова, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,  
О. Голубась, канд. фіз.-мат. наук  
Науково-дослідний інститут астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

## МЕТЕОРНА БАЗА ДАНИХ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ У 2019–2021 роках ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІДЕОСПЕКТРАЛЬНОГО МЕТЕОРНОГО ПАТРУЛЯ ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

*Проаналізовано Базу даних позиційних і спектральних спостережень метеорів, проведених у 2019–2021 рр. із використанням автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля Науково-дослідного інституту астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Методами метеорної астрономії визначено кінематичні параметри й елементи геліоцентричних орбіт метеороїдів за даними Базу спостережень.*

*Описано методику оброблення спектральних відеоспостережень. Для аналізу спектрів метеорів створено програмне забезпечення "AVSMP\_Pro v1", що дозволяє генерувати синтетичні спектри та порівнювати їх зі спостережуваними спектрами метеорів. Для визначення хімічного складу метеороїда використовують електронну Базу NIST ASD. Як результат, ми отримуємо інформацію про відносний кількісний хімічний склад метеороїдів і фізичні умови утворення метеорної плазми.*

**Ключові слова:** метеор, спектр, спектральні лінії, інтенсивність спектральних ліній.

**Вступ.** Метеор являє собою світлове явище і пов'язані з ним фізичні процеси, які є результатом швидкісного (від 11 до 72 км/с) потрапляння метеороїда (продукт розпаду комет та астероїдів) з космосу в газоподібну атмосферу Землі. Маса таких твердих тіл можуть бути в межах  $10^{-6}$ – $10^7$  кг, а їхні розміри від 100 мкм до 20 м. Метеорні явища найчастіше відбуваються на висотах 120–80 км, а іноді й вище 120 км.

Хімічний склад комет і астероїдів можна визначати безпосередньо, вивчаючи речовину метеоритів, які випадають на земну поверхню. Однак головний недолік такого підходу полягає у тому, що кількість виявлених метеоритних падінь низька (< 20 %). Спектральні спостереження за метеорами й болідами є одним із шляхів розв'язання цієї проблеми методом класифікації надходження метеорного матеріалу. Спектри метеорів надають інформацію про фізико-хімічні процеси (умови збудження, світіння й іонізацію метеорної плазми, температуру, процеси абляції тощо), що відбуваються під час метеорних явищ в атмосфері Землі [1]. Такі спостереження дають можливість визначити масу метеороїдів, причини і характер протікання спалахів, якісний і кількісний хімічний склад метеорного тіла, а отже, отримувати інформацію про складову ядер комет і астероїдів. Отже, методи метеорної астрономії є потужним доповненням до інших методів астрономії, астрофізики та космічно-технічної галузі, що дозволяють вивчати різноманітну природу тіл Сонячної системи і навіть поза її межами, якщо метеороїди потрапили до Землі з глибокого космосу.

В останні роки широке використання сучасних відеосистем (так званих CCTV-камер) привело до створення баз даних, у яких налічуються сотні тисяч спостережень метеорів за рік в усьому світі. Огляд цих спостережних баз представлено у роботі [2]. Такі бази даних спостережень, зокрема і надають інформацію про рівень метеорної активності протягом року, елементи їхніх геліоцентричних орбіт, а також розподіл метеороїдів за масою і абсолютною світністю та ін. Проте нині все ж дуже мало зібрано спектральних даних для метеорів різноманітних потоків і спорадичного фону. Тому кожен метеорний спектр являє собою значну наукову цінність. В Україні спектральні спостереження метеорів активно проводилися колективами наукових установ, починаючи з 1957 р. до 1990 р., і відновилися лише з жовтня 2018 р. (НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна) із застосуванням сучасних світлочутливих відеокамер і цифрового оброблення результатів спостережень [2, 3].

Статистичне накопичення інформації про фотометричні параметри метеорів і кінематичні характеристики (швидкість, висота, параметри атмосферної траєкторії та ін.) метеорних тіл із подальшим обчисленням геліоцентричних елементів орбіт метеороїдів здійснюють за допомогою відеобазисних (одночасних двобічних або багатостанційних) метеорних патрулів, які дозволяють під час спостережень перекидати значну частину атмосфери на висотах 80–130 км [4].

У цій роботі ми проводимо аналіз накопиченої Базу даних позиційних і спектральних спостережень метеорів, виконаних у 2019–2021 рр. із використанням автоматизованого відеоспектрального метеорного патруля НДІ астрономії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Коротко викладено методику спостережень і оброблення накопиченого спостережного матеріалу.

**Метеорний патруль НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна.** З метою всебічного вивчення метеорних явищ були організовані дві спостережні станції. Перша розташована у Харкові на території НДІ астрономії, друга – на території Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії. Геодезичні координати метеорних патрулів визначали за допомогою GPS-навігаторів: "Харків" – широта місця  $\varphi = 50^{\circ}0'9.94''$  N, довгота місця  $\lambda = 36^{\circ}13'48.67''$  E, висота місця над рівнем моря – 141 м; "Чугуївська спостережна станція" – широта місця  $\varphi = 49^{\circ}38'28.61''$  N, довгота місця  $\lambda = 36^{\circ}56'8.62''$  E, висота місця над рівнем моря – 154 м. Відстань між оптичними приладами становить 64.76 км. Це достатньо для надійного отримання кінематичних характеристик метеорних тіл.

Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль (АВСМП) НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна являє собою оптично-електронний апаратний комплекс із застосуванням CCTV-відеокамер. Як детектори випромінювання використовують CCTV-камери Watec WAT-902H2 ULTIMATE із частотою формування кадрів із зображенням  $40 \text{ мс}^{-1} \pm 0.1 \text{ мс}^{-1}$  та із часовою роздільною здатністю 20 мс (час формування напівкадру) [4]. У таких камерах використовується CMOS-матриця ICX-249AL ExView розміром 1/2 дюйма. Фізичний розмір одного елемента матриці (пікселя) становить  $8.6 \times 8.3$  мкм. За паспортними даними чутливість камери – 0.0001 Лк (з відносною діафрагмою  $F/1.4$ ), співвідношення сигнал/шум становить більше 46 дБ. Під час спостережень автоматичне підвищення яскравості від-

ключене. Телевізійний тюнер із восьмирозрядним АЦП використовується для перетворення аналогового сигналу з камери на цифровий і зберігається у вигляді відеофайлу у форматі AVI. Усі камери оснащено об'єктивами Tamron 12VM1040 ASIR ( $F = 10$  мм, відносна апертура  $F1.4$ ), які забезпечують поле зору  $34.4^\circ \times 25.8^\circ$ . Отже, для розміру зображення  $576 \times 768$  пікселів, кутовий розмір одного пікселя складає  $2.65'$ . Оптичні пристрої метеорного патруля Чугуївської спостережної станції встановлені на екваторіальне монтування Sky-Watcher EQ6-R і працюють автоматично. У Харкові камера встановлена стаціонарно у напрямку на інший спостережний пункт під кутом близько  $70^\circ$  до горизонту, що забезпечує базисні одночасні спостереження метеорів на лінійних висотах близько 100 км. Одна з камер метеорного патруля Чугуївської спостережної станції оснащена дифракційною ґраткою 500 штрихів/мм для спектральних спостережень. Захоплення відеозображення здійснюється автоматичним реєстратором метеорів UFOCapture (SonotaCo, [5]). Для прив'язки часу метеорних патрулів використовується GPS-модуль NEO-6M і програмна плата Arduino UNO, запрограмована на отримання GPS-сигналу (дата, час, геодезичні координати у системі WGS-84) та передачі цієї інформації пульта управління метеорного патруля.

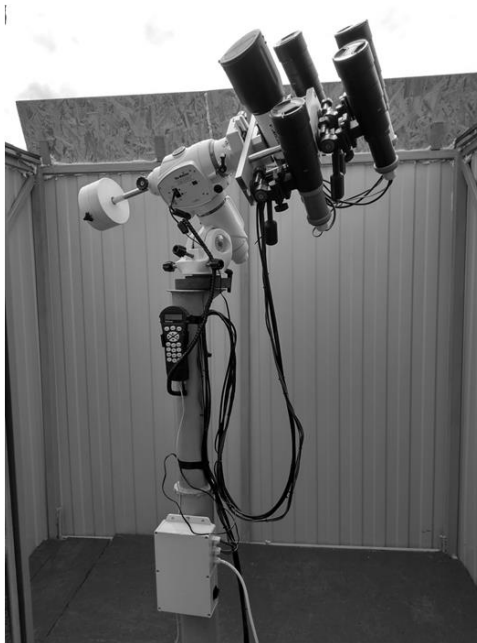


Рис.1. Автоматизований відеоспектральний метеорний патруль Чугуївської спостережної станції НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна

**База даних позиційних спостережень метеорів та їхніх спектрів.** Для кожного інструмента АВСМП створено динамічну базу даних, що постійно поповнюється спостережним матеріалом і результатами позиційної, фотометричної та спектральної обробки цього матеріалу. Нині База спостережень метеорів та їхніх спектрів складається з трьох каталогів – окремо для кожної відеокамери, розташованих на Чугуївській спостережній станції, одна з яких забезпечена дифракційною ґраткою, і на території НДІ астрономії в Харкові (відеокамера без дифракційної ґратки). Після ночі метеорного патрулювання у Базу даних надходять відеофільми, що складаються з 50 кадрів до і після появи метеора та кадрів із зображенням самого метеора.

У табл. 1 для кожного інструмента метеорного патруля наведено статистику спостережного матеріалу за період 2019–2021 рр., для яких вже виконано первинне оброблення. У табл. 1 позначено: ChII\_no1 та KhII\_no1 – оптичні відеокамери без дифракційної ґратки, ChII\_sp1 – спектральна камера, тобто відеокамера з дифракційною ґраткою.

Таблиця 1

Статистика спостережного матеріалу у Базі метеорних даних

Оптичний інструмент	Кількість зафіксованих метеорів	Період спостережень	Місце розташування
ChII_no1	1389	19.05.2019 – 22.12.2020	Чугуївська спостережна станція
ChII_sp1	504 (з яких 44 мають яскраві спектри, 12 є базисними)	19.05.2019 – 22.12.2020	Чугуївська спостережна станція
KhII_no1	534	19.08.2019 – 16.11.2021	НДІ астрономії, Харків

З табл. 1 видно, що кількість зафіксованих метеорів для KhII\_no1 менша приблизно у два рази, ніж для спостережень з аналогічною камерою ChII\_no1. Причиною такого факту є сильне світлове забруднення нічного неба у Харкові, де встановлена камера KhII\_no1. Так, статистична сумарна величина штучного засвічення неба за рік (у розрахунку на  $3.14 \text{ км}^2$  навколо пункту спостережень), дослідженого за допомогою Банку даних Глобальної карти світлового забруднення (Data Bank Global Map of Light Pollution) [6], у місці розташування метеорного патруля Чугуївської спостережної станції становить  $3.6 \times 10^{-9} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ , а харківського –  $1.2 \times 10^{-6} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$ . Тобто, різ-

ниця у цих значеннях становить три порядки. Для спектральної камери з 504 метеорів тільки 44 мають яскраві спектри (метеори яскравіші за  $-2^m$ ). Інші спектри дуже слабкі, або зовсім не виділяються у шумі, та непридатні для подальшого оброблення. Крім цього, 12 яскравих метеорів зі спектрами отримано одночасно з двох кореспондуючих пунктів спостереження, а отже для них можна визначити всі кінематичні характеристики, елементи геліоцентричних орбіт і маси метеороїдів.

У табл. 2 наведено статистику метеорних тіл у Базі даних, для яких отримано кінематичні параметри, елементи геліоцентричної орбіти та проведено фотометричне оброблення. В останній графі у дужках вказано кількість зафіксованих спектрів. Невелика кількість метеорних спектрів пояснюється складним процесом отримання спектра, який залежить від багатьох сприятливих умов: яскравість метеора, вірогідність одночасного пролітання метеора у полі зору спектральної і неспектральних камер, вдале розташування спостережуваних спектральних ліній відносно лінії дисперсії ґратки тощо.

Таблиця 2

Статистика метеорних тіл, для яких отримано кінематичні параметри й елементи геліоцентричної орбіти

Назва метеорного потоку	Код	Кількість зафіксованих метеорів (кількість спектрів)
Метеори спорадичного фону	Spo	115 (6)
Perseids	Per	73 (4)
Geminids	Gem	10
Orionids	ORI	5
Sigma Hydrids	HYD	4
August Beta Piscids	BPI	3
November Orionids	NOO	3
Southern Taurids	STA	2 (1)
Southern delta Aquariids	SDA	2
Psi Ursae Majorids	PSU	2
Northern Taurids	NTA	1
December alpha Draconids	DAD	1
Comae Berenicids	COM	1
Eta Eridanids	ERI	1
Leonids	LEO	1 (1)
Kappa Cygnids	KCG	1

**Визначення кінематичних характеристик метеороїдів.** Методику позиційних вимірювань телевізійних зображень метеорів детально описано в роботі [4]. Для визначення кінематичних характеристик і розрахунків елементів геліоцентричної орбіти метеорних тіл використовують пакет програмного забезпечення, розробленого із цією метою в НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна (автор О. Голубаєв) [4]. Крім цього, як альтернативу використовують програмне забезпечення, розроблене SonotaCo (Японія) [5]:

1. UFOCaptureHD2 і UFOCaptureV2 – для відеоспостережень і попередньої підготовки спостережного матеріалу до аналізу.

2. UFOAnalyzerV2 і UFOOrbitV2 – для фотометрії, розрахунків кінематичних параметрів і обчислень елементів геліоцентричних орбіт метеорних тіл.

Обробка відеофайлів після спостережень включає такі кроки:

- 1) відбір відеофайлів із метеорами;
- 2) завантаження даних до ПЗ UFOAnalyzer;
- 3) введення координат пункту спостережень, даних про камеру й іншої супровідної інформації;
- 4) введення інформації про поле зору й орієнтацію відеокамери;
- 5) астрометричне налаштування;
- 6) фотометричне калібрування;
- 7) збереження та встановлення профілю для пакетного оброблення зображень зір і метеорів;
- 8) перевірка результатів;

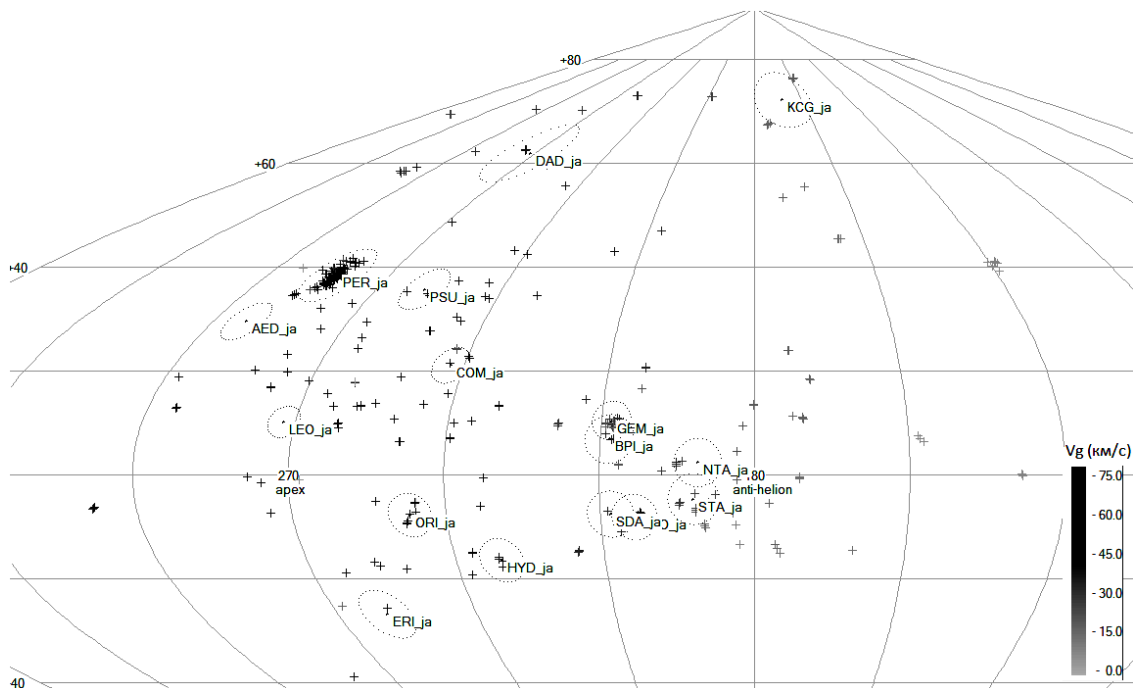
9) збереження результатів і завантаження даних до програми UFOOrbitV2 для подальших обчислень: отримання даних про кінематичні параметри метеорного тіла (траєкторія у земній атмосфері, лінійна висота, швидкість, координати на небесній сфері метеорного радіанта, елементи геліоцентричної орбіти та ін.) і фотометричних параметрів метеорів (абсолютний блиск, зміна блиску із часом).

Як приклад на рис. 2 зображено розташування на небесній сфері метеорних радіантів за спостереженнями у 2019–2020 рр. Виділяється група радіантів метеорів, що належать метеорному потоку Персеїди, а на рис. 3 зображено геліоцентричні орбіти відповідних метеорних частинок потоку Персеїди. Цей метеорний потік породжений кометою 109/Swift-Tuttle. Таким чином, фізико-хімічні властивості метеороїдів цього потоку дають нам уявлення про властивості речовини ядра цієї комети.

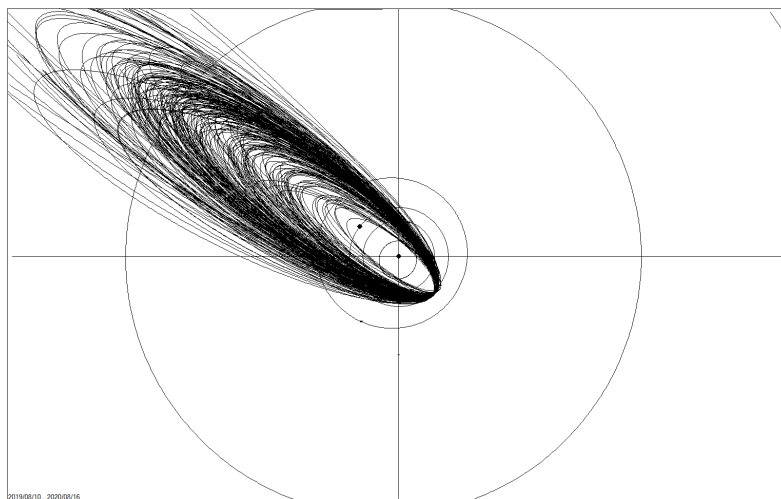
**Методика оброблення метеорних спектрів, отриманих за допомогою АВСМП.** База даних АВСМП включає також спостережний відеоматеріал метеорних спектрів за період 2019–2021 рр. і результати його обробки. Статис-

тика спектральних спостережень представлена у табл. 1 і 2. Як бачимо із цієї статистики, яскравий і придатний для обробки спектр технічно важко отримати за допомогою тільки однієї спектральної камери. Тому в майбутньому планується збільшити кількість відеокамер, оснащених спектральними ґратками, а отже збільшити за рахунок цього покриття спостережної зони.

Спектр метеора є сукупністю емісійних ліній. Загальна енергія випромінювання метеора розподіляється у безперервному спектрі слабкої яскравості й порівняно невеликій кількості монохроматичних зображень. Якісний аналіз спектрів полягає у вимірюванні спектрів уздовж дисперсії, визначенні довжин хвиль кожної емісійної лінії і ототожненні ліній хімічних елементів, що входять до складу метеороїда та земної атмосфери.



**Рис. 2.** Радіанти метеорів, зафіксованих у 2019–2020 рр. із використанням АВСМП. Положення радіантів зображено у екліптичній системі координат відносно екліптичної довготи Сонця ( $L_R - L_S$ )



**Рис. 3.** Геліоцентричні орбіти метеорних тіл потоку Персеїди, розраховані за спостереженнями у 2019–2020 рр. із використанням АВСМП

Для ототожнення хімічного складу метеороїдів у спектрах спостережених метеорів, використовують програмне забезпечення "AVSMP\_Pro v1" (автори О. Голубаєв, А. Мозгова), яке автоматизує цей процес і дає змогу обробляти великі обсяги даних. Оброблення відео з метеорним спектром проводиться за такими кроками.

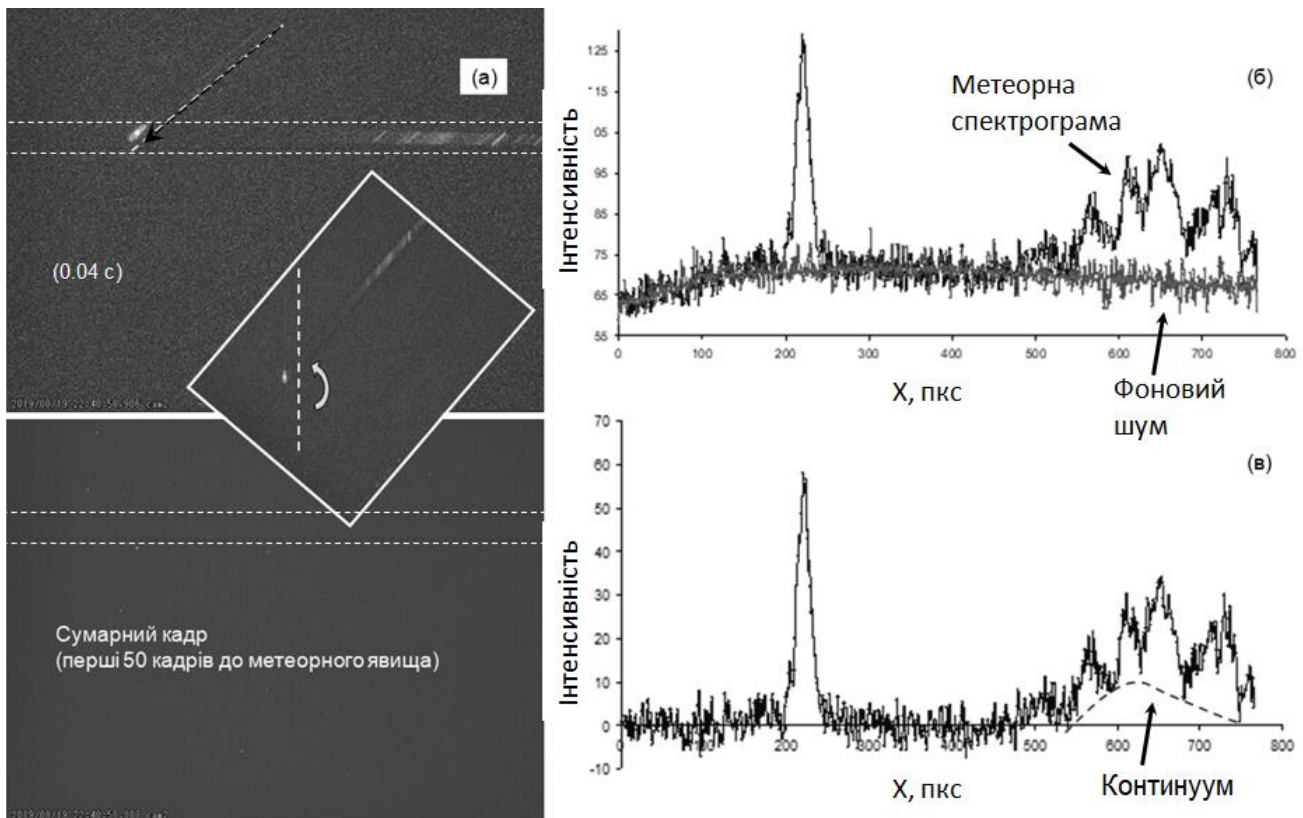
1. Під час спостережень отримують відеофільм, що містить 50 кадрів (тривалістю 2 с) до початку метеорного явища, кадри з метеорним спектром, а також 50 (чи більше) кадрів після метеорного явища. В останньому, це роблять для випадку, коли спостерігається тривале післясвітіння метеорного сліду.

2. Відеофільм розбивають на окремі оригінальні кадри, сформовані за 40 мс. Перші 50 кадрів до метеорного явища підсумовують та усереднюють ("сумарний кадр").

3. Від оригінального кадру зі спектром метеора віднімають сумарний кадр. У результаті такої операції вилучають зображення зір і дефектні пікселі, які постійно присутні на кожному кадрі, а отже залишається тільки зображення метеороного спектра на фоні фотометрично рівного, але зашумленого поля.

4. Проводять сканування частини зображення зі спектром, у результаті якого отримують спектрограму метеора. Під час цієї процедури вводять поправки, які враховують різні геометричні і фотометричні апаратні спотворення. Для отримання дискретної спектрограми, оцифровують частину зображення спектра, повернуту на деякий кут до осі абсцис (рис. 4а). Цей кут визначають із поздовжнього переміщення зображення метеора. Отже, зображення ліній будуть розташовані під кутом 90° до осі абсцис. Далі створюється спектрограма шляхом підсумовування значень пікселів у кожному стовпці вибраної частини зображення. Отримана дискретна спектрограма апроксимується кубічним сплайном і гаусіаною для подальшого аналізу.

5. Виконують процедуру виділення корисного сигналу метеороного спектра із зображення спектра з накладеними на нього шумами різної природи. Так, під час формування сумарного кадру (див. крок 2) в окремий файл записують середнє значення яскравості кожного пікселя і середньоквадратичне відхилення від середнього значення у коливанні яскравості пікселя. В останньому випадку рівень фонового шуму може досягати 15σ (рис. 4б, 4в) [7]. Виділяють корисний сигнал такий, що вищий за значенням на 1σ від середньоквадратичного відхилення.



**Рис. 4.** До методики первинного оброблення відеозображення зі спектром метеора й отримання спектрограми:

- (а) – угорі зображення одного з кадрів відеофільму зі спектром метеора, сформованого за 0.04 с. Пунктирними лініями показано межі зображення метеороного спектра, а пунктирною стрілкою – напрямком переміщення метеора. На вставці зображено поворот кадру на кут, що дорівнює куту, під яким метеор рухається відносно осі абсцис. Внизу показано сумарне зображення за першими 50 кадрами до появи метеора. Пунктирними лініями вказано межі, що відповідають вибраній області зі спектром метеора;
- (б) – метеорна спектрограма й розподіл фонового шуму під метеорним спектром; (в) – зашумлена метеорна спектрограма

6. Проводять прив'язку відносних відліків спектрограми за довжинами хвиль. Для цього після отримання метеороної спектрограми здійснюють ототожнення довжин хвиль, порівнюючи спектр метеора зі спектром еталона, в якому точно відомі довжини хвиль спектральних ліній. Зазвичай, для цього використовують найбільш яскраві та відомі лінії у спектрі метеора (нейтральні атоми кисню, азоту, натрію, магнію, заліза), довжини хвиль яких відомі з достатньою точністю. Виконують вимірювання спектрограми – отримують довжини хвиль λ спектральних ліній і відповідні їм відносні відліки шкали n<sub>i</sub> (відстань від певного нуля-пункту до спектральних ліній). У результаті одержують залежність у вигляді градуйованої кривої спектрограми λ = f(n). Ця залежність визначає масштаб досліджуваної ділянки спектра – так звану обернену дисперсію ділянки спектрограми. Обернену дисперсію визначають за формулою (1):

$$D = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{n_2 - n_1}, \tag{1}$$

вимірюють, як правило, у нанометрах на 1 мм (нм/мм). У випадку цифрового зображення вимірюють у нанометрах на 1 піксель (нм/пкс). Дифракційний спектр має сталу дисперсію D вздовж усієї спектрограми.

7. На спектрограмі віднімають суцільний спектр, або континуум (на рис. 4в показано пунктирною лінією), підбираючи значення вірогідної температури метеорної коми. Згідно з формулою Планка, розподіл енергії в суцільному спектрі нагрітого газу метеорної коми визначається температурою

$$E_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1}, \quad (2)$$

де  $h$  – стала Планка ( $6.625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $c$  – швидкість світла у вакуумі ( $3 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup>);  $k$  – стала Больцмана ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>);  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання, м;  $T$  – абсолютна температура, К.

Значення температури підбирають так, щоб крива Планка якнайкраще описувала вільні від яскравих ліній частини ділянки метеорної спектрограми (рис. 4в). Абсолютна температура, знайдена таким чином, надалі використовується у першому наближенні під час розрахунків синтетичного спектра метеора для визначення кількісного вмісту хімічних елементів у метеороїді.

8. Проводять абсолютне калібрування спектрограми.

Відеоспектральна апаратура характеризується відносною спектральною чутливістю, яку треба врахувати під час визначення відносної та абсолютної інтенсивності спектральних ліній. Для цього необхідно отримати спектр еталонного джерела випромінювання, для якого відомий розподіл енергії у спектрі. Нормування метеорного спектра здійснюється діленням спектра метеора на спектр порівняння. Далі знайдену функцію спектральної чутливості  $f(\lambda)$  використовують для калібрування інтенсивностей емісійних ліній у спектрі метеора. У метеорній спектроскопії абсолютну інтенсивність спектральних ліній, зазвичай, виражають в ерг·с<sup>-1</sup>·нм<sup>-1</sup>·ср<sup>-1</sup>. Після отримання сканованого зображення метеорного спектра та його калібрування, враховуючи різноманітні геометричні і фотометричні спотворення, здійснюється детальна ідентифікація спектральних ліній, виконується пошук нових емісійних ліній, визначаються їхні абсолютні інтенсивності, розраховуються фізичні параметри метеорних тіл та ін.

На рис. 5а показано криву (суцільну лінію) спектральної чутливості відеокамери WATEC 902H2 (CMOS-матриця ICX-249AL ExView), яка обмежується чутливістю на довжинах хвиль близько 1000 нм. Пропускна спектральна характеристика УФ фільтра обмежує чутливість камери на довжинах хвиль близько 350 нм (на рис. 5а пунктирна лінія).

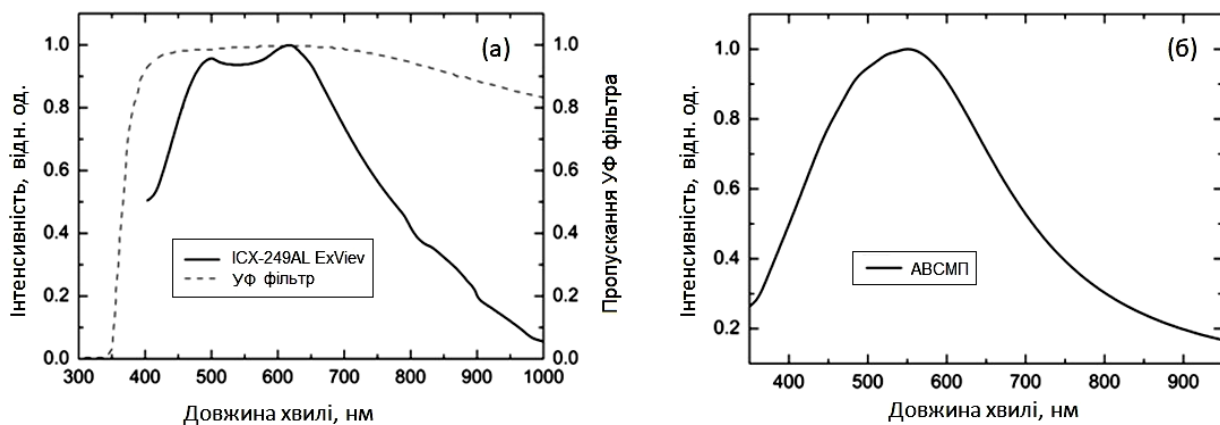


Рис. 5. (а) – суцільна лінія – крива спектральної чутливості відеокамери WATEC 902H2 (CMOS матриця ICX-249AL ExView), пунктирна лінія – пропускна спектральна характеристика УФ фільтра; (б) – спектральна калібрувальна функція ABCMP

Як калібрувальне джерело ми використали Юпітер. Спектральну калібрувальну функцію системи  $f(\lambda)$  розраховано за формулою

$$f(\lambda) = \frac{DO}{DC[\text{ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}]}, \quad (3)$$

де  $DO$  – інтенсивність випромінювання спектра Юпітера у відносних одиницях під час спостережень за допомогою ABCMP;  $DC$  – інтенсивність випромінювання Юпітера в абсолютних одиницях [ $\text{ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}$ ].

Дані  $DC$  отримано множенням сонячного спектра в інтервалі 300–1000 нм поза земною атмосферою [8] на альbedo Юпітера. Значення альbedo Юпітера взято з роботи [9].

Густина потоку  $F(\lambda)$  випромінювання метеорних спектрів у абсолютних величинах отримують із використанням кривої спектральної калібрувальної функції системи  $f(\lambda)$ :

$$\frac{F(\lambda)}{\text{ерг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нм}^{-1}} = \frac{OMS}{f(\lambda)}, \quad (4)$$

де  $OMS$  – інтенсивність випромінювання спектра Юпітера у відносних одиницях під час спостережень за допомогою ABCMP.

Отже, отримуємо нормовану на одиницю у своїх максимумах спектральну калібрувальну функцію спостережної телевізійної спектроскопічної системи ABCMP із використанням ґратки 500 штрихів/мм (рис. 5б).

9. Ототожують спектральні лінії щодо їхньої приналежності до атомів, іонів і молекул хімічних елементів, із використанням Бази даних спектральних ліній NIST ASD [10]. Результат оброблення метеорного спектра заносять до Бази даних спостережень ABCMP. Далі проводять якісний і кількісний аналіз отриманих результатів.

**Визначення хімічного складу метеороїдів.** Для якісного й кількісного аналізу хімічного складу метеороїда за його метеорною спектрограмою використовуємо синтетичний спектр, який розраховано за формулою

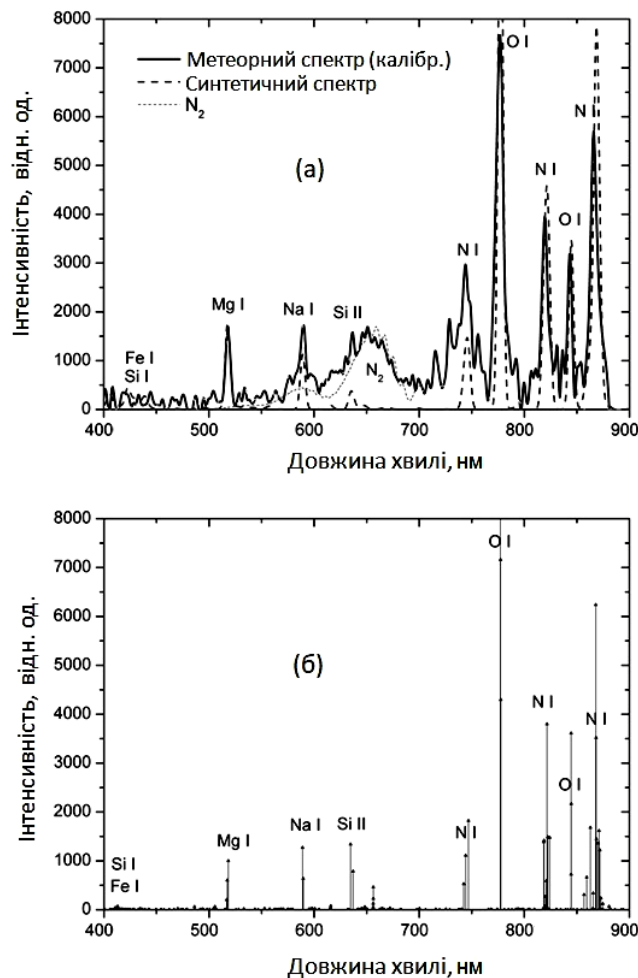
$$I_{nr} = \frac{1}{4\pi} \frac{hcN_0}{\lambda Z} g_n A_{nr} \exp\left(-\frac{E_n}{kT_{\text{еф}}}\right), \quad (5)$$

де  $I_{nr}$  – інтенсивність спектральної лінії;  $h$  – стала Планка ( $6.625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $c$  – швидкість світла у вакуумі ( $3 \cdot 10^8$  м·с<sup>-1</sup>);  $k$  – стала Больцмана ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж·К<sup>-1</sup>);  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання, м;  $N_0$  – загальна кількість атомів цього елемента у випромінювальному об’ємі;  $g_n$  – статична вага рівня  $n$ ;  $E_n$  – енергія збудженого верхнього стану,  $Z$  – сума за станами;  $A_{nr}$  – коефіцієнт Ейнштейна;  $T_{\text{еф}}$  – ефективна температура, К.

Усі необхідні параметри для конкретної спектральної лінії взято з електронної Бази даних NIST ASD [10]. Припускається, що у метеорній плазмі виконуються умови локальної термодинамічної рівноваги. У такому випадку ефективна ( $T_{\text{еф}}$ ) й електронна температури ( $T_e$ ) будуть рівні за значенням, а отже з формули (5) можна визначити загальну кількість атомів хімічного елемента у випромінювальному об’ємі. Змінюючи інтенсивність різних атомних синтетичних спектральних ліній метеора й атмосферного кисню й азоту, можна розділити на окремі спектральні лінії складні метеорні спектри з емісіями, що являють собою сукупність ліній різних хімічних елементів. Для перевірки та коректності розрахунків результати отриманих синтетичних атомних спектрів порівнювали з результатами, отриманими за допомогою програмного забезпечення [11].

На спектрограмах метеорів крім ліній нейтральних атомів та іонів різних хімічних елементів присутні молекулярні смуги атмосферного азоту  $N_2$ , модельні розрахунки якого, проводять за допомогою програмного забезпечення PGPHER [12].

Як приклад, на рис. 6а показано калібровану за описаною методикою спектрограму метеора M20190819\_224058 (суцільна крива) і синтетичний спектр (штрихована крива) з ототожненими атомами й іонами хімічних елементів. За допомогою програмного забезпечення "AVSMP\_Pro v1" у спектрі метеора ототожнено спектральні лінії, які належать атомам хімічних елементів Fe I, Ca I, Mg I, Si I, Na I, іонам Si II, атомам атмосферного походження O I, N I та молекулярні смуги атмосферного азоту  $N_2$  на проміжку довжин хвиль 600–700 нм. На рис. 6б зображено розраховані за синтетичним спектром інтенсивності окремих спектральних ліній цих хімічних елементів.

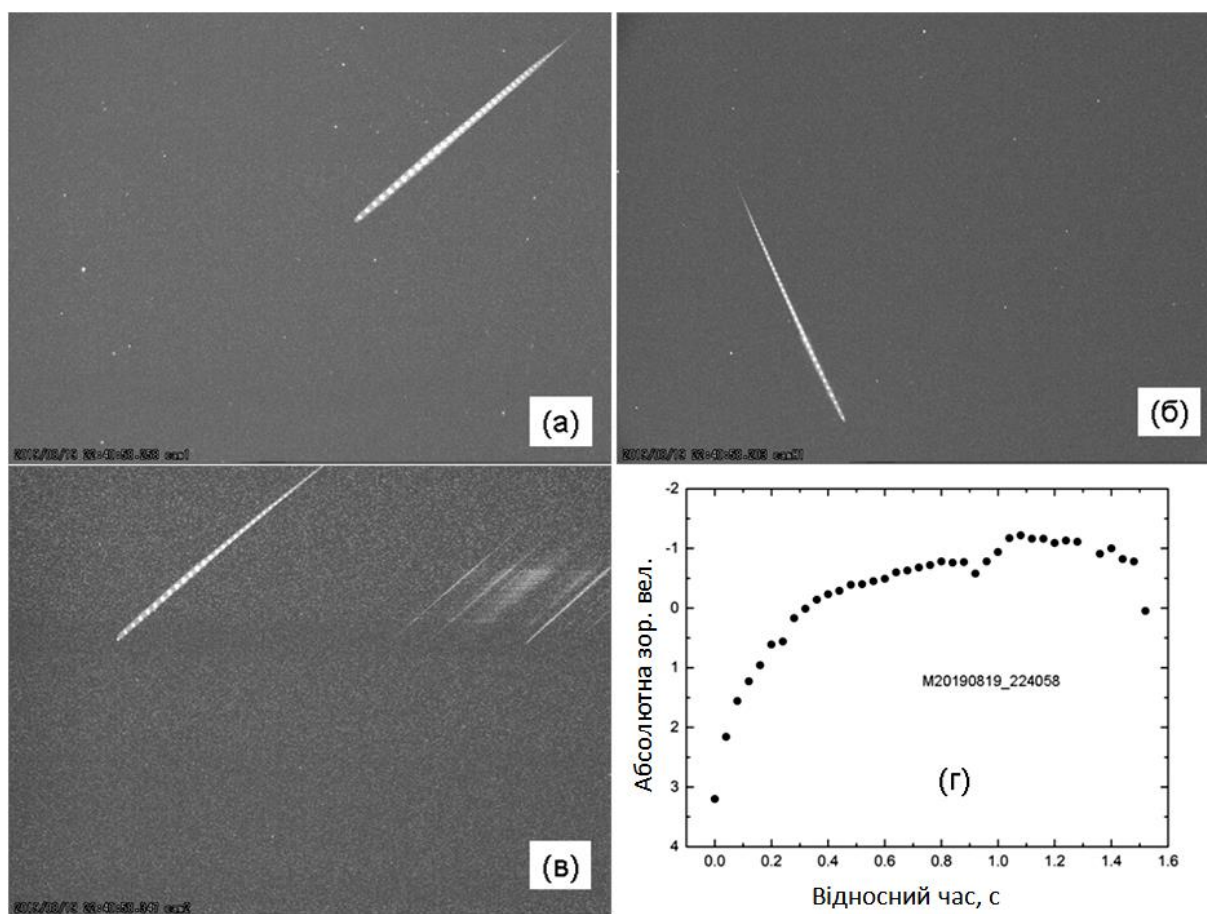


**Рис. 6.** (а) – калібрована спектрограма метеора M20190819\_224058 (суцільна крива, синтетичний спектр (штрихована крива) з ототожненими атомами й іонами хімічних елементів, модель молекулярного спектра азоту  $N_2$  (пунктирна крива); (б) – ототожнені спектральні лінії атомів хімічних елементів, які розраховані за синтетичним спектром



Знайдена загальна кількість атомів певного хімічного елемента у випромінювальному об'ємі дає можливість розрахувати відносні значення концентрацій Fe, Mg, Na, Ca, Si та ін., а отже визначити до якого загального класу (залізний, залізо-силікатний чи силікатний) належить метеороїд. Але треба зауважити, що описана методика кількісного аналізу хімічного складу метеорного тіла належить до безеталонного методу, коли розрахунки дуже чутливі до точності визначення температури. У такому випадку похибки абсолютних значень концентрацій елементів можуть досягати десятків відсотків (в окремих випадках більше 30–50 відсотків). Тому питання безеталонного методу визначення хімічного складу метеорних тіл ще потребує подальшого вирішення. Як альтернативу для кількісного аналізу на практиці знаходять значення відносних інтенсивностей ліній FeI-15 (530 нм), MgI-2 (516.7 нм), NaI-1 (588.9 нм), Ca I-2 (422.6 нм) [13, 14]. Це також відображає інформацію про класифікацію метеороїда.

**Кінематичні параметри й геліоцентрична орбіта метеора потоку Персеїди (M20190819\_224058) 19 серпня 2019 р.** Далі представлено результати, виконані за описаною вище схемою, оброблення позиційних і спектральних спостережень на прикладі метеора M20190819\_224058 за Базою даних спостережень метеорів АВСМП. Явище відбулось 19 серпня 2019 р. о 22<sup>h</sup>40<sup>m</sup>58<sup>s</sup> UT під час активності метеорного потоку Персеїди. Спостерігачі – Олександр Голубасв, Альона Мозгова. Спостереження метеора були базисними, тому є можливість визначити елементи геліоцентричної орбіти метеорного тіла. Спектр та інтегральне зображення яскравого метеора показано на рис. 7а, б, в.



**Рис. 7.** Метеор (M20190819\_224058) потоку Персеїди 19 серпня 2019 р.:  
 (а) – спостереження на Чугувській спостережній станції; (б) – спостереження у Харкові; (в) – спектр метеора;  
 (г) – зміна абсолютної зоряної величини метеора із часом

У табл. 3–5 наведено основні кінематичні параметри і геліоцентричні елементи орбіти метеорного тіла M20190819\_224058, що належав до потоку Персеїди (# PER).

**Таблиця 3**

(*lng1, lat1, H1*) і (*lng2, lat2, H2*) – геодезичні координати і висота метеорного тіла M20190819\_224058 у початковий і кінцевий моменти спостережень явища; к. град – кутові градуси

Дата (UTC)			Час (UTC),			lng1, к. град	lat1, к. град	H1, км	lng2, к. град	lat2, к. град	H2, км
рік	місяць	день	год	хв	с						
2019	08	19	22	40	58	36.97	50.01	116.1	36.64	49.83	80.1

Таблиця 4

Координати радіанта метеора M20190819\_224058. MJD – модифікована Юліанська дата; Sol – довгота Сонця; Ra0, Dc0 – екваторіальні координати радіанта; Rat, Dct – виправлені екваторіальні координати радіанта; elng, elat – екліптичні координати радіанта; к. град – кутові градуси;

MJD	Sol	Ra0	Dc0	Rat	Dct	elng	elat
59746.58676	146.39	58.20	57.84	58.73	57.93	69.91	36.66

Таблиця 5

Геліоцентричні орбітальні параметри (J2000) метеороїда M20190819\_224058. Vi, Vg, Vs – позаатмосферна, геоцентрична, геліоцентрична швидкості (км·с<sup>-1</sup>); a – велика піввісь (а.о.); q – перигелійна відстань (а.о.); e – ексцентриситет; ω – аргумент перигелія; к. град – кутові градуси; Ω – довгота висхідного вузла; i – кут нахилу орбіти

Vi км·с <sup>-1</sup>	Vg км·с <sup>-1</sup>	Vs км·с <sup>-1</sup>	a а.о.	q а.о.	e	ω к. град	Ω к. град	i к. град	Метеорний потік
59.73	58.52	39.97	5.69	0.93	0.84	145.998	146.39	114.92	PER_ja

На рис. 7г зображено криву зміни блиску метеора із часом. Тривалість метеорного явища становить близько 1.6 с. Якщо знехтувати гальмуванням сферичного метеорного тіла, тоді можна оцінити його фотометричну масу ( $M_{ph}$ ) у грамах. Залежність між  $M_{ph}$ , силою світла  $I$  (єрг·с<sup>-1</sup>·ср<sup>-1</sup>) і швидкістю  $V_{\infty}$  (км·с<sup>-1</sup>) описують формулою

$$4\pi I = -\tau \frac{V_{\infty}^2}{2} \frac{dM_{ph}}{dt} \quad (6)$$

У роботі використано коефіцієнт ефективного випромінювання  $\tau = 0.002$  [15, 16, 17].

Сумарне значення темпу сублимації метеорного тіла  $dM/dt$  дає  $M_{ph}$  приблизно 0.08 г. Якщо прийняти для нього мінералогічну густину, характерну для Персеїд [18]  $\rho = 1.2$  г·см<sup>-3</sup>, тоді розмір метеороїда становив близько 0.5 см.

**Висновки.** У роботі описано Базу даних позиційних і спектральних спостережень метеорів, проведених у 2019–2021 рр. за допомогою метеорного патруля НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Виконано оброблення спостережень метеора M20190819\_224058, що був зафіксований камерами АВСМП 19 серпня 2019 р. о 22<sup>h</sup>40<sup>m</sup>58<sup>s</sup> UT під час активності метеорного потоку Персеїди. Методами метеорної астрономії досліджено його кінематичні і фізико-хімічні властивості. Проведено аналіз ототожнених емісійних ліній, виявлених у метеорному спектрі, і створено їхній каталог. Результати оброблення, що представлені в роботі, показують узгодженість із роботами інших авторів і даними інших баз, наприклад NIST ASD. Отже, програмне забезпечення "AVSMP\_Pro v1", розроблене авторами цієї статті для оброблення метеорних спектрів, може застосовуватися для подальшої роботи з рештою спостережного матеріалу в Базі даних АВСМП. Розроблене ПЗ постійно оновлюється залежно від задач, які потрібно розв'язувати.

Роботу виконано:

- НДІ астрономії ХНУ імені В. Н. Каразіна – частково в межах договору № БФ/32-2021 на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Математичні науки та природничі науки" Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України;
- Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка – у межах держбюджетної теми 22БФ023-02 "Діагностика пилу в активних малих тілах Сонячної системи та навколоземному космічному просторі" за рахунок фінансування Міністерства освіти і науки України, та частково в межах виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Математичні науки та природничі науки" Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

**Список використаних джерел**

1. Мозгова А. М. Речовинний склад вибраних метеорів за дистанційними спектральними спостереженнями. Дисертація. Київ. – 2018. – 133 с.
2. Голубаєв О. В., Горбаньов Ю. М., Шульга О. В., Андрєєв О. А., Бушуєв Ф. І., Відьмаченко А. П., Грудинін Б. О., Жилиєв Б. Ю., Калюжний М. П., Козак П. М., Куліченко М. О., Малиновський Є. В., Мозгова А. М., Савчук С. Г., Стеклов О. Ф., Сумарук Ю. П., Янків-Вітковська Л. М. Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості // Косм. наука і технол. – 2022. – 28 (4). – С. 39–70.
3. Голубаєв О., Мозгова А. Перші результати спостережень метеорних явищ за допомогою автоматизованого відео-спектрального метеорного патруля Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна // Вісник Київського нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2019. – 59 (1). – С. 41–48.
4. Голубаєв О. В. Кінематичні та фізичні характеристики метеорних тіл з радіантами поблизу Сонця за даними наземних телевізійних спостережень. Дисертація. Київ. – 2017. – 195 с.
5. UFO Capture is motion capture software. Електронний ресурс: [http://sonotaco.com/e\\_index.html](http://sonotaco.com/e_index.html) (last accessed – 24.01.2022).
6. Data Bank Global Map of Light Pollution, [www.lightpollutionmap.info](http://www.lightpollutionmap.info)
7. Gorbanev Y. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V. et al. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors // Sol Syst Res. – 2006. – 40. – P. 412–426.
8. Wehrli 1985, AM0 Spectrum. Електронний ресурс: <http://redc.nrel.gov/solar/standards/am0/wehrli85.txt>
9. Karkoschka Erich. Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titanat 300 to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum // Icarus. – 1994. – Vol. 111, Iss. 1. – P. 174-192.
10. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2020, November 15]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
11. Електронний ресурс: [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)

12. Colin M. Western, Luke Carter-Blatchford, Patrick Crozet, Amanda J. Ross, Jérôme Morville and Dennis Tokaryk. The spectrum of N<sub>2</sub> from 4500 to 15700 cm<sup>-1</sup> revisited with PGOPHER // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2018. – Vol. 219. – P. 127–141.
13. Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R. Catalogue of representative meteor spectra // A&A. – 2015. – 580, A67. – P. 31.
14. Sekiguchi Takashi. Results of spectral observations of meteor showers and sporadic meteors from October 2018 until May 2020 // eMeteor News. – Vol. 5, no. 5. – P. 300–313. <https://www.meteornews.net>
15. Spurný P. Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993-1996 // Planetary and Space Science. – 1997. – Vol. 45, Iss. 5. – P. 541–555. DOI: 10.1016/S0032-0633(97)00006-8,
16. Campbell-Brown M.D., Koschny D., 2004. Model of the ablation of faint meteors. Astronomy and Astrophysics, Volume 418, p.751–758. DOI: 10.1051/0004-6361:20041001-1
17. Kozak P. M. Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classic heights // Kinematika i fizika nebesnyh tel (Online). – 2019. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 62–79.
18. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I. Densities and porosities of meteoroids // A&A. – 2009. – 495. – P. 353–358.

#### References

1. Mozgova A. M. (2018). Material composition of meteors by remote spectral observations. [Unpublished doctoral dissertation]. National Aviation University.
2. Golubaev A.V., Gorbanev Yu.M., Shulga O.V., Andreev O.A., Bushuev F.I., Vidmachenko A.P., Hrudynin B.O., Zhilyaev B.E., Kaliuzhnyi M.P., Kozak P.M., Kulichenko M.O., Malynovskiy Ye.V., Mozgova A.M., Savchuk S.G., Steklov A.F., Sumaruk Yu.P., Yankiv-Vitkovska L.M. Creation of the Ukrainian meteor observation network: instruments, methods for processing, observation possibilities // Space Sci. & Technol – 2022. – 28 (4). – P. 39–70.
3. Golubaev A., Mozgova A. The first results of meteor phenomena observations using automated video-spectral meteor patrol of V.N. Karazin Kharkiv National University // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2019. – 59 (1). – P. 41–48.
4. Golubaev A.V. (2017). Kinematic and physical characteristics of meteoroids with radiant near the Sun according to terrestrial television observations. [Unpublished doctoral dissertation]. National Aviation University.
5. UFO Capture is motion capture software. Електронний ресурс: [http://sonotaco.com/e\\_index.html](http://sonotaco.com/e_index.html) (last accessed – 24.01.2022).
6. Data Bank Global Map of Light Pollution, [www.lightpollutionmap.info](http://www.lightpollutionmap.info)
7. Gorbanev Y. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V. et al. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors // Sol Syst Res. – 2006. – 40. – P. 412–426.
8. Wehrli 1985, AM0 Spectrum. Електронний ресурс: <http://redc.nrel.gov/solar/standards/am0/wehrli85.txt>
9. Karkoschka Erich. Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titanat 300 to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum // Icarus. – 1994. – Vol. 111, Iss. 1. – P. 174-192.
10. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.8), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2020, November 15]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
11. Електронний ресурс: [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
12. Colin M. Western, Luke Carter-Blatchford, Patrick Crozet, Amanda J. Ross, Jérôme Morville and Dennis Tokaryk. The spectrum of N<sub>2</sub> from 4500 to 15700 cm<sup>-1</sup> revisited with PGOPHER // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2018. – Vol. 219. – P. 127–141.
13. Vojáček V., Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R. Catalogue of representative meteor spectra // A&A. – 2015. – 580, A67. – P. 31.
14. Sekiguchi Takashi. Results of spectral observations of meteor showers and sporadic meteors from October 2018 until May 2020 // eMeteor News. – Vol. 5, no. 5. – P. 300–313. <https://www.meteornews.net>
15. Spurný P. Exceptional fireballs photographed in central Europe during the period 1993-1996 // Planetary and Space Science. – 1997. – Vol. 45, Iss. 5. – P. 541–555. DOI: 10.1016/S0032-0633(97)00006-8,
16. Campbell-Brown M.D., Koschny D., 2004. Model of the ablation of faint meteors. Astronomy and Astrophysics, Volume 418, p.751–758. DOI: 10.1051/0004-6361:20041001-1
17. Kozak P. M. Diffuse structure of some meteors at the beginning of their trajectories at classic heights // Kinematika i fizika nebesnyh tel (Online). – 2019. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 62–79.
18. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I. Densities and porosities of meteoroids // A&A. – 2009. – 495. – P. 353–358.

Надійшла до редколегії 27.11.22

A. Mozgova, PhD

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

A. Golubaev, PhD

Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

### THE METEOR DATABASE OF OBSERVATIONS IN 2019–2021 WITH THE AUTOMATICAL VIDEO AND SPECTRAL METEOR PATROL OF V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY

*The Database of positional and spectral observations of meteors in 2019–2021 using the automatical video and spectral meteor patrol of the Institute of Astronomy of V. N. Karazin Kharkiv National University has analyzed. The kinematic parameters and elements of the heliocentric orbits of meteoroids were calculated using the methods of meteor astronomy according to the Observation Database.*

*This work describes the methods of processing of spectral video observations. The software "AVSMP\_Pro v1" for meteor spectra analysis has been created that allows to generate synthetic spectra and compare them with observed meteor spectra. The data from the NIST ASD electronic database ([https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)) is used for obtaining the composition of chemical elements in the meteoroid. As a result, we obtain an information about the relative quantitative chemical composition of meteoroids and the physical conditions of meteor plasma formation.*

**Keywords:** meteor, spectrum, spectral lines, intensity of spectral lines.

УДК 523.985+52-337

М. Громов, студ.,  
І. Яковкін, асп.,  
В. Лоцицький, д-р фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ЛІМБОВОМУ СОНЯЧНОМУ СПАЛАХУ 12 липня 2012 року НА ВИСОТІ БЛИЗЬКО 40 МЕГАМЕТРІВ

*Наведено результати вимірювань магнітного поля у лімбовому сонячному спалаху 12 липня 2012 р. бала M7.7, отримані на основі аналізу профілів  $I \pm V$  лінії  $H_{\alpha}$ . Результати стосуються моменту 06:45:50 UT, коли вершина спалахової аркади досягла 40 Мм за даними космічної обсерваторії SDO. Спостережені профілі лінії  $H_{\alpha}$  мають характерні ознаки неоднорідності магнітного поля, зокрема і неоднакове за величиною розщеплення бісекторів профілів  $I \pm V$  на різних віддальях від їхніх центрів. У цілому розщеплення бісекторів зростає у процесі переходу від крил спектральної лінії до її ядра, причому величина цього розщеплення відповідає напруженостям у межах 400–1200 Гс. Однак на фоні вказаного тренда виявлено також локальний максимум розщеплення бісекторів на віддалі близько 420 мА, який може вказувати на локальні магнітні поля напруженістю приблизно 20 кГс. Як відомо авторам, спостережені вказівки на такі дуже сильні магнітні поля на висоті 40 Мм виявлено вперше. Очевидно, такі магнітні поля можуть існувати у розрізненій сонячній короні лише за певної особливої структури магнітного поля, напевно безсилового типу, що передбачає сильну скрученість силових ліній.*

**Ключові слова:** Сонце, сонячна активність, лімбові сонячні спалахи, спектральний аналіз, ефект Зеємана, магнітні поля, метод бісекторів, надсильні магнітні поля.

**Вступ.** Магнітні поля у сонячних спалахах на лімбі Сонця (лімбових) вивчені значно менше, ніж у спалахах на диску, а також, тим більше, у сонячних плямах. Сонячні плями є дуже зручними об'єктами для спостережень, оскільки вони виникають на Сонці досить часто (особливо у максимумі 11-річного циклу), існують довго (від кількох днів до кількох тижнів) і мають досить великі розміри (іноді до 100 Мм [13]) – значно більші, ніж типове розділення сучасних сонячних телескопів (< 1 Мм). Крім того, у сонячних плямах існують досить сильні магнітні поля (2000–8000 Гс [5, 7]), за яких у спектрі можна спостерігати повне спектральне розділення компонент розщеплення в ефекті Зеємана, якщо використовувати спектрально вузькі лінії (приблизно 0.1 Å) із великими факторами Ланде ( $g = 2.5-3.0$ ). Саме у цьому випадку надійно вимірюється модуль напруженості магнітного поля, притому незалежно від нахилу силових ліній магнітного поля, впливу інструментальної поляризації і розсіяного світла [14].

Сонячні спалахи виникають значно рідше, ніж сонячні плями, завжди несподівано і тривають від кількох хвилин до кількох годин. Для глибшого вивчення їхньої фізичної природи важливо дослідити магнітні поля в них в області найінтенсивнішого енерговиділення, що відповідає діапазону висот "хромосфера – сонячна корона". Однак спектральні лінії, що формуються у цьому діапазоні висот, є досить широкими ( $\geq 0.3-1$  Å), а їхні фактори Ланде – невеликими, близькими до 1.0. Унаслідок цього, з методичних причин тут може бути вимірний не модуль напруженості магнітного поля, а його поздовжня компонента, яку позначають звичайно як  $B_{\parallel}$  або  $B_{\text{Los}}$ . Саме така характеристика вимірюється, наприклад, на магнітографі орбітальної обсерваторії SOHO [12]. Точніше, це лише у тому випадку, якщо магнітне поле є однорідним. Якщо ж воно неоднорідне і містить, наприклад, дуже тонкі силові трубки з фактором заповнення  $f$ , занурені у немагнітний фон, то тоді прямі вимірювання відображають величину добутку  $fB_{\text{Los}}$  [15] (фактор заповнення – це сумарна частка площі відної щільності телескопа, зайнята горизонтальними перерізами силових трубок). Зауважимо, що напруженості магнітного поля у різних силових трубках можуть відрізнятися і це можна виявити за формою бісекторів профілів  $I \pm V$  спектральних ліній [9].

Лімбові сонячні спалахи приваблюють для досліджень тим, що дають відносно простий спектр, який стосується лише самого спалаху, а не спалаху і фотосфери під ним, як у випадку спалахів на диску. Крім того, для лімбових спалахів можна більш надійно і просто визначити висоту в атмосфері Сонця, для якої виконано вимірювання. Для спалахів на диску це можна зробити лише на основі модельних розрахунків за певних припущень, що вносить певну невизначеність у кінцеві результати.

Величина магнітного поля у лімбових сонячних спалахах, виміряна різними авторами і різними методами, відрізняється дуже суттєво – від  $10^2$  до  $10^5$  Гс (див. наприклад, роботи [2, 3, 4, 17, 18], а також посилання у цих роботах). Слід зауважити, що оскільки лімбові сонячні спалахи виникають у нижній сонячній короні, де дуже низька концентрація плазми ( $10^8-10^9$  см<sup>-3</sup>), то навіть магнітні поля близько  $10^2$  Гс є "надто сильними" для простих однорідних нескручених силових трубок – у таких трубках теоретична величина магнітного поля, знайдена з умови рівноваги магнітного тиску всередині трубки і газового тиску зовні трубки, не повинна перевищувати 10 Гс. Насправді ж, як сказано вище, спостереженнями відмічено на 1–4 порядки сильніші поля. Це свідчить про те, що внутрішня структура магнітних полів в області спалахів має якісь специфічні особливості, які суттєво відрізняють їх від вказаного вище простого випадку, який, до того ж, цілком задовільно пояснює величину магнітних полів на фотосферному рівні – у сонячних плямах. Саме тому є дуже актуальними нові дослідження магнітних полів у лімбових спалахах, особливо для максимальної можливої висот у сонячній атмосфері. Метою цієї роботи є представлення і короткий аналіз результатів, які стосуються потужного лімбового спалаху бала M7.7 на достатньо великій висоті в атмосфері – близько 40 Мм.

**Матеріал спостережень і його первинна обробка.** Спостережений матеріал був отриманий В. Г. Лоцицьким на ешельному спектрографі горизонтального сонячного телескопа Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (ГСТ АО КНУ). Основні характеристики інструмента наведено в роботі [7]. Одночасне спостереження на ньому майже всієї видимої області спектра (від 3800 до 6600 Å) забезпечується тим, що порядки дифракції від дифракційної ґратки розводяться скляною призмою. Спектральне розділення у червоній

© Громов М., Яковкін І., Лоцицький В., 2022

області спектра становить  $50 \text{ \AA}$ , тобто близьке до спектрального розділення на орбітальній обсерваторії Hinode [16]. Хоча просторове розділення на ГСТ майже на порядок гірше (до  $1\text{--}2 \text{ Мм}$ ), ніж на Hinode, спостереження на ГСТ забезпечують на три порядки більшу ширину одночасної реєстрації спектра, ніж на вказаній орбітальній обсерваторії. Завдяки цьому на ешельних спектрограмах можуть бути зареєстровані одночасно багато тисяч спектральних ліній, що особливо важливо для вивчення процесів сонячної активності на різних висотах в атмосфері Сонця.

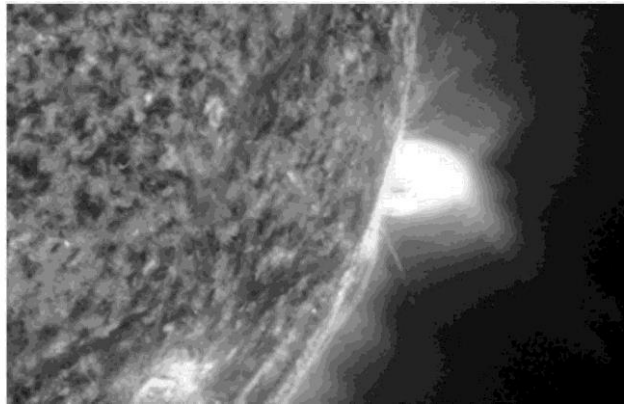


Рис. 1. Геліограма дослідженого спалаху на момент 07:06 UT згідно з даними орбітальної обсерваторії SDO, отриманими на довжині хвилі  $304 \text{ \AA}$

Сонячний спалах 19 липня 2012 р. виник на західному лівбі Сонця (рис. 1). Він пов'язаний з активною областю NOAA 1520, яка мала велику сонячну пляму (діаметром близько  $50 \text{ Мм}$ ) із магнітним полем  $2500 \text{ Гс}$ . Згідно з даними детекторів GOES, максимум рентгенівського випромінювання на довжинах хвиль  $1\text{--}8 \text{ \AA}$  спостережено приблизно о 06:00 UT. Цей спалах був повільний – його фаза зростання тривала близько 1 год 40 хв, а фаза затухання – більше 4 год.

Згідно з даними орбітальної обсерваторії SDO (Solar Dynamics Observatory) на довжинах хвиль  $171 \text{ \AA}$  і  $211 \text{ \AA}$ , із самого початку спалаху на лівбі виникла яскрава система магнітних петель (аркада), яка була найяскравішою у своїй вершині й підіймалась угору із середньою швидкістю  $4\text{--}5 \text{ км/с}$ .

Під час спостережень на ГСТ АО КНУ зроблено близько десяти експозицій спектра цього спалаху з використанням аналізатора циркулярної поляризації, що дозволяло потім вивчати комбінації профілів Стокса I + V та I – V. Спектри були сфотографовані на фотопластинки WP3 ORWO при експозиціях  $20\text{--}30 \text{ с}$ .

У цій роботі досліджено зєсман-спектрограму спалаху, отриману, починаючи з 06:45:50 UT, коли вершина спалахової аркади досягла висоти приблизно  $40 \text{ Мм}$ . Цю спектрограму проскановано І. І. Яковкіним за допомогою сканера Epson Perfection V 550 scanner. Подальші кроки у первинному опрацюванні матеріалу спостережень були такими.

Оцифровані результати сканування, які представляли почорніння на спектрограмі, перетворювались на інтенсивності з урахуванням характеристичної кривої фотоматеріалу, а також нелінійності самого сканера. У підсумку отримувалися ".dat" файли, які містили близько 2500 точок у форматі "довжина хвилі в умовних одиницях (кроках сканування) – інтенсивність у профілі лінії". Потім для кожного фотометричного розрізу співставлено профілі I + V та I – V з використанням застосунку Origin. Зазначимо, що графіки для різних поляризацій суміщувались так, щоб оптимально збігалися в них телуричні лінії. При цьому, як виявилось, спостерігалось деяке відносне зміщення профілів лінії  $H_{\alpha}$  в цілому (рис. 2). Це трактувалось як прояви ефекту Зєсмана у випадку слабкого розщеплення  $\Delta\lambda_n$ , коли це розщеплення набагато менше за спостережену півширину  $\Delta\lambda_{1/2}$  спектральної лінії.

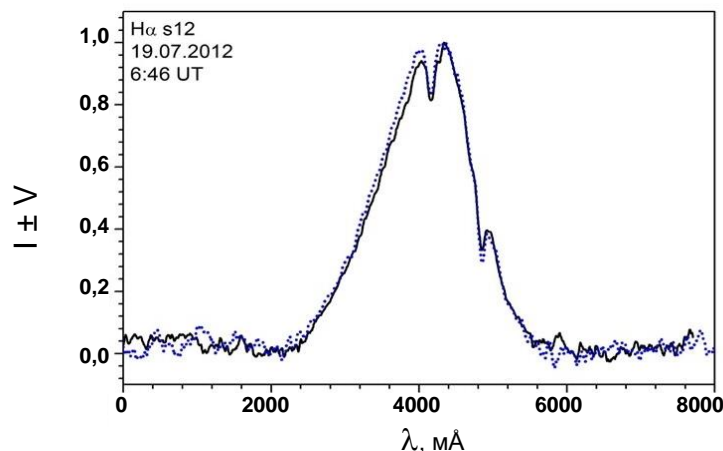


Рис. 2. Спостережені незгладжені профілі лінії  $H_{\alpha}$  у спалаху для фотометричного розрізу № 12. Відліки по горизонтальній осі нанесено у  $\text{m\AA}$  відносно умовного нуля. Крім широкого емісійного профілю лінії  $H_{\alpha}$ , видно вузькі телуричні лінії  $H_2O$  (на  $\lambda \approx 4100$  та  $4800 \text{ m\AA}$ ), по яких здійснювалась відносна "прив'язка" профілів в ортогональних поляризаціях

Після того, як профілі  $I + V$  та  $I - V$  були оптимально суміщені по телуричних лініях, вони згладжувались для зменшення впливу "шумів" за допомогою програми smooth, створеної Іваном Яковкіним. Для згладжених графіків побудовано бісектори за допомогою програми Median, що також розроблена Іваном Яковкіним. Згладжені графіки та відповідні їм бісектори були попарно побудовані для кожного з профілів в Origin. Далі за графіками бісекторів визначено, наскільки вони відрізняються один від одного по довжинах хвиль, тобто яка між ними відстань на кожній висоті профілю лінії. За отриманими даними про відстань між бісекторами обчислено значення напруженості магнітного поля з використанням калібровочної формули

$$\Delta\lambda_n = 2.01 \times 10^{-5} B, \tag{1}$$

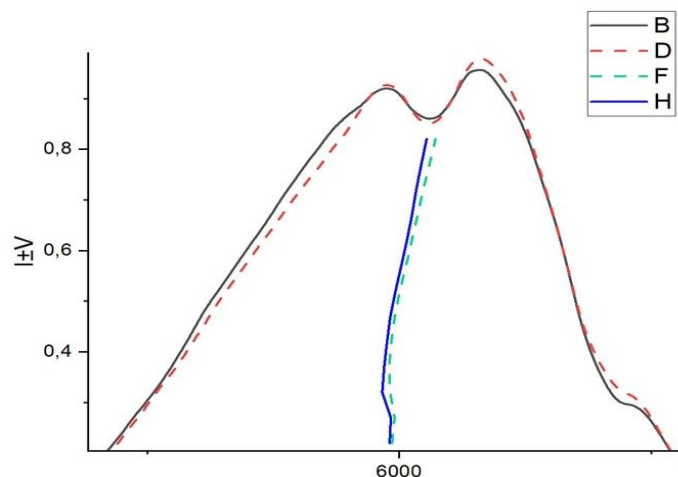
де  $\Delta\lambda_n$  виражено в ангстремах (Å), а магнітне поле  $B$  – у гаусах (Гс). Формула (1) відповідає фактору Ланде для  $H_{\alpha}$ , рівному 1.0, що справедливо за дуже сильних полів, коли настає ефект Пашена – Бака [1].

**Профілі лінії  $H_{\alpha}$  і магнітні поля у спалаху.** Спостережені профілі лінії  $H_{\alpha}$  є помітно розширеними, їхня півширина  $\Delta\lambda_{1/2}$  – близько 1.5 Å, тоді як у спектрі фотосфери цей параметр приблизно 1 Å. Це вказує, імовірно, на розширення профілю лінії в основному турбулентними швидкостями, хоча розширення температурою також може відігравати певну роль. Це видно з порівняння цього спалаху з іншим лімбовим спалахом – 17 липня 1981 р., в якому саме турбулентне розширення було домінуючим [18]. Нижче, однак, це питання детально не розглядається, оскільки воно потребує порівняння ширин профілів ліній, що стосуються різних хімічних елементів, тобто атомів із різною масою. У цій роботі аналізується лише одна спектральна лінія і лише ті спектральні ефекти, які стосуються магнітних полів.

З рис. 2 видно, що спостережені профілі мають помітну асиметрію, що свідчить про градієнт променевих швидкостей уздовж променя зору. Візуально це проявляється у тому, що далекі крила лінії в інтервалі інтенсивностей 0.1–0.2 мають більші довжини хвиль  $\lambda$ , ніж ядро лінії, яке відповідає інтервалу інтенсивностей приблизно 0.7–1.0. Слід врахувати, що емісія в лінії  $H_{\alpha}$  ймовірно є оптично товстою, тобто непрозорою для власного випромінювання. Ця непрозорість суттєвіша в ядрі лінії і практично відсутня в її крилах. Отже, у цілому ядро лінії відображає більше ті шари спалаху, які ближче до спостерігача, тому що випромінювання від більш далеких шарів не проходить через спалах. Однак у крилах лінії весь спалах прозорий і тому випромінювання доходить до нас як від ближніх, так і від віддалених його областей. У цілому це має такий ефект: ядро лінії дає інформацію про ближчі області спалаху, а крила – про більш віддалені. А те, що ядро і крила мають дещо різні довжини хвиль, означає, що променеві швидкості для них, у цілому, є різними.

Для вимірювань магнітного поля використовували лише "чисті" ділянки профілю лінії  $H_{\alpha}$ , тобто такі, де немає телуричних ліній-бленд. Зауважимо, що ці бленди можна врахувати (тобто "зрізати"), але це дає не дуже надійні результати. Саме тому висновки цієї роботи базуються на аналізі лише "чистих" ділянок профілю лінії, які відповідають інтервалу інтенсивностей 0.45–0.95.

Вплив телуричної бленди на  $\lambda \approx 4800$  мÅ добре видно з рис. 3, на якому зображено дуже згладжені профілі лінії  $H_{\alpha}$ ; згладжування проводилось по 100 точках, тобто по спектральному інтервалу приблизно 300 мÅ. Можна бачити, що бісектори профілів в інтервалі інтенсивностей 0.2–0.4 мають локальний максимум розщеплення, який, імовірно, є фіктивним. Саме тому краще звертати увагу в цьому випадку на ті ділянки профілю, які не мають впливу бленд. Щодо цього, то з рис. 3 видно, що під час переходу від крил лінії в її ядро (тобто від менших інтенсивностей до більших) маємо прогресивне зростання розщеплення бісекторів. Це свідчить про неоднорідність магнітного поля: у разі однорідного поля ці бісектори мали б бути паралельними між собою, якщо спостережене розщеплення значно менше, ніж півширина лінії (тобто  $\Delta\lambda_n \ll \Delta\lambda_{1/2}$ ) [6, 9].



**Рис. 3.** Спостережені згладжені профілі лінії  $H_{\alpha}$  у спалаху для фотометричного розрізу № 12. Ці дані аналогічні зображеним на рис. 2, але тут показано також бісектори профілів. Позначеннями B, D, F і H вказано профілі  $I + V$ ,  $I - V$ , а також відповідні їм бісектори

Для виявлення тонших ефектів у розщепленні бісекторів опрацьовано незгладжені профілі ліній (рис. 4 і 5). Таке опрацювання виявило достовірний локальний максимум розщеплення на  $\Delta\lambda = 410\text{--}470$  мÅ. Цей максимум дещо відрізняється за положенням у сусідніх фотометричних розрізах № 8, 10 і 12, однак усереднення всіх даних по цих роз-

різах підтверджує два основні ефекти: (а) – прогресивне зростання розщеплення бісекторів під час переходу від крил лінії до її ядра, (б) – максимум розщеплення на  $\Delta\lambda \approx 420$  мÅ (рис. 5). Можливо, там є ще один максимум розщеплення на  $\Delta\lambda \approx 660$  мÅ, але він менш достовірний.

Обидва ефекти (а) і (б) можливі у двокомпонентній структурі магнітного поля, коли у спектрі накладаються дві картини ефекту Зеемана, що відповідають більш слабкій і більш сильній компонентам [9]. Причому ефект (а) дозволяє оцінити реальне магнітне поле на основі моделювання, що дає не зовсім однозначні результати. Зокрема з роботи [6] впливає таке: якщо виміряна напруженість у ядрі лінії згідно з рис. 5 досягає приблизно 800 Гс, то насправді локальні напруженості можуть бути у 3–6 разів більшими, тобто досягати 4–5 кГс.

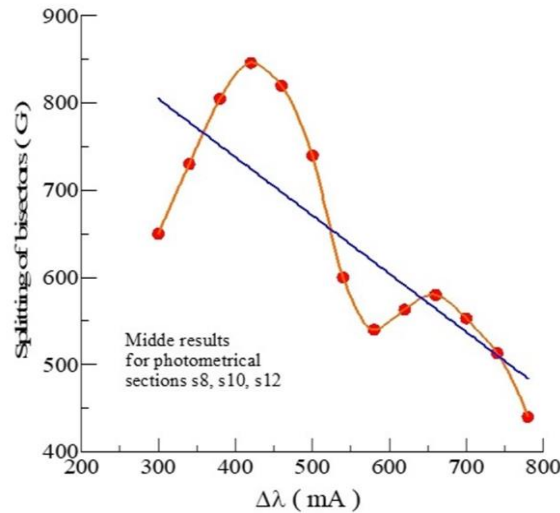


Рис. 4. Залежність виміряного розщеплення бісекторів від віддалі  $\Delta\lambda$  від середини лінії для фотометричних розрізів № 8 і 12, які відрізняються розташуванням у картинній площині на 4 Мм (див. текст)

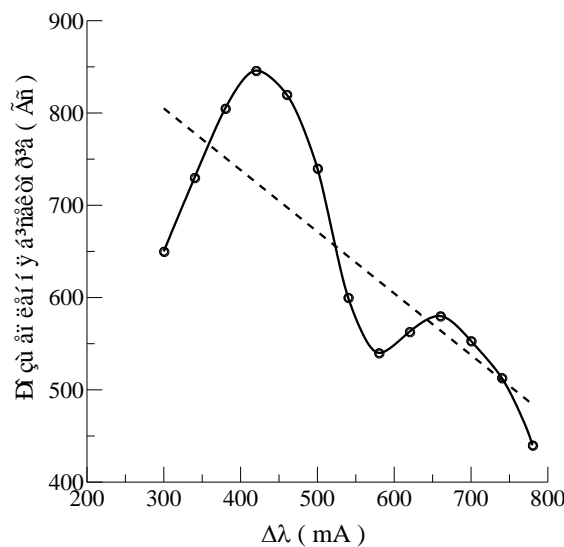


Рис. 5. Те саме, що й на рис. 4, але для усереднених спостережних даних по сусідніх розрізах № 8, 10 і 12

Ефект (б) допускає точніші оцінки магнітного поля в межах таких припущень. Локальні максимуми розщеплення бісекторів, імовірно, не тільки відображають двокомпонентну структуру магнітного поля, але і те, що напруженість магнітного поля у сильній компоненті є настільки великою, що спектрально реалізується режим сильного магнітного поля, коли для відповідних зееманівських сигма-компонент справджується така нерівність:  $\Delta\lambda_n \geq \Delta\lambda_{1/2}$ . Ще однією умовою тут є те, що відповідний фактор заповнення сильної компоненти є невеликим, тобто  $f \ll 1$ . Якщо ці припущення справедливі, то тоді положення максимуму на рис. 5 дає фактично положення зееманівських сигма-компонент, тобто тоді  $\Delta\lambda_{\max} \approx \Delta\lambda_n \approx 0.42 \text{ \AA}$ . Тоді, згідно з формулою (1), для такого значення  $\Delta\lambda_n$  маємо  $B \approx 20.8$  кГс. Однак враховуючи, що на рис. 4 положення цього максимуму дещо відрізняється у різних фотометричних розрізах, причому ця різниця може бути частково внаслідок указаних там похибок вимірювань, правомірніше вказати, що  $B \approx 20$  кГс.

Таким чином, отримані результати вказують на можливе існування у дослідженому сонячному спалаху дуже сильних магнітних полів рівня  $10^3 - 10^4$  Гс. Щодо порядку величини магнітного поля, то ці результати подібні до раніше отриманих у роботах [8,17,18], однак вони стосуються дуже високого рівня в атмосфері – близько 40 Мм. Як відомо авторам цієї статті, такий випадок відмічено вперше.

**Висновки.** Найбільш переконливим висновком представленого дослідження є те, що у лімбовому сонячному спалаху 12 липня 2012 р. бала M7.7 величина магнітного поля досягала приблизно 1 кГс на висоті 40 Мм над рівнем фотосфери. Знайдено свідчення того, що у цьому спалаху існували також значно сильніші магнітні поля, зосереджені у просторово нероздільних структурах із малим фактором заповнення. На це вказують характерні ознаки неоднорідності магнітного поля, зокрема і неодакнове за величиною розщеплення бісекторів профілів  $I \pm V$  лінії  $H_{\alpha}$  на різних віддалах від центра її емісії. У цілому розщеплення бісекторів зростає під час переходу від крил спектральної лінії до її ядра, причому величина цього розщеплення відповідає напруженостям у межах 400–1200 Гс. Однак на фоні вказаного тренда виявлено також локальний максимум розщеплення бісекторів на віддалі близько 420 мА, який може вказувати на локальні магнітні поля напруженістю приблизно 20 кГс. Такі магнітні поля можуть існувати у розрідженій сонячній короні лише за певної особливої структури магнітного поля, очевидно безсилового типу, що передбачає сильну скрученість силових ліній [10,11].

**Подяка.** Це дослідження профінансовано Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, держбюджетна тема № 22БФ023-03.

#### Список використаних джерел

1. Фриш И. Е. Оптические спектры атомов. – М.–Л.: Физматгиз, 1963. – 640 с.
2. Kirichek E. A., Solov'ev A. A., Lozitskaya N. I., Lozitskii V. G. Magnetic fields in a limb flare on July 19, 2012 // *Geomagn.and Aeronomy.* – 2013. – Vol. 53., No. 7. – P. 831–834.
3. Koval A. N. On magnetic field measurements in prominences and flares using photographic method // *Krymskaia Astrofizicheskaia Observatoriia, Izvestiia.* – 1977. –Vol. 5. – P. 133–143.
4. Kuridze D., Mathioudakis M., Morgan H., Oliver R. et al. Mapping the magnetic field of flare coronal loops // *The Astrophys. Journ.* – 2019. – Vol. 874., Iss.2, article id. 126, 12 pp.
5. Livingston, W., Harvey, J. W., Malanushenko O. V. Sunspots with the strongest magnetic fields // *Solar Phys.* – 2006. – Vol. 239. – P. 41–68.
6. Lozitsky V., Masliukh V., Botygina O. Estimations of local magnetic fields in prominences which have large optical thickness in emissive // *Bull. of Taras Shevchenko Nation.Univ. of Kyiv. Astronomy.* – 2015. – Vol. 52. – P. 7–11.
7. Lozitsky V. G. Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra // *Advances in Space Research.* – 2016. – Vol. 57. – P. 398–407.
8. Lozitsky V. G. Observations of magnetic fields with strength of several tesla in solar flares // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 1998. – V. 14., № 5. – P. 401–414.
9. Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of  $I \pm V$  profiles // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 55., Iss.3. – P. 958–967.
10. Parker E. N. Solar activity and classical physics // *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics.* – 2001. – Vol. 1., No. 2. – P. 99–124.
11. Schatzman E. Model of a force free field // *IAU Symp. No. 22 "Stellar and Solar Magnetic Fields".* – Amsterdam, 1965. – P. 337.
12. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I. et al. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler imager // *Solar Phys.* – 1995. – Vol. 162. – P. 129–188.
13. Solanki S. Sunspots: An overview // *The Astron. Astrophys. Rev.* – 2003. – Vol.11., No. 2–3. – P. 153–286.
14. Staude J. On the interpretation of some peculiarities observed in eeman-split line contours in sunspots // *Solar Phys.* – 1973. – Vol. 32., No 2. – P. 403–408.
15. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun // *Astronomy & Astrophysics.* – 2011. – Vol. 529., id.A42, 20 pp.
16. Tsuneta S., Ichimoto K., Tatsukawa Y. et al. The solar optical telescope for the Hinode mission: an overview // *Solar. Phys.* – 2008. – Vol. 249., № 2. – P. 167–196.
17. Yakovkin I. I., Lozitsky V. G. Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H $\alpha$  line // *Advances in Space Research.* – 2022. – Vol. 69., Iss. 12. – P. 4408–4418, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>
18. Yakovkin I. I., Veronig A. M., Lozitsky V. G. Magnetic field measurements in a limb solar flare by hydrogen, helium and ionized calcium lines // *Advances in Space Research.* – 2021. – Vol. 68., Iss. 3. – P. 1507–1518. DOI: [10.1016/j.asr.2021.03.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.03.036)

#### References

1. Frish S. E., 2010, Optical atom spectra. St.-Peterburg. Moscow. Krasnodar, 656 p.
2. Kirichek E. A., Solov'ev A. A., Lozitskaya N. I., Lozitskii V. G. Magnetic fields in a limb flare on July 19, 2012 // *Geomagn.and Aeronomy.* – 2013. – Vol. 53., No. 7. – P. 831–834.
3. Koval A. N. On magnetic field measurements in prominences and flares using photographic method // *Krymskaia Astrofizicheskaia Observatoriia, Izvestiia.* – 1977. –Vol. 5. – P. 133–143.
4. Kuridze D., Mathioudakis M., Morgan H., Oliver R. et al. Mapping the magnetic field of flare coronal loops // *The Astrophys. Journ.* – 2019. – Vol. 874., Iss.2, article id. 126, 12 pp.
5. Livingston, W., Harvey, J. W., Malanushenko O. V. Sunspots with the strongest magnetic fields // *Solar Phys.* – 2006. – Vol. 239. – P. 41–68.
6. Lozitsky V., Masliukh V., Botygina O. Estimations of local magnetic fields in prominences which have large optical thickness in emissive // *Bull. of Taras Shevchenko Nation.Univ. of Kyiv. Astronomy.* – 2015. – Vol. 52. – P. 7–11.
7. Lozitsky V. G. Indications of 8-kilogauss magnetic field existence in the sunspot umbra // *Advances in Space Research.* – 2016. – Vol. 57. – P. 398–407.
8. Lozitsky V. G. Observations of magnetic fields with strength of several tesla in solar flares // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* – 1998. – V. 14., № 5. – P. 401–414.
9. Lozitsky V. G. Small-scale magnetic field diagnostics in solar flares using bisectors of  $I \pm V$  profiles // *Advances in Space Research.* – 2015. – Vol. 55., Iss.3. – P. 958–967.
10. Parker E. N. Solar activity and classical physics // *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics.* – 2001. – Vol. 1., No. 2. – P. 99–124.
11. Schatzman E. Model of a force free field // *IAU Symp. No. 22 "Stellar and Solar Magnetic Fields".* – Amsterdam, 1965. – P. 337.
12. Scherrer P. H., Bogart R. S., Bush R. I. et al. The solar oscillations investigation – Michelson Doppler imager // *Solar Phys.* – 1995. – Vol. 162. – P. 129–188.
13. Solanki S. Sunspots: An overview // *The Astron. Astrophys. Rev.* – 2003. – Vol.11., No. 2–3. – P. 153–286.
14. Staude J. On the interpretation of some peculiarities observed in eeman-split line contours in sunspots // *Solar Phys.* – 1973. – Vol. 32., No 2. – P. 403–408.
15. Stenflo J. O. Collapsed, uncollapsed, and hidden magnetic flux on the quiet Sun // *Astronomy & Astrophysics.* – 2011. – Vol. 529., id.A42, 20 pp.
16. Tsuneta S., Ichimoto K., Tatsukawa Y. et al. The solar optical telescope for the Hinode mission: an overview // *Solar. Phys.* – 2008. – Vol. 249., № 2. – P. 167–196.
17. Yakovkin I. I., Lozitsky V. G. Signatures of superstrong magnetic fields in a limb solar flare from observations of the H $\alpha$  line // *Advances in Space Research.* – 2022. – Vol. 69., Iss. 12. – P. 4408–4418, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.012>
18. Yakovkin I. I., Veronig A. M., Lozitsky V. G. Magnetic field measurements in a limb solar flare by hydrogen, helium and ionized calcium lines // *Advances in Space Research.* – 2021. – Vol. 68., Iss. 3. – P. 1507–1518. DOI: [10.1016/j.asr.2021.03.036](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.03.036)

Надійшла до редколегії 27.11.22



M. Gromov, Student,  
I. Yakovkin, PhD Student,  
V. Lozitsky, Dr Hab.  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### MAGNETIC FIELD PECULIARITIES IN LIMB SOLAR FLARE OF 12 JULY 2012 ON HEIGHT ABOUT 40 MEGAMETERS

*We present results of magnetic field measurements in limb solar flare of 12 July 2012 of M7.7 class based on analysis of  $I \pm V$  profiles of  $H\alpha$  line. Our results relate to moment 06:45:50 UT when top of flare arcade reached  $\approx 40$  Mm according to observations of space observatory SDO. Observed  $H\alpha$  profiles have specific signs of magnetic field inhomogeneity, in particular, unequal splitting of bisectors of  $I \pm V$  profiles on various distances from their centers. In general, splitting of bisectors increases from line wings to its core, and value of this splitting corresponds to magnetic field in range 400–1200 G. In addition to this trend, local peak of bisector splitting was found on distance about 420 mÅ which may indicate local magnetic field with strength about 20 kG. As the authors know, observational indications of such very strong magnetic fields at a height of 40 mm have been detected for the first time. Obviously, such magnetic fields can exist in the rarefied solar corona only with a certain special structure of the magnetic field, obviously of the force-free type, which implies strong twisting of the lines of force.*

*Keywords: Sun, solar activity, limb solar flares, spectral analysis, Zeeman effect, magnetic fields, method of bisectors, super-strong magnetic fields.*

УДК 520.86

В. Клецонок, канд. фіз.-мат. наук  
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,  
 В. Карбовський, наук. співроб.  
 Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, Україна,  
 М. Буромський, провідний інженер  
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,  
 М. Лашко, наук. співроб., канд. пед. наук  
 Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, Україна,  
 В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук  
 Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## МОДЕРНІЗАЦІЯ АСТРОНОМІЧНОГО КОМПЛЕКСУ СПОСТЕРЕЖНОЇ СТАНЦІЇ ЛІСНИКИ

Спостережну станцію Лісники (міжнародний код 585) активно використовують для спостережень малих тіл та навчальної роботи. На станції працюють два телескопи АЗТ-8 ( $D = 700$  мм,  $\Phi = 2830$  мм,  $D/\Phi = 1:4$ ) і АЗТ-14 ( $D = 480$  мм,  $\Phi = 7715$  мм,  $D/\Phi = 1:16$ ). Вони мають застарілу конструкцію і потребують модернізації для відповідності сучасним вимогам спостережної астрономії. Світова практика модернізації оптичних телескопів зводиться, зазвичай, до встановлення нових сучасних приймачів світла, зміни оптичної системи, покращення оптичних характеристик шляхом алюмініювання дзеркал. В оптичному діапазоні нині широко використовують ПЗЗ- та КМОН-матриці з покращеними характеристиками, застосування яких дозволяє значно збільшувати проникну здатність і часову, і просторову роздільні здатності телескопів. Сучасні приймачі світла обладнані автоматичними блоками фільтрів із різноманітними наборами астрономічних фільтрів. Для різних задач спостережної астрономії застосовують різні комплекти приймачів світла. З урахуванням цих сучасних вимог розроблено концепцію модернізації спостережного комплексу на базі телескопів АЗТ-14 та АЗТ-8.

2022 р. на телескопі АЗТ-8 в основному фокусі встановлено нову КМОН камеру Moravian C4-16000EC з блоком світлофільтрів UBVRi фотометричної системи Джонсона – Козінса. У такому варіанті телескоп використовують для моніторингу малих тіл і пошуку нових комет та астероїдів, фотометричних і позиційних спостережень комет, спостережень активних ядер галактик. З метою збільшення поля зору на ПЗЗ-матриці, зменшення розмірів зображень зіроч і збільшення світлосили телескопа АЗТ-14, розроблено та виготовлено оптичний редуктор (у 4.5 рази зменшує фокусну відстань) з блоком ширококутових BVRI-світлофільтрів. Для спостережень комет у вузькосмугових областях спектра розроблено і виготовлено блок із 8 кометних світлофільтрів, який використовують із ПЗЗ-камерою Ardee Alta U47. Для керування блоком розроблено і виготовлено систему електронного керування, яка включає такі основні електронні вузли: плата датчиків положення світлофільтрів, електронна плата, генератор стабільної частоти, драйвер крокового двигуна, контролер для керування всіма електронними вузлами та для зв'язку з персональним комп'ютером.

**Ключові слова:** телескопи, ПЗЗ-камери, модернізація.

**Вступ.** Головним питанням на сучасному етапі розвитку астрономічних досліджень є задача нагальної необхідності технічного переоснащення і модернізації існуючих телескопів для розв'язання наукових і навчально-прикладних задач. Світова практика модернізації оптичних телескопів зводиться, зазвичай, до встановлення нових сучасних приймачів світла, зміни оптичної системи, покращення оптичних характеристик шляхом алюмініювання дзеркал та інтегрованого програмного забезпечення.

Спостережну станцію Лісники (міжнародний код 585) активно використовують для спостережень малих тіл і для навчальної роботи. На станції працюють два телескопи АЗТ-8 ( $D=700$  мм,  $\Phi=2820$  мм,  $D/\Phi=1:4$ ) і АЗТ-14 ( $D=480$  мм,  $\Phi=7715$  мм,  $D/\Phi=1:16$ ). Вони мають застарілу конструкцію і потребують модернізації згідно із сучасними вимогами спостережної астрономії.

Багато телескопів у процесі модернізації оснащують сучасними приймачами – ПЗЗ-камерами, оптичними коректорами та високоточними системами наведення й гідуювання [4]. Існують цілі комплекси з різних телескопів, об'єднані кабельними мережами. Управління комплексом здійснюють зі спеціального центру, що міститься в окремому приміщенні й обладнаний необхідними засобами керування [3]. З урахуванням цих сучасних вимог розроблено концепцію модернізації телескопів АЗТ-14 та АЗТ-8.

**Телескоп АЗТ-14.** АЗТ-14 – рефлектор системи Кассегрена. Діаметр головного дзеркала 480 мм, фокусна відстань 2160 мм, діаметр гіперболічного дзеркала 133 мм, еквівалентний фокус системи 7715 мм, світлосила 1:16. З метою зменшення еквівалентного фокуса телескопа та збільшення поля зору на ПЗЗ-матриці розроблено та виготовлено оптичний редуктор із блоком BVRI-світлофільтрів. Оптико-механічну блок-схему і зовнішній вигляд оптичного редуктора [2] разом із ПЗЗ-камерою Ardee Alta U47 показано на рис. 1. Ця камера може працювати в режимі "drift scan mode", що дозволяє її використовувати для покриттів зір і спостережень космічних апаратів [5].

Установлена близько еквівалентного фокуса системи Кассегрена лінза поля  $K$  (колектив) зменшує розбіжність польових пучків, але не змінює їхню апертуру. Колектив дозволяє істотно зменшити діаметр лінз оптичного редуктора  $R$ . Діаметр колективу  $K$  визначає лінійний поперечник поля зору. Він є ахроматом, склеєним із двох лінз діаметром 70 мм, і має фокусну відстань 242 мм. У фокальній площині його встановлено оптичний редуктор  $R$ , який є використаний дороблений об'єктив Carl Zeiss Sonnar. Зміни в конструкції об'єктива описано в авторському свідоцтві № 80430 [2]. Його фокусна відстань: 52,5 мм, відносний отвір: 1:1,5. Він зменшує еквівалентну фокусну відстань телескопа в 4.5 рази, тим самим значно збільшуючи його світлосилу. Для цього оптичного редуктора розроблений блок ширококутових BVRI-світлофільтрів. Установлюється він перед колективом  $K$ . BVRI-світлофільтри – це скляні світлофільтри зі вхідним діаметром 78 мм: Криві пропускання  $B$  і  $V$  світлофільтрів для реалізації фотометричної системи Джонсона (Johnson), а  $R$  і  $I$  відповідно  $R'$  і  $I'$  фотометричної системи Козінса (Cousins) (рис. 2). Положення бло-

© Клецонок В., Карбовський В., Буромський М., Лашко М., Єфіменко В., 2022

ка BVRI-світлофільтрів і колективу *K* відносно фокальної площини телескопа розраховано таким чином, щоб цими оптичними елементами вносились мінімальні спотворення у світловий пучок.

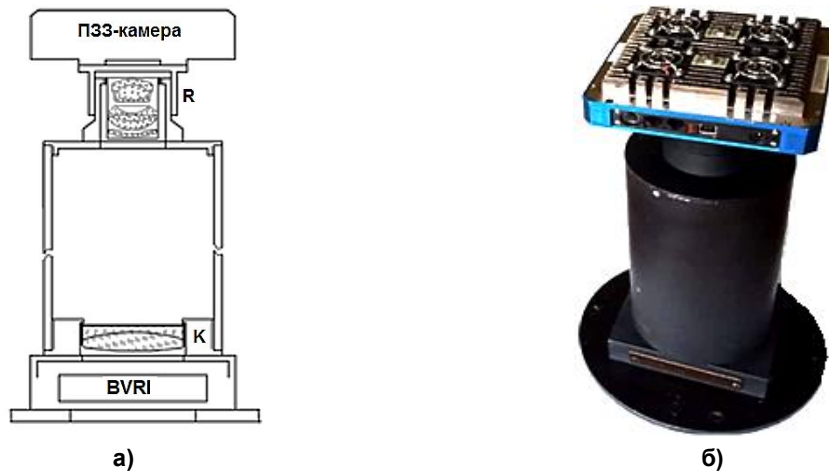


Рис. 1. Оптичний редуктор для телескопа АЗТ-14: а) оптико-механічна блок-схема; б) зовнішній вигляд із ПЗЗ-камерою Aropgee Alta U47

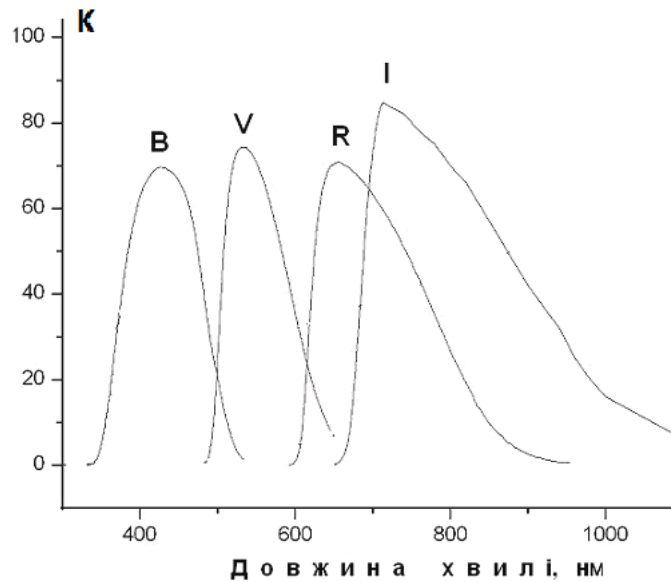


Рис. 2. Спектральні криві пропускання BVRI-світлофільтрів, у відсотках

Для спостережень комет у вузьких ділянках спектра розроблено і виготовлено блок кометних світлофільтрів, який використовують із ПЗЗ-камерою Aropgee Alta U47 (рис. 3).

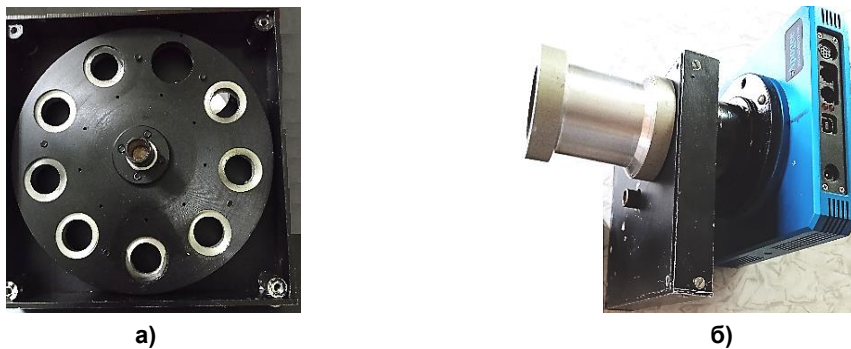


Рис. 3. Блок кометних світлофільтрів: а) внутрішній вигляд; б) з ПЗЗ-камерою Aropgee Alta U47

На турельному диску містяться 8 посадочних місць під інтерференційні кометні світлофільтри діаметром 25 мм і завтовшки 7 мм та один вільний наскрізний отвір. У табл. 1 наведено характеристики кометних світлофільтрів, що використовуються у блоці. Кожен світлофільтр на диску має датчик положення. Диск приводиться в рух кроковим приводом. Вибір потрібного світлофільтра здійснюється програмою з персонального комп'ютера.

Таблиця 1

Характеристики кометних фільтрів

Кометний світлофільтр	Еквівалентна довжина хвиль / Смуга пропускання, А°
CN	3670/62
C3	4062/62
CO+	4266/64
BLUE CONT.	4450/67
C2	5141/118
GREEN CONT.	5260/56
H <sub>2</sub> O	7020/170
RED CONT.	7128/58

Для керування кроковим двигуном розроблено схему електронного блока. Він містить такі основні електронні вузли: плата датчиків положення світлофільтрів, електронна плата, генератор стабільної частоти, драйвер крокового двигуна, контролер для керування всіма електронними вузлами та для зв'язку з персональним комп'ютером, система живлення (рис. 4).

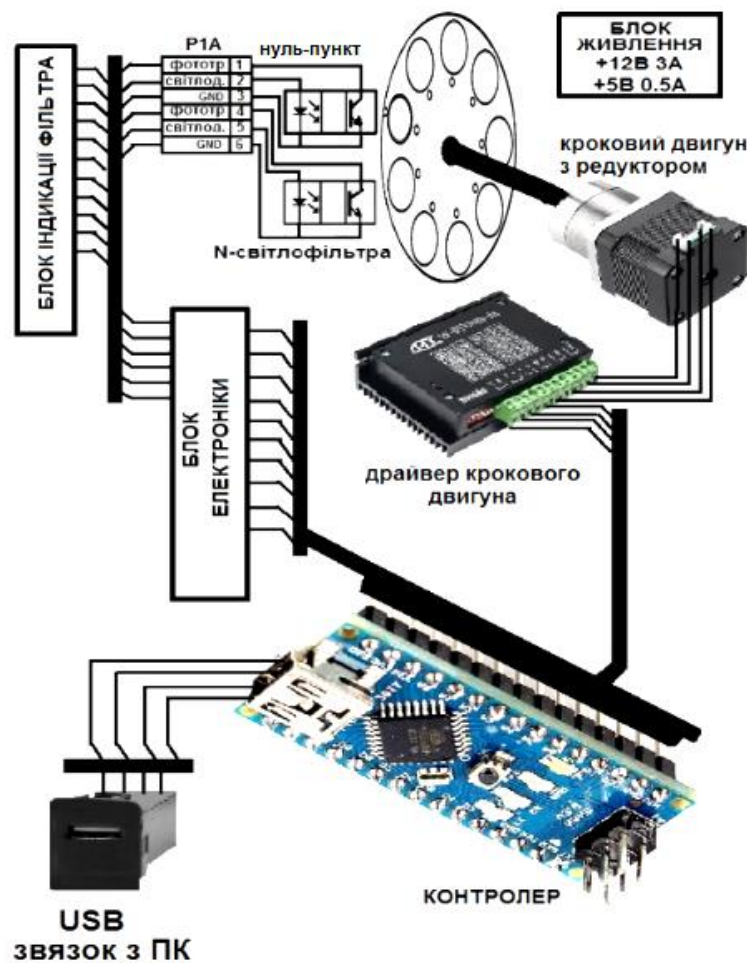


Рис. 4. Структурна схема блока керування кроковим двигуном

З метою проведення спостережень із ПЗЗ-камерою в головному фокусі дзеркала телескопа АЗТ-14, розроблено й виготовлено вузол її кріплення у прямому фокусі (рис. 5). Як приймач зображення використовується ПЗЗ-камера Atik Infinity ATK0144: Sensor – Sony ICX825, кількість пікселів 1392 × 1040, розмір пікселя 6.45 мікрон, розрядність

АЦП – 16 bit. Ця швидкісна камера має пасивне охолодження і використовуватиметься з короткими експозиціями для спостереження покриттів.

Лазерним коліматором здійснено юстування ПЗЗ-камери відносно оптичної осі телескопа. Методика юстування стандартна (рис. 6). Вхідне вікно камери закривалося півсферичною затемненою лінзою. У центрі отвору головного дзеркала телескопа кріпився лазерний коліматор. Відбитий промінь лазерного світлодіода (лс) від напівпрозорого дзеркала (нпдз) суміщався із центром відбитого зображення кілець Ньютона від півсферичної затемненої лінзи. Суміщення проводилось переміщенням вузла кріплення камери у двох напрямках, перпендикулярних до оптичної осі головного дзеркала та корекції нахилу ПЗЗ-камери у вузлі її кріплення для отримання концентричного зображення кілець Ньютона.



Рис. 5. ПЗЗ-камера Atik Infinity в первинному фокусі телескопа АЗТ-14

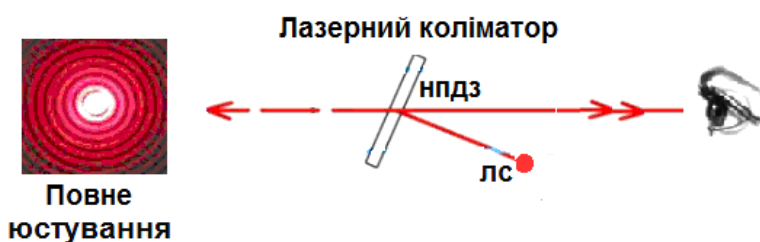


Рис. 6. Юстування ПЗЗ-камери лазерним коліматором

Проведено декілька сеансів тестових спостережень із метою визначення основних параметрів астрономічного спостережного комплексу. Після оброблення кадрів отримано такі результати: поле зору з даною ПЗЗ-камерою – 14.2' × 10.6' (кутових мінут). Якість зображення відповідає розміру зображення зорі 1.8"–2.2". Масштаб зображення – 0.613 "/піксель. За 10 с експозиції в R-світлофільтрі отримано зорі з граничною зоряною величиною 17.3 mag. На рис. 7 показано виділену зорю з каталогу Gaia EDR3 4302812350147523328 із зоряною величиною Gmag 17.316.

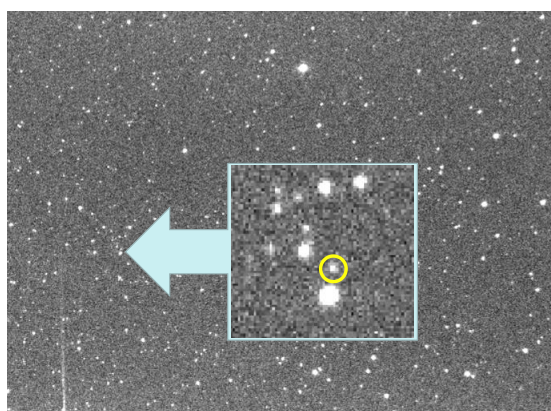


Рис. 7. Зоря EDR3 4302812350147523328 Gmag 17.316

**Телескоп АЗТ-8.** АЗТ-8 – рефлектор системи Кассегрена. Діаметр головного дзеркала 700 мм, фокусна відстань 2820 мм. У 2022 р. на телескопі в головному фокусі встановлено нову КМОН-камеру Moravian C4-16000EC із блоком UBVR1-світлофільтрів фотометричної системи Джонсона – Козінса (рис. 8).



Рис. 8. КМОН-камера Moravian C4-16000EC із блоком світлофільтрів у первинному фокусі телескопа АЗТ-8

Характеристики камери Moravian C4-16000EC наведено в табл. 2. Спектральні характеристики UBVRІ-світлофільтрів зображено на рис. 9.

Для реалізації швидкісних можливостей КМОН-камери Moravian C4-16000EC для спостережень швидкоплинних космічних явищ використовують мікрокомп'ютер Vinga Mini PCV500. Мікрокомп'ютер кріплять безпосередньо на трубі телескопа завдяки його невеликому розміру (140 × 140 мм). До його порту USB3 під'єднано камеру, а через порт RJ45 здійснюється керування ним із головного комп'ютера, на якому зберігаються всі отримані кадри.

Таблиця 2

Технічні характеристики камери Moravian C4-16000EC

Параметр	Значення
Тип	Front Illuminated
Тип сенсора	Full Frame
Модель сенсора	Gsense 4040 CMT
Квантова ефективність	>50 % at 550 nm
Розмір пікселів у мікронах	9 μm × 9 μm
Масив пікселів	4096 × 4096
Діагональ сенсора	52.1 mm
Тип затвора	Mechanical
Шум зчитування	3.9 e- RMS
Інтерфейс	USB 3.0
Охолодження	35 °C below ambient

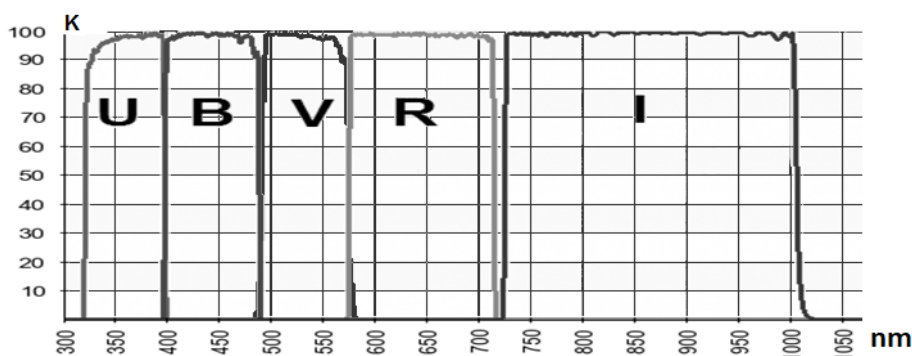


Рис. 9. Спектральні криві пропускання світлофільтрів для камери Moravian C4-16000EC (взято з документації на світлофільтри)

Проведено декілька сеансів тестових спостережень із метою визначення основних параметрів астрономічного спостережного комплексу й уточнення методики спостережень. Для цього виконано спостереження комети C/2017 K2 (PanSTARRS) і ділянки неба навколо неї в UBVRІ-світлофільтрах (рис. 10). Після оброблення кадрів

отримано такі результати: поле зору із цієї камерою –  $45 \times 45$  кутових мінут. За 30 с експозиції в R-світлофільтрі отримано зорі з граничною зоряною величиною 19.3 mag.

Аналіз профілів зображень зірок показав, що вони мають симетричну форму й апроксимуються гаусовим круговим розподілом із шириною піка на половині його висоти (FWHM) близько 2.9–3.4 пікселів або  $3,6''$ – $4,0''$  (рис. 11).

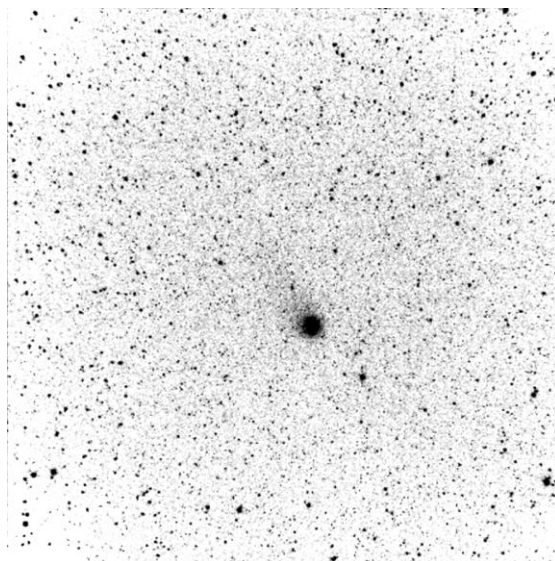


Рис. 10. Тестові спостереження комети C/2017 K2 з камерою Moravian C4-16000EC, які отримані на телескопі АЗТ-8

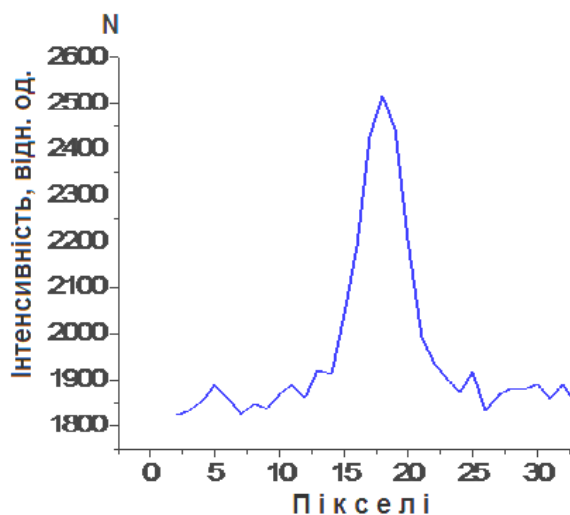


Рис. 11. Профіль зображення зірки

**Висновки.** У ході першого етапу модернізації астрономічного комплексу спостережної станції Лісники здійснено заміну світлоприймальної апаратури телескопів АЗТ-14 і АЗТ-8. Нові приймачі дозволяють працювати й отримувати результати згідно із сучасними вимогами до телескопів подібного діаметра. Світлоприймальна апаратура телескопа АЗТ-14 дозволяє виконувати спостереження малих тіл зі стандартними BVRI-фільтрами та комет із набором інтерференційних фільтрів, а також швидкісну фотометрію з високою чутливістю. Нова КМОН-камера Moravian C4-16000EC з автоматичним блоком підвищує ефективність використання АЗТ-8 за рахунок збільшення поля зору та швидкісного зчитування кадру. Модернізація дозволила продовжити моніторингові спостереження малих тіл Сонячної системи для отримання фотометричних і позиційних даних для комет і астероїдів на телескопах АЗТ-8 і АЗТ-14 [1].

#### Список використаних джерел

1. Клецюнок В. В., Карбовський В. І., Буромський М. І., Лашко М. В., Горбаньов Ю. М., Кашуба В. І., Кімаковський С. Р., Шавловський В. І., Ангельський О. В., Цехмейстренко В. С., Мишевський М. М., Ревун А. В. Покриття зір малими планетами Сонячної Системи: стан спостережних програм в Україні. – Космічна наука і технологія. – № 5, 2022. – С. 56–66.
2. Карбовський В. Л., Клецюнок В. В., Буромський М. І. "Перетворювач фокусної відстані телескопа з блоком BVRI-світлофільтрів". Авторське Свідоцтво № 80430 від 23.07.2018. Авторське право і суміжні права. – № 50. – С. 182.
3. Сергєєв А. В., Бурхонов О. А., Дудінов В. М., Железняк А. П., Круглий Ю. М., Молотов І. С., Шульга В. М., Егамбердієв Ш. А, Конічек В. В., Кочетов О. В. Модернізація телескопа АЗТ-22 Майданацької високогірної обсерваторії: результати тестування. Радиофизика и радионастроения. – 2014, Т. 19, № 1. – С. 20–25.

4. Kovalchuk A., Kozirev E., Shulga A. Восстановление и модернизация телескопа АЗТ8. Abstract Book of "Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System", Nikolaev, September 25–28 2006. – Nikolaev : Atoll, 2006. – P. 61.

5. Kovalchuk A., Mazhaev A., Shulga A. The distributed software system for observation at the robotic telescopes. Abstract Book of "Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System", Nikolaev, September 25–28 2006. – Nikolaev : Atoll, 2006. – P. 62.

#### References

1. Kleshchonok V.V., Karbovsky V.I., Buromsky M.I., Lashko M.V., Gorbanev Yu.M., Kashuba V.I., Kimakovskiy S.R., Shavlovskiy V.I., Angelskiy O.V., Tsekhnmeistrenko V.S., Myshevskiy N.N., Revun A.V. Star occultation by small bodies of the Solar system: current state of observations in Ukraine // Space Sci. & Technol. – № 5, 2022. – P. 56–66.

2. Karbovsky V.I., Kleshchonok V.V., Buromsky M.I. Peretvoriuvach fokusnoi vidstani teleskopa z blokom BVRI-svitlofiltriv". Avtorske Svidotstvo № 80430 vid 23.07.2018. Avtorske pravo i sumizhni prava. – № 50. – P. 182.

3. Sergeev A.V., Burkhonov O.A., Dudinov V.N., Zheleznyak A.P., Krugly Y.N., Molotov I.E., Shulga V.M., Ehgamberdiev S.A., Konichek V.V., Kochetov A.E. Modernization of AZT-22 Telescope of Maidanak High-Altitude Observatory: Testing Results // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2014, V. 19, № 1. – P. 20–25.

4. Kovalchuk A., Kozirev E., Shulga A. Восстановление и модернизация телескопа АЗТ8. Abstract Book of "Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System", Nikolaev, September 25–28 2006. – Nikolaev : Atoll, 2006. – P. 61.

5. Kovalchuk A., Mazhaev A., Shulga A. The distributed software system for observation at the robotic telescopes. Abstract Book of "Enlargement of Collaboration in Ground-Based Astronomical Research in SEE Countries. Studies of the Near-Earth and Small Bodies of the Solar System", Nikolaev, September 25–28 2006. – Nikolaev : Atoll, 2006. – P. 62.

Надійшла до редколегії 28.11.22

V. Kleshchonok, PhD

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

V. Karbovsky, Researcher

Main astronomical observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

M. Buromsky, engineer

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

M. Lashko, Researcher, PhD

Main astronomical observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

V. Efimenko, PhD

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### MODERNIZATION OF ASTRONOMICAL COMPLEX OF OBSERVATIONAL STATION LISNYKY

*The Lisnyky observation station (international code 585) is actively used for observations of small bodies and for educational purpose. The station operates two telescopes AZT-8 ( $D=700$  mm,  $F=2830$  mm,  $D/F=1:4$ ) and AZT-14 ( $D=480$  mm,  $F=7715$  mm,  $D/F=1:16$ ). They have an outdated design and need to be modernized to meet the modern requirements of observational astronomy. The world practice of modernizing optical telescopes is reduced, as a rule, to installing new modern light receivers, changing the optical system, improving optical characteristics by aluminizing mirrors. Light receivers are now CCD image sensors, the use of which allows you to significantly increase the penetrating power (to observe fainter objects) and the temporal and spatial resolution of telescopes. Modern light receivers are equipped with automatic filter units with various sets of astronomical filters. Different sets of light receivers are used for different tasks of observational astronomy. The concept of modernization of the observation complex based on the AZT-14 and AZT-8 telescopes was developed according to these modern requirements.*

*A new Moravian C4-16000ES CMOS camera ( $4096 \times 4096$  pixels,  $9 \times 9 \mu\text{m}$ ) with a UBVR light filter unit of the Johnson-Cousins photometric system was installed at the main focus of the AZT-8 telescope in 2021. In this version, the telescope is used to monitor small bodies and search for new comets and asteroids, photometric and positional observations of comets, observations of active galactic nuclei.*

*An optical reducer (4.5 times reduction focal length) with a block of broadband light filters BVRI light filters was developed and manufactured for the AZT-14 telescope in order to increase the field of view on the CCD array, reduce the size of star images and increase the light power of the telescope. A new block of 8 comet narrowband filters, which is used with the Apogee Alta U47 CCD camera, was designed and manufactured for observations of comets. An electronic control system, which includes the following main electronic components: a light filter position sensor board, an electronic board, a stable frequency generator, a stepper motor driver, a controller for controlling all electronic components and for communication with a personal computer, was developed and manufactured for control the unit.*

**Keywords:** telescopes, CCD, modernization.



В. Єфіменко, канд. фіз.-мат. наук  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА У 2022 році

В Астрономічній обсерваторії 2022 р. працювали 72 працівники, з яких 51 – штатні і 21 – сумісники. Із 40 науковців – 11 докторів наук і 15 кандидатів наук, серед них – 20 штатних і 20 сумісників. Упродовж року виконувались 5 бюджетних тем.

Отримано такі основні наукові результати. Проаналізовано дані спостережень залишку наднової Тихо Браге (SN 1572), які отримано космічною рентгенівською обсерваторією Chandra. За даними спостережень створено карту залишку для різних діапазонів енергій фотонів, зокрема для теплового континууму (4.1–6.0 кеВ) і ліній Si (1.6–2.1 кеВ) та S (2.3–2.6 кеВ). Розпочато модернізацію спостережної бази у с. Лісники: придбано нову ПЗЗ-камеру Moravian C4-16000 із блоком світлофільтрів і фільтрами UVRI фотометричної системи Джонсона – Кузінса для телескопа АЗТ-8; розроблено та виготовлено оптичний редуктор, блок вузькосмугових фільтрів і конструкторську документацію на блок широко-смугових фільтрів для телескопа АЗТ-14; на основі придбаних телескопа Celestron Advanced VX 11 із системою GOTO та ПЗЗ-камер серії Atik Infinity ATK0144 створено мобільний комплекс для спостережень явищ покриття зір астероїдами.

За результатами досліджень опубліковано три монографії, навчальний посібник, 74 наукові статті, зроблено 47 доповідей на наукових конференціях.

**Ключові слова:** відділ астрофізики, сектор астрометрії і малих тіл Сонячної системи, національне надбання, міжнародна наукова конференція.

Інформацію про роботу Астрономічної обсерваторії у 2021 р. подано у Віснику Київського університету [1]. Тут висвітлено результати наукових досліджень і найважливіші події у житті обсерваторії за 2022 р.

**Структура та склад.** 2022 р. в Астрономічній обсерваторії працювали 72 працівники (стан на грудень 2022 р.), з яких 51 – штатні і 21 – сумісники. Із 40 науковців – 11 докторів наук і 15 кандидатів наук, серед них – 20 штатних і 20 сумісників, обслуговуючий персонал – 32 працівники. Закінчили навчання в аспірантурі О. С. Сташко (наук. керівник В. І. Жданов) і В. В. Войцехівський (наук. керівник Б. І. Гнатик).

Упродовж року змін у структурі обсерваторії не було: до її складу входили відділ астрофізики (зав. відділу д-р фіз.-мат. наук, проф. В. І. Жданов), сектор астрометрії та малих тіл Сонячної системи (зав. сектору канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. І. В. Лук'яник) та дві спостережні станції (с. Лісники Києво-Святошинського р-ну і с. Пилиповичі Бородянского р-ну Київської обл.).

2022 р. померли колишні працівники Астрономічної обсерваторії канд. фіз.-мат. наук Віктор Гнатович Іванчук (16.05.1930–18.05.2022), канд. фіз.-мат. наук Віра Петрівна Таращук (24.12.1936–7.11.2022), яка 2002 р. перейшла на роботу у Кримську астрофізичну обсерваторію.

Обсяг бюджетного фінансування у 2022 р. становив 5785,17 тис. грн.

Співробітниками обсерваторії 2022 р. опубліковано три монографії, навчальний посібник, 74 наукові статті, з них 31 у зарубіжних виданнях, проведено міжнародну конференцію "Астрономія і фізика космосу в Київському університеті", 18–21 жовтня 2022 р.; зроблено 47 доповідей на наукових конференціях. Упродовж 2022 р. отримано патент, подано дві заявки, результати досліджень упроваджено в навчальний процес. Співробітники обсерваторії В. І. Жданов і Ю. І. Штанов отримали премію імені Г. Гамова НАН України.

**Тематика наукових досліджень.** Упродовж року виконувались п'ять бюджетних тем: "Релятивістська гравітація, темна матерія і темна енергія в позагалактичних і космологічних об'єктах", наук. керівник С. Л. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, проф. (об'єм фінансування 1027,0 тис. грн); "Діагностика пилу в активних малих тілах Сонячної системи та навколосемному космічному просторі", наук. керівник В. К. Розенбуш, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (об'єм фінансування 1027,07 тис. грн); "Активні процеси на Сонці, магнітні поля і їхній вплив на зміни клімату", наук. керівник В. Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (об'єм фінансування 1025,7 тис. грн); "Багатоканальні дослідження процесів генерування космічних променів і нетеплового випромінювання в релятивістських струменях астрофізичних об'єктів", наук. керівник В. О. Данилевський, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (об'єм фінансування 1024,4 тис. грн); "Мультихвильові дослідження космічних джерел гамма-випромінювання в межах проєкту Cherenkov Telescope Array (СТА)", наук. керівник В. О. Пономаренко, канд. фіз.-мат. наук (об'єм фінансування 901,0 тис. грн).

Співробітники обсерваторії брали участь у виконанні розділу теми № 21БНН-06 "Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку "Математичні науки та природничі науки"", наук. керівник проф. М. В. Макарець, відповідальний виконавець розділу І. В. Лук'яник (480,0 тис. грн), а також виконано роботи з утримання, збереження й розвитку об'єкта національного надбання Горизонтальний сонячний телескоп Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, В. М. Єфіменко (300,0 тис. грн).

**Результати наукових досліджень.**

**Астрофізика.** Розглянуто космологічні й астрофізичні прояви F(R)-гравітації як інфляційної теорії і як кандидата у темну матерію. З'ясовано початкові умови для еволюції скалярна F(R)-гравітації у постінфляційному Всесвіті й обчислено спектр нейтрино, що випромінювалися впродовж космологічної еволюції (Ю. Штанов).

На прикладі метрики Фішера показано, що пряма взаємодія між частинками та скалярним полем може істотно ускладнити топологію розподілів стійких колових орбіт і появи незв'язних областей цих орбіт (В. Жданов, О. Сташко).

Уперше проведено 2.5D магнітогідродинамічне моделювання еволюції навколосзоряних бульбашок гарячої плазми, породжуваних вітрами зір Вольфа – Райє та, на їхній основі, досліджено вплив магнітного поля та неоднорідностей навколо зоряного середовища на структуру вітрових бульбашок, яка матиме вирішальний вплив на еволюцію та форму залишка наднової після спалаху наднової під час колапсу ядра зорі Вольфа – Райє. Уперше відтворено карти розподілу магнітного поля в залишку наднової Тихо Браге, на основі карт нетеплового радіо- та теплового рентгенівського випромінювання. Показано, що морфологія залишків наднових може бути суттєво несферичною зокрема і бочкоподібною (О. Петрук, В. Бешлей).

Отримано обмеження на параметри альтернативних гравітаційних теорій за даними космологічних спостережень. Розраховано ефекти несиметричності джерела випромінювання у процесі мікролінзування у кривих блиску. Оцінено параметри змінності кривих блиску, необхідні для визначення часу затримки між рентгенівськими зображеннями в системі Q2237+0305. Проведено пошук локальних компактних галактик з активним зореутворенням, у яких виявлено випромінювання теплового пилю за даними космічної місії WISE, на цій основі створено список таких галактик. Розроблено нову альтернативну космологічну модель у межах  $F(R)$ -гравітації. Розглянуто поведінку простору-часу біля космологічної сингулярності в однорідній недіагональній моделі типу IX за Біанкі (С. Парновський, В. Жданов, О. Сергієнко, І. Ізотова).

Розроблено нестационарні моделі дискової акреції навколоядерної речовини на надмасивні чорні діри в активних ядрах галактик і пояснено закономірності проявів транзйентної активності в системі диск–корона–джет у різних діапазонах спектра електромагнітного випромінювання. Уперше виконано моделювання рентгенівських спектрів активного ядра галактики 3C120 у м'якому та жорсткому діапазонах для оцінювання внесків у загальний потік випромінювання нетеплового випромінювання релятивістського джета та теплового випромінювання навколоядерної системи диск–корона.

Уперше проведено моделювання взаємодії трьох компонентів наколюядерної області активних ядер: акреційний диск–корона над диском–релятивістський джет на основі виділення окремих вкладів у випромінювання – від релятивістського джета (нетеплове випромінювання – синхротронне й обернене комптонівське) та від диску і корони (теплове й комптонізоване теплове), що дозволяє описати взаємозалежність кривих блиску АЯГ у радіо-, оптичному, X- та гамма-діапазонах і, тим самим, передбачити гамма-спалахи ядра за характерними змінами в низькоенергетичних діапазонах.

Розроблено нову модель прискорення лептонних космічних променів у релятивістських струменях, генерованих ядрами активних галактик, і новонародженими мілісекундними магнетарами в космологічних гамма-спалахах, яка вперше дозволяє розрахувати енергетичні спектри та максимальні енергії прискорених космічних променів – електронів і позитронів у релятивістській плазмі із системою двох релятивістських ударних хвиль – головної та зворотної, які виникають під час взаємодії електрон-позитронних джетів із навколорядним чи міжзоряним середовищем.

Отримані результати мають суттєве значення для вітчизняної та світової науки, оскільки належать до переднього краю експериментальних досліджень фізики фундаментальних взаємодій. Виконання проєкту є внеском Української сторони у проривний міжнародний інфраструктурний проєкт світового рівня СТА з побудови й експлуатації гамма-обсерваторії нового покоління з параметрами, на порядок кращими за наявні аналоги (<https://www.cta-observatory.org/>). Україна є повноправним учасником проєкту СТА з 2015 р. Сім із восьми учасників СТА з Української сторони мають афіліацію КНУ, троє з них – автори та виконавці цього проєкту. Отримані у процесі виконання проєкту результати відповідають ключовій програмі СТА "Активні ядра галактик" і будуть реалізовані в майбутній програмі спостережень масивом гамма-телескопів СТА із чутливостями й енергетичними і кутівими розділеннями, що значно перевершують існуючі зараз детектори.

Розраховано характеристики ГВДВЕ в релаксованих і нерелаксованих скупченнях галактик. Розраховано потік і спектр ГВДВЕ від Надскупчення Шеплі з урахуванням внеску окремих наймасивніших скупчень Ейбела. Визначено орієнтації магнітного поля, його градієнта та градієнта густини середовища на основі спостережень об'єкта в радіо і рентгенівському діапазонах. Проведено розрахунки й отримано симульовані криві блиску АЯГ у тьмовому та мультитьмовому діапазонах енергій у СТАО-спостереженнях для різних механізмів спалахів (Б. І. Гнатик, Р. Б. Гнатик, В. І. Жданов).

Оброблено фотометричні спостереження АЯГ Mrk 501 в оптичному діапазоні, виявлено зміни блиску у фільтрах BVRI, проаналізовано механізми коливачь блиску й показники кольору цього активного ядра галактики (В. Пономаренко).

**Астрометрія та малі тіла сонячної системи.** Установлено нову ПЗЗ-камеру Moravian C4-16000E з блоком фільтрів UBVRi на телескопі АЗТ-8 (Лісники) та виготовлено вузол для її фокусування і кріплення в первинному фокусі. Проведено юстування і пробні спостереження для визначення фотометричної системи нової камери. Виявлено недоліки (кома) зображень, проводиться робота над їхнім усуненням.

На телескопах АО КНУ (Лісники) спостерігали 23 комети (850 положень) і 19 астероїдів (492 положення). Отримані положення надруковано в Minor Planet Center Circulars і у базі даних British Astronomical Association (журнал "The Astronomer"). Фотометричні та спектральні спостереження вибраних комет і астероїдів проведено на 1.3-метрових (Skalnate Pleso, Словаччина) і 2.5-метрових (La Palma, Іспанія) телескопах. Поляриметрію супутників Юпітера і Сатурна виконано на 2.6-метровому (КрАО) і 2-метровому (Терскол) телескопах. Проведено спостереження покриття зір однією кометою та 9 астероїдами.

Спільно з командою W. Sparks (Space Telescope Science Institute, USA) у вересні–жовтні 2022 р. на 2.6-метровому (КрАО) і 2-метровому (Терскол) телескопах проведено синхронні з космічним телескопом Габбла поляриметричні спостереження супутника Юпітера Європи з метою виявлення місць витоку підповерхневого океану на поверхню для їхнього дослідження космічною місією Europa Clipper (В. Розенбуш).

На основі наявних та проведених в 2022 р. спостереженнях та чисельного моделювання отримано наступні результати:

Побудовано карти просторового розподілу інтенсивності і/чи кольору та поляризації по комах комет 29P/Schwassmann–Wachmann 1, C/2013 X1 (PANSTARRS), C/2014 B1 (Schwartz) і активного астероїда (248370) 2005 QN173 (О. Іванова, І. Лук'яник).

За результатами моніторингових спостережень в 2012–2019 рр. комети-кентавра 29P на телескопі АЗТ-8 спостережної станції в с. Лісники встановлено, що, зважаючи на швидкості продукування пилю (в сенсі  $A_{fr}$ ) і з урахуванням динамічних властивостей, комета належить до класу кентаврів, має період обертання  $57 \pm 2$  дні і 4 активні області, розміщені біля екватора ядра (В. Клещюнок, О. Іванова, І. Лук'яник).

На основі аналізу варіацій кольору об'єкта 29P протягом серпня–жовтня 2018 р. і під час спалахової активності в жовтні 2018 р. встановлено, що величина градієнта відбивної здатності пилу змінилася від 19.72 % у серпні до – 6.88 % у жовтні; червоний колір комета має у разі домінування пилу, який містить Fe-Mg силікати й органіку, а синій колір – коли присутній водяний лід чи збагачені магнієм силікати; обчислено миттєву запиленість внутрішньої коми, яка становить у серпні  $1450 \pm 150 \text{ м}^3$  і  $6550 \pm 650 \text{ м}^3$  у жовтні 2018 р.; моделювання динаміки пилових частинок розміром 2 мкм показало, що швидкість утворення пилу для спокійного періоду  $Q \approx 4.6 \pm 2.3 \text{ кг/с}$ , тоді як під час спалахової активності  $Q \approx 17.6 \pm 2.8 \text{ кг/с}$  (О. Іванова, І. Лук'яник).

Удосконалено геометричну модель джетів з урахуванням кута вильоту пилинки з поверхні ядра, теплової інерції та кута розкриття джетів, за допомогою якої визначено положення активних областей на поверхнях ядер комет 29P і C/2013 X1. Розроблено асиметричний цифровий фільтр, за допомогою якого встановлено напрямок обертання ядра комети C/2014 B1 (В. Клецонок).

Проведено чисельне моделювання дифузії газу крізь пористі середовища у застосуванні до кометної поверхні, яка представлена шаром пористих ієрархічних агрегатів. Для побудови таких агрегатів використовували два підходи: а) "осідання" ієрархічних агрегатів; б) в ієрархічному агрегаті мономер замінювався на простий агрегат. Проведено порівняння газової дифузії крізь ієрархічні шари з дифузиею крізь монодисперсні та бідисперсні. Побудовано профілі яскравості вздовж хвоста активного астероїда 6478 (Gault). Виявлено короткоперіодичні варіації поверхневої яскравості, обумовлені спалаховою активністю астероїда (В. Решетник).

Уперше одержано зображення активного астероїда (248370) 2005 QN173 в поляризованому світлі. Просторові зміни поляризації вздовж хвоста були від приблизно 0.1 % до 1.5 % на фазовому куті  $\alpha \approx 23^\circ$  і від –0.9 % до –1.7 % на  $\alpha \approx 8^\circ$ . Середні величини поляризації та кольору є типовими для астероїдів C-типу. У спектрі астероїда не зареєстровано газові емісії (О. Іванова, І. Лук'яник).

Завершено аналіз фотометричних, поляриметричних і спектрополяриметричних спостережень АН3 (3200) Фаєтон (Phaethon). Визначено параметри фазової кривої поляризації Фаєтона ( $P_{\max} = 45 \% \pm 1 \%$  на  $\alpha_{\max} = 124.0^\circ \pm 0.4^\circ$ ), його геометричне альbedo ( $p_v = 0.061 \pm 0.002$ ) і розмір ( $6.8 \pm 0.3 \text{ км}$ ). Чисельне моделювання спостережних даних показало, що реголіт на поверхні Фаєтона представляє суміш форстеритових (90 %) і аморфного вуглецю (10 %) частинок (В. Розенбуш, О. Іванова, І. Лук'яник).

Уперше отримано точну форму ФЗП-поляризації для трьох супутників Юпітера і п'яти супутників Сатурна в UBVR-I-смугах і визначено їхні параметри. Комп'ютерне моделювання спостережних даних для Європи, яке ґрунтується на методі перенесення випромінювання і зворотного когерентного розсіяння (RT-CB), відтворює спостережену асиметричну ФЗП з різким і вузьким поляризаційним опозиційним ефектом. Крижаний покрив поверхні Європи утворюють частинки розміром 20 мкм із пористістю 66 % (В. Розенбуш).

Доповнення класичних рівнянь метеорної фізики (рівняння гальмування та нагрівання) гравітаційним членом, застосування уточнених числових методів їхнього розв'язання, а також сплайнове згладжування табличних параметрів стандартної атмосфери дало змогу уточнити розподіли формування аерозолів космічного походження від висоти та маси в діапазоні 80–120 км. Розраховано кінематичні параметри аномально повільного боліда, який спостерігався 2020 р. Показано, що різниця в географічній та геодезичній широтах на метеорних висотах 100–200 км може сягати 21 км і має бути врахована в обчисленнях (П. Козак).

Для 225 метеорних тіл визначено кінематичні параметри й елементи геліоцентричних орбіт. За розрахованими положеннями радіантів метеорних явищ встановлено їхню приналежність до метеорних потоків чи спорадичного фону. Проведено аналіз метеорного явища, зафіксованого 19 серпня 2019 р. під час активності метеорного потоку Персеїди. Установлено його висоту (116.1–80.1 км), швидкість (58.52 км/с), масу ( $M_{ph} \approx 0.08 \text{ г}$ ), розмір (близько 0.5 см). У спектрі метеора ототожнено емісії FeI, CaI, MgI, SiI, NaI, SiII (А. Мозгова).

Досліджено проблему походження люків Кірквуда в поясі астероїдів. Показано, що утворення люка в резонансі 2:1 з Юпітером ( $a = 3.28 \text{ а.о.}$ ) неможливо пояснити без впливу негравітаційних ефектів, наприклад, ефекту Ярковського. Для виходу з люка астероїдів розмірами  $>50 \text{ км}$ , які там були понад 2 млрд років тому, інтенсивність сонячної радіації мала б бути значно вищою порівняно з теперішньою (А. Казанцев).

**Фізика Сонця, сонячно-земні зв'язки.** За даними спостережень на ГСТ АО КНУ виявлено достовірну циркулярну поляризацію протилежного знаку в далеких крилах лінії  $H_\alpha$  (на віддалях  $1.5 \div 4 \text{ \AA}$  від її центра) у лімбовому сонячному спалаху 14 липня 2005 р. на висотах 5–30 Мм, яка, найімовірніше, вказує на надпотужні магнітні поля напруженістю приблизно 90 Гс у цьому спалаху. Спостережені особливості цієї поляризації узгоджуються з теоретичною картиною ефекту Пашена – Бака за таких дуже сильних полів, що свідчить на користь їхньої реальності. Такі екстремально сильні магнітні поля виявлено вперше на вказаних висотах (які стосуються нижньої сонячної корони). Отриманий результат важливий для розвитку теорії концентрованих магнітних полів у космічній плазмі (І. І. Яковкін, В. Г. Лозицький).

Установлено ще одна важлива роль диференційного обертання (крім створення умов для збудження сильного тороїдального магнітного поля), а саме, його здатність збуджувати глобальні гідродинамічні течії в СКЗ. Використавши просторовий профіль диференційного обертання, узятий із даних геліосейсмологічних експериментів, досліджено стійкість диференційного обертання в СКЗ. Виявлено область, де диференційне обертання згідно з критерієм Релея втрачає свою стійкість. Знайдена нестабільність диференційного обертання приводить до збудження тривимірної гідродинамічної глобальної міграційної течії, полоїдальна і тороїдальна складові якої відповідають меридіональній циркуляції і торсійним коливанням на Сонці (В. Н. Криводубський).

На основі даних про 24 попередні сонячні цикли розглянуто статистичний зв'язок між швидкістю наростання кількості сонячних плям на фазі кривої зростання й амплітудою циклу. Виявилось, що результат прогнозування амплітуди циклу залежить від того, яку ділянку кривої зростання взяти за основу для прогнозування, а також від того, брати до уваги всі 24 цикли, чи лише непарні. На результат прогнозування впливає також початкове припущення про монотонність чи немонотонність фази зростання. Дійшли висновку, що, найімовірніше, максимальна згладжена кіль-

кість сонячних плям у 25-му циклі має дорівнювати  $185 \pm 18$  одиниць у новій системі, що відповідає середньому за потужністю сонячному циклу, з виконанням правила Гнєвишева – Оля. За таких параметрів цього циклу немає ознак наближення глибокого мінімуму вікового циклу в середині XXI ст. (В. М. Єфіменко, В. Г. Лоцицький).

Виконано дистанційні дослідження аерозолів у атмосфері над Києвом за допомогою сонячного фотометра на київській спостережній станції міжнародної мережі AERONET. Протягом 2022 р. зареєстровано явища підвищеного вмісту аерозольних частинок у стовпі атмосфери над Києвом, під час яких аерозольна оптична товщина (440 нм) протягом окремих днів набувала значень від 0.5 до 1.0 і вище. Такі явища 23 і 24 березня, 25 квітня, 11 і 23 серпня проаналізовано детально, оскільки в ці дні була одержана достатня кількість спостережних даних. Шляхом аналізу переміщення атмосферних мас встановлено високу ймовірність зв'язку цих явищ із бойовими діями на території України, оскільки вони призводять до численних пожеж і викидів у атмосферу диму й пилу. Аналіз оптичних і мікрофізичних характеристик аерозольних частинок, усереднених у стовпі атмосфери над місцем спостережень, теж указує на присутність тут як частинок диму внаслідок пожеж, так і ґрунтового пилу. Однак аналіз зворотних траєкторій руху повітря вказує і на те, що частково пилові частинки у квітні цього року були принесені із Сахари, як це відбувається щорічно у цю пору року (В. О. Данилевський).

#### Список використаних джерел

1. Єфіменко В. М. Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка у 2021 р. // Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Астрономія. – 2021. – Вип. 2(64). – С. 37–39.

#### References

1. Efimenko V.M. Astronomical observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv in 2021 // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2021. – 2 (64). – P. 37–39.

Надійшла до редколегії 21.12.22

V. Efimenko, PhD  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

### ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV IN 2022

*In 2022, the Astronomical Observatory had 72 employees, including 51 full-time and 21 part-time workers, 40 scientists (11 doctors of science and 15 candidates of science), including 20 full-time and 20 part-time workers. During the year, 5 budget topics were implemented.*

*Main scientific results. The observational data of the Tycho Brahe supernova remnant (SN 1572), which were obtained by the Chandra space X-ray observatory, were analyzed. According to the observation data, a residual map was created for different photon energy ranges, in particular for the thermal continuum (4.1–6.0 keV) and the Si (1.6–2.1 keV) and S (2.3–2.6 keV) lines. The modernization of the observation base in the village has begun. Foresters: purchased a new Moravian C4-16000 CCD camera with a block of light filters and UVRI filters of the Johnson-Cousins photometric system for the AZT-8 telescope; an optical reducer, a block of narrow-band filters and design documentation for a block of wide-band filters for the AZT-14 telescope were developed and manufactured; on the basis of the purchased Celestron Advanced VX 11 telescope with GOTO system and CCD cameras of the Atik Infinity ATK0144 series, a mobile complex was created for observing the phenomena of star coverage by asteroids.*

*Based on the results of the research, 3 monographs, one study guide, 74 scientific articles, and 47 reports at scientific conferences were published.*

*Keywords: Department of Astrophysics, Sector of Astrometry and Small Bodies of the Solar System, National Property, International Scientific Conference.*

**ІВАНЧУК ВІКТОР ГНАТОВИЧ**

18 травня 2022 р. помер ветеран Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник Віктор Гнатович Іванчук. Народився Віктор Гнатович 16 травня 1930 р. у с. Клітище, Черняхівського району Житомирської області у сім'ї агрономів зі складною долею у роки трансформації та становлення колгоспного ладу. Після закінчення школи 1948 р. вступив до Київського державного університету імені Т. Г. Шевченка.

Закінчив із відзнакою фізичний факультет у 1954 р. і був рекомендований в аспірантуру на кафедру астрономії, яку закінчив 1958 р. під керівництвом професора С. К. Всехсвятського. Кандидатська дисертація В. Г. Іванчука була присвячена дослідженню проблеми нагрівання сонячної корони та впливу магнітних полів Сонця на її нагрів. Дослідження виконувалося в теоретичному руслі значною мірою під впливом неофіційних керівників Г. М. Нікольського та Є. О. Пономарьова, які працювали на той час на кафедрі астрономії. Спілкування із цими особистостями, у майбутньому видатними вченими, допомогло Віктору Гнатовичу визначити сферу своїх наукових інтересів і мало на нього великий вплив. Після захисту дисертації "Магнітне поле та структурні особливості корони Сонця" (1965) пра-

цював на різних наукових посадах кафедри астрономії фізичного факультету, а з 1988 р. до виходу на пенсію у 1999 р., Астрономічної обсерваторії університету.

За час роботи в університеті до сфери наукових інтересів В. Г. Іванчука входили: напрями фізики сонячної атмосфери й геліосфери, сонячна активність, структура і динаміка сонячної корони та її магнітних полів, зв'язок корони і хромосфери із сонячним вітром, перехідний шар хромосфера–корона, сонячні спікули, корональні транзєнти, міжпланетні ударні хвилі, геліосферний струмовий шар. Уперше показав, що полярні промені Сонця є джерелом корпускулярних потоків сонячного вітру. Відкрив надтонкі односекундні струминки у внутрішній короні – продовження хромосферних спікул. Довів, що існує "сонячний дощ" – низхідні потоки плазми у перехідному шарі хромосфера–корона. Брав участь у багатьох експедиціях Київського університету зі спостережень повних сонячних затемнень, полярних сьайв, комет. Віктор Гнатович читав спецкурси з фізики Сонця, сонячної активності, керував педагогічною практикою, курсовими та дипломними роботами студентів. Є автором 150 наукових робіт, зокрема: "Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве", 1965 (у співавторстві). Підготував рукопис історії кафедри астрономії фізичного факультету Київського університету і розділ зі спостережень сонячних затемнень, які надруковано в монографії "175 років Астрономічній обсерваторії Київського університету", 2020 (у співавторстві).

Віктор Гнатович Іванчук був членом Міжнародної Астрономічної Співки (1970), автором низки статей з астрономічної тематики у двох виданнях УРЕ та малій космічній енциклопедії.

Помер 18 травня 2022 р. у м. Києві, похований на Байковому цвинтарі, ділянка № 51.

**В. М. Єфіменко**

Наукове видання



**ВІСНИК**  
**КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**АСТРОНОМІЯ**

**Випуск 2(66)**

**Оригінал-макет виготовлено ВПЦ "Київський університет"**

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали. Рукописи та електронні носії не повертаються.



Формат 60x84<sup>1/16</sup>. Ум. друк. арк. 6,3. Наклад 300. Зам. № 222-10545.  
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № А2.  
Підписано до друку 29.12.22

Видавець і виготовлювач  
ВПЦ "Київський університет",  
б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна  
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; тел./факс (38044) 239 31 28  
e-mail: vpc@knu.ua; vpc\_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua  
http: vpc.knu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02